

Produktion und Logistik

Isabel Jasmin Acker

**Methoden zur
mehrstufigen Ablaufplanung
in der Halbleiterindustrie**



RESEARCH

Isabel Jasmin Acker

Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie

GABLER RESEARCH

Produktion und Logistik

Herausgegeben von
Professor Dr. Bernhard Fleischmann,
Universität Augsburg
Professor Dr. Martin Grunow,
Technische Universität München
Professor Dr. Hans-Otto Günther,
Technische Universität Berlin
Professor Dr. Stefan Helber,
Universität Hannover
Professor Dr. Karl Inderfurth,
Universität Magdeburg
Professor Dr. Herbert Kopfer,
Universität Bremen
Professor Dr. Herbert Meyr,
Technische Universität Darmstadt
Professor Dr. Thomas S. Spengler,
Technische Universität Braunschweig
Professor Dr. Hartmut Stadtler,
Universität Hamburg
Professor Dr. Horst Tempelmeier,
Universität Köln
Professor Dr. Gerhard Wäscher,
Universität Magdeburg

Kontakt: Professor Dr. Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin,
H 95, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Isabel Jasmin Acker

Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Andreas Kleine



GABLER

RESEARCH

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

Dissertation Universität Hohenheim, 2010

D 100

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Stefanie Brich | Nicole Schweitzer

Gabler Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.gabler.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8349-2921-1

Geleitwort

Die Unterstützung von betrieblichen Entscheidungen gehört zu den zentralen Aufgaben der Betriebswirtschaftslehre. Nach der Veröffentlichung des Simplex-Algorithmus durch George B. Dantzig in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts und mit der fortschreitenden Entwicklung der Hard- und Software stehen heute zahlreiche leistungsfähige Systeme zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung. Trotz der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Algorithmen lassen sich jedoch eine Vielzahl von praktischen Problemstellungen nicht mit exakten Verfahren lösen. Zur Klasse derartig komplexer Probleme zählt die betriebliche Ablaufplanung. Hierbei sucht ein Unternehmen nach einer optimalen Reihenfolge von Aufträgen, die auf unterschiedlichen Maschinen zu bearbeiten sind. Die Lösung dieser Problemstellung ist in der Regel so aufwendig, dass die Ermittlung einer optimalen Lösung mit einem konvergenten Verfahren kaum möglich ist. Daher kommen für derartige Probleme heuristische Ansätze zum Einsatz, die in der Regel eine gute Lösung in akzeptabler Zeit finden. In der Ablaufplanung sind diese Verfahren für spezielle Problemstellungen fortlaufend weiterentwickelt worden. Dennoch lassen sich praktische Anwendungen mit diesen oftmals nicht sachgerecht abbilden.

An diesem Punkt knüpft die vorliegende Schrift von Frau Dr. Isabel Jasmin Acker an. Am Beispiel der Halbleiterindustrie veranschaulicht sie, dass eine wesentliche Besonderheit in der Ablaufplanung bislang kaum Beachtung gefunden hat. Bei der Fertigung einer Diode gibt es in der Regel eine Vielzahl von Möglichkeiten, die unterschiedlichen Fertigungsanlagen zu durchlaufen. Diese alternativen Maschinentypfolgen sind für die betriebliche Praxis von außerordentlich großer Bedeutung, da die Planung deutlich flexibler gestaltet werden kann. Durch diese zusätzliche Flexibilität lassen sich allerdings auch wesentlich mehr alternative Lösungsstrategien generieren, was aus methodischer Sicht die Bestimmung einer optimalen Lösung erschwert.

Zur Verdeutlichung der besonderen Struktur einer Produktionsplanung mit alternativer Maschinenfolgen erweitert Frau Acker zunächst die Klassifikation von Ablaufplänen um eine neue Klasse, den flexiblen Job-Shop-Problemen mit mehreren Maschinentypfolgen. Das im Folgenden entwickelte Modell bildet die Grundlage für ein hierarchisches Lösungsverfahren, das sich aus einer Kombination aus einer exakten und einer heuristischen Methode zusammensetzt. In einer ersten Stufe wird hierzu ein Teilproblem mit einem Simplex-Verfahren op-

timal gelöst. Diese Lösung stellt im zweiten Schritt die Basis für die Heuristik dar. Für die betrachtete Problemstellung werden zwei Heuristiken, Prioritätsregelverfahren und der genetische Algorithmus, verglichen, wobei sich letzterer als überlegen erweist. Frau Acker veranschaulicht damit am Beispiel der Diodenfertigung, dass die Kombination aus einem exakten Verfahren und einer Metaheuristik ein großes Potential für die effiziente Lösung komplexer Probleme beinhaltet.

Andreas Kleine

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Juli 2010 bei der Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Universität Hohenheim als Dissertation eingereicht und im November 2010 von dieser angenommen. Sie entstand u. a. während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrgebiet Quantitative Methoden.

Mein Dissertationsthema wurde mir von Prof. Dr. Knut Haase vermittelt, wofür ich ihm sehr dankbar bin. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Andreas Kleine. Auch der Zweitgutachterin Frau Prof. Dr. Mareike Schoop und dem Prüfungsvorsitzenden im Colloquium Herrn Prof. Dr. Werner Schulz möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Darüber hinaus möchte ich ein herzliches Dankeschön an meine Kolleginnen und Kollegen am Lehrgebiet für die gute Zusammenarbeit richten. Dabei möchte ich Dr. Thomas Bonke hervorheben, der mir ein ausgesprochen angenehmer Zimmergenosse war, mit dem ich mich über wissenschaftliche aber auch private Themen austauschen konnte. Insbesondere danke ich auch Frau Regina Fuchs und Dr. Marcel Rossmly.

„Kleinigkeiten sind die Bausteine der Vollendung. Die Vollendung ist aber keine Kleinigkeit.“ Diese Aussage von Michelangelo Buonarotti Anfang des 16. Jahrhunderts kann ich aus eigener Erfahrung nur bestätigen. Aus diesem Grund bin ich über die große Unterstützung dankbar, die ich durch mein privates Umfeld erfahren habe. So hat mich Dr. Andreas Kaiser während meiner gesamten Promotionsphase immer wieder motiviert. Auch meine Mutter Roswitha Acker hat auf vielfältige Weise zu dem Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Mein größter Dank richtet sich aber an meinen Vater Bernd Acker. Er war, wann immer ich Diskussionsbedarf hatte, ein konstruktiver Ansprechpartner und darüber hinaus ein eifriger Korrekturleser meines Manuskripts.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern in tiefer Dankbarkeit.

Isabel Jasmin Acker

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Verzeichnis ausgewählter Symbole	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Gegenstand der Arbeit	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Ablaufplanung	7
2.1 Einordnung der Ablaufplanung in den Produktionsprozess . . .	7
2.2 Grundlagen der Ablaufplanung	11
2.2.1 Begriff und Aufgaben der Ablaufplanung	11
2.2.2 Definitionen und Notationsvereinbarungen	14
2.3 Klassifikation von Ablaufplanungsproblemen	21
2.3.1 Maschinencharakteristika α	21
2.3.2 Auftragscharakteristika β	24
2.3.3 Zielkriterien γ	26
2.4 Der Lösungsbereich – Arten von Ablaufplänen	33
2.4.1 Fallstudie FS1	33
2.4.2 Zulässige Ablaufpläne	35
2.4.3 Semiaktive Ablaufpläne	37
2.4.4 Aktive Ablaufpläne	38
2.4.5 Unverzögerte Ablaufpläne	40
3 Fallstudie aus der Halbleiterindustrie	43
3.1 Produktionsstufe Montage	44
3.2 Produktionsstufe Endmessung	46
3.3 Maschinenverfügbarkeit	50
3.4 Alternative Maschinenfolgen	53
3.5 Nachfrage	55

3.6	Zielsetzung	58
3.7	Zusammenfassung und Anmerkungen	60
4	Job-Shop-Modelle der Ablaufplanung	67
4.1	Das Prinzip des disjunktiven Graphen	68
4.1.1	Allgemein	68
4.1.2	Veranschaulichung mit Hilfe der Fallstudie FS1	70
4.2	Modellformulierung nach Manne für das klassische Job-Shop- Problem	74
4.2.1	Herleitung der Modellformulierung	74
4.2.2	Anwendung auf die Fallstudie FS1	76
4.3	Ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm zur Modellierung der Fallstudie aus der Halbleiterindustrie	78
4.3.1	Weitere Notationsvereinbarungen	78
4.3.2	Modellierung der Fallstudie FSH: GGLP-Komplett	81
4.3.3	Erläuterungen	83
4.3.4	Fallstudie FS2	87
5	Lösungsverfahren für Job-Shop-Probleme	91
5.1	Anmerkungen zur Komplexität	91
5.2	Überblick über exakte und heuristische Lösungsansätze	95
5.2.1	Exakte Verfahren	95
5.2.2	Heuristische Verfahren	103
5.2.2.1	Eröffnungsverfahren	104
5.2.2.2	Verbesserungsverfahren/Lokale Suchverfahren	106
5.2.2.3	Weitere Verfahren	114
5.3	Prioritätsregelverfahren	114
5.3.1	Einfache Konstruktionsverfahren	114
5.3.2	Prioritätsregeln	122
5.3.3	Anwendung des Giffler&Thompson-Verfahrens auf die Fall- studie FS1	128
5.4	Genetische Algorithmen	133
5.4.1	Hintergrund und Ablauf	133
5.4.2	Konstruktion Genetischer Algorithmen	138
5.4.2.1	Kodierung	139
5.4.2.2	Lösungsevaluierung	141
5.4.2.3	Ausgangspopulation	145
5.4.2.4	Selektion	146
5.4.2.5	Crossover	149
5.4.2.6	Mutation	154
5.4.2.7	Ersetzungsschema	156
5.4.2.8	Abbruchkriterium	157
5.4.3	Veranschaulichung an der Fallstudie FS1	158

6	Zweiphasen-Heuristik für die Fallstudie aus der Halbleiterindustrie	163
6.1	1. Phase – Auswahl der Maschinenfolgen	164
6.1.1	Ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm zur Auswahl der Maschinenfolgen	164
6.1.2	Notationsvereinbarungen	166
6.1.3	Modellierung der Maschinenfolgeauswahl: GGLP-Auswahl	167
6.1.4	Erläuterungen	168
6.1.5	Fallstudie FS3	169
6.2	2. Phase – das Prioritätsregelverfahren	173
6.2.1	Einleitung	173
6.2.2	Erweiterungen	176
6.2.2.1	Nachlaufzeit	176
6.2.2.2	Rüstzeit und Auftragsgruppen	176
6.2.2.3	Maschinen – Stillstände und Anlaufzeit	177
6.2.2.4	Konflikt-Begriff	178
6.2.3	Der Ablaufplan-Generator [G&T-ext]	181
6.2.4	Lösung der Fallstudie FS3	192
6.3	2. Phase – der Genetische Algorithmus	196
6.3.1	Problemspezifische Ausgestaltung des Genetischen Algorithmus	197
6.3.2	Der Ablaufplan-Generator [Decod-ext]	199
6.3.3	Lösung der Fallstudie FS3	204
7	Evaluation	207
7.1	Bestimmung und Generierung der Daten und Szenarien für die Simulationsstudie	207
7.1.1	Unveränderliche Daten	208
7.1.2	Veränderliche Daten	208
7.1.2.1	Planungshorizont	208
7.1.2.2	Nachfrage	209
7.1.2.3	Liefertermine	209
7.1.2.4	Maschinenstillstände	210
7.1.2.5	Maschinenfolgen	212
7.1.3	Betrachtete Szenarien	212
7.2	Simulationsablauf und -ergebnisse der 1. Phase	213
7.3	Simulationsablauf und -ergebnisse der 2. Phase	217
7.3.1	Allgemeines	217
7.3.2	Prioritätsregelverfahren	220
7.3.3	Genetischer Algorithmus	224
7.3.3.1	Populationsgröße	225
7.3.3.2	Anzahl Kinder	226

7.3.3.3	Evolutionstrategie	227
7.3.3.4	Abbruchkriterium	228
7.3.3.5	Selektion des Mating-Pool	230
7.3.3.6	Crossover	232
7.3.3.7	Mutation	233
7.3.3.8	Zusammenfassung	235
7.4	Ergebnisvergleich der beiden Lösungsverfahren	237
7.4.1	Zielfunktionswert	237
7.4.2	Fertigstellung nach dem Ende des Planungszeitraums	238
7.4.3	Zykluszeit	239
7.4.4	Terminüberschreitung	239
7.4.4.1	Anzahl Terminüberschreitungen	239
7.4.4.2	Höhe Terminüberschreitung	241
7.4.5	Abschlussbemerkungen	242
8	Schlussbetrachtung	247
8.1	Zusammenfassung	247
8.2	Ausblick	252
A	Anhang	255
A.1	Weitere Ablaufgraphen und -pläne zu den Fallstudien	255
A.1.1	Beispiel für Unzulässigkeit	255
A.1.2	Aktiv	256
A.1.3	Unverzögert	256
A.1.4	Optimal	257
A.1.5	Optimales Gantt-Diagramm von Fallstudie FS3 mit den Maschinenfolgen gemäß GGLP-Auswahl	259
A.2	Modellformulierung nach Manne für Fallstudie FS1	260
A.3	Simulationsergebnisse zur 1. Phase	261
A.4	Simulationsergebnisse zur 2. Phase	263
A.4.1	Prioritätsregelverfahren	263
A.4.2	Genetischer Algorithmus	265
	Literaturverzeichnis	269

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zusammenhang zwischen Produktionssystem und Produktionsplanung	8
2.2	Das Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (PPS-System)	10
2.3	FS1 – Zulässiger Ablaufplan (maschinenorientiert)	36
2.4	FS1 – Zulässiger Ablaufplan (auftragsorientiert)	36
2.5	FS1 – Semiaktiver Ablaufplan	37
2.6	FS1 – Aktiver Ablaufplan	39
2.7	FS1 – Unverzögerter Ablaufplan	40
2.8	FS1 – Optimaler Ablaufplan	41
2.9	Venn-Diagramm bzgl. möglicher Ablaufplan-Arten	41
3.1	Wafer-Dioden-Fabrik	43
3.2	Arbeitsgänge der Montage	44
3.3	Planungsrelevante Arbeitsgänge der Endmessung	48
3.4	Mögliche Produktionswege von Endmessen und Sichtprüfen . . .	49
3.5	Produktionsprozess	51
3.6	Explizite Darstellung der 6 möglichen Maschinenfolgen von Endmessdiodentyp ED10	54
3.7	Maschinenfolgen von Endmessdiodentyp ED62	55
3.8	Zeitstrahl Planungshorizont	57
3.9	Divergierende Produktionsstruktur des Montagediodentyps MD18	57
3.10	Veranschaulichung der vier Job-Shop-Scheduling-Problemtypen <i>J, FJ, MJ</i> und <i>MFJ</i>	65
4.1	Legende	70
4.2	FS1 – Maschinenfolgegraph	71
4.3	FS1 – Disjunktiver Graph	71
4.4	FS1 – Auftragsfolgegraph (zulässig)	72
4.5	FS1 – Zulässiger Ablaufgraph	73
4.6	FS1 – Optimaler Ablaufgraph (Lösungsvariante 1)	77
4.7	FS2 – Optimaler Ablaufplan (GGLP-Komplett)	89
4.8	FS2 – Optimaler Ablaufplan (GGLP-Komplett) mit Stillstand von Maschine 4	90
5.1	Entscheidungsbaum und das Branch-and-Bound-Prinzip	96

5.2	Allgemeines Prinzip der lokalen Nachbarschaftssuche	108
5.3	Lokale und Globale Minima	109
5.4	Heuristische Lösungsverfahren für Job-Shop-Probleme	115
5.5	Entscheidungsbaum und das Prinzip einfacher Konstruktionsverfahren	116
5.6	Einsatzmöglichkeiten von einfachen Konstruktionsverfahren	118
5.7	Ablauf des H&L-Verfahrens	119
5.8	Ablauf des G&T-Verfahrens	120
5.9	Ablauf eines Konstruktionsverfahren mit unverzügter Einplanung	122
5.10	Struktogramm [G&T]	129
5.11	FS1 – Gantt-Diagramm für das Ergebnis des Prioritätsregelverfahrens	133
5.12	Grundstruktur eines Genetischen Algorithmus	136
5.13	Kodierung eines 3×4 -JSP	140
5.14	Zuordnung der Aufträge zu den Maschinen	141
5.15	Struktogramm [Dekod]	142
5.16	Resultierendes Gantt-Diagramm	143
5.17	Struktogramm für die zufällige Erzeugung der Ausgangspopulation	146
5.18	Struktogramm für die Turnier-Selektion	147
5.19	Struktogramm für die Zeiger-Selektion	148
5.20	Beispiel zur Zeiger-Selektion	149
5.21	Struktogramm für Generalized Order Crossover (GOX)	151
5.22	Beispiel zur Bestimmung der Einfügestelle – Nehmer-Chromosom (GOX)	152
5.23	Beispiel zur Generierung der Nachkommen (GOX)	152
5.24	Struktogramm für Position Based Crossover (PBX)	153
5.25	Beispiel zum PBX	154
5.26	Struktogramm für die Mutation	155
5.27	Beispiel zur OBM	156
5.28	Struktogramm für das Abbruchkriterium	157
5.29	FS1 – Individuen der Ausgangspopulation	159
5.30	FS1 – Dekodierung der Ausgangspopulation	159
5.31	FS1 – Zeiger-Selektion	160
5.32	FS1 – Nachkommen der ersten Generation	161
5.33	FS1 – Dekodierung der Nachkommen	162
6.1	Phasen des Lösungsverfahrens	164
6.2	Iteratives Vorgehen bei der Maschinenfolgeauswahl	165
6.3	FS3 – Optimaler Ablaufplan mit Maschine 4 (GLP-Komplett)	171
6.4	Nachlaufzeit	176
6.5	Rüstabfrage	177
6.6	Zustände der Maschine m	177
6.7	Relevante Stillstände	178

6.8	Belegungszeit	179
6.9	Konfliktfälle	180
6.10	Struktogramm [G&T-ext]	181
6.11	Struktogramm [Konflikt]	183
6.12	Konfliktabfrage beim erweiterten G&T-Algorithmus	185
6.13	Struktogramm [k, mas]	186
6.14	Stillstandskollision k, mas	187
6.15	Struktogramm [k^*, nm]	188
6.16	Mögliche Situationen an der nächsten Maschine	189
6.17	FS3 – Gantt-Diagramm, [G&T-ext], LRBZ-FLT	196
6.18	Struktogramm [Decod-ext]	200
6.19	FS3 – Dekodierung des Chromosoms	202
6.20	FS3 – Gantt-Diagramm des Ablaufplans gemäß Chromosom	204
6.21	FS3 – Entwicklung der Zielfunktionswerte	205
6.22	FS3 – Chromosom mit ZF^*	205
6.23	FS3 – Gantt-Diagramm des Ablaufplans gemäß Chromosom mit ZF^*	206
7.1	$D^{120}ZF$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	222
7.2	$D^{30}ZF$ in Abh. von der Parametereinstellung und dem Szenario	224
7.3	Vergleich der Ergebnisse für D^{120}	243
A.1	FS1 – Auftragsfolgegraph (unzulässig)	255
A.2	FS1 – Ablaufgraph (unzulässig)	255
A.3	FS1 – Aktiver Ablaufgraph	256
A.4	FS1 – Unverzögerter Ablaufgraph	256
A.5	FS1 – Optimaler Ablaufgraph (Lösungsvariante 2)	257
A.6	FS1 – Optimaler Ablaufplan (Lösungsvariante 2)	257
A.7	FS1 – Optimaler Ablaufgraph (Lösungsvariante 3)	258
A.8	FS1 – Optimaler Ablaufplan (Lösungsvariante 3)	258
A.9	FS3 – Optimales Gantt-Diagramm (GGLP-Auswahl)	259
A.10	$D^{120}AnzFnT$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	263
A.11	$D^{120}Z$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	263
A.12	$D^{120}AnzTA^+$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	264
A.13	$D^{120}\overline{TA}_{\mathcal{K}}^+$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	264
A.14	$D^{120}\overline{TA}_{\mathcal{K}^+}$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	265
A.15	$D^{30}AnzFnT$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	265
A.16	$D^{30}Z$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	266
A.17	$D^{30}AnzTA^+$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	266
A.18	$D^{30}\overline{TA}_{\mathcal{K}}^+$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	267
A.19	$D^{30}\overline{TA}_{\mathcal{K}^+}$ in Abh. von der Prioritätsregel und dem Szenario	267

Tabellenverzeichnis

2.1	Merkmalsausprägungen von Ablaufplänen – Teil 1	19
2.2	Merkmalsausprägungen von Ablaufplänen – Teil 2	20
2.3	FS1 – Maschinenfolgen	34
2.4	FS1 – Prozesszeiten in ZE	34
2.5	FS1 – Anfangszeiten in ZE	36
3.1	Produktionsstufe Montage	46
3.2	Divergierende Produktionsstruktur	47
3.3	Produktionsstufe Endmessung	50
3.4	Alternative Maschinentypfolgen und dazugehörige Anzahl Maschinenfolgen von ED62	55
3.5	Anzahl möglicher Maschinenfolgen je Endmessdiodentyp	56
3.6	Differenzierung von Job-Shop-Scheduling-Problemtypen	63
4.1	FS1 – Auftragsfolgen	72
4.2	Anzahl Nebenbedingungen und Variablen (FS1)	76
4.3	FS1 – Binärvariablen optimaler Ablaufgraph (Lösungsvariante 1)	76
4.4	FS1 – Anfangszeiten optimaler Ablaufplan (Lösungsvariante 1)	77
4.5	Deklarationen GGLP-Komplett – Teil 1	79
4.6	Deklarationen GGLP-Komplett – Teil 2	80
4.7	FS2 – Alternative Maschinenfolgen	88
4.8	FS2 – Prozess-, Rüst- und Nachlaufzeiten in ZE	88
4.9	FS2 – Anlaufzeiten und Stillstandszeiträume der Maschinen sowie Liefertermine der Aufträge in ZE	89
5.1	Einfache, bearbeitungszeitbezogene Prioritätsregeln	123
5.2	Einfache, fertigungsterminbezogene Prioritätsregeln	124
5.3	Sonstige einfache Prioritätsregeln	124
5.4	Kombinierte Prioritätsregeln	126
5.5	FS1 – Ablauf [G&T], KOZ-Zufall	131
5.6	Wichtige Fachbegriffe bei Genetischen Algorithmen	135
5.7	Resultierende Auftragsfolgen	141
5.8	Beispiel zur Fitnesswertberechnung	145
5.9	FS1 – Fitnesswerte	160
5.10	FS1 – Individuen und ihre Zielfunktionswerte	161

6.1	Deklarationen (GGLP-Auswahl)	166
6.2	FS3 – Stillstandszeiträume der Maschinen in ZE	170
6.3	FS3 – Alternative Maschinenfolgen	171
6.4	Verwendete Prioritätsregeln	174
6.5	FS3 – Ablauf [G&T-ext], LRBZ-FLT	193
6.6	FS3 – Anfangs- und Endzeiten, [G&T-ext], LRBZ-FLT	195
6.7	FS3 – Ergebnisse des erweiterten Giffler&Thompson-Verfahrens bei Anwendung verschiedener Prioritätsregeln	195
6.8	FS3 – Auftragsfolgen $[k]$ vom Beispiel-Chromosom	202
6.9	FS3 – Ablaufplan-Generierung des Chromosoms	203
7.1	Anlaufzeiten az_m der Maschinen m in Minuten	208
7.2	Kapazitäten und Anzahl Stillstände bei den vier Maschinenstill- stands-Varianten	212
7.3	Szenarien	213
7.4	Auswertung der Ergebnisse der 1. Phase	215
7.5	Parameter des Genetischen Algorithmus in der Simulationsstudie	218
7.6	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Prioritätsregel und dem Szenario	221
7.7	Ergebnisse des Prioritätsregelverfahrens mit PRIO*	223
7.8	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Populationsgröße und dem Szenario	225
7.9	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Anzahl Kinder und dem Szenario	226
7.10	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Evolutionsstrate- gie und dem Szenario	227
7.11	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom Abbruchkriterium und Szenario – Teil 1	228
7.12	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom Abbruchkriterium und Szenario – Teil 2	229
7.13	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom Selektionsverfahren und Szenario	230
7.14	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom Selektionsdruck und Szenario	231
7.15	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit vom Crossover-Verfahren und Szenario	232
7.16	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von p_C und dem Szenario	233
7.17	Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der Mutation und dem Szenario	234
7.18	GA* – Endgültige Parametereinstellung des Genetischen Algo- rithmus	235
7.19	Ergebnisse des Genetischen Algorithmus mit der besten Parame- tereinstellung	236

7.20	Vergleich der Ergebnisse – D^dZF und σ^dZF	237
7.21	Vergleich der Ergebnisse – $D^dAnzFnT$ und $\sigma^dAnzFnT$	238
7.22	Vergleich der Ergebnisse – D^dZ und σ^dZ	239
7.23	Vergleich der Ergebnisse – D^dAnzTA^+ und σ^dAnzTA^+ (absolut)	240
7.24	Vergleich der Ergebnisse – D^dAnzTA^+ und σ^dAnzTA^+ (prozentual)	240
7.25	Vergleich der Ergebnisse – $D^dTA_{\mathcal{K}}^+$ und $\sigma^dTA_{\mathcal{K}}^+$	241
7.26	Vergleich der Ergebnisse – $D^dTA_{\mathcal{K}^+}$ und $\sigma^dTA_{\mathcal{K}^+}$	242
7.27	PRIO* vs. GA* – Prozentuale Verbesserung	244
A.1	FS1 – Binärvariablen des optimalen Ablaufgraphen (Lösungsvariante 2)	257
A.2	FS1 – Binärvariablen des optimalen Ablaufgraphen (Lösungsvariante 3)	258
A.3	Auswertung der Ergebnisse von GGLP-Auswahl Masst.1 / Masst.2	261
A.4	Auswertung der Ergebnisse von GGLP-Auswahl Masst.3 / Masst.4	261
A.5	Auswertung für Masfo.Zufall Masst.1 / Masst.2	262
A.6	Auswertung für Masfo.Zufall Masst.3 / Masst.4	262
A.7	Ergebnisse des Genetischen Algorithmus mit der besten Parametereinstellung (Pretestmenge)	268

Abkürzungsverzeichnis

ACO	Ant Colony Optimization
BG	Abbruchkriterium, das sich aus den beiden Kriterien „Überschreiten einer fest vorgegebenen Anzahl G an Generationen“ oder „Überschreiten einer fest vorgegebenen Anzahl GOV an Generationen ohne Verbesserung“ zusammensetzt
BM	Both Mutation
B&B	Branch-and-Bound(-Verfahren)
B&C	Branch-and-Cut(-Verfahren)
B&C&P	Branch-and-Cut-and-Price(-Verfahren)
B&P	Branch-and-Price(-Verfahren)
C	Competition, Evolutionsstrategie des „survival of the fittest“
CoverT	Prioritätsregel
CR	Kleinste Verhältnis aus zulässiger Restdurchlaufzeit ($F_k^* - t$) und Restbearbeitungszeit (critical ration)
<i>F</i>	Flow-Shop-Problem
<i>FF</i>	Flexibles Flow-Shop-Problem
<i>FJ</i>	Flexibles Job-Shop-Problem
FAFS	Früheste Ankunft im Betrieb (First Arrival First Serve)
FCFS	Längste Wartezeit in der Schlange (First Come First Serve)
FFT	Frühester Freigabetermin (ERD, Earliest Release Date)
FLT	Frühester Liefertermin
FMS	Flexibles Fertigungssystem (Flexible Manufacturing System)
FOLT	Frühester Operations-Liefertermin
FS1	Fallstudie, siehe Abschnitt 2.4.1 auf S. 33f.
FS2	Fallstudie, siehe Abschnitt 4.3.4 auf S. 87f.
FS3	Fallstudie, siehe Abschnitt 6.1.5 auf S. 169f.
FSH	Fallstudie aus der Halbleiterindustrie, siehe Kapitel 3 auf S. 43ff.
GA	Genetische(r) Algorithmus/-men
GGBZ	Größte Gesamtbearbeitungszeit auf allen Maschinen
GGLP	Gemischt-ganzzahliges lineares Programm
GLP	Ganzzahliges lineares Programm
GOn	Größte Anzahl noch durchzuführender Operationen
GOV	Abbruchkriterium, das eine feste Anzahl GOV an Generationen ohne Verbesserung vorgibt

GOZ- WSLnM	Kleinste Summe der Operationszeiten an der in der Operationsfolge des ausgewählten Auftrags nachfolgenden Maschine
G&T	Giffler&Thompson(-Verfahren)
H&L	Heller&Logemann(-Verfahren)
<i>J</i> , JSP	Job-Shop(-Scheduling)-Problem
KGBZ	Kleinste Gesamtbearbeitungszeit auf allen Maschinen
KOn	Kleinste Anzahl noch durchzuführender Operationen
KOZ	Kürzeste Operationszeit
KOZ*	Modifizierte Kürzeste Operationszeit-Regel
KOZnM	Kürzeste Operationszeit an der in der Operationsfolge des ausgewählten Auftrags nachfolgenden Maschine
KRBZ	Kürzeste Restbearbeitungszeit
LRBZ	Längste Restbearbeitungszeit
LOZ	Längste Operationszeit
LOZnM	Längste Operationszeit an der in der Operationsfolge des ausgewählten Auftrags nachfolgenden Maschine
LP	Lineares Programm
LRBZ	Längste Restbearbeitungszeit
<i>MJ</i>	Job-Shop-Problem mit mehreren Maschinentypfolgen
<i>MFJ</i>	Flexibles Job-Shop-Problem mit mehreren Maschinentypfolgen
<i>O</i>	Open-Shop-Problem
OBM	Order Based Mutation
ohneM	ohne Mutation
OZ/GRBZ	Kleinstes Verhältnis aus der Operationszeit und der Gesamten Restbearbeitungszeit aller Aufträge
OZ/RBZ	Kleinstes Verhältnis aus Operationszeit und Restbearbeitungszeit des Auftrags
<i>P</i>	Scheduling-Problem mit identischen parallelen Maschinen
<i>PF</i>	Permutations-Flow-Shop-Problem
PPS	Produktionsplanungs- und -steuerung
<i>Q</i>	Scheduling-Problem mit uniformen parallelen Maschinen
<i>R</i>	Replacement
<i>R</i>	Scheduling-Problem mit heterogenen parallelen Maschinen
RM	Random Mutation
RZ	Kürzeste Rüstzeit
SZ	Kleinste Schlupfzeit
SZ/On	Kleinstes Verhältnis aus Schlupfzeit und Anzahl noch durchzuführender Operationen
SZ/RBZ	Kleinstes Verhältnis aus Schlupfzeit und Restbearbeitungszeit des Auftrags
SZ/ZRDZ	Kleinstes Verhältnis aus Schlupfzeit und zulässiger Restdurchlaufzeit

WR	Höchster Wert
WSL _n M	Kürzeste Warteschlangenlänge an der in der Operationsfolge des ausgewählten Auftrags nachfolgenden Maschine (Anzahl an wartenden Aufträgen)
WSL _n M	Warteschlangenlänge an der nächsten Maschine
zGOZ- WSL _n M	Kleinste Summe der Operationszeiten an der in der Operationsfolge des ausgewählten Auftrags nachfolgenden Maschine beim Eintrittszeitpunkt in deren Warteschlange („zukünftig“)
ZRDLZ	Kleinste zulässige Restdurchlaufzeit
ZRDLZ/On	Kleinste Verhältnis aus zulässiger Restdurchlaufzeit und Anzahl noch durchzuführender Operationen
Zufall	Zufällige Auswahl aus den vor der Maschine wartenden Aufträgen

Verzeichnis ausgewählter Symbole

a	Ausbeutefaktor [%]
a_{jcem}	Anfangszeitpunkt der Bearbeitung von Charge c des Endmessdientyps j mittels Maschinenfolge e auf Maschine m
a_{km}	(frühester) Anfangszeitpunkt der Bearbeitung der Operation O_{km}
a_{kmt}	Anfangszeitpunkt t der Bearbeitung von Auftrags k auf Maschine m
α	Maschinencharakteristika
A_k^*	Freigabetermin des Auftrags k
\mathcal{A}	Menge der betrachteten Maschinenfolge-Varianten nach GGLP-Auswahl: $\mathcal{A} = \{\text{Masfo.1;Masfo.2;Masfo.3;Masfo.4}\}$ bzw. Menge der konjunktiven Pfeile im disjunktiven Graphen G^*
A_k	Menge der möglichen Maschinenfolgen von Auftrag k im disjunktiven Graphen G^*
\mathcal{AB}	Menge der betrachteten Abbruchkriterien, $\mathcal{AB} = \{\text{BG50-5;BG50-10;BG100-25;BG100-50;BG300-100;GOV10;GOV25;GOV50;G25;G100;G300;G400;G1000}\}$
\mathcal{AKF}	Menge der Aufträge, die zu k' im Konflikt stehen
$Anz bA_m$	Anzahl Aufträge, die bisher auf m bearbeitet wurden
$Anz fA$	Anzahl fertiger Aufträge
$AnzFnT$	Anzahl der Aufträge, deren Fertigstellungszeitpunkt nach dem Ende des Planungszeitraums T liegt
$AnzKF$	Anzahl Aufträge, die zu k' im Konflikt stehen
\mathcal{ANZKI}	Menge der betrachteten Kinderanzahlen, $\mathcal{ANZKI} = \{\text{Single;Double}\}$
$AnzRV$	Anzahl Rüstvorgänge
$AnzTA$	Anzahl Terminabweichungen des Auftragsbestandes
$AnzTA^+$	Anzahl Terminüberschreitungen des Auftragsbestandes
$AnzTA^-$	Anzahl Terminunterschreitungen des Auftragsbestandes
\mathcal{AST}	Menge der Aufträge vor mas , die ebenfalls im gleichen Verfügbarkeitszeitraum wie k' warten
\mathcal{AWS}_m	Menge der Aufträge, die vor der Maschine m in der Warteschlange warten
az_m	Anlaufzeit von Maschine m nach einem Maschinenstillstand

b_{km}	Belegungszeit des Auftrags k auf Maschine m (ohne l_{km})
β	Auftragscharakteristika
B_m	Belegungszeit der Maschine m
Bb_m	Zeitpunkt, bis zu dem Maschine m belegt ist/war
BM	Gesamtbelegungszeit des Maschinenbestandes \mathcal{M}
Bv_m	Auftrag, von der Maschine m zuletzt belegt ist/war
$c(c_1, c_2)$	Charge (c_1 vor c_2)
$\gamma(\gamma_1 \dots \gamma_Z)$	Zielkriterien
c_k	Verspätungsfaktor von Auftrag k (CoverT)
C	Anzahl Chargen, die insgesamt herzustellen sind
C_{max}	maximale Anzahl Chargen aller Endmessdiodyentypen
C_j	Anzahl Chargen, die vom Endmessdiodyentyp j herzustellen sind
\mathcal{C}_j	Menge der vom Endmessdiodyentyp j herzustellender Chargen, $\mathcal{C}_j = \{1; \dots; C_j\}$
\mathcal{CV}	Menge der betrachteten Crossover-Verfahren, $\mathcal{CV} = \{\text{PBX}; \text{GOX}\}$
d	Datensatz
d_m^+	Überschreitung der durchschnittlichen Kapazitätsauslastung bei Maschine m
d_m^-	Unterschreitung der durchschnittlichen Kapazitätsauslastung bei Maschine m
D	Anzahl Datensätze
D (auch \emptyset)	Durchschnitt
D_k	Durchlaufzeit des Auftrags k
\mathcal{D}	Menge der Datensätze d , $\mathcal{D} = \{1; \dots; D\}$
Δ	Hilfsvariable - gibt eine zeitliche Differenz an
DK	Gesamtdurchlaufzeit des Auftragsbestandes \mathcal{K}
\overline{DK}	mittlere Durchlaufzeit des Auftragsbestandes \mathcal{K}
$D^d \dots$	Durchschnitt der betreffenden Größe \dots der in d angegebenen Datensätze
D^5	Durchschnitt über die 5 Datensätze der Menge \mathcal{D}^5
D^{20}	Durchschnitt über die 20 Datensätze der Menge \mathcal{D}^{20}
D^{25}	Durchschnitt über die 25 Datensätze der Menge \mathcal{D}^{25}
D^{30}	Durchschnitt über die 30 Datensätze der Menge \mathcal{D}^{30}
D^{100}	Durchschnitt über die 100 Datensätze der Menge \mathcal{D}^{100}
D^{120}	Durchschnitt über die 120 Datensätze der Menge \mathcal{D}^{120}
D^5	Anzahl Datensätze ist 5
D^{20}	Anzahl Datensätze ist 20
D^{25}	Anzahl Datensätze ist 25
D^{30}	Anzahl Datensätze ist 30
D^{100}	Anzahl Datensätze ist 100
D^{120}	Anzahl Datensätze ist 120

\mathcal{D}^5	Menge folgender 5 Datensätze: $\mathcal{D}^5 = \{100; 105; 110; 115; 120\}$
\mathcal{D}^{20}	Menge folgender 20 Datensätze: $\mathcal{D}^{20} = \{101; \dots; 120\}$
\mathcal{D}^{25}	Menge folgender 25 Datensätze: $\mathcal{D}^{25} = \{1; \dots; 25\}$
\mathcal{D}^{30}	Menge folgender 30 Datensätze: $\mathcal{D}^{30} = \{1; \dots; 25; 100; 105; 110; 115; 120\}$
\mathcal{D}^{100}	Menge folgender 100 Datensätze: $\mathcal{D}^{100} = \{1; \dots; 100\}$
\mathcal{D}^{120}	Menge folgender 120 Datensätze: $\mathcal{D}^{120} = \{1; \dots; 120\}$
$D^d \text{AnzFnT}$	Durchschnitt der Anzahl nach T fertig gestellter Aufträge der in d angegebenen Datensätze
$D^d \text{AnzTA}^+$	Durchschnitt der Anzahl an Terminüberschreitungen der in d angegebenen Datensätze
$D^d \overline{KA}^T$	Durchschnitt der durchschnittlichen auf den Planungszeitraum T bezogenen Kapazitätsauslastung über alle M Maschinen der in d angegebenen Datensätze
$D^d \overline{KB}$	Durchschnitt der durchschnittlichen Kapazitätsbelastung aller M Maschinen der in d angegebenen Datensätze
$D^d \overline{TA}_K^+$	Durchschnitt der auf alle K Aufträge bezogenen durchschnittlichen Terminüberschreitung der in d angegebenen Datensätze
$D^d \overline{TA}_{K^+}^+$	Durchschnitt der auf alle K^+ Aufträge bezogenen durchschnittlichen Terminüberschreitung der in d angegebenen Datensätze
$D^d Z$	Durchschnitt der Zykluszeiten der in d angegebenen Datensätze
$D^d ZF$	Durchschnitt der Zielfunktionswerte der in d angegebenen Datensätze
$e (e_1, e_2)$	alternative Maschinenfolge
e_{km}	(frühester) Endzeitpunkt der Bearbeitung der Operation O_{km}
\bar{e}_{km}	(frühester) Endzeitpunkt der Bearbeitung und potentiellen anschließenden Nachlaufzeit der Operation O_{km}
e_{kmt}	Endzeitpunkt t der Bearbeitung von Auftrags k auf Maschine m
\hat{e}	alternative Maschinentypfolge
E_1, E_2	Individuum, das als erstes bzw. zweites Elternteil agiert
E_j	Anzahl der alternativen Maschinenfolgen e von Endmessdiodyentyp j
E_k	Anzahl der alternativen Maschinenfolgen e von Auftrag k
\hat{E}_k	Anzahl der alternativen Maschinentypfolgen \hat{e} von Auftrag k
\mathcal{E}_j	Menge der alternativen Maschinenfolgen e von Endmessdiodyentyp j , $\mathcal{E}_j = \{1; \dots; E_j\}$
\mathcal{E}	Menge aller disjunktiven Pfeilpaare im disjunktiven Graphen G^*
\mathcal{E}_m	Menge der möglichen Auftragsfolgen der Maschine m im disjunktiven Graphen G^*
ED_i	Endmessdiodyentyp vom Vorgänger-Auftrag i
ED_k	Endmessdiodyentyp von Auftrag k

ED_y	Endmessdiidentyp Nr. y ($y=1, \dots, 63$)
ES	Einfügestelle des Substrings im Rahmen des GOX
\mathcal{ES}	Menge der betrachteten Evolutionsstrategien, $\mathcal{ES} = \{R0;R2;R6;R12;C\}$
$f(x)$	Funktion in Abhängigkeit von x
$f^R(x)$	Funktion eines relaxierten Problems in Abhängigkeit von x
F	Gesamte effektive Fertigstellungszeit
F_k	Fertigungszeit des Auftrags k
F_k^*	Fertigungstermin des Auftrags k
\widetilde{F}_k^*	Fertigungstermin des Auftrags k , dessen Überschreiten zur Unzulässigkeit führt
F_{jc}	Fertigungszeit von Charge c des Endmessdiidentyps j
F_{jc}^*	Fertigungstermin von Charge c des Endmessdiidentyps j
$Fit(i)$	Fitnesswert von Individuum i
$\widetilde{Fit}^*(Fit_{neu}^*)$	aktuell bester Fitnesswert (bzw. der neuen Generation)
$\widetilde{Fit}(i)$	relative Fitness von Individuum i
\widetilde{Fit}_{kum}	kumulierter relativer Fitnesswert
FAZ_{km}	Frühestmöglicher Anfangszeitpunkt der Bearbeitung von Auftrag k auf Maschine m
g	Generationszähler
g_A	Gewichtung der summierten (gesamten) Anfangszeit GA
g_k	Gewichtungsfaktor für Auftrag k
g_m	Gewichtungsfaktor für Maschine m
g_Z	Gewichtung der Zykluszeit Z
g_{AG}	Faktor zur Korrektur der Kapazitätsbelastung der Montagemaschinen $m \in \mathcal{M}_{AG}$
$g_{\overline{AG}}$	Faktor zur Korrektur der Kapazitätsbelastung der (Nicht-Montage-)Maschinen $m \in (\mathcal{M} \setminus \mathcal{M}_{AG})$
g_{oV}	Zähler für die Generationen ohne Verbesserung
g_{jce}	=1, wenn Charge c vom Endmessdiidentyp j mit Maschinenfolge e hergestellt wird (0, sonst)
G	Anzahl Generationen
G^*	Disjunktiver Graph
gg	„großes“ Zielgewicht
GA^*	endgültige Parametereinstellung für den genetischen Algorithmus
GA	gewichtete gesamte Anfangszeit
\mathcal{GAM}	Menge der betrachteten Mutationsstrategien, $\mathcal{GAM} = \{BM3;BM10;OBM3;ohneM;RM3;RM10\}$
GOV	Anzahl Generationen ohne Verbesserung
GSN	gewichteter Strafterm für nicht erfüllte Aufträge
GTA^+	gewichtete Gesamtterminüberschreitung des Auftragsbestandes

GTA_{jc}^+	gewichtete Terminüberschreitung von Charge c des Endmessdiodentyps j
$\overline{GTA}_{\mathcal{K}^+}^+$	durchschnittliche gewichtete auf alle \mathcal{K}^+ Aufträge bezogene Terminüberschreitung
$\overline{GTA}_{\mathcal{K}}^+$	durchschnittliche gewichtete auf alle \mathcal{K} Aufträge bezogene Terminüberschreitung
GZ	gewichtete Zykluszeit
h (h' , h'')	h -tes Gen im Chromosom
h_s , h'_s	Zähler für die Anzahl zu selektierender Gene
H	Anzahl Gene des Chromosoms
H_s	Anzahl zu selektierender Gene
i	Individuum einer Population / Vorgängerauftrag von Auftrag k
i_S	Zähler für die zu selektierenden Individuen
i_T	Zähler für die Anzahl der Turnierteilnehmer
I	Anzahl Individuen einer Population
I_S	Anzahl zu selektierender Individuen
\mathcal{I}	Menge der Individuen i einer Population ($i = 1, \dots, I$)
\mathcal{I}_S	Menge der selektierten Individuen ($0 \leq \mathcal{I}_S \leq I_S$)
I_T	Anzahl der Turnierteilnehmer
j (j_1, j_2)	Endmessdiodentyp (j_1 vor j_2)
J	Anzahl Endmessdiodentypen
\mathcal{J}	Menge der Endmessdiodentypen j ($j = 1, \dots, J$)
ι	Index für die Iterationsstufe
k (k_1, k_2, i)	Auftrag (k_1 vor k_2 bzw. i vor k)
$[k]$	Index, der den k -ten Auftrag in der Auftragsfolge einer Maschine m angibt
k'	vorläufig ausgewählter Auftrag
k^*	aufgrund der Prioritätsregel bzw. der Reihenfolge im Chromosom ausgewählter Auftrag
k_m	=1, falls $KB_m > KV_m$ (0 sonst)
\mathcal{K}	Anzahl Aufträge
\mathcal{K}^+	Anzahl Aufträge mit Terminüberschreitung
\mathcal{K}	Menge an Aufträgen k , Auftragsbestand, $\mathcal{K} = \{1; \dots; \mathcal{K}\}$
\mathcal{K}^+	Menge an Aufträgen mit Terminüberschreitungen
\mathcal{K}_m	Anzahl Aufträge, die auf Maschine m bearbeitet werden
\mathcal{K}_m	Menge der Aufträge, die auf der Maschine m bearbeitet werden müssen
KA	Kapazitätsauslastung des Maschinenparks in Bezug auf die Zykluszeit
KA_m	Kapazitätsauslastung der Maschine m in Bezug auf den Zeitraum von t_0 bis zum Ende der letzten Operation auf m

KA_m^T	Kapazitätsauslastung der Maschine m in Bezug auf den kompletten Planungszeitraum von T Zeiteinheiten
\overline{KA}^T	durchschnittliche Kapazitätsauslastung aller Maschinen bezogen auf den kompletten Planungszeitraum von T Zeiteinheiten
KB_m	Kapazitätsbelastung der Maschine m
\overline{KB}	durchschnittliche Kapazitätsbelastung aller Maschinen
KT_{je}	Korrekturterm von Endmessdiodentyp j , der mit Maschinenfolge e hergestellt wird
\overline{KT}_j	durchschnittlicher Korrekturterm vom Endmessdiodentyp j
KV_m	Verfügbare Kapazität von Maschine m (in Minuten)
KV_m^T	relative Angabe der verfügbaren Kapazität der Maschine m bezogen auf den Planungszeitraum T
$KV_m^{T_m}$	relative Angabe der verfügbaren Kapazität der Maschine m bezogen auf die bzgl. Maschine m sinnvolle Zeit T_m
\overline{KV}	durchschnittliche absolute verfügbare Kapazität aller Maschinen
\overline{KV}^T	durchschnittliche relative verfügbare Kapazität aller Maschinen bezogen auf den kompletten Planungszeitraum T
\overline{KV}^{T_m}	durchschnittliche relative verfügbare „sinnvolle“ Kapazität aller Maschinen bezogen auf den kompletten Planungszeitraum T
L	Gesamtleerzeit
L_m	Leerzeit von Maschine m
LB, LB_s	Unterschranke (von Teilproblem Π_s) (Lower Bound)
	Unterschranke von Teilproblem Π_s
LS	Länge des Substrings im Rahmen des GOX
LZ	Abstand zwischen den Zeigern im Rahmen der Zeiger-Selektion
$m (m_1, m_2,$	Maschine (m_1 vor m_2
$mas, nm, vm)$	bzw. vm vor mas vor nm)
$[m]$	Index, der die m -te Maschine in der Maschinenfolge eines Auftrags k angibt
M	Anzahl Maschinen
M_k	Anzahl Maschinen, auf denen Auftrag k bearbeitet wird
M_{je}	Anzahl Maschinen, auf denen Endmessdiodentyp j bei Maschinenfolge e bearbeitet werden muss
M_{km}	Anzahl identischer paralleler Maschinen, die zur Bearbeitung der Operation O_{km} zur Verfügung stehen
\mathcal{M}	Menge der Maschinen m , $\mathcal{M} = \{1; \dots; M\}$
\mathcal{M}_j	Menge der Maschinen, auf denen der Endmessdiodentyps j (unabhängig von der für die Charge c gewählten Einplanungsalternative e) bearbeitet werden kann
\mathcal{M}_k	Menge aller Maschinen, auf denen der Auftrag k bearbeitet werden muss

\mathcal{M}_{AG}	Menge der Maschinen, die Auftragsgruppen berücksichtigen (Montagemaschinen)
\mathcal{M}_{je}	Menge der Maschinen, auf denen der Endmessdientyp j bei Maschinenfolge e bearbeitet werden kann
\mathcal{M}_{km}	Teilmenge der Maschinen, die zur Bearbeitung der Operation O_{km} zur Verfügung stehen, $\mathcal{M}_{km} = \{1; \dots; M_{km}\}$
mas	Maschine, auf der der ein ausgewählter Auftrag (k', k^*) bearbeitet werden muss
\mathcal{MASS}	Menge der betrachteten Maschinenstillstands-Varianten, $\mathcal{MASS} = \{\text{Masst.1}; \text{Masst.2}; \text{Masst.3}; \text{Masst.4}\}$
$Max^d \dots$	Maximum der betreffenden Größe \dots der in d angegebenen Datensätze
$Max^d ZF$	maximaler Zielfunktionswert der in d angegebenen Datensätze
MD_i	Montagedientyp von Vorgängerauftrag i
MD_k	Montagedientyp von Auftrag k
MD_x	Montagedientyp Nr. x ($x=1, \dots, 40$)
MF	Anzahl Maschinen bzw. Fertigungsstufen zur Klassifikation des Parameters α_2
$Min^d \dots$	Minimum der betreffenden Größe \dots der in d angegebenen Datensätze
$Min^d ZF$	Minimaler Zielfunktionswert der in d angegebenen Datensätze
MT	Maschinentyp
n_{jce}	=1, wenn Charge c vom Endmessdientyp j innerhalb des Planungszeitraums fertig gestellt wird (0 sonst)
nm	nächste Maschine in der Maschinenfolge von Auftrag k^*
nz	Nachlaufzeit (unabhängig von Auftrag k auf Maschine m)
nz_k	Nachlaufzeit von Auftrag k
nz_m	Nachlaufzeit nach der Bearbeitung auf Maschine m
nz_{jm}	Nachlaufzeit von Endmessdientyp j nach seiner Bearbeitung auf Maschine m
nz_{km}	Nachlaufzeit von Auftrag k auf Maschine m
nzA_k	Anfangszeitpunkt der Nachlaufzeit von Auftrag k
nzE_k	Endzeitpunkt der Nachlaufzeit von Auftrag k
N, N_1, N_2	Individuum, das als (erstes bzw. zweites) Nachkomme ist
N	Anzahl Generationen beim Genetische Algorithmus
$\mathcal{NB}(x)$	Nachbarschaft einer Lösung x
\mathcal{NP}	Komplexitätsklasse der (vermutlich) praktisch unlösbaren Probleme
O	Arbeitsganganzahl des Auftragsbestandes
\mathcal{O}	Menge aller Operationen
\mathcal{O}^*	Menge der Knoten im disjunktiven Graphen G^*
\mathcal{O}^e	Menge der einplanbaren Operationen

O_k	Arbeitsganganzahl des Auftrags k
\mathcal{O}_k	Menge der Operationen des Auftrags k , $\mathcal{O}_k = \{O_{k[1]}, \dots, O_{k[M_k]}\}$
O_m	Arbeitsganganzahl auf Maschine m
\mathcal{O}_m	Menge der Operationen auf Maschine m , $\mathcal{O}_m = \{O_{[1]m}, \dots, O_{[K_m]m}\}$
O_{ke}	Arbeitsganganzahl des Auftrags k bei Maschinenfolge e
O_{km}	Bearbeitung von Auftrag k auf Maschine m (Operation, Arbeitsgang)
$O_{[k]m}$	Auftrag, der an k -ter Stelle der Auftragsfolge der Maschine m eingeordnet ist
$O_{k[m]}$	Auftrag k auf der Maschine, die an m -ter Stelle der Maschinenfolge des Auftrages k tätig wird
O_{max}	maximale Anzahl an Operationen eines Ablaufplanungsproblems
O_{N_k}	Anzahl Operationen des Auftrags k , die noch stattfinden müssen
\mathcal{O}_{N_k}	Menge aller Operationen des Auftrags k , die noch stattfinden müssen
O_{N_m}	Anzahl Operationen der Maschine m , die noch stattfinden müssen
\mathcal{O}_{N_m}	Menge aller Operationen der Maschine m , die noch stattfinden müssen
O_{S_k}	Anzahl Operationen des Auftrags k , die bereits stattgefunden haben
\mathcal{O}_{S_k}	Menge aller Operationen des Auftrags k , die bereits stattgefunden haben
O_{S_m}	Anzahl Operationen der Maschine m , die bereits stattgefunden haben
\mathcal{O}_{S_m}	Menge aller Operationen der Maschine m , die bereits stattgefunden haben
\mathcal{OKF}	Menge der Operationen O_{km} , die zu $O_{k'mas}$ im Konflikt stehen
p	für alle Operationen einheitliche Bearbeitungszeit
p_k	(maschinenunabhängige) Bearbeitungszeit von Auftrag k
p_M	Mutations-Wahrscheinlichkeit
p_o	Obergrenze der für alle Operationen einheitlichen Bearbeitungszeit
p_u	Untergrenze der für alle Operationen einheitlichen Bearbeitungszeit
p_{jm}	Bearbeitungszeit von Endmessdiodentyp j auf Maschine m
p_{km}	Bearbeitungszeit von Auftrag k auf Maschine m
p_C	Crossover-Wahrscheinlichkeit
pf	Produkt-/Auftragsfamilie
P_k	gesamte Bearbeitungszeit des Auftrags k
P_m	gesamte Bearbeitungszeit auf der Maschine m

p_{MV}	Wahrscheinlichkeit für das Mutationsverfahren OBM im Rahmen von BM
$P(i)$	Position von Individuum i in der nach dem Fitnesswert sortierten Menge der Individuen einer Population
\mathcal{P}	Komplexitätsklasse in polynomialer Zeit lösbarer Probleme
\mathcal{P}_C	Menge der betrachteten Crossover-Wahrscheinlichkeiten, $\mathcal{P}_C = \{60; 95; 100\}$
PK	gesamte Bearbeitungszeit des Auftragsbestandes \mathcal{K}
PM	gesamte Bearbeitungszeit auf dem Maschinenbestand \mathcal{M}
\mathcal{PZ}	Wertebereich für die Bearbeitungszeiten aller Operationen
\mathcal{POP}	Menge der betrachteten Populationsgrößen, $\mathcal{POP} = \{50; 120; 200; 500\}$
PRIO^*	endgültige Prioritätsregel für das Prioritätsregelverfahren
PRIO	Menge der betrachteten Prioritätsregeln, $\text{PRIO} = \{\text{FCFS}; \text{FLT}; \text{KOZ}; \text{LRBZ}; \text{RZ}; \text{SZ}; \text{SZ}/\text{On}; \text{SZ}/\text{RBZ}; \text{WSL}_n\text{M}; \text{Zufall}; \text{ZRDLZ}; \text{ZRDLZ}/\text{On}\}$
PriO_k	Prioritätswert von Auftrag k
Π_s	(separiertes) Teilproblem beim B&B-Verfahren
Φ_k	Prioritätswert von Auftrag k
Q	Quelle eines Graphen
RBZ_k	Restbearbeitungszeit vom Auftrag k
RV	Rüstvorgang
rz	Rüstzeit (unabhängig von Auftrag k und Maschine m)
rz_k	Rüstzeit von Auftrag k
rz_m	Rüstzeit von Maschine m
rz_{jm}	Rüstzeit von Endmessdiodentyp j auf Maschine m
rz_{km}	Rüstzeit von Auftrag k auf Maschine m
$rz_{k_1k_2}$	reihenfolgeabhängige Rüstzeit (k_1 vor k_2) (maschinenunabhängig)
$rz_{k_1k_2m}$	reihenfolgeabhängige Rüstzeit auf Maschine m (k_1 vor k_2)
$rz_{pf_1pf_2}$	reihenfolgeabhängige Rüstzeit (pf_1 vor pf_2)
$rz_{pf_1pf_2m}$	reihenfolgeabhängige Rüstzeit auf Maschine m (pf_1 vor pf_2)
RZ	gesamte Rüstzeit des Auftragsbestandes
Rz_k	Summe der Rüstzeiten von Auftrags k
Rz_m	Summe der Rüstzeiten auf Maschine m
$s(s_1, s_2)$	Index für separierte Teilprobleme beim B&B-Verfahren
s_m	Intensität der Maschine m (Geschwindigkeit, mit der Maschine m betrieben wird)
s_{km}	operationsspezifische Intensität der Maschine m (Geschwindigkeit, mit der Maschine m betrieben wird)