

# **Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart zur Erlangung  
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von  
Dipl.-Wirt.-Ing. Katharina Beumelburg  
aus Siegen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.  
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf

Tag der Einreichung: 20.10.2004

Tag der mündlichen Prüfung: 18.02.2005

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)

2005

# **IPA-IAO Forschung und Praxis**

Berichte aus dem  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und  
Automatisierung (IPA), Stuttgart,  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und  
Organisation (IAO), Stuttgart,  
Institut für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart  
und Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper  
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger

Katharina Beumelburg

Fähigkeitsorientierte  
Montageablaufplanung  
in der direkten  
Mensch-Roboter-Kooperation

Nr. 413

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Katharina Beumelburg  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper  
ord. Professor an der Universität Stuttgart  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger  
ord. Professor an der Universität Stuttgart  
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

D 93

ISBN 3-936947-52-X Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2005.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

## Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper    Hans-Jörg Bullinger

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt den Leitern des Institutes, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Rolf-Dieter Schraft, für die Unterstützung und Förderung, die zum erfolgreichen Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf danke ich für die Übernahme des Mitberichtes der Arbeit. Ebenso danke ich dem weiteren Prüfer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Klemm für die Arbeit im Prüfungsausschuss.

Bei Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer bedanke ich mich für die sehr gute Betreuung, die stete Motivation und die intensiven Durchsprachen im Laufe der Entstehung dieser Arbeit.

Aus dem großen Kreis der Kolleginnen und Kollegen des Institutes, die mich durch ihre Mitarbeit und konstruktive Kritik unterstützt haben, möchte ich in besonderem Maße Herrn MEng Achim Breckweg, Frau Dr.-Ing. Andrea Hiller-Brod, Herrn Dipl.-Ing. Jochen C. Spingler und Herrn Dr.-Ing. Johannes Wößner hervorheben und mich sehr herzlich für die vielen investierten Stunden bedanken. Die wertvollen Anregungen und Diskussionen haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt auch allen Studenten, Diplomanden und Praktikanten, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben. Insbesondere danke ich Herrn Horst Leonbacher, Herrn Benoit Taddei und Herrn Lars Aldinger für die engagierte Lösung von wichtigen Teilaufgaben.

Herzlich danke ich auch meinen Freunden für die Aufmunterungen und vor allem meinen Eltern, die mir stets mit viel Unterstützung, Förderung und Verständnis zur Seite standen. Deshalb ist dieses Buch Edeltrud und Jürgen Beumelburg gewidmet! Danke für alles, ohne Euch wäre es nicht dazu gekommen!

München, Februar 2005

Katharina Beumelburg





# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	9
Abkürzungen und Formelzeichen.....	13
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>19</b>
1.1 Problemstellung .....	19
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	20
<b>2 Ausgangssituation .....</b>	<b>22</b>
2.1 Begriffe und Definitionen .....	22
2.2 Stand der Technik.....	24
2.2.1 Kooperierende Mensch-Roboter Systeme .....	24
2.2.2 Montageplanung.....	26
2.2.2.1 Montageplanung hybrider Montagesysteme.....	26
2.2.2.2 Ablaufplanung in Montagesystemen.....	32
2.3 Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte .....	35
<b>3 Analyse der Grundlagen zur Planung von Montageabläufen hinsichtlich der Fähigkeitsorientierung und Ableitung der Anforderungen an ein Planungsverfahren für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle .....</b>	<b>37</b>
3.1 Analyse der Grundanforderungen .....	37
3.1.1 Analyse der Optimierungsaufgabe .....	37
3.1.2 Kriterien für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung .....	40
3.1.3 Temporale Kriterien für die Montageablaufplanung .....	45
3.2 Folgerungen aus den Analyseergebnissen .....	46
3.3 Anforderungen an das Planungsverfahren .....	47
3.3.1 Anforderungen an die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die Mensch-Roboter Kooperationszelle .....	47
3.3.2 Anforderungen an ein softwarebasiertes Planungstool .....	49
<b>4 Entwicklung eines Bewertungsmodells für die spezifischen Fähigkeiten von Mensch und Roboter.....</b>	<b>50</b>
4.1 Basismodell für die Fähigkeitsbeurteilung .....	50
4.2 Fähigkeitsbeurteilung.....	51
4.2.1 Deliberation der Entscheidung .....	52
4.2.2 Skalierung der Bewertung .....	54
4.2.3 Aggregation der Einzelbewertungen .....	55

4.2.4	Gewichtung der Kriterien für die Fähigkeitsorientierung.....	57
4.3	Berechnung des Eignungsgrades von Mensch und Roboter .....	58
<b>5</b>	<b>Konzeption eines Systemmodells und Verfahrens zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in Mensch-Roboter-Kooperationszellen .</b>	<b>63</b>
5.1	Systemmodell und Verfahren für Montageabläufe in der Mensch- Roboter-Kooperation .....	63
5.1.1	Beschreibung des Montagevorrangmodells mit Graphen .....	64
5.1.2	Vorgehensweise und Verfahren .....	68
5.1.2.1	Vorgehensweise zur Entwicklung der Montageabläufe .....	68
5.1.2.2	Vorgehensweise zur Entwicklung der Operationsreihenfolgen für Mensch und Roboter .....	69
5.1.2.3	Vorgehensweise zur Entwicklung der Matrix der Startzeiten.....	70
5.1.3	Montageablaufmodell .....	72
5.2	Mögliche Verfahren zur multikriteriellen Optimierung für die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation.....	73
5.3	Lösung des multiobjektiven flexiblen Job-Shop-Scheduling Problems mit Hilfe von genetischen Algorithmen für die Ablaufplanung .....	76
5.3.1	Grundkonzept.....	77
5.3.1.1	Modellannahmen .....	78
5.3.1.2	Mathematische Formulierung des FJSSP .....	79
5.3.2	Genetische Repräsentation der Montageabläufe .....	87
5.3.2.1	Kodierungsstruktur für die Ressourcenbelegung.....	88
5.3.2.2	Kodierungsstruktur für Operationsfolgen .....	90
5.3.3	Die Dekodierungsfunktion .....	91
5.3.4	Zielfunktion und Fitnessbewertung.....	93
5.3.5	Genetische Operatoren .....	95
5.3.5.1	Crossover.....	95
5.3.5.2	Mutation .....	98
5.3.6	Selektions Verfahren .....	99
5.3.7	Ersetzungsstrategien.....	100
<b>6</b>	<b>Spezifizierung und Entwurf eines Verfahrens zur Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle mit genetischen Algorithmen .....</b>	<b>102</b>
6.1	Erweiterung der Modellumgebung für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation.....	102

6.2	Spezifische Randbedingungen der Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	103
6.2.1	Auftragsanalyse.....	103
6.2.2	Ressourcenanalyse.....	105
6.2.3	Verarbeitung der Randbedingungen .....	106
6.3	Aspekte der Kooperation bezüglich Zielkriterien und Fitnessbewertung .....	107
6.4	Adaptierte Kodierung für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	112
6.5	Die genetischen Operatoren für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	115
6.5.1	Crossover-Operator für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	115
6.5.2	Mutations-Operator für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	117
6.5.3	Die Dekodierungsfunktion für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation .....	117
6.5.4	Selektion von Ablaufplänen in der Mensch-Roboter-Kooperation.....	120
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines softwarebasierten Werkzeugs zur Optimierung der Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation.....</b>	<b>122</b>
7.1	Aufbau des Entwicklungswerkzeugs .....	122
7.2	Daten- und Parametersätze.....	124
7.2.1	Gewichtungsfaktoren.....	124
7.2.2	Parameter des Entwicklungsverfahrens .....	124
7.3	Arbeitsweise mit dem Entwicklungswerkzeug .....	126
<b>8</b>	<b>Umsetzung der Ergebnisse und pilothafte Anwendung.....</b>	<b>127</b>
8.1	Programmsystem.....	127
8.1.1	Rechnerimplementierung .....	127
8.1.2	Aufbau und Verfahrensweise des Programmsystems.....	127
8.2	Pilothafte Anwendung des Werkzeugs .....	129
8.2.1	Beschreibung der Beispielmontage.....	129
8.2.2	Ermittlung der Eignungsgrade .....	131
8.2.3	Parameter-Einstellbereiche und Operatoren-Anwendungsschwerpunkte.....	132
8.2.4	Einfluss und Beurteilung der Fähigkeitsorientierung und der Kooperation bei der Entwicklung der Montageabläufe .....	136

8.2.5	Entwicklung eines Montageablaufplans für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle bezüglich $\{\mathbf{C}_{\max}, \mathbf{E}_{\max}, \bar{\mathbf{F}}\}$ .....	141
8.3	Beurteilung der Ergebnisse .....	143
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Summary .....</b>	<b>147</b>
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>152</b>

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Großbuchstaben

<b>A(G)</b>	Adjazenzmatrix eines Graphen $G$
$A_{hg}$	Ausprägungen $h$ der Kriterien $g$
$B$	Kantenmenge
$C$	Menge der konjunktiven Kanten des Graphen $G$
$\bar{C}$	Mittlere Fertigungszeit
$C_i$	Fertigstellungszeit (completion time) eines Auftrags $i$
$C_{\max}$	mit $C_i = F_i + r_i$ : Zykluszeit oder maximale Fertigstellungszeit (makespan)
$D$	Menge der disjunktiven Kanten des Graphen $G$
$D_{ij}^{(s,c)}$	Definitionsbereich der Start- und Fertigstellungszeiten
<b>E</b>	Matrix der Eignungsgrade
$E$	Gesamteignungsgrad
$E_{\max}$	maximaler Gesamteignungsgrad eines Montageablaufs
$F$	Pareto-Front
$\bar{F}$	Mittlere Durchlaufzeit, Flussdauer
$F_i$	Durchlaufzeit eines Auftrags $i$
<b>FJSSP</b>	Flexibles Job-Shop Scheduling Problem
$F_Z, F_K, F_Q$	Fähigkeitskennzahlen für Unternehmensziele Zeit ( $F_Z$ ), Kosten ( $F_K$ ) und Qualität ( $F_Q$ )
$F_{ges}$	Fähigkeitsindex
$F_{ges\_Mj,k}$	Fähigkeitsindices für den Mensch für einzelne Kriterien $j$
$F_{ges\_Rj,k}$	Fähigkeitsindices für den Roboter für einzelne Kriterien $j$
<b>G</b>	Graph zur Darstellung der Präzedenzbeziehungen
$G_s$	azyklischer Digraph

$G^*$	G plus disjunktive Kanten
GA	Genetischer Algorithmus
$GN$	Anzahl Generationen
$G_n$	Generation $n$
$G_{n+1}$	Folgegeneration
$H$	Planungshorizont
$I$	Leerzeit (idle time)
$\bar{I}$	Mittlere Leerzeit
$J_i$	Auftrag $i$
JSSP	Job-Shop Scheduling Problem
$K_h$	Kriterien
$LB$	Untere Schranke einer Zielfunktion
$M$	Menge der alternativen Ressourcen von $O_{ij}$
$M_a$	Montageaufgabe $a$
$M_i$	$i$ -te Ressource (im vorliegenden Fall Mensch oder Roboter)
$M_{ij}$	Menge der alternativen Ressourcen einer Operation $O_{ij}$ eines Auftrags $J_i$
$M_M$	Montageauftrag für den Mensch
$M_R$	Montageauftrag für den Roboter
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
MOP	Multikriterielles Optimierungsproblem
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
MTM	Methods Time Measurement
$N$	Populationsgröße
$\bar{N}$	Mittlere Ressourcenauslastung
$N(i)$	Nachfolgemenge von Montageschritt $i$
NPGA	Niched-Pareto Genetic Algorithm

NSGAI	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
$O_i$	Montageoperation
$O_{ij}$	$j$ -te Montageoperation (Montageschritt) des $i$ -ten Auftrags
$O(k)$	Menge der Operationen, die Ressource $k$ zugeteilt sind
$P_i$	Summe aller Prozesszeiten
$P_{ij}^k$	Effizienzfaktor der $k$ -ten Ressource
$P_t$	aktuelle Population
$Q_t$	Nachkommenpopulation
$\bar{R}$	durchschnittliche Ressourcenauslastung
$R_i$	Rang des Individuums $I$
$R_p$	Kapazitätsauslastung
$\bar{R}_p$	Mittlere Kapazitätsauslastung
<b>S</b>	Matrix der Startzeiten
<b>S<sub>0</sub></b>	Eingangs-Matrix der Startzeiten
<b>S<sub>OF</sub></b>	operationsfolgenspezifische Matrix der Startzeiten
SA	Simulated Annealing
SOP	Einkriterielles Optimierungsproblem
SPEA2	Strength-Pareto Evolutionary Algorithm
<b>T</b>	Matrix der Prozesszeiten
$TM_A$	Technologiemerkmale Arbeitsqualität
$TM_P$	Technologiemerkmale Prozesssicherheit
$TM_T$	Technologiemerkmale Taktzeit
$TM_Z$	Technologiemerkmale Zusatzinvest
TS	Tabu-Search
UB	Obere Schranke einer Zielfunktion
V	Menge der Knoten des Graphen $G$

VEGA	Vector-Evaluated Genetic Algorithm
$\bar{W}$	Mittlere Wartezeit
$W_i$	Wartezeit eines Auftrags $i$
$X^\mu$	Lösungsraum der Zuordnung von Aufträgen zu Ressourcen
$X^\pi$	Anzahl der Möglichkeiten der Anordnung der Operationen auf den Ressourcen

### Kleinbuchstaben

$c_{ij}$	Fertigstellungszeit von $O_{ij}$
$c_{ij}^k$	Fertigstellungszeit von $O_{ij}$ auf Ressource $k$
$cd_i$	crowding distance des Individuums $i$
$d$	Kante einer Graphen
$d_i$	Fertigstellungstermin (due date) des Auftrags $i$
$e_{FügKom}$	Fügekomplexität
$e_{HHKom}$	Handhabungskomplexität
$e_{ij}^k$	Eignungsgrad von Ressource $k$ zur Bearbeitung von $O_{ij}$
$e_{ij}^M$	Eignungsgrad des Menschen zur Bearbeitung von $O_{ij}$
$e_{ij}^R$	Eignungsgrad des Roboters zur Bearbeitung von $O_{ij}$
$f_{avg}$	durchschnittliche Fitness einer Generation
$f_i$	Fitnesswert
$\bar{f}$	mittlere Fitness einer Population
$l_{CH}$	Länge eines Chromosoms
$k_{min}$	diejenige alternative Ressource einer Operation mit der jeweils kürzesten Prozessdauer
$m_{actual}$	aktuell zugehörige Ressource einer Operation



$m_{ij}$	Anzahl der alternativen Ressourcen der $j$ -ten Operation des $i$ -ten Auftrags
$m_{new}$	neue zugehörige Ressource einer Operation
$n_i$	Anzahl der Operationen des $i$ -ten Auftrags
$n_k$	Anzahl der Operationen für Ressource $k$
$p_c$	Crossoverwahrscheinlichkeit
$p_1, p_2$	Crossover Punkte
$p_{ij}$	Prozessdauer von $O_{ij}$
$p_{ij}^k$	Prozessdauer von $O_{ij}$ auf Ressource $k$
$p_{ij}^M$	Prozessdauer von $O_{ij}$ bei Bearbeitung durch den Menschen
$p_{ij}^R$	Prozessdauer von $O_{ij}$ bei Bearbeitung durch den Roboter
$p_m$	Mutationswahrscheinlichkeit auf dem Reihenfolgechromosom
$p_M$	Mutationswahrscheinlichkeit auf dem Ressourcenbelegungschromosom
$r$	gleichverteilte Zufallsvariable
$r_i$	Freigabezeit (release times) des Auftrags $i$
$r_k$	Freigabezeit (release times) von Ressource $k$
$s_{ij}$	Startzeit von $O_{ij}$
$s_{ik}$	Startzeit der Nachfolgeoperation von $O_{ij}$
$s_{ij}^k$	Startzeit von $O_{ij}$ auf Ressource $k$
$s_{ij}^*$	frühestmöglicher Startzeitpunkt der Operation $O_{ij}$
$s_{ij}^{**}$	zugewiesene Startzeit der Operation $O_{ij}$
$s_{in_i}$	Startzeit der letzten Operation des $i$ -ten Auftrags
$t$	Einplanungszeitpunkt

### Häufig verwendete Indizes

$g$	Ausprägungsindex
$h$	Kriteriumsindex
$i$	Auftragsindex
$j$	Operationsindex
$k$	Ressourcenindex
$t$	Generationsindex

### Griechische Buchstaben

$\alpha_h$	Gewichtungsfaktor bei der Berechnung der Eignungsgrade
$\alpha_{lk}$	Verhältnis der Effizienzen der Ressourcen $k$ und $l$
$\alpha_{ges}$	Summe der Gewichte der zutreffenden Ausprägungen
$\beta$	Skalierungsfaktor
$\delta$	Parameter für die Entwicklung der Startzeiten
$\pi$	Indizierung der Permutationen
$\mu$	Index der Abbildung von Operationen auf Ressourcen
$\tau_{ij}^{(k)}$	Ressourcenfolgematrix
$\pi$	Indizierung der Permutationen
$\pi_{ij}^{(k)}$	Permutationsmatrix
$\omega_1, \omega_2$	Gewichte

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Produzierende Unternehmen in Deutschland werden heute durch die Globalisierung der Märkte mit vielen neuen Herausforderungen konfrontiert. Die Produktion von Waren in Billiglohnländern zwingt sie, die Herstellkosten in Deutschland zu senken. Besonders im Montagebereich weist die Produktion von Industriegütern durch den hohen Anteil an manueller Arbeit auch heute noch große Rationalisierungspotenziale auf. Die Situation der Unternehmen in diesem Bereich wird im Wesentlichen durch die hohen Anforderungen an die Qualität, den anhaltenden Lohnkostendruck, die durch kürzere Produktlebenszyklen geforderten kürzeren Entwicklungszeiten und die steigende Typen- und Variantenvielfalt bei den Produkten sowie die dadurch bedingten hohen Flexibilitätsanforderungen der Montage geprägt [Wes-01].

Nachdem der Trend in Richtung Hochautomatisierung in den letzten Jahren stark nachgelassen hat [Lay-01], erfordert diese Situation die Entwicklung neuer Montagekonzepte, die zu einer „angepassten Automatisierung“ führen [Lot-02]. Ein solches, neues Konzept, das speziell auf die Bedürfnisse der Kleingeräte-Industrie abgestimmt ist, stellt die direkte Mensch-Roboter-Kooperation dar [Spi-01]. Sie ermöglicht eine flexible Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter, durch die beide entsprechend ihrer spezifischen Fähigkeiten optimal „zusammenarbeitend“ eingesetzt werden können. Durch einen flexiblen Werkereinsatz kann auf jede Veränderung der notwendigen Kapazitäten reagiert werden. Mit dem System der direkten Mensch-Roboter-Kooperation kann somit optimal mit den vorhandenen Randbedingungen der Montage umgegangen werden.

Allerdings ist ein solches System nur Herstellkosten senkend einzusetzen, wenn ein an die Fähigkeiten und Prozesszeiten angepasster Montageablauf mit einer entsprechenden Arbeitsteilung stattfindet. Um dies zu gewährleisten, ist eine fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung notwendig [Beu-02]. Da zu diesem Zweck eine genaue Bewertung der einzelnen Montageschritte hinsichtlich ihrer technischen und ergonomischen Machbarkeit sowie eine Optimierung sowohl hinsichtlich dieser Machbarkeiten als auch hinsichtlich der Prozesszeiten und Ressourcenbelegung vorgenommen werden muss, ist dies von den Planern ohne Einsatz unterstützender Verfahren nicht zu bewältigen. Derzeit sind zur Montageplanung zwar verschiedene softwarebasierte Hilfsmittel im Einsatz, keines von ihnen berücksichtigt jedoch den fähigkeitsorientierten Ansatz oder die kooperierende Zusammenarbeit von Menschen und Robotern.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur fähigkeitsorientierten und optimierten Montageablaufplanung in einer Mensch-Roboter-Kooperationszelle. Dabei wird vom Ein-Produkt-Fall ausgegangen und es wird eine Kooperationszelle besetzt mit einem Roboter und einem Werker betrachtet.

Zur Entwicklung des Verfahrens werden grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse auf den Gebieten der Bewertung von Fähigkeiten und der flexiblen Ablaufplanung unter Berücksichtigung der Kooperation zwischen Mensch und Roboter erarbeitet. Auf der Basis dieser Grundlagen wird ein Verfahren zur temporal optimierten Montageablaufplanung entwickelt, das insbesondere auch die fähigkeitsorientierte Verteilung der Einzeltätigkeiten auf Mensch und Roboter berücksichtigt. Unter Zuhilfenahme eines softwarebasierten Werkzeugs soll die Einsetzbarkeit des Verfahrens nachgewiesen und Erkenntnisse für die Umsetzung der Resultate in der Industrie bereitgestellt werden.

Ausgehend von einer Analyse des Istzustandes bei der Planung von Montageabläufen sowie einer Analyse der Anforderungen an die Montageablaufplanung, die sich aus dem neuen Konzept der Mensch-Roboter-Kooperations-Arbeitsplätze ergeben, werden die Anforderungen an ein Verfahren sowie an ein softwarebasiertes Werkzeug zur fähigkeitsorientierten Montageablaufplanung von Mensch-Roboter-Kooperationsarbeitsplätzen ermittelt. Schwerpunkt der Analyse ist die Betrachtung der heute bekannten Ansätze zur Montageplanung, die Analyse der Einflussfaktoren, die für eine fähigkeitsorientierte Montageplanung relevant sind, sowie die Analyse der Optimierungsaufgaben im Rahmen der Planung von Mensch-Roboter-Kooperationszellen. Aus den Analyseergebnissen werden die Anforderungen an das Verfahren, die Zielkriterien für die Optimierung im Rahmen der Planungstätigkeiten sowie die Anforderungen an ein softwarebasiertes Planungswerkzeug abgeleitet.

Nach den so ermittelten Anforderungen wird ein Bewertungsmodell für die fähigkeitsorientierte Arbeitsteilung entworfen, mit dessen Hilfe Eignungsgrade für Mensch und Roboter für einzelne Tätigkeiten ermittelt werden. Diese Eignungsgrade zeigen, wie gut sich Mensch und Roboter auf Basis von technischen und ergonomischen Gesichtspunkten für die Ausführung einer Montagetätigkeit eignen. Dabei wird das Bewertungsmodell so entwickelt, dass eine objektive und umfassende Bewertung der Fähigkeiten erreicht wird.

Auf dieser Basis wird anschließend ein Verfahren zur Arbeitsteilung und Ablaufplanung unter Zuhilfenahme eines Optimierungsverfahrens konzipiert. Das Verfahren erzeugt einen Montageablauf, der die einzelnen Montageoperationen auf Mensch und Roboter verteilt und eine Reihenfolge der Operationen für Mensch und Roboter festlegt.

Für das konzipierte Verfahren wird nachfolgend eine Lösungsrepräsentation erarbeitet und die Teilsysteme des Optimierungsverfahrens werden entwickelt.

Zur Umsetzung des Verfahrens wird ein softwarebasiertes Planungstool entworfen. Die einzelnen Fragmente des Planungsverfahrens werden in einem Programmsystem umgesetzt und an der Montage eines Beispielproduktes erprobt. Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse soll Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, die Parametrisierung des Verfahrens und den implementierten Algorithmus zulassen.

## 2 Ausgangssituation

### 2.1 Begriffe und Definitionen

Unter Montage wird nach DIN 8593 und VDI 2860 das Handhaben und Fügen von Teilen verstanden. Es wird zwischen hochautomatisierten, manuellen und hybriden Montagesystemen unterschieden. Dabei stellen Hybridsysteme teilautomatische Montagesysteme dar, in denen Kombinationen aus manueller und automatischer Montage in flexibler Weise zusammenwirken [Sra-02].

Eine spezielle Form der hybriden Montage ist die direkte Mensch-Roboter-Kooperation. Nach [Spi-01] beschreibt die direkte Mensch-Roboter-Kooperation ein Konzept, bei dem die strikte Trennung von Roboter- und Werkerarbeitsplatz aufgehoben wurde und somit manuelle und automatische Kapazitäten in einem Arbeitsplatz gebündelt werden. Für die Realisierung der direkten Mensch-Roboter-Kooperation wurde eine Kooperationszelle entwickelt [Spi-01]. Die Kooperationszelle ist eine autonome Einheit zur Montage von Baugruppen und kompletten Produkten. Durch die Integration von sowohl manuellen als auch automatischen Fähigkeiten können beliebig große Arbeitsinhalte in einer Zelle verwirklicht werden und diese wiederum auf beliebig viele Arbeitsplätze aufgeteilt werden.

Ein multikriterielles Optimierungsproblem ist die Aufgabe, einen oder mehrere Vektoren von Entscheidungsvariablen (Lösungsvektoren) zu finden, die sämtliche Randbedingungen erfüllen und den dazugehörigen Zielfunktionsvektor, der die Entscheidungsvariablen auf die Zielkriterien abbildet, in gewissem Sinne zu optimieren.

Unter dem Scheduling von Produktionsprozessen wird eine Tätigkeit verstanden, bei der ausgehend von einer Menge von Aufträgen ein zeitlicher Ablaufplan (*schedule*) aufgestellt wird, der festhält, wann, in welcher Reihenfolge bzw. auf welchen Ressourcen die Aufträge bearbeitet und fertig gestellt werden sollen. Vereinfacht ausgedrückt sind bei einem Scheduling Problem  $n$  Aufträge (*jobs*) auf  $m$  Ressourcen (*machines*) durchzuführen. Dabei ist ein Auftrag die Vorgabe zur Herstellung eines Produktes oder einer Teilmenge dessen. Ein Auftrag kann als Einheit angesehen werden. Aufträgen können Freigabezeiten (*release-times*) oder Fertigstellungstermine (*due dates*) zugeordnet werden. Maschinen und Menschen sind die bei der Produktion verwendeten Ressourcen, die die einzelnen Arbeitsgänge der Aufträge bearbeiten. Ein Auftrag besteht aus einer strikt geordneten Menge von Operationen. Eine Operation (Arbeitsgang, Teilverrichtung) ist ein sinnvoll nicht weiter unterteilbarer Montagevorgang, was bedeutet, dass eine darüber hinausgehende Unterteilung zu einem höheren Zeitaufwand für die Ausführung der Tätigkeit führt [Zei-94]. Operationen wird eine Bearbei-

tungszeit zugeordnet, die die Dauer der Bearbeitung eines Auftrags auf einer Ressource beschreibt.

Eine Ressourcenfolge für einen Auftrag ist die technologische Vorschrift zur vollständigen Bearbeitung eines Auftrags. Diese Vorschrift gibt an, in welcher Reihenfolge ein Auftrag bis zu seiner Fertigstellung die Ressourcen zu durchlaufen hat und welche Operationen von welchen Ressourcen zu bearbeiten sind. Die Auftragsfolge für eine Ressource ist die Reihenfolge, in der die Ressource die ihr zugeteilten Aufträge verarbeitet. Die Auftragsfolgen auf allen Ressourcen können als symbolischer Produktionsplan betrachtet werden, in dem zeitliche Beziehungen noch keine Rolle spielen. Die zeitliche Zuordnung von Operationen auf Ressourcen heißt zulässiger Ablaufplan, falls dabei alle Restriktionen, denen sie unterworfen sind, erhalten bleiben. Ein Plan heißt Permutationsplan, wenn alle Auftragsfolgen auf sämtlichen Ressourcen gleich sind.

Ein Ablaufplan heißt semi-aktiv, wenn keine Operation existiert, die früher gestartet werden kann, ohne die Bearbeitungssequenz auf einer Ressource zu verändern oder technologische Restriktionen zu verletzen. Mit anderen Worten wird beim semi-aktiven Scheduling bei fester Sequenz eine Operation frühestmöglich gestartet. Ein Ablauf, in dem keine Operation früher gestartet werden kann ohne eine andere zu verzögern oder dadurch technologische Vorrangsbedingungen zu verletzen, heißt aktiver Plan. Ein Ablauf, bei dem, sobald eine Maschine frei ist, eine Operation, die zu diesem Zeitpunkt auf ihr durchgeführt werden kann, eingeplant wird, heißt unverzögerter Ablauf (non-delay schedule).

Ein deterministisches Job-Shop Scheduling Problem (JSSP) der Größe  $n \times m$  besteht aus  $n$  Aufträgen und  $m$  Ressourcen. Jeder Auftrag besteht aus  $n_j$  Operationen. Die Operationen eines Auftrags sind in eine partielle lineare Ordnungsstruktur [Bak74] gegliedert. Die Bearbeitungsreihenfolgen der Aufträge unterliegen determinierten technologischen Randbedingungen, d.h. die  $j$ -te Operation des  $i$ -ten Auftrags,  $O_{ij}$ , wird auf genau einer Ressource  $m$  mit der Prozessdauer  $p_{ij}$  bearbeitet.

Bei einem flexiblen Job-Shop Scheduling Problem (FJSSP) ist, anders als beim klassischen Fall, die Ressourcenfolge der einzelnen Aufträge nicht a priori festgelegt, sondern stellt einen zusätzlichen und den Charakter des Optimierungsproblems entscheidend verändernden Freiheitsgrad dar.

Weiterführendes Material zum Thema Scheduling bieten [Dom-97], [Fre-82] und [Bak74].

Der in dieser Arbeit verwendete Planungsalgorithmus beruht auf dem System der genetischen Algorithmen. Die genetischen Algorithmen sind eine besondere Form der evolutionären Algorithmen. Die biologische Genetik und insbesondere die Evolutionstheorie diente als

Vorbild für ihre Entwicklung. Heute werden die genetischen Algorithmen hauptsächlich für komplexe Planungs- und Optimierungsaufgaben aus verschiedenen technischen Anwendungsgebieten genutzt.

Beim Einsatz eines genetischen Algorithmus werden Individuen als Repräsentanten von Lösungsalternativen für die Optimierungsaufgabe eingesetzt. Die Menge der Individuen innerhalb eines Iterationsschritts (Generation) wird als Population bezeichnet. Für jedes Individuum einer Generation wird zur Bewertung seiner Qualität bezüglich der Zielfunktion eine Fitness ermittelt. Diese Fitness ist ausschlaggebend für die Weitervererbung seiner Eigenschaften in die Nachkommengeneration. Um, ausgehend von einer Elterngeneration, eine Nachkommengeneration zu erzeugen, werden die Operatoren Selektion, Crossover und Mutation eingesetzt. Mit Hilfe der Operatoren werden so lange Nachfolgegenerationen gebildet, bis ein Abbruchkriterium für die Güte der Generation oder die zeitliche Beschränkung des Verfahrens die Lösungssuche beendet.

Umfangreiches Material zu genetischen Algorithmen steht mit [Nis-97], [Bäc-96], [Bru-96], [Gol-89] zur Verfügung.

## **2.2 Stand der Technik**

### **2.2.1 Kooperierende Mensch-Roboter Systeme**

Dem Stand der Technik entspricht eine strikte Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Roboter. Diese Arbeitsräume sind mit Hilfe von sogenannten trennenden Schutzeinrichtungen separiert.

Im Zuge des OTS-Trends (Ohne trennende Schutzeinrichtungen) wurde am Fraunhofer IPA die direkte Mensch-Roboter-Kooperation entwickelt. Sie wurde im Rahmen der Versuchsanlage [team@work](#) (Bild 2.2) realisiert [Thi-02].

Das Ziel für die Entwicklung von [team@work](#) ist die Schaffung eines gemeinsamen (Kooperations-) Arbeitsplatzes für Mensch und Roboter, in dem die anfallenden Aufgaben flexibel und entsprechend den spezifischen Fähigkeiten von Mensch und Roboter verteilt werden können.



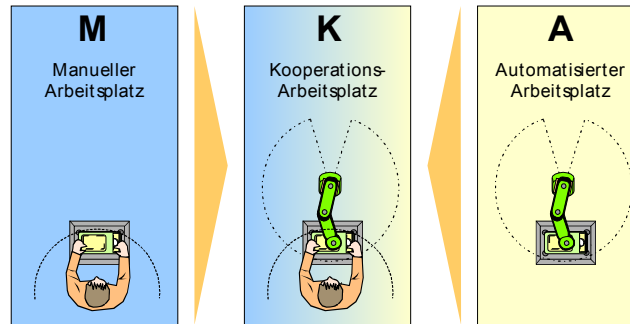


Bild 2.1: Kooperations-Arbeitsplatz [Thi-02]

Der Kooperations-Arbeitsplatz ist so konzipiert, dass Mensch und Roboter sich gegenüber stehen und sich das Montageobjekt, für den Zeitraum der gemeinsamen Bearbeitung, stationär in der Mitte befindet (Bild 2.1) [Spi-01]. Dadurch haben beide Interaktionspartner uneingeschränkten Zugriff auf das Montageobjekt und können sich trotzdem frei bewegen.

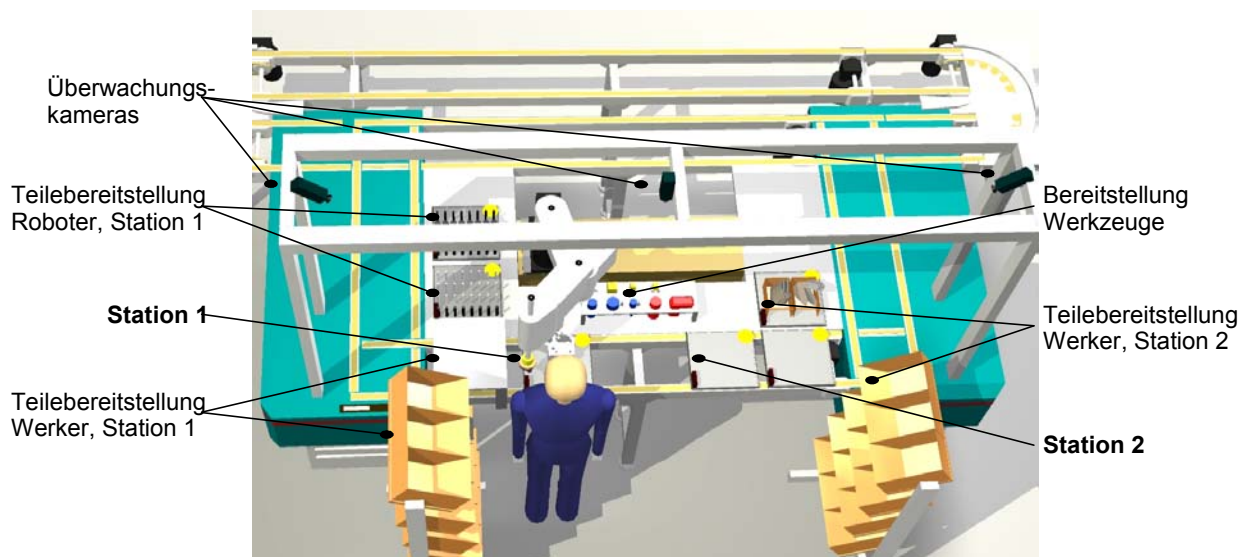


Bild 2.2: Versuchsanlage [team@work](#) [Thi-02]

Die direkte Mensch-Roboter-Kooperation ermöglicht die flexible Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter, die somit ihre spezifischen Fähigkeiten optimal einsetzen können. Da der Roboter nur die Tätigkeiten durchführt, die leicht automatisierbar sind, führt dies zu vereinfachten Prozesswerkzeugen, einfacher Roboterprogrammierung und Materialbereitstellung [Thi-03].

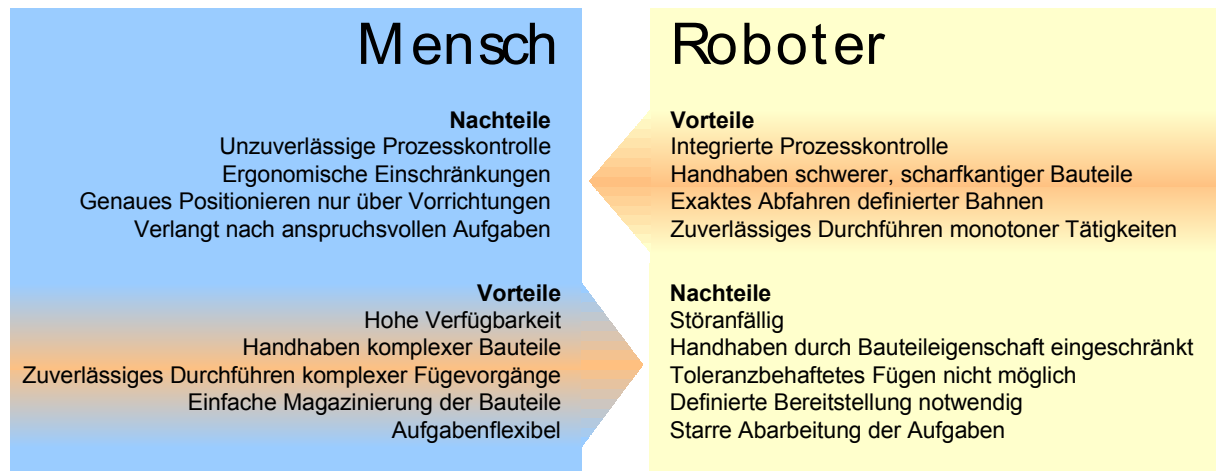


Bild 2.3: Vergleich Mensch-Roboter [nach Thi02]

## 2.2.2 Montageplanung

Insbesondere an den Hochschulinstituten wurden rechnergestützte Planungshilfsmittel geschaffen, die teilweise auf sehr unterschiedliche Bereiche der Montageplanung spezialisiert sind. Da es sich bei dem in dieser Arbeit betrachteten System um ein hybrides Montagesystem handelt, wird im Folgenden insbesondere die Planung solcher Systeme betrachtet. Die Ablaufplanung in hybriden Montagesystemen ist ein für diese Arbeit sehr wichtiger Bestandteil der Montageplanung und wird aus diesem Grund separat und detailliert diskutiert. Weitere Planungssysteme werden in Bild 2.8 dargestellt.

### 2.2.2.1 Montageplanung hybrider Montagesysteme

Bei der Montageplanung hybrider Montagesysteme stellt sich die zentrale Frage, welche Teilverrichtungen automatisiert werden und welche Montagetätigkeiten manuell ausgeführt werden.

Metzger [Met-77] entwickelt ein Vorgehen für die Untersuchung der Mechanisierungs- und Automatisierungsmöglichkeiten und bezeichnet dieses als Vorranggraphenanalyse. Zur Untersuchung der Teilverrichtungen bezüglich Automatisierung schlägt Metzger die Bildung einer Arbeitsgruppe vor. Diese Gruppe setzt sich aus Rationalisierungsingenieuren, Ferti-

gungsplanern, Betriebsmittel- und Erzeugniskonstrukteuren, dem Montageleiter und Montagemleistern zusammen. Die Gruppenmitglieder müssen basierend auf ihrer Erfahrung und anhand von Musterteilen, Zeichnungen, dem geplanten Produktionsprogramm sowie dem Vorranggraphen qualitativ abschätzen, ob die einzelnen Montagetätigkeiten mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand automatisierbar, bedingt automatisierbar oder nicht automatisierbar sind.

Schöninger und Spingler [Sön-89] beschreiben eine Methode zur Planung automatisierter Montageanlagen. Für die automatische Ausführung der Funktionen Bereitstellen, Zuführen und Fügen müssen die erforderlichen Wirkorgane ausgewählt werden. Im Rahmen dieser Entscheidung erfolgt die Festlegung, welche Arbeitsschritte bei der Montage automatisch durchgeführt werden können und welche manuell erfolgen müssen. Nach welchen Gesichtspunkten die Entscheidung stattfindet, wird nicht erörtert.

Bei der Konzeption des Planungstools **Primos** [Pri-89] wird im Abschnitt Anlagenstrukturplanung die Definition der Stationen und die Angabe des Stationstyps (manuell oder automatisch) angesprochen (Bild 2.4). Die Auswahlkriterien und die Entscheidungsfindung für die Festlegung des Automatisierungsgrades werden auch in diesem Fall nicht aufgezeigt.

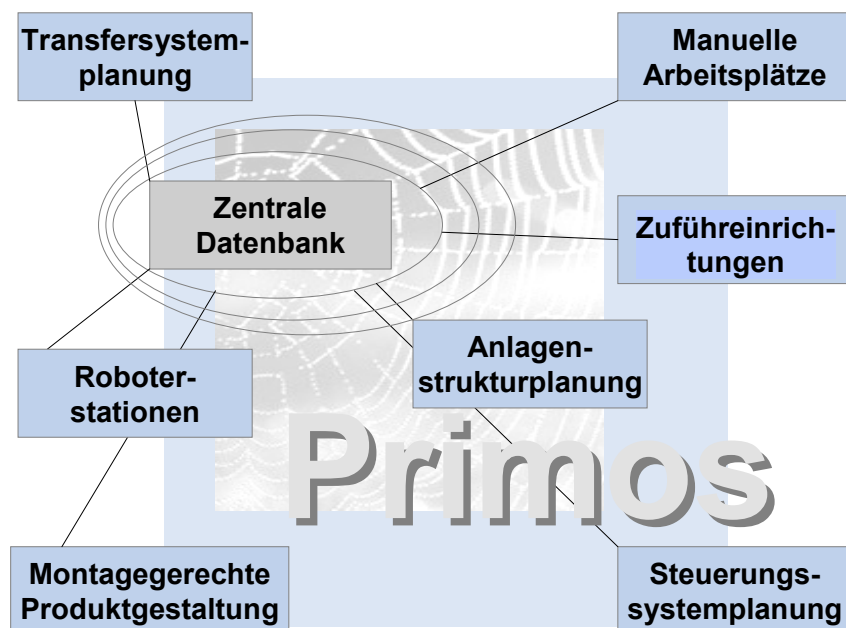


Bild 2.4: Planungstool PRIMOS [Pri-89]

Der von Rabe, Veza und Wang [Rab-92] entwickelte Softwareentwurf zur rechnergestützten Montageablaufplanung mit Integration in das Planungssystem **MOSYS** besteht aus zehn Modulen. Mit Prozessmodul 5 kann die Automatisierbarkeit von Montageverrichtungen interaktiv bewertet werden. Die Bewertung erfolgt durch Analyse der prozess- und produktbezogenen Merkmale der Verrichtungen anhand bestimmter Kriterien und soll als technische

Grundlage für die Entscheidung über eine Automatisierung der Montage dienen. Das Modul wurde softwaremäßig nicht umgesetzt. Nach Angabe des Autors Rabe wurde das gesamte Planungssystem Mosys 1998 eingestellt.

Kettner [Ket-87] und Merz [Mer-87] definieren zunächst zwei Kennzahlen, die Flexibilitätskennzahl und die Komplexitätskennzahl. Mit diesen beiden Kennzahlen sollen im frühen Planungsstadium der Strukturplanung lösungsunabhängige quantifizierbare Aussagen über den Aufwand zur Automatisierung ermöglicht werden. Die Flexibilitätskennzahl berücksichtigt die Anzahl der Produktvarianten, die Unterscheidungsmerkmale zwischen den Variantenteilen und den Flexibilitätsbedarf je Variantenteil. Die Komplexität der Montageaufgabe steigt mit zunehmender Teilezahl. In ein Koordinatensystem werden zwei Kurven, die Flexibilitäts- und die Komplexitätskurve, eingetragen. Die erste von Merz entwickelte Vorgehensweise ist nur theoretisch durchführbar. Beide Kurven werden nivelliert, damit die Anforderungen an Komplexität und Flexibilität in einer Baugruppe beim Zusammenfassen der Teilverrichtungen gleich verteilt sind. Wenn alle Baugruppen die gleichen Kennzahlen besitzen, kann durch die Überprüfung der Kennzahlen einer Baugruppe die wirtschaftliche Automatisierung des gesamten Erzeugnisses überprüft werden. Dieser Fall tritt in der Praxis kaum auf. Die zweite Vorgehensweise fasst Teilverrichtungen mit hohen und niedrigen Kennwerten zusammen, separiert diese unterschiedlichen Gruppen und teilt sie entsprechend der manuellen oder automatisierten Montage zu.

Das Thema der Arbeit von Walther [Wal-85] ist die Montage großvolumiger Produkte mit Industrierobotern. Spezifischen Gegebenheiten dieser Montageart erschweren bzw. verhindern eine Automatisierbarkeit. Walther fasst diese Kriterien zu folgenden Automatisierungshemmnissen zusammen:

- Fügen grob tolerierter Bauteile
- Schlechte Zugänglichkeit des Fügeorts
- Gleichzeitiges Fügen mehrere Teile an einem Fügeort
- Fügen biegeschlaffer Teile
- Anpass- und Justierarbeiten
- Abstützen hoher Fügekräfte und –momente

Das Programmsystem **Adam** (Auswahl der optimalen Automatisierungsart einer Montagestation für großvolumige Produkte) ermittelt die bezüglich Automatisierungs- und Flexibilitätsgrad optimale Automatisierungsart einer Montagestation. Für die definierten Automatisierungsarten werden die Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitskennwerte ausgegeben. Die

entscheidenden Einflussfaktoren der Investitionskosten sind die definierten Kennwerte Handhabungskomplexität  $e_{HHKom}$  und Fügekomplexität  $e_{FügKom}$ . Diese beiden Kennwerte werden jeweils mit einem Erfassungsbogen ermittelt (Bild 2.5). Anhand dieser Einflussfaktoren werden die Investitionskosten der einzelnen Automatisierungsformen abgeschätzt sowie die Rentabilität und die Amortisationszeit berechnet.

Formblatt: Ermittlung des Fügekomplexitätsfaktors $e_{FügKom}$			
Montageaufgabe	B	S	Legende
<b>Feinpositionieren</b> Anzahl möglicher Fügepositionen Toleranz Fügestelle/Positionierstellen Füge toleranz (Spiel) Fügehilfen Fügen an bewegter Basisbaugruppe	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	X3 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> S <sub>1</sub> = <input type="text"/>	Bewertungsmaßstab B 1- kein Problem 2- geringes Problem 3- mittleres Problem 4- großes Problem 5- entscheidendes Problem
<b>Werkstückpaarung</b> Anzahl gleichzeitig zu fügender Teile Anpass- und Justieraufwand Anzahl Teile/ Fügeposition Mehrfachfügstellen Lagesicherung gefügter Teile	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	X3 = <input type="text"/> X3 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> S <sub>2</sub> = <input type="text"/>	Zwischensummen S <sub>i</sub>
<b>Fügebewegung</b> Anzahl möglicher Fügebahnen Länge des ungeführten Fügeweges Fügebahn Fügefreiraum Füge richtung	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	X3 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> S <sub>3</sub> = <input type="text"/>	
<b>Fügeprozess</b> Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse Prüfaufwand physikalische Prozessgrößen Wirkorgananforderungen Umgebungsbelastung Hilfsstoffzufuhr	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	X3 = <input type="text"/> X3 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X2 = <input type="text"/> X1 = <input type="text"/> S <sub>4</sub> = <input type="text"/>	<b><math>e_{FügKom}</math></b> $(S_1 \times X S_2 \times X S_3 \times X S_4)^{0,36}$ <b>10400</b>

Bild 2.5: Ermittlung Fügekomplexitätsfaktor  $e_{FügKom}$  [Wal-85]

Bullinger [Bul-86] erwähnt die Bedeutung der Fügeart des Erzeugnisses, die Zugänglichkeit der Füge stelle und die Bereitstellung der Einzelteile für die Ermittlung des Automatisierungspotentials, geht aber nicht näher auf diesen Aspekt ein. Für ihn besteht die Frage nach Automatisierung in einer Frage der Wirtschaftlichkeit und gegebenenfalls in der konstruktiven Veränderung der Montageobjekte (Bild 2.6).

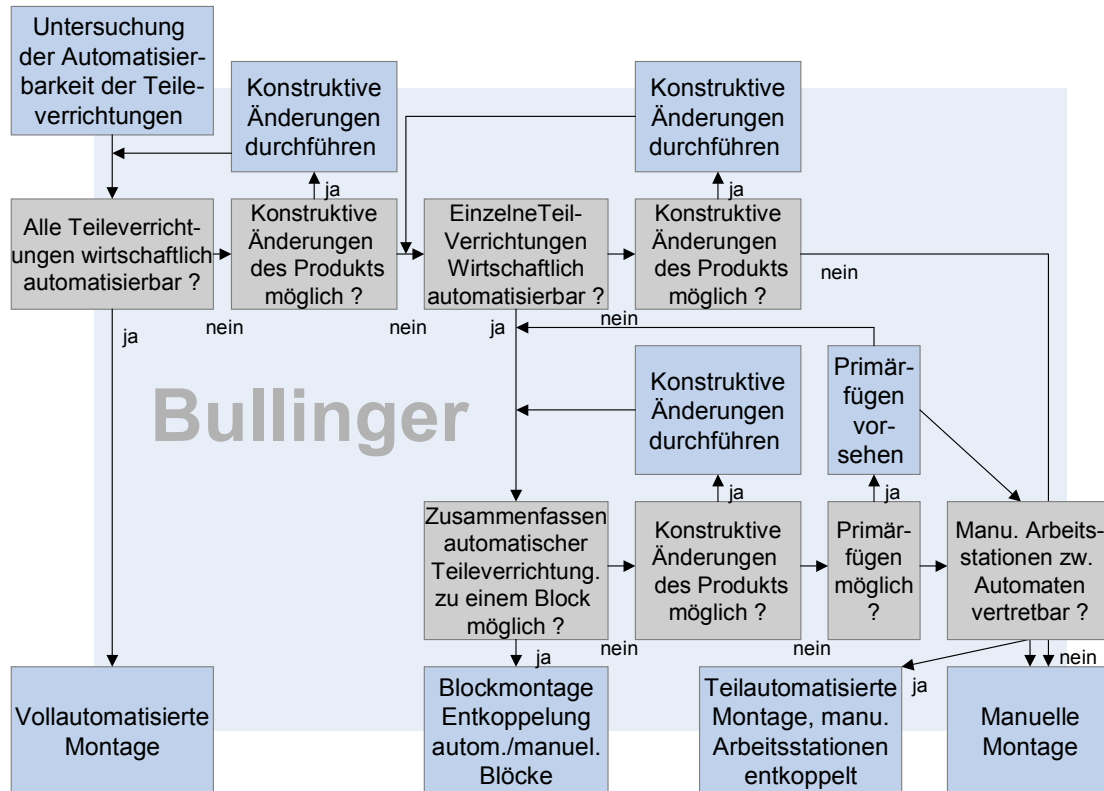


Bild 2.6: Bestimmung automatisierbarer Teileverrichtungen [Bul-86]

Deutschländer [Deu-89] erstellt eine Checkliste zur Beurteilung der Automatisierbarkeit. Die Beurteilungskriterien sind in objekt- und prozessbezogen unterteilt (Bild 2.7). Mittels der Kriterien wird der technische Aufwand der Automatisierbarkeit abgeschätzt. In der einen Tabellenspalte sind die Beurteilungskriterien aufgelistet. Ihnen werden die Ausprägungen des zu untersuchenden Montageproblems gegenübergestellt. Dafür stehen die drei Spalten einfach realisierbar, realisierbar und mit großem Aufwand realisierbar zur Verfügung. Bei einfach zu realisierender Automatisierung stehen käufliche Komponenten zur Verfügung. Realisierbar signalisiert, dass nach dem Stand der Technik eine Automatisierung grundsätzlich möglich ist, aber erhebliche Änderungen am Arbeitsplatz oder Produkt erforderlich sind. Die Automatisierung mit großem Aufwand bedarf eines zu hohen Einsatzes technischer und finanzieller Mittel. Der Montageplaner kreuzt für jedes Merkmal diejenige der drei Spalten an, die auf sein Montageproblem zu trifft. Alle Kreuze der drei Spalten werden aufsummiert und die Spalte mit den meisten Kreuzen spiegelt die Automatisierbarkeit des behandelten Montageproblems wider. Das Problem dieser Methode ist die sehr hohe Subjektivität und die mangelnde Erfahrung junger Planer.

<b>Beurteilung der Automatisierbarkeit von Montagesystemen</b>			
<b>Firma:</b>		<b>Datum:</b>	
<b>Montagearbeitsplatz:</b>	<b>Montageverrichtung:</b>	<b>Montagezeit:</b>	
<b>Montageaufgabe:</b>			
<b>Kriterium</b>	<b>Ausprägungsform</b>		
<b>OBJEKTBEZOGEN</b>			
Anzahl der Teile	gering	mittel	hoch
Komplexitätsgrad der Montageobjekte	gering	mittel	hoch
Werkstückabmessungen	1-300 mm	0,5-1 mm 300-800 mm	< 0,5 mm > 800 mm
Gewicht	0-10 kg	11-30 kg	> 30 kg
Formstabilität	starr	elastisch	biegeschlaff/ gelenkig
<b>PROZESSBEZOGEN</b>			
variantenspezifische Flexibilitätsanforderungen	gering	mittel	hoch
Art der Fügebewegung	geradlinige Bewegung in Richtung der Schwerkraft	geradlinige Bewegung nicht in Richtung der Schwerkraft	Bahnkurve im Raum
Genauigkeitsanforderungen an den Fügeprozess	gering	mittel	hoch
Sensorik	nicht erforderlich	mit käuflichen Sensoren realisierbar	sensorische Anforderungen
Zugänglichkeit Fügeort/ Greifstelle	keine Einschränkungen	leichte Einschränkungen	starke Einschränkungen
vorübergehende Lagesicherung	nicht erforderlich/ bestimmt	teilweise bestimmt	indifferent
Kontrollfunktion, Justage	nicht vorhanden	durch Messeinrichtung realisierbar	Sichtkontrolle
Nacharbeit, sonst. Aufgaben	keine	gering	hoch
Teilevereinzelnung, Ordnungsaufwand	Bereitstellung in Magazinen entfällt	Schüttgut, ausgeprägte und stabile Vorzugslagen	Schüttgut mit unerwünschtem Zusammenhalt
Betriebsmittelzugänglichkeit	ohne Einschränkung	Zugänglichkeit leicht eingeschränkt	Zugänglichkeit stark eingeschränkt
<b>Summe <math>S_i</math></b>	<b><math>S_1 =</math></b>	<b><math>S_2 =</math></b>	<b><math>S_3 =</math></b>
<b>Ausprägung <math>A_i = S</math></b>	<b><math>A_1 =</math></b>	<b><math>A_2 =</math></b>	<b><math>A_3 =</math></b>
<b>Montage-automatisierung</b>	<b>einfach realisierbar</b>	<b>realisierbar</b>	<b>mit großem Aufwand realisierbar</b>

Bild 2.7: Checkliste zur Ermittlung der Automatisierbarkeit [Deu-89]

Bick [Bic-92] untersucht im Rahmen der Grobanalyse Prozesse in drei Schritten auf mögliche Automatisierbarkeit. Zunächst ermittelt er die Rationalisierungspotentiale der Prozesse und vergleicht diese mit einer einmalig festzulegenden Potential-Untergrenze. Diese unterste Grenze entspricht den Mindestkosten einer automatisierten Prozesslösung. Alle wirtschaftlich nicht vorteilhaften Prozesse werden nicht weiter betrachtet. In Schritt 2 werden die restlichen Prozesse auf technische K.O.-Kriterien untersucht. Alle danach noch verbleibenden Teileverrichtungen werden eingehender analysiert. Die Untersuchung besteht aus einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsvergleichsrechnung der manuellen und automatischen Prozessausführung.

Pfrang [Pfr-90] betont die Bedeutung der Integration und Vernetzung von manuellen Montagearbeitsplätzen mit automatisierten Montagezellen und spricht in diesem Zusammenhang das Grundsatzproblem des zeitlichen Abgleichs manueller und automatisierter Montageoperationen an. Für die Arbeitssystemplanung ergibt sich seiner Meinung nach die Forderung, parallel manuelle, teilautomatisierte und automatisierte Montagesysteme auszulegen und gegeneinander zu vergleichen. Pfrang beschränkt sich bei seiner Arbeit auf die graphische Gestaltung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze unter Berücksichtigung ergonomischer Gesichtspunkte. Die Auswahl der Grafikkomponenten erfolgt dabei rechnerunterstützt. Für die entwickelte Arbeitsmethode werden Bewegungssimulationen und Zeitanalysen auf MTM Basis durchgeführt. Ziel der Simulation und Kombination manueller und automatisierter Teilverrichtungen ist die zeitliche Abstimmung der Montageschritte und ein optimaler Gesamttablauf mit hoher Auslastung der Einzelkomponenten. Die Bewertung und der Vergleich der manuellen und automatischen Systeme erfolgt ausschließlich durch Zeitstudien mit den Simulationsprogrammen **Cosiman** und **Cosiro** sowie durch Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Die unterschiedliche technische Eignung beider Systeme wird nicht betrachtet.

#### 2.2.2.2 Ablaufplanung in Montagesystemen

Das Planungssystem **DOGMA (Dialogorientiertes Optimierungs- und Graphiksystem für Montageabläufe)** optimiert die Montagefolge. Dazu werden aus dem Vorranggraphen die Anlagenausbringung, die Stationszahl und der Systemauslastungsgrad ermittelt. Das Tool von Nolting [Nol-89] liefert dem Montageplaner die Vorranggraphenblockung, die Stationsauslastung und den Verlustzeitverlauf. Das Optimierungsmodul führt die Abtaktung der Stationen optional mittels heuristischer Verfahren oder durch vollständige Enumeration durch. Zunächst wird die größte Teilverrichtungszeit im Vorranggraphen identifiziert. Diese Zeit entspricht der erforderlichen Mindesttaktzeit. Der Planer kann wahlweise Ober- und Untergrenzen der Taktzeit für die Abtaktung ins System eingeben. Bei der vollständigen Enumeration wird die Anzahl der Optimierungsschritte abgefragt. Auf diese Weise kann die Aufgabenkomplexität und Rechendauer gesteuert werden. Nach dem Durchlaufen der Optimierungsschritte werden die Arbeitsanweisungen für die manuellen Stationen und die Fertigungsinhalte der automatischen Stationen ausgegeben. In einem Diagramm werden alle Vorgangszeiten mit den zugehörigen Verlustzeiten ausgedruckt. Für jede Station wird die Belegung mit Teilverrichtungen und eine Auslastungsstatistik erstellt.

Die Basis des von Evers [Eve-01] entwickelten **Programmsystems zur Belegungsplanung** bildet ein sogenannter Ereigniskalender. Er dient zur Einplanung und Abarbeitung der Vorgänge bei der Maschinenbelegung. In den Ereigniskalender werden Daten wie Auftragsnummer, Fertigungsstufe, Vorgangsbezeichnung, Starttermin, Ressourcenbedarf und Vor-



gangsdauer eingetragen. Die Arbeitsvorgänge werden sukzessive eingeplant. Zu einem beliebigen Planungszeitpunkt  $t$  lässt sich jeder Arbeitsvorgang einer der drei Kategorien (eingeplant, einplanbar oder nicht einplanbar) zuordnen. Für eingeplante Vorgänge sind Start- und Endtermin bereits disponiert. Die erforderlichen Ressourcen werden reserviert. Bei einplanbaren Arbeitsvorgängen sind außer dem aktuellen Arbeitsgang alle zeitlich früher auszuführenden Tätigkeiten eingelastet. Nicht einplanbare Vorgänge lassen sich aufgrund fehlender Disposition der Vorgängertätigkeiten noch nicht einplanen.

Das Planungstool **BEPROD** von Garlichs [Gar-95] besteht aus den zwei Hauptmodulen Datenmanagement und Belegungsplanung. Mit Hilfe des Datenmanagement Moduls werden Daten eingegeben und verändert. Im Modul Belegungsplanung wird zunächst ein Optimierungsalgorithmus festgelegt. Dabei kann zwischen einem Evolutionsalgorithmus oder einem Toleranzschwellenalgorithmus gewählt werden. In einem nächsten Schritt wird die Bedarfsdeckung, d.h. die Realisierbarkeit der Kundenaufträge bezüglich Termin und Menge, überprüft und als Optimierungsgröße definiert. Weitere Optimierungsgrößen sind Nutzungsgrad, Montage-, Bestands- und Rüstkosten. Alle Parameter werden zuerst einzeln und anschließend gemeinsam optimiert.

In der Matrix in Bild 2.8 sind die im Vorfeld diskutierten und weitere Planungssysteme nach ihren Anwendungsgebieten untergegliedert und dargestellt. Die beinhalteten Planungsschritte gehen dabei auf eine speziell für die systematische Montageplanung entwickelte Methode nach Bullinger [Bul-86] zurück.

Gruppierung nach Schwerpunkten	Integration der Konstruktion/ Simult. Engineering	manuelle Montage	Simulation Optimierung Virtuelle Realität	Durchgängige Planungstools	Montageablaufplanung	Verschiedenes
<b>Legende:</b> Rechnergestütztes Planungskonzept:						TICON MTM-Vereinigung 1999
						ASSEMBLY PLANNING S. Grewal 1995
						IMPOS R. Schneider 1994
						KOMPASS 2 W. Bernhart 1993
						N.N. Hong-Suck Park 1992
						PLASMOFLEX Albert Vuyls 1991
						CARCO C. Kleinedan 1990
						ROSI Martin Huck 1990
						ASSEMBLY FACCS van Brüssel 1990
						SIMPP/CONPF M. Möhre 1989
						N.N. Frank Köhler 1989
						MOSYS Günther Seeliger 1988
						ADAM Jörg Walther 1985
						CAHAS M. Simon 1984
						N.N. Stephan Evers 2001
						LISZY Markus Weber 1998
						BEPROD Ralf Garlachs 1995
						MOGRAPH Klaus Thaler 1993
						DOGMA Friedrich-W. Nolting 1989
						N.N. Thomas Friedmann 1989
						PRISMA Joachim Schöninger 1988
						PAKAP Hans Sauer 1987
						INIAKI Gunter Schad 1986
						DEMVOF Ernst-Dieter Ammer 1985
						POLEMM M. Corke 1970
						ERGO-/VIS- DELMIA
						EM Tecnomatix
						N.N. Ralf Cuijper 2000
						PRIMOS IPA, IAO, Bosch, TT 1989
						N.N. Arthur Deutschländer 1989
						ED Enterprise Dynamics (ED)
						ADEPT Adept Technology, Inc
						N.N. Rainer Heger 1998
						auf Basis von UG C. Woencckhaus 1990
						MONSIM H. J. Heusler 1988
						ERGOMAS Delmia/Delta GmbH
						FMMA ifab Karlsruhe (Homepage)
						DEMONA ifab Karlsruhe (Homepage)
						ARPLA Eberhard Haller 1982
						REMF O. Hirschbach 1978
						FUJ Stefan Grunwald 2002
						COSMONAUT Christoph Feldmann 1996
						COSEM Gerd Schuster 1992
						IDAP M. Richter 1992
						N.N. W. Scholz 1989
<b>1. Projektorganisation</b>						
Projektmanagement:						
Projektplanung:						
Projektüberwachung:						
<b>2. Konzeption</b>						
Analyse Planungsdaten:						
Ableitung Planungsziele:						
Entwurf Prinziplosungen:						
Montagekostenkalkulation:						
<b>3. Ablaufplanung</b>						
Erzeignisstrukturierung:						
Montageablaufstruktur:						
Kapazitätsstellung:						
Vorbereiten:						
Arbeitsinhalte bewerten:						
<b>4. Montagesystementwurf</b>						
Technik:						
Organisationsformen:						
Prinzipdarstellungen:						
Materialbereitstellung:						
Layoutplanung:						
Simulation:						
Einplanung Produktionsprogramm:						
Auswahl Montagesystem:						
<b>5. Ausarbeitung</b>						
Manuelle Montagestationen:						
Automatische Montagestationen:						
Überprüfung der Montagestationen:						
<b>6. Realisierung</b>						
Bereitstellung der Betriebsmittel:						
Personaleinsatzplanung:						
Montagesystemaufbau und -anlauf:						
<b>7. Betrieb</b>						
Controlling:						
Kennzahlen:						
Rationalisierung:						
Problemlösungstechniken:						

Bild 2.8: Übersicht Montageplanungsverfahren

### **2.3 Ableitung der Entwicklungsschwerpunkte**

Zur Unterstützung des Anwenders bei der Montageplanung steht eine Vielzahl von Verfahren und Softwaretools zur Verfügung. Die Tools unterstützen den Planer in den Bereichen der Konzeption von Montagesystemen, der Ablaufplanung, dem Montagesystementwurf und bei der Ausarbeitung der manuellen, automatisierten sowie hybriden Montagesysteme. Viel Entwicklungsaufwand wurde auch in die Unterstützung des Simultaneous Engineering zwischen Konstruktion und Montageplanung investiert, um dem signifikanten Einfluss und der Steuerungsmöglichkeit von Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung bezüglich der Montagekosten Rechnung zu tragen. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt liegt im Bereich der Layoutplanung und Simulation. Zu diesen Themengebieten wie auch zur Detaillierung und Ergonomiegestaltung manueller Montagearbeitsplätze kann auf zahlreiche Programmsysteme zurückgegriffen werden.

Auf dem Gebiet der Montageablaufplanung wird der Anwender nur bei der Erzeugnisstrukturierung, der Montagevorranggraphenerstellung, der Vorgabezeitberechnung und bei der Abtaktung ausreichend softwaretechnisch unterstützt. Beim Planungsschritt der Automatisierungsentscheidung gibt es jedoch nur wenige Konzepte, die sich zumeist mit dem betriebswirtschaftlichen Aspekt des Automatisierungspotentials beschäftigen. Die Entscheidungen aus technischer Sicht für oder gegen eine Automatisierung bzw. einen Robotereinsatz beruhen auf der Berufserfahrung der Montageplaner oder auf Tabellen, die k.o.-Kriterien definieren und so ein Ausschlussverfahren für Automatisierung darstellen. Ein weitgehend objektives Verfahren für eine fähigkeitsorientierte Aufteilung der Teileverrichtungen auf Menschen und Maschinen existiert bisher nicht.

Eine weitere Lücke besteht bei Verfahren zur Reihenfolgeoptimierung für die Ausführung von Teilverrichtungen. Auf dem Gebiet der Teilefertigung existieren bereits Verfahren und Tools zur Belegungsplanung. Keines dieser Verfahren bietet allerdings die Möglichkeit, eine Aufgabenteilung und eine Reihenfolgeoptimierung parallel durchzuführen. Es werden immer zunächst die Aufgaben auf Maschinen verteilt und anschließend optimierte Reihenfolgen auf den einzelnen Maschinen erzeugt. Somit ist eine fähigkeitsorientierte und gleichzeitig durchlaufzeitoptimierte Planung bisher nicht möglich.

Da Montagesysteme, in denen eine direkte Mensch-Roboter-Kooperation verwirklicht wird, bisher nicht betrachtet wurden, existiert auch bisher kein Planungsverfahren, das die speziellen Anforderungen, die sich aus dieser Form der Montage ergeben, berücksichtigt und die Möglichkeit der Einplanung kooperierender Arbeitsschritte bietet.

Für die Aufgabenteilung der Montageschritte und die Ablaufplanung in solchen Systemen ist deshalb noch erhebliche Entwicklungsarbeit zu leisten. Die Entwicklungsschwerpunkte dieser Arbeit liegen somit

- in der fähigkeitsorientierten Aufteilung der Teileverrichtungen auf Menschen und Maschinen,
- auf dem Gebiet der Parallelisierung von Aufgabenteilung und Reihenfolgeoptimierung und
- in der Berücksichtigung der direkten Mensch-Roboter-Kooperation in der Planung.

### **3 Analyse der Grundlagen zur Planung von Montageabläufen hinsichtlich der Fähigkeitsorientierung und Ableitung der Anforderungen an ein Planungsverfahren für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle**

#### **3.1 Analyse der Grundanforderungen**

Zur Analyse der Grundanforderungen bei der fähigkeitsorientierten Montageablaufplanung und zur Formulierung von Anforderungen an ein Verfahren für die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle unter Zuhilfenahme eines softwarebasierten Werkzeugs wird die Optimierungsaufgabe analysiert und es werden Untersuchungen im Bereich der Automatisierbarkeit und fähigkeitsorientierten Montageplanung sowie im Bereich der temporalen Zielkriterien bei der Planung von Abläufen durchgeführt.

##### **3.1.1 Analyse der Optimierungsaufgabe**

Aus der Zielsetzung heraus, die Mensch-Roboter-Kooperationszelle dahingehend einzusetzen, dass die Fähigkeiten von Mensch und Roboter optimal genutzt werden und gleichzeitig den Ressourceneinsatz bei der Montage mit Hilfe der Zelle (Produktionszeit) zu minimieren, ergibt sich eine Optimierungsaufgabe mit sehr unterschiedlichen Zielkriterien.

Zum einen kann an einer Mensch-Roboter-Kooperationszelle durch die Fähigkeitsorientierung das Ziel verfolgt werden, den Arbeitsplatz für den Menschen besonders ergonomisch zu gestalten und dem Roboter alle der Arbeitsergonomie nicht zuträglichen Tätigkeiten zuzuteilen. Dadurch können der Krankenstand und die Fluktuation gesenkt werden, die Freude an der Arbeit und somit auch die erzeugte Qualität gehoben werden. Außerdem bewirkt die Fähigkeitsorientierung, dass die speziellen Fähigkeiten, die Mensch und Roboter haben, wie etwa die permanente Prozessüberwachung durch die Augen des Menschen und die genauen Positionierfähigkeiten des Roboters, optimal ausgenutzt und parallel eingesetzt werden können. Durch eine fähigkeitsorientierte Zuweisung der Montageaufgaben können auch die Kosten für Zusatzinvest minimiert werden, indem der Ressource eine Montageaufgabe zugeteilt wird, die kein Zusatzinvest für die Durchführung benötigt (beispielsweise ist es nicht nötig, den Roboter mit einem zusätzlichen Vision-System auszustatten, wenn die entsprechende Montageaufgabe vom Menschen durchgeführt werden kann).

Zum anderen kann durch die direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter auch eine Reduzierung der Montagezeit vorgenommen werden, wenn die Montagetätigkeiten jeweils so zugeteilt werden, dass sie mit minimalem Zeiteinsatz durchgeführt werden. Für den Men-

schen wird dabei als Basis von MTM-Zeiten ausgegangen, die Prozesszeiten des Roboters ergeben sich aus Versuchen oder Angaben der Roboterhersteller.

Beide Intentionen sind als notwendige Voraussetzungen zur Erfüllung übergeordneter Vorgaben für die Qualitäts- und Kostenziele zu sehen.

Um die Zielverfolgung der Fähigkeitsorientierung möglich zu machen, muss diese bewertbar sein. Die unterschiedlichen Fähigkeiten der Arbeitspartner müssen erfasst und interpretiert werden. Zu diesem Zweck ist eine Analyse der fähigkeitsorientierten Kriterien bei der Montageplanung erforderlich.

Eine zweite Analyse ist für die zeitbezogenen Zielkriterien bei der Montageplanung durchzuführen, um einen auch von Seite der Kosten optimierten Montageprozess entwickeln zu können.

Mit den Erkenntnissen aus den durchgeführten Untersuchungen soll bei der fähigkeitsorientierten Montageplanung in kooperierenden Mensch-Roboter-Zellen eine mehrfache Zielsetzung verfolgt werden - die Minimierung der Produktionszeit und die Maximierung der Eignung bezüglich des ermittelten Kriterienkatalogs. Bei dieser Problemform müssen also bei der Bewertung der erzeugten Lösungen im Gegensatz zur einfachen Zielsetzung mehrere Optimierungsziele (Kriterien) berücksichtigt werden. Solche Problemstellungen werden multikriterielle Optimierungsprobleme (*multi-objective optimization problem*, MOP) genannt. Bei einer mehrfachen Zielsetzung existiert im Allgemeinen eine Schar gleichwertiger Lösungen, die als pareto-optimal bezeichnet werden. Diese Lösungen unterscheiden sich zwar bezüglich ihrer Komponenten im Zielfunktionsvektor, sind aber bezüglich der Gesamtzielfunktion qualitativ nicht voneinander zu unterscheiden [Kno-02].

Bei der Behandlung von MOPs wird, anders als bei der Lösung von Einzel-Optimierungsproblemen, gleichzeitig der Raum der Entscheidungsvariablen und der Raum der Zielfunktion betrachtet. Dabei ergeben sich große Mengen von potentiellen Pareto-optimalen Lösungen. Zur Lösung dieser multikriteriellen Probleme stehen verschiedene Lösungsstrategien zu Verfügung, aus denen die am besten geeignete identifiziert werden muss.

Bei dem vorliegenden Problem der fähigkeitsorientierten Ablaufplanung in kooperierenden Mensch-Roboter-Systemen handelt es sich um eine gemischt-ganzzahlige Optimierung (im Gegensatz zur Parameter- und Funktionenoptimierung). Die gemischt-ganzzahlige Optimierung unterscheidet sich von der Parameteroptimierung im Wesentlichen durch ihren Variablenvektor, der sowohl aus reellen als auch aus ganzzahligen Parametern besteht. Die Produktionsplanung ist ein typisches Beispiel für ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem.

Da bei der vorliegenden Problemstellung Montageoperationen in einen sinnvollen Ablauf gebracht werden sollen, handelt es sich um einen Spezialfall der Produktionsplanung, um das Job-Shop Scheduling Problem (JSSP).

In produzierenden Unternehmen ist das Scheduling ein der Produktionsplanung nachgeschalteter Prozess. Produktionsplanungssysteme generieren meist Auftragslisten aufgrund von geschätzten Kapazitäten und Lieferzeiten, ohne die Reihung der Aufträge zu berücksichtigen. Unter Berücksichtigung von Auftragspräferenzen und von technologischen Einschränkungen in der Produktion wird anschließend die Planung der Reihenfolge (Sequencing) und möglicherweise auch eine Festlegung von Zeiten für Operationen auf Ressourcen (Scheduling) vorgenommen. Da im vorliegenden Fall der fähigkeitsorientierten Montageablaufplanung in kooperierenden Mensch-Roboter-Systemen Sequencing und Scheduling parallel durchgeführt werden, um einen optimalen Ablauf und eine optimale Aufgabenverteilung zu erreichen, handelt es sich um ein so genanntes flexibles Job-Shop Scheduling Problem (FJSSP) (Bild 3.1).

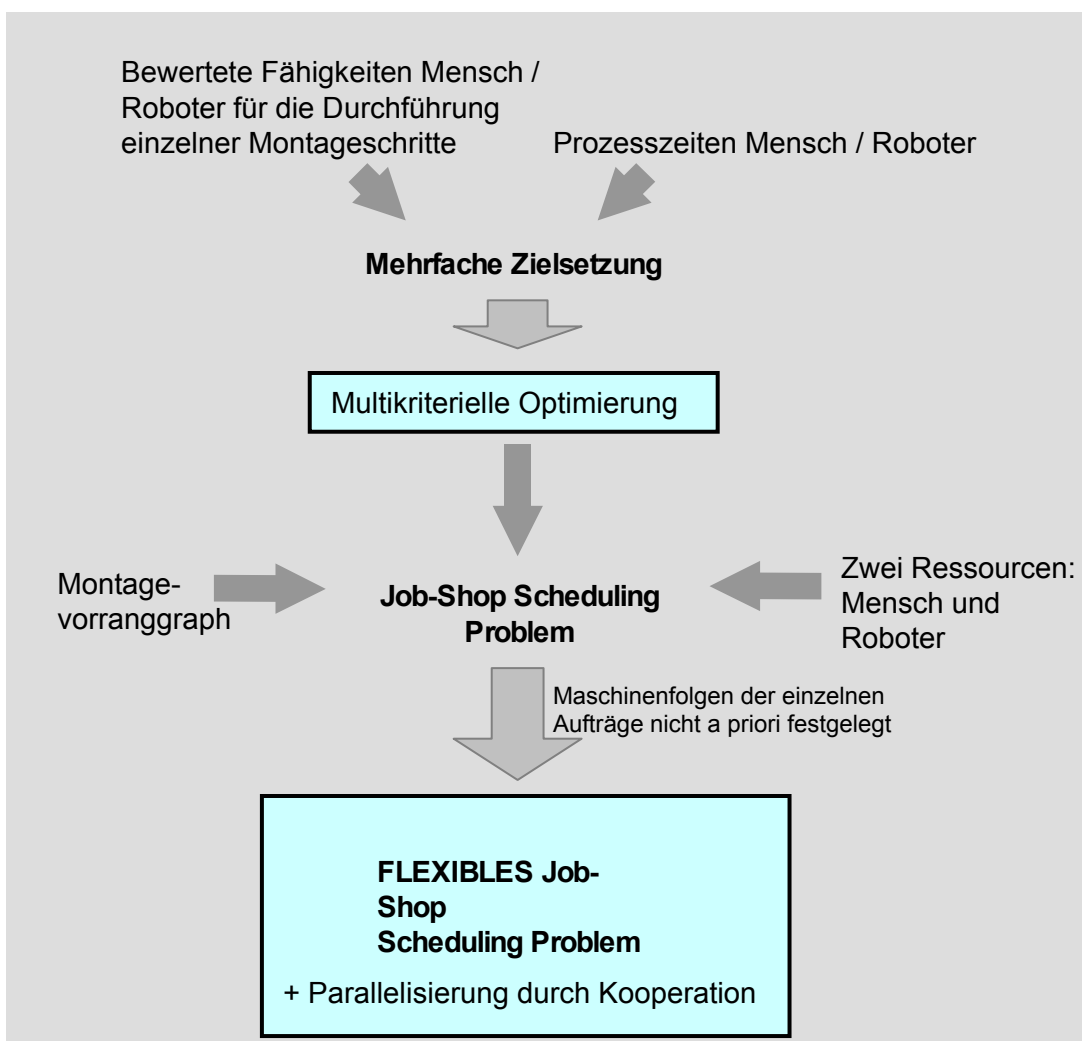


Bild 3.1: Analyse der Optimierungsaufgabe

Die Möglichkeit der parallelen Bearbeitung ein und desselben Produktes durch zwei verschiedene Ressourcen (Mensch und Roboter) zum selben Zeitpunkt stellt eine Verallgemeinerung des JSSP dar, da Operationen, die von verschiedenen Ressourcen ausgeführt werden, parallelisiert werden können (Kooperation).

### 3.1.2 Kriterien für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung

Die Zusammenstellung der Kriterien für eine fähigkeitsorientierte Montageplanung erfolgt zum einen durch eine Literatur-Recherche, die die bereits entwickelten Ansätze und Untersuchungen auf diesem Gebiet zusammenträgt. Zusätzlich werden Analysen im Bereich der Automatisierungshemmnisse und Vorteile, der montagegerechten Produktgestaltung und der Ergonomie durchgeführt, die zu weiteren Kriterien führen [Beu-02]. Andere Kriterien gehen auf DIN Normen und die Arbeitsschutzverordnung zurück.

Bei der Zusammenstellung der Kriterien werden vier Bereiche berücksichtigt [Wes-03]:

Der **Montageprozess**, welcher alle Kriterien beinhaltet, die die Füge- und Handhabungsprozesse betreffen;

die **Ergonomie**, deren Kriterienzusammenstellung die Arbeitsqualität für den Menschen erhöhen soll;

das **Bauteil**, welches alle Kriterien aufzeigt, die direkt den Montage- und Fügeteilen zugeordnet werden können und

die **Teilebereitstellung**, welche ein Kriterium beinhaltet, dass sich auf die Zuführeinheiten der Montagesysteme bezieht.

In der folgenden Tabelle sind unter den vorgestellten Bereichen die einzelnen identifizierten Kriterien  $K_h$  aufgeführt. Die Kriterien sind aus den jeweils angegebenen Literaturstellen abgeleitet, d.h. nicht alle sind in der Literaturstelle direkt als Kriterium für die Montageplanung genannt, sondern ergeben sich teilweise aus Antworten bei Umfragen (z.B. [Sra-99]) oder Regeln zur Produktgestaltung.

Jedem Kriterium sind seine möglichen Ausprägungen  $A_{hg}$  zugeordnet. Sie zeigen auf, in welchen Formen die Kriterien auftreten können. Die Ausprägungen stellen die Entscheidungsgrundlage für die fähigkeitsorientierte Aufteilung der Montagetätigkeiten auf Mensch und Roboter dar.



<b>K<sub>h</sub></b>	<b>Kriterium</b>	<b>A<sub>hg</sub></b>	<b>Ausprägung</b>
<b>Montageprozess</b>			
K <sub>1</sub>	Möglichkeit des Verhakens beim Fügen [War-90]	A <sub>1,1</sub>	ja
		A <sub>1,2</sub>	nein
K <sub>2</sub>	Während des Fügens Parallelprozess sichern [Beu-02]	A <sub>2,1</sub>	nötig
		A <sub>2,2</sub>	nicht nötig
K <sub>3</sub>	Sichern nach dem Fügen [Beu-02]	A <sub>3,1</sub>	nötig
		A <sub>3,2</sub>	nicht nötig
K <sub>4</sub>	Kontakt Werkstück / Fügeteil (einzelne Bauteile sollen zueinander eine möglichst geringe Anzahl Fügstellen haben) [Sma-88]	A <sub>4,1</sub>	Einstellenkontakt
		A <sub>4,2</sub>	Mehrstellenkontakt: Ausrichten mehrerer Einzelelemente erforderlich
		A <sub>4,3</sub>	Mehrstellenkontakt: System starr, Fügepassung > Werkstücktoleranzen
K <sub>5</sub>	Zusätzliche Prozessschritte durch Anpassarbeiten (z.B. durch mangelnde Bauteilqualität) [Bic-92], [Wal-85]	A <sub>5,1</sub>	nicht erforderlich
		A <sub>5,2</sub>	teilweise erforderlich
K <sub>6</sub>	Prozesskontrolle, sensorische Fähigkeiten [Sra-99]	A <sub>6,1</sub>	nicht nötig
		A <sub>6,2</sub>	von Mensch und Roboter durchführbar
		A <sub>6,3</sub>	vom Menschen durchführbar, Robotersysteme benötigen Zusatzinvest
		A <sub>6,4</sub>	vom Roboter durchführbar, Mensch benötigt Zusatzinvest
K <sub>7</sub>	Umrüstaufwand für Prozesseinrichtung [Sra-99]	A <sub>7,1</sub>	kein Umrüstaufwand
		A <sub>7,2</sub>	Umrüstaufwand nur bei Automatisierung
		A <sub>7,3</sub>	Umrüstaufwand automatisiert < manuell
		A <sub>7,4</sub>	Umrüstaufwand automatisiert > manuell
		A <sub>7,5</sub>	Umrüstaufwand automatisiert = manuell
K <sub>8</sub>	Fügebewegung (möglichst einfach) [Sma-88]	A <sub>8,1</sub>	durch Bauteilgeometrie erzwungen
		A <sub>8,2</sub>	durch Führung Fügewerkzeug
K <sub>9</sub>	Fügepassungen [Hoi-00], [Sra-98]	A <sub>9,1</sub>	Spielpassung
		A <sub>9,2</sub>	Grenzpassung
		A <sub>9,3</sub>	Übermaßpassung (ist jeweils nur durch Einlegen in eine Pressvorrichtung möglich)
K <sub>10</sub>	Sensorische Unterstützung des Prozesses [Beu-02]	A <sub>10,1</sub>	nicht nötig
		A <sub>10,2</sub>	visuelle Unterstützung nötig
		A <sub>10,3</sub>	taktile Unterstützung nötig

<b>K<sub>h</sub></b>	<b>Kriterium</b>	<b>A<sub>hg</sub></b>	<b>Ausprägung</b>
<b>Ergonomie</b>			
K <sub>11</sub>	Hilfs-/ Betriebs-/ Werkstoffe gesundheitsschädlich [GSV], [Sma-88]	A <sub>11,1</sub>	unschädlich
		A <sub>11,2</sub>	bei Berührung
		A <sub>11,3</sub>	bei Gegenwart
K <sub>12</sub>	Schadstoffeinwirkung von Luftinhaltsstoffen (Stäube, Rauche, Nebel, Gase, Dämpfe,...) [AVV], [Bul-94]	A <sub>12,1</sub>	aktuelle zulässige MAK-Werte nicht überschritten
		A <sub>12,2</sub>	aktuelle zulässige MAK-Werte überschritten
K <sub>13</sub>	Bauteiltemperatur [DIN EN 563]	A <sub>13,1</sub>	T < 0 °C
		A <sub>13,2</sub>	0 °C < T < 44 °C
		A <sub>13,3</sub>	T ≥ 44 °C
K <sub>14</sub>	Physiologische Dauerbelastung des Menschen bei schwerer dynamischer Muskelarbeit [Gey-99]	A <sub>14,1</sub>	gering
		A <sub>14,2</sub>	mittel
		A <sub>14,3</sub>	hoch
K <sub>15</sub>	Lärmbelastigung am Arbeitsplatz [Bul-94]	A <sub>15,1</sub>	LR < 85 dB(A)
		A <sub>15,2</sub>	85 dB(A) < LR < 90 dB(A)
		A <sub>15,3</sub>	LR > 90 dB(A)
<b>Bauteil</b>			
K <sub>16</sub>	Zugänglichkeit des Fügeorts [Bic-92], [Wal-85], [Sma-88]	A <sub>16,1</sub>	Sichtkontrolle und Werkzeugfreiräume gegeben
		A <sub>16,2</sub>	keine Sichtkontrolle möglich, Werkzeugfreiräume gegeben
		A <sub>16,3</sub>	Sichtkontrolle gegeben, keine Werkzeugfreiräume vorhanden
		A <sub>16,4</sub>	keine Sichtkontrolle möglich, keine Werkzeugfreiräume vorhanden
K <sub>17</sub>	Greif- und/oder Zentriermöglichkeiten der Bauteile [Sma-88]	A <sub>17,1</sub>	gegeben
		A <sub>17,2</sub>	nicht gegeben
K <sub>18</sub>	Oberflächenempfindlichkeit des Bauteils [Sra-99]	A <sub>18,1</sub>	Material unempfindlich
		A <sub>18,2</sub>	Material kratz-, bruch-, formempfindlich
K <sub>19</sub>	Steifheit des Fügeteils [Sra-98]	A <sub>19,1</sub>	starr
		A <sub>19,2</sub>	elastisch
		A <sub>19,3</sub>	biegeschlaff
K <sub>20</sub>	Steifheit des Basisteils [Beu-02]	A <sub>20,1</sub>	starr
		A <sub>20,2</sub>	elastisch
		A <sub>20,3</sub>	biegeschlaff

<b>K<sub>h</sub></b>	<b>Kriterium</b>	<b>A<sub>hg</sub></b>	<b>Ausprägung</b>
K <sub>21</sub>	Prozessanpassung auf Grund der Bauteiltoleranz [Wal-85]	A <sub>21,1</sub>	ja (Korrektur von Bauteilposition, Bauteilorientierung, Fügeposition, Fügeorientierung)
		A <sub>21,2</sub>	nein
<b>Teilebereitstellung</b>			
K <sub>22</sub>	Bereitstellung der Basis- / Fügeteile [Beu-02]	A <sub>22,1</sub>	positioniert und orientiert bereitgestellt
		A <sub>22,2</sub>	einfach und prozesssicher automatisierbar
		A <sub>22,3</sub>	nicht prozesssicher automatisierbar

Tabelle 3.1: Kriterienkatalog für die fähigkeitsorientierte Ablaufplanung

Um die Vollständigkeit, Korrektheit und Wichtigkeit der analysierten Kriterien zu überprüfen, wird eine Umfrage unter Fachleuten in Unternehmen und wissenschaftlichen Experten zum Thema „Arbeitsteilung in hybriden Montagesystemen“ in Form einer schriftlichen Befragung durchgeführt. Der Fragebogen, der nach den Regeln von Schnell, Hill und Esser [Sne-95] gestaltet wurde, enthält einen Teil mit geschlossenen Fragen und einen mit offenen. Im ersten, geschlossenen Frage-Teil wird mit Hilfe einer Likert-Skala die Relevanz der angegebenen Kriterien bei einer Entscheidung bezüglich eines Roboter-Einsatzes in der Montage bewertet. Bild 3.2 zeigt das Ergebnis.

Im zweiten, offenen Frage-Teil wird nach fehlenden Kriterien gefragt. Die Auswertung dieses Teils des Fragebogens liefert keine zusätzlichen Kriterien.

Die Vollständigkeit des Kriterienkataloges ist somit verifiziert. Aus der Relevanzbewertung werden in Kapitel 4.2.4 die Gewichtungen der Kriterien ermittelt.

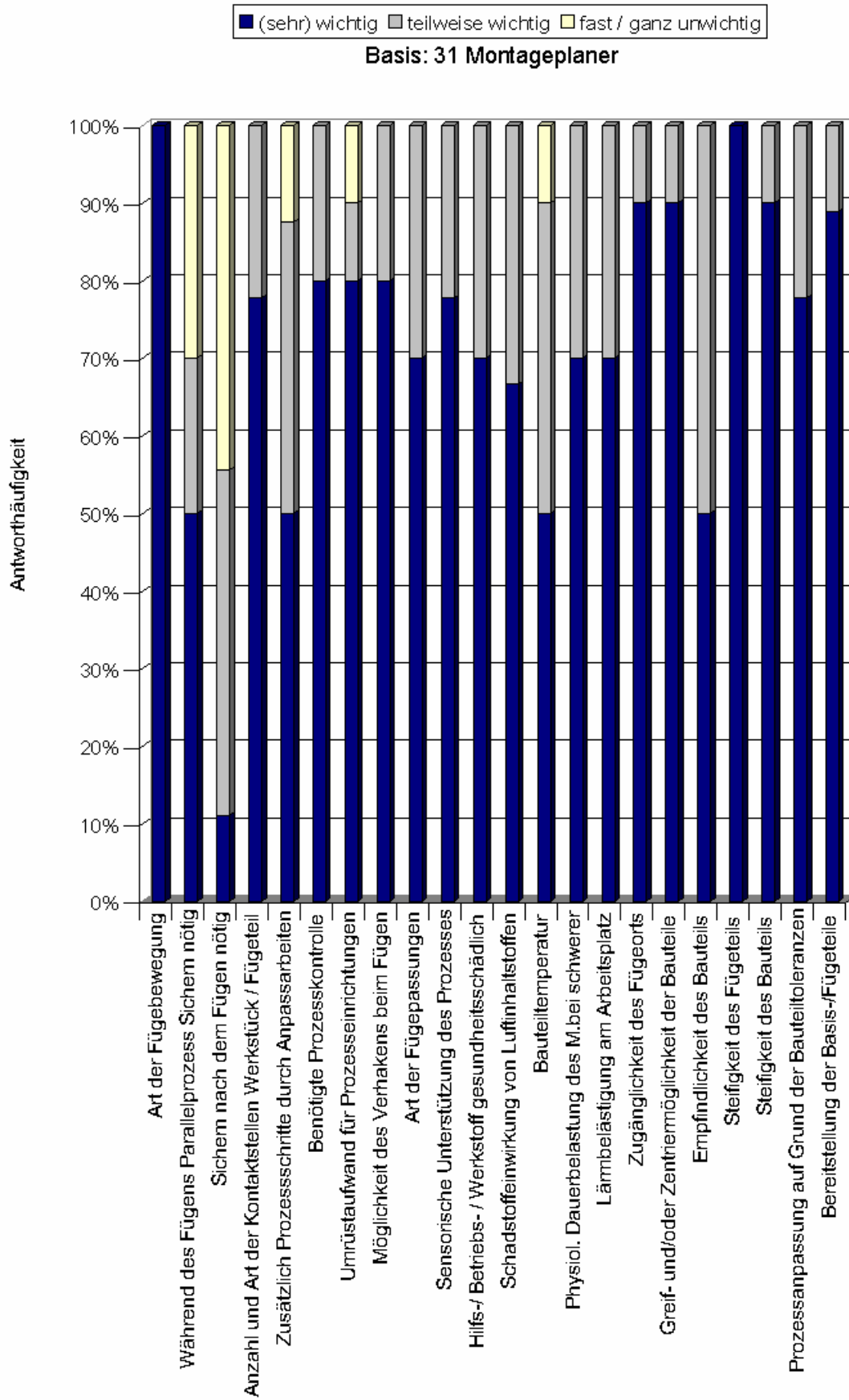


Bild 3.2: Ergebnis der Expertenbefragung: Relevanz der Kriterien

### 3.1.3 Temporale Kriterien für die Montageablaufplanung

Die temporalen Zielkriterien bei der Ablaufoptimierung von Montagevorgängen sind gleichzusetzen mit denen der Produktionsplanung. Sie können somit in Bezug auf die Kapazität oder die Durchlaufzeit von Aufträgen klassifiziert werden. Die durchlaufbezogenen Zielkriterien umfassen die Fertigstellungszeit (completion time)  $C_i$  eines Auftrags  $i$ , die Zeit vom Planungsbeginn bis zum Abschluss der letzten Operation des Auftrags  $i$ , die Wartezeit  $W_{ij}$  (waiting time) sowie die Durchlaufzeit (flow time)  $F_i$ . Die Wartezeit eines Auftrags beschreibt die Zeitspanne, die nach seiner Freigabe und nach Beendigung seiner Fertigung bzw. Montage auf der vorhergehenden Maschine bzw. Station bis zum Beginn seiner Bearbeitung auf der benötigten Maschine  $k$  vergeht. Dabei ist  $W_i = \sum_{k=1}^m W_{ik}$  die gesamte Wartezeit des Auftrages  $i$ .

Die Durchlaufzeit  $F_i$  eines Auftrags beschreibt die Zeitspanne, die von seiner Bereitstellung  $r_i$  bis zu seiner Fertigstellung vergeht:  $F_i = C_i - r_i$ . Häufig wird  $r_i = 0$  implizit vorausgesetzt. In diesem Fall ist  $F_i = C_i$ .

In der Literatur werden für die Aufträge  $i = 1, \dots, n$  vor allem die folgenden durchlaufzeitbezogenen Ziele betrachtet [Dom-97]:

- Die Minimierung der Durchlaufzeit  $F = \sum_{i=1}^n F_i$  bzw. der mittleren Durchlaufzeiten

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i,$$

- die Minimierung der maximalen Durchlaufzeit:  $F_{\max} = \max\{F_i | i = 1, \dots, n\}$ ,
- die Minimierung der Wartezeit  $W = \sum_{i=1}^n W_i$ .

Unter den kapazitätsbezogenen Zielkriterien werden verstanden:

- Die Minimierung der maximalen Fertigstellungszeit  $C_{\max} = \max\{C_i | i = 1, \dots, n\}$ ,
- die Minimierung der Leerzeiten  $I = \sum_{k=1}^m I_k$ ,
- die Maximierung der durchschnittlichen Kapazitätsauslastung  $\bar{R}_p = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_j} p_{ij}}{C_{\max}}$ .

Dabei ist  $C_{\max} = \max\{C_i | i = 1, \dots, n\}$ , mit  $C_i = F_i + r_i$  die Zykluszeit oder maximale Fertigstellungszeit (makespan) und  $p_{ij}$  die Prozessdauer von Operation  $O_{ij}$ . Diese Zeitspanne vergeht vom Beginn der Montage bis zum Ende der Bearbeitung des letzten Arbeitsganges. Bei der Minimierung der maximalen Fertigstellungszeit wird für eine gegebene Menge von Aufträgen ein Plan gesucht, bei dem die Zeit für die Durchführung aller notwendigen Montageoperationen minimal ist.

Eine weitere kapazitätsbezogene Zielgröße, die Auskunft über den Nutzungsgrad der Maschinen gibt, ist die Leerzeit (idle time)  $I = C_{\max} - \sum_{j=1}^n p_{ij}$ . Diese gibt für jede Maschine die Zeit an, in der sie keinen Auftrag bearbeitet.

Wie in [Fre-82] bewiesen wird, sind die folgenden drei Zielfunktionen äquivalent:

$$\text{Mittlere Fertigstellungszeit: } \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ r_i + \sum_{k=1}^m (W_{ik} + p_{ij(k)}) \right]$$

$$\text{Mittlere Durchlaufzeit: } \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - r_i)$$

$$\text{Mittlere Wartezeit: } \bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m W_{ik}.$$

Ebenso äquivalent verhalten sich die Zielfunktionen  $C_{\max}$ ,  $\bar{R}_p$  und  $\bar{T}$  [Fre-82].

### 3.2 Folgerungen aus den Analyseergebnissen

Aus den Einzelaspekten der Analyse des Istzustandes werden die nachstehenden Folgerungen gezogen:

#### Folgerungen aus den Analyseergebnissen bezüglich der Fähigkeitsorientierung

Der in sich abgeschlossene Kriterien- und Ausprägungskatalog aus Kapitel 3.1.2 dient als Ausgangsbasis für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung. Um den Katalog für die Planung der Montageabläufe nutzen zu können, ist es nötig, ein Bewertungssystem zu entwickeln, das die verfolgte Fähigkeitsorientierung ebenso quantifizierbar macht, wie es bei den zeitbezogenen Kriterien der Fall ist. Das Bewertungssystem soll sich die unterschiedlichen Fähigkeiten der Arbeitspartner zunutze machen und durch einen Vergleich der Kriterien, welche die Fähigkeitsorientierung beschreiben, mit den zutreffenden Ausprägungen, die auf die einzelnen Montageoperationen des zu planenden Ablaufs zutreffen, zu einem Eignungsgrad für den Menschen und einem Eignungsgrad für den Roboter für die jeweiligen

Teilverrichtungen führen. Die Eignungsgrade stellen Zielgrößen im Rahmen der Optimierungsaufgabe dar.

Für dieses Vorgehen werden grundlegende Erkenntnisse bezüglich eines allgemein gültigen, objektiven Systems benötigt, mit dessen Hilfe für jede Montageoperation die Fähigkeiten von Mensch und Roboter in Form eines Eignungsgrades ausgedrückt werden können.

### Folgerungen aus den Analyseergebnissen bezüglich der temporalen Kriterien

Da sich die temporalen Zielfunktionen  $\bar{C}$ ,  $\bar{F}$  und  $\bar{W}$  ebenso wie die Funktionen  $C_{\max}$ ,  $\bar{R}_p$  und  $\bar{T}$  äquivalent verhalten, werden als temporale Optimierungsziele für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle

1. die mittlere Durchlaufzeit  $\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - r_i)$  und
2. die maximale Fertigstellungszeit  $C_{\max} = \max\{C_j \mid j = 1, \dots, n\}$

weiterverfolgt.

### **3.3 Anforderungen an das Planungsverfahren**

Aus den Analyseergebnissen und den Folgerungen daraus werden die nachstehenden Anforderungen an das zu entwickelnde Planungsverfahren und Planungstool für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle abgeleitet.

Die Anforderungen werden gegliedert in Anforderungen an ein Entwicklungsverfahren für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle und Anforderungen an ein softwarebasiertes Planungstool.

#### **3.3.1 Anforderungen an die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die Mensch-Roboter Kooperationszelle**

Die Anforderungen an das Entwicklungsverfahren lassen sich in drei thematische Bereiche gliedern. Zunächst werden allgemein auf das Verfahren bezogene Anforderungen formuliert (Bild 3.3). Die Anforderungen an das Gesamt-Verfahren und an das Optimierungsverfahren der Entwicklung der fähigkeitsorientierten Montageabläufe für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation sind aus der Analyse der Optimierungsaufgabe abgeleitet. Anschließend werden die Anforderungen, bezogen auf den Montageprozess, identifiziert (Bild 3.4), sie basie-

ren auf den Untersuchungen der fähigkeitsorientierten und temporalen Kriterien für die Montageablaufplanung sowie auf den Folgerungen aus den Analyseergebnissen.

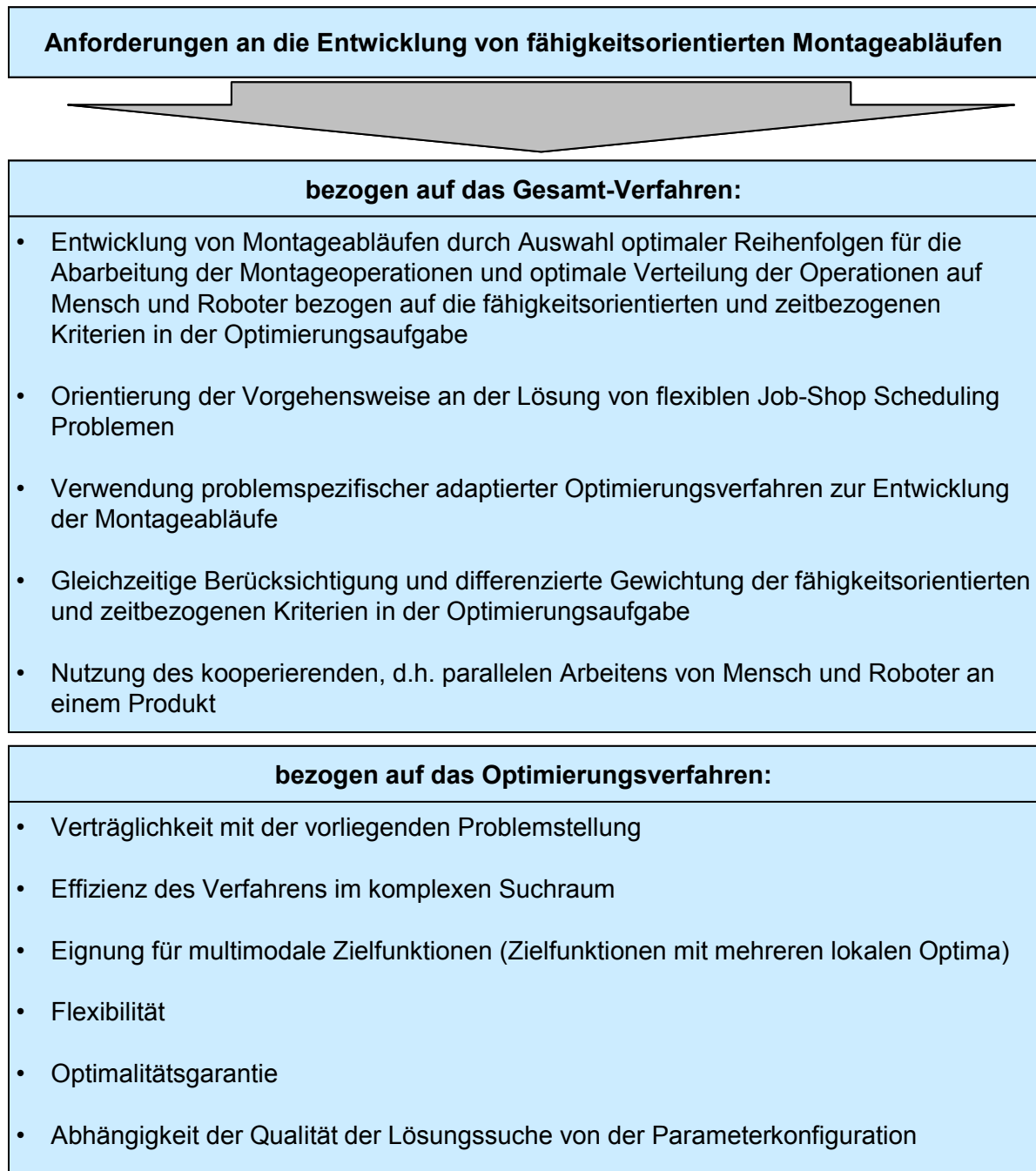


Bild 3.3: Anforderungen an das Planungsverfahren



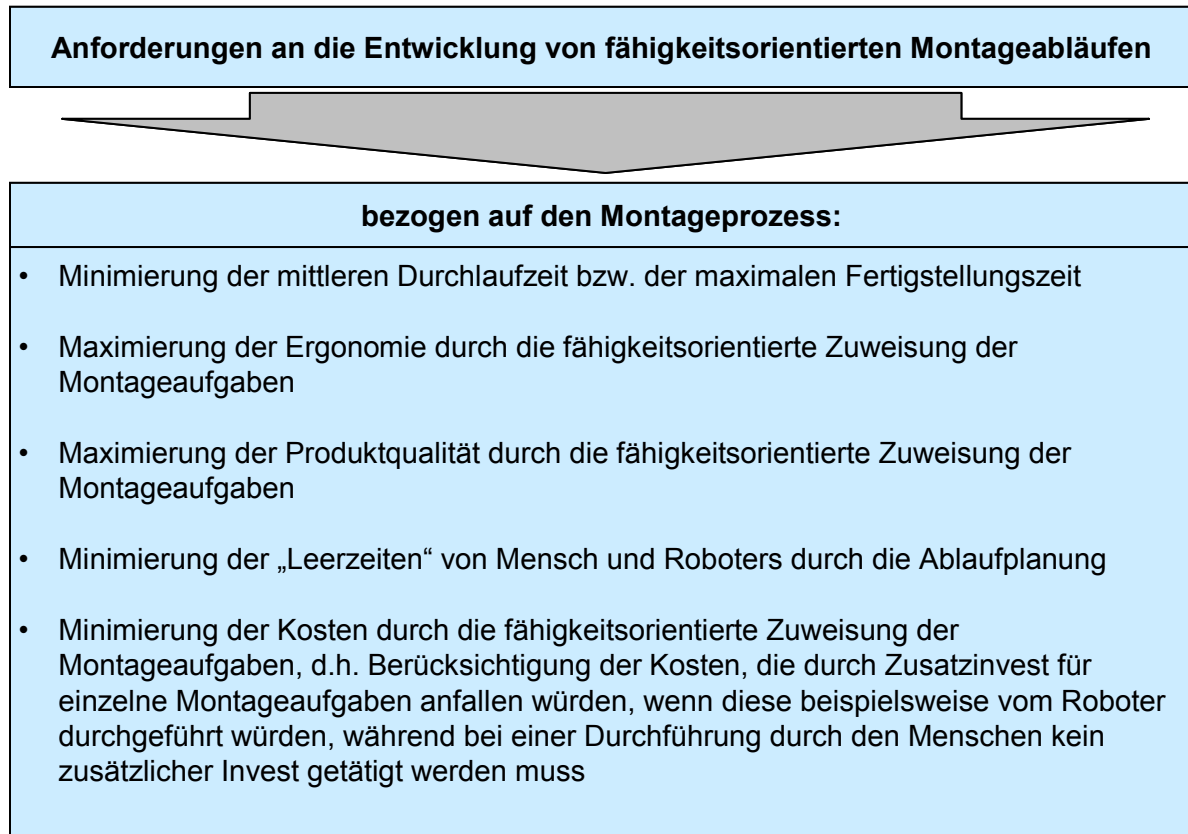


Bild 3.4: Anforderungen an den Montageprozess

### 3.3.2 Anforderungen an ein softwarebasiertes Planungstool

Die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die Mensch-Roboter-Kooperation ist ein Teilbereich der Montageplanung in produzierenden Unternehmen. Neben den Anforderungen bezogen auf das Entwicklungsverfahren selbst werden durch diese Umgebung Anforderungen aus Sicht des Anwenders des Werkzeugs, aus Sicht der Rechnerunterstützung und aus Sicht der Planungsumgebung an das Planungstool gestellt.

Aus Anwendersicht ist für eine komfortable Nutzung des Planungstools eine übersichtliche und klar strukturierte Dateneingabe und Ausgabe, eine Bedienbarkeit ohne Programmierkenntnisse und eine hohe Bedienfreundlichkeit wünschenswert. Aus Sicht der Rechnerunterstützung der Unternehmen umfassen die Anforderungen die Nutzung von Hardware Standardkomponenten, kurze Rechenzeiten und die Nutzung von Standards bezüglich der Benutzeroberfläche. Schließlich ist noch die Planungsumgebung zu berücksichtigen, die einen modularen Aufbau für eine einfache Anpassung und Erweiterung und eine Programmierung in Hochsprache fordert.

## 4 Entwicklung eines Bewertungsmodells für die spezifischen Fähigkeiten von Mensch und Roboter

Der in sich abgeschlossene Kriterien- und Ausprägungskatalog aus Kapitel 3.1 dient als Ausgangsbasis für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung. Um den Katalog für die Planung der Montageabläufe nutzen zu können, ist es nötig, ein Bewertungssystem zu entwickeln, das die verfolgte Fähigkeitsorientierung ebenso quantifizierbar macht, wie es bei den zeitbezogenen Kriterien mittlere Durchlaufzeit und maximale Fertigungszeit der Fall ist. Dazu werden grundlegende Erkenntnisse bezüglich eines allgemein gültigen Systems erarbeitet, mit dessen Hilfe für jede Montageoperation die Fähigkeiten von Mensch und Roboter in Form eines Eignungsgrades ausgedrückt werden können.

### 4.1 Basismodell für die Fähigkeitsbeurteilung

Das betrachtete Planungsproblem ergibt sich aus der Montageaufgabe  $M_a$ . Diese setzt sich wiederum aus den Montageoperationen  $O_i$  zusammen.

$$M_a = \begin{pmatrix} O_1 \\ \vdots \\ O_n \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

Der Kriterienkatalog aus Kapitel 3.1 ermöglicht die Charakterisierung einzelner Montageoperationen  $O_i$  in Bezug auf die für einen fähigkeitsorientierten Automatisierungsentscheid wichtigen Aspekte. Das Element  $O_i$  wird durch die Kriterien  $K_h$  beschrieben, die sich in einem Kriterienvektor darstellen lassen:

$$O_i \rightarrow \begin{pmatrix} K_1 \\ \vdots \\ K_n \end{pmatrix}$$

Das Element  $O_i$  ist erst durch die Betrachtung aller Kriterien vollständig in Bezug auf sein Automatisierungspotential beschrieben.

Den Kriterien  $K_h$  wird entsprechend der zu charakterisierenden Montageoperation je eine der zum Kriterium gehörenden Ausprägungen  $A_{hg}$  zugewiesen. Die Anzahl  $g$ , der möglichen Ausprägungen variiert je nach Kriterium  $K_h$ . Der Kriterienkatalog (Tabelle 3.1) variiert dabei zwischen  $I_{min}=2$  und  $I_{max}=4$  Ausprägungen je Kriterium. Die Ausprägungen können somit in einem Ausprägungsvektor dargestellt werden, dessen Dimension je nach Kriterium variiert.

$$K_h \rightarrow \begin{pmatrix} A_{h1} \\ \vdots \\ A_{hl} \end{pmatrix}$$

Der Vektor stellt somit die Gesamtheit aller möglichen Ausprägungen je Kriterium dar. Die Charakterisierung des einzelnen Vorrangelementes hinsichtlich  $K_h$  erfolgt durch die Wahl einer der gegebenen Ausprägungen.

$$\begin{pmatrix} A_{h1} \\ \vdots \\ A_{hl} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = A_{h1} \quad \text{Gleichung 4.2}$$

Die Wahl einer Ausprägung kann, wie oben dargestellt, als Multiplikation des allgemeinen Ausprägungsvektors eines Kriteriums  $K_h$  mit einem Einheitsvektor verstanden werden. Die Dimension des Einheitsvektors, der in der Folge als Auswahlvektor bezeichnet wird, ist entsprechend der Dimension des zugehörigen Ausprägungsvektors zu wählen.

Zusammenfassend werden also jeder Montageoperation  $O_i$  Kriterien  $K_h$  zugeordnet, wobei jedem Kriterium  $K_{hi}$  entsprechend der Montageoperationen  $O_i$  eine Ausprägung  $A_{hgi}$  zugeordnet wird.

$$O_i \rightarrow \begin{pmatrix} K_1 \\ \vdots \\ K_n \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A_{1,g,i} \\ \vdots \\ A_{n,g,i} \end{pmatrix}$$

Damit sind die Montageoperationen  $O_i$  vollständig hinsichtlich der für die Fähigkeitsanalyse relevanten Kriterien beschrieben.

## 4.2 Fähigkeitsbeurteilung

Bei der vorliegenden Problemstellung handelt es sich um ein Technologieauswahl-Problem. Technologieauswahl-Probleme sind dadurch gekennzeichnet, dass in jedem einzelnen Teilsystem ein Bedarfsvektor existiert und verschiedene Technologien zur Deckung dieses Bedarfs genutzt werden können. Der Einsatz der diversen Technologien zur Bedarfsdeckung verbraucht Ressourcen; über die globalen Ressourcenbeschränkungen sind die Teilsysteme miteinander gekoppelt. [Gol-93]

Bekanntere Bewertungsverfahren wie etwa die Nutzwertanalyse [Zan-71], der paarweise Vergleich [Bug-90], der Analytical Hierarchy Process (AHP) [Saa-94] oder die Methode zur Design-Bewertung [Deh-94] können vor allem auf Grund der Subjektivität und auf Grund feh-

lender kardinaler Skalen für das vorliegende Problem nicht genutzt werden. Teile dieser Systeme sind jedoch als viel versprechend einzustufen. Ein auf das Problem angepasstes Bewertungssystem, welches Teilaspekte der bekannten Bewertungssysteme mit allgemeinen Anwendungen aus der Entscheidungsfindung kombiniert, stellt an dieser Stelle die optimale Lösung dar.

Der Bedarfsvektor ist gekennzeichnet durch den Arbeitsinhalt der aktuell betrachteten Montageaufgabe  $M_a$ . Zur Deckung der Bedarfe, in diesem Fall zur Abarbeitung der einzelnen Vorrangelemente, stehen die beiden „Technologien“ bzw. im vorliegenden Fall die beiden Ressourcen Mensch und Roboter zur Verfügung. Es gilt, einen Montageauftrag ( $M_R$ ) für den Roboter und einen Montageauftrag ( $M_M$ ) für den Menschen zu erzeugen. Aus mathematischer Sicht bestehen die folgenden Randbedingungen:

$$M_a = M_R + M_M \quad \text{Gleichung 4.3}$$

$$M_R \in M_a \cup M_M \in M_a \quad \text{Gleichung 4.4}$$

Die Entscheidungsaufgabe besteht darin, die anfallenden Arbeiten in Form von Montageoperationen fähigkeitsorientiert auf  $M_R$  und  $M_M$  zu verteilen. Dazu bedarf es einer standardisierten Bewertungsmethode. Ausgehend vom Kriterienkatalog aus Kapitel 3 gilt es, für jede Ausprägung  $A_{hgi}$  zu entscheiden, welcher der Partner die „besseren Fähigkeiten“ besitzt. Dies bedeutet, dass beispielsweise für den Fall der Montageoperation  $O_i$  „Teil einsetzen“ für Kriterium  $K_{1,j}$  „Fügebewegung“ und die zutreffende Ausprägung  $A_{1,i,2}$  „durch Führung Fügewerkzeug“ ein numerischer Wert angegeben muss, wie sich diese Ausprägung des Kriteriums auf die Entscheidung, ob die Montageoperation  $O_i$  von Mensch oder Roboter durchgeführt werden soll, auswirkt. Auf dieser höchsten Ebene des Problems ist die Entscheidung nur als subjektive Spontanentscheidung zu fällen. Spontan kann festgestellt werden, dass eine „bahngesteuerte“ Fügebewegung wahrscheinlich besser von einem Roboter durchgeführt wird. Diese Form der Entscheidungsfindung ist jedoch nicht nachvollziehbar und standardisierbar und somit ungenügend.

#### 4.2.1 Deliberation der Entscheidung

Wie die von Dehlinger [Deh-94] beschriebene Methode zur Design-Bewertung wird das spontan zu entscheidende Problem der höchsten Ebene in Unteraspekte aufgespalten, um auf einer tieferen Ebene die Spontanurteile durch objektivere Teil-Urteile zu ersetzen.

Um auf einer tieferen Ebene Teil-Urteile fällen zu können, werden Merkmale benötigt, die es ermöglichen, für eine Ausprägung (z.B. „durch Führung Fügwerkzeug“) durch einfache besser/ schlechter-Urteile die Fähigkeitsorientierung zu bewerten. Dadurch, dass nur besser/ schlechter-Urteile getroffen werden, steigt die Objektivität des Bewertungsmodells. Dabei wird auf die Erfolgsfaktoren eines Unternehmens zurückgegriffen. Die Aspekte Zeit, Kosten und Qualität gelten allgemein als die zentralen Faktoren, wenn es um den Erfolg eines Unternehmens geht [Wes-02]. Somit ist es sinnvoll, diese Globalziele auf den Bereich der Montage und in diesem Fall der fähigkeitsorientierten Montageablaufplanung in kooperierenden Mensch-Roboter Systemen abzubilden. Dies bedeutet, dass die Fragestellung der Deliberation nun lautet: Wie wirkt sich jede Ausprägung bei Einsatz des Roboters/ Menschen auf die Faktoren Zeit, Kosten und Qualität aus?

Die drei Unternehmensziele werden, wie in Bild 4.1 gezeigt, auf die einzelnen Teilverrichtungen bei der Entwicklung von Montageabläufen in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation abgebildet. Diese Merkmale, die zur Auswahl der Technologie führen, werden Technologiemerkmale genannt.

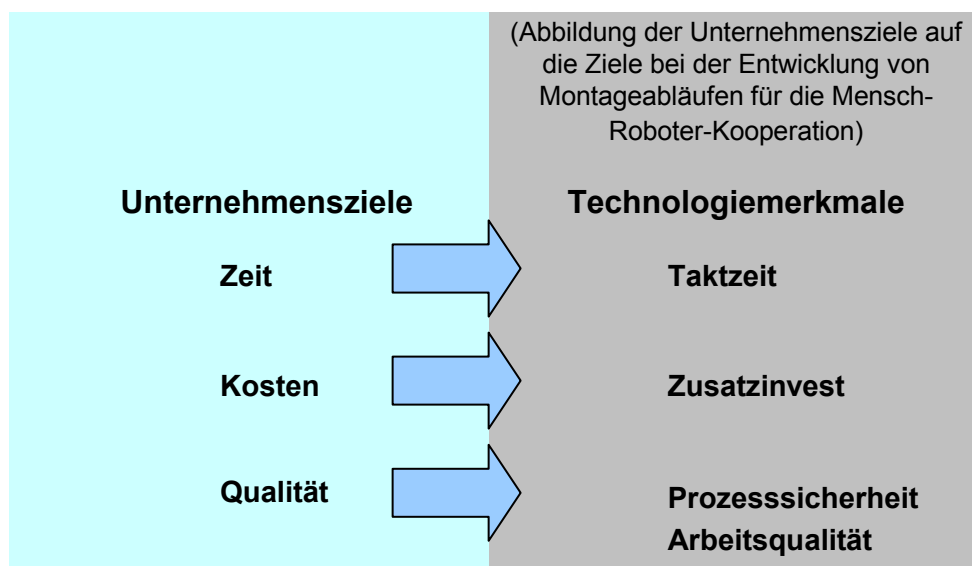


Bild 4.1: Abbildung der Unternehmensziele auf den Bereich der Montage

Die Qualität wird in zweierlei Hinsicht berücksichtigt: Zum einen ist ein Technologiemerkmale die Qualität des betrachteten Montageschritts. Diese Qualität drückt sich in der Prozesssicherheit des Schrittes aus. Geyer [Gey-99] sieht die ergonomischen Eigenschaften eines Arbeitssystems ebenfalls als Qualitätsaspekt und führt die „Arbeitsqualität“ ein. Diese wird im vorliegenden Bewertungssystem ebenfalls berücksichtigt, da ein Grund für den Einsatz von Robotertechnik die Verbesserung der Ergonomie und der Arbeitssicherheit sein kann. Die

Arbeitsqualität wird allerdings nur im Falle der Ergonomie-Kriterien herangezogen, da sie für alle anderen Kriterien nicht sinnvoll ist.

Das Bewertungssystem sieht also vor, die Fähigkeit des Menschen bzw. des Roboters daran zu messen, wie sich die Ausprägungen der einzelnen Kriterien hinsichtlich der Technologie-merkmale Taktzeit, Zusatzinvest, Prozesssicherheit und Arbeitsqualität verhalten. Dieser Katalog von Technologiemerkmale erfüllt die Forderungen, die Dehlinger [Deh-94] in der Beschreibung seiner Methode zur Design-Bewertung stellt. Die Faktoren sind voneinander unabhängig und der Katalog ist vollständig. Ausgewählt wird nach der Fähigkeit des Merkmals, eine allgemeine Aussage über die Fähigkeit der Ressourcen Mensch und Roboter treffen zu können.

#### **4.2.2 Skalierung der Bewertung**

Bei der Bewertung werden die Zielerfüllungsgrade verschiedener Alternativen miteinander verglichen und somit die optimale Lösung identifiziert. Um diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen, ist es notwendig, die Zielerfüllungsgrade der Alternativen auf einer Skala abzutragen.

Auf Grund der teilweise nicht messbaren, „weichen“ Kriterien des Kataloges, die eine objektive Zuordnung einer Technologie zu einem kardinalen Skalenwert unmöglich machen, wird die Bewertung mit Hilfe einer Ordinalskala vorgenommen. Ordinalskalen geben an, ob eine Alternative als besser, schlechter oder gleichwertig gegenüber einer anderen Alternative anzusehen ist. Diese Fähigkeiten sind ausreichend, um das Technologieauswahlproblem abzubilden.

Es stehen zwei ordinale „Skalentypen“ zur Auswahl: „besser, schlechter, gleichwertig“ und eine „Skala“ mit einer ausschließlichen Aussage „besser, schlechter“. Der Vorteil der ersten Variante liegt in Ihrem höheren Detaillierungsgrad. Die zweite Variante bildet dagegen den eigentlichen Kern des Gesamtproblems exakter ab. Da nicht für jedes Merkmalspaar aus Ausprägung und Technologiemerkmale eindeutig entschieden werden kann, ob der Mensch oder der Roboter die besseren Fähigkeiten aufweist, wird die Möglichkeit einer gleichwertigen Bewertung erhalten und der erste Skalentyp wird eingesetzt.

Um einen Eignungsgrad in der Form eines Zahlenwertes angeben zu können und eine Aggregation der Deliberationsstufen zu ermöglichen, werden die ordinalen Skalenwerte in eine kardinale Skala übertragen. Bild 4.2 veranschaulicht, wie die Aussagen über die Fähigkeit einer Technologie in kardinale, verrechenbare Skalenwerte übertragen werden.

Ordinale Skalenwerte	Fähigkeit einer Technologie	Kardinale Skalenwerte
besser	100%	1
gleichwertig	50%	0,5
schlechter	0%	0

Bild 4.2: Bewertungsurteile und zugehörige Skalenwerte

### 4.2.3 Aggregation der Einzelbewertungen

Nachdem die fähigkeitsorientierte Mensch/ Roboter-Entscheidung durch die Deliberation auf eine tiefere Ebene verlagert wurde, die objektive Teil-Urteile ermöglicht, werden diese Einzelurteile nun durch Aggregation zu einem Gesamturteil zusammengefasst.

Die Fähigkeitsentscheidung auf Ebene der Technologiemerkmale wird in zwei Stufen zu einer Aussage für die einzelne Ausprägung  $A_{hg}$  aggregiert. Basis für diese Aggregation ist die auf der Technologiemerkmale-Ebene getroffene ordinale und objektive „besser, schlechter, gleichwertig“ Entscheidung.

Wie Bild 4.3 darstellt, wird in der 1. Stufe der Aggregation die Bewertung der Technologiemerkmale in eine Aussage für die globalen Unternehmensziele, Zeit, Kosten und Qualität überführt.

Da für die Zielgrößen Zeit und Kosten in der ersten Stufe der Deliberation jeweils nur ein Unterpunkt in der zweiten Stufe der Deliberation existiert, wird das Ergebnis aus den Unterpunkten direkt übernommen.

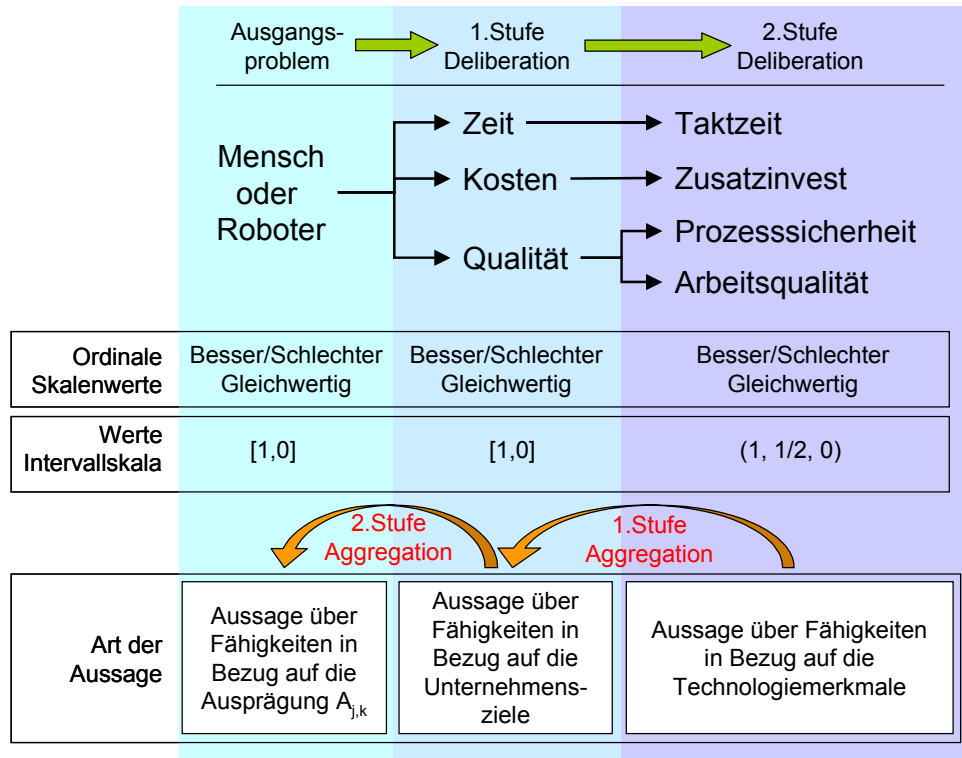


Bild 4.3: Aggregation der Entscheidung auf Technologiemerkmalebene zu einer Aussage für Mensch und Roboter

Im Falle des Qualitätsaspekts existieren jedoch für die Ergonomie-Kriterien zwei Unterpunkte in der zweiten Stufe der Deliberation. Die Aussage der Technologiemerkmale Prozesssicherheit und Arbeitsqualität wird nach

$$Qualität_{1.Stufe} = \frac{TM_P + TM_A}{2} \quad \text{Gleichung 4.5}$$

in eine Aussage für das Unternehmensziel Qualität überführt. Dadurch entsteht für die Ebene der Unternehmensziele eine Aussage über die Fähigkeit zu Qualität für beide Ressourcen, die normiert ist und die beiden Technologiemerkmale gleichwertig berücksichtigt.

Für die Kriterien, die nicht in den Bereich Ergonomie fallen, entfällt das Technologiemerkmale Arbeitsqualität als Unterpunkt des Qualitätsaspekts. Die Aggregation der Bewertungsergebnisse für das Technologiemerkmale „Prozesssicherheit“ zu einer Aussage für das Unternehmensziel Qualität erfolgt analog zur Aggregation der Ergebnisse von Taktzeit und Zusatzinvest.

Die zweite Stufe der Aggregation überführt die Fähigkeitsurteile der Unternehmenszielebene in eine objektivierte Aussage über die Fähigkeiten von Mensch und Roboter in Bezug auf die



Ausprägung  $A_{hg}$ . Die kardinal skalierten Fähigkeitskennzahlen für die einzelnen Unternehmensziele werden zu einer Gesamtaussage aggregiert:

$$F_{ges} = \frac{F_Z + F_K + F_Q}{3} \quad \text{Gleichung 4.6}$$

Der Fähigkeitsindex, der somit abschließend für Mensch und Roboter erzeugt wird, bewegt sich im abgeschlossenen Intervall  $[0,1]$ .

Die Gleichgewichtung der Unternehmensziele Zeit, Kosten und Qualität ist auf die Feststellung von Bullinger und Warnecke [Bul-96] zurückzuführen, die besagt, dass sich die Tendenz zeigt, die Bedeutung der Zeit, mit der der beiden anderen Zielgrößen gleichzusetzen.

Damit liegt für jede Ausprägung der Kriterien des Kriterienkataloges eine Fähigkeitskennzahl vor, die im Wertebereich zwischen 0 und 1 liegt. Dieser erarbeitete Kern des Bewertungssystems ist allgemein gültig und muss in einem späteren Einsatz nicht mehr angepasst werden.

In einem nächsten Schritt werden Gewichte für die einzelnen Kriterien bestimmt, da nicht alle Kriterien dieselbe Relevanz für die Gesamtaussage für die Montageoperation  $O_i$  haben.

#### 4.2.4 Gewichtung der Kriterien für die Fähigkeitsorientierung

Um die Frage nach der Relevanz der einzelnen Kriterien für die Automatisierungsfähigkeit der Vorrangelemente objektiv zu beantworten, wurde im Rahmen der Expertenbefragung aus Kapitel 3.1 auch nach der Wichtigkeit der Kriterien für die Entscheidung für oder gegen einen Robotereinsatz gefragt (Bild 3.2).

Die Umfrageergebnisse werden wie folgt in Gewichtungsfaktoren überführt:

Zunächst werden den ordinal skalierten Werten „(sehr) wichtig“, „teilweise wichtig“ und „fast/ganz unwichtig“ kardinale Skalenwerte zugeordnet. Dieser Schritt ist notwendig, um bei der späteren rechnerischen Ermittlung der Eignungsgrade das Gewicht der Kriterien berücksichtigen zu können. Die ordinalen Werte werden einer kardinalen Skala mit den Werten 1, 2, 3 zugeordnet:

(sehr) wichtig	=	3
teilweise wichtig	=	2
fast/ganz unwichtig	=	1

Diese ordinalen Skalenwerte stellen den Mittelwert von Klassen dar, die durch die Abstufungen der Wichtigkeit beschrieben werden.

Über eine Gewichtung der Expertenantworten wird ein Durchschnittswert für die Relevanz eines Kriteriums errechnet. Der Gewichtungsfaktor  $\alpha_h$  eines Kriteriums errechnet sich aus der Summe der Produkte aus prozentualer Anwohrtäufigkeit und dem zu einer Antwort gehörenden Skalenwert 1, 2 oder 3.

$$\frac{\text{Anteil "Wichtig"}}{100} * 3 + \frac{\text{Anteil "TeilweiseWichtig"}}{100} * 2 + \frac{\text{Anteil "Fast / GanzUnwichtig"}}{100} * 1 = \alpha_h$$

Gleichung 4.7

Für die Ausprägungen „Kriterium für Operation nicht relevant“ wird ein Gewichtungsfaktor mit dem Wert 0 angesetzt, da in diesem Fall das Kriterium nicht in die Berechnung des Eignungsgrades eingehen soll.

### 4.3 Berechnung des Eignungsgrades von Mensch und Roboter

Bild 4.4 stellt die erarbeitete Vorgehensweise zur Berechnung der allgemein gültigen Fähigkeitskennzahlen dar.

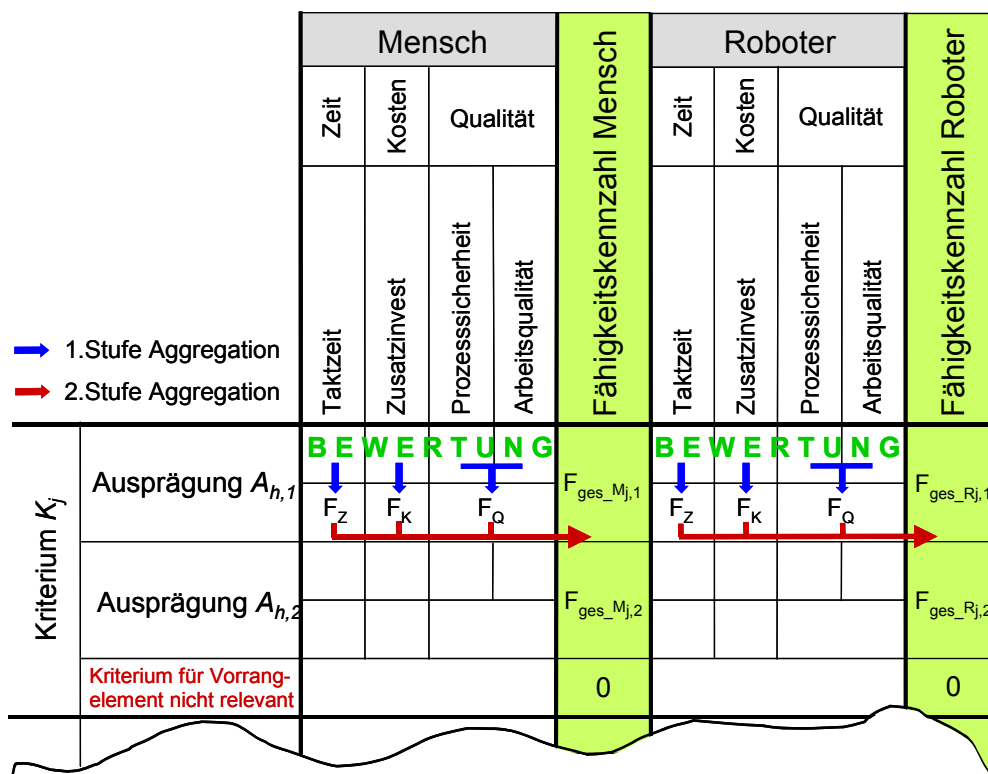


Bild 4.4: Berechnung der Fähigkeitskennzahlen durch Aggregation

Die Aggregation überführt die Fähigkeitskennzahlen der Ebene der Unternehmensziele in Fähigkeitsindizes für Mensch  $F_{ges\_Mj,k}$  und Roboter  $F_{ges\_Rj,k}$ . Diese Fähigkeitsindizes geben

an, ob sich eher der Mensch oder eher der Roboter im Falle des Auftretens der Ausprägung  $A_{hg}$  zur Durchführung der Montageaufgabe eignet.

Der zweite Schritt, der für jeden betrachteten Prozess einer Montageplanung individuell durchzuführen ist, ist die Prozessanalyse. Durch Auswahl der passenden Ausprägungen für jedes Kriterium werden die Montageoperationen  $O_i$  charakterisiert. Dieser Vorgang der Prozessanalyse wurde aus mathematischer Sicht in Kapitel 4.1 als Multiplikation des Ausprägungsvektors eines jeden Kriteriums mit dem dort definierten Auswahlvektor beschrieben.

Kriterium	Ausprägung	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$
$K_1$	$A_{1,1}$	1	0	0	0	1	0
	$A_{1,2}$	0	1	1	0	0	1
	$K_1$ für $O_i$ nicht relevant	0	0	0	1	0	0
$K_2$	$A_{2,1}$	1	0	1	1	0	1
	$A_{2,2}$	0	1	0	0	1	0
	$K_2$ für $O_i$ nicht relevant	0	0	0	0	0	0
$K_3$	$A_{3,1}$	0	0	0	0	0	0
	$A_{3,2}$	1	0	0	1	0	0
	$A_{3,3}$	0	1	0	0	1	1
	$K_3$ für $O_i$ nicht relevant	0	0	1	0	0	0

1 = Auf eine Montageoperation  $O_i$  zutreffende Ausprägung  $A_{h,g}$   
 0 = Auf eine Montageoperation  $O_i$  nicht zutreffende Ausprägung  $A_{h,g}$

Bild 4.5: Prozessanalyse durch Wahl der auf  $O_i$  zutreffenden Ausprägungen

Abschließend werden die für jede Ausprägung allgemein ermittelten Fähigkeitskennzahlen mit der Prozessanalyse für jede einzelne Montageoperationen  $O_i$  verbunden. Dabei wird entsprechend Bild 4.6 vorgegangen: Die Fähigkeitsindizes der Ausprägungen, die durch die Prozessanalyse für die Montageoperation  $O_i$  ausgewählt wurden, werden mit dem Gewichtungsfaktor  $\alpha_h$  multipliziert. Für Mensch und Roboter werden die gewichteten Eignungsgrade aufsummiert. Um einen Eignungsgrad für Mensch und Roboter zu erhalten, der mit anderen Montageoperationen vergleichbar ist, wird der Eignungsgrad normiert. Dazu wird in einem letzten Schritt der Eignungsgrad durch die Summe der vergebenen Gewichte  $\alpha_{ges}$  geteilt. Dadurch ergibt sich für die Eignungsgrade ein Wert zwischen 0 und 1.

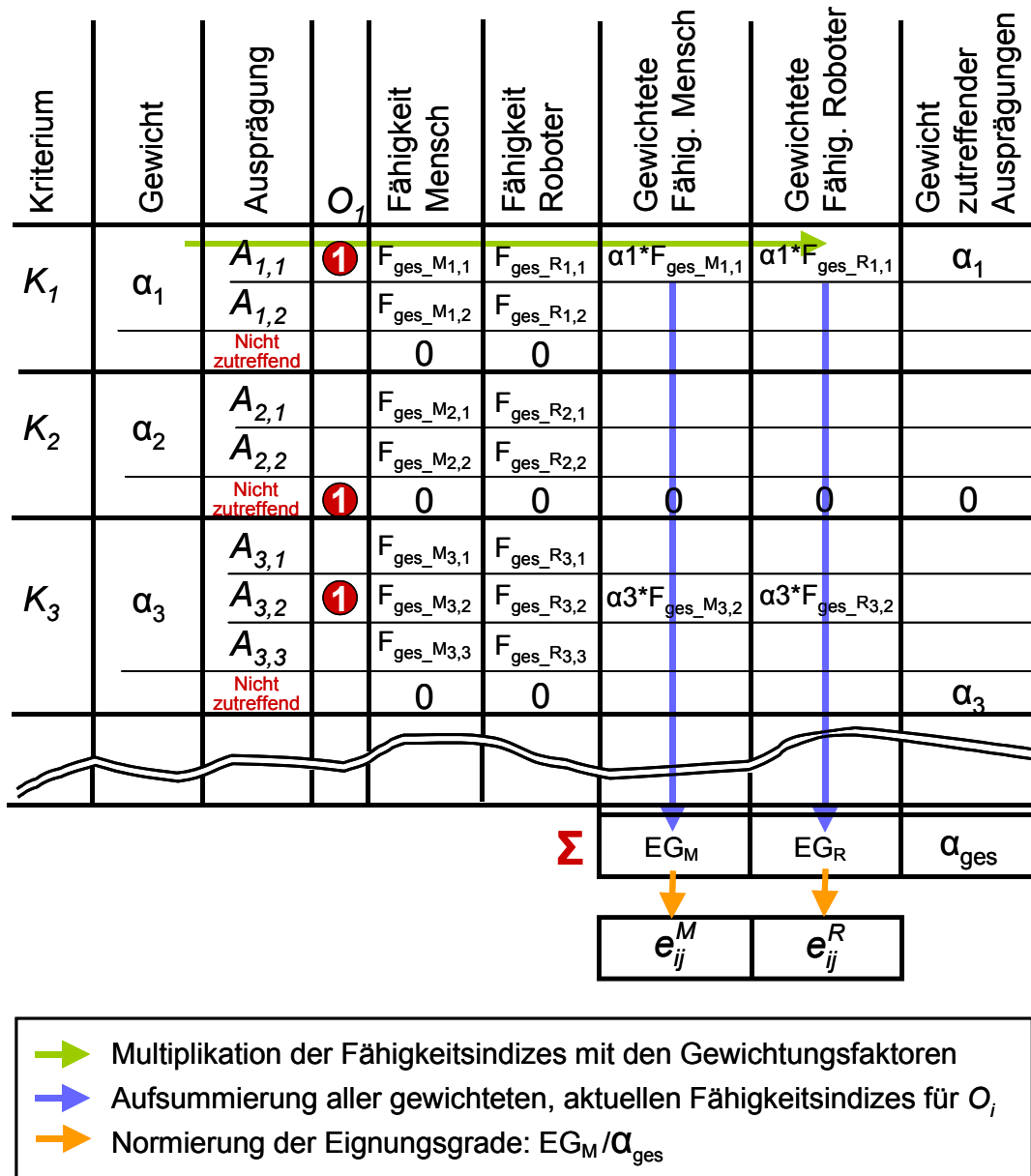


Bild 4.6: Berechnung der Eignungsgrade

Durch die Aussage über die individuellen Fähigkeiten von Mensch und Roboter in Bezug auf jede Montageoperation kann unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen ein optimaler Montageauftrag für Mensch ( $M_M$ ) und Roboter ( $M_R$ ) erzeugt werden.

Betrachtet man das Bewertungstool aus Sicht der entscheidungstechnischen Grundlagen, lassen sich folgende Aussagen treffen:

Bei der hier betrachteten Mensch/Roboter-Entscheidung, handelt es sich um eine multikriterielle Entscheidung zwischen zwei Alternativen, die „unter Sicherheit“ gefällt wird. Die Frage ob der Mensch oder der Roboter die besseren Fähigkeiten in Bezug auf ein Vorrangelement aufweist, wird aufgrund der Fähigkeiten beider Ressourcen auf der Technologiemerkmale-

ebene entschieden und dann zu einer Gesamtaussage aggregiert. Diese Technologiemerkmale und der Kriterienkatalog stellen eine Vielzahl von Kriterien dar, die zur Bewertung der Alternativen herangezogen werden. Die Entscheidung soll unter den aktuell vorherrschenden technologischen Voraussetzungen gefällt werden, was den Aspekt der Sicherheit rechtfertigt. Die Elemente einer Entscheidung sind wie in Bild 4.7 dargestellt abgebildet:

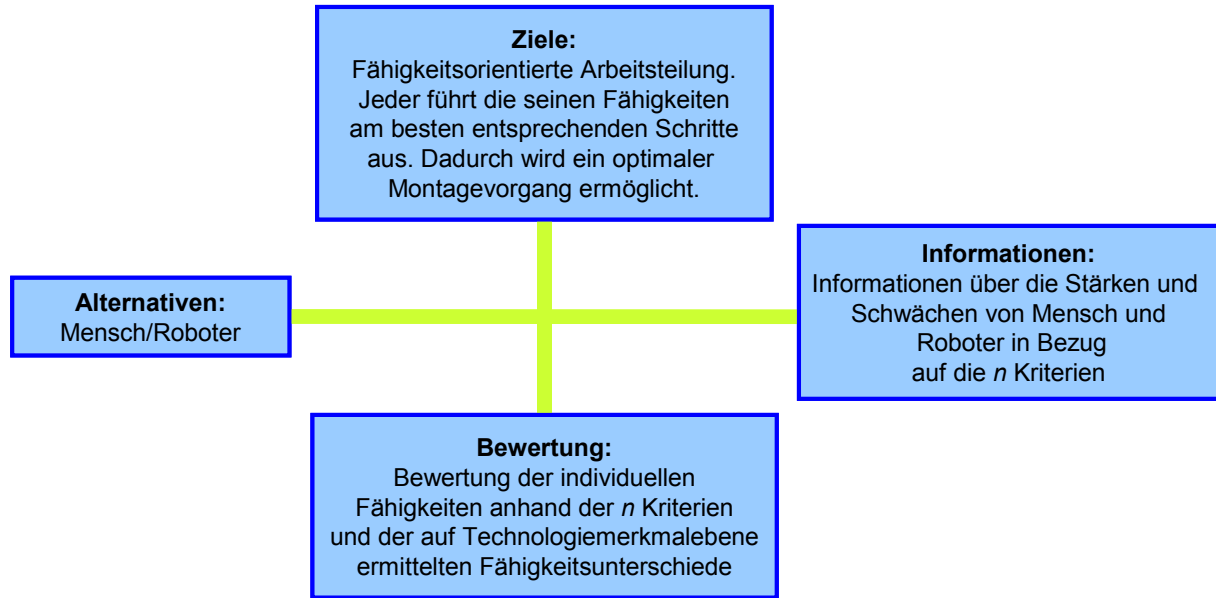


Bild 4.7: Elemente der Mensch/Roboter-Entscheidung

Das strukturell vorgestellte Bewertungssystem muss mit Daten gefüllt werden, um eine wissenschaftlich fundierte Aussage darüber zu liefern, weshalb einer Technologie, jeweils im Vergleich zur anderen, die besseren Fähigkeiten zugesprochen werden.

Die Bewertung wird nach folgendem Schema vorgenommen:

$K_j$	$A_{j,k}/A_{j,k+1}$	$TM_T$	$TM_Z$	$TM_P$	$TM_A$	$F_{ges\_M/R}$	
Kriterium	Ausprägung k	$T_M$	$F_{T\_M}$	$F_{I\_M}$	$F_{P\_M}$	$F_{A\_M}$	$F_{ges\_M}$
		$T_R$	$F_{T\_R}$	$F_{I\_R}$	$F_{P\_R}$	$F_{A\_R}$	$F_{ges\_R}$
	Ausprägung k+1	$T_M$	$F_{T\_M}$	$F_{I\_M}$	$F_{P\_M}$	$F_{A\_M}$	$F_{ges\_M}$
		$T_R$	$F_{T\_R}$	$F_{I\_R}$	$F_{P\_R}$	$F_{A\_R}$	$F_{ges\_R}$

mit

- $TM_T$ : Technologiemerkmale Taktzeit
- $TM_Z$ : Technologiemerkmale Zusatzinvest
- $TM_P$ : Technologiemerkmale Prozesssicherheit
- $TM_A$ : Technologiemerkmale Arbeitsqualität

Bild 4.8: Allg. Darstellung der Bewertung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter

Für jede Ausprägung eines Kriteriums und für jedes Technologiemerkmale wird für Mensch und Roboter wie beschrieben eine Fähigkeitskennzahl bestimmt. Dabei ergeben die Kennzahlen für Mensch und Roboter für jedes Technologiemerkmale in der Summe stets eins. Am Ende einer jeden Zeile ist abschließend für jede Technologie ein Fähigkeitsindex in Bezug auf die betrachtete Ausprägung angegeben, der sich durch die beschriebene Aggregation der Einzelergebnisse ergibt. Somit ist ein Bewertungssystem erarbeitet worden, das messbare Daten für die Optimierung der Montageabläufe liefert.

## 5 Konzeption eines Systemmodells und Verfahrens zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in Mensch-Roboter-Kooperationszellen

### 5.1 Systemmodell und Verfahren für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation

Der Entwurf eines Verfahrens zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle setzt ein eindeutiges Systemmodell voraus, das die drei Modellkomponenten Montagevorrangmodell, Vorgehensmodell und Montageablaufmodell umfasst und dessen theoretische Grundlagen im Folgenden erarbeitet werden.

Als Eingangsgrößen für das Verfahren zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle werden die ermittelten Eignungsgrade für Mensch und Roboter, die erzielten Ergebnisse aus der Untersuchung der Montage (Montagevorranggraph) sowie die entsprechenden Prozesszeiten in Form des Montagevorrangmodells bereitgestellt.

Das Vorgehensmodell beschreibt die Vorgehensweise und das zu verwendende Verfahren zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle aus dem Montagevorrangmodell.

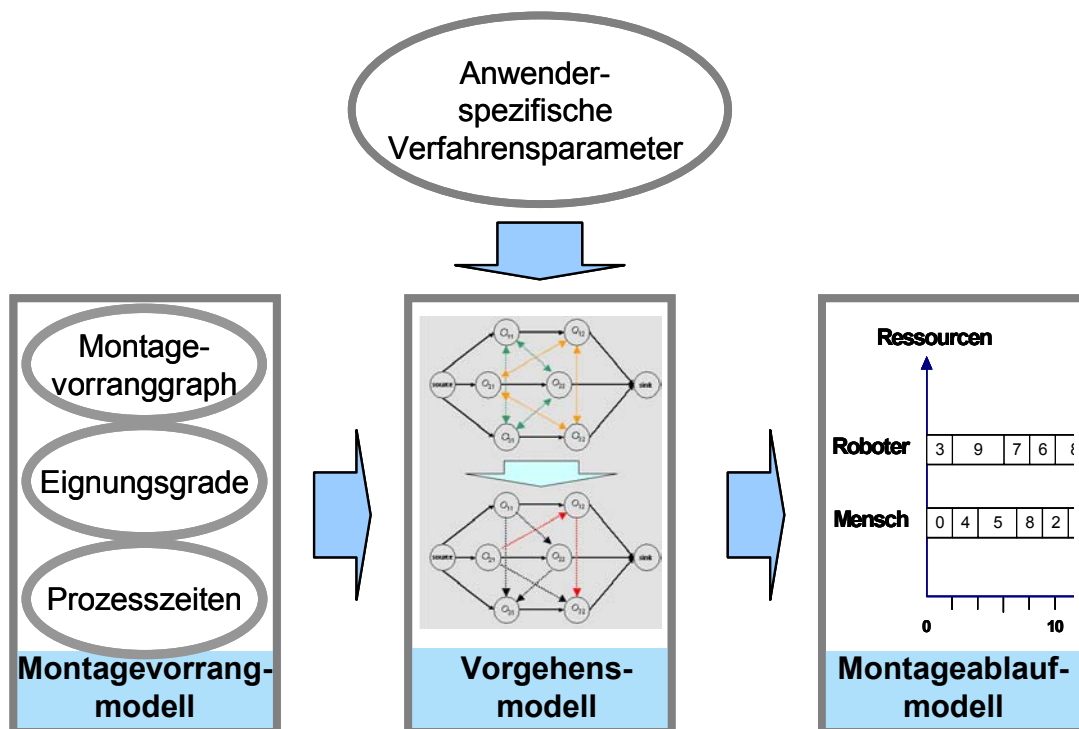


Bild 5.1: Systemmodell für die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle

Das Verfahren zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle soll durch den Anwender entsprechend der zu bearbeitenden Problemstellung parametrisierbar sein. Die Ergebnisse des Entwicklungsverfahrens werden in einem Montageablaufmodell abgebildet.

### 5.1.1 Beschreibung des Montagevorrangmodells mit Graphen

Zur Erstellung des Montagevorrangmodells werden die Ergebnisdaten aus der Berechnung der Eignungsgrade für Mensch und Roboter, die Daten des Montagevorranggraphen sowie die Prozesszeiten für die einzelnen Montageoperationen als Eingangsdaten herangezogen (Bild 5.2).

Eingangsdaten	Beschreibende Attribute	Modellkomponente
Eignungsgrade für Mensch und Roboter für die einzelnen Montageoperationen	Fähigkeitsorientierte Komponente der Optimierung	Matrix der Eignungsgrade für Mensch und Roboter
Präzedenzbeziehungen zwischen den einzelnen Montageoperationen	Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Montageschritten	Graphendarstellung der Montagevorgänge
Prozesszeiten für die einzelnen Montageoperationen für Mensch und Roboter	Zeitliche Komponente der Optimierung	Matrix der Prozesszeiten

Bild 5.2: Eingangsdaten zur Beschreibung des Montagevorrangmodells

#### Matrix **E** zur Beschreibung der Eignungsgrade im Montagevorrangmodell

Die Ergebnisdaten aus der Berechnung der Eignungsgrade für die einzelnen Montageoperationen für Mensch und Roboter werden in einer Matrix **E** abgelegt. Die Zeilen der Matrix **E** repräsentieren die einzelnen nummerierten Montageoperationen, die erste Spalte der Matrix repräsentiert die Eignungsgrade des Menschen für die einzelnen Montageschritte, die zweite Spalte die des Roboters. Der schematische Aufbau der Matrix **E** für die Abbildung der Eignungsgrade der Montageoperationen ist in Bild 5.3 dargestellt. Die Matrix **E** ist eine  $(n \times 2)$ -Matrix. Dabei ist  $n$  die Anzahl der Montageoperationen, die eingeplant werden sollen. Die Matrix **E** ist im Allgemeinen eine Rechteckmatrix und somit nicht symmetrisch.



### Matrix T zur Beschreibung der Prozesszeiten im Montagevorrangmodell

Die Matrix **T** entspricht in ihrem Aufbau der Matrix **E** mit dem Unterschied, dass die Spalten der Matrix **T** die Prozesszeiten repräsentieren (Bild 5.3).

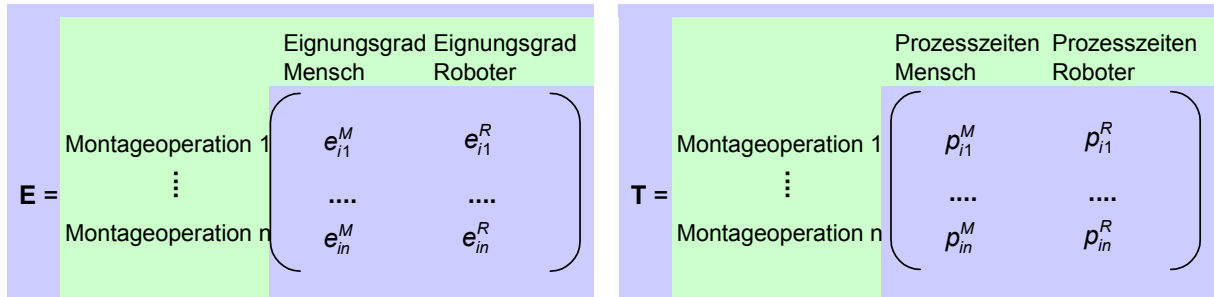


Bild 5.3: Schematische Darstellung der Matrizen **E** und **T**

### Graph G zur Beschreibung der Präzedenzbeziehungen zwischen den Montageschritten

Die Präzedenzbeziehungen zwischen den einzelnen Montageoperationen der Montageaufgabe werden durch den azyklisch ungerichteten Graphen **G** der Montage und eine Adjazenzabbildung, die jedem Montageschritt seine Nachfolger zuordnet, repräsentiert. Der Graph  $G = \{V, C\}$  besteht aus der Menge seiner Knoten **V** und seiner Kanten **C**.

Die Menge seiner Knoten (vertices) besteht aus allen Montageoperationen  $O_{ij}$  erweitert um zwei fiktive Knoten, einem Ausgangs- (Quelle, source) und einem Endknoten (Senke, sink).

$$V = \{O_{ij} \mid 1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2\} \cup \{\varepsilon_1 = \text{source}, \varepsilon_2 = \text{sink}\} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

Die Menge der konjunktiven Kanten (conjunctive arc set) stellt die Präzedenzrelationen zwischen den Montageschritten (Operationen) eines Auftrags dar.

$$C = \{(O_{ij}, O_{kl}) \mid O_{ij}, O_{kl} \in V, (i = k \vee j = l) \wedge (O_{ij} \rightarrow O_{kl})\} \quad \text{Gleichung 5.2}$$

Die Adjazenzabbildung gibt an, dass zwischen dem Knoten *i* und dem Knoten *j* eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung besteht und beschreibt damit die Beziehungen, die zwischen den einzelnen Montageoperationen eingehalten werden müssen. Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den *n* Knoten des Graphen **G** dient die (*n* x *n*) – Adjazenzmatrix **A** von **G**:

$$\mathbf{A}(\mathbf{G}) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{Gleichung 5.3}$$

mit den Elementen

$$\mathbf{A}(\mathbf{G}) = \begin{cases} a_{ij} = 1, & \text{falls } (i, j) \in B \\ a_{ij} = 0, & \text{falls } (i, j) \notin B \end{cases} \quad \text{mit } (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n)$$

mit der Kantenmenge

$$B = \{(J_i, J_l) \mid J_i \rightarrow J_l, \text{ mit } 1 \leq i, l \leq n\}.$$

Die Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}$  eines Graphen  $\mathbf{G}$  ist im Allgemeinen keine symmetrische Matrix. Jeder Montageschritt  $j$  mit  $(i, j) \in V$  heißt Nachfolger von Montageschritt  $i$  und die Menge  $N(i) = \{j : (i, j) \in V\}$  heißt Nachfolgermenge von Montageschritt  $i$ .

Ist für jeden Montageschritt  $i$  die Liste seiner Nachfolger bekannt, so ist der Graph durch die Nachfolgerlisten vollständig dargestellt. Statt Nachfolger können auch Vorgänger verwendet werden.

Bild 5.4 zeigt ein Beispiel eines Graphen  $\mathbf{G}$  zur Beschreibung der Präzedenzbeziehungen zwischen Montageschritten mit seiner zugehörigen Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}(\mathbf{G})$ .

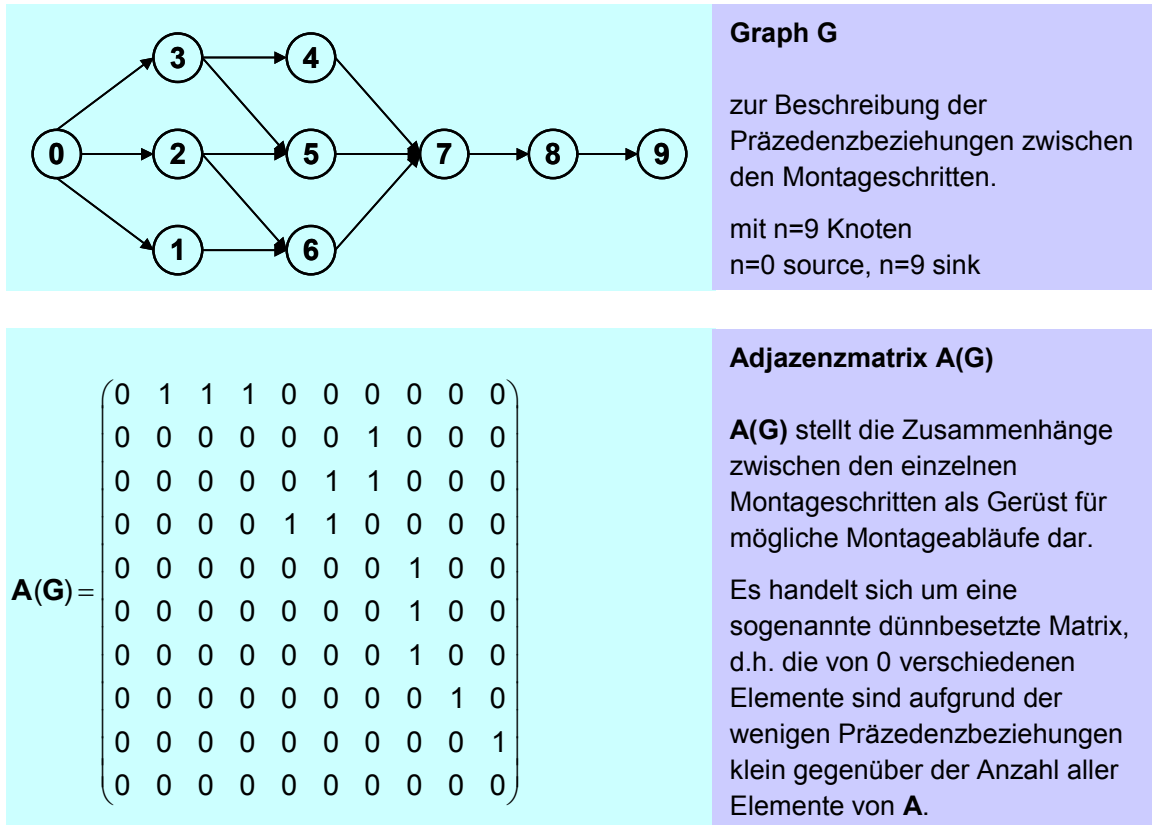


Bild 5.4: Beispiel von Präzedenzbeziehungen zwischen Montageschritten und ihrer Darstellung durch den Graphen G und die Matrix  $A(G)$

### Graph $G^*$ der möglichen Ressourcenbelegungen

Bei der Ermittlung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperation ist es nötig, die einzelnen Montageoperationen auf Mensch und Roboter aufzuteilen. Für einen solchen Ablauf existiert eine endliche Anzahl Varianten. Diese Varianten werden von einer entsprechenden Menge Graphen  $G^*$  repräsentiert. Die Graphen  $G^*$  enthalten neben den Knoten  $V$ , die die einzelnen Montageoperationen darstellen, und den konjunktiven Kanten  $C$ , die die Präzedenzbeziehungen zwischen den Montageoperationen repräsentieren, eine Menge disjunktiver Kanten  $D$  (disjunctive arc set, disjunctive edges), die jeweils die einer Ressource zugewiesenen Montageoperationen verbinden.

$$D = \left\{ (O_{ij}, O_{kl}) \mid O_{ij}, O_{kl} \in V, (i = k \vee j = l) \wedge (O_{ij}, O_{kl}) \notin C \wedge (O_{kl}, O_{ij}) \notin C \right\} \text{ Gleichung 5.4}$$

Diese Darstellung geht auf die graphentheoretische Darstellung des Job-Shop Scheduling Problems von Roy und Sussmann [Roy-64] zurück.

## 5.1.2 Vorgehensweise und Verfahren

Das Vorgehensmodell zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation beschreibt die Überführung des Montagevorrangmodells in ein Montageablaufmodell. Dazu kommt zur Ermittlung der Montageabläufe und somit auch zur Verteilung der Montageoperationen auf Mensch und Roboter ein mehrkriterielles Optimierungsverfahren zum Einsatz. Unter dem Einfluss anwenderbestimmter Randbedingungen wird in einem iterativen Ablauf ein spezifischer Montageablaufplan entwickelt.

### 5.1.2.1 Vorgehensweise zur Entwicklung der Montageabläufe

Zu Beginn werden zunächst die Graphen  $G^*$  aller Montageabläufe im Netzwerk der konjunktiven Kanten  $C$  erstellt. Mögliche Verteilungen der Montageoperationen  $O_{ij}$  werden repräsentiert durch die disjunktiven Kanten  $D$  ihres Graphen. Weiter werden anfangs alle Startzeiten der Montageoperationen auf ihren auftragsbezogen frühestmöglichen Startzeitpunkt gesetzt. Damit erhält man die vollbesetzte, zunächst teilweise unbestimmte Matrix  $\mathbf{S}_0$  mit den Elementen

$$S_{0_{ik}} = \max(s_{i,k-1} + p_{k-1}, s_{hl} + p_{hl})$$

da sich die frühestmögliche Startzeit der Operation  $O_{ik}$  durch das Maximum der Fertigstellungszeiten der Vorgängeroperation desselben Auftrags auf derselben Ressource bestimmt.

Im nächsten Schritt wird unter Einsatz eines Optimierungsverfahrens iterativ vorgegangen. In jeder Iterationsstufe werden Operationsreihenfolgen für Mensch und Roboter und alle Startzeiten der einzelnen Operationen als Bestandteil des Montageablaufmodells ermittelt. Um den Entwicklungsfortschritt zu gewährleisten, werden die Zwischenergebnisse des Optimierungsverfahrens in jeder Iterationsstufe mit der Bewertung aus der Fähigkeitsanalyse abgeglichen (Bild 5.5).

Mit den spezifisch für den Montageablauf und dessen Randbedingungen entwickelten Operationsfolgen für Mensch und Roboter im Graphen  $G_s$  und den einzelnen Startzeiten  $s_{ik}$  wird die Matrix der Startzeiten  $\mathbf{S}_0$  in die operationsfolgenspezifische Matrix der Startzeiten  $\mathbf{S}_{OF}$  überführt. Zusammen mit den ermittelten Operationsfolgen ist damit das Montageablaufmodell eindeutig festgelegt.

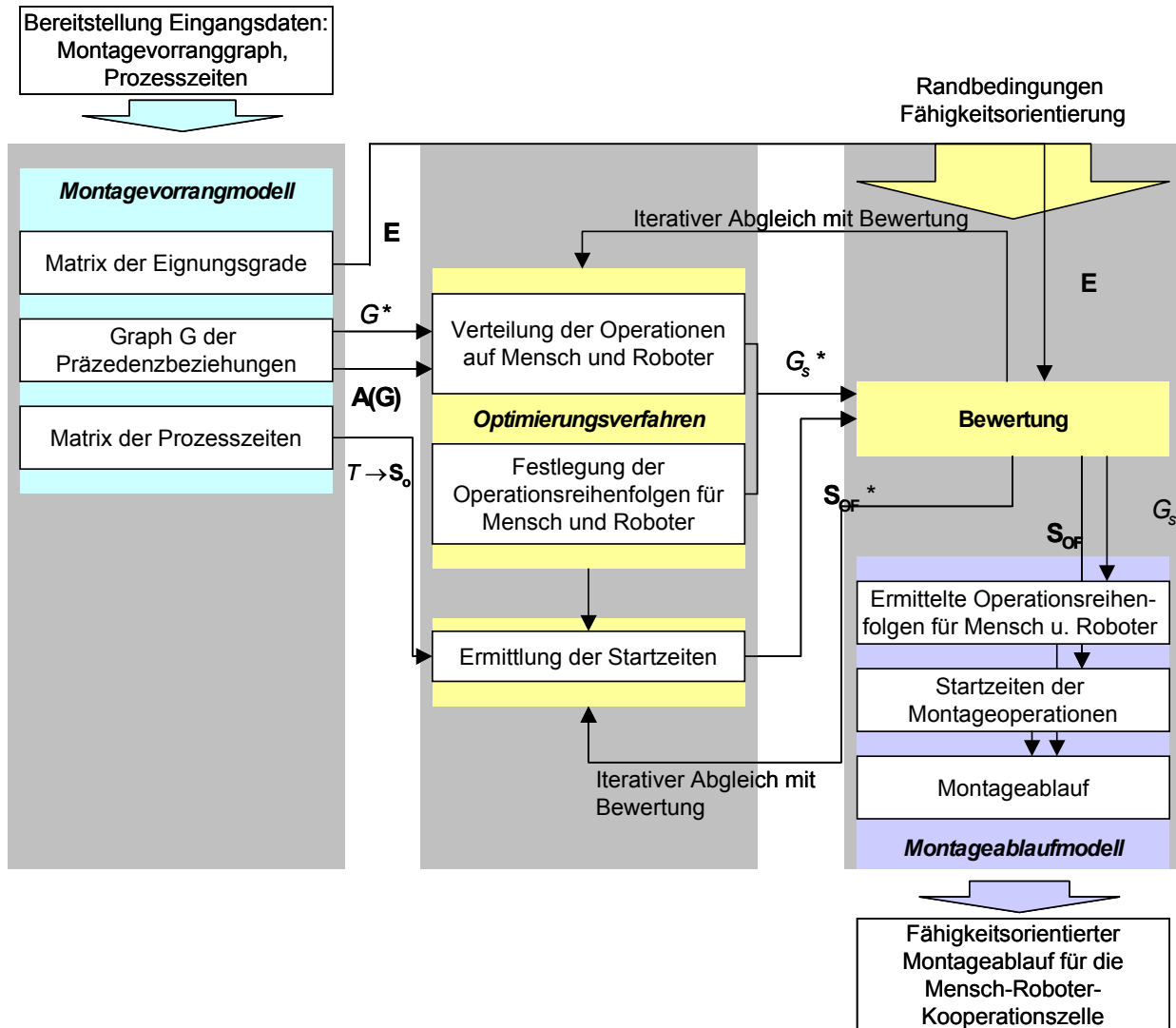


Bild 5.5: Vorgehensmodell des Verfahrens zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation

### 5.1.2.2 Vorgehensweise zur Entwicklung der Operationsreihenfolgen für Mensch und Roboter

Die Operationsreihenfolgen für Mensch und Roboter bestehen aus zwei Komponenten: Die Montageoperationen werden Mensch und Roboter zugeteilt und es wird jeweils eine Reihenfolge für Mensch und Roboter gebildet. Diese beiden Aufgaben werden von dem eingesetzten Optimierungsverfahren übernommen.

Die Graphen  $G^*$  besitzen gerichtete sowie ungerichtete Kanten. Zur sukzessiven Bestimmung einer vollständigen und zulässigen Zuordnung zwischen den Ressourcen (Mensch und Roboter) und den Montageschritten müssen den Kanten  $d \in D$  in  $G^* = (V; C \cup D)$  Orientierungen zugewiesen werden, so dass keine Zyklen (gerichtete Kreise) entstehen, Bild 5.6a.

Die disjunktiven Kanten  $d \in D$  in  $G^* = (V; C \cup D)$  zwischen Operationen werden zunächst entsprechend deren Wertebereich an alternative Ressourcen festgelegt. Anschließend werden die disjunktiven Kanten in konjunktive umgewandelt, wodurch eine Reihenfolge der Operationen auf den Ressourcen festgelegt wird. Am Ende dieses Prozesses existieren ausschließlich gerichtete Kanten, d. h. es gilt  $D = \emptyset$ . Der dadurch entstandene azyklische Digraph  $G_s$  beschreibt eine Sequenz, d.h. einen zulässigen Montageablaufplan, Bild 5.6b.

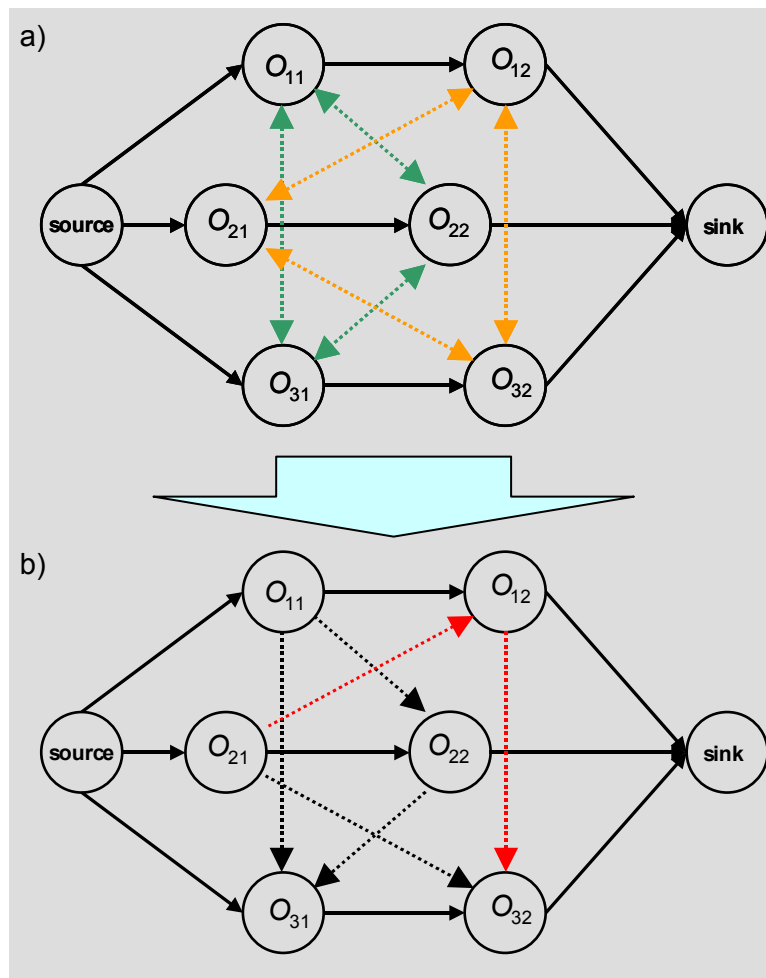


Bild 5.6: Überführung eines Graphen  $G^*$  in einen azyklischen Digraph  $G_s$

### 5.1.2.3 Vorgehensweise zur Entwicklung der Matrix der Startzeiten

Zur Überführung der zunächst teilweise unbestimmten Eingangs-Matrix der Startzeiten  $S_0$  in die operationsfolgenspezifische Matrix der Startzeiten  $S_{OF}$  wird eine Vorgehensweise konzipiert, die auf dem hybriden Giffler-Thompson Algorithmus von Bierwirth und Mattfeld [Bie-99] basiert. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Generierung der Menge der Anfangsoperationen  $A = \{O_{i1} | i = 1, \dots, n\}$  aller Aufträge  $J_i$ .
2. Identifizierung der Montageoperation  $O_{ij}$  aus  $A$  mit der frühestmöglichen Fertigstellungszeit, die sich iterativ aus der Summe aus ihrer Startzeit (aus Matrix  $\mathbf{S}_0$ ) und der Prozessdauer ergibt:

$$c_{ij} = s_{ij} + p_{ij}.$$

Bei diesem Schritt füllt sich die Matrix  $\mathbf{S}_0$  iterativ mit den entsprechenden Werten.

3. Bestimmung der Ressource  $M_{\mu_i(j)}$  (Mensch oder Roboter), auf der  $O_{ij}$  ausgeführt werden soll. Diese Information wird aus dem Ergebnis des Optimierungsverfahrens entnommen, das den Graphen  $G_s$  bestimmt.
4. Ermittlung der Menge  $D$  aller auf Ressource  $M_{\mu_i(j)}$  einplanbaren Operationen, die vor der Fertigstellungszeit  $c_{ij}$  starten können, wobei gilt

$$D := \{O_{ij} \in A | \mu_i(j) = M\}.$$

5. Bestimmung der Operation  $O'_{ij} \in D$  mit dem frühestmöglichen Startzeitpunkt

$$s_{ij}^* : \forall O'_{ij} \in D : s_{ij}^* \leq s_{ij}.$$

6. Bestimmung einer neuen Menge  $D$  der einplanbaren Operationen gemäß:

$$D := \left\{ O_{ij} \in D \mid s_{ij}^{**} \leq s_{ij}^* + \delta(c_{ij} - s_{ij}^*) \right\}.$$

Dieser Vorgang beschreibt die Konstruktion eines Zeitfensters. Dabei ist  $s_{ij}^*$  die untere Schranke des Zeitfensters.

7. Auswahl einer Operation aus dem Zeitfenster, die obigen Forderungen genügt, zur Einplanung. D.h. der Montageoperation  $O_{ij}$  wird ihre Startzeit  $s_{ij}^{**}$  zugewiesen.

Diese Vorgehensweise produziert für  $\delta = 0$  aktive und für  $\delta = 1$  aktive, unverzögerte Montageablaufpläne. Dabei bestimmt  $\delta(c_{ij} - s_{ij}^*)$  die Länge der möglichen Wartezeiten von Mensch und Roboter zwischen einzelnen Operationen.

Die so ermittelten  $s_{ij}^{**}$  stellen die Elemente der operationsfolgenspezifischen Matrix der Startzeiten  $\mathbf{S}_{OF}$  dar.

### 5.1.3 Montageablaufmodell

Das Montageablaufmodell für einen Montageablauf in der Mensch-Roboter-Kooperations-Zelle wird durch die Bestandteile „azyklischer Digraph“, „Matrix der Startzeiten“ und ein Gantt-Diagramm beschrieben.

Bestandteil des Ablaufmodells	Beschreibung
azyklische Digraph $G_s$	Operationsreihenfolgen für Mensch und Roboter
Matrix der Startzeiten $S$	Startzeiten der einzelnen Operationen " auf" Mensch und Roboter
Gantt-Diagramm	Visualisierte Gesamtdarstellung des Montageablaufs und der Kooperation

Bild 5.7: Bestandteile des Montageablaufmodells

Beim azyklischen Digraph  $G_s$  (Digraph = disjunktiver Graph) handelt es sich um einen Graphen  $G^*$ , der einer vollständigen Selektion unterzogen wurde und somit ausschließlich gerichtete Kanten besitzt. Damit ist sowohl dem Menschen als auch dem Roboter eine eindeutige Operationsfolge zugeteilt. Dabei ist der ausgewählte Digraph  $G_s$  Resultat des Optimierungsverfahrens.

Die Belegung der operationsfolgenspezifischen Matrix der Startzeiten  $S_{OF}$  gibt an, wann die einzelnen Montageschritte von Roboter und Mensch gestartet werden. Sie ist kein direktes Resultat des Optimierungs-Algorithmus sondern nutzt den Digraphen  $G_s$  als Basis zur Erzeugung der einzelnen Startzeiten der Operationen.

Der gültige Prozessplan wird durch ein Gantt-Diagramm visualisiert. Ein Beispiel für ein Gantt-Diagramm ist in Bild 5.8 gegeben.

Die Kästchen stellen die einzelnen Montageschritte dar, wobei ihre Länge der Bearbeitungsdauer entspricht. Dem Gantt-Diagramm können die kooperierenden Arbeitssequenzen von Mensch und Roboter entnommen werden.

Im Gantt-Diagramm fließen die Informationen aus dem Digraph  $G_s$  und der Matrix  $S$  zusammen.



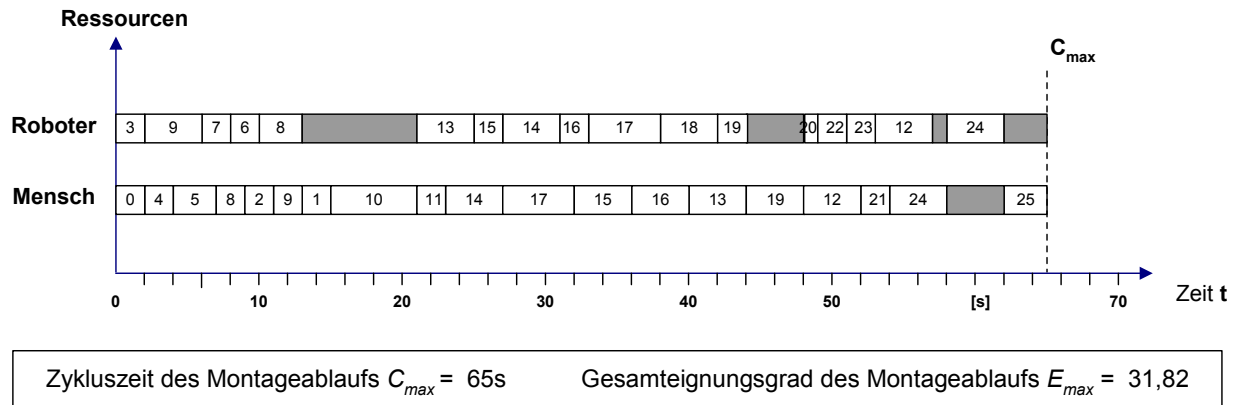


Bild 5.8: Gantt-Diagramm eines pareto-optimalen Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperation (Nummerierung im Diagramm bezieht sich auf Aufträge)

## 5.2 Mögliche Verfahren zur multikriteriellen Optimierung für die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation

Das flexible Job-Shop-Scheduling Problem (FJSSP) ist als multikriterielles Optimierungsproblem wegen seiner hohen Anzahl von Freiheitsgraden mit den exakten oder analytischen Methoden der klassischen Optimierungstheorie entweder gar nicht oder zumindest nicht befriedigend lösbar. Anstelle dieser klassischen Verfahren treten die vor ca. 50 Jahren eingeführten und in den letzten Jahrzehnten verstärkt weiterentwickelten heuristischen Verfahren wie Evolutionäre Algorithmen, Simulated Annealing, Tabu-Search oder Bottleneck-Heuristiken.

In diesem Kapitel werden verschiedene Gesichtspunkte bezüglich der Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Lösung des FJSSP, das als MOP zu der Klasse der NP-schweren Probleme gehört, im Hinblick auf seine Anwendung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation diskutiert. Es wird im Folgenden zunächst eine Lösung für das FJSSP im mehrkriteriellen Fall gesucht, die dann im weiteren Verlauf der Arbeit hinsichtlich der direkten Mensch-Roboter-Kooperation spezifiziert wird.

Zur Vorbereitung der Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens werden zunächst Merkmale der zugrundeliegenden Problemstellung untersucht. Sowohl das FJSSP im Allgemeinen als auch das Mensch-Roboter-Kooperationsproblem im Speziellen sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Beide Probleme gehören zu der Klasse der kombinatorischen Optimierungsprobleme. Demzufolge beschränkt sich die Suche nach optimalen Lösungen auf einen endlichen und diskreten Lösungsraum, d.h. es gibt nur endlich viele Lösungsalternativen und die Entscheidungsvariablen besitzen diskrete Wertebereiche.

- Das FJSSP und somit auch das Mensch-Roboter-Kooperationsproblem bestehen aus einem dualen Problem: Die Aufträge werden geeigneten Ressourcen zugeordnet, auf denen dann zulässige Operationsfolgen gebildet werden.
- Beide Probleme sind einer hohen Anzahl von Restriktionen unterworfen, die Mensch-Roboter-Kooperation in noch höherem Maße als das FJSSP im Allgemeinen. Hierbei sind die harten Randbedingungen ausschlaggebend, die technologischer Natur und nicht mehr relaxierbar sind.
- Die hohe Anzahl voneinander abhängiger, epistatischer Entscheidungsvariablen erhöht die Komplexität des Suchraums.

Obige Charakteristika bilden zusammen mit den im Folgenden diskutierten Kriterien die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens.

Zur Lösung eines Optimierungsproblems können im Allgemeinen mehrere Verfahren in Betracht gezogen werden. Die Verfahren wurden bzgl. ihrer Eignung auf der Basis folgender Vergleichskriterien untersucht:

#### Verträglichkeit mit der Problemstellung

Aufgrund ihrer kombinatorischen Struktur scheiden analytische (indirekte) Verfahren zur Optimierung des FJSSP und für die Ablaufplanung in kooperierenden Mensch-Roboter-Zellen aus. Es werden also nur direkte Verfahren in Betracht gezogen werden, die keinerlei analytische Eigenschaften und Informationen über die Zielfunktion benötigen. Direkte Optimierungsverfahren, zu denen auch alle evolutionsbasierten Ansätze und Branch and Bound Methoden gehören, versuchen, durch Parametervariation an bekannten Lösungen bessere zu finden. Die dabei gefundenen Lösungen müssen nicht zwangsläufig das absolute Optimum sein.

#### Effizienz im komplexen Suchraum

Unter der Effizienz der Suche in komplexen Lösungsräumen versteht man die Möglichkeit, neben lokalen Optima auch das, sofern existent, absolute Optimum zu finden. Genetische Algorithmen (GA), Simulated Annealing (SA) und Tabu-Search (TS) besitzen dadurch, dass sie unter gewissen Umständen auch Verschlechterungen der Lösung in Kauf nehmen, prinzipiell das Potential, das absolute Optimum auffinden zu können. Branch and Bound Algorithmen sind dagegen grundsätzlich auf die Detektion des absoluten Optimums ausgelegt. Simulated Annealing und Tabu-Search sind ebenso eher auf das Finden des absoluten Optimums ausgelegt, da sie iterativ immer nur eine Lösung suchen. Auf Grund ihrer parallelen Suche auf einer Menge von Alternativlösungen sind GA sämtlichen lokalen Verfahren prinzipiell überlegen.

### Multimodalität

Multimodale Zielfunktionen besitzen mehrere lokale Optima:

$$\exists \varepsilon > 0, y \in \left\{ x^* \in X \mid d(x, x^*) < \varepsilon \right\} \Rightarrow F(x) \leq F(y)$$

wobei  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}^+$  ein geeignetes Abstandsmaß (z.B. euklidischer Abstand oder Hamming Distanz) in  $X$  ist. Dabei können sich lokale Optima in ihren Zielfunktionswerten stark unterscheiden. Es wird daher ein absolutes Optimum  $x^* \in X$  gesucht, für das gilt

$$\forall y \in X: F(x^*) \leq F(y).$$

Die Vorteile des Genetischen Algorithmus beruhen auf seiner inhärenten Parallelität: Während Simulated Annealing an einem einzigen Punkt im Suchraum startet und ein lokales Suchverfahren realisiert, durchläuft der Genetische Algorithmus den Suchraum an vielen Stellen gleichzeitig. Daher ist die Gefahr geringer, dass der Suchprozess in einem lokalen Optimum stagniert.

### Flexibilität

Evolutionäre Verfahren und vor allem GA nehmen im Gegensatz etwa zu Branch and Bound Algorithmen keine zeitaufwändigen Abschätzungen oberer und unterer Schranken vor. Bei Problemen mit vielen Parametern führt dieses Vorgehen oftmals zu langen Rechenzeiten. Wenn eine vorherige analytische Abschätzung nur schwer möglich ist, liefern evolutionäre Verfahren durch ihre inhärente Parallelität besonders schnell ein Bild des Lösungsraums und jener Teilmengen dessen, die tendenziell gute Lösungen enthalten. Zudem sind sie sehr allgemeine Optimierungsverfahren und eignen sich als Grundalgorithmus eines hybriden Optimierers. Ihre Kombination mit lokalen exakten sowie heuristischen Suchmethoden hat sich bisher als erfolgreich erwiesen.

### Optimalitätsgarantie

Ebenso wie die meisten Heuristiken geben auch die GA keine Optimalitätsgarantie. Im Gegensatz dazu konvergiert SA unter bestimmten Voraussetzungen mit der Wahrscheinlichkeit 1 gegen die optimale Lösung. Aufgrund ihrer Komplexität können bei realen Problemen meistens nur Lösungen sub-optimaler Qualität erwartet werden.

### Parameterkonfiguration

Die Suchqualität der genetischen Algorithmen hängt sehr empfindlich von der Parameterkonfiguration ab. Dies ist eine Schwachstelle sämtlicher stochastischer Methoden, da ein großer Teil der benötigten Parameter einen stochastischen Charakter aufweist.

Von den untersuchten Verfahren erfüllen die Genetischen Algorithmen die erforderlichen Bedingungen an einen Problemlöser zur Behandlung des flexiblen Job-Shop-Scheduling Problems und somit auch zur fähigkeitsorientierten Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation am besten. Die Bewertung der verschiedenen Optimierungsverfahren ist in Bild 5.9 zusammengefasst.

Kriterien	Optimierungsverfahren				
	Genetische Algorithmen	Simulated Annealing	Tabu Search	Branch and Bound	Threshold Accepting
Problemverträglichkeit	●	●	●	●	○
Effizienz	●	●	○	○	○
Robustheit	●	●	○	○	○
Flexible Gestaltung	●	○	○	○	○
Optimalitätsgarantie	○	○	○	●	○
Parametrisierung	○	○	○	○	○

Legende	
●	entspricht den Anforderungen
○	entspricht partiell den Anforderungen
○	entspricht den Anforderungen nicht

Bild 5.9: Bewertung verschiedener Optimierungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei der Ablaufplanung in kooperierenden Mensch-Roboter-Systemen

### 5.3 Lösung des multiobjektiven flexiblen Job-Shop-Scheduling Problems mit Hilfe von genetischen Algorithmen für die Ablaufplanung

Die genetischen Algorithmen zeigen, im Gegensatz zu den meisten anderen Verfahren, ein unkompliziertes Verhalten und eignen sich daher besonders gut zur Lösung von Problemen mit hochgradig stochastischem Charakter wie dem FJSSP, da sie mit einem Minimum kodierten Wissens über das zu optimierende Problem auskommen und da, im Gegensatz zu den meisten analytischen Verfahren, keine Differenzierbarkeitseigenschaften der Zielfunktion vorausgesetzt werden müssen.

Bei der Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme durch genetische Algorithmen gibt es vielfältige Ansätze zur Handhabung der Zielkriterien. Die am meisten verbreiteten Techniken sind:

- **Aggregationsansatz:** Bei dieser Methode wird ein MOP in ein SOP transformiert, indem der Zielfunktionsvektor durch Linearkombination seiner Komponenten in eine eindimensionale Zielfunktion umgewandelt wird.
- **Wechselnde Ziele:** Der VEGA (Vector-Evaluated Genetic Algorithm) [Saf-85] bewertet und selektiert die Individuen einer Population abwechselnd bezüglich eines Kriteriums, um so approximative Ergebnisse für die verschiedenen Optima zu erhalten.
- **Nischentechniken:** Ein Vertreter der Klasse von Algorithmen, die zur Lösung von MOP's Nischentechniken nutzt, ist der von Horn [Hor-93] entwickelte NPGA (Niche-Pareto Genetic Algorithm). Die Autoren versuchen durch Generierung und Erhaltung von Nischen die verschiedenen lokalen oder globalen Optima sukzessive zu approximieren.
- **Pareto-basierte Ansätze:** Diese Verfahren nutzen ausgiebig das Konzept der Pareto-Dominanz, um bezüglich aller Zielkriterien möglichst diplomatische Lösungen eines MOP zu erhalten. Ein Vertreter dieser Klasse von Algorithmen ist der von Deb [Deb-01] entwickelte NSGAII (Nondominated Sorting Genetic Algorithm). Die grundlegende Idee der NSGA-Algorithmen basiert auf der Transformation der  $n$  Zielkriterien in ein einziges Fitnessmaß durch die Klassifizierung der Individuen in Pareto-Fronten [Deb-00], der Anwendung nischenerhaltender Verfahren innerhalb jeder der Fronten und einer graduellen Fitnessbestimmung.

Dem in dieser Arbeit verwendeten multikriteriellen genetischen Algorithmus wird die Strategie des Pareto-basierten Ansatzes zugrunde gelegt, da sie am unempfindlichsten auf die geringen Informationen bezüglich des Zielfunktionsraums reagiert, die im Fall der Ablaufplanentwicklung für die fähigkeitsorientierte Mensch-Roboter-Kooperation vorliegen.

### 5.3.1 Grundkonzept

Da in der Literatur kein multikriterielles FJSSP beschrieben wird, welches mit Hilfe eines multikriteriellen genetischen Algorithmus gelöst wird, besteht in diesem Punkt Entwicklungsbedarf. Deshalb wird zunächst im Grundkonzept eine Lösungsstrategie für das FJSSP mit Hilfe eines GA konzipiert. Darauf aufbauend wird in Kapitel 6 eine Spezifizierung dieser Lösungsstrategie für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle vorgenommen und das Verfahren zur Erzeugung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation entwickelt.

Ausgehend vom Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II) nach Deb [Deb-01] werden nachfolgend problemspezifische Verfahrensvarianten konzipiert, um eine effiziente

Lösung der Optimierungsaufgabe bei der Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation zu erreichen. Beim NSGA II handelt es sich um einen Algorithmus, der als Grundsatz der Selektion einen pareto-optimalen Ansatz verwendet. Das Verfahren ist elitär, da die Nachfolgeneration jeweils aus den besten Eltern und Nachkommen gebildet wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass der NSGA II heute neben dem SPEA2 und dem MOGA zu den effektivsten Multikriteriellen Genetischen Algorithmen gehört und den anderen beiden stellenweise überlegen ist [Jen-01].

Insbesondere in komplexen Suchräumen ist das Verhalten neuer Verfahrensvarianten aufgrund der anwenderspezifischen Formulierung nur schwer abschätzbar und deshalb im Rahmen der Konzeption nicht vergleichbar [Nis-97]. Dementsprechend muss die Anwendung dieser neuen Verfahrensvarianten in Versuchen mit Benchmarkproblemen ergeben, für welche Anwendungsbereiche die konzipierten Verfahren des genetischen Algorithmus geeignet sind.

Der Einsatz genetischer Algorithmen bei der Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation setzt eine angepasste Formulierung der Optimierungsaufgabe voraus. Im Folgenden wird das Grundkonzept eines flexiblen Job-Shop-Scheduling Problems und eines entsprechenden genetischen Algorithmus entworfen, mit dem anschließend in Kapitel 6 die Lösung der in der Analyse bestimmten multikriteriellen flexiblen Optimierungsaufgabe im Rahmen der Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation möglich wird.

### **5.3.1.1 Modellannahmen**

Beim flexiblen Job-Shop-Scheduling Problem stehen, anders als beim statischen Job-Shop-Scheduling Problem (JSSP), die Ressourcenfolgen (routings) für die Montage-Aufträge nicht a priori fest. Daher besteht also das Problem bei der Lösung des FJSSP's nicht allein in der zeitlichen Zuordnung der Montage-Operationen zu den Ressourcen, sondern vielmehr müssen in einem ersten Schritt Operationen geeignete Ressourcen zugeteilt werden, die dafür ausgelegt sind, diese zu bearbeiten. Wegen des zusätzlichen kombinatorischen Freiheitsgrades ist das FJSSP eine Verallgemeinerung des deterministischen Falls.

Bei dem vorliegenden Problem der fähigkeitsorientierten Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle liegt genau dieser Fall des FJSSP vor. Die zur Verfügung stehenden und fähigen zwei Ressourcen sind Mensch und Roboter und es muss sowohl eine zeitliche Ordnung der Operationen für Mensch und Roboter als auch eine Zuteilung der Operationen zu Mensch und Roboter vorgenommen werden.

Die Modellannahmen für das FJSSP werden wie folgt formuliert:

1. Es existiert eine Menge von  $n$  unabhängigen Aufträgen (jobs)  $J_i$  zu einer gegebenen diskreten Indexmenge  $I$  mit  $i \in I$  und  $I = \{1, \dots, n\}$ .
2. Jeder Auftrag  $J_i$  besteht aus einer oder mehreren Operationen  $O_{ij}$  mit  $j = 1 \dots n_i$ , wobei  $n_i$  die Anzahl der Operationen des Auftrags  $i$  ist. Die Operationen eines Auftrags bilden eine strikt geordnete Menge, d.h. sie werden in einer vordefinierten festen Reihenfolge bearbeitet.
3. Ebenso existiert eine Menge von  $m$  Mehrzweckressourcen, d.h. jede Ressource ist in der Lage mindestens einen Arbeitsschritt eines Auftrags durchzuführen.
4. Jeder Operation  $O_{ij}$  eines Auftrages  $J_i$  kann eine Menge  $M_{ij}$  mit  $M_{ij} \subseteq \{1 \dots m\}$  alternativer Ressourcen zugeordnet werden.
5. Die Charakteristika einer Operation (z.B. ihre Prozessdauer) sind a priori bekannt, aber ressourcenabhängig. Die Prozessdauer einer Operation  $O_{ij}$  auf ihrer  $k$ -ten alternativen Ressource wird mit  $p_{ij}^k$  bezeichnet.
6. Umrüstzeiten sind ablaufunabhängig und in den Prozesszeiten enthalten (da sie als klein gegenüber diesen angenommen werden).
7. Einmal begonnene Operationen können nicht unterbrochen werden (non-preemption condition).
8. Eine Ressource kann zu einem Zeitpunkt  $t$  höchstens eine Operation bearbeiten.
9. Einer Ressource kann mehr als eine Operation eines Auftrags zugeordnet werden.
10. Sämtliche Aufträge sind zu Planungsbeginn verfügbar, d.h. es gibt keine Präzedenzbeziehungen zwischen den Aufträgen.
11. Ziel ist die Optimierung der Prozessabläufe bezüglich einer Menge von Zielkriterien (multikriterielles Optimierungsproblem).

### 5.3.1.2 Mathematische Formulierung des FJSSP

Die Problemstruktur des FJSSP wird im Vergleich zum häufig in der Literatur erwähnten Job-Shop-Scheduling Problem (JSSP) im wesentlichen durch die zusätzliche Berücksichtigung alternativer Ressourcen für Operationen erweitert. Im Folgenden werden die verschiedenen Variablen sowie die Struktur des Suchraums beschrieben. Im Rahmen der in dieser Arbeit betrachteten Probleme sind sämtliche Problemparameter aus  $\square^+$ .

## Variablen

Gegeben sei eine endliche Menge  $J = \{J_1 \dots J_l \dots J_{n_i}\}$  von Aufträgen und eine endliche Menge  $M = \{1 \dots k \dots m\}$  von Ressourcen. Dabei soll jedem Element aus  $J$  eine Teilmenge aus  $M$  zugeordnet werden. Die Lösung  $x$  dieses Zuordnungsproblems ist damit aus dem Produktraum  $J \times M$ , also  $x \subseteq J \times M$ , wobei jedes Paar  $(O_{ij}, k) \in x$  eine zulässige Zuordnung der Operation  $O_{ij}$  zur Ressource  $k$  bedeuten soll. D.h.  $k$  ist Element der Menge der Alternativressourcen von  $O_{ij}$ . Damit ergibt sich der Lösungsraum der Zuordnungen von Aufträgen zu Ressourcen die alle Randbedingungen erfüllen zu

$$X^\mu \subseteq 2^{J \times M} \quad \text{Gleichung 5.5}$$

Dabei ist  $\mu$  der Index der Abbildung von Operationen auf Ressourcen.

Bei gegebener Ressourcenbelegung berechnen sich die Anzahl der Möglichkeiten der Anordnung der Operationen auf den Ressourcen zu:

$$X^\pi = n_1! \cdot n_2! \cdot \dots \cdot n_m! = \prod_{k=1}^m n_k! \quad \text{Gleichung 5.6}$$

$\pi$  ist dabei die Indizierung der Permutationen,  $n_k$  ist die Anzahl der Operationen auf Ressource  $k$  und  $X^\pi$  beinhaltet alle möglichen Permutationen von Aufträgen und Ressourcen.

Eine Lösung  $x$  des FJSSP ist somit

$$x \subseteq X^\mu \times X^\pi \quad \text{Gleichung 5.7}$$

Ohne Beschränkungen der Allgemeinheit können die Operationen  $O_{ij}$  mit ihren Startzeiten  $s_{ij}^k$  oder Fertigstellungszeiten  $c_{ij}^k$  identifiziert werden [Bru-96]. Sowohl den Startzeiten als auch den Fertigstellungszeiten kann daher ein Definitionsbereich  $D_{ij}^{(s,c)}$  zwischen Planungsbeginn 0 und Planungshorizont  $H$  zugeordnet werden:

$$D_{ij}^{(s,c)} = [0, H]. \quad \text{Gleichung 5.8}$$

Im allgemeinen kann  $H = \infty$  angenommen werden. Dies ist für reale Probleme nicht sinnvoll. Eine mögliche obere Schranke für  $H$  ist die Summe aller Prozesszeiten.



## Restriktionen

Grundsätzlich lässt sich zwischen Präzedenzrestriktionen, auch konjunktive Restriktionen genannt, und kapazitiven oder disjunktiven Restriktionen unterscheiden. Die Präzedenzbeschränkungen zwischen Operationen geben die lineare Ordnungsstruktur innerhalb der Aufträge wieder und sind in der Modellannahme 2 verankert. Sie sind von der Form:

$$s_{ij} + p_{ij} \leq s_{ij+1}, \quad 1 \leq j \leq n_i, \quad 1 \leq i \leq n. \quad \text{Gleichung 5.9}$$

Die kapazitiven Restriktionen schließen aus, dass zwei verschiedene Operationen  $O_{ij}$  und  $O_{hl}$ , die dieselbe Ressource  $k$  beanspruchen, gleichzeitig auf dieser Ressource bearbeitet werden. Sie sind in der Modellannahme 8 verankert und von der Form:

$$s_{ij}^k \leq s_{hl}^k + p_{hl}^k \vee s_{hl}^k \leq s_{ij}^k + p_{ij}^k, \quad 1 \leq k \leq m, \quad l \leq n_{i,h}, \quad 1 \leq j, \quad 1 \leq i, \quad h \leq n.$$

Gleichung 5.10

Die unter Modellannahme 7 beschriebene Situation, dass Operationen nicht unterbrochen werden können, drückt sich in der folgenden Restriktion aus, wobei  $O_{ij}$  die Vorgängeroperation von  $O_{hl}$  auf Ressource  $k$  ist:

$$s_{hl}^k \geq s_{ij}^k + p_{ij}^k, \quad 1 \leq k \leq m, \quad l \leq n_{i,h}, \quad 1 \leq j, \quad 1 \leq i, \quad h \leq n. \quad \text{Gleichung 5.11}$$

Die Restriktionen können auch mittels der Fertigstellungszeiten beschrieben werden. Wie oben nehme man an, Operation  $j$  von Auftrag  $i$  benötige Ressource  $k$  zu ihrer Bearbeitung und Operation  $(j-1)$  desselben Auftrags benötige Ressource  $m$ . Für die  $c_{ij}^k$ , und damit für einen gültigen Prozessplan, muss also gelten:

$$c_{ij}^k - p_{ij}^k \geq c_{i-1,j}^m, \quad 1 \leq j \leq n_i, \quad 1 \leq i \leq n. \quad \text{Gleichung 5.12}$$

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass zum Zeitpunkt  $t$  höchstens eine Operation auf einer Ressource bearbeitet wird. Dazu wird angenommen, dass Operation  $h$  von Auftrag  $i$  vor Operation  $j$  von Auftrag  $i$  auf Ressource  $k$  bearbeitet werden soll. Das heißt insbesondere, dass für die betreffenden Operationen bezüglich ihrer Fertigstellungszeit gilt:

$$c_{ij}^k - p_{ij}^k \geq c_{ih}^k, \quad \text{falls } O_{ih}^k \prec O_{ij}^k \quad (*)$$

$$c_{ih}^k - p_{ih}^k \geq c_{ij}^k, \quad \text{falls } O_{ij}^k \prec O_{ih}^k \quad \text{Gleichung 5.13}$$

In Relation (\*) ist  $c_{ij}^k - p_{ij}^k$  gerade die Startzeit von  $O_{ij}$  auf Ressource  $k$ .

### Zielfunktion der Optimierungsaufgabe

Auf Baker [Bak-74] geht die Formulierung des statischen JSSP als ganzzahliges Programm zurück. Dieses Modell wird hier auf den Fall des FJSSP übertragen.

Für praktische Zwecke wird  $H$  als genügend große Zahl angenommen, so dass es möglich ist, innerhalb dieser Zeit alle Aufträge fertigzustellen. Der gewählte Wert für  $H$  ist die Summe aller Prozesszeiten. Im Falle des FJSSP sei

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^{\max}, \quad \text{Gleichung 5.14}$$

wobei der Index *max* angibt, dass aus der Menge der Alternativressourcen für eine Operation  $j$  jeweils diejenige ausgewählt wird, auf der  $j$  maximale Prozessdauer besitzt. Damit ergibt sich für den Planungshorizont  $H$  folgender Wert:

$$H = \sum_{i=1}^n P_i. \quad \text{Gleichung 5.15}$$

Ziel der Optimierungsaufgabe ist es, die durchschnittliche Flussdauer  $\bar{F}$  der Aufträge zu minimieren. Bezüglich der Minimierung von  $\bar{F}$  sind die  $\{c_{ij}^k\}$  die entscheidenden Größen.

Die Fertigstellungszeiten  $\{c_{ij}^k\}$  und die Startzeiten  $\{s_{ij}^k\}$  sind Entscheidungsvariablen, die den Prozessplan bestimmen. Sowohl die konjunktiven Randbedingungen als auch die disjunktiven Restriktionen bezüglich Operationsreihenfolgen werden mit Hilfe folgender Indikatorvariable modelliert:

$$x_{ij}^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{falls Operation } j \text{ von Auftrag } i \text{ auf Maschine } k \text{ an der Stelle } p \text{ bearbeitet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Gleichung 5.16

Um die mittlere Flussdauer  $\bar{F}$  der Aufträge zu minimieren, kann folgendes ganzzahliges Programm formuliert werden:

Zielfunktion: 
$$\min \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad \text{Gleichung 5.17}$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$s_{in_i} + \sum_{\{k:O_{ij} \in O(k)\}} \sum_{p=1}^{n_k} p_{in_i}^k x_{in_i}^{kp} = F_i \quad \text{Gleichung 5.18}$$

Dabei ist  $s_{in_i}$  die Startzeit der letzten Operation von Auftrag  $i$  und  $\sum_{\{k:O_{ij} \in O(k)\}} \sum_{p=1}^{n_k} p_{in_i}^k x_{in_i}^{kp}$  die Prozesszeit der letzten Operation von Auftrag  $i$ . Dargestellt ist die Flussdauer jeden Auftrags  $i$ .

$$s_{ij} + \sum_{\{k:O_{ij} \in O(k)\}} \sum_{p=1}^{n_k} p_{ij}^k x_{ij}^{kp} \leq s_{ij+1} \quad \text{Gleichung 5.19}$$

stellt die Bedingung der Ordnungsstruktur innerhalb der Aufträge sicher in dem Sinne, dass Operation  $O_{ij+1}$  erst nach Beendigung von  $O_{ij}$  gestartet werden kann.

Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass die Startzeit der ersten Operation eines Auftrags größer oder gleich seiner Freigabezeit ist:

$$r_i \leq s_{i1} \quad \forall i. \quad \text{Gleichung 5.20}$$

Die Bedingungen zwischen der Freigabezeit einer Ressource und der ihr zugewiesenen Operationen wird dargestellt durch:

$$s_{ij} + (p_{ij}^k + H)x_{ij}^{kp} - r_{ij}^{kp} \leq H, \quad \{(i, j): O_{ij} \in O(k)\}, \quad p = 1 \dots n_k \quad \forall k$$

$$\text{Gleichung 5.21}$$

Damit ist sichergestellt, dass sämtliche Operationen aus  $O(k)$  innerhalb des Planungshorizonts  $H$  abgeschlossen sind.

Weiterhin muss sichergestellt sein, dass die Operation an der Stelle  $p+1$  in der Warteliste einer Ressource erst nach Beendigung der  $p$ -ten Operation dieser Liste bearbeitet werden darf. Dabei muss die Freigabezeit der betreffenden Ressource nach Beendigung des  $(p+1)$ -ten Auftrags größer oder gleich der des  $p$ -ten Auftrags sein:

$$r^{kp} + Hx_{ij}^{kp+1} - s_{ij} \leq H, \quad \{(i, j): O_{ij} \in O(k)\}, \quad p = 1 \dots n_k \quad \forall k$$

$$r^{kp+1} - r^{kp} \geq 0, \quad , \quad p = 1 \dots n_k \quad \forall k \quad \text{Gleichung 5.22}$$

Die folgende Gleichung stellt sicher, dass die Operation  $(p+1)$  aus  $O(k)$  erst nach der  $p$ -ten Operation aus  $O(k)$  der zugehörigen Ressource zugeteilt wird.

$$\sum_{\{O_j \in O(k)\}} x_{ij}^{kp} - \sum_{\{O_j \in O(k)\}} x_{ij}^{k(p+1)} \geq 0, \quad \forall i, j = 1 \dots n_i \quad \text{Gleichung 5.23}$$

Zusätzlich darf eine Ressource zu einem Zeitpunkt t höchstens einen Arbeitsgang ausführen

$$\sum_{\{O_j \in O(k)\}} x_{ij}^{kp} \leq 1, \quad p = 1 \dots n_k \quad \forall k \quad \text{Gleichung 5.24}$$

und es wird sicher gestellt, dass eine Operation genau einer Ressource zugeteilt ist:

$$\sum_{\{k: O_j \in O(k)\}} \sum_{p=1}^{n_k} x_{ij}^{kp} = 1, \quad \forall i, j = 1 \dots n_i \quad \text{Gleichung 5.25}$$

$$x_{ij}^{kp} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad \forall i, j, k, p$$

### Algorithmus für fähigkeitsorientierte Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation

Das Verfahren genetischer Algorithmus wird in der Variante zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle von zwei Hauptschleifen bestimmt. Die äußere Schleife ist für die Generierung neuer Ressourcenbelegungspläne (routing policies) durch genetische Manipulationen zuständig. Die innere Schleife sorgt für die Evaluierung neuer Reihenfolgepläne. Dabei wird eine Optimierung der Zielkriterien vorgenommen, indem simultan beide Problemkomponenten des FJSSP, also jeweils die Bildung der Ressourcenfolgen und Operationsreihenfolgen, einem genetischen Algorithmus unterworfen werden. Die Strategie dieser Modellierung besteht in der Approximation des FJSSP durch eine Folge von dynamischen JSSP. Der Algorithmus basiert auf dem NSGAI [Deb-01], wurde problemspezifisch weiterentwickelt und durchläuft im Einzelnen die folgenden Stadien, die im weiteren Verlauf des Kapitels genauer beleuchtet werden:

1. Zunächst wird eine Ausgangspopulation durch Initialisierung der Ressourcenbelegungschromosomen und der darauffolgend bestimmten Reihenfolgechromosomen erzeugt.
2. Aus der initialen Population werden daraufhin durch die Dekodierungsfunktion zulässige Prozessabläufe entwickelt und für jedes Individuum wird der zugehörige Zielfunktionswert bestimmt.
3. Anschließend werden die Individuen einer Ranking-Prozedur unterworfen und auf diese Weise auf die verschiedenen Pareto-Fronten verteilt.

4. Als Nächstes wird die Dichte jeder Front durch Bestimmung der *crowding-distance* berechnet und zwischen Individuen derselben Front ein *fitnesssharing* entsprechend der *crowding-distance* durchgeführt. In diesem Stadium besitzt ein Individuum eine Fitness, die sich aus seinem Rang und seiner *crowding-distance* zusammensetzt.
5. Daraufgehend werden durch einen Selektionsalgorithmus (Crowded Tournament Algorithmus) Individuen selektiert, in den *mating-pool* gesetzt und Individuenpaare zur Rekombination gebildet.
6. Dann werden jeweils die Ressourcenbelegungschromosomen und Reihenfolgechromosomen gesondert rekombiniert.
7. Anschließend werden ausgewählte Individuen mutiert.
8. Der gesamte Algorithmus stoppt, falls eine bestimmte, vordefinierte Generationenzahl erreicht worden ist, ansonsten beginnt der Prozess erneut bei Schritt 2.

Bild 5.10 zeigt die Ablaufstruktur des beschriebenen Algorithmus.

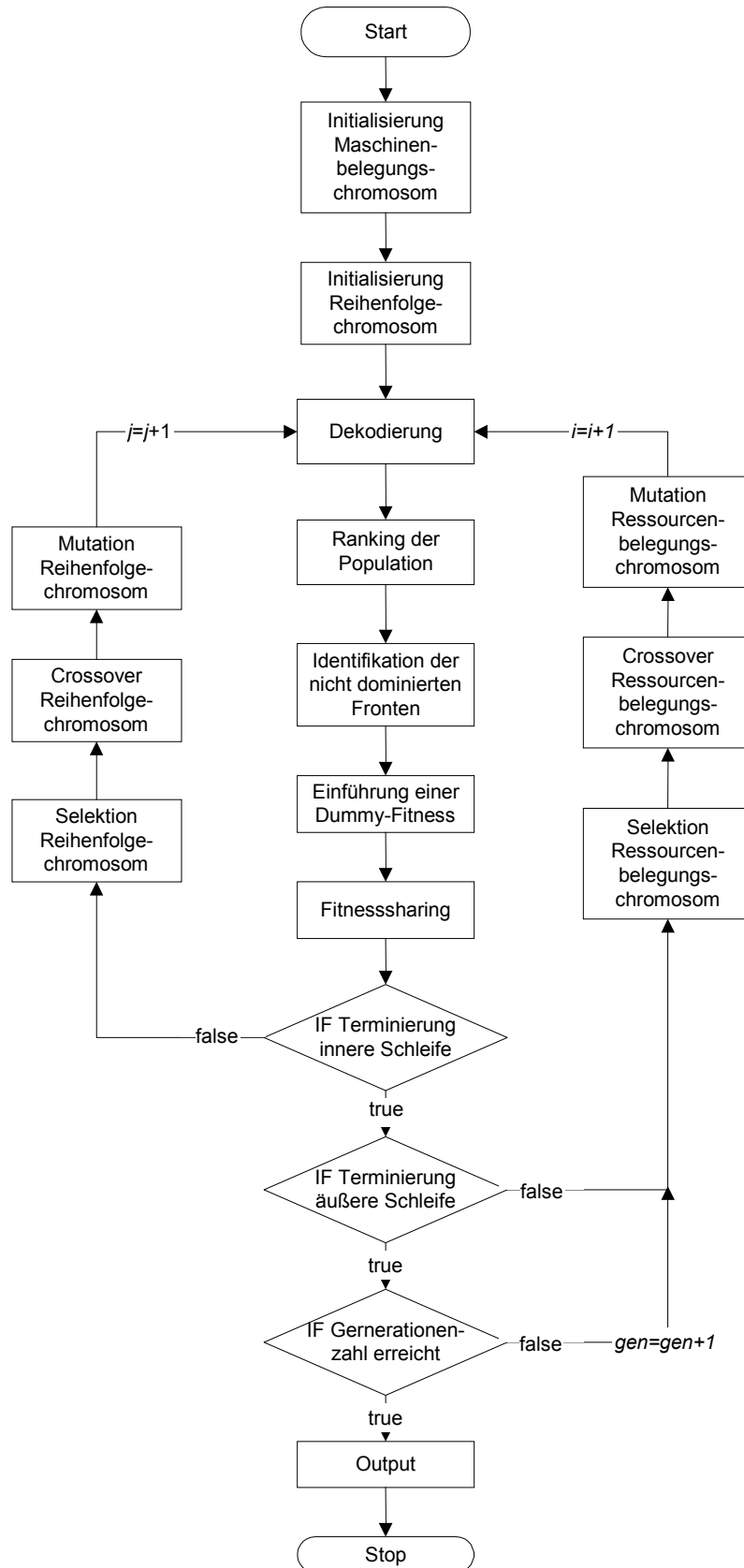


Bild 5.10: Vorgehensweise des Genetischen Algorithmus zur Ablaufplanung in der MRK

### 5.3.2 Genetische Repräsentation der Montageabläufe

Ziel einer genetischen Repräsentation ist eine minimale und vollständige Darstellung einer zulässigen Lösung des Problems. Im Hinblick auf die Optimierungsziele ist es vorteilhaft eine Kodierung zu finden, die bei der Dekodierung nur gültige Lösungen liefert, um den Suchraum möglichst einzuschränken. Außerdem soll eine Kodierung gewährleisten, dass alle in Frage kommenden zulässigen Lösungen berücksichtigt werden können. Eine der Hauptursachen für die Schwierigkeiten bei der Lösung von Job-Shop Scheduling Problemen mit Heuristiken wie den genetischen Algorithmen oder anderen evolutionären Ansätzen ist die wegen der zahlreichen Restriktionen hohe Gefahr der Entstehung unzulässiger Lösungen. Diese äußern sich vor allem in sogenannten Deadlocks (Situation in der Ablaufplanung, in der zwei oder mehrere Prozesse (Operationen) gegenseitig auf die Schaffung der Voraussetzungen für die Weiterführung der eigenen Arbeit warten [Käs-97]). Das Entstehen unzulässiger Lösungen hängt maßgeblich von der gewählten Problemrepräsentation ab.

Für kombinatorische Reihenfolgeprobleme wie der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation im hier untersuchten Fall werden im Allgemeinen ganzzahlige und Permutationskodierungen verwendet ([Bie-96], [Mat-96]), da diese das zugrundeliegende Problem in „natürlicher“ Weise beschreiben. Allerdings werden in anderen Untersuchungsmodellen auch Realzahlkodierungen verwendet, die den Vorteil haben, dass sie durch einfache Vergleich- und Sortierverfahren eindeutig auf Permutationen abgebildet werden können [Knj-02].

In dieser Arbeit werden vor allem die bewährten Methoden der Repräsentation durch Permutationen in Betracht gezogen. Dabei scheinen vor allem die Ansätze von Bierwirth [Bie-96] oder auch der Ansatz von Käschele und Teich [Käs-97] sehr effizient. Diese beiden Ansätze werden im Folgenden in Bezug auf ihre Eignung zur Anwendung auf das FJSSP diskutiert.

Im Falle der symbolischen Repräsentation durch Permutationen mit Wiederholung ist es nicht ohne Weiteres möglich, dass Aufträge mehr als einmal von ein und derselben Ressource bearbeitet werden. Für diesen Fall generierte Reihenfolgen können zu Deadlocks führen. Um diese Probleme zu umgehen, ist es von Vorteil, die Ressourcen in die Planungssituation und damit in die genetische Darstellung der Abläufe mit einzubeziehen. Dies geschieht folgendermaßen: Im Allgemeinen kann ein Individuum, je nach Komplexität des zu bearbeitenden Problems, aus einem oder mehreren Chromosomen bestehen, wobei jedes davon eine abgeschlossene Problemcharakteristik abbilden kann. Im Falle des FJSSP bzw. der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation liegen durch das Hinzukommen nichtdeterminierter Ressourcenfolgen für die Aufträge zwei Problem-Freiheitsgrade vor. Daher besteht in diesem Fall ein Individuum aus

zwei Chromosomen, wobei jedes einen Freiheitsgrad abbildet und beide eindeutig in eine vollständige und zulässige Lösung transformiert werden können. Im ersten Chromosom wird für jede Operation eine Ressourcenbelegung festgelegt (d.h. für jeden Auftrag eine Ressourcenfolge), und im zweiten Chromosom werden dann aufgrund dieser Belegungen Operationsreihenfolgen auf den entsprechenden Ressourcen gebildet. Beide Chromosomen sind also hierarchisch abhängig voneinander in dem Sinne, dass Operationssequenzen nur in Abhängigkeit der Ressourcenzuordnung erzeugt werden können. Auf diese Weise werden nur gültige Abläufe generiert und nur die relevanten Präzedenzrelationen zwischen Operationen in Betracht gezogen. Dies sind zum einen Präzedenzbeziehungen zwischen Operationen gleichen Auftrags und zum anderen solche zwischen Operationen, denen dieselbe Ressource zugeteilt worden ist.

In einem ersten Ansatz wird für die Repräsentation beider Chromosomen eine klassische und weitestgehend problemunabhängige Kodierung durch ganze Zahlen und Permutationen verwendet. Im zweiten Ansatz wird für die Kodierung der Ressourcenbelegung eine Kodierungsstruktur mit Realzahlen verwendet, die ebenso problemunabhängig gehalten ist. Da die Gültigkeit der erzeugten Lösungen vom GA nicht vollends sichergestellt werden kann, wird eine Dekodierungsfunktion (schedule builder) entwickelt, die die Konstruktion zulässiger Schedules aus den Operationsreihenfolgen übernimmt.

### 5.3.2.1 Kodierungsstruktur für die Ressourcenbelegung

#### Ganzzahlige Kodierung

Das Ressourcenbelegungschromosom definiert für jeden Auftrag eine Ressourcenfolge, in der die Operationen der Aufträge von den zugewiesenen Ressourcen bearbeitet werden. Die Länge  $l_{CH}$  eines solchen Chromosoms ist gleich der Anzahl der Operationen. Dabei ist, anders als beim klassischen JSP, die Anzahl der Operationen nicht notwendig gleich der Anzahl der Ressourcen (siehe Modellannahme 9). Insbesondere heißt dies, dass ein Auftrag mehrere Male von derselben Ressourcen bearbeitet werden kann oder Ressourcen auslassen kann.

Das Chromosom ist in  $n$  Teile der Länge  $n_i$  partitioniert, wobei  $n_i$  der Anzahl der Operationen des Auftrags  $i$  entspricht und jedes der Teilsegmente die Ressourcenfolge eines Auftrags repräsentiert. Die Operationen des  $i$ -ten Auftrags werden in der Reihenfolge ihrer Bearbeitung, entsprechend der Präzedenzbeschränkungen innerhalb des Auftrags, in den Loci (Alleles) fest kodiert, wobei die angenommenen Werte an den jeweiligen Stellen der dieser Operation zugewiesenen Ressourcen entsprechen. In Bild 5.11 ist ein solches Chromosom am Beispiel eines Problems mit 3 Ressourcen und 3 Aufträgen mit jeweils 3 Operationen



symbolisch dargestellt. Hierbei wird Auftrag 2 zuerst von Ressource 3, dann von Ressource 2 und zuletzt von Ressource 1 bearbeitet. Aus diesem Chromosom lässt sich bereits der Arbeitsvorrat für jede Ressource bestimmen, wobei Reihenfolgen zunächst noch unberücksichtigt bleiben, da diese erst durch das Reihenfolgechromosom bestimmt werden. Der Arbeitsvorrat für Ressource 2 besteht hier aus den Operationen  $\{O_{12}, O_{22}, O_{32}\}$ .

$O_{11}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$O_{21}$	$O_{22}$	$O_{23}$	$O_{31}$	$O_{32}$	$O_{33}$
1	2	3	3	2	1	1	2	3
Auftrag 1			Auftrag 2			Auftrag 3		

Bild 5.11: Ressourcenbelegungschromosom, ganzzahlig kodiert

### Kodierung mit reellen Zahlen

Eine weitere Möglichkeit der Repräsentation von Ressourcenfolgen besteht in deren Kodierung durch reelle Zahlen [Knj-02]. Die Ressourcenselektion mittels der reellen Repräsentation kann ebenfalls als problemunabhängig bezeichnet werden und ist lediglich von der Anzahl der alternativen Ressourcen einer Operation abhängig. Die ideale Einteilung des Chromosoms ist wie zuvor. Im Folgenden wird ein spezielles Gen betrachtet. Der Wertebereich des Gens entspricht dem Intervall  $[0,1]$ . Das abgeschlossene Einheitsintervall wird äquidistant in  $m_{ij}$  Teilsegmente zerlegt, wobei  $m_{ij}$  der Anzahl der alternativen Ressourcen der  $j$ -ten Operation des  $i$ -ten Auftrags entspricht. Jedes der Teilsegmente entspricht dem Definitionsbereich einer Ressource. Damit bestimmt eine reelle Zahl  $r \in [0,1]$  die zu wählende Ressource für eine Beispieloperation  $O_{ij}$ , mit  $m_{ij} = s$ , wie folgt:

- Ist  $\left[0 \leq r \leq \frac{1}{s}\right]$ , plane  $O_{ij}$  auf Ressource 1 ein.
- Ist  $\left[\frac{1}{s} < r \leq \frac{2}{s}\right]$ , plane  $O_{ij}$  auf Ressource 2 ein.
- ....
- Ist  $\left[\frac{s-1}{s} < r \leq 1\right]$ , plane  $O_{ij}$  auf Ressource  $s$  ein.

Die reelle Zahl  $r$  wird als gleichverteilte Zufallszahl über dem abgeschlossenen Einheitsintervall erzeugt und alle Ressourcen besitzen dieselben Auswahlwahrscheinlichkeiten. Das in

Bild 5.12 dargestellte Beispiel zeigt die resultierenden Ressourcenfolgen für die Aufträge des oben verwendeten Beispielproblems mit 3 Ressourcen und 3 Aufträgen.

$O_{11}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$O_{21}$	$O_{22}$	$O_{23}$	$O_{31}$	$O_{32}$	$O_{33}$
0,22	0,45	0,89	0,10	0,27	0,78	0,67	0,09	0,53

↓

$O_{11}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$O_{21}$	$O_{22}$	$O_{23}$	$O_{31}$	$O_{32}$	$O_{33}$
1	2	3	3	2	1	1	2	3
Auftrag 1			Auftrag 2			Auftrag 3		

Bild 5.12: Beispiel eines mit reellen Zahlen kodierten Ressourcenbelegungschromosoms

### 5.3.2.2 Kodierungsstruktur für Operationsfolgen

Die genetische Repräsentation der Operationssequenzen muss in Abhängigkeit der vorher bestimmten Ressourcenzuweisungen erzeugt werden, da unbestimmt ist, wie oft eine Ressource einen Auftrag bearbeitet oder welche Ressourcen ein Auftrag auslöst. Wieder wird von einem Chromosom bestehend aus Teilsegmenten ausgegangen, wobei jetzt jedes Teilsegment für eine Ressource steht. Die Anzahl der Segmente ist damit gleich der Anzahl der Ressourcen und ihre Länge gleich der Anzahl der zugewiesenen Operationen. Die Segmente müssen damit nicht notwendig gleich lang sein. Zunächst wird für jede Ressource anhand des ersten Chromosoms die Anzahl der von ihr zu bearbeitenden Operationen und deren Identitäten ermittelt. Anschließend werden über Prioritätsregeln oder zufällig die Operationen auf jeder Ressource sequenziert. In Bild 5.13 sind die Operationsfolgen beispielhaft skizziert.

Ressource 1	Ressource 2	Ressource 3
$O_{11}$ $O_{12}$ $O_{13}$	$O_{21}$ $O_{22}$ $O_{23}$	$O_{31}$ $O_{32}$ $O_{33}$

Bild 5.13: Beispiel eines Reihenfolgechromosoms

Die so erzeugten Operationssequenzen werden von der Dekodierungsfunktion als Prioritätsrelationen betrachtet und in Konfliktsituationen zu deren Lösung herangezogen. Das heißt, dass die Operationsreihenfolgen bei der Evaluierung eines Ablaufs nur als sekundäre Entscheidungsinstanz in Anspruch genommen werden und primär die Ressourcenfolgen entscheidend für die Zuteilung der nächsten Operation eines Auftrags verantwortlich sind. Dies wird im Abschnitt über die Dekodierungsfunktion ausführlich diskutiert.

### 5.3.3 Die Dekodierungsfunktion

Die entwickelte Kodierungsstruktur liefert also ein vollständiges Bild eines Ablaufs und ist minimal bezüglich der Modellannahmen. Allerdings übernimmt diese Komponente des GA nur die Aufgabe, Operationen Ressourcen zuzuteilen und Reihenfolgen zu bilden, also nur das *sequencing*. Die so erzeugten Abläufe greift die Dekodierungsfunktion auf und bildet die Operationsfolgen zeitlich auf die Menge der Ressourcen ab und zwar so, dass die Zulässigkeit der erhaltenen Lösung sichergestellt ist.

Bei der Entwicklung eines zulässigen Ablaufs, wobei  $C_{\max}$  minimiert und  $E_{\max}$  maximiert werden soll, vollzieht die Dekodierungsstruktur im wesentlichen Schritte zur Auffindung des kritischen Pfades im zugrundeliegenden Modell eines azyklischen disjunktiven Graphen. Dazu wird die auf Roy und Sussmann [Roy-84] zurückgehende Vorgehensweise angewendet. Die disjunktiven Kanten zwischen Operationen werden entsprechend ihrem Wertebereich an alternative Ressourcen gesetzt. Danach werden die für die Bearbeitung der Operationen zuständigen Ressourcen festgelegt. Im genetischen Algorithmus bildet diesen Vorgang die Erzeugung der Ressourcenbelegungschromosomen ab. Anschließend werden die disjunktiven Kanten in konjunktive Kanten umgewandelt und so eine Reihenfolge der Operationen auf den Ressourcen festgelegt. Dieser Vorgang wird als Vollständige Selektion bezeichnet. Im genetischen Algorithmus entspricht dies der Sequenzierung der Operationen für die entsprechenden Ressourcen, also der Bildung der Reihenfolgechromosomen. Die darauf folgende Vorgehensweise wird nachfolgend aus algorithmischer Sicht detaillierter skizziert.

- Zunächst werden aus dem Ressourcenbelegungschromosom die Ressourcenfolgematrix  $\tau_{ij}^{(k)}$  und aus dem Reihenfolgechromosom die Permutationsmatrix  $\pi_{ki}^{(j)}$  bestimmt. Die Ressourcenfolgematrix ist von der Größe  $n_j^{\max} \times n_j^{\max}$ , wobei  $n_j^{\max}$  der Anzahl der Operationen des größten Auftrags entspricht. Die Zeilen von  $\tau_{ij}^{(k)}$  entsprechen jeweils den Aufträgen. Sind die Aufträge von verschiedener Größe, werden die entsprechenden Stellen  $(i,j)$  der kleineren Aufträge mit Nullen ergänzt. Die Permutationsmatrix  $\pi_{ki}^{(j)}$  repräsentiert den Arbeitsvorrat der Ressourcen und jede Zeile entspricht einer Ressource. Diese ist ebenfalls eine quadratische Matrix, deren Größe von der maximalen Anzahl der einer Ressource zugeteilten Operationen abhängt. Diese wird von  $\tau_{ij}^{(k)}$  festgelegt.
- Nachdem nun die Ressourcenfolgen für die Aufträge und die Operationsreihenfolgen für die Ressourcen festgelegt sind, wird ein leerer Belegungsplan durch die Zurück-

setzung der Zustandsvariablen der Ressourcen und Aufträge auf die Ausgangsposition generiert.

- Im nächsten Schritt werden alle Aufträge entsprechend der Ressourcenfolgematrix denjenigen Ressourcen zugeteilt, von denen sie als erstes zu bearbeiten sind. Dabei beschränkt sich die Dekodierungsfunktion bei der Ablaufplanentwicklung nur auf Operationen, die in der jeweiligen Planungsphase zur Bearbeitung freigegeben sind, und ordnet ihnen eine Startzeit auf den zugeteilten Ressourcen zu bei gleichzeitiger Einhaltung der Präzedenzbedingungen. Konkurrieren zu einem Einplanungszeitpunkt  $t$  mehrere Operationen gleichzeitig um dieselbe Ressource, entscheidet ihre Position im Reihenfolgechromosom, also ihre Position innerhalb der Prioritätsliste einer Ressource, über den Vorrang. Der Operation höchster Priorität wird dann die Startzeit zugeordnet, die sich aus dem Maximum zwischen der Fertigstellungszeit der Vorgängeroperation desselben Auftrags und der Fertigstellungszeit der Vorgängeroperation auf der zugeteilten Ressource ergibt.

$$s_{ik} = \max(s_{i,k-1} + p_{i,k-1}, s_{hl} + p_{hl}) \quad \text{Gleichung 5.26}$$

- Nachdem die Bearbeitung einer Operation  $O_{ij}$  abgeschlossen ist, wird die nächstfolgende Operation des zugehörigen Auftrags in die Warteschlange der entsprechenden Ressource gesetzt. So ist sichergestellt, dass die Präzedenzbeziehungen innerhalb eines Auftrags eingehalten werden. Die Identität dieser Ressource ergibt sich aus der Ressourcenfolgematrix als der  $(i, j + 1)$ -te Eintrag.
- Nach jedem Einplanungsschritt wird die momentane Zykluszeit aus dem Maximum der Terminierungszeiten der einzelnen Ressourcen ermittelt.
- Der Prozess wird solange wiederholt, bis sämtliche Aufträge abgearbeitet sind und terminiert, sobald die letzte Operation abgeschlossen ist.

Die Priorität einer Operation kann dabei unterschiedlich definiert werden. Als einfachste Definition gilt die positionelle Priorität, d.h. allein aufgrund der Position einer Operation im Reihenfolgechromosom wird über ihre Einplanung und den Vorrang gegenüber anderen entschieden (Prioritätswarteschlangen). Weiterhin können Prioritäten aufgrund temporaler Eigenschaften gebildet werden. Solche Gesichtspunkte der Einplanung werden im Allgemeinen als Eröffnungsverfahren benutzt. Beide Methoden sind lediglich in der Lage semiaktive Pläne zu generieren. Da der Lösungsraum, der durch die semiaktiven Schedules bestimmt wird, immer noch groß ist gegenüber dem, der von den aktiven oder unverzögerten Schedules generiert wird (Bild 5.14), wird bei diesem Verfahren zur Entwicklung fähigkeitsorientierter

Ablaufpläne für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation der hybride Giffler-Thompson Algorithmus als Schedulebuilder berücksichtigt, der in der Lage ist, aktive oder unverzögerte Pläne zu generieren.

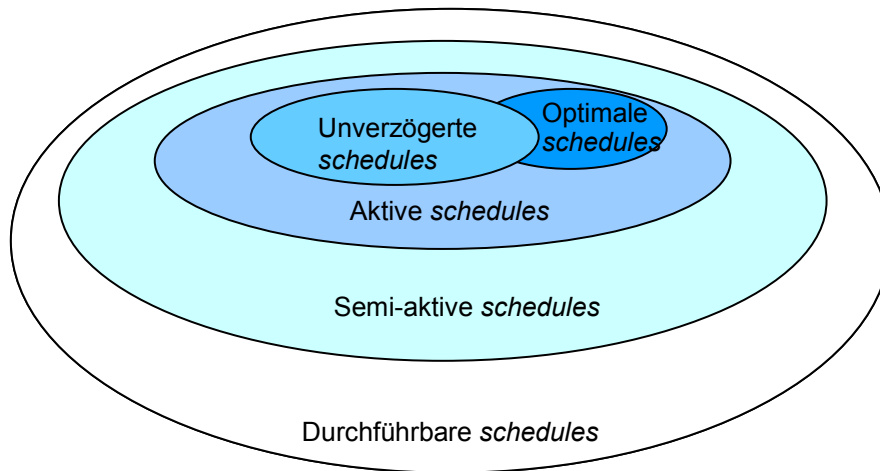


Bild 5.14: Mengenverhältnisse zulässiger Schedules

### 5.3.4 Zielfunktion und Fitnessbewertung

Die Zielfunktion des FJSSP entspricht dem Vektor:

$$\vec{\phi} = \{f_1, f_2\} \text{ mit } f_1 = C_{\max}, f_2 = \bar{F}. \quad \text{Gleichung 5.27}$$

Die Fitnessfunktion ordnet dem Zielfunktionsvektor eine reelle Zahl, den sogenannten Fitnesswert  $f \geq 0$ , einer Lösung zu. In der kanonischen Form des GA betrachtet man die Fitness eines Individuums in Analogie zur biologische Evolution als sein Vitalitätspotential und setzt deshalb seinen Fitnesswert  $f_i$  mit der erreichten mittleren Fitness  $\bar{f}$  der gesamten Population ins Verhältnis.

Die Fitnessfunktion ist ausschlaggebend für das Reproduktionspotential eines Individuums. Sie transformiert den Zielfunktionsvektor in einen skalaren Wert und hat naturgemäß einen eher qualitativen Charakter.

Die Fitnessbewertung beim FJSSP und bei der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation erfolgt entsprechend der im NSGA II verfolgten Strategie. Die Berechnung der Fitness der Individuen erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden alle pareto-dominanten Individuen identifiziert, in Fronten erfasst und erhalten einen temporären Fitnesswert, der proportional zur Populationsgröße ist. Anschließend erfolgt zwischen den Individuen dieser ersten Front ein phänotypisches *sharing*. Das *sharing* wird also nur zwischen Individuen der gleichen Front (also gleichen Rangs)

durchgeführt. Anschließend wird die temporäre Fitness auf einen Wert gesetzt, der kleiner als der kleinste durch das *sharing* entstandene Fitnesswert ist und der Vorgang wiederholt sich für die folgende Front, ohne Berücksichtigung der Individuen, die bereits bewertet wurden.

Um eine übersichtlichere Skalierung der erhaltenen Zielfunktionswerte zu erreichen, werden diese durch

$$\tilde{f}_i = \frac{f_i - LB_i}{UB_i - LB_i} \quad \text{Gleichung 5.28}$$

auf das Einheitsintervall normiert, wobei  $UB_i$  und  $LB_i$  jeweils die obere und untere Schranke des Zielkriteriums  $i$  ist. Dabei bleibt die Forderung der Minimierung der Zielfunktionswerte weiterhin gültig. Die entsprechenden Ober- bzw. Unterschranken für die Zielfunktionswerte ergeben sich wie folgt:

Eine obere Schranke  $UB_1$  für  $f_1 = C_{\max}$  entsteht durch Aufsummierung aller Prozesszeiten. Beim FJSSP wird für eine Operation jeweils die längste Prozessdauer auf einer Ihrer Alternativressourcen angenommen:

$$UB_1 = \sum_{i,j} p_{ij}^{k_{\max}} \quad \text{Gleichung 5.29}$$

Für  $\bar{F}$  ist  $C_{\max}$  eine obere Schranke.

$$UB_2 = C_{\max} \quad \text{Gleichung 5.30}$$

Eine einfache Methode zur Erzeugung der unteren Schranke,  $LB_1$ , sowohl für  $C_{\max}$  als auch für  $\bar{F}$  ist das Weglassen der Leerzeiten.

Für jeden Auftrag ist

$$P_j = \sum_{i=1}^{n_j} p_{i,j}^{(k_{\min})} \quad \text{Gleichung 5.31}$$

die Summe der Prozesszeiten seiner Operationen, wobei  $k_{\min}$  diejenige alternative Ressource der  $j$ -ten Operation des  $i$ -ten Auftrags mit der jeweils kürzesten Prozessdauer ist. Eine untere Schranke für  $C_{\max}$  ist somit gegeben durch:

$$LB_1 = \max\{P_j\}, 1 \leq j \leq n \quad \text{Gleichung 5.32.}$$

Eine untere Schranke für  $f_2 = \bar{F}$  ist ebenfalls durch das Weglassen der Leerzeiten gegeben durch:

$$LB_2 = \frac{1}{n} \sum_i^n P_i, 1 \leq i \leq n. \quad \text{Gleichung 5.33}$$

Um die Fitness eines kodierten Belegungsplans zu berechnen, wird dieser zunächst über den *schedule-builder* in seinen feinterminierten Belegungsplan transformiert, um so Zielfunktionswerte zu ermitteln. Der GA arbeitet weitestgehend unabhängig von der konkreten Problemstellung und die speziellen Problemcharakteristika fließen erst bei der Transformation der Genotypen in feinterminierte Pläne mit ein.

Bei der Dekodierung wird ein Individuum (oder Subchromosom) von links nach rechts gelesen und unter Berücksichtigung der technologischen Restriktionen sowie der aktuellen Belegungssituation einer Ressource wird jedem Auftrag bzw. jeder Operation der frühestmögliche Startzeitpunkt im Sinne des aktiven oder unverzögerten *schedulings* zugeordnet. Sind sämtliche Aufträge vollständig eingeplant, können die Zielfunktionswerte ermittelt werden. Aus diesen Werten wird dann die Fitness eines Belegungsplans berechnet. Dabei werden die einzelnen Zielfunktionswerte entsprechend der oben besprochenen Skalierungsfunktionen auf das Intervall  $[0;1]$  normiert und stellen so die Entscheidungsgrundlage für die Übernahme eines Individuums in den *mating-pool* oder seine Ablehnung dar.

### 5.3.5 Genetische Operatoren

Für die genetischen Operatoren Mutation und Crossover werden im Folgenden Verfahren konzipiert, welche sich für die Anwendung auf das FJSSP und somit auch für die Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation und die dabei auftretenden Optimierungsaufgaben eignen. Basis für die Konzeption sind die unter anderen in [HOL-92], [BÄC-96] und [NIS-97] beschriebenen Standard-Operatoren.

#### 5.3.5.1 Crossover

Durch das Crossover werden üblicherweise aus zwei Elternindividuen ein oder zwei Nachkommen gebildet, die von diesen möglichst gute Eigenschaften übernehmen sollen. Die Crossover Prozedur kann als nicht-antizipierender stochastischer Prozess aufgefasst werden. Sie nutzt lediglich die aus vorangegangenen Generationen schon bekannte Informationen, um Nachkommen zu bilden, und hat damit einen eher exploitativen Charakter.

Das Ziel eines Crossover Operators beim Erzeugen von Montageabläufen im Rahmen des FJSSP ist es, überdurchschnittlich gute Ressourcenbelegungssequenzen und Montageoperationsreihenfolgen auf die Nachkommen zu übertragen. Solche Sequenzen relativ hoher Fitness (Qualität) werden als *building blocks* bezeichnet. Wichtig beim Crossover von Montageoperationsreihenfolgen ist die Weitergabe und die mindestens partielle Erhaltung von Präzedenzbeziehungen zwischen Operationen auf derselben Ressource. Beim Erzeugen von Montageabläufen im Rahmen des FJSSP ist man mit dem hohen disruptiven Charakter der meisten Standardoperatoren konfrontiert. Dadurch gehen nicht nur wertvolle Informationen der Eltern verloren, sondern es kann auch die Zulässigkeit der erzeugten Individuen nicht ohne Weiteres garantiert werden.

Da zum einen die Crossover Sequenzen nicht notwendig gleicher Länge sein müssen und zum anderen der Suchraum nach Möglichkeit auf zulässige Lösungen beschränkt werden soll, muss der Crossover Operator die folgenden beiden Bedingungen erfüllen:

- Im Reihenfolgenchromosom dürfen Operationen nicht mehrfach auftreten und
- es dürfen keine Operationen ausgelassen werden.

Für diese Anwendung eignet sich das Linear-Order-Crossover (LOX), welches auf Falkenauer und Bouffoux [Fal-91] zurückgeht. Die Funktionsweise des Linear-Order-Crossover wird am Beispiel des Austausches von Operationsfolgen zwischen zwei Ressourcen erläutert. Das Crossover findet jeweils auf den sogenannten Sub-Chromosomen statt, also gerade auf den Operationsfolgen der einzelnen Ressourcen.

Als erstes werden in beiden Elternteilen zufällig zwei Crossover Punkte  $p_1$  und  $p_2$  bestimmt. Die zwischen den beiden Punkten liegende Sequenz wird zwischen den Elternchromosomen ausgetauscht. Um nun zwei Nachkommen zu generieren, übernimmt abwechselnd jedes der beiden Elternteile die Rolle des Donators, aus dem eine Operationssequenz extrahiert wird, und des Empfängers, in den die Sequenz des Donators unverändert integriert wird. Die übrigen Operationen müssen unter Umständen entsprechend umgeordnet oder entfernt werden. Unter Einhaltung der beiden oben gestellten Forderungen geschieht dies wie folgt:

- 1 Diejenigen Operationen beider Eltern, die nicht in der Crossover Region liegen, werden in die gleichen Positionen der Nachkommen kopiert.
- 2 Die in den Nachkommen verbleibenden freien Positionen werden durch zyklisches Vertauschen der einzelnen Plätze (Alleles) in die Crossover Region verschoben.



- 3 Die zur Vererbung vorgesehenen Operationsfolgen der Eltern werden unter Ausschluss mehrfachen Auftretens bzw. Auslassens von Operationen, sowie der Beibehaltung relativer Reihenfolgen, in die Nachkommen eingefügt.

Bild 5.15 illustriert diese Vorgehensweise am Beispiel eines Subchromosoms.

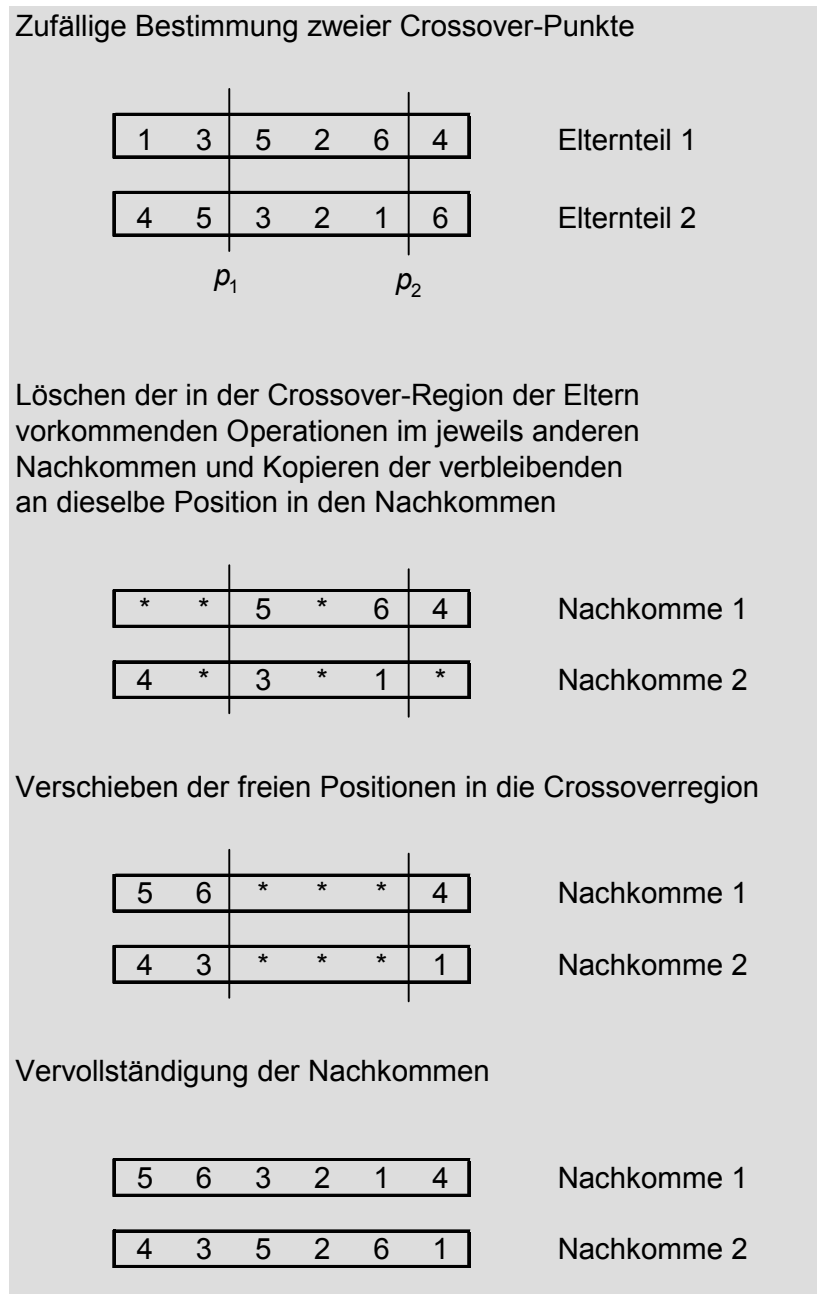


Bild 5.15: Funktionsweise des Linear-Order Crossover

Für die Ressourcenbelegungslisten wird sowohl bei ganzzahliger als auch bei Kodierung mit reellen Zahlen das klassische Uniform-Crossover angewandt, da hier Genduplikate keinen

Einfluss auf die Zulässigkeit eines Ablaufs haben. Dabei werden einzelne Allels zweier Individuen mit der Wahrscheinlichkeit  $p_{co}$  ausgetauscht.

### 5.3.5.2 Mutation

#### Mutation auf dem Reihenfolgechromosom

Während durch Crossover Routinen versucht wird, gute aber schon existente Informationen zu bewahren, hat der Mutationsoperator eher einen explorativen Charakter. Durch geringe Veränderung der Informationsstruktur der Chromosomen versucht die Mutation, neue gute Kombinationen von Genen zu finden. Unter der Annahme, dass geringfügige Veränderungen im Genotyp lediglich minimale Veränderungen der Zielfunktionswerte zur Folge haben, kann dem Mutationsoperator ein Verhalten ähnlich dem eines lokalen Suchverfahrens zugesprochen werden.

Im Falle der Montageablaufplanung bzw. des FJSSP wird mit Hilfe der Mutation versucht, adäquate Ressourcenbelegungen für Operationen und neue zulässige Operationsreihenfolgen auf den Ressourcen zu finden, die eine überdurchschnittliche Fitness eines Individuums zur Folge haben. Zunächst wird für jedes Subchromosom (z.B. Operationsfolge auf einer Ressource) geprüft, ob eine Mutation durchgeführt werden soll. Typischerweise werden 1% der Individuen einer Generation mutiert. Wird ein Chromosom mutiert, dann werden zunächst zufällig zwei Stellen  $p_1$  und  $p_2$  innerhalb des Subchromosoms bestimmt. Falls alle Randbedingungen dadurch eingehalten werden, werden die Werte an diesen Stellen ausgetauscht. Ein graphisches Beispiel für einen in dieser Arbeit verwendeten Mutationsoperator zeigt Bild 5.16.

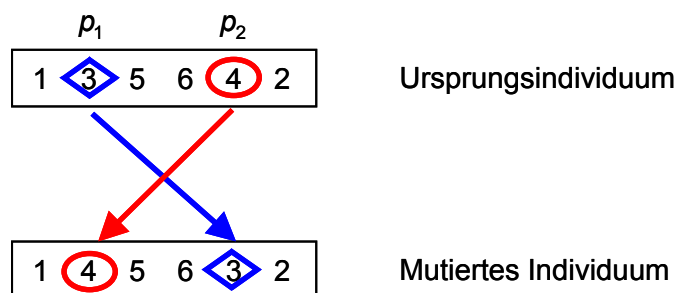


Bild 5.16: Beispiel der Mutation für eine Montagoperationenfolge

#### Mutation auf dem Ressourcenbelegungschromosom

Bei der Mutation auf dem Ressourcenbelegungschromosom wird für jedes Subchromosom über eine gleichverteilte Zufallsvariable  $r$  zunächst entschieden, ob eine Mutation stattfinden soll oder nicht. Falls ja, also  $r \leq p_m$ , wird zufällig eine Operation ausgesucht, deren aktuelle

Ressource dann durch eine andere Ressource aus der Menge ihrer alternativen Ressourcen ersetzt wird. Die dazu notwendigen Einzelschritte sind:

- 1 Prüfe ob  $r \leq p_m$ .
- 2 Falls ja, bestimme zufällig eine Operation, deren zugehörige Ressource,  $m_{actual}$ , durch eine neue,  $m_{new}$ , ersetzt werden soll.
- 3 Bestimme  $m_{new}$  zufällig aus der Menge ihrer alternativen Ressourcen.
- 4 Ersetze  $m_{actual}$  durch  $m_{new}$ .

### 5.3.6 Selektions Verfahren

Die Selektion ist die eigentlich steuernde Größe im Evolutionsprozess. Sie bestimmt die Richtlinien und Grenzen der anderen Operatoren durch die Auswahl der zur Fortpflanzung bestimmten Individuen. Indirekt ist auch die Populationsgröße von der Selektion abhängig, die damit auch die Gewichtung von Mutation und Crossover reguliert.

Innerhalb des genetischen Algorithmus zur Erzeugung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen wählt die Selektion sowohl die Eltern für das Crossover als auch die Nachkommen für die nächste Generation aus den Individuen der Population aus. Dadurch, dass die Selektion Lösungen mit höherem Zielfunktionswert mit größerer Wahrscheinlichkeit auswählt, soll erreicht werden, dass nach und nach immer bessere Lösungen gefunden werden.

Bei der Implementierung eines GA zur Erzeugung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen werden zwei gegensätzliche Ziele verfolgt. Einerseits sollen die Informationen bereits ermittelter, guter Lösungen ausgenutzt werden (Exploitation), andererseits soll bei der genetischen Suche weiterhin die Möglichkeit bestehen, erfolgsversprechende Regionen des Suchraumes zu erreichen (Exploration). Um eine erfolgreiche Suche zu gewährleisten, ist es daher notwendig, ein Gleichgewicht zwischen beiden Zielen zu erzielen

Für die Erzeugung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen werden die beiden Standardverfahren „Roulette-Wheel-Selection“ und „Crowded Tournament Selection“ ohne Einschränkungen durch problemspezifische Anforderungen eingesetzt.

Die Roulette-Wheel-Selektion ahmt ein Glücksrad nach. Dabei wird zunächst die durchschnittliche Fitness einer Generation bestimmt. Danach wird für jedes Individuum sein relativer Fitnesswert  $\frac{f_i}{f_{avg}}$  bestimmt, der angibt, dass, je höher die relative Fitness eines Individuums ist, desto höher der Erwartungswert der Anzahl seiner Vertreter im *mating-pool*. Die-

se fitnessproportionale Selektion ist die häufigste Methode zur Auswahl von Individuen zur Rekombination und versucht die Balance zwischen Nutzung des bisher Erreichten (Exploitation) und der Erforschung neuer Regionen des Suchraums (Exploration) zu modellieren. Das Verfahren ist problematisch, wenn wenige Super-Individuen mit extrem hohen Fitnesswerten in der Population vertreten sind. Damit steigt die Gefahr der Dominanz weniger Individuen sehr hoher Fitness über den restlichen Teil der Population. Diese Art von Elitismus bewirkt eine vorzeitige Konvergenz gegen im Allgemeinen schlechte Lösungen [Nis-97].

Der Crowded Tournament Operator gehört zu der Klasse der Turnirselektionen. Dabei werden die Individuen der alten Population paarweise miteinander verglichen und der qualitativ Bessere in den *mating-pool* übernommen. Der Operator für die Erzeugung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen nutzt einen Distanz-Parameter (*crowding distance*), der als Maß für die Dichte der Population in der Umgebung eines Individuums dient. Er vergleicht die Individuen zunächst bezüglich ihrer Ränge und dann, falls notwendig, bezüglich ihres *crowding* Abstandes. Dabei gilt ein niedriger Rang als besser und, falls die Ränge gleich sind, ein größerer *crowding* Abstand als Vorteil.

### 5.3.7 Ersetzungsstrategien

In jeder Generation wird aus der jeweilig aktuellen Population die nachfolgende Generation von Individuen berechnet. Dabei können die neuen Individuen die alte Population ganz ersetzen (*general replacement*) oder auch nur teilweise, wie es beim *steady state* Ansatz von De Jong [Jon-75] der Fall ist. Bei diesem Ansatz werden nur die  $n$  besten Nachkommen (Elite) in die Folgegeneration übernommen.

Die Ersetzungsstrategie bestimmt auf Basis der für die Montageabläufe berechneten Fitnesswerte, nach welchem Prinzip die Lösungsalternativen beim Übertritt von der Elterngeneration  $G_n$  in die Folgegeneration  $G_{n+1}$  durch ihre Nachkommen ersetzt werden. Bei der in dieser Arbeit vorliegenden Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation wird von einer konstanten Populationsgröße der einzelnen Generationen ausgegangen.

Da der Suchraum bei der Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation eine hohe Komplexität aufweist und die Zielfunktion von einer Vielzahl von Variablen abhängt, kommt den Merkmalen „Explorativer Charakter“, „Exploitativer Charakter“ und „Aktive Erhaltung der Heterogenität“ die größte Bedeutung zu. Um diesen Merkmalen gerecht zu werden, wird für die Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation eine Strategie verwendet, die sich vor allem auf das von Deb [Deb-00] im NSGA II benutzte Konzept stützt, das zu den sogenannten schwach elitären Modellen gezählt wird.

Diese Methode bildet die Folgegeneration durch die Verwendung des Eliteprinzips. So wird die Folgegeneration nicht mehr ausschließlich aus der Menge der Nachkommen gebildet, sondern es wird zunächst ein sogenannter *mating-pool*, bestehend aus Eltern- und Nachkommengeneration, generiert. Diesen  $2N$  Individuen wird anschließend einzeln ein Rang zugeordnet, dann werden sie in einzelne Fronten klassifiziert. Das aufgrund seiner Parameterabhängigkeit kritisierte *niching* wird durch einen erweiterten Selektionsmechanismus ersetzt, bei dem die Dichtheit der Nachbarschaft von Individuen mit identischem Front-Index (d.h. Individuen der gleichen Pareto-Front) durch eine sogenannte *crowding distance* berücksichtigt wird.

Durch diese Ersetzungsstrategie werden gut bewertete Lösungen für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation aus der Elterngeneration in die Nachkommengeneration übernommen. Dadurch konzentriert sich der Algorithmus auf erfolgversprechende Regionen des Suchraums und nutzt dabei die in den guten Lösungen enthaltenen Abläufe und Verteilungen der Operationen.

Für den Erfolg des multiobjektiven GA ist es wichtig, möglichst lange die Heterogenität innerhalb einer Population aufrecht zu erhalten, da sie die Effektivität der genetischen Operatoren, vor allem des Crossovers, entscheidend mitbestimmt. Der durch die Berechnung der *crowding distance* erweiterte Selektionsmechanismus eignet sich zur Erhaltung der Heterogenität des Erbgutes in der Population von Lösungsalternativen für Montageabläufe durch Erhaltung möglichst vieler Ablaufvarianten und Verteilungsmöglichkeiten.

## 6 Spezifizierung und Entwurf eines Verfahrens zur Entwicklung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle mit genetischen Algorithmen

Der in Kapitel 5.3 konzipierte genetische Algorithmus für flexible Job Shop Scheduling Probleme wird nun hinsichtlich der Mensch-Roboter-Kooperation spezifiziert und die einzelnen Schritte des Verfahrens sowie die Operatoren des genetischen Algorithmus werden entworfen.

### 6.1 Erweiterung der Modellumgebung für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation

Als Produktionsumgebung wird der Fall einer Station, bestehend aus einem manuellen und einem Roboter-Arbeitsplatz, betrachtet. Es wird von einem Ein-Produkt-Problem ausgegangen. Die Arbeitsgangfolge des Produktes ist durch seinen Vorranggraphen gegeben.

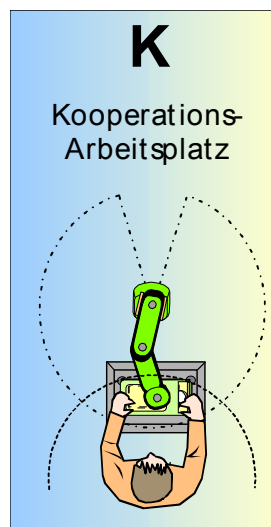


Bild 6.1: Kooperationsarbeitsplatz [Thi-02]

Bezüglich der in Kapitel 5.3.1.1 festgelegten Modellannahmen und Randbedingungen im Zusammenhang mit dem FJSSP müssen in diesem Fall einige Spezifizierungen vorgenommen werden. Die Annahmen 1-11 (Kapitel 5.3.1.1) gelten dabei nach wie vor und werden durch folgende ergänzt:

12. Aufträge können voneinander abhängen, d.h. zwischen Aufträgen sind Vorrangsbeziehungen gegeben.
13. Die streng hierarchischen Präzedenzbeziehungen zwischen Operationen eines Auftrags bleiben jedoch bestehen.

14. Die Mensch-Roboter-Kooperationszelle ist voll besetzt. Daher kann, falls technisch möglich, zu jedem Zeitpunkt kooperierend gearbeitet werden.
15. Es werden keine Stationswechsel des Werkers vorgenommen.
16. Ressourcen bzw. Mensch und Roboter werden Eignungsgrade, wie in Kapitel 4 eingeführt, bezüglich der Bearbeitung der Operationen zugeordnet. Diese haben keinen temporalen Bezug.
17. Der Montageablaufplan für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle wird bezüglich der Zielkriterien  $\{C_{\max}, E_{\max}, \bar{F}\}$  optimiert.

## **6.2 Spezifische Randbedingungen der Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation**

### **6.2.1 Auftragsanalyse**

In diesem Abschnitt werden die relationalen Restriktionen bezüglich Einzelfunktionen definiert und klassifiziert. In den Montagevorranggraphen der zu montierenden Produkte treten sowohl konjunktive als auch disjunktive Verknüpfungen zwischen Paaren von Einzelarbeitsschritten auf, die die Freiheitsgrade ihrer Abarbeitungsreihenfolge charakterisieren. Besteht zwischen Funktionen eine disjunktive Relation, können sie parallel bearbeitet werden, besteht dagegen eine konjunktive Verknüpfung, können sie nur sequentiell bearbeitet werden.

Jedoch sind nicht sämtliche Präzedenzrelationen zwischen Einzelarbeitsschritten für die tatsächliche Umsetzung des Produktplans durch Bildung von Operationsreihenfolgen in einen gültigen Prozessplan sinnvoll und spielen im Kontext der Feinterminierung eine Rolle. Es bieten sich vielmehr Relaxationsmöglichkeiten, die im Folgenden diskutiert werden.

Um die Anzahl der Vorgänger-Nachfolger Beschränkungen des Problems möglichst niedrig zu halten, werden die Operationen neu definiert und es wird eine Klassifikation der Operationen in Aufträge vorgenommen. Dazu werden Einzelarbeitsschritte, die zeitlich direkt hintereinander und von derselben eingeführten Ressource bearbeitet werden müssen, zu Operationen zusammengefasst. Dies kann ohne Einbußen in den Planungsmöglichkeiten gemacht werden, da zwischen diesen Arbeitsgängen keinerlei Einplanungsfreiheitsgrade bestehen. Ein Beispiel für solche Operationen ist: „Teil greifen“, „Teil schwenken“, „Teil einsetzen“. Diese drei Operationen werden von Einzelarbeitsschritten im Kontext der Ressourcen-Belegungsplanung zu einer Operation zusammengefasst.

Außerdem werden jeweils die längsten Operationssequenzen mit eindeutigen Vorgänger-Nachfolger Beziehungen, d.h. Operationen die höchstens einen Vorgänger und höchstens

einen Nachfolger besitzen, zu einem Auftrag zusammengefasst. Dies kann ebenso ohne Einschränkungen der Planungsmöglichkeiten geschehen, da innerhalb eines Auftrags die Präzedenzbeziehungen zwischen den zugehörigen Operationen einer linearen Reihenfolgestruktur unterliegen.

Im Gegensatz zur Globalplanung des Gesamtprojektes hat diese Methode den entscheidenden Vorteil der möglichen Parallelisierung des Scheduling-Prozesses für die Teilprojekte. Da die innere Reihenfolge eines Auftrags bereits feststeht, werden durch diese Klassifikation also lediglich die Präzedenzbeziehungen zwischen Aufträgen berücksichtigt.

Im Fall der Entwicklung von Montageabläufen für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation sind die durch eine No-Wait-Bedingung ausgezeichneten Einzelschritte auch von derselben Ressource auszuführen. Daher können diese Arbeitsschritte ohne Einschränkung der Planungsfreiheitsgrade zu Operationen zusammengefasst werden. Ebenso können Teilprojekte, deren Operationen einer linearen Ordnungsstruktur unterworfen sind, als Aufträge aufgefasst werden. Somit liegt für die Entwicklung von Montageabläufen für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation eine Menge parallel durchführbarer Aufträge vor und jedem Auftrag kann die Menge seiner direkten Nachfolger,  $J_i \rightarrow \{J_i^{(S_i)}\}$ , zugeordnet werden, wobei  $s_i$  eine Indexmenge  $I$  gleich der Anzahl der Nachfolger des Auftrags  $i$  durchläuft. Wieder kann ein Auftrag mehrere Vorgänger und mehrere Nachfolger besitzen. Die konjunktiven Präzedenzbeziehungen zwischen den Aufträgen sind daher durch einen azyklischen gerichteten Graphen darstellbar, gegeben durch seine Adjazenzmatrix. Die Knoten des Graphen repräsentieren nun die Aufträge, wobei die gerichteten Kanten die Vorgänger-Nachfolger Beziehungen angeben und beispielsweise mit der Fertigstellungszeit des Auftrags im Ausgangsknoten belegt werden können. Ist die Bearbeitung der Vorgänger eines Auftrags abgeschlossen, gilt die maximale Fertigstellungszeit der Aufträge  $j$  dieser Menge als Freigabezeit (*release time*) der direkten Nachfolgeaufträge  $i$ :

$$\max(c_j) \leq r_j, \quad 1 \leq j \leq n_{\text{Vorgänger}}, \quad 1 \leq i \leq n_{\text{Nachfolger}}. \quad \text{Gleichung 6.1}$$

Die frühest mögliche Startzeit der ersten Operation der Nachfolgermenge der Aufträge  $j$  ergibt sich zu:

$$s_{j1} = \max(r_j, s_{hl}^k + p_{hl}^k), \quad 1 \leq i \leq n_{\text{Nachfolger}}, \quad 1 \leq k \leq m, \quad \text{Gleichung 6.2}$$

wobei  $s_{hl}^k$  und  $p_{hl}^k$  jeweils die Start- bzw. Prozesszeit der auf der jeweils zugeteilten Ressource  $k$  gerade durchgeführten Operation  $O_{hl}$  des Auftrags  $h$  sind.



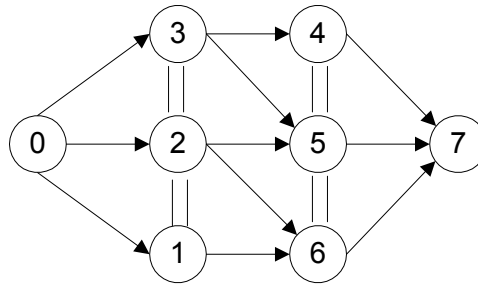


Bild 6.2: Darstellung der Präzedenzrelationen zwischen Aufträgen bei der Planung eines Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle durch einen Digraph

Die Darstellung der Montageabläufe der Mensch-Roboter-Kooperation als Ganzes kann damit in eine Folge von Teilproblemen zerlegt werden, von denen jedes jeweils aus der Menge der Aufträge besteht, zwischen denen disjunktive Verknüpfungen existieren und die, falls alle Vorgänger bearbeitet sind, zur Einplanung bereitstehen. Jedes dieser Teilprobleme kann, nach vorher durchgeführter Ressourcenbelegung, als deterministisches Job-Shop Scheduling Problem betrachtet und gelöst werden. Die Lösungsstrategie entspricht damit der des FJSSP. Es handelt sich hier also um ein dynamisches Scheduling Problem und es kann unter Ausschluss der bereits abgeschlossenen Projekte ein neues Teilprojekt formuliert werden, sobald sämtliche Vorgängeraufträge eines Folgeauftrags abgeschlossen sind. Das Gesamtproblem wird durch einen azyklischen gerichteten Graphen dargestellt, wobei in der jeweiligen Planungsphase lediglich Aufträge betrachtet werden, die zur Einplanung freigegeben sind. Die Aufträge ihrerseits können als Operationsstapel betrachtet werden, die nach und nach abgearbeitet werden.

Aus praktischer und theoretischer Sicht lassen sich die Modelle und Verfahren für die Belegungsplanung einer kooperierenden Produktionszelle nicht nur für diese Produktionsumgebung nutzen, sondern können auch als Basis bei der Untersuchung anderer komplizierter Produktionsstrukturen dienen. Dabei können Lösungsverfahren übertragen und problemspezifisch erweitert werden.

### 6.2.2 Ressourcenanalyse

Bezüglich der Ressourcen können die im vorigen Kapitel diskutierten Eigenschaften und Voraussetzungen weitestgehend übernommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass prinzipiell jede Ressource, d.h. Mensch und Roboter, in der Lage ist, jede Operation zu bearbeiten. Jedem Paar von Ressourcen und Operationen

$$\left\{ (M_k, O_{ij}) \mid M_k \in M, 1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n_i \right\}, \quad \text{Gleichung 6.3}$$

werden problemabhängige Parameter zugeordnet, wobei  $M$  die Menge der alternativen Ressourcen von  $O_{ij}$  ist. Diese sind zum einen die im vorigen Abschnitt eingeführten ressourcenabhängigen Eignungsgrade  $(e_{ij}^k)$  und zum anderen die eingeführten ressourcenabhängigen Prozesszeiten  $p_{ij}^k$ :

$$(M_k, O_{ij}) \rightarrow (e_{ij}^k, p_{ij}^k). \quad \text{Gleichung 6.4}$$

Bei den Prozesszeiten für den Menschen wird wieder auf MTM-Zeiten zurückgegriffen. Aufgrund der im vorigen Abschnitt durchgeführten Zusammenfassung von Einzelarbeitsschritten zu Operationen müssen die Ressourcenparameter angeglichen werden, da diese zunächst für Einzelarbeitsschritte bestimmt werden. So werden beispielsweise bei der Zusammenfassung von  $n$  Einzelschritten zu einer Operation die zugehörigen Eignungsgrade und Prozesszeiten aufaddiert. Dieses Vorgehen beinhaltet keine zusätzlichen Einschränkungen, da zwischen zusammengefassten Einzelfunktionen keinerlei Planungsfreiheitsgrade bestehen.

### 6.2.3 Verarbeitung der Randbedingungen

Als neues Planungsproblem wird nun der gerichtete auftragsbezogene Montagevorranggraph  $G = \{(V, B)\}$  betrachtet. Die Knoten  $i \in V$  dieses Schedulingprojektes repräsentieren im Folgenden die Aufträge, wobei die konjunktiven Kanten die Präzedenzbeziehungen zwischen Aufträgen darstellen. Die Auftragsknoten besitzen ihrerseits jeweils die Gestalt eines azyklischen Digraphen. Die Kantenmenge ist gegeben durch:

$$B = \{(J_i, J_l) \mid J_i \rightarrow J_l, \text{ mit } 1 \leq i, l \leq n\}. \quad \text{Gleichung 6.5}$$

Der Ablaufgraph wird durch seine Adjazenzmatrix repräsentiert.

Es sei  $i$  ein fester Knoten von  $G$ . Gilt  $(i, j) \in B$ , so heißen die Aufträge  $i$  und  $j$  auch adjazent. Die Menge  $V(i) = \{j : (i, j) \in B\}$  heißt Adjazenzmenge von Auftrag  $i$ . Die Adjazenzmatrix  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(G)$  eines Graphen  $G$  beschreibt die Präzedenzbeziehungen zwischen den Aufträgen und ist eine  $n \times n$ -dimensionale Matrix mit den Elementen

$$\mathbf{A} = \begin{cases} a_{ij} = 1, & \text{falls } (i, j) \in B \\ a_{ij} = 0, & \text{falls } (i, j) \notin B \end{cases} \quad \text{Gleichung 6.6}$$

Jeder Auftrag  $j$  mit  $(i, j) \in V$  heißt Nachfolger von Auftrag  $i$  und die Menge  $N(i) = \{j : (i, j) \in V\}$  heißt Nachfolgermenge von Auftrag  $i$ . Analog heißt jeder Auftrag  $j$  mit  $(j, i) \in V$  Vorgänger von  $i$ , und die Menge  $V(i) = \{j : (j, i) \in V\}$  heißt Vorgängermenge von  $i$ .

Es ist ausreichend für jeden Auftrag  $i$  die Liste seiner Nachfolger anzugeben, um eine vollständige Darstellung des Graphen durch Nachfolgerlisten zu erhalten. Statt Nachfolger können auch Vorgänger gespeichert werden.

Um die Präzedenzen zu finden, müssen sämtliche Paare  $(i, j)$  untersucht werden. Dies erfordert  $n^2$  Rechenschritte. Eine weniger aufwändige Methode ist für jeden Knoten die Speicherung der Knotenindizes, zwischen denen Präzedenzen bestehen, in einer Liste, der sogenannten Adjazenzliste. Die Adjazenzliste von Auftrag  $i$  ist eine Liste der Elemente aus  $N(i)$ , wobei die Reihenfolge  $N(i)$  vorerst keine Rolle spielt. Durch Angabe aller  $n$  Adjazenzlisten ist  $G$  vollständig bestimmt.

### 6.3 Aspekte der Kooperation bezüglich Zielkriterien und Fitnessbewertung

Ziel des genetischen Optimierungsprozesse zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation ist es, unter Gesichtspunkten der Fähigkeitsorientierung sowohl gute Kombinationen zwischen Operationen und Ressourcen zu generieren als auch gute Operationsreihenfolgen auf den Ressourcen zu bilden, die eine Kooperation so oft wie möglich erlauben. Die erwähnten Heuristiken zur Generierung gültiger Abläufe bei Scheduling Problemen dienen vor allem dem Ziel der Optimierung zeitbezogener Kriterien. In diesem speziellen Fall der Mensch-Roboter-Kooperation soll neben den temporalen Zielkriterien auch ein nicht zeitbezogenes Zielkriterium, der maximale Eignungsgrad, betrachtet werden.

In Bild 6.3 ist eine multimodale Fitnesslandschaft graphisch dargestellt. In der Abbildung ist die hohe Anzahl lokaler Extrema schon bei dieser sehr kleinen Problemdimension zu sehen.

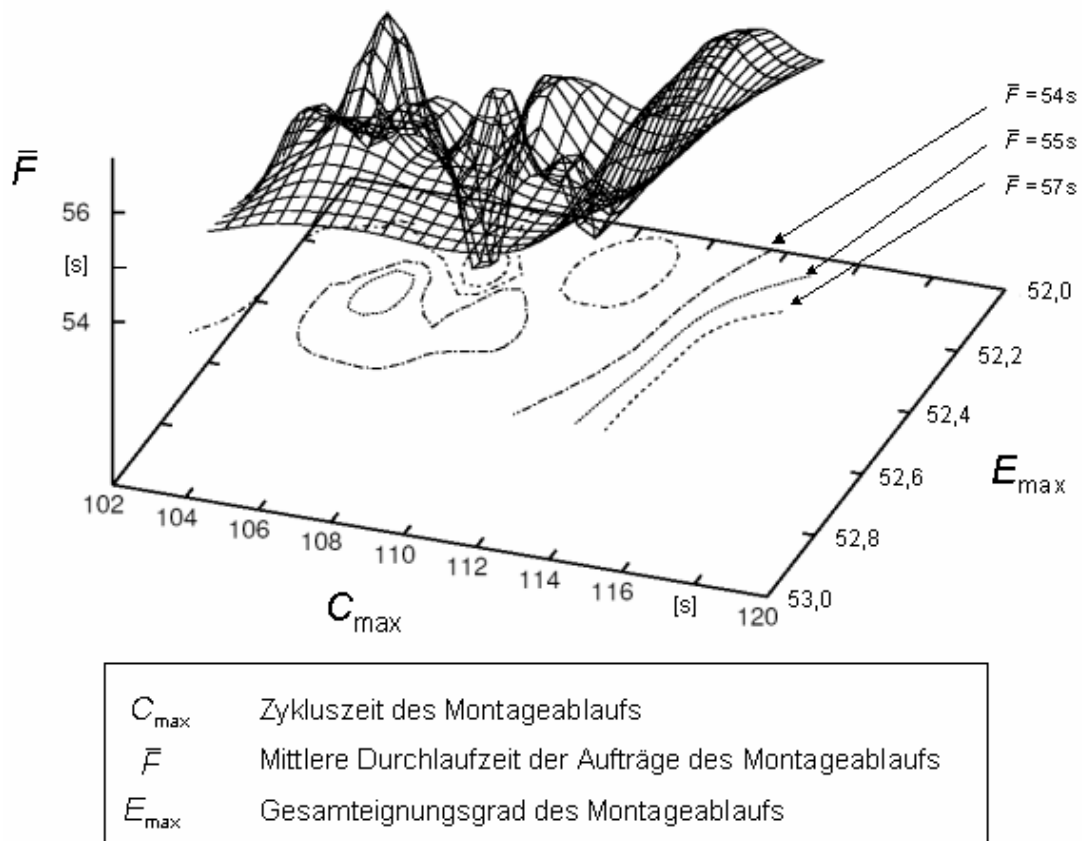


Bild 6.3: Fitnesslandschaft eines Optimierungsproblems der Mensch-Roboter-Kooperation

Sei  $x_{ij}^k$  die Entscheidungsvariable für die Zuordnung von Ressourcen zu Operationen:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{falls Operation } j \text{ von Auftrag } i \text{ von Ressource } k \text{ bearbeitet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann berechnet sich der Gesamteignungsgrad  $E$  im Falle von  $m$  Ressourcen,  $n$  Aufträgen und  $n_i$  Operationen pro Auftrag zu:

$$E = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^k e_{ij} \quad \text{Gleichung 6.7}$$

Ein Ziel des Optimierungsprozesses ist die Maximierung des Gesamteignungsgrades. Da im Kontext dieser Arbeit sämtliche Optimierungsprobleme als Minimierungsprobleme betrachtet werden, ist die Minimierung von  $-E_{\max}$  äquivalent zu seiner Maximierung. Das allgemeine Optimierungsziel lautet also:

$$\min \bar{f} = \min(C_{\max}, -E_{\max}, \bar{F}). \quad \text{Gleichung 6.8}$$

Ebenso wie die Zielfunktionswerte in Abschnitt 5.3.4 soll auch der Gesamteignungsgrad auf das Einheitsintervall normiert werden. Dies geschieht ebenfalls mittels der Skalierungsgleichung Gleichung 5.28. Als obere und untere Schranke für den Gesamteignungsgrad ergeben sich

$$UB_{E_{\max}} = \sum_{i,j} e_{ij}^{(k_{\max})} \quad \text{Gleichung 6.9}$$

$$LB_{E_{\max}} = \sum_{i,j} e_{i,j}^{(k_{\min})} \quad \text{Gleichung 6.10}$$

wobei  $k_{\max}$  bzw.  $k_{\min}$  diejenige Ressource kennzeichnet, die für die Bearbeitung der Operation  $O_{ij}$  den maximalen bzw. minimalen Eignungsgrad besitzt. Der skalierte Gesamteignungsgrad wird dann anhand der folgenden Gleichung berechnet:

$$\tilde{f}(E_{\max}) = \frac{E_{\max} - LB_{E_{\max}}}{UB_{E_{\max}} - LB_{E_{\max}}} \quad \text{Gleichung 6.11}$$

Im Sinne der Optimierung unter Gesichtspunkten der Pareto-Optimalität wird ein Ablaufplan als optimal eingestuft, wenn er die gegebenen Zielkriterien bezüglich beliebiger Gewichtungen bestmöglich erfüllt.

Der Gesamteignungsgrad wird vollständig von den Ressourcenfolgen der Aufträge bestimmt. Die Entscheidung der Ressourcenbelegung zusammen mit der Bildung von Operationsreihenfolgen beeinflusst wiederum die Qualität eines Prozessablaufs bezüglich der temporalen Zielkriterien  $C_{\max}$  und  $\bar{F}$ . Die Interdependenz beider Problemkomponenten ist a priori nicht einzuschätzen. Daher liegt der Ansatz der hier verfolgten Optimierungsstrategie in der Trennung der beiden Problemkomponenten, um als mögliches Ergebnis bessere Voraussagen bezüglich des relativen Zusammenhangs günstiger Ressourcen-Operationen Paare und der Bildung guter Operationsfolgen machen zu können. Eine mögliche Verknüpfung beider Entscheidungskomponenten bildet die im Folgenden konzipierte Prioritätsregel. Zunächst sollen allerdings einige Gesichtspunkte der speziellen Montageumgebung und ihr Einfluss auf die Zielfunktion diskutiert werden.

Damit eine kooperative Bearbeitung zweier Aufträge generell stattfinden kann, müssen zunächst die zu diesem Zeitpunkt bereitstehenden Operationen dieser Aufträge derselben Arbeitsstation zugeteilt werden. Dies ist in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle zu jedem Zeitpunkt gegeben. Auf Grund der Präzedenzbeschränkungen innerhalb der Aufträge ist weiterhin für die kooperative Bearbeitung der relevanten Operationen notwendig, dass sie

verschiedenen Aufträgen angehören und zwischen diesen eine disjunktive Relation besteht. Des Weiteren müssen sie verschiedenen Ressourcen zugeteilt sein, also entweder dem Werker oder dem Roboter. Im übrigen ist eine kooperative Bearbeitung eines Auftrags dann besonders sinnvoll und effektiv, falls für die beteiligten Ressourcen gilt, dass sie für die Bearbeitung der zugeteilten Operationen relativ zu den restlichen Ressourcen der Menge der Alternativressourcen jeweils einen höheren Eignungsgrad und eine kürzere Prozessdauer aufweisen. Dies gilt jedoch jeweils nur lokal, also in Bezug auf ein Operationenpaar  $(O_{ij}, O_{lk})$ , mit  $j \neq k$ . Eine solch günstige Konstellation bezüglich des gesamten Prozessablaufs wird sich im Allgemeinen jedoch nicht ergeben. Des Weiteren ist eine vorherige Zuteilung der Operationen auf Ressourcen, für die das Verhältnis

$$\frac{p_{ij}^k}{e_{ij}^k}, e_{ij}^k \neq 0 \quad \text{Gleichung 6.12}$$

minimal ist, keine Gewährleistung dafür, dass auch die Qualität des gesamten Ablaufs hoch ist, da die Bildung von Operationsfolgen auf Ressourcen in hohem Maße mitentscheidend für die Qualität des vollständigen und feinterminierten Ablaufs ist. Auch wenn die Ressourcenzuteilung nicht immer in der Weise vorgenommen werden kann, dass jeweils die Ressource  $k$ , die das kleinste Verhältnis für eine Operation  $O_{ij}$  aufweist, diese auch bearbeitet, wirkt sich die Kooperation in jedem Fall günstig auf die Minimierung von  $C_{\max}$  aus, da die Teilprojekte nicht mehr notwendig nach und nach durch die Ressourcen geschleust werden, sondern parallel, d.h. kooperierend, bearbeitet werden können. Daher ist der Wert von  $C_{\max}$ , und damit die durchschnittliche Ressourcenauslastung  $\bar{R}$ , ein gutes Maß dafür, wie oft Kooperation stattfindet.

Für den Fall, dass Aufträge wegen der Präzedenzbeziehungen nur zu verschiedenen Zeitpunkten freigegeben werden können, ist  $C_{\max}$  allein kein sinnvolles Optimierungskriterium. Ein besseres Bild über das dynamische Potential innerhalb eines Prozessplans liefert  $\bar{F}$ .

Es ergibt sich die Möglichkeit der Priorisierung von Ressourcen-Operationen Paaren, die ein möglichst niedriges Verhältnis  $p_{ij}^k / e_{ij}^k$  aufweisen. Diese Möglichkeit wird zum Entwurf einer einfachen Prioritätsregel benutzt. Im Folgenden soll das Verhältnis  $p_{ij}^k / e_{ij}^k$  als Kooperationspotential bezeichnet werden. Die Prioritätsregel zur Bildung initialer Ressourcenbelegungen erfolgt in zwei Schritten:

1. Man bilde für alle Operationen und die zugehörigen Alternativressourcen das Kooperationspotential  $p_{ij}^k / e_{ij}^k$ .
2. Man bestimme für alle Operationen diejenige Ressource, für die das Kooperationspotential minimal ist, und teile die Operationen dieser Ressource zu. Existieren mehrere Ressourcen, die den gleichen Wert aufweisen, entscheidet der Zufall.

Obige Prioritätsregel wird zur heuristischen Steuerung der Konstruktion der Ressourcenbelegungschromosomen der initialen Population genutzt.

### Relatives Verhalten der Zielkriterien

Es ist offensichtlich, dass ein Ablauf bezüglich der temporalen Zielkriterien eine besonders gute Performance aufweist, wenn die Arbeitsteilung zwischen Werker und Roboter eine möglichst häufige Kooperation vorsieht, da ja am gleichen Produkt gearbeitet wird. Dies heißt nicht zwangsläufig, dass dadurch der höchstmögliche Gesamteignungsgrad erreicht wird. Da der Eignungsgrad keine temporalen Eigenschaften der Schedulingobjekte in Betracht zieht, kann zunächst über das Verhalten zwischen den zeitbezogenen Zielen und dem Gesamteignungsgrad keine Aussage gemacht werden. Es lässt sich aufgrund der Problemdaten nicht nachweisen, ob sich die Zielgruppen komplementär oder indifferent verhalten, oder ob sie sich begünstigen.

Eine experimentelle Analyse zeigt (Bild 6.4), dass relativ gesehen ein hoher Eignungsgrad einer Ressource nicht notwendig eine kürzere Prozessdauer erzeugt. Daher kann von einem indifferenten Verhalten der beiden Typen von Zielkriterien ausgegangen werden. Bild 6.4 zeigt, dass sich die beiden Zielkriterien  $C_{\max}$  und  $E_{\max}$  im Analysebeispiel konkurrierend verhalten. Endgültige Auskunft über den Grad der Konkurrenz gibt die Analyse der pareto-optimalen Lösungen. Besteht die Pareto-Front aus mehr als einem Punkt, so ist dies ein Indiz dafür, dass sich die Zielkriterien nicht begünstigen (sonst gäbe es eine einzige optimale Lösung).

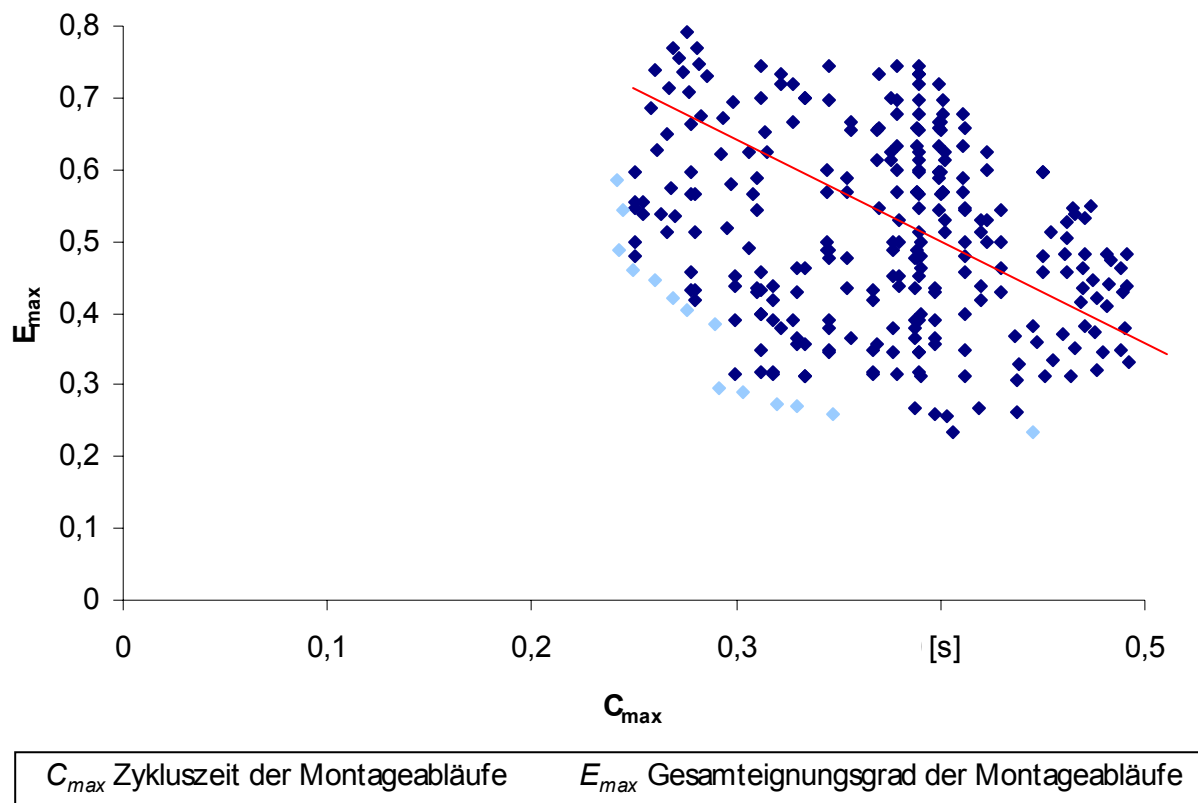


Bild 6.4: Beispiel konkurrierenden Verhaltens zwischen  $C_{max}$  und  $E_{max}$

#### 6.4 Adaptierte Kodierung für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation

An dieser Stelle wird ein problemadaptierter genetischer Repräsentationsformalismus entwickelt, der sowohl Eignungsgrade als auch Prozesszeiten in die Entscheidung über die Zuordnung der Operationen zu Mensch oder Roboter mit einbezieht.

Der Repräsentationsformalismus basiert auf der Möglichkeit der Kodierung der Ressourcenbelegungschromosomen durch reelle Zahlen [Knj-02]. Die Ressourcenselektion aufgrund der von Knjazew 2002 geschilderten reellen Repräsentation kann als problemunabhängig bezeichnet werden und ist lediglich von der Anzahl der alternativen Ressourcen einer Operation abhängig. Dabei denke man sich eine Partition des Ressourcenfolgenchromosoms wie in Abschnitt 5.3.2.1. Im Folgenden wird ein spezielles Gen betrachtet. Der Wertebereich dieses Gens entspricht dem Intervall  $[0,1]$ . Das abgeschlossene Einheitsintervall wird äquidistant in  $m_j$  Teilsegmente zerlegt, wobei  $m_j$  der Anzahl der alternativen Ressourcen der  $j$ -ten Operation des  $i$ -ten Auftrags entspricht, also im Fall der Mensch-Roboter-Kooperationszelle  $m_j = 2$  ist. Jedes der Teilsegmente entspricht einer Ressource, d.h. das eine Teilsegment entspricht



dem Mensch, das andere dem Roboter. Damit bestimmt eine reelle Zahl  $r \in [0,1]$  die zu wählende Ressource für eine Operation  $O_{ij}$ , mit  $m_{ij} = 2$ , wie folgt:

- Ist  $\left[0 < r \leq \frac{1}{2}\right]$ , plane  $O_{ij}$  auf Ressource 1 (Mensch) ein.
- Ist  $\left[\frac{1}{2} < r \leq 1\right]$ , plane  $O_{ij}$  auf Ressource 2 (Roboter) ein.

Die reelle Zahl  $r$  wird als gleichverteilte Zufallszahl über dem abgeschlossenen Einheitsintervall erzeugt und Mensch und Roboter besitzen dieselben Auswahlwahrscheinlichkeiten. Weiterhin wird eine gleichverteilte Zufallszahl  $r \in [0,1]$  erzeugt, und die Entscheidung zur Ressourcenbelegung darauf begründet, in welches der Teilintervalle  $r$  fällt.

Die zugrundeliegende Idee der Integration der Prozesszeiten und Eignungsgrade in die Entscheidung der Ressourcenbelegung ist folgende: Die Parameter  $\{p_{ij}^k, e_{ij}^k\}$  werden in einem Faktor  $P_{ij}^k$  zusammengefasst, der die Effizienz der Ressource  $k$  ausdrückt, mit der diese die Operation  $j$  des Auftrags  $i$  bearbeitet. Der Typ der Optimierungsaufgabe soll dabei unverändert bleiben, d.h. es soll sich weiter um eine reine Minimierungsaufgabe handeln. Der Eignungsgrad ist auf dem abgeschlossenen Intervall  $[0,1]$  abgebildet. Der Effizienzfaktor  $P_{ij}^k$  der  $k$ -ten Ressource zur Bearbeitung der Operation  $j$  des Auftrags  $i$  berechnet sich dann im Sinne der Minimierung zu

$$P_{ij}^k = (1 - e_{ij}^k) p_{ij}^k. \quad \text{Gleichung 6.13}$$

Nun wird der Effizienzfaktor der einzelnen Ressourcen aus der Menge der Alternativressourcen Mensch und Roboter in die Berechnung der Länge der Teilintervalle mit einbezogen. Dies geschieht in folgender Weise: Zunächst werden die Ressourcen bezüglich ihrer Effizienz verglichen. Dann wird das paarweise Verhältnis der  $P_{ij}^k$ ,  $1 \leq k \leq m$  zwischen den Ressourcen gebildet, das ihr Potential zur Bearbeitung einer Operation wiedergibt. Die Länge  $|M_k|$  des Teilintervalls für Ressource  $M_k$  berechnet sich dann mit

$$\alpha_{lk} = \alpha_{kl} = \frac{P_{ij}^k}{P_{ij}^l}, \text{ falls } P_{ij}^k \leq P_{ij}^l \quad \text{Gleichung 6.14}$$

und

$$x_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{falls } P_{ij}^k \leq P_{ij}^l \\ -1, & \text{falls } P_{ij}^k \geq P_{ij}^l \end{cases} \quad \text{Gleichung 6.15}$$

zu

$$l_k = |M_k| = \frac{1}{m} + \frac{1}{\beta m} \sum_{l=1}^m x_{kl} (1 - \alpha_{kl}), \quad 1 \leq k, l \leq m, \beta = 1 \vee 2. \quad \text{Gleichung 6.16}$$

Der Skalierungsfaktor  $\beta$  nimmt dabei abhängig von der Varianz der Eignungsgrade der Alternativressourcen die Werte 1 oder 2 an.

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{falls die Varianz der Eignungsgrade der Alternativressourcen } < 0,5 \\ 2, & \text{falls die Varianz der Eignungsgrade der Alternativressourcen } > 0,5 \end{cases}$$

Dabei gelten die notwendigen Bedingungen

$$\sum_{i=1}^m |M_i| = 1 \quad \text{Gleichung 6.17}$$

und

$$\sum_{l=1}^m x_{kl} (1 - \alpha_{kl}) \leq 2, \quad 1 \leq k, l \leq m. \quad \text{Gleichung 6.18}$$

Daraus ergibt sich insgesamt für die Teilintervalllängen  $l_k$ ,  $1 \leq k \leq m$ , bzw. den Wahrscheinlichkeitsvektor  $\vec{l}$  folgende algebraische Gleichung:

$$(l_1, \dots, l_k, \dots, l_m) = \vec{l} = \frac{1}{m} + \frac{1}{\beta m} (Id - A) \circ X \quad \text{Gleichung 6.19}$$

mit

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \alpha_{kl}, \quad 1 \leq k, l \leq m$$

$$\mathbf{X} = x_{kl}, \quad 1 \leq k, l \leq m$$

Die Entscheidung, auf welcher Ressource  $O_{ij}$  eingeplant werden soll, erfolgt demnach durch folgende Aufteilung:

- Ist  $[0 < r \leq l_1]$ , plane  $O_{ij}$  für Ressource 1 (Mensch) ein.

- Ist  $[l_1 < r \leq 1]$ , plane  $O_{ij}$  für Ressource 2 (Roboter) ein.

Die Kodierung der Operationsfolgen erfolgt wie in Kapitel 5.3.2.2 beschrieben.

## **6.5 Die genetischen Operatoren für die Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation**

Aufgrund der hinzugekommenen Restriktionen zwischen den Aufträgen bei der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation, stellen die für das FJSSP in Abschnitt 5.3.5 beschriebenen genetischen Operatoren die Zulässigkeit der Prozessabläufe nicht mehr ohne weiteres sicher. Daher müssen sowohl der Crossover Operator als auch die Mutation einigen Modifikationen unterzogen werden.

### **6.5.1 Crossover-Operator für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation**

Der Crossover Operator für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation kann in seiner Grundform wie in Kapitel 5.3.5 beschrieben angewendet werden. Um die Zulässigkeit der genotypischen Schedules bezüglich der Reihenfolgebeziehungen sicherzustellen, muss nach dem Austausch der Gensequenzen zwischen den Elternchromosomen eine Konsistenzprüfung der Nachkommen durchgeführt werden.

Zunächst wird das Crossover wie gewohnt durchgeführt. Anschließend werden durch Prüfung der Vorgänger-Nachfolger Beziehungen innerhalb des Reihenfolgechromosoms, mögliche Konflikte aufgedeckt und durch zyklische Vertauschung der in einen Konflikt verwickelten Operationen behoben. Dies führt dazu, dass nach der Korrektur des Reihenfolgechromosoms Nachfolgeraufträge an der erstmöglichen Position nach den entsprechenden Vorgängeraufträgen stehen, wobei die von der zyklischen Vertauschung nicht betroffenen Aufträge, das sind jene, die in keinen Vorgänger-Nachfolger Konflikt verwickelt sind, fest bleiben. Dieses Vorgehen wird in Bild 6.5 an einem Beispiel gezeigt.

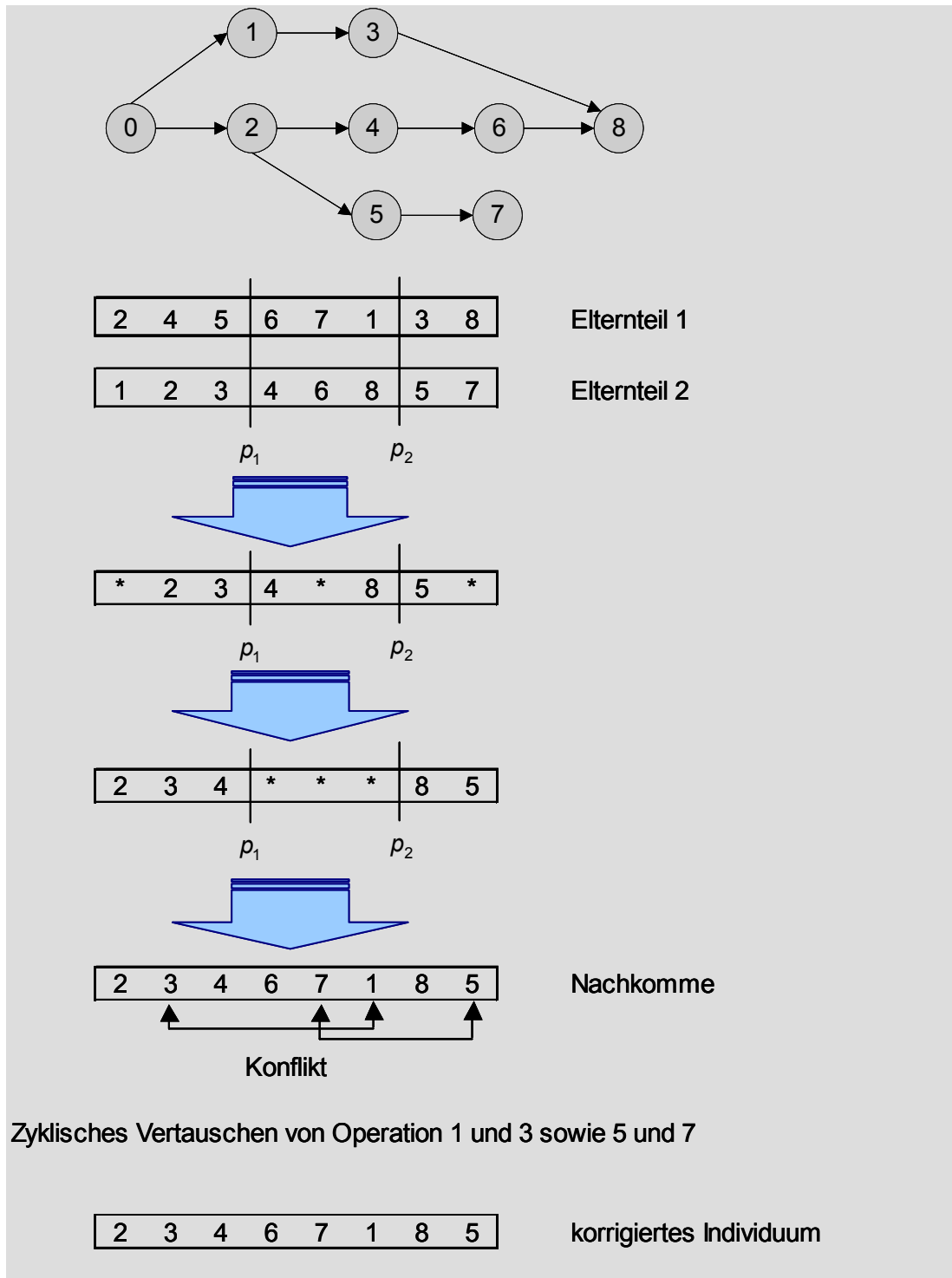


Bild 6.5: Crossover für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation

Der Pseudocode des Sortiervorgangs wird nachfolgend beschrieben. Dabei bezeichnet der Operator  $\prec$  die Präzedenzrelationen zwischen den Aufträgen in dem Sinne, dass, falls  $J_i \prec J_k$  gilt, der Auftrag  $J_i$  ein Vorgänger von Auftrag  $J_k$  ist.

```

BEGIN
  ∀ resources m
    ∀ jobs j
      ∀ jobs k
        IF (k < i)
          DO
            exchange indexes of i and k
END

```

Bild 6.6: Entwickelter Pseudocode für den Sortiervorgang des Crossover-Operators für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation

### 6.5.2 Mutations-Operator für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation

Damit nur zulässige Montageabläufe generiert werden, wird auch der Mutationsoperator angepasst. Dies geschieht in folgender Weise:

1. Sei  $r \in [0, 1]$  eine gleichverteilte Zufallsvariable und  $p_m$  die Mutationswahrscheinlichkeit. Gilt  $r \leq p_m$ , so werden zunächst auf Zufallsbasis zwei Gene, d.h. zwei Operationen bestimmt, die miteinander vertauscht werden sollen.
2. Besteht zwischen den zugehörigen Aufträgen eine konjunktive Verknüpfung und sind sämtliche direkten Vorgänger-Operationen eingeplant (dies gilt als erfüllt, falls sie im Chromosom vor den beiden ausgewählten Operationen stehen), werden die Operationen vertauscht. Ansonsten wird nach der Bestimmung der ersten Operation solange weitergesucht, bis ein geeigneter Partner zur Mutation gefunden wird.

Diese Art der Mutation stellt die Anforderung, nur benachbarte Gene zur Vertauschung in Betracht zu ziehen. Dies ist ein positiver Effekt, da diese Gene in gegenseitiger Nachbarschaft liegen und damit eine genotypisch nur geringe Veränderung am Genom vorgenommen wird. Es wird erwartet, dass eine geringen Veränderung des Genotyps eine geringe Veränderung der Fitness bewirkt. Dies ist allerdings nicht immer der Fall, da besonders bei Scheduling Problemen eine geringe Änderung der Reihenfolgen eine extreme Veränderung der Zielfunktionswerte zur Folge haben kann. Solche Effekte sind charakteristisch für Scheduling Probleme und ihre Glättung ist kaum möglich.

### 6.5.3 Die Dekodierungsfunktion für die Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation

Die Generierung feinterminierter zulässiger Montageablaufpläne für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation wird nach einigen Erweiterungen gegenüber der Version aus Kapitel

5.3.3 gänzlich von der Dekodierungsfunktion übernommen. In diesem Fall gestaltet sich die Bildung der Menge der Anfangsoperationen schwieriger, da zusätzliche Vorgänger-Nachfolger Beziehungen zwischen den Aufträgen berücksichtigt werden müssen.

Während der Evaluation der Pläne beschränkt sich die Dekodierungsfunktion auf die Bearbeitung bereitstehender Aufträge. Sie arbeitet dabei auf Teilproblemen, die ihrerseits stets klassische JSSP bilden, die immer dann, wenn die Menge der Vorgänger eines Auftrags abgeschlossen ist, er also zur Verarbeitung freigegeben wird, durch die Hinzunahme des betreffenden Auftrags aktualisiert werden. Die Prioritätsentscheidungen aufgrund der Reihenfolgen innerhalb eines Chromosoms werden dann auf diesen Auftrag ausgedehnt. Die Freigabezeiten für die Aufträge lassen sich mittels der Gleichung in Kapitel 6.2.1 berechnen. Diese Vorgehensweise entspricht der Lösung von deterministischen Job-Shop Scheduling Problemen, wie sie auch bei Teich [Tei-98] erläutert wird, wobei die dort beschriebenen Gleichungen ebenfalls zur Berechnung der Freigabe- und Startzeiten der Aufträge bzw. deren Operationen herangezogen werden.

Bild 6.7 zeigt den Pseudocode der Dekodierungsfunktion, der für die fähigkeitsorientierte Ablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Gegenüber der Dekodierungsfunktion für das FJSSP wurde die Dekodierungsfunktion bezüglich der Berücksichtigung der Präzedenzrelationen zwischen den Aufträgen erweitert. Im Pseudocode sind  $i$ ,  $l$  und  $h$  Auftragsindizes,  $p$  die Anzahl der bereits abgeschlossenen Aufträge,  $p_i$  ist die Anzahl der bereits eingeplanten Operationen von Auftrag  $i$  und  $m$  ist die als nächstes einzuplanende Ressource, wobei  $c_i$  bzw.  $c_m$  die Fertigstellungszeiten des Auftrags  $i$  bzw. der Ressource  $m$  ist.  $mach[m]joblist$  bezieht sich auf die Auftragswarteschlange der Ressource  $m$ . Mit  $job[i].npred$  wird die Anzahl der Vorgängeraufträge und mit  $job[i].flag$  der Abarbeitungsgrad des Auftrags  $i$  bezeichnet.

BEGIN	
$\forall$ jobs $i$	Berechne den Gesamteignungsgrad
$\forall$ operations $j$	
$\forall$ resources $m$	
IF ( $m \leftarrow O_{ij}$ )	
$E_{\max}^+ = e_{ij}^k$	
$\forall$ jobs $i$	Generiere einen leeren Belegungsplan
{	
IF ( $job[i].flag = nrpred$ )	Prüfe, ob sämtliche Vorgänger von $i$ eingeplant sind
$\forall$ resources $m$	
$ressource[\tau_{i,0}].joblist \leftarrow job_{i,0}$	Ordne die ersten Operationen sämtlicher Aufträge ihren Ressourcen zu
}	
$p = 0;$	
WHILE( $p < n$ )	Hauptschleife
{	
DO	
$\forall$ jobs $i$	
IF ( $c_i < c_h$ )	
THEN $k = i;$	
$m^* \leftarrow \tau_{k,j}$	
$\forall$ jobs $i \in mach[m^*].joblist$	Ermittle die Auftragsprioritäten auf Ressource $m^*$
IF( $priority(i) < priority(h)$ )	
THEN $l = i;$	
$s_l = \max(c_l, c_m)$	Ordne Auftrag $l$ die frühestmögliche Startzeit zu
$C_l = s_l + p_{l,j}$	Nächste Fertigstellungszeit von Auftrag $l$
IF( $p_l = n_l$ )	
{	
THEN $p = p + 1;$	
$\forall$ successorjobs $q$ of $i$	
IF( $job[q].flag = job[q].nrpred$ )	
$\forall$ resources $m$	
$ressource[\tau_{q,0}].joblist \leftarrow job_{q,0}$	
}	
ELSE	
$mach[\tau_{i,j+1}].joblist \leftarrow job_{i,j+1}$	Aktualisiere die Menge der Anfangsoperationen durch Hinzufügen der nächsten Operation des Auftrag $l$ in die Warteschlange der nächsten Ressource seiner Ressourcenfolge
}	
$C_{\max} = \max(C_l)$	
END	

Bild 6.7: Entwickelter Pseudocode der Dekodierungsfunktion für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation

### 6.5.4 Selektion von Ablaufplänen in der Mensch-Roboter-Kooperation

Wie in Kapitel 5.3.7 beschrieben, wird das aufgrund seiner Parameterabhängigkeit kritisierte Nicheing bei der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation durch einen erweiterten Selektionsmechanismus ersetzt, bei dem die Dichte der Nachbarschaft von Individuen gleicher Pareto-Front durch eine sogenannte *crowding distance* berücksichtigt wird. Dabei wird auf die Vorgehensweise von Deb [Deb-00] zurückgegriffen, die ohne Einschränkungen durch problemspezifische Anforderungen eingesetzt werden kann. Die Schritte zur Bestimmung der *crowding distance* eines Individuums innerhalb einer Front sind folgende:

1. Sei  $|F| = l$  die Anzahl der Individuen innerhalb der Front  $F$ . Für jedes Individuum  $i$  wird seine *crowding distance*  $cd_i = 0$  gesetzt.  $cd_i$  ist die *crowding distance* des Individuums  $i$ .
2. Die Zielfunktionswerte werden in aufsteigender Reihenfolge geordnet, d.h. der Indexvektor  $I^m = \text{sort}(f_m, \geq_n)$  wird bestimmt. Dabei ist  $m$  die Anzahl der Zielfunktionen. Der Vergleichsoperator  $\geq_n$  ist wie folgt definiert:

$$i \geq_n j \text{ falls } (R_i < R_j) \vee [(R_i = R_j) \wedge (cd_i > cd_j)] \quad \text{Gleichung 6.20}$$

$R_i$  ist der Rang.

3. Der *crowding distance* der Randlösungen wird ein ausreichend hoher Wert zugeordnet, d.h. für alle Zielfunktionswerte  $m$  ist  $cd_{I_j^m} = cd_{I_l^m} = \infty$  und für alle anderen Lösungen, also  $j = 2, \dots, l - 1$ , gilt:

$$cd_{I_j^m} = cd_{I_j^m} + \frac{f_m^{I_{j+1}^m} - f_m^{I_{j-1}^m}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}. \quad \text{Gleichung 6.21}$$

Der Index  $I_j$  bezeichnet den  $j$ -ten Lösungsindex des  $j$ -ten Elements in der sortierten Liste. Der zweite Additionsterm der rechten Seite bezeichnet die Differenz der Zielfunktionswerte, normiert durch die Differenz der Extremalwerte zweier benachbarter Lösungen, beiderseits der Lösung  $i$ . Um eine möglichst homogene Verteilung der Individuen innerhalb der Pareto-Front zu erreichen und Montageabläufe in eventuell vorhandene Nischen zu erhalten, werden bei der Selektion grundsätzlich diejenigen begünstigt, deren *crowding distance* größer ist. Auf diese Weise wird die Übernahme der jeweils insgesamt besten Individuen beider Ge-



nerationen garantiert, unabhängig davon, ob diese zuvor der Eltern- oder Nachkommengeneration angehört haben. Bild 6.8 zeigt den Pseudocode für diese Prozedur nach Deb.

Weiter ist  $I$  eine Menge, mit  $|I| = l$  und  $m$  ist die Anzahl der Zielfunktionen. Des Weiteren bezieht sich  $I[i]_m$  auf die  $m$ -te Zielfunktion des  $i$ -ten Individuums der Menge  $I$ . Die Fitnessbestimmung erfolgt also schrittweise, zunächst durch die Bestimmung eines Ranges für alle Individuen und anschließender Berechnung der *crowding distance* für sämtliche Individuen mit gleichem Front-Index.

```

BEGIN
   $l = |I|$ 
   $\forall i \ I[i]_{dist} = 0$ 
   $\forall m \ I = \text{sort}(I, m)$ 
   $I[1]_{dist} = I[l] = \infty$ 
  for  $i = 1 : (l - 1)$ 
     $I[i]_{dist} = I[i]_{dist} + (I[i + 1]_m - I[i - 1]_m)$ 
  END

```

Bild 6.8: Pseudocode für die Berechnung der *crowding distance* für Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation in Anlehnung an Deb [Deb-00]

Die Fitness eines Montageablaufs setzt sich nach der Berechnung dieser Größen folglich zum einen aus seinem Rang und zum anderen aus seiner *crowding distance* zusammen. Beide Größen nehmen nun wie folgt Einfluss auf die Entscheidung bei der Selektion. Bei der *crowded tournament* Selektion entscheidet als erste Instanz der Rang über die Übernahme eines Montageablaufs (in Form seines Individuums) in den *mating-pool*. Dabei wird jeweils jenes mit einem niedrigeren Rang, also niedrigeren Front-Index, ausgewählt. Soll zwischen Montageabläufen gleichen Ranges entschieden werden, greift als zweite Entscheidungsinstanz deren *crowding distance* und es wird jener Ablauf mit der höheren *crowding distance* ausgewählt.

Dieses Vorgehen soll gewährleisten, dass die zur Rekombination ausgewählten Montageabläufe möglichst gut über die Pareto-Front verteilt sind, was zur Erhaltung der genetischen Vielfalt der Population beiträgt. Die Anzahl der an der Wettkampfselektion teilnehmenden Individuen ist aus Gründen der einfacheren und übersichtlicheren Analyse a priori auf zwei beschränkt.

## 7 Entwicklung eines softwarebasierten Werkzeugs zur Optimierung der Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperation

In den vorangegangenen Kapiteln wurden ein Systemmodell und Verfahren zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation konzipiert und entworfen. Diese sollen im Rahmen dieses Kapitels in ein softwarebasiertes Entwicklungswerkzeug umgesetzt werden. Der Aufbau dieses Werkzeugs und die Arbeitsweise mit diesem unterstützenden Hilfsmittel bei der Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen werden im Folgenden entworfen.

### 7.1 Aufbau des Entwicklungswerkzeugs

Das Entwicklungswerkzeug besteht aus zwei Komponenten, die über eine Datenbank miteinander verbunden sind. Die eine Komponente stellt das fähigkeitsorientierte Bewertungssystem dar, mit dem die einzelnen Montageoperationen bewertet werden müssen, die andere Komponente führt die Ablaufplanung und Optimierung durch.

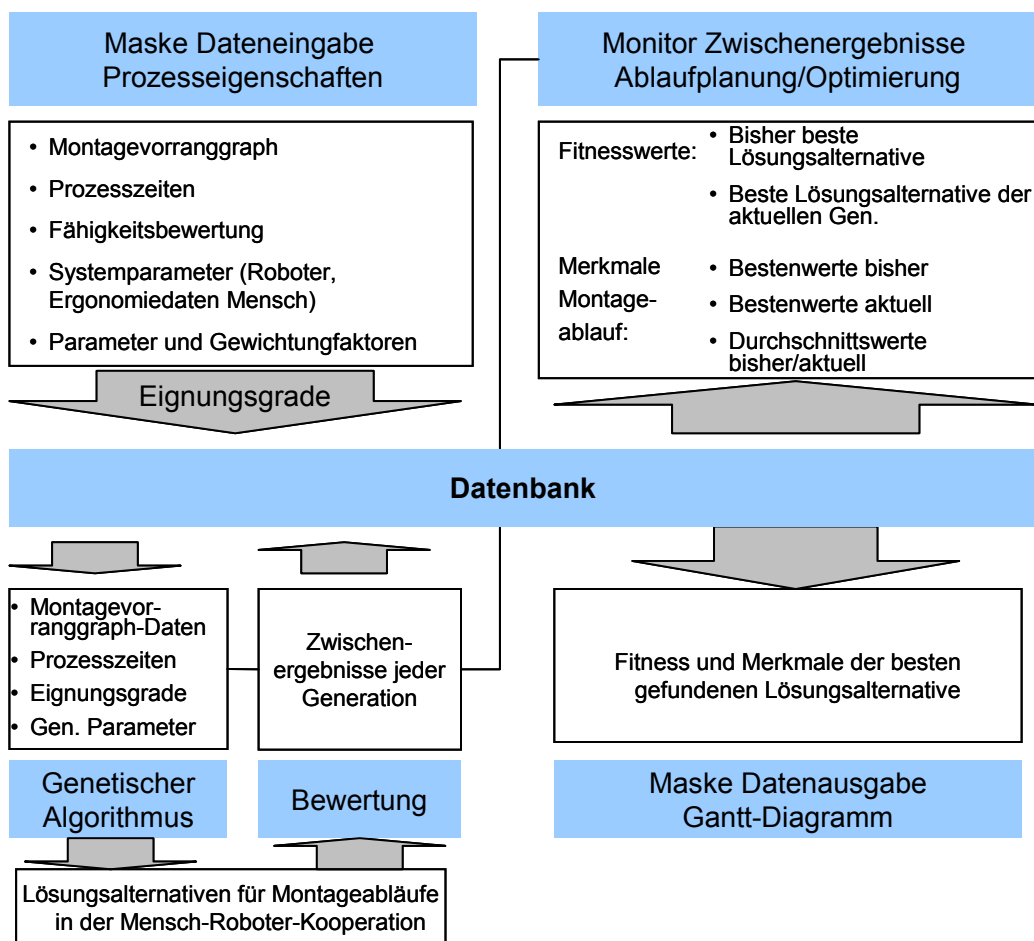


Bild 7.1: Aufbau des Entwicklungswerkzeugs

Bild 7.1 stellt den Aufbau des Entwicklungswerkzeugs aus den Teilsystemen sowie deren Zusammenwirken untereinander dar.

Entsprechend den aus der Analyse an das Entwicklungswerkzeug abgeleiteten Anforderungen soll das Programmsystem aus Teilsystemen zur bedienerfreundlichen Datenein- und ausgabe (Masken), Beobachtung von Zwischenergebnissen (Monitor), dem Bewertungssystem und dem genetischen Algorithmus sowie einer zentralen Datenbank zur Verwaltung der erzeugten Zwischen- und Endergebnisse bestehen. Dabei ist für die Beobachtung der Zwischenergebnisse während eines Programmdurchlaufs die Synchronisation der Verfahrensteilsysteme über die Datenbank vorzusehen.

Zur Darstellung der entworfenen Window-orientierten Bedieneroberfläche zeigt Bild 7.2 beispielhaft verschiedene Dateneingabe-Masken.

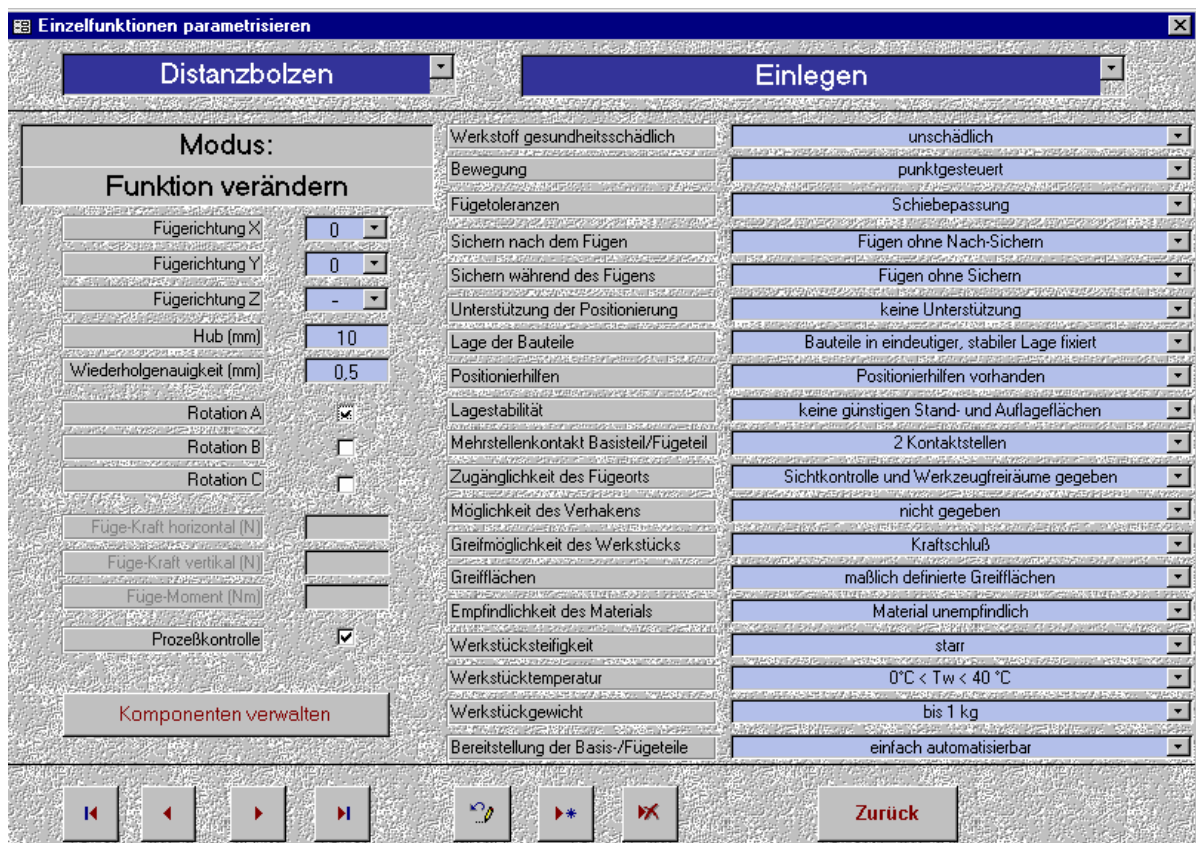


Bild 7.2: Bedieneroberfläche für den Anwender des Werkzeugs (Ausschnitte)

Bei der Eingabe von Werten in die Datenfelder der Eingabe-Masken wird der Bediener teilweise durch voreingestellte Werte oder eine Auswahl an gültigen Werten, beispielsweise durch Kombinationsfelder, unterstützt. Aus den Datenfeldern der Ausgabe-Masken sind die Zwischen- und Endergebnisse abzulesen. Besonders anschaulich ist dabei die Darstellung des Gesamtergebnisses mit Hilfe eines Gantt-Diagramms.

## 7.2 Daten- und Parametersätze

### 7.2.1 Gewichtungsfaktoren

In der Analyse wurden im Rahmen der Formulierung der Anforderungen an das Entwicklungsverfahren Zielkriterien für die Optimierungsaufgabe abgeleitet. Diese Zielkriterien betreffen zum einen die Fähigkeitsorientierung bei der Verteilung der Montageoperationen auf Mensch und Roboter und zum anderen temporale Komponenten. Dabei wird bei der Entwicklung der Montageabläufe davon ausgegangen, dass die Zielkriterien der Fähigkeitsorientierung ebenso wichtig sind wie die temporalen Ziele.

Zur Gewichtung der Ziele der Fähigkeitsorientierung sind Koeffizienten  $\alpha_n$  eingeführt worden. Für diese Koeffizienten wurden im Rahmen der Expertenbefragung aus Kapitel 3.1.2 Werte ermittelt. Diese Werte können vom Anwender des Entwicklungswerkzeugs übernommen werden, es besteht aber auch die Möglichkeit, die Werte nach den Bedürfnissen des Unternehmens über eine Eingabemaske anzupassen.

Bild 7.3 zeigt die Strukturierung der Gewichtungsfaktoren analog zur Ordnung der Zielkriterien für die Optimierungsaufgabe.

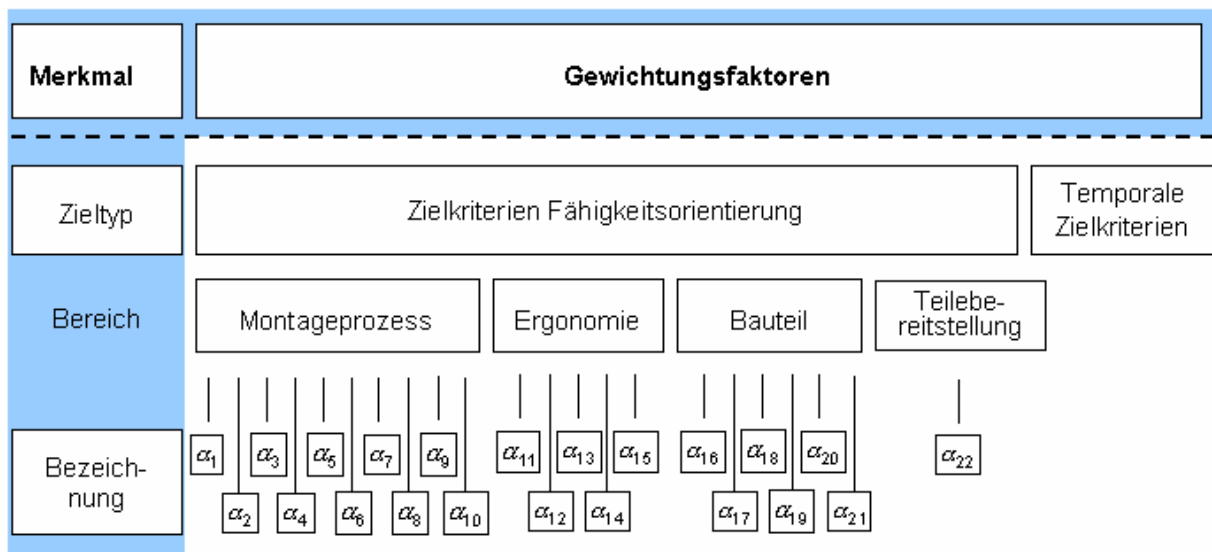


Bild 7.3: Gewichtungsfaktoren der Zielkriterien

### 7.2.2 Parameter des Entwicklungsverfahrens

Neben den anwenderspezifischen Gewichtungskoeffizienten wird die Parametrisierung des für das Entwicklungsverfahren eingesetzten genetischen Algorithmus erforderlich. Die wählbaren Konstanten lassen sich in fünf Gruppen aufteilen (Bild 7.4):

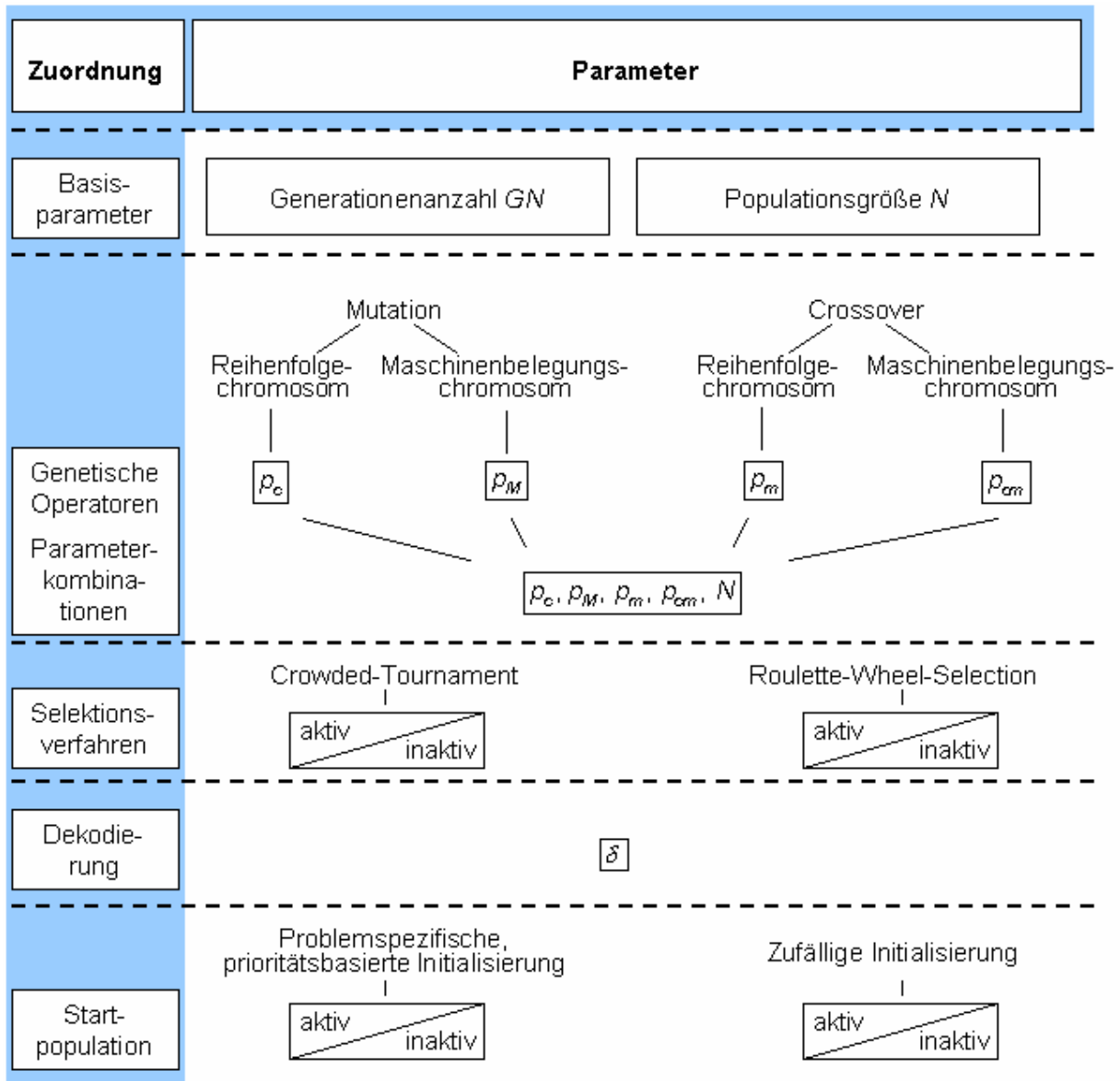


Bild 7.4: Parameter des Entwicklungsverfahrens

- Die Basis-Parameter bestimmen den Umfang an Lösungsalternativen und damit die Bandbreite an verschiedenen fähigkeitsorientierten Montageabläufen, mit denen der genetische Algorithmus während eines Iterationsschrittes arbeitet. Durch diese Parameter wird die Laufzeit eines Entwicklungslaufes hauptsächlich bestimmt. Die Generationszahl ist außerdem ein Abbruchkriterium für die Durchführung des Verfahrens.
- Zur Einstellung und Dimensionierung der genetischen Operatoren sind weitere Parameter vorgesehen.

- Die Verfahrensvarianten der Selektion sind ausschließlich alternativ einsetzbar. In den Eingabemasken für den Verfahrensanwender sind dementsprechend Verriegelungen zur Vermeidung von Fehleingaben zu implementieren.
- In ähnlicher Weise ist bei der Auswahl eines Initialisierungs-Verfahrens die Aktivierung des alternativen Verfahrens zu unterbinden.
- Die Variation des Parameters  $\delta$  für die Dekodierung gibt an, ob reine aktive oder unverzögerte Pläne produziert werden.

Da die Populationsgröße  $N$ , die Crossoverwahrscheinlichkeit  $p_c$  sowie die Mutationswahrscheinlichkeit  $p_m$  einander in ihrer Wirkungsweise beeinflussen und dadurch auch stark auf die Konvergenzeigenschaften des genetischen Algorithmus Einfluss nehmen, ist es wichtig, eine möglichst günstige Parameterkombination zu wählen. Da sich Parameterkombinationen einer analytischen Analyse a priori entziehen, bleibt zur Auffindung einer geeigneten Parametrisierung nur die experimentelle Evaluation verschiedener Parameter- und Operatorkombinationen. Dies bedeutet, dass alle möglichen Einstellungskombinationen überprüft werden müssen, um günstige Konstellationen zu bekommen.

### 7.3 Arbeitsweise mit dem Entwicklungswerkzeug

Das Systemmodell und darin insbesondere das Vorgehensmodell sowie der Aufbau des Entwicklungswerkzeugs und seine Daten- und Parameterstruktur führen zu folgender Arbeitsweise und –abfolge für den Bediener:

- Die Eingabe von Daten erfolgt über Eingabemasken, in die vom Bediener jeweils thematisch zusammengehörende Daten einzutragen sind. Die Eingabemasken sind so gestaltet, dass ein intuitives Vorgehen des Bedieners unterstützt wird und Fehleingaben durch ein Angebot an vorausgewählten Feldeinheiten weitestgehend vermieden werden.
- Während des Planungsablaufs können wichtige Zielkriterien sowie die Verläufe übergeordneter Variablen des genetischen Algorithmus in einem mit dem Verfahren synchronisierten Zwischenergebnisfenster der Datenbank beobachtet werden (Monitor).
- Die Endergebnisse der Planung können sowohl in graphischer Form (Gantt-Diagramm) als auch in tabellarischer Form in mehreren Ausgabemasken des Werkzeugs ausgegeben werden oder den Ergebnistabellen der Datenbank entnommen werden.

## **8 Umsetzung der Ergebnisse und pilothafte Anwendung**

### **8.1 Programmsystem**

#### **8.1.1 Rechnerimplementierung**

Das entworfene softwarebasierte Werkzeug ist als Programmsystem implementiert worden. Das Programmsystem wurde mit Hilfe der objektorientierten Softwareentwicklung realisiert. Als Hardwarebasis für die Implementierung des Software-Tools dient ein Rechner mit Intel-Pentium III Prozessor. Die Systemmerkmale sind im einzelnen:

- Betriebssystem: Microsoft Windows 2000
- Entwicklungsumgebung: Microsoft Visual C++
- Datenbank: Microsoft Access 2000

Objektorientiertes Design und der modulare Aufbau der einzelnen Komponenten soll ein ausreichendes Wiederverwendungspotential im Hinblick auf spätere Erweiterungen gewährleisten und damit die Möglichkeit bieten, ohne größeren Aufwand benutzerdefinierte Funktionen oder andere Optimierungsmethoden nach individuellen Bedürfnissen zu integrieren.

#### **8.1.2 Aufbau und Verfahrensweise des Programmsystems**

Der strukturelle Aufbau des Programmsystems orientiert sich an den Entwicklungsschritten des System- und Vorgehensmodells.

Die Datenbasis enthält die Grunddaten, Parameter und Randbedingungen der in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle zu bearbeitenden Montageaufgabe. Entsprechend der Bearbeitungsinhalte der einzelnen Entwicklungsschritte bei der Anwendung des Werkzeugs wird diese Datenbasis selektiv genutzt, um daraus im Verlauf der Vorgehensweise die Ergebnisdaten zu generieren. Der Programmaufbau ist in Bild 8.1 zusammenfassend beschrieben.

In den symbolisch als Magnetplattenspeicher dargestellten Strukturblöcken sind die Informationen zur Datenbasis und die Ergebnisdaten in Form einer Datenbank zu speichern und zu verwalten. Die als Funktionsblöcke gezeigten, datenverarbeitenden Entwicklungsschritte des Vorgehensmodells sind in die einzelnen Programmsysteme zu implementieren. Die gerichteten Verbindungselemente zwischen den Funktionsblöcken und der Datenbasis bzw. den Ergebnisdaten stellen die Informations- und Datenflüssen dar, die realisiert werden müssen.

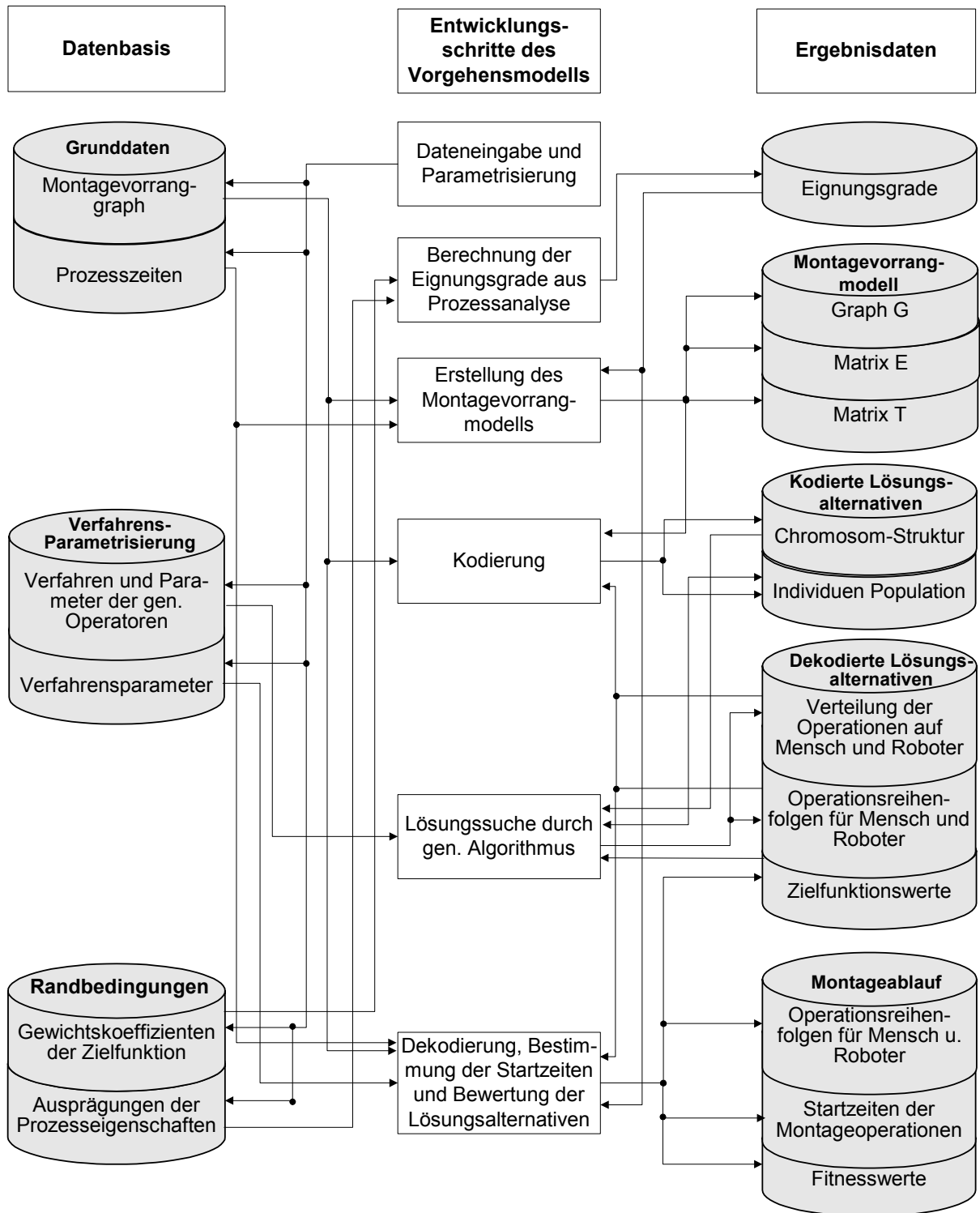


Bild 8.1: Programmaufbau des Entwicklungswerkzeugs für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der Mensch-Roboter-Kooperation



## **8.2 Pilothafte Anwendung des Werkzeugs**

Die Vorgehensweise, die Anwendung der Software und die damit erzielten Ergebnisse werden anhand eines Beispiels veranschaulicht und erprobt.

### **8.2.1 Beschreibung der Beispielmontage**

Als Testinstanz wird ein Thermodrucker herangezogen, der sich auf Grund seines breiten Spektrums an Montageoperationen gut zur Erprobung des Werkzeugs eignet. Der Montagevorranggraph des Beispielproduktes ist in Bild 8.2 gegeben.

Neben dem Montagevorranggraph werden über die Eingabemasken der Prozessanalyse die fähigkeitsorientierten Eigenschaften der einzelnen Montageoperationen eingegeben [Beu-02]. Zusätzlich ist die Eingabe der Prozesszeiten von Mensch und Roboter für jede Montageoperation nötig.

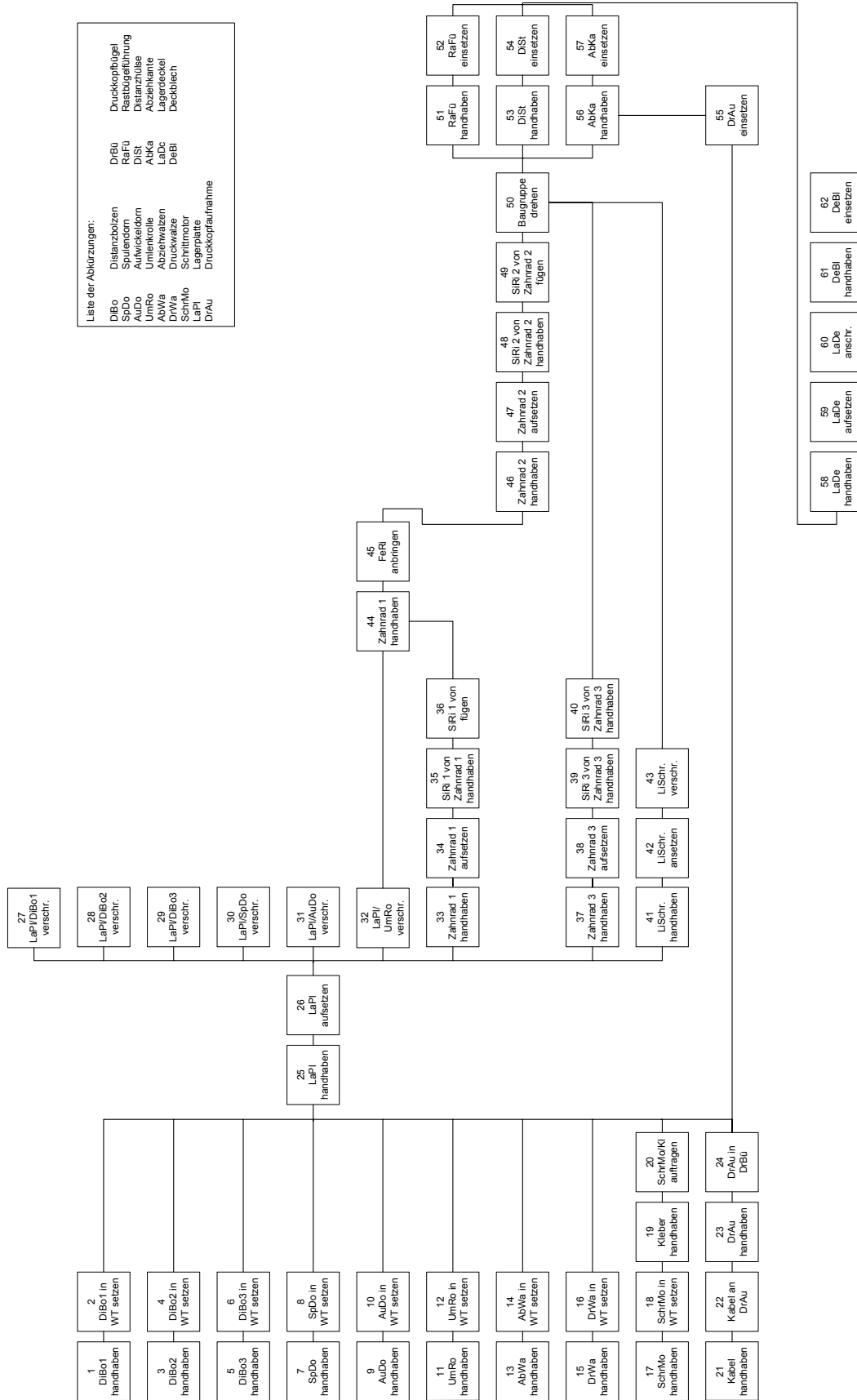


Bild 8.2: Montagevorranggraph Beispielprodukt Thermodrucker

### 8.2.2 Ermittlung der Eignungsgrade

Im ersten Schritt des entwickelten Verfahrens werden die Eignungsgrade aus den vom Benutzer eingegebenen Ausprägungen errechnet. Die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien sind dabei mit den Ergebnissen der Expertenbefragung belegt. Der Benutzer kann diese Gewichtungen aber individualisieren.

Die Eignungsgrade werden im ersten Schritt für die einzelnen Montageoperationen des Montagevorranggraphen bestimmt. In Bild 8.3 ist ein Monitor mit dem Zwischenergebnis der Eignungsgrade der einzelnen Montageoperationen dargestellt.

Ordnung	Komponente	Funktion	EG Mensch	EG Roboter
1	Distanzbolzen	Einlegen	0,94	0,88
2	Distanzbolzen	Weitergeben	0,94	0,88
3	Spulendorn	Weitergeben	1	0,95
4	Spulendorn	Einlegen	1	0,95
5	Aufwickeldorn	Weitergeben	0,92	1
6	Aufwickeldorn	Einlegen	0,88	1
7	Schrittmotor	Weitergeben	1	0,54
8	Schrittmotor	Kleben mit chem. abbindenden Klebstoff	0,54	0,65

Bild 8.3: Monitor: Zwischenergebnis Eignungsgrade

In einem nächsten Schritt werden die Operationen und Aufträge, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, neu definiert, um die Anzahl der Vorgänger-Nachfolger Beschränkungen des Planungsproblems möglichst niedrig zu halten. Bild 8.4 zeigt die Projektabelle, in der Operationen und Aufträge neu definiert wurden. Dementsprechend werden auch die Eignungsgrade für die neuen Operationen bestimmt, bevor sie die Grundlage der Ablaufplanung darstellen.

Aufträge	Operationen			
	Operation 1		Operation 2	
	Nr./Einzelarbeitsschritte			
0	1 DiBo1 handhaben	2 DiBo1 in WT setzen		
1	3 DiBo2 handhaben	4 DiBo2 in WT setzen		
2	5 DiBo3 handhaben	6 DiBo3 in WT setzen		
3	7 SpDo handhaben	8 SpDo in WT setzen		
4	9 AuDo handhaben	10 AuDo in WT setzen		
5	11 UmRo handhaben	12 UmRo in WT setzen		
6	13 AbWa handhaben	14 AbWa in WT setzen		
7	15 DrWa handhaben	16 DrWa in WT setzen		
8	17 SMO handhaben	18 SMO in WT setzen	19 Kleber handhaben	20 SMO/Kleb auftragen
9	21 Kabel handhaben	22 Kabel an DrAu	23 DrAu handhaben	24 DrAu in DrB
10	25 LaPI handhaben	26 LaPI aufsetzen		
11	55 DrAu einsetzen			
12	27 LaPI/DiBo1 verschr		28 LaPI/DiBo2 verschr	
13	29 LaPI/DiBo3 verschr		30 LaPI/SpDo verschr	
14	31 LaPI/AuDo verschr		32 LaPI/UmRo verschr	
15	33 Zahnr1 handhaben	34 Zahnr1 aufsetzen	35 SiRi1/Zahnr handh.	36 SiRi1 fuegen
16	37 Zahnr3 handhaben	38 Zahnr3 aufsetzen	39 SiRi3/Zahnr handh.	40 SiRi3 fuegen
17	41 LiSchr handhaben	42 LiSchr ansetzen	43 LiSchr verschrauben	
18	44 Zahnr 1 handh.	45 FeRi anbringen		
19	46 Zahnr2 handhaben	47 Zahnr2 aufsetzen	48 SiRi2/Zahnr2 handh.	49 Siri2/Zahnr fuegen
20	50 Baugruppe drehen			
21	51 RaF handhaben	52 RaF einsetzen		
22	53 DiSt handhaben	54 DiSt einsetzen		
23	56 AbKa handhaben	57 AbKa einsetzen		
24	58 LaDe handhaben	59 LaDe aufsetzen	60 LaDe anschrauben	
25	61 DeBl handhaben	62 DeBl einsetzen		

Bild 8.4: Projekttable Beispiels Thermodrucker: Definition der Operationen und Aufträge

### 8.2.3 Parameter-Einstellbereiche und Operatoren-Anwendungsschwerpunkte

Die Strategie zur Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle basiert, ebenso wie die zur Lösung des FJSSP, auf der formalen

genetischen Trennung der Ressourcenbelegung und der Reihenfolgebildung. Da der maximale Gesamt-Eignungsgrad  $E_{\max}$  bereits vollständig durch die Ressourcenbelegung festgelegt ist, ist eine optimale Einstellung der Parameter des genetischen Algorithmus von entscheidender Wichtigkeit. Da eine geeignete Parametrisierung stets problemorientiert bestimmt werden sollte, werden experimentelle Untersuchungen, unter Berücksichtigung des multiobjektiven Charakters der Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle, durchgeführt, die nach der nun folgenden Festlegung der Testbedingungen erläutert werden.

Da ein genetischer Optimierungsprozess aufgrund seiner stochastischen Operatoren Schwankungen unterworfen ist, ist die Aussagekraft einzelner Optimierungsläufe für die Parametrisierung und die Ermittlung der Eigenschaften der entwickelten Operatoren gering. Einschätzungen auf der Basis durchschnittlicher Entwicklungen des Verfahrens sind aussagekräftiger. Daher wird für die nachfolgend durchgeführten Tests folgendes festgelegt: Für die gerichteten (Selektion) sowie nicht gerichteten genetischen Operatoren (Crossover und Mutation) sowie deren Kombinationen werden je 30 Testläufe für jede Parameterkombination durchgeführt und die erhaltenen Testwerte über alle Läufe gemittelt. Dies entspricht einem gängigen Stichprobenumfang [Bru-96], [Neu-98].

Bei der Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle hat sich in Tests die Durchführung eines Crossovers auf dem Ressourcenbelegungschromosom aufgrund der kurzen Länge seiner Subchromosomen als nicht sinnvoll erwiesen, da dieses der Wirkung einer Mutation gleichkommt. Daher wird zur Manipulation der Ressourcenbelegungschromosomen lediglich ein Mutationsoperator angewendet. Trotz der Trennung der beiden Problemkomponenten können die Parameter des genetischen Algorithmus der einzelnen Komponenten nicht getrennt betrachtet werden, da von der Auswahl der Ressourcen gleichzeitig die Prozessdauer der auf dieser Ressource auszuführenden Operationen bestimmt wird, und dies die Zielfunktionswerte auch der temporalen Zielkriterien beeinflusst. Aufgrund dessen wurden die Ergebnisse aller möglichen Parameterkombinationen miteinander verglichen.

Dabei werden die Crossoverwahrscheinlichkeit  $p_c$ , die Mutationswahrscheinlichkeit auf dem Reihenfolgechromosom  $p_m$  und auf dem Ressourcenbelegungschromosom  $p_M$  jeweils im Bereich  $[0,1; 0,2; \dots; 1,0]$  variiert. Um eine geeignete Parameterkonstellation zu erhalten, werden alle möglichen Kombinationen der Parameter zu drei verschiedenen Populationsgrößen mit  $N=100$ ,  $N=150$  und  $N=200$  Individuen getestet und der Algorithmus wird nach 200 Generationen gestoppt. Die Größe des mating-pool entspricht jeweils der Populationsgröße  $N$ .

Bei der Parametrisierung eines GA zur Behandlung von Einzel-Optimierungsproblemen bildet z.B. der jeweils beste oder mittlere Zielfunktionswert, den man nach einer bestimmten Anzahl von Generationen erhält, die Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Konfiguration des GA. Bei multikriteriellen Problemen wird jedoch nach der Menge der pareto-optimalen Lösungen gesucht, deren Elemente nach Bagchi [Bag-99] die folgenden beiden Eigenschaften besitzen sollen:

- Lösung befindet sich auf der Pareto-Front,
- Lösungen sind auf dieser möglichst gut verteilt.

Um den genetischen Algorithmus für die Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle zu kalibrieren, wird daher das Konzept der Pareto-Dominanz in die Entscheidung über das Lösungspotential einer Parameterkombination mit eingebunden. Dazu wird folgendermaßen vorgegangen: Alle Pareto-Lösungen der Testläufe zu einer bestimmten Parameterkonfiguration werden gespeichert und anschließend einer gesonderten Ranking-Prozedur unterworfen. Die daraus resultierende durchschnittliche Anzahl auf phänotypischer Basis echt unterschiedlicher Pareto-Lösungen, also Lösungen mit Rang 1, werden als erste Entscheidungsinstanz für eine Parameterkombination betrachtet.

Da im Falle der Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle die Struktur der Pareto-Front zunächst unbekannt ist, kann die mittlere Anzahl pareto-optimaler Lösungen nicht als alleinige Entscheidungsbasis gelten. Es ist möglich, dass das Resultat einer bestimmten Parameterkonfiguration zwar eine höhere mittlere Anzahl verschiedener Pareto-Lösungen aufweist als bei einer anderen, manche Pareto-Lösungen dieser aber einige der ersteren dominieren. Daher bildet die Metrik von Zitzler et al. [Zit-99], die das Dominanzpotential der Pareto-Lösungen einer Parameterkonfiguration im paarweisen Vergleich zu den anderen misst, eine zusätzliche Entscheidungsgrundlage für eine Parameterkombination. Umfangreiches Material zur Verwendung der Metrik steht mit [Zit-99] zu Verfügung.

Aus Gründen der Übersicht werden an dieser Stelle nur die jeweils besten Parameterkombinationen aufgeführt. Diese ergeben sich für:

$N=100$ ,

$p_c = 0,5; 0,6; 0,7$  mit  $p_m = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  und  $p_M = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$

und sind in Bild 8.5 dargestellt.

Aufgrund der erreichten mittleren Anzahl pareto-optimaler Lösungen erweist sich die Kombination

$$N = 100, p_c = 0,7; p_m = 0,2; p_M = 0,6$$

als die geeignetste.

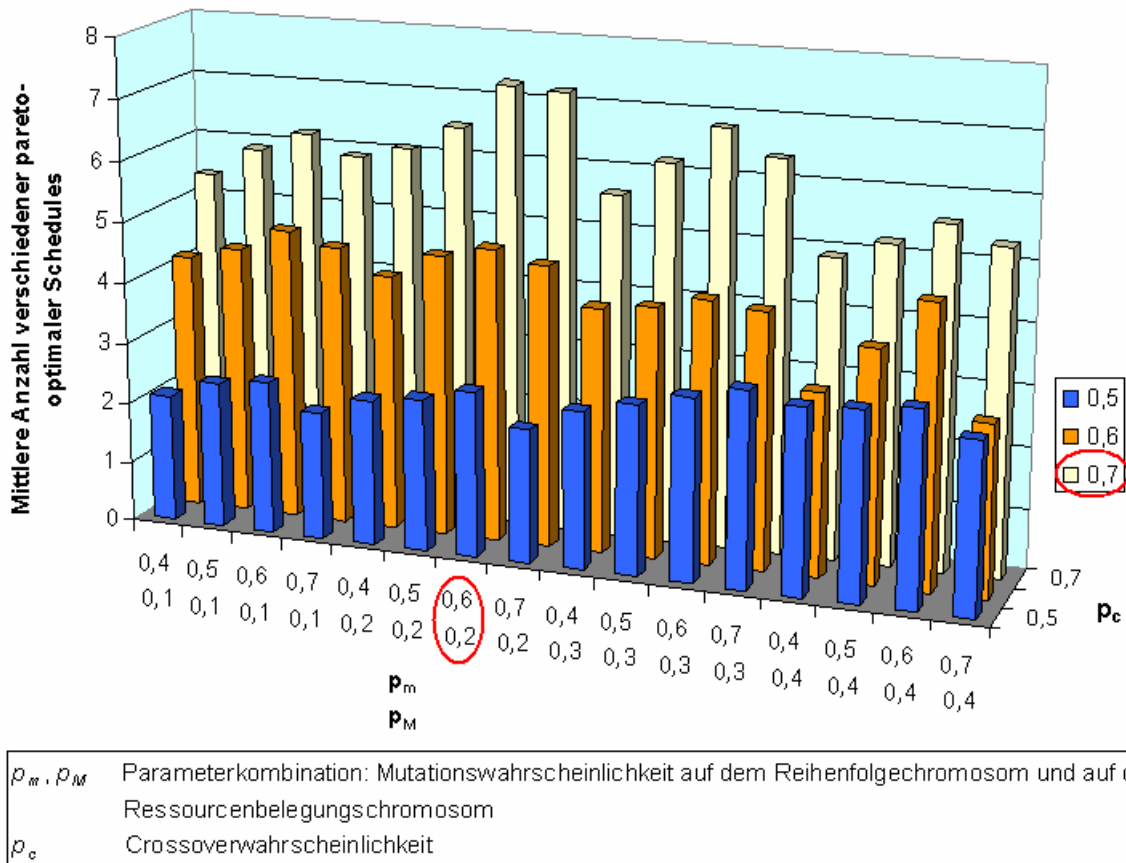


Bild 8.5: Parametertests für die Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle

Für den Parameter  $\delta$ , der für die Dekodierung und somit die Ermittlung der Startzeiten der Montageoperationen benötigt wird, werden ebenfalls Tests mit verschiedenen Konfigurationen durchgeführt, wobei  $\delta$  im Bereich  $\delta = 0,0; 0,1; \dots; 1,0$  variiert. Hierbei zeigt sich, dass die Strategie des unverzögerten Scheduling nicht die beste im Sinne der Kooperation ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Ressourcenauslastung durch eine Häufung der Präzedenzkonflikte, begünstigt durch die Vorgänger-Nachfolger Beziehungen zwischen den Aufträgen, zum Ende des Planungszeitraums erheblich verschlechtert.

In Bild 8.6 sind die durchschnittlich erreichten Pareto-Lösungen für die verschiedenen Werte von  $\delta$  in einem Histogramm eingezeichnet. Die höchste durchschnittliche Anzahl von etwa

10.3 Pareto-Lösungen wird für  $\delta = 0,4$  erreicht. Ein Ergebnis, das auch darauf zurückzuführen ist, dass die Generationenzahl beschränkt ist.

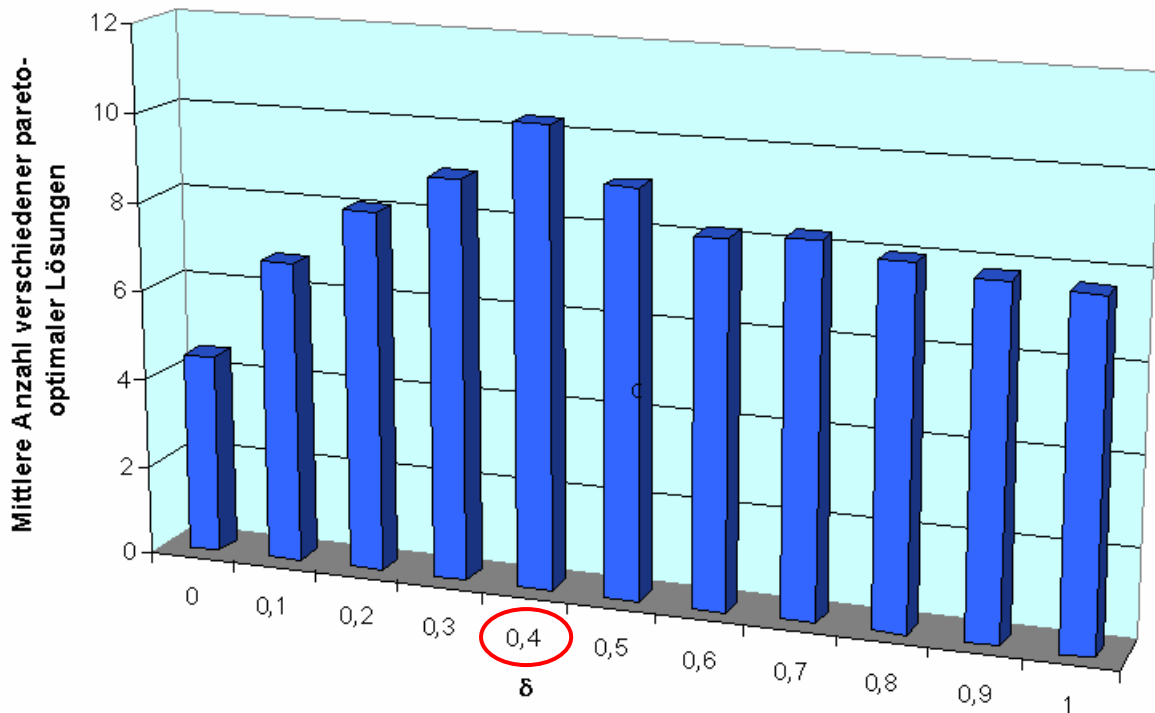


Bild 8.6: Tests für den Parameter  $\delta$  für die Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle

#### 8.2.4 Einfluss und Beurteilung der Fähigkeitsorientierung und der Kooperation bei der Entwicklung der Montageabläufe

Bezüglich der Pareto-Lösungen der besten Parameterkonfiguration soll nun der Einfluss der Zielfunktionen auf das Kooperationspotential bzw. auf die Fähigkeitsorientierung der Montageablaufpläne betrachtet werden. Die Entwicklung der mittleren Zykluszeit  $C_{\max}$  und des mittleren Gesamt-Eignungsgrades  $E_{\max}$  ist in diesem Zusammenhang wenig aussagekräftig, da die Wirkung des Optimierungsprozesses (vor allem der Selektion) bei einem multikriteriellen Optimierungsproblem bei Betrachtung der mittleren Zielgrößen nicht in dem Maße offen zu Tage tritt, wie es bei eindimensionalen Problemen der Fall ist. In Bild 8.7 ist die Entwicklung der mittleren Zielfunktionswerte dargestellt. Es besteht die Möglichkeit von Negativentwicklungen in einem Zielkriterium, nämlich genau dann, wenn sich in dem anderen eine Verbesserung einstellt. Ähnliches gilt für das durchschnittliche Optimierungspotential der Pareto-Lösungen.



Wegen der geringen Aussagekraft der Entwicklung der durchschnittlichen Zielfunktionswerte müssen daher zur Erörterung des Kooperationsgrades und der Fähigkeitsorientierung andere Eigenschaften der erzeugten Pläne betrachtet werden.

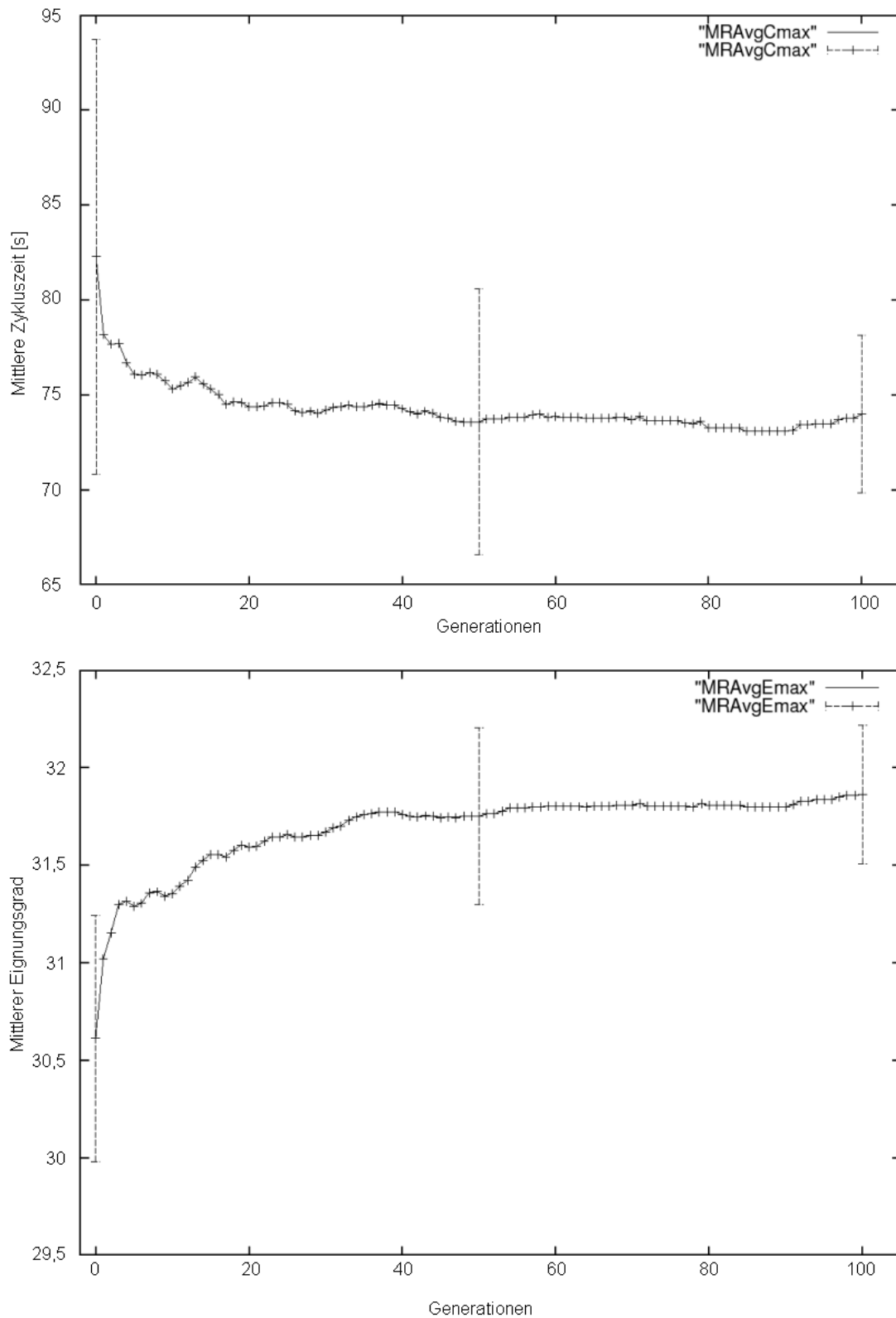


Bild 8.7: Entwicklung der mittleren Zielfunktionswerte bei Test mit Pareto-Lösungen

Wie in Kapitel 6.3 erläutert, ist die mittlere Ressourcenauslastung  $\bar{N}$  ein Maß für die Kooperation. Nach Kapitel 3.1.3 verhalten sich die Zielfunktionen  $\bar{N}$  und  $C_{\max}$  äquivalent. In Bild 8.8 ist die mittlere Ressourcenauslastung  $\bar{N}$  für die Montage des Thermodruckers bei der Optimierung nach  $C_{\max}$  und nach  $\{C_{\max}, E_{\max}\}$  dargestellt.

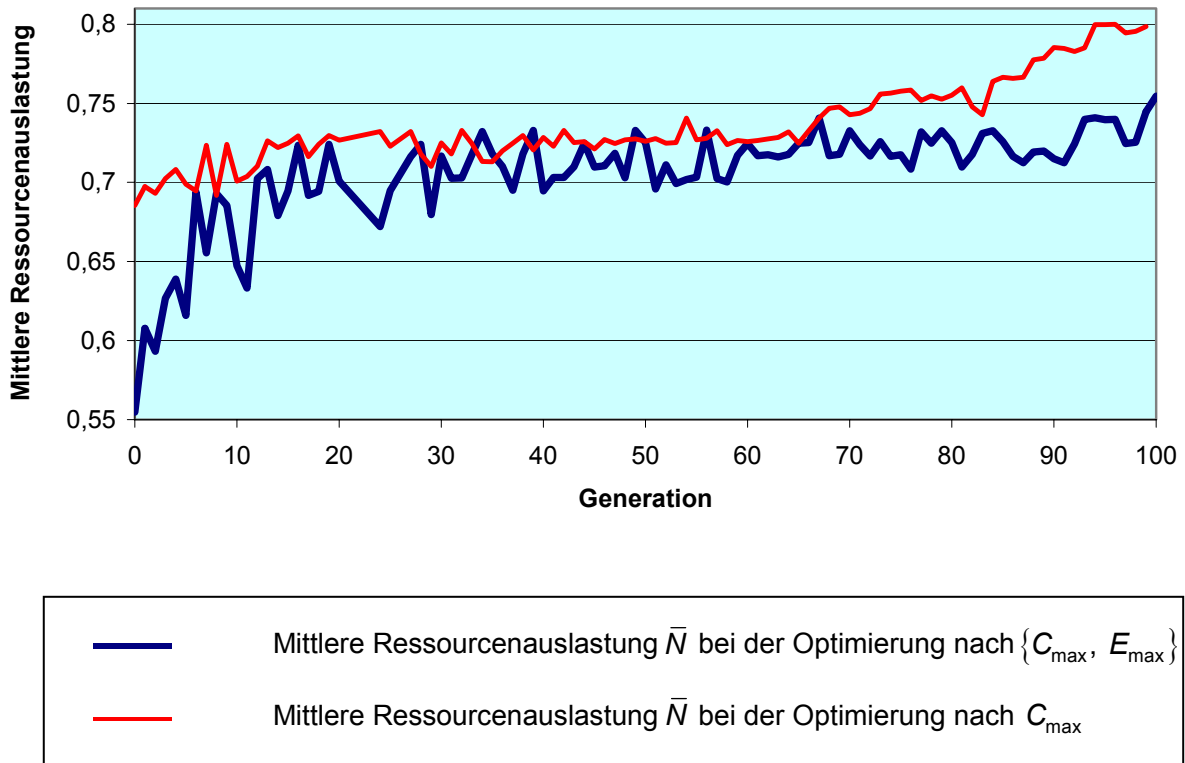


Bild 8.8: Mittlere Ressourcenauslastung  $\bar{N}$  bei der Optimierung nach  $C_{\max}$  und nach  $\{C_{\max}, E_{\max}\}$

Dabei wurde die Optimierung nach  $C_{\max}$  deshalb als Vergleichskriterium gewählt, da die Minimierung von  $C_{\max}$  die Maximierung von  $\bar{N}$  zur Folge hat. Aufgrund des konkurrierenden Charakters von  $C_{\max}$  und  $E_{\max}$  (siehe Kapitel 6.3) fällt  $\bar{N}$  bei der bikriteriellen Lösungsfindung der Mensch-Roboter-Kooperationszelle im Durchschnitt deutlich niedriger aus als bei der Minimierung von  $C_{\max}$ . Während die beste erreichte Ressourcenauslastung bei der Optimierung letzterer bei ca. 83% liegt, hat sie bei der Optimierung bezüglich  $\{C_{\max}, E_{\max}\}$  nur einen Höchstwert von ca. 75%. Ein Maß für die Fähigkeitsorientierung ist der erreichte Gesamteignungsgrad  $E_{\max}$  eines Belegungsplans. Beim Vergleich der Belegungspläne 1 und 2 in Bild 8.9 fällt die Diskrepanz zwischen Fähigkeitsorientierung und Kooperation bei der Planung eines Montageablaufs für den Thermodrucker deutlich auf.

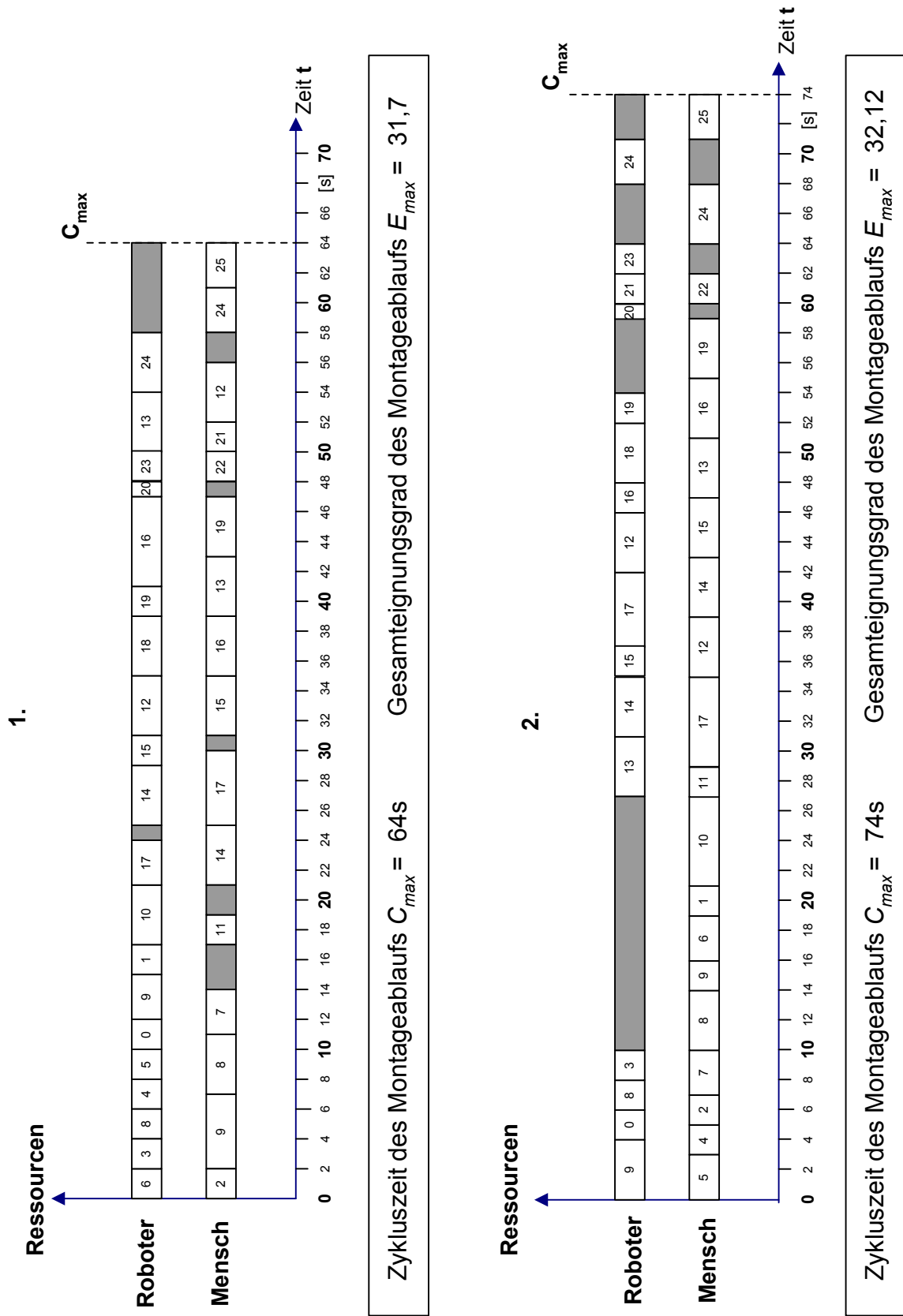


Bild 8.9: Gantt-Diagramme zu zwei Pareto-Lösungen der Parametertests (Nummerierung im Diagramm bezieht sich auf Aufträge gemäß Projekttable in Bild 8.4)

Die Nummerierung der Montageschritte in den Gantt-Diagrammen bezieht sich auf die Nummern der Aufträge in der Projekttable (Bild 8.4). Der Ablauf im ersten Diagramm sieht vor, dass der Werker zunächst Auftrag 2 der Montage des Thermodruckers ausführt und anschließend die Operation 1 von Auftrag 9. Operation 2 von Auftrag 9 bearbeitet der Roboter 6s später.

Während Plan 2 einen höheren Gesamteignungsgrad als Plan 1 besitzt, ist beispielsweise der Roboter nur zu 60% ausgelastet. Dementsprechend kommt es also in diesem Fall wesentlich seltener zu einer direkten Kooperation zwischen Mensch und Roboter.

Eine Eigenschaft pareto-optimaler Lösungen ist, dass sie dem Entscheidungsträger ermöglichen, entsprechend den planerischen Erfordernissen pragmatische Entscheidungen bei der Auswahl einer bestimmten Ressourcenbelegung oder Auftragsreihenfolge zu treffen. So wird eine Priorisierung der Optimierungsziele nicht direkt vom Optimierungsverfahren vorgenommen, sondern dem Entscheidungsträger überlassen. Dies ist bei der Optimierung mehrerer gegensätzlicher Zielkriterien, wie im vorliegenden Fall der Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Montageablaufs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle, von Vorteil, da eine Priorisierung a priori nicht vorgenommen werden kann. Der Bediener erhält also als Ergebnis mehrere pareto-optimale Lösungen und kann dann entsprechend seinen Präferenzen hinsichtlich der Zielkriterien die für ihn optimale Variante auswählen.

Nach genauerer Kenntnis der möglichen Lösungen besteht die Möglichkeit, im Anschluss an die Pareto-Optimierung eine Optimierung bezüglich gewichteter Ziele vorzunehmen, wobei die Gewichte jeweils in einem Teilintervall von  $[0,1]$  angenommen werden, dessen Größe dem Bediener sinnvoll erscheint. Soll ein höheres Maß an Kooperation erreicht werden, so kann bezüglich einer gewichteten Zielfunktion optimiert werden, die von der Form

$$f(C_{\max}, E_{\max}) = \omega_1 \left( \frac{C_{\max} - LB_{C_{\max}}}{UB_{C_{\max}} - LB_{C_{\max}}} \right) - \omega_2 \left( \frac{E_{\max} - LB_{E_{\max}}}{UB_{E_{\max}} - LB_{E_{\max}}} \right) \quad \text{Gleichung 8.1}$$

mit  $\omega_1 + \omega_2 = 1$  ist, wobei  $LB_{C_{\max}}$ ,  $UB_{C_{\max}}$ ,  $LB_{E_{\max}}$ ,  $UB_{E_{\max}}$  jeweils die oberen und unteren Schranken der Zielfunktionen  $C_{\max}$  und  $E_{\max}$  sind. Dem Einfluss der Optimierung nach  $C_{\max}$  wird ein größeres Gewicht beigemessen, also  $\omega_1 > \omega_2$ . Umgekehrt verhält sich dies bei einer Optimierung im Sinne einer höheren Fähigkeitsorientierung. Um dies am Beispiel des Thermodruckers zu illustrieren, wird jeweils ein Simulationslauf für die Werte  $\omega_1 = 0,66$  und  $\omega_2 = 0,33$  bzw.  $\omega_1 = 0,33$  und  $\omega_2 = 0,66$  durchgeführt. Das Ergebnis ist für die erste Variante als Gantt-Diagramm in Bild 8.10 zu sehen.

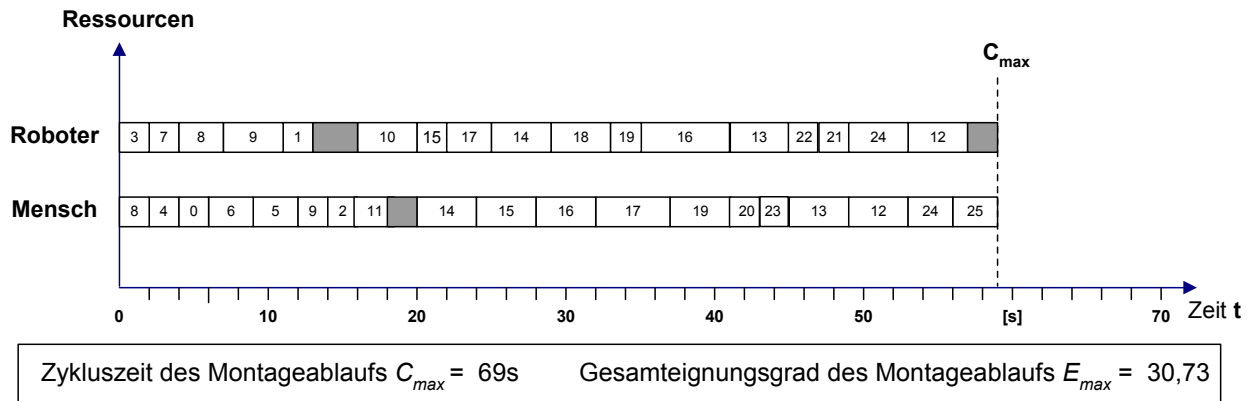


Bild 8.10: Beispiel für die Priorisierung der Zielfunktion  $C_{max}$  (Nummerierung im Diagramm bezieht sich auf Aufträge gemäß Projektabelle in Bild 8.4)

Der Plan weist gegenüber den bisher erreichten Werten ein Maximum für die durchschnittliche Ressourcenauslastung auf. Dies stellt ein Maximum an Kooperation dar durch eine Ressourcenauslastung von 88,2%, jedoch auch ein Mindestmaß an Fähigkeitsorientierung mit einem Gesamt-Eignungsgrad von nur 30,73. Plan 2 mit  $\omega_1 = 0,33$  und  $\omega_2 = 0,66$  weist umgekehrt einen maximalen Gesamt-Eignungsgrad von 32,52 auf und somit ein Höchstmaß an Fähigkeitsorientierung, bringt jedoch nur eine Ressourcenauslastung von 65% und eine Zykluszeit von 86 Zeiteinheiten mit sich.

### 8.2.5 Entwicklung eines Montageablaufplans für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle bezüglich $\{C_{max}, E_{max}, \bar{F}\}$

Nun werden die Ergebnisse der Entwicklung der Montageabläufe bezüglich der Zielkriterien  $\{C_{max}, E_{max}, \bar{F}\}$  betrachtet. Die Untersuchungen hierzu werden jeweils mit der identifizierten Parameterkonfiguration  $N = 100$ ,  $p_c = 0,7$ ;  $p_m = 0,2$ ;  $p_M = 0,6$  und  $\delta = 0,4$  durchgeführt.

Aufgrund des paarweise konkurrierenden Charakters der Zielfunktionen steigt die Anzahl der pareto-optimalen Lösungen erheblich an. Im Unterschied zu der bei der bikriteriellen Entwicklung der Montageabläufe gefundenen Höchstzahl von 14 Pareto-Lösungen sind es hier 29 bzw. durchschnittlich 25,3. Durch die Hinzunahme von  $\bar{F}$  als Optimierungskriterium spielt, im Gegensatz zu der im vorigen Abschnitt untersuchten Problemstellung, nicht nur die durchschnittliche Ressourcenauslastung der Pareto-Lösungen eine tragende Rolle, sondern auch die mittlere Leerzeit der Aufträge. Diese ist in Bild 8.11 im Vergleich zu der des 2-dimensionalen Problems aufgetragen.

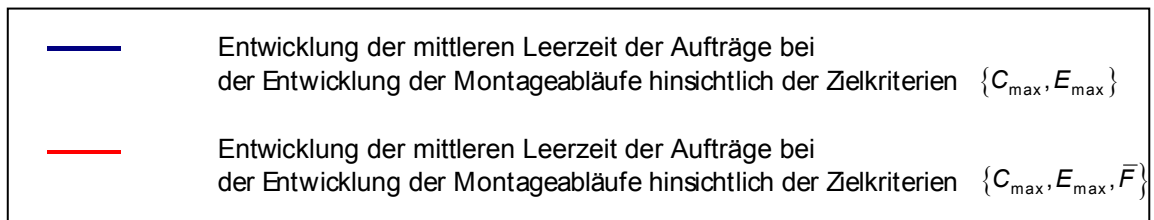
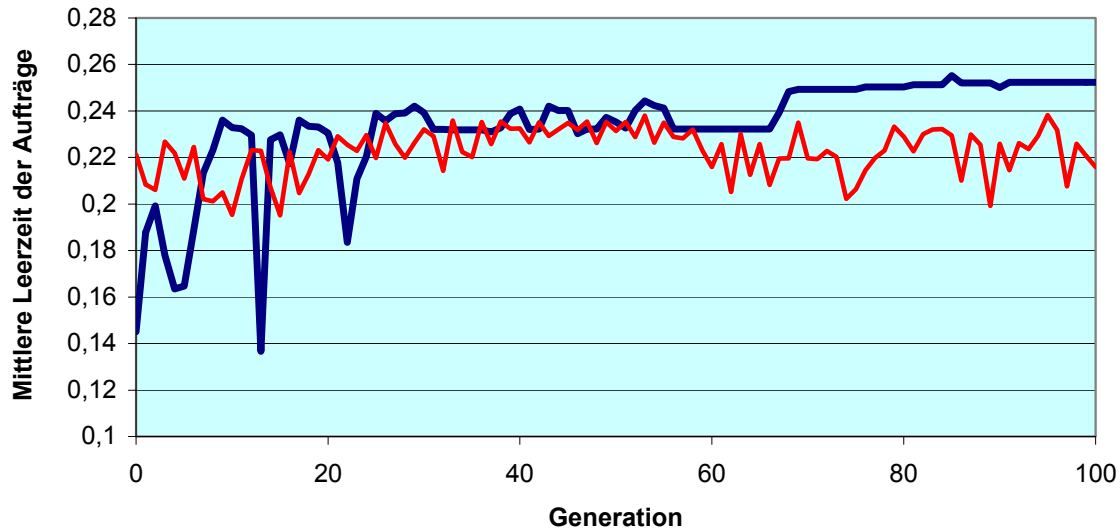


Bild 8.11: Vergleich der Entwicklung der mittleren Leerzeit der Aufträge bei der Entwicklung der Montageabläufe hinsichtlich der Zielkriterien  $\{C_{\max}, E_{\max}\}$  bzw.  $\{C_{\max}, E_{\max}, \bar{F}\}$

Dabei ist die Einflussnahme von  $\bar{F}$  darin zu sehen, dass die mittlere Leerzeit der pareto-optimalen Lösungen beim dreidimensionalen Problem leicht abnimmt. Die Ressourcenauslastung, die ausschlaggebend für den Kooperationsgrad ist, fällt durch den negativen Einfluss von  $\bar{F}$  auf  $C_{\max}$  im Vergleich zum 2-dimensionalen Problem ebenfalls niedriger aus. Der Vorteil der zusätzlichen Optimierung nach  $\bar{F}$  liegt darin, dass in die Dynamik innerhalb des Ressourcenbelegungsvorgangs besser eingegriffen werden kann. So bewirkt eine Priorisierung von  $\bar{F}$ , dass die Aufträge durchschnittlich zügiger abgeschlossen werden, was z.B. bei der Bearbeitung dringender Aufträge von Vorteil ist. Abschließend ist in Bild 8.12 das Gantt-Diagramm eines Pareto-optimalen Montageablaufplans für die Montage des Thermo-druckers bezüglich der Zielkriterien  $\{C_{\max}, E_{\max}, \bar{F}\}$  gegeben.

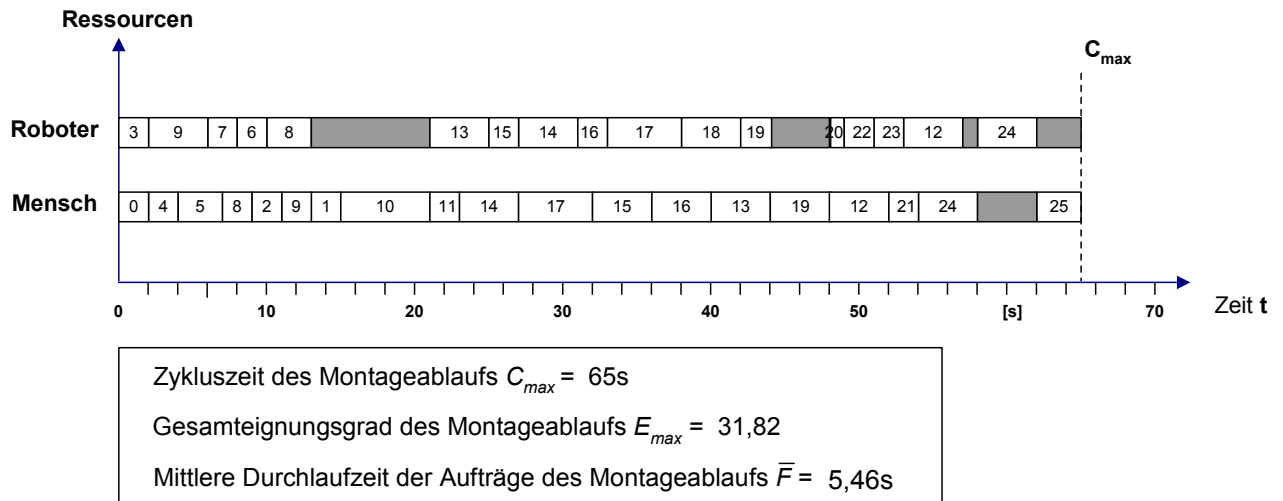


Bild 8.12: Gantt-Diagramm eines Pareto-optimalen Montageablaufs für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation bezüglich der Zielkriterien  $\{C_{max}, E_{max}, \bar{F}\}$

### 8.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die Anwendung des softwarebasierten Werkzeugs auf das beschriebene Beispiel hat in einer Vielzahl von Testläufen gezeigt, dass das entwickelte Verfahren in der Lage ist, Lösungen für die Montageablaufplanung für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle zu generieren. Dabei hat sich der Einsatz genetischer Algorithmen als mehrkriterielles Optimierungsverfahren als erfolgreich herausgestellt.

Die identifizierten Werte für die Verfahrensparameter und die entwickelten Anwendungsschwerpunkte der Operatoren für den genetischen Algorithmus geben dem Anwender eine Orientierung bei der Konfiguration des Werkzeugs. Ausgehend von diesen Grundeinstellungen der Größen für Verfahren und Operatoren des Algorithmus ist eine anwenderspezifische Parametrisierung einfach möglich. Der Umgang des Anwenders mit den Pareto-optimalen Lösungen eröffnet die Möglichkeit, den Montageablauf mit dem am besten erreichten Zielfunktionswert auszuwählen, der den Wünschen des Anwenders am nächsten kommt.

Die Auswertung der Ergebnisse der Entwicklungsläufe haben gezeigt, dass der Anwender mit den vom Verfahren entwickelten Lösungsalternativen bei der Gestaltung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle im Sinne der formulierten Ziele deutlich unterstützt werden kann. Auf Grund der unterschiedlichen verfolgten Ziele und der hohen Anzahl möglicher Abläufe ist eine fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung für die Mensch-Roboter-Kooperation ohne Softwareunterstützung kaum realisierbar. Je komplexer das zu montierende Produkt dabei ist und je mehr Operationen der Montageprozess enthält, desto wichtiger ist der Einsatz des Werkzeugs.

Ein Vergleich der verschiedenen Pareto-optimalen Lösungen verdeutlicht, dass durch das entwickelte Bewertungssystem und die Einführung der Eignungsgrade eine Montageablaufplanung möglich wird, bei der quantitativ ablesbar ist, wie fähigkeitsorientiert die Montageaufgaben auf die beteiligten Ressourcen Mensch und Roboter verteilt wurden. Diese Möglichkeit hat mit der Entwicklung der direkten Mensch-Roboter-Kooperation eine hohe Relevanz bekommen, da der Einsatz solcher Arbeitsplätze nur bei einer fähigkeitsorientierten Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter sinnvoll ist. Wie im entwickelten Montageablauf in Bild 8.12 zu sehen ist, wird der größte Teil der Montageoperationen kooperierend ausgeführt, das bedeutet, Mensch und Roboter arbeiten zur selben Zeit am gleichen Teil. Diese Arbeitsform senkt die Bearbeitungszeit des Produktes und steigert durch die Fähigkeitsorientierung die Arbeitsqualität für den beteiligten Werker.

Das entwickelte Programmsystem erlaubt dem Anwender die Erstellung und den Vergleich verschiedener Montageabläufe für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle innerhalb weniger Stunden.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen für die direkte Mensch-Roboter-Kooperation stellt eine komplexe, von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängige Aufgabe dar. Innerhalb des Entwicklungsprozesses für solche Montageabläufe sind dabei insbesondere durch die gewünschte Fähigkeitsorientierung, die die Nutzung der Mensch-Roboter-Kooperationszelle erst sinnvoll möglich macht, und den enormen Kostendruck in der Montage eine Vielzahl von Zielkriterien und Randbedingungen zu beachten. Da bisher bei den Entwicklungswerkzeugen für Montageabläufe in hybriden Montagesystemen ein deutliches Defizit hinsichtlich der Fähigkeitsorientierung bestand und es keine Möglichkeit zur Berücksichtigung kooperativer Montageschritte bei der Montageablaufplanung gab, wurde als Zielsetzung dieser Arbeit die Entwicklung eines Verfahrens und die Implementierung eines Programmsystems formuliert, welches die diesbezüglichen Anforderungen erfüllt und dem Anwender die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle ermöglicht.

In dieser Arbeit wurde, aufbauend auf den Ergebnissen einer Analyse des fähigkeitsorientierten Entwicklungsprozesses von Montageabläufen, zunächst ein Bewertungssystem für die Fähigkeitsorientierung und dann ein Systemmodell für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation ausgearbeitet. Im Rahmen des Systemmodells wurden Vorgehensweise und Verfahren für die Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens, den genetischen Algorithmen, konzipiert und entwickelt. Dabei wurde zur Darstellung von Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle eine spezifische Lösungsrepräsentation entwickelt. Auf Basis des NSGAI (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) wurden problemspezifische Varianten zur Lösung des Flexiblen Job-Shop Scheduling Problems und darauf aufbauend zur Entwicklung von fähigkeitsorientierten Montageabläufen in der Mensch-Roboter-Kooperation konzipiert und entwickelt. Zur Anwendung der Vorgehensweise wurde ein softwarebasiertes Werkzeug entworfen. Mit diesem Entwurf für ein Ablaufplanungswerkzeug wurden die Verfahren und Algorithmen schließlich in einem Programmsystem als softwarebasiertes Werkzeug implementiert.

Die pilothafte Erprobung des softwarebasierten Werkzeugs hat wichtige Erkenntnisse über die Einstellbereiche von Verfahrensparametern geliefert. Diese können dem Anwender als Orientierungshilfe bei der Konfiguration des Systems für seine Planungsaufgabe dienen. Nicht zuletzt konnte mit der Anwendung des Werkzeugs bei der beispielhaften Entwicklung eines Montageablaufs sowohl die Leistungsfähigkeit des Verfahrens als auch der erfolgrei-

che Einsatz des Optimierungsverfahrens und des Bewertungssystems für die Fähigkeitsorientierung nachgewiesen werden.

Mit dem entwickelten Verfahren und Werkzeug wird es möglich, Montageabläufe in der Mensch-Roboter-Kooperationszelle den Fähigkeiten von Roboter und Mensch entsprechend und gleichzeitig durchlaufzeitminimierend zu entwickeln und ihre Güte zu bewerten. Das Verfahren füllt somit eine im Zuge der Entwicklung der Mensch-Roboter-Kooperationszelle entstandene Lücke und ermöglicht eine optimierte Nutzung dieser neuen Technologie.

Die Fortsetzung dieser Arbeit ist in zweierlei Hinsicht sinnvoll:

Zum einen ist im Zusammenhang mit der Nutzung des Werkzeugs für die Mensch-Roboter-Kooperationszelle eine unmittelbare Einbindung des Verfahrens in die Regelung und Steuerung der Zelle anzustreben. Dadurch kann zum einen das Ergebnis der Montageablaufplanung unmittelbar umgesetzt werden, zum anderen kann eine interaktive Reaktion der Planung der Montageabläufe auf Störungen im Ablauf angestrebt werden.

Im Zusammenhang mit der Planung von hybriden Montagesystemen stellt die Nutzung des Verfahrens ebenfalls eine interessante Weiterentwicklung dar. Beim Entwurf neuer Montagesysteme kann mit einem weiterentwickelten Verfahren von Anfang an eine fähigkeitsorientierte Aufteilung der Montageoperationen vorgesehen werden. Dafür muss das Verfahren auf ein Viel-Produkt-Problem ausgeweitet werden, das eine zusätzliche Flow-Shop Optimierung ermöglicht.

## 10 Summary

### **Skill-oriented assembly sequence planning for the direct man-robot-cooperation**

To meet the requirements of today's production a new kind of semi automated assembly system has been developed. In this system man and robot are working together in the same assembly station without safety constructions which separate them. Such an assembly station is called a cooperation-cell [Spi-01]. The idea is to combine the advantages of automatic processes with those of manual ones. This assembly system enables an absolutely flexible sharing of work between man and robot, which therefore can ideally contribute their specific capabilities. Since the robots only carry out processes which can be automated easily, this kind of assembly systems lead to simplified process tools, faster robot programming, easier material supply and less specific devices.

The appearing question is how this cooperation-cell should be planned: What is the best allocation of the assembly processes to man and robot? How can be decided which processes should be done by whom and when? What is the optimised operating sequence?

In this thesis a method and a software tool have been developed for the planning of an operating sequence for a cooperation-cell which is optimised in terms of skills of humans, technical skills of robots and the cycle time.

The target of the developed method is a skill oriented, multi criteria planning of an operating sequence. The method has been integrated into a software tool which enables the planner of assembly systems to schedule the assembly processes and distribute them among the robot and human according to their skills and with an optimised cycle time.

The developed method comprises two parts. In the first part, two so called 'skill levels' are calculated for each assembly process: One for the man and one for the robot. These 'skill levels' are quantitative factors which determine the suitability for performing the assembly process by a robot or by a human. Within the second part of the method a multi criteria planning of the operating sequence is done. With the help of a genetic algorithm an operating sequence is created with a high skill level on the one hand and a low cycle time on the other hand.

To calculate these 'skill levels' a catalogue of characteristics and an associated rating system were developed. The catalogue of characteristics contains properties referring to the workpiece, to the assembly process, to human engineering and to the material handling.

The characteristics of the workpiece can be divided in those of the basic workpiece and those of the joining workpiece. An example for these workpiece characteristics is the stiff-

ness of the workpiece or the accessibility of the joining-point. If the workpiece to be joined is flexible (for example a cable) the joining process can not be automated without any special fixture. If the point of joining is difficult to access, it might be necessary to design special tools to automate the assembly process and an easy and cheap automation is very unlikely.

The characteristics of the assembly process itself describe the joining and the handling processes. Is it necessary to fix the workpiece during the joining process? Is tactile help necessary for the positioning of the workpiece? Which narrow tolerances need to be kept in the joining process? These and other characteristics of the assembly processes need to be taken into consideration if the utilisation of a robot is planned.

The third kind of characteristics are those dealing with material handling. These characteristics rate the ability to automate assembly processes considering the supply of the necessary material. This point should not be neglected because the possibilities to supply the material for the process are very important for the realisation of an employment of a robot.

A weighting is assigned to every characteristic. This weighting describes the relevance of the characteristic for the skill oriented rating of the assembly process. The impact of the weighting is that those characteristics which have a great effect on the question whether human or robot are more appropriate for a process are taken more into consideration than those which are less important. The weighting of the characteristics is based on an expert survey. For the rating itself a new model is designed within this thesis.

Every characteristic has different parameter values. When analysing an assembly process the parameter values for every single characteristic for this special process are determined.

In order to get an objective quantitative value for the skill levels, a rating system has been developed. It is based on the idea that a deliberation of a decision leads to objectivity. So the decisions that have to be made for every criteria are deliberated to the level of the targets of a company: time, costs and quality. Thinking about assembly systems, these company targets are takt-time, investment and quality of processes on the one hand and quality of work on the other. On this level of decision the rating can be done with a better/ equal/ worse scale. After the aggregation of the single ratings, this leads to an objective value that give a quantitative information about skill oriented allocation of assembly tasks.

The result of this first part of the planning method is a skill level for a human and a skill level for a robot for every single assembly process.

For the development of skill-oriented operating sequences a system model and a procedure have been designed. The input data of the procedure for the development of skill-oriented operating sequences in the man-robot-cell consists of the calculated skill-levels, the results

of an analysis of the assembly process and the processing times for the different assembly processes for man and robot. The procedure itself is based on the graph theory. A graph describes the relations between the assembly processes. The graph consists of a set of nodes,, a set of conjunctive and a set of disjunctive edges. The nodes represent the assembly operations and the edges the relationship the operations have to each other. The conjunctive arcs represent the precedence relations between operations of a job whereas the disjunctive arcs mark those operations which can be processed on the same resource. Through a so called complete selection the disjunctive arcs are transformed into directed ones to determine an ordered sequence of operations on a resource.

Afterwards the starting times of the processes have to be found so that the specific assembly sequence can be defined. This is realized with an adopted hybrid Giffler-Thompson algorithm.

The output of the procedure is a Gantt-diagram which describes the operating sequences for man and robot and the starting time of every single assembly operation. It fully describes the operating sequence of the assembly task in the man-robot-cell.

The planning of the operating sequence can be modelled as a Flexible Job-Shop Scheduling Problem (FJSSP) which is concerned with a dual problem:

- On the one hand each assembly process has to be assigned to its most suitable resource, i.e. to robot or human (routing policy).
- On the other hand a timed and feasible sequence of assembly processes on each resource has to be determined in order to minimize a set of objectives (scheduling).

Since the skill levels for man and robot from the first part of the method have only considered ergonomic and technological aspects and have no temporary reference, consequently the second main optimisation objective is the total cycle time. In general both objectives are conflicting.

The investigation to solve the resulting multi-objective optimisation problem (MOP) is based on the concept of Pareto optimality. This concept is proved to have a better behaviour in treating all objectives equally in contrast to other approximation methods such as the weighted sum approach. One of the most popular and effective class of heuristics used to solve multi-objective problems and the FJSSP are genetic algorithms, not only because of their uncomplicated behaviour. Their main advantage in contrast to other heuristics is their implicit parallelism [Deb-01], i.e. they work simultaneously on a set of potential solutions.

When dealing with the FJSSP, first each operation has to be assigned to a resource, i.e. human or robot, which is capable to perform the task, and second a feasible sequence of op-

erations on each resource has to be determined. To represent the FJSSP genetically, an individual is defined by two chromosomes. The first chromosome codes the assignment of resources to operations, whereas the second chromosome determines an ordered sequence of operations on each resource according to the first. Thus both chromosomes are dependent to each other in the sense that the second one can be derived from the first one. As coding structures for both chromosomes permutations of resources and operations were chosen, because this seems to be the most natural coding scheme for ordering problems like the FJSSP. Defined this way, both chromosomes give a complete genetic representation of the FJSSP.

In order to integrate the skill levels and processing times into the optimisation process, they are combined to become one factor which characterises the 'efficiency' of a resource to perform operations. In this way the formerly two-objective min-max problem is transformed into a pure single-objective minimization problem, regarding the adapted efficiency as the only performance measure of an individual. In order to integrate the efficiency in the coding scheme of the resource selection chromosome, a method is designed in this thesis.

For the skill oriented planning of operation sequences in a man-robot-cell the strategy of the NSGA II was used, a multi-objective Genetic Algorithm (GA) developed by Deb [Deb-01]. Unlike most other approaches the NSGA II not only uses an elite-preservation strategy but also a diversity-preserving mechanism. The initial population of size  $N$  is first ranked out by giving all individuals equal reproductive chances. Instead of only finding the nondominated sets, the parent and offspring population are put together to form a population of size  $2N$ . Then a nondominating sorting procedure is used to classify the individuals at different ranks into nondominated fronts.

Because of the special optimisation task and the cooperation, special operators needed to be developed and existing operators had to be adopted for using the algorithm for the problem of this thesis.

The selection operator is one of the most important components in the GA. Its task is to choose individuals for reproduction. In literature many selection methods are reported. Because it is so dependent on parameters, the very common niching is not used in the selection operator for the development of skill-oriented assembly sequences. Instead of the niching a build up selection mechanism is used which takes the nearness of individuals on the same Pareto fronts with the help of a so called crowding distance into consideration. This procedure is based on Deb as well.

After the selection process the chosen individuals are transferred into a mating pool. Dependent on its relative fitness an individual may reproduce more than once. The purpose of

the cross-over operator is to transmit high quality information (operation sequences) of the parent population to the offspring. Such sequences of above-average quality (fitness) are called building blocks. The main difficulty of ordering problems concerning cross-over operators is the highly disruptive character of most of them.

Further on, mutation operators can only be derived analysing the fitness values. A common strategy implementing these operators is to exchange sequences of parent pairs which show a relatively good performance and try to preserve these orderings by transmitting them to the offspring. For the FJSSP special order-preservative cross-over operators were used. For the permutation-based chromosome as well as for the real coded resource-selection chromosome general order and real cross-over operators can be used. The difficulty in crossing over the operation-sequence chromosomes is that the operation sequences on corresponding resources neither need to have the same length nor the same operation set. After the cross-over procedure therefore it has to be ensured that for every resource operation sequence no duplicates of operations occur and that there are no missing operations.

Whereas cross-over tries to preserve good but already existing information, mutation is another operator of more explorative character. By slight changes of an individuals information, mutation tries to detect new good combinations of genes. By assuming that slight changes of genotype information may cause at least slight changes of an individuals fitness, mutation has a local-search behaviour. In the case of FJSSP, one tries to find more adequate resource assignments and new feasible operation sequences of above-average fitness. For this project a swapping-gene mutation operator was used for both chromosomes. A check and repair procedure for operation chromosomes again ensures feasibility.

The algorithm which was designed for the development of skill-oriented assembly sequences in the man-robot-cell consists of two main loops. The outer loop evaluates new solution candidates for the resource-selection chromosome. The inner loop evaluates the resource-operation sequences. This way the FJSSP was modelled as a sequence of classical JSSP.

A method for the skill oriented planning of the man-robot-cell has been presented. The method consists of two parts: In the first part two so called 'skill levels' were calculated for each assembly process. Within the second part of the method a multi criteria planning of the operating sequence was done by means of a genetic algorithm. The method was integrated in a software tool. In tests series a parameter configuration was found that can be used as an orientation but can be adopted by users. Looking at the result of the tests, it can be shown that the planner is supported by the developed skill oriented assembly sequences. The software tool enables the planning of the assembly tasks in the man-robot-cell and ensures a skill oriented distribution of the assembly operations among humans and robots.

## 11 Literatur

- [Amm-85] Ammer, Ernst-Dieter:  
Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung  
Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1985  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 81). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1984
- [AAV-87] Allgemeine Arbeitnehmerschutzverordnung (AAV),  
§ 16 Abs. 2, BGBl. Nr. 218/1983, in der Fassung der Verordnung BGBl. Nr. 593/1987
- [Bäc-96] Bäck, T.:  
Evolutionary Algorithms in Theory and Practice  
1. Auflage  
New York: Oxford University Press, 1996
- [Bak-74] Baker, K.R.:  
Introduction to Sequencing and Scheduling  
New York: Wiley, 1974
- [Bak-85] Baker, J.:  
Adaptive selection methods for genetic algorithms  
In: Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Pittsburgh, 1985, S. 101-111
- [Bas-00] Bassler, Thomas:  
Vergleichende Validierung von Planungsalgorithmen für die kurzfristige Fertigungssteuerung  
Heimsheim: Jost-Jetter, 2000  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 311). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Diss. 1999
- [Bag-99] Bagchi, Tapan P.:  
Multiobjective Scheduling by Genetic Algorithms  
Boston: Kluwer, 1999



- [Bau-95]. Bauer, Joachim; Menges, Raimund:  
Neue Methoden der Montageplanung,  
Rechnerunterstützte Verfahren für die Praxis  
Karlsruhe: Universität Karlsruhe, ifab, 1995
- [Beu-02]. Beumelburg, Katharina; Spingler, Jochen C.:  
Automatisierungspotential-Analyse : Eine Methode zur technischen  
und wirtschaftlichen Klassifizierung von Automatisierungspotentialen.  
In: Wt Werkstattstechnik online 92 (2002), Nr. 3, S. 62-64
- [Bic-92] Bick, Werner:  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen  
Automatisierungsgrades  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1992  
(iwv Forschungsberichte 46). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1991
- [Bie-96] Bierwirth, Christian; Mattfeld, Dirk C. ; Kopfer, Herbert:  
On permutation representations for scheduling problems.  
In: Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IV / Hans-Michael Voigt, Werner Ebeling, Ingo Rechenberg, Hans-Paul Schwefel (Hrsg.)  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1996, S. 310-318
- [Bie-99] Bierwirth, Christian; Mattfeld, Dirk:  
Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms.  
In: Evolutionary Computation, 7(1999), Nr.1, S.1-17,
- [Bru-96] Bruns, Ralf:  
Wissensbasierte genetische Algorithmen: Integration von Genetischen Algorithmen und Constraint-Programming zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme.  
Sankt Augustin : infix Verlag, 1996  
(DISKI 134). Oldenburg, Univ., Fachbereich Informatik, Diss., 1996
- [Bug-90] Bugdahl, V.:  
Entscheidungsfindung  
Würzburg: Vogel, 1990

- [Bul-86] Bullinger, Hans-Jörg (Hrsg):  
Systematische Montageplanung (Handbuch für die Praxis)  
München, Wien: Hanser, 1986
- [Bul-94] Bullinger, Hans-Jörg:  
Ergonomie – Produkt und Arbeitsplatzgestaltung  
Stuttgart: Teubner, 1994
- [Bul-96] Bullinger, Hans-Jörg; Warnecke, Hans-Jürgen:  
Neue Organisationsformen im Unternehmen  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1996
- [Cui-00] Cuiper, Ralf:  
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
München : Utz, 2000  
(iwb Forschungsberichte 143). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Diss. 2000
- [Deb-00] Deb, Kalyanmoy; Agrawal, Samir; Pratab, Amrit and Meyarivan, T.:  
A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGAI.  
KanGAL report 200001. Kanpur, Indian Institute of Technology, India, 2000.
- [Deb-01] Deb, Kalyanmoy:  
Multit-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms  
Chinchester : Wiley, 2001
- [Deh-94] Dehlinger, Hans:  
Deontische Fragen, Urteilsbildung, Bewertungssysteme  
in: Arbeitsberichte aus dem Fachgebiet Design-Theorien und Methoden Nr. 7/94, Kassel: Universität GhKassel/ Fachbereich Produkt-Design, 1994
- [Deu-89] Deutschländer, Arthur:  
Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung  
München: Hanser, 1989  
(Produktionstechnik - Berlin 72). Berlin, Techn. Univ., Inst. für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Diss. 1989

- [DIN 8593]                   DIN 8593 01.1985:  
Fertigungsverfahren Fügen
- [DIN EN 563]                 DIN EN 563 01.2000:  
Temperaturen berührbarer Oberflächen; Ergonomische Daten zur  
Festlegung von Temperaturgrenzwerten für heiße Oberflächen
- [Dom-97]                     Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.:  
Produktionsplanung  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997
- [Eve-01]                     Evers, Stephan:  
Simulationsgestützte Belegungsplanung in der pufferfreien Werk-  
stattfertigung bei unterschiedlichen Kalendern und Kapazitäten  
Essen: Vulkan-Verlag, 2001  
(Schriftenreihe des IWF). Braunschweig, Techn. Univ. Carolo-  
Wilhelmina, Fak. für Maschinenbau und Elektrotechnik, Inst. für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Diss. 2000
- [Fal-91]                     Falkenauer, E.; Bouffoix, S.:  
A genetic algorithm for job shop  
In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics  
and Automation, 1991, Sacramento, S. 824-829
- [Fre-82]                     French, S.:  
Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of  
the Job-Shop  
2. Auflage  
New York: Wiley, 1982
- [Fel-96]                     Feldmann, Christoph:  
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung  
Berlin u.a. : Springer, 1996  
(iwb Forschungsberichte 104). München, Techn. Univ., Fak. für Ma-  
schinenwesen, Diss. 1996
- [Fri-89]                     Friedmann, Thomas:  
Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch  
neue, rechnergestützte Verfahren  
Karlsruhe : Grässer, 1989  
(wbk-Forschungsberichte 25). Karlsruhe, Univ., Fak. für Maschinen-  
bau, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Diss.  
1989

- [Gar-95] Garlichs, Ralf:  
Entscheidungsorientierte Belegungsplanung von verketteten Montageanlagen  
Düsseldorf : VDI Verlag, 1996  
(Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2 402). Hannover, Univ., Fak. für Maschinenwesen, Inst. für Fabrikanlagen, Diss. 1995
- [Gey-99] Geyer, Manuel:  
Flexible Planungssysteme zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung  
Berlin u.a. : Springer, 1997  
(iwb Forschungsberichte 112). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Diss. 1997
- [Gif-60] Giffler, B.; Thompson, G.L.:  
Algorithms for solving production scheduling problems.  
In: Operations Research 8 (1960), S. 487-503
- [Gol-89] Goldberg, D.E.:  
Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning  
Boston u.a.: Addison-Wesley, 1989
- [Gol-93] Gollmer, Jens:  
Untersuchung zu hierarchischen Mehrebenen-Mehrschicht- Algorithmen für die Entscheidungsfindung in komplexen Systemen  
Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau, Diss. 1993
- [Gru-02] Grunwald, Stefan:  
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
München: Utz, 2002  
(iwb Forschungsberichte 159). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Diss. 2001
- [GSV] Gefahrstoffverordnung - Band 1 : Gefahrstoffverordnung mit Anhang I bis VI GefStoffV und Chemikalien-Verbotsverordnung ChemVerbotsV.  
4., neu bearb. Auflage, Stand Nov. 1993  
Bonn: Deutscher Bundesverlag, 1993

- [Hec-95] Hechl, Christoph:  
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995  
(iwb Forschungsberichte 92). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Diss. 1995
- [Heg-98] Heger, Rainer:  
Entwicklung eines Systems zur interaktiven Gestaltung und Auswertung von manuellen Montagetätigkeiten in der virtuellen Realität  
Stuttgart: Springer, 1998  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 273). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Diss. 1998
- [Heu-89] Heusler, Hans-Joachim:  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1989  
(iwb Forschungsberichte 19). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1989
- [Hoi-00] Hoischen, H.:  
Technisches Zeichnen – Grundlagen, Normen, Beispiele, Darstellung Geometrie  
Berlin: Cornelsen, 2000
- [Hol-92], Holland, J.H.:  
Adaption in natural and artificial systems  
2.Auflage  
Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992
- [Hor-93] J. Horn and N. Nafpliotis:  
Multiobjective optimization using the niched pareto genetic algorithm  
Technical Report 93005, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, 1993
- [Huc-90] Huck, Martin:  
Produktorientierte Montageablauf- und Layoutplanung für die Robotertermontage  
Düsseldorf: VDI Verlag, 1990  
Karlsruhe, Univ., Fak. für Informatik, Inst. für Prozeßtechnik und Robotik, Diss. 1990

- [Jen-01] Jensen, Mikkel T.:  
Robust and flexible scheduling with evolutionary computation  
Aarhus DK: brics, 2001 (Brics Dissertation Series; 2001, 10)  
Zugleich Aarhus, Univ., Diss, 2001
- [Jon-00] Jonas, Christian:  
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
München: Utz, 2000  
(iwb Forschungsberichte 145). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 2000
- [Jon-75] De Jong, K. A. :  
An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems.  
Chicago, USA, University of Michigan, PhD Thesis 1975
- [Käs-97] Käschel, J.:  
Ein genetischer Algorithmus für das Job Shop Scheduling Problem  
Chemnitz, Zwickau: Technische Universität für Wirtschaftswissenschaften, 1997
- [Ket-87] Kettner, Peter:  
Konzeption eines Informationssystems für die Planung automatisierter Montagesysteme  
Aachen, 1987  
Aachen, RWTH, Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1987
- [Knj-02] Knjazew, D.:  
OMGA: A Competent Genetic Algorithm for Solving Permutation and Scheduling Problems  
Dordrecht NL: Kluwer, 2002
- [Kno-02] Knowles, Joshua D.:  
Local-Search and Hybrid Evolutionary Algorithms for Pareto Optimization  
University of Reading, Department of Computerscience, PhD thesis, 2002

- [Lin-99] Lindermaier, Robert:  
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen,  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999  
(iwb Forschungsberichte 115). München, Techn. Univ., Fak. für Ma-  
schinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswis-  
senschaften, Diss. 1998
- [Lay-01] Lay, G.; Schirrmeister, E.:  
Sackgasse Hochautomatisierung?  
In: Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, Nr.22,  
Fraunhofer ISI, 2001
- [Lof-02] Loferer, Michael:  
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
München: Utz, 2002,  
(iwb Forschungsberichte 162). München, Techn. Univ., Fak. für Ma-  
schinenwesen, Diss. 2002
- [Lot-02] Lotter, B.:  
Der Wirtschaftlichkeit angepasster Automatisierungsgrad  
In: 17. Deutscher Montagekongress, 2002, München
- [Mat-96] Mattfeld, Dirk Christian:  
Evolutionary Search and the Job Shop  
Heidelberg: Physica, 1996
- [Mer-87] Merz, Karl-Peter:  
Entwicklung einer Methode zur Planung der Struktur automatisierter  
Montagesysteme  
Aachen, RWTH Aachen, Diss. 1987
- [Met-77] Metzger, H.:  
Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage  
Mainz : Krausskopf, 1977  
(IPA Forschung und Praxis). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstech-  
nik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1977
- [Neu-98] Neubauer, M.:  
Analyse und Synthese Evolutionärer Algorithmen zur Maschinenbe-  
legungsplanung.  
Marburg: Tectum-Verlag, 1998  
Essen, Univ., Diss. 1997

- [Nis-97] Nissen, V.:  
Einführung in evolutionäre Algorithmen  
1. Auflage  
Wiesbaden, Braunschweig: Vieweg, 1997
- [Nol-89] Nolting, Friedrich-Wilhelm:  
Projektierung von Montagesystemen  
München, Wien: Hanser, 1989  
(Fertigungstechnik - Erlangen). Erlangen-Nürnberg, Friedrich-Alexander-Univ., Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Diss. 1988
- [Osm-82] Osman, Mohamed:  
Untersuchung von Verfahren der Reihenfolgeplanung und Ihrer Anwendung bei Fertigungszellen  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1982  
(IPA Forschung und Praxis 61). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1982
- [Pah-97] Beitz, Wolfgang; Pahl, Gerhard:  
Konstruktionstechnik  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997
- [Par-92] Park, Hong-Suck:  
Rechnerbasierte Montageplanung in der Mittelserienfertigung  
Düsseldorf: VDI Verlag, 1992  
(IFW Produktionstechnik). Hannover, Univ., Fak. für Maschinenwesen, Inst. für Fertigungstechnik u. Spanende Werkzeugmaschinen, Diss. 1992
- [Pfr-90] Pfrang, Winfried:  
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1990  
(iwb Forschungsberichte 29). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1990
- [Pri-89] PRIMOS:  
Konzeption und Auslegung von Montageanlagen  
Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1989



- [Rab-92] Rabe, Markus; Veza, Ivica; Wang, Yufei.:  
Rechnerunterstützte Montageablaufplanung  
Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH KFA, 1992
- [REF-91] Methodenlehre der Betriebsorganisation:  
Planung und Steuerung  
München: Hanser, 1991
- [Rix-97] Rixen, Ivo:  
Maschinenbelegungsplanung mit Evolutionären Algorithmen  
Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1997  
(DUV Wirtschaftswissenschaft). Bremen, Univ., Diss. 1997
- [Roy-64] Roy, B.; Sussmann, B.:  
Les problèmes d'ordonnement avec contraintes disjonctives.  
*SEMA*, 1964.
- [Saa-94] Saaty, T.L.:  
Highlights an critical points in the theory and application of the Analytical Hierarchy Process  
In: *European Journal of Operations Research*, 74 (1994) No. 3, S. 426-447
- [Saf-85] Schaffer, J. D.:  
Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms.  
In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Pittsburgh, PA, 1985, S. 74-79
- [Sau-87] Sauer, Hans:  
Mengen- und ablauforientierte Kapazitätsplanung von Montagesystemen  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1987  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 102). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1987
- [Sad-86] Schad, Günter:  
Entwicklung und Einsatz eines interaktiven Verfahrens zur Leistungsabstimmung von Montagesystemen  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1986  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 94). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1986

- [Sim-91] Schimke, Ernst-Friedrich:  
Montageplanung – Methoden, Fallbeispiele, Praxiserfahrung  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991
- [Sma-88] Schmaus, Thomas; Schneider, Wolf-Dietrich; Weisener, Thomas;  
Baden-Württemberg / Landesgewerbeamt:  
Regelwerk zur montagegerechten Produktgestaltung  
Stuttgart : Bandell, 1988 (Informationen für die Wirtschaft)
- [Sön-89] Schöninger, Joachim:  
Planung taktzeitoptimierter flexibler Montagestationen  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1989  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 133). Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1988
- [Sne-95] Schnell, R ; Hill, P.B.; Esser, E.:  
Methoden der empirischen Sozialforschung  
München, Wien: Oldenbourg, 1995
- [Sön-89] Schöninger, J.K.; Spingler, J.C.:  
Planung der Montageanlage : Serie Flexible Montageautomatisierung V.  
In: Technica 38 (1989), Nr. 14, S. 27-32
- [Sra-03] Schraft, Rolf Dieter:  
Vorlesungsskript Automatisierungs- und Handhabungstechnik  
Stuttgart, Univ., Fak. Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, SS 2003
- [Sra-02]. Schraft, Rolf Dieter:  
Die Montage - Das Tor zum Kunden.  
In: Schraft, Rolf Dieter (Fachl. Leitung); Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA u.a.:  
Montage 2002 : Kostengünstiger, schneller und flexibler montieren.  
18. und 19. Februar 2002, Stuttgart.  
Stuttgart, 2002, S. 2-11
- [Sra-99] Schraft, Rolf Dieter; Kaun, Ralf:  
Automatisierung: Stand der Technik, Defizite und Trends in der Automatisierungstechnik.  
Düsseldorf : Handelsblatt, 1999

- [Sra-98] Schraft, Rolf Dieter ; Kaun, R.:  
Automatisierung der Produktion – Erfolgsfaktoren und Vorgehen in der Praxis  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998
- [Spi-01] Spingler, Jochen C.; Thiemermann, Stefan:  
Direkte Mensch-Roboter-Kooperation  
In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001), Nr. 11-12, S. 616-620
- [Sus-92] Schuster, Gerd:  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1992  
(iwb Forschungsberichte 55). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss. 1992
- [Tei-98] Teich, Tobias:  
Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren  
Lohmar u.a.: Eul, 1998  
Zugleich Chemnitz, Zwickau, Techn. Univ., Diss., 1998
- [Tha-93] Thaler, Klaus:  
Regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1993  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 176). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Diss. 1993
- [Thi-02] Thiemermann, Stefan; Schulz, Oliver:  
Trennung aufgehoben.  
In: Computer & Automation (2002), Nr. 8, S. 82-85
- [Thi-03] Thiemermann, Stefan:  
team@work - Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage.  
In: Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.) u.a.; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA:  
Workshop für OTS-Systeme in der Robotik : Mensch und Roboter ohne trennende Schutzsysteme.  
Fraunhofer IPA Workshop F88, 24. Juni 2003, Stuttgart.  
Stuttgart : FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2003, S. 149-159

- VDI 2221 VDI-Richtlinie 2221, 05.93:  
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme  
und Produkte
- VDI 2222 VDI-Richtlinie 2222 Bl. 1, 06.97:  
Konstruktionsmethodik  
Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien
- VDI 2225 VDI-Richtlinie 2225 Bl. 1, 11.97:  
Konstruktionsmethodik  
Technisch- wirtschaftliches Konstruieren
- VDI 2860 VDI-Richtlinie 2860, 05.90:  
Montage- und Handhabungstechnik  
Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen;  
Begriffe, Definitionen, Symbole
- [Wal-85] Walther, Jörg:  
Montage großvolumiger Produkte mit Industrierobotern  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1985  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 88). Stuttgart, Univ., Fak. Ferti-  
gungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss.  
1985
- [War-90] Warnecke, Hans-Jürgen.; Schraft, Rolf Dieter:  
Industrieroboter – Handbuch für Industrie und Wissenschaft  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1990
- [Web-99] Weber, Markus:  
Vorgabezeitermittlung mit künstlichen neuronalen Netzen für die  
variantenreiche Kleinserienmontage  
Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 1999  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 296). Stuttgart, Univ., Fak. Kon-  
struktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb, Diss. 1999
- [Wes-01] Westkämper, Engelbert:  
Modulare Produkte - Modulare Montage.  
In: Wt Werkstattstechnik 91 (2001), Nr. 8, S. 479-482
- [Wes-02] Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen:  
Einführung in die Fertigungstechnik  
5. überarbeitete und aktualisierte Auflage  
Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner, 2002

- [Wes-03] Westkämper, Engelbert; Spingler, Jochen; Beumelburg, Katharina:  
Skill Oriented Planning Of Semi Automated Assembly Systems  
In: Preprints of the Proceedings 8<sup>th</sup> Symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge, 22-24. Sept. 2003, Göteborg.  
Laxenburg, IFAC, 2003, S.121-128
- [Whi-89] Whitley, D.; Starkweater, T.:  
GENITOR II: a distributed genetic algorithm  
In: Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, UK, 2 (1990) No. 3, S. 189-214
- [WiM-98] Anonym:  
Wirtschaftliche Montage – Effizienz durch ganzheitliche Systemgestaltung  
In: 14. Deutscher Montagekongress, Fachtagung 18. bis 19. März 1998, München Landsberg: Verlag moderne industrie, 1998
- [Woe-94] Woenckhaus, Christoph:  
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D Layout-optimierung  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1994  
(iwb Forschungsberichte 65). München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Diss. 1993
- [Zan-71], Zangemeister, C.:  
Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen  
2.Auflage  
München: 1971
- [Zei-94] Zeile, Ulrich:  
Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995  
(IPA-IAO Forschung und Praxis 207). Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 1994
- [Zit-99] Zitzler, Eckart; Deb, Kalyanmoy; Thiele, Lothar:  
Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical results  
In: Evolutionary Computation 8 (2000) No. 2, S. 173-195



## Lebenslauf

Persönliche Daten: Katharina Beumelburg,  
geboren am 13.2.1976 in Siegen

Familienstand: ledig

Schulbildung: 08/82 - 07/86 Katholische Grundschule der Stadt Kreuztal  
08/86 - 06/95 Städt. Friedrich-Flick-Gymnasium Kreuztal, Abitur

Studium: 10/95 – 08/00 Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität  
Siegen, Abschluss: Dipl.-Wirt.-Ing.  
07/98 – 12/98 University of Tulsa, Oklahoma, USA  
College of Business Administration

Berufstätigkeit: 10/00 – 12/04 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer  
IPA, Stuttgart  
Seit 01/05 Siemens Management Consulting, Siemens AG,  
München