

Edition KVV

Christoph Stich

Produktionsplanung in der Automobil- industrie

Optimierung des Ressourceneinsatzes
im Serienanlauf



Springer Gabler



Edition KWV

Die „Edition KWV“ beinhaltet hochwertige Werke aus dem Bereich der Wirtschaftswissenschaften. Alle Werke in der Reihe erschienen ursprünglich im Kölner Wissenschaftsverlag, dessen Programm Springer Gabler 2018 übernommen hat.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/16033>

Christoph Stich

Produktionsplanung in der Automobilindustrie

Optimierung des Ressourceneinsatzes
im Serienanlauf

Christoph Stich
Capgemini Deutschland GmbH
Stuttgart, Deutschland

Bis 2018 erschien der Titel im Kölner Wissenschaftsverlag, Köln

Edition KWW

ISBN 978-3-658-26351-5 ISBN 978-3-658-26352-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26352-2>

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2007, Nachdruck 2019

Ursprünglich erschienen bei Kölner Wissenschaftsverlag, Köln, 2007

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

*Wenn der Mensch sich etwas vornimmt,
so ist ihm mehr möglich als man glaubt.*

Johann-Heinrich Pestalozzi

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der DaimlerChrysler AG im Werk Sindelfingen in Zusammenarbeit mit dem Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Supply Chain Management und Produktion (SCMP) der Universität zu Köln entstanden. Sie wurde im Februar 2007 von der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät als Dissertation angenommen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Planungsproblemen im Serienanlauf, wie sie gewöhnlich in der betrieblichen Praxis auftreten. Im Allgemeinen ist die angewandte Forschung bestrebt, Forschungsinhalte aus praktischen Problemen abzuleiten und durch wissenschaftlichen Fortschritt zu neuen, besseren Lösungen zu gelangen. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten modellorientierten Problemlösungsansatz hoffe ich, diesem Bestreben möglichst weitgehend nachzukommen. An dieser Stelle möchte ich nun all denjenigen gebührend danken, die jeweils auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem akademischen Lehrer, Herrn Univ.-Prof. Dr. Horst Tempelmeier, für den von ihm gewährten wissenschaftlichen Freiraum, für seine stete Diskussionsbereitschaft und die vielen wertvollen Anregungen, die mich nicht zuletzt auch immer wieder zur kritischen Reflexion meiner Arbeit zwangen. Herrn Univ.-Prof. Dr. Ulrich W. Thonemann danke ich für die Anfertigung des Zweitgutachtens, Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. Ulrich Derigs für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Darüber hinaus danke ich sehr herzlich Herrn Dipl.-Ing. Matthias Eisenschmid und Herrn Dr. Ferdinand Blömer, für die Möglichkeit zur Anfertigung einer Dissertation in ihrem Bereich, für ihre Einführung in die interessante „Welt“ der Anlaufprobleme sowie ihre stete Betreuung und Förderung. Ebenso danke ich allen fest und allen befristet angestellten ehemaligen Kollegen der Abteilung für ihre Unterstützung, für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre und die zahlreichen mal mehr, mal weniger fachlichen Diskussionen.

Bedanken möchte ich mich zudem bei allen Mitarbeitern des Seminars. Sie haben mich als sog. „Externer“ von Beginn an hervorragend integriert und sind mir stets mit großer

Hilfsbereitschaft entgegengetreten. Ein ganz herzlicher Dank gebührt vor allem Herrn Dr. Michael Manitz für seine vielen wertvollen Hinweise und Anregungen sowie für die eingehende Korrektur des Manuskripts.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir eine solche Ausbildung ermöglicht haben und mir stets den notwendigen Rückhalt gaben. Zu guter Letzt richtet sich mein Dank an meine Freundin Mercedes. Sie hat mich während der gesamten Entstehungszeit begleitet und dabei auf viele gemeinsame Stunden verzichtet. Ihr Verständnis, ihre Geduld und ihre motivierenden Worte gaben mir immer wieder den entscheidenden Ansporn voranzuschreiten. Mercedes, te doy las gracias.

Köln, Februar 2007

Christoph Stich

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XXVII
1 Gegenstand und Gang der Arbeit	1
2 Der Serienanlauf als Planungsumfeld	5
2.1 Begriff des Serienanlaufs	5
2.2 Phasen des Serienanlaufs	6
2.2.1 Vorserie	7
2.2.2 Nullserie	8
2.2.3 Produktionshochlauf	8
2.3 Anlauftypen	9
2.4 Literaturüberblick über Probleme und Lösungsansätze im Serienanlauf.....	10
2.5 Planungsprobleme und -ebenen der Produktionsplanung und -steuerung.....	14
2.6 Produktionsprogrammplanung.....	16
2.7 Produktprogrammverfügbarkeitsplanung	18
2.8 Einordnung des Problems in den Planungskontext.....	22
2.9 Strukturdefekte des Planungsproblems	24
3 Abbildung variantenreicher Erzeugnisse	27
3.1 Abbildungsebenen	27
3.2 Produktebene	28
3.2.1 Funktion der Produktebene	29

3.2.2	Klassifizierung von Merkmalen	31
3.2.3	Implizite und explizite Produktdefinition.....	31
3.2.4	Restriktionen zwischen Merkmalsausprägungen	33
3.3	Technische Ebene	35
3.3.1	Erzeugnisstruktur und Stücklistenarten	35
3.3.2	Probleme bei der Abbildung variantenreicher Erzeugnisse	37
3.3.3	Geschlossene Variantenstücklisten.....	40
3.3.4	Offene Variantenstückliste: Die regelbasierte Komplexstückliste	41
3.3.4.1	Funktionsweise	41
3.3.4.2	Coderegeln als Boole'sche Terme.....	43
3.3.4.3	Sekundärbedarfsbestimmung	47
3.3.4.4	Integration von Strukturinformationen.....	47
4	Das mehrstufige, einperiodige Produktprogrammverfügbarkeits- Planungsproblem (MEPVP)	55
4.1	Annahmen	55
4.2	Problemparameter	56
4.2.1	Faktoreinsatzkosten zur Aufholung eines Entwicklungsverzug.....	57
4.2.2	Nachfrageprognose, Stückdeckungsbeitrag und Beschaffungskapazität.....	66
4.3	Handlungsalternativen	69
4.4	Restriktionen	70
4.4.1	Globale Restriktionen	71
4.4.2	Logische Restriktionen.....	72
4.4.2.1	Abbildung des Produktprogramms	72
4.4.2.2	Interpretation der Auswahl.....	77
4.4.2.3	Zulässigkeit der Auswahl	79
4.4.2.4	Unterschiedlichkeit der Auswahl	81
4.5	Zielkriterien	81
4.6	Plananpassung und -fortschreibung.....	83
4.7	Fazit.....	85
5	Optimierungsmodelle zur Abbildung des MEPVP.....	87
5.1	Einordnung der entwickelten Modelle in Modelltypen	87

5.2 Übersicht über die entwickelten Modelle und die Gliederung des Kapitels	90
5.3 Mengen-, Parameter- und Variablendefinitionen	91
5.4 Verfügbarkeitsplanung mit einzelnen Varianten	93
5.4.1 Minimierungsmodell.....	93
5.4.2 Erweiterungsmöglichkeiten des Minimierungsmodells	99
5.4.3 Maximierungsmodell.....	101
5.4.4 Erweiterungsmöglichkeiten des Maximierungsmodells.....	103
5.4.5 Kritische Beurteilung.....	104
5.5 Verfügbarkeitsplanung mit Variantenmengen	104
5.5.1 Geschlossene Variantenmengen	105
5.5.2 Semi-offene Variantenmengen (Das MEPVP-Modell)	112
5.5.3 Offene Variantenmengen	117
5.5.4 Erweiterungsmöglichkeiten	119
5.5.5 Kritische Beurteilung.....	119
6 Mögliche Lösungsansätze für das MEPVP	121
6.1 Verallgemeinerung des MEPVP-Modells.....	121
6.2 Einordnung des MEPVP in die Systematik der Knapsack-Probleme.....	122
6.2.1 Multi-dimensionales Knapsack-Problem (MDKP).....	123
6.2.2 Multiples Knapsack-Problem (MKP)	124
6.2.3 Vergleich des MEPVP mit dem MDKP und dem MKP	125
6.3 Komplexität des MEPVP	128
6.3.1 Empirische Überlegungen	128
6.3.2 Komplexitätstheoretische Betrachtung.....	129
6.4 Diskussion von Lösungsverfahren.....	134
6.4.1 Anforderungen an ein Lösungsverfahren für das MEPVP.....	135
6.4.2 Exakte Lösungsverfahren	136
6.4.3 Heuristische Lösungsverfahren.....	138
6.4.4 Auswahlentscheidung und deren Begründung	147
7 Ein heuristischer Lösungsansatz für das MEPVP	149
7.1 Überblick über den gewählten Lösungsansatz.....	149

7.2 Auslagerung von Stücklisteninformationen in die Produktebene als Vorstufe der Heuristiken	150
7.2.1 Prinzip	150
7.2.2 Sekundärbedarfsbestimmung bei ausgelagerten Stücklisteninformationen .	152
7.2.3 Auslagerung von Baubarkeitsregeln	154
7.2.4 Auslagerung von Zusteuerungsregeln.....	156
7.2.5 Vereinfachung von Coderegeln	158
7.2.6 Anwendung am Beispiel	161
7.3 Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)	163
7.4 Tabu-Search.....	166
7.4.1 Basisalgorithmus	166
7.4.2 Erweiterungen	170
7.5 Konzeption der Algorithmen für das MEPVP.....	172
7.5.1 Definitionen und algorithmische Grundlagen	172
7.5.2 GRASP als Eröffnungsverfahren	179
7.5.2.1 Überblick über den Algorithmus	179
7.5.2.2 Konstruktionsphase.....	180
7.5.2.3 Lokale Suche.....	188
7.5.3 Tabu-Search als Verbesserungsverfahren.....	193
7.5.3.1 Überblick über den Algorithmus	193
7.5.3.2 Erzeugung der Nachbarschaft.....	200
7.5.3.3 Auswahl des besten Zugs.....	205
7.5.3.4 Exploration, Intensivierung und Diversifikation.....	207
8 Empirische Analyse des heuristischen Lösungsansatzes	211
8.1 Übersicht über die Probleminstanzen.....	212
8.1.1 Beschreibung der Probleminstanzen.....	212
8.1.2 Künstliche Probleminstanzen	213
8.1.3 Reale Probleminstanzen.....	214
8.2 Empirische Analyse von GRASP	215
8.3 Empirische Analyse von Tabu-Search.....	219
9 Schlussbetrachtung und Ausblick	229

Anhang	231
Literaturverzeichnis	235

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Phasen des Serienanlaufs	7
Abb. 2.2: Literaturüberblick über Lösungsansätze im Serienanlauf und Branchen (Teil I)	12
Abb. 2.3: Literaturüberblick über Lösungsansätze im Serienanlauf und Branchen (Teil II)	13
Abb. 2.4: Produktprogramm einer Produktserie	17
Abb. 2.5: Störungen in der Entwicklungs- und Anlaufphase als Problemursache	21
Abb. 2.6: Einordnung des Planungsproblems in den Planungskontext einer hierarchischen Produktionsprogrammplanung	23
Abb. 3.1: Zusammenhang der drei Abbildungsebenen	28
Abb. 3.2: Erzeugnisdarstellung in Listen	36
Abb. 3.3: Struktur von einfachen und von variantenreichen Erzeugnissen	38
Abb. 3.4: Repräsentation von Coderegeln mit Hilfe von Mengen	46
Abb. 3.5: Neutrales Produktschema einer Fahrzeugserie	49
Abb. 3.6: Kurze und lange Coderegeln als nicht-disjunkte und disjunkte Mengen	51
Abb. 4.1: Unstetige Plan- und Ist-Reifegradentwicklung eines Teils i	59
Abb. 4.2: Stetige Plan- und Ist-Reifegradentwicklung eines Teils i	60
Abb. 4.3: Aufholen des Entwicklungsverzugs eines Teils i	63
Abb. 4.4: Kostensatzfunktion für den zusätzlichen Faktoreinsatz pro Zeiteinheit eines Teils i	65
Abb. 4.5: Zeitlicher Verlauf des Faktoreinsatzes pro Zeiteinheit und des Entwicklungsverzugs eines Teils i	66
Abb. 4.6: Eine zulässige Lösung des MEPVP	69
Abb. 4.7: Produktprogramm zur Beispielstückliste	73
Abb. 4.8: Logische Restriktionen zur Interpretation einer Auswahl von Teilen	78
Abb. 4.9: Zielhierarchie für das MEPVP	82
Abb. 4.10: Plananpassung für das MEPVP	84
Abb. 5.1: Übersicht über die entwickelten Modelle und die Gliederung des Kapitels	90
Abb. 7.1: Überblick über die verfolgten Lösungsansätze für das MEPVP	149
Abb. 7.2: Prinzip der Auslagerung von Stücklisteninformationen in die Produktebene	151

Abb. 7.3: Sekundärbedarfsbestimmung mit vorgelagerter Zusteuerung und Zulässigkeitsprüfung bei einer regelbasierten Komplexstückliste mit ausgelagerten Stücklisteninformationen	153
Abb. 7.4: Vorgehensweise zur Reduzierung von Coderegeln	158
Abb. 7.5: Darstellung der direkten zwingenden positiven Restriktionen zwischen Codes als Digraph	160
Abb. 7.6: GRASP-Algorithmus	164
Abb. 7.7: Tabu-Search-Algorithmus	167
Abb. 7.8: Aufteilung der Menge aller Codes bezüglich einer semi-offenen Variantenmenge d	176
Abb. 7.9: Aufteilung der Menge aller Teile bezüglich einer semi-offenen Variantenmenge d	178
Abb. 7.10: Überblick über den Ablauf von GRASP für das MEPVP	180
Abb. 7.11: Ablauf der zufälligen Auswahl von \bar{d} Produkttypen	182
Abb. 7.12: Ablauf des Semi-Greedy-Algorithmus für das MEPVP	185
Abb. 7.13: Ablauf der Methode Zusteuerung()	187
Abb. 7.14: Ablauf der lokalen Suche für das MEPVP	190
Abb. 7.15: Überblick über den Ablauf von Tabu-Search für das MEPVP	199
Abb. 7.16: Ablauf zur Erzeugung von Add-Zügen	200
Abb. 7.17: Ablauf der Methode <code>bestimmeHinzukommendeCodes()</code>	201
Abb. 7.18: Ablauf der Methode <code>repariereBaubarkeitsregel()</code>	202
Abb. 7.19: Ablauf zur Erzeugung von Drop-Zügen	203
Abb. 7.20: Ablauf der Methode <code>bestimmeZuEntfernendeCodes()</code>	204
Abb. 7.21: Ablauf der strategischen Oszillation	207
Abb. 7.22: Zusammenspiel von Exploration, Intensivierung und Diversifikation	209

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Verzeichnis der Merkmalsausprägungen und Codes für ein Automobil	30
Tab. 3.2: Verzeichnis der Merkmalsausprägungen und Codes für einen Motor	32
Tab. 3.3: Implizite Produktdefinition	32
Tab. 3.4: Explizite Produktdefinition	32
Tab. 3.5: Klasseninterne Restriktionen	33
Tab. 3.6: Sekundärbedarf für die einzelnen Motorvarianten	42
Tab. 3.7: Regelbasierte Komplexstückliste ohne Struktur	43
Tab. 3.8: Regelbasierte Komplexstückliste mit der Gruppierung von Alternativteilen in Positionen	50
Tab. 3.9: Regelbasierte Komplexstückliste mit vierstufiger Struktur	54
Tab. 4.1: Beispielstückliste	73
Tab. 4.2: Möglichkeiten zur Abbildung von Varianten durch Teilmengen d von Codes	74
Tab. 4.3: Möglichkeiten zur Abbildung der Fahrzeugvarianten durch Teilmengen von Codes im Beispiel	76
Tab. 4.4: Möglichkeiten zur Abbildung des MEPVP	85
Tab. 5.1: Übersicht über Modelltypen	88
Tab. 5.2: Beispielstückliste	95
Tab. 5.3: Verzeichnis der Merkmalsausprägungen und Codes zur Beispielstückliste	95
Tab. 5.4: Beispielstückliste	107
Tab. 5.5: Verzeichnis der Merkmalsausprägungen und Codes zur Beispielstückliste	108
Tab. 6.1: Charakterisierung des MEPVP, des MDKP und des MKP	127
Tab. 6.2: Stückliste zu der betrachteten MEPVP-Instanz	133
Tab. 6.3: Zusammenfassende Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile ausgewählter heuristischer Verfahren	146
Tab. 7.1: Codeliste zur Beispielstückliste	162
Tab. 7.2: Reduzierte Beispielstückliste	163
Tab. 7.3: Repräsentation der Variablen γ_{cd}	177
Tab. 7.4: Repräsentation der Variablen ξ_i	179
Tab. 7.5: Auswahl des besten Zugs nach Phasen	206
Tab. 8.1: Übersicht über die Strukturmerkmale der künstlichen Problemklassen	213

Tab. 8.2: Übersicht über die Strukturmerkmale der realen Problemklassen	214
Tab. 8.3: Parametereinstellungen von GRASP für die künstlichen Problemklassen	216
Tab. 8.4: Ergebnisse der empirischen Analyse von GRASP mit den künstlichen Problemklassen	217
Tab. 8.5: Parametereinstellungen von GRASP für die realen Problemklassen	218
Tab. 8.6: Ergebnisse der empirischen Analyse von GRASP mit den realen Problemklassen	219
Tab. 8.7: Parametereinstellungen von Tabu-Search für die künstlichen Problemklassen	221
Tab. 8.8: Ergebnisse der empirischen Analyse von Tabu-Search als Eröffnungsverfahren mit den künstlichen Problemklassen	222
Tab. 8.9: Ergebnisse der empirischen Analyse von Tabu-Search als Verbesserungsverfahren mit den künstlichen Problemklassen	224
Tab. 8.10: Parametereinstellungen von Tabu-Search für die realen Problemklassen	225
Tab. 8.11: Ergebnisse der empirischen Analyse von Tabu-Search als Eröffnungs- und als Verbesserungsverfahren mit den realen Problemklassen	226

Symbolverzeichnis

Mengen

\emptyset	leere Menge
A	eine beliebige Teilmenge der Menge C
BC	Menge aller Basiscodes c
BC_A	Menge der Basiscodes c der Teilmenge A der Menge C
BC_d	Menge aller Basiscodes c der Teilmenge bzw. des Produkttyps d
C	Menge aller Codes c
C_m	Menge aller Codes c der Merkmalsausprägungen des Merkmals m
C^{Mind}	Menge aller Codes c , die in jeder Teilmenge d als Mindestausstattung enthalten sein müssen ($C^{Mind} \subset C$)
C^n	eine beliebige Teilmenge der Menge C
C_d^{akt}	Menge aller Codes c (Basiscodes und Zusatzcodes) der aktuellen semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
$C_d^{akt,fix}$	Menge aller Codes c , die auf Grund einer Intensivierungsphase oder einer Diversifikationsphase in der aktuellen semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d fixiert sind
C_d^{unzul}	Menge aller unzulässigen Codes der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
$C_d^{unzul,temp}$	Menge aller temporär unzulässigen Codes der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
C_d^{zul}	Menge aller zulässigen Zusatzcodes der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
$C_t^{NBB_c}$	Menge aller Codes c des Konjunktionsterms t der negativen Baubarkeitsregel NBB_c des Codes c
$C_t^{PBB_c}$	Menge aller Codes c des Konjunktionsterms t der positiven Baubarkeitsregel PBB_c des Codes c
D	Menge aller Produkttypen d
\bar{D}	Menge aller zu erzeugenden Teilmengen d ($\bar{D} = 1, \dots, \bar{d}$)

EC_{cd}^{akt}	Menge aller Codes c (inklusive dem Primärkode), die zur Einhaltung der logischen Restriktionen aus der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d zusammen entfernt werden müssen
$EC_{cd}^{akt,rep}$	Teilmenge der Menge EC_{cd}^{akt}
HC_{cd}^{akt}	Menge aller Codes c (inklusive dem Primärkode), die zusammen in die semi-offene Variantenmenge des Produkttyps d zur Einhaltung der logischen Restriktionen aufgenommen werden müssen
$HC_{cd}^{akt,ges}$	Menge, die mehrere Mengen HC_{cd}^{akt} vereinigt
I	Menge aller Teile i in der Stückliste
I_d	Menge aller Basisteile i der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
I_p	Menge aller Teile i in der Position p
I_{cd}^{akt}	Menge aller Teile i , die zur Menge I_d^{akt} von Teilen hinzugefügt werden müssen, falls der Primärkode c und die durch ihn zugesteuerten Codes der Menge ZC_{cd} in der aktuellen Iteration in die semi-offene Variantenmenge des Produkttyps d aufgenommen werden
I_d^{akt}	Menge aller Teile i (Basisteile und Zusatzteile) der aktuellen semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d
J_{ip}	Menge aller Konjunktionsterme j der langen Coderegeln des Teils i in der Position p
J^{BB_c}	Menge aller Konjunktionsterme j der Baubarkeitsregeln des Codes c
J^{NBB_c}	Menge aller Konjunktionsterme t der negativen Baubarkeitsregeln des Codes c
J^{PBB_c}	Menge aller Konjunktionsterme t der positiven Baubarkeitsregeln des Codes c
J^{ZB_c}	Menge aller Konjunktionsterme j der Zusteuerungsregeln des Codes c
J_{ip}^{kurz}	Menge aller Konjunktionsterme j der kurzen Coderegeln des Teils i in der Position p
M^{BT}	Menge von Boole'schen Termen
IN	Menge der natürlichen Zahlen
NC_{ipj}	Menge aller Codes c der negativen Codemenge des Konjunktionsterms j der langen Coderegeln des Teils i in der Position p
NC_{ipj}^{kurz}	Menge aller Codes c der negativen Codemenge des Konjunktionsterms j der kurzen Coderegeln des Teils i in der Position p
NC_{ipj}^{red}	Menge aller Codes c der reduzierten negativen Codemenge des Konjunktionsterms j der Coderegeln des Teils i in der Position p
NC_j^{BB}	Menge aller Codes c der negativen Codemenge des Konjunktionsterms j der Baubarkeitsregeln des Codes c
NC_j^{ZB}	Menge aller Codes c der negativen Codemenge des Konjunktionsterms j der Zusteuerungsregeln des Codes c
P	Menge aller Positionen p in der Stückliste
$P(C)$	Potenzmenge der Menge C

$P(X)$	Menge der Nachbarschaften $N(x)$ aller Lösungen x
PC_{ipj}	Menge aller Codes c der positiven Codemenge des Konjunktionsterms j der langen Coderegel des Teils i in der Position p
PC_{ipj}^{kurz}	Menge aller Codes c der positiven Codemenge des Konjunktionsterms j der kurzen Coderegel des Teils i in der Position p
PC_{ipj}^{red}	Menge aller Codes c der reduzierten positiven Codemenge des Konjunktionsterms j der Coderegel des Teils i in der Position p
$PC_j^{BB_c}$	Menge aller Codes der positiven Codemenge des Konjunktionsterms j der Baubarkeitsregel des Codes c
$PC_j^{ZR_c}$	Menge aller Codes der positiven Codemenge des Konjunktionsterms j der Zusteuerungsregel des Codes c
IR	Menge der reellen Zahlen
R	Menge aller diskreten Reifegrade $R = \{r_0, \dots, r_n\}$
RC_{cd}^{akt}	Menge aller Codes c , die zur Reparatur der Baubarkeitsregel von Code c in die semi-offene Variantenmenge des Produkttyps d aufgenommen werden müssen
SZK_w^{ipj}	Menge aller Codes c der w -ten streng zusammenhängenden Komponente des Digraphen der direkten zwingenden positiven Restriktionen der Codes der positiven Codemenge PC_{ipj}
W	Menge aller streng zusammenhängenden Komponenten w des betrachteten Digraphen
Ω	Menge aller (Teil i , Position p)-Kombinationen in der Stückliste
X	Menge der Lösungen x eines beliebigen Problems
ZC_d	Menge aller Codes c , die durch die Menge BC_d der Basiscodes der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d zugesteuert werden, d. h., zusammen mit den Basiscodes immer in der semi-offenen Variantenmenge d enthalten sein müssen
ZPC_{ipj}	Menge aller Codes c der direkten zwingenden positiven Restriktionen der Codes der positiven Codemenge PC_{ipj}
ZC_{cd}^{akt}	Menge aller Codes c , die bei Aufnahme des Primärcores c in der aktuellen Iteration zur Einhaltung der logischen Restriktionen der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d zugesteuert bzw. ebenfalls hinzugefügt werden müssen
$ZC_{cd}^{akt,rep}$	Menge aller Codes c , die in der aktuellen Iteration bei Aufruf der Reparaturfunktion zurückgegeben werden
$ZC_{cd}^{akt,temp}$	Menge aller Codes c , die im aktuellen Zusteuersdurchlauf (temporär) bei Aufnahme des Primärcores c in der aktuellen Iteration der semi-offenen Variantenmenge des Produkttyps d zugesteuert werden

Variablen

a_i	eine beliebige Boole'sche Variable
-------	------------------------------------

α	eine beliebige Boole'sche Variable
β	eine beliebige Boole'sche Variable
c, c'	Boole'sche Variablen (Codes)
χ	eine beliebige Boole'sche Variable
δ_{ipj}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Konjunktionsterm j der Coderegeln des Teils i in der Position p in der Auswahl (Lösung) enthalten ist, 0 sonst
δ_{ipjd}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Konjunktionsterm j der Coderegeln des Teils i in der Position p in der Teilmenge d der Lösung enthalten ist, 0 sonst
ϵ_d	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls die Teilmenge bzw. der Produkttyp d ausgewählt wird, 0 sonst
γ_c	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Code c in der Auswahl (Lösung) enthalten ist, 0 sonst
γ_{cd}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Code c in der Teilmenge d der Lösung enthalten ist, 0 sonst
$\eta_{cdd'}$	(Hilfs-)Variable, die sicherstellt, dass sich die Teilmengen d und d' der Lösung im Code c unterscheiden
λ_{ip}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls die Coderegeln des Teils i in der Position p in der Auswahl (Lösung) enthalten ist, 0 sonst
λ_{ipd}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls die Coderegeln des Teils i in der Position p in der Teilmenge d der Lösung enthalten ist, 0 sonst
ξ_i	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls das Teil i ausgewählt wird, 0 sonst
x_{ij}	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Gegenstand j in den Rucksack i gepackt wird, 0 sonst
x_j	Binärvariable, die den Wert 1 annimmt, falls der Gegenstand j in den Rucksack gepackt wird, 0 sonst
x_l	eine beliebige Boole'sche Variable

Indices

c, c'	Codes
d, d'	Teilmengen einer Lösung des MEPVP
d	ein Produkttyp (beim MEPVP-Modell)
i	ein „Rucksack“ im Knapsack-Problem
i, i'	Teile (Baugruppen oder Einzelteile)
j	ein Gegenstand im Knapsack-Problem
j, j', j''	Konjunktionsterme einer Coderegeln

l	eine GRASP-Iteration
m	ein Merkmal
p	eine Position in der Stückliste
PF	ein Produktionsfaktor
q	eine logische Restriktion des MEPVP-Modells
t	ein Konjunktionsterm einer positiven oder negativen Baubarkeitsregel
w	eine streng zusammenhängende Komponente eines Graphen

Funktionen

BT	Boole'scher Term (bzw. Boole'sche Funktion)
BB_c	Baubarkeitsregel des Codes c
$c_{PF}(\Delta FE_{PF,i}(t))$	Kostensatzfunktion des zusätzlichen Faktoreinsatzes des Produktionsfaktors PF pro Zeiteinheit
D_1, D_2, \dots, D_e	paarweise verschiedene Disjunktionsterme
$\Delta FE_{PF,i}(t)$	zusätzlicher (notwendiger) Faktoreinsatz des Produktionsfaktors PF pro Zeiteinheit bezüglich der Entwicklung von Teil i zur Aufholung eines eingetretenen Entwicklungsverzugs über den Zeitverlauf t
$\Delta \Phi(mv_{cd})$	Zielfunktionswertdifferenz, die aus der Ausführung des Zugs mv_{cd} resultiert
$\Delta \Phi^{best}$	Zielfunktionswertdifferenz, die aus der Ausführung des besten Zugs mv_{cd}^{best} resultiert
$\Delta K(mv_{cd})$	Faktoreinsatzkostendifferenz, die aus der Ausführung des Zugs mv_{cd} resultiert
ΔK^{best}	Faktoreinsatzkostendifferenz, die aus der Ausführung des besten Zugs mv_{cd}^{best} resultiert
$\Delta P_i(t)$	zusätzliche (notwendige) Produktivität bezüglich der Entwicklung von Teil i zur Aufholung eines eingetretenen Entwicklungsverzugs über den Zeitverlauf t
$\Delta r_i(t)$	Funktion, die jedem Zeitpunkt t den Reifegrad-Entwicklungsverzug eines Teils i zuordnet
$e^{akt}(c, d)$	Greedy-Funktion, die die Aufnahme des Primärcodes c in die semi-offene Variantenmenge des Produkttyps d bewertet
$flipFreq(c, d)$	Anzahl, wie häufig eine Variable γ_{cd} bzw. eine Stelle $(\gamma_{cd})_i$ des Lösungsvektors seit dem Beginn von Tabu-Search von 0 auf 1 gesetzt wurde
$f(\cdot)$	eine beliebige Funktion
f_B	eine n -stellige Boole'sche Funktion
$f_Z(\cdot)$	eine beliebige Zielfunktion
$f_i^{Ist}(t)$	Funktion, die jedem Zeitpunkt t den Ist-Reifegrad r zuordnet
$f_i^{Plan}(t)$	Funktion, die jedem Zeitpunkt t den Plan-Reifegrad r zuordnet

F_N	Funktion, die aus einer beliebigen Teilmenge von Codes einen Konjunktionsterm aus negierten Codes bildet
F_p	Funktion, die aus einer beliebigen Teilmenge von Codes einen Konjunktionsterm aus Codes bildet
$FE_{PF,i}^{Plan}$	konstanter Plan-Faktoreinsatz des Produktionsfaktors PF pro Zeiteinheit bezüglich der Entwicklung von Teil i
$FE_{PF,i}^{Ist}(t)$	Ist-Faktoreinsatz des Produktionsfaktors PF pro Zeiteinheit bezüglich der Entwicklung von Teil i über den Zeitverlauf t
$\Phi(\cdot)$	Zielfunktion des MEPVP
$g(\cdot)$	eine beliebige Funktion
$g_i^{Ist}(t)$	Funktion, die die zur Beseitigung des eingetretenen Entwicklungsverzugs des Teils i notwendige Reifegradentwicklung beschreibt
$k_i(t)$	Funktion, die jedem Zeitpunkt t die zusätzlichen Faktoreinsatzkosten für Teil i zuordnet
K_1, K_2, \dots, K_e	paarweise verschiedene Konjunktionsterme
K_{ges}	zusätzliche Faktoreinsatzkosten einer Lösung
$K(\cdot)$	Faktoreinsatzkostenfunktion
KT_{ipj}	j -ter Boole'scher Konjunktionsterm der langen Coderegeln des Teils i in der Position p
KT_{ipj}^{kurz}	j -ter Boole'scher Konjunktionsterm der kurzen Coderegeln des Teils i in der Position p
KT_{ipj}^{red}	j -ter Boole'scher Konjunktionsterm der reduzierten langen Coderegeln des Teils i in der Position p
LCR_{ip}	Funktion zur Berechnung der langen Coderegeln des Teils i in der Position p
$N(\cdot)$	Nachbarschaftsfunktion
NBB_c	negative Baubarkeitsregel des Codes c
$p_{PF,i}^{Plan}$	konstante spezifische Plan-Produktivität des Produktionsfaktors PF bezüglich der Entwicklung von Teil i
$p_{PF,i}^{Ist}(t)$	spezifische Ist-Produktivität des Produktionsfaktors PF bezüglich der Entwicklung von Teil i über den Zeitverlauf t
PBB_c	positive Baubarkeitsregel des Codes c
p_i^{Plan}	konstante Plan-Produktivität bezüglich der Entwicklung von Teil i
$p_i^{Ist}(t)$	Ist-Produktivität bezüglich der Entwicklung von Teil i über den Zeitverlauf t
r	kontinuierlicher Reifegrad, $r \in [r_0, r_n]$
$resFreq(c,d)$	Aufenthaltshäufigkeit eines Codes c in der semi-offenen Variantenmenge d in Bezug auf alle besuchten Lösungen
$resFreqBest(c,d)$	Aufenthaltshäufigkeit eines Codes c in der semi-offenen Variantenmenge d in Bezug auf alle besuchten „guten“ Lösungen

$O(\cdot)$	Landausches Symbol „groß O“
$T(n)$	Rechenaufwand als Funktion der Eingabelänge n einer Problem Instanz
ZB_c	Zusteuierungsregel des Codes c

Parameter

a_d	geplante Produktionsmenge der durch die Teilmenge d beschriebenen Variante
α	Parameter, der bei der GRASP-Heuristik die Länge der RCL festlegt
α	von der Problem Instanz abhängiger Parameter für die Berechnung der dynamischen Tabudauer bei Tabu-Search
$A(c)$	Anzahl der Konjunktionsterme der Baubarkeits- und der Zusteuierungsregeln, die den Code c enthalten
β	(Steuerungs-)Parameter für die dynamische Tabudauer bei Tabu-Search
β	Parameter, der bei der GRASP-Heuristik die Länge der RCL festlegt
c_i	Kapazität der i -ten Dimension (bzw. des Rucksacks i) im Knapsack-Problem
d	Anzahl der Dimensionen i im Knapsack-Problem
\bar{d}	vorgegebene mengenmäßige Verfügbarkeit (Anzahl an zu erzeugenden Teilmengen)
k_i	zusätzliche Faktoreinsatzkosten für Teil i
\bar{K}	verfügbares Budget an zusätzlichem Faktoreinsatz
m	Anzahl der Rucksäcke i im Knapsack-Problem
m_{ip}	Mengenbedarf in Mengeneinheiten des Teils i in der Position p
M	Anzahl der Merkmale m ($m = 1, \dots, M$)
n	Anzahl der Gegenstände j im Knapsack-Problem
n	Anzahl der diskreten Reifegrade
p_j	Nutzen von Gegenstand j im Knapsack-Problem
r_0	diskreter Reifegrad zum Zeitpunkt des Entwicklungsstarts
r_n	diskreter Reifegrad zum Zeitpunkt des Entwicklungsendes (Serienreife)
s	Anzahl der logischen Restriktionen des MEPVP-Modells
t	ein Zeitpunkt bzw. eine Periode
t_0	ein beliebiger Zeitpunkt vor dem Serienstart T_s
τ	ein beliebiger Zeitpunkt bzw. eine beliebige Periode, $\tau < t + T$
τ_i	Zeitpunkt, zu dem der Entwicklungsverzug des Teils i beseitigt ist
T	Planreichweite, Länge des Planungshorizonts
$T_{E,i}$	Zeitpunkt des Entwicklungsstarts eines Teils i

T_s	Zeitpunkt des Serienstarts der anlaufenden Produktserie
$T_{v,i}$	Zeitpunkt, zu dem ein Teil i verfügbar ist, wenn kein zusätzlicher Faktoreinsatz bezüglich der Entwicklung von Teil i erbracht wird
\bar{R}_i	Beschaffungskapazität in Mengeneinheiten für das Teil i
v_c	Nachfrageprognosewert des Codes c
v_{cd}	Nachfrageprognosewert des Codes c für den Produkttyp d
\bar{V}	geforderte Mindestmarktabdeckung der Auswahl
\bar{V}_d	geforderte Mindestmarktabdeckung für jede Teilmenge d
w_{ij}	Kosten von Gegenstand j bezüglich der i -ten Dimension im Knapsack-Problem
w_j	Kosten von Gegenstand j im Knapsack-Problem

Sonstige Größen

\rightarrow	Implikationsverknüpfung (wenn A dann B)
\leftrightarrow	Äquivalenzverknüpfung (wenn A dann B und umgekehrt)
\emptyset	Durchschnitt
$a_{cdq}, a_{ipdq}, a_{ipjdq}$	ganzzahlige Koeffizienten der logischen Restriktionen des verallgemeinerten MEPVP-Modells
a_{iq}, a_{dq}, b_q	ganzzahlige Koeffizienten der logischen Restriktionen des verallgemeinerten MEPVP-Modells
A	ein beliebiges Entscheidungsproblem
B	ein beliebiges Entscheidungsproblem
c	eine Konstante, $c > 0$
e	Aufnahmewert für die RCL
e^{\max}	Obergrenze für den Aufnahmewert e
e^{\min}	Untergrenze für den Aufnahmewert e
H	Gedächtnisstruktur
I_{KP}	eine Probleminstanz des Knapsack-Problems
I_{MEPVP}	eine Probleminstanz des MEPVP
m	eine Zahl, die kleiner gleich der Anzahl der Elemente der Menge C ist
mv_{cd}	Zug, der von der aktuellen zu einer Lösung in der Nachbarschaft führt
mv_{cd}^{best}	Zug, der von der aktuellen zur besten Lösung in der Nachbarschaft führt
n	Eingabelänge einer Probleminstanz
n^k	ein Polynom vom Grad k

NP	Klasse aller Probleme, die mit einem nicht-deterministischen polynomialen Algorithmus gelöst werden können
$p(n)$	ein beliebiges Polynom
P	Klasse aller Probleme, die mit einem deterministischen polynomialen Algorithmus gelöst werden können
S^{akt}	aktuelle Lösung, die für alle Produkttypen d aus den Mengen C_d^{akt} von Codes und den Mengen I_d^{akt} von Teilen besteht
S^l	bisher beste Lösung der GRASP-Iteration l
S^{next}	Lösung des MEPVP, zu welcher durch die Ausführung des besten Zugs aus der Nachbarschaft als nächstes übergegangen wird
S^*	bisher beste gefundene Lösung
$TD(mv_{cd})$	Tabudauer eines Zugs mv_{cd}
TL	Tabuliste
x	eine Probleminstanz
x	eine beliebige Lösung eines bestimmten Problems
y	eine beliebige Lösung eines bestimmten Problems
$\vec{\gamma}_{cd}, \vec{\gamma}'_{cd}, \vec{\gamma}''_{cd}$	Vektoren, die eine Lösung des MEPVP darstellen
$\vec{\gamma}_{cd}^{next}$	Vektor, der eine Lösung des MEPVP darstellt, zu welcher durch die Ausführung des besten Zugs aus der Nachbarschaft als nächstes übergegangen wird

Abkürzungsverzeichnis

CL	candidate list
const.	constant
CP	constraint programming
DIN	Deutsche Industrie-Norm(en)
Diss.	Dissertation
DNF	disjunktive Normalform
DPSP	daily photograph scheduling problem
GA	genetische Algorithmen
geg.	gegeben
GH	Greedy-Heuristiken
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
HC	Hill-Climbing
I	Probleminstanz
Kap.	Kapitel
KCR	kurze Coderegeln
KNF	konjunktive Normalform
KP	eindimensionales, lineares Knapsack-Problem
KT	Konjunktionsterm
LCR	lange Coderegeln
LP	lineare Programmierung
LS	lokale Suche
max.	maximale
MDKP	multi-dimensionales Knapsack-Problem
MEPVP	mehrstufiges, einperiodiges Produktprogrammverfügbarkeits-Planungsproblem
min.	minimale

MKP	multipl. Knapsack-Problem
o. O.	ohne Ortsangabe
o. S.	ohne Seitenangabe
OR	Operations Research
PCKP	precedence-constrained knapsack problem
PIK	Probleminstanzklasse
RCL	restricted candidate list
RLCR	reduzierte lange Coderegeln
RV	relaxationsbasierte Verfahren
SA	Simulated Annealing
SAT-Problem	Satisfiability-Problem, Erfüllbarkeitsproblem
SG	Semi-Greedy
SO	strategische Oszillation
SOP	start of production
Sp.	Spalte
Tab.	Tabelle
TL	Tabuliste
TS	Tabu-Search
u. B. d. R.	unter Beachtung der Restriktionen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZF	Zielfunktion
Zyl.	Zylinder