

Eine Methode zur Reihenfolgeplanung bei Mehrprodukt-Fertigungssystemen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

an der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Steininger

aus Worms/Rhein

Tag der mündlichen Prüfung:	03.11.2006
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gert Zülch
Korreferent:	Prof. Dr. Wolffried Stucky

ifab

Forschungsberichte
aus dem Institut für
Arbeitswissenschaft und
Betriebsorganisation der
Universität Karlsruhe

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Gert Zülch

Band 38 - 2007

Peter Steininger

**Eine Methode zur
Reihenfolgeplanung bei
Mehrprodukt-Fertigungssystemen**

Shaker Verlag

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.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6079-8

ISSN 1436-3224

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Planung der Auftragsreihenfolge bei Mehrproduktfertigungssystemen ist für die betriebliche Praxis ein äußerst relevantes Thema. Dabei werden einerseits die in einer definierten Planungsperiode einzulastenden Fertigungsaufträge als bekannt vorausgesetzt, andererseits die Bearbeitungsfolge eines jeden Auftrags als technologisch definiert betrachtet. Des Weiteren wird auch die Fertigungsstruktur in technischer und kapazitätsbezogener Hinsicht als gegeben angesehen, üblicherweise wird jedoch keine Unterscheidung zwischen maschinellen und personellen Ressourcen vorgenommen. Wohl aber werden verschiedene Ablaufprinzipien betrachtet, wobei in der Literatur vorrangig zwischen einer Anordnung der maschinellen Ressourcen nach dem Verrichtungsprinzip (Job Shop) und nach dem Flussprinzip (Flow Shop) unterschieden wird.

Das Operations Research befasst sich bereits seit den 1950er-Jahren mit dieser Problemstellung. Es wurden zwar Lösungsverfahren entwickelt, die im Prinzip derartige Probleme im Sinne einer mathematischen Optimierung lösen können, jedoch ist der Rechenaufwand hierfür so hoch, dass diese Verfahren für praktische Anwendungen nicht eingesetzt werden können. Daher wurden andere Verfahren entwickelt, die in annehmbarer Rechenzeit zumindest eine gute Lösung für eine vorgegebene Problemklasse liefern. Die Bandbreite reicht dabei von Verfahren auf der Basis von Prioritätsregeln über diverse heuristische Suchverfahren bis hin zu den in jüngerer Zeit entwickelten Genetischen Algorithmen, die Vorgänge der Evolution zum Lösungsfinden imitieren.

Während beim Flussprinzip die einzelnen Aufträge aus einer Sequenz von Arbeitsvorgängen bestehen, sind diese beim Verrichtungsprinzip netzwerkartig miteinander verknüpft. Organisatorisch betrachtet liegt dann ein Mehrprojekt-Planungsproblem vor, bei dem eine möglichst gute zeitliche Zuordnung der Arbeitsvorgänge zu den begrenzten Ressourcen gesucht wird. Hierbei können dann auch noch verschiedene Zielsetzungen verfolgt werden, die von der Maximie-

rung der Ressourcenauslastung bis hin zur Minimierung der Durchlaufzeit des gesamten einzuplanenden Auftragsprogramms reicht. Hieraus ergibt sich dann eine weitere Aufgabe daraus, nicht nur ein geeignetes Lösungsverfahren anzuwenden, sondern auch den erforderlichen Datentransfer, die notwendigen zusätzlichen Angaben durch den Benutzer des Verfahrens sowie die Ausgabe und Bewertung der Ergebnisse im Sinne der Gebrauchstauglichkeit der Software möglichst benutzungsgerecht zu gestalten.

Die hier vorgelegte Arbeit setzt sich zum Ziel, hierfür eine geeignete Methode zu entwickeln und in einer Software bereit zu stellen. Der Anwendungsbereich wird dabei auf die Lösung von Auftragsreihenfolgeproblemen bei einer Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip eingegrenzt. Des Weiteren sind die Aufträge durch jeweils unterschiedliche Netzwerke charakterisiert, bei denen eine parallele Bearbeitung einzelner Arbeitsvorgänge eines Auftrages möglich ist. Dadurch wird auf eine Fertigung von Einzelerzeugnissen nach dem Verrichtungsprinzip fokussiert und damit auf eine Problemklasse, die als schwer lösbar einzustufen ist.

Zur Bewältigung des Datentransfers werden die Auftragsdaten aus einer vorhandenen Software über eine Datenschnittstelle in das Lösungsverfahren übernommen. Hierfür wird vorausgesetzt, dass diese Aufträge mit der zeitlich-logischen Folge ihrer Arbeitsvorgänge in einem Projektplanungsverfahren, hier speziell *Microsoft Project 2003*, modelliert sind. Die Ermittlung einer guten Auftragsreihenfolge erfolgt dann in dem hier neu entwickelten Verfahren *REIMOS*. Das Ergebnis der Reihenfolgeplanung wird anschließend an das Projektplanungsverfahren zurückgegeben, mit dessen Funktionalitäten dann die Lösung bewertet werden kann. Die Güte des neu entwickelten Reihenfolgeplanungsverfahrens wird abschließend anhand von Benchmarks überprüft, die öffentlich verfügbar sind, sich dort aber auf idealtypische Reihenfolgeprobleme beziehen. Diese Validierung des Verfahrens zeigt auf, dass das neue Verfahren einen wertvollen Beitrag für die betriebliche Praxis liefert.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Gert Zülch

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Defizite bei der Reihenfolgeplanung von Mehrprodukt-Fertigungssystemen	7
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	7
1.2 Zielsetzung der Arbeit	9
1.2.1 Modellierung des Fertigungsprogramms	9
1.2.2 Verfahren zur algorithmischen Lösung	11
1.2.3 Ziele der Arbeit	12
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	13
2. Stand der Technik der Reihenfolgeplanung	16
2.1 Aufgaben der Reihenfolgeplanung	16
2.1.1 Einordnung der Reihenfolgeplanung in die Betriebsorganisation	16
2.1.1.1 Gestaltungsalternativen der Produktionsorganisation	17
2.1.1.2 Ablaufplanung	18
2.1.1.3 Ablaufprinzipien	19
2.1.2 Einordnung der Reihenfolgeplanung in die Produktionsplanung und -steuerung	22
2.1.3 Begriffsbestimmung	24
2.1.3.1 Reihenfolgeplanung in der Fertigung	24
2.1.3.2 Algorithmische Reihenfolgeplanung	25
2.2 Formale Beschreibung des Reihenfolgeproblems	26
2.2.1 Begriffe und Definitionen	26
2.2.2 Zeitbegriff der Reihenfolgeplanung	30
2.2.3 Definition der Eingabe- und Ausgabezeitarten	31
2.2.3.1 Zeiten der Eingabedaten	31
2.2.3.2 Zeiten der Ergebnisdaten	33
2.2.4 Zielfunktionen der Reihenfolgeplanung	37
2.2.5 Graphische Darstellung von Reihenfolgen	39
2.3 Klassifikation der Reihenfolgeprobleme	40

2.3.1	Hauptkriterien der Klassifikation	41
2.3.2	Maschinencharakteristika	41
2.3.3	Auftragscharakteristika	45
2.3.4	Zielsetzungen	50
2.4	Entwicklung der Reihenfolgeplanung	52
2.4.1	Historie der Reihenfolgeplanung	52
2.4.2	Ablaufplanungsverfahren	54
2.4.3	Abhängigkeit der Reihenfolgeprobleme	56
2.5	Darstellung des Reihenfolgeproblems als Graphenproblem	57
2.5.1	Graphentheoretische Überlegungen	57
2.5.2	Beispiel eines Job-Shop-Problems in Graphendarstellung	60
2.5.2.1	Aufgabenstellung	60
2.5.2.2	Darstellung des Graphen	61
2.5.2.3	Darstellung von Auftragsfreigabeterminen	62
2.5.2.4	Umformung des Graphen zu einem Digraphen	63
2.5.2.5	Überführung des Digraphen in einen Hamilton-Digraphen	64
2.5.2.6	Bewertung des Hamilton-Digraphen	66
2.6	Auswahl des zu lösenden Problems	68
3.	Berechenbarkeit und Komplexität von Algorithmen	70
3.1	Komplexität von Algorithmen	70
3.2	Effizienzmaße bei einer Turingmaschine	72
3.2.1	Funktionsweise der Turingmaschine	72
3.2.2	Entscheidungsprobleme	75
3.3	Komplexitätsklassen von Entscheidungsproblemen	77
3.4	Problemklassen der Reihenfolgeplanung	79
3.5	Beispiele für das Laufzeitverhalten von Algorithmen	81
4.	Algorithmen zur Lösung von $\mathcal{NP}$ -schweren Problemen	84
4.1	Heuristische Problemlösung	84
4.2	Branch-and-Bound-Algorithmen	85
4.3	Suchtechniken	87

4.3.1	Lokale Suchtechniken	87
4.3.2	Nachbarschaftsstruktur	88
4.3.3	Simulated Annealing	89
4.4	Lösungsalgorithmen für Job-Shop-Probleme	90
4.4.1	Vereinfachungsverfahren	90
4.4.1.1	Zurückführung des Job-Shop-Problems auf Ein-Maschinen-Probleme	90
4.4.1.2	Shifting-Bottleneck-Verfahren	91
4.4.2	Heuristische Verfahren	91
4.4.2.1	Prioritätsregelverfahren	91
4.4.2.2	Verfahren von Giffler-Thompson	92
4.4.3	Verfahren zur Reihenfolgeplanung	93
4.4.3.1	Reduktion der Komplexität für Reihen- folgealgorithmen	93
4.4.3.2	Das Softwaresystem <i>ISSOP</i>	94
4.4.3.3	Das Verfahren <i>Plant PowerOps</i>	95
4.4.3.4	Computer-Algebra-Verfahren	95
4.4.4	Weitere Algorithmen	96
4.5	Evolutionsansätze	97
4.5.1	Idee der Evolutionsansätze	97
4.5.2	Grundlegende Aspekte der Genetik	99
4.5.3	Beschreibung der grundsätzlichen Vorgehens- weise Genetischer Algorithmen	102
4.5.4	Formale Darstellung des Evolutionsprogramms	102
4.6	Evolutionsstrategien	104
4.6.1	Standardmodell	104
4.6.2	Vereinfachung des Standardmodells	107
4.7	Genetische Algorithmen	108
4.7.1	Prinzip	108
4.7.2	Lösungen	111
4.7.3	Verfahrensablauf	112
4.7.4	Operatoren für Genetische Algorithmen	115
4.7.4.1	Fitness	115
4.7.4.2	Selektion	116
4.7.4.3	Crossover-Verfahren	117
4.7.4.4	Mutation	119

4.7.4.5	Reproduktion	121
4.7.5	Einsatzmöglichkeiten von Genetischen Algorithmen	121
4.7.6	Vergleich zwischen Evolutionsstrategien und Genetischen Algorithmen	123
4.7.7	Vor- und Nachteile von Genetischen Algorithmen	125
5.	Entwicklung eines Verfahrens zur Reihenfolgeplanung	129
5.1	Lösung von Job-Shop-Problemen	129
5.2	Darstellung von Auftragsreihenfolgen für Job-Shop-Probleme mittels Chromosomen	130
5.2.1	Direkte Repräsentationstechniken	132
5.2.1.1	Completion-Time-basierte Repräsentation	132
5.2.1.2	Job-basierte Repräsentation	132
5.2.1.3	Job-Pair-Relation-basierte Repräsentation	133
5.2.1.4	Operation-basierte Repräsentation	133
5.2.1.5	Random-Key-basierte Repräsentation	134
5.2.2	Indirekte Repräsentationstechniken	135
5.2.2.1	Disjunctive-Graph-basierte Repräsentation	135
5.2.2.2	Machine-basierte Repräsentation	136
5.2.2.3	Preference-List-basierte Repräsentation	136
5.2.2.4	Priority-Rule-basierte Repräsentation	137
5.2.3	Auswahl der Chromosomenrepräsentation	137
5.3	Operatoren für Job-Shop-Probleme in Genetischen Algorithmen	138
5.3.1	Fitness-Funktion	138
5.3.2	Selektion	138
5.3.2.1	Rouletterad-Selektion	138
5.3.2.2	Ranking-and-Scaling	140
5.3.2.3	$(\mu+\lambda)$ -Selektion	141
5.3.2.4	Tournament-Selektion	141
5.3.3	Crossover	142

5.3.4	Mutation	148
5.3.5	Reproduktion	149
6.	Realisierung eines graphisch-interaktiven Verfahrens zur Reihenfolgeplanung	150
6.1	Entwicklung des graphisch-interaktiven Planungsverfahrens <i>REIMOS</i>	150
6.1.1	Aufbau und Module des Verfahrens	150
6.1.2	Anforderungen an die Benutzungsoberfläche	152
6.2	Abbildung der aufgabenspezifischen Daten	154
6.2.1	Anlegen des Planungsprojektes	154
6.2.2	Eingabe der Planungsparameter	155
6.3	Implementierung	161
6.3.1	Technische Umsetzung	161
6.3.1.1	Rechnerkonfiguration und Software	162
6.3.1.2	Integration in <i>Microsoft Office</i>	163
6.3.1.3	Erstellung der Wizard-Komponente	167
6.3.1.4	Chromosomen-Repräsentation in <i>REIMOS</i>	168
6.3.2	Darstellung der Planungsergebnisse	168
7.	Verifikation und Validierung des entwickelten Verfahrens	169
7.1	Verifikation des entwickelten Verfahrens in einer Einzelfertigung	169
7.1.1	Beschreibung der Ausgangssituation	169
7.1.2	Beschreibung des Planungsergebnisses	170
7.2	Validierung des entwickelten Verfahrens	170
7.2.1	Benchmarkinstanzen der Reihenfolgeplanung	171
7.2.2	Parameter und Bewertungskriterien	171
7.2.3	Ergebnis der Validierungsstudie	172
7.3	Diskussion des mit <i>REIMOS</i> ermittelten Planungsergebnisses	176
8.	Zusammenfassung und Ausblick	177
8.1	Zusammenfassung	177
8.2	Ausblick und weiterführende Aspekte	178

9. Literaturverzeichnis	180
9.1 Quellen	180
9.2 Software	198
10. Anhang	199
10.1 Speicherung von Graphen	199
10.2 Pseudocodedarstellung des Genetischen Algorithmus nach Goldberg	201
10.2.1 Definitionen des Genetischen Algorithmus	201
10.2.2 Hauptprogramm des Genetischen Algorithmus	201
10.2.3 Unterprogramme des Genetischen Algorithmus	202
10.2.3.1 Initialisierung der Population	202
10.2.3.2 Decodierungsfunktion	202
10.2.3.3 Populationsstatistische Funktionen	202
10.2.3.4 Erzeugung einer neuen Generation	203
10.2.3.5 Genetische Operatoren	203
10.2.3.5.1 Selektion	203
10.2.3.5.2 Mutation	204
10.2.3.5.3 Crossover	204
10.3 Pseudocodedarstellung des Partially-Matched-Crossover nach Goldberg	205
10.4 Objektmodell von <i>Microsoft Project 2003</i>	207
10.5 Benutzungsoberfläche des <i>REIMOS</i> -Wizard	208
10.6 Benchmark-Instanzen für Job-Shop-Probleme nach Taillard	216
10.6.1 Benchmark-Instanz JSP-15-15 von Taillard	216
10.6.2 Benchmark-Instanz JSP-20-15 von Taillard	219
10.6.3 Benchmark-Instanz JSP-50-20 von Taillard	221
10.6.4 Ergebnisübersicht für die Benchmark-Instanzen nach Taillard	224
10.7 Modelldatei einer Reihenfolgeplanung mittels <i>REIMOS</i>	227
11. Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	229
11.1 Formelzeichen	229
11.2 Abkürzungen	241