

Entwicklung einer reaktiven Fertigungssteuerung auf der Basis der Ant-Colony-Optimierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
(vormals Universität Karlsruhe)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Patricia Isabel Stock

aus Solingen

Tag der mündlichen Prüfung:	07.02.2012
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gert Zülch
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter

ifab

Forschungsberichte
aus dem Institut für
Arbeitswissenschaft und
Betriebsorganisation der
Universität Karlsruhe

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

Band 41 - 2012

Patricia Stock

**Entwicklung einer reaktiven
Fertigungssteuerung auf der Basis
der Ant-Colony-Optimierung**

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, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1027-5

ISSN 0940-0559

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 Fertigungssteuerung stellt eines der zentralen Probleme der Betriebsorganisation dar. Trotz aller Fortschritte im Bereich des Operations Research und der Rechentechnik gelingt es lediglich, kleinere Probleminstanzen optimal zu lösen, wobei dann aber auch immer nur eine Zielfunktion betrachtet werden kann. Sobald die Steuerungsprobleme praxisnahe Dimensionen erreichen, ist man daher gezwungen, auf heuristische Lösungsverfahren zurückzugreifen, die zwar in der Regel eine gute Lösung versprechen, aber keineswegs Optimalität gewährleisten können.

Zur Lösung derartiger Steuerungsprobleme werden in der Praxis vorrangig Methoden verwendet, die auf Prioritätsregeln basieren und die entweder für einzelne Arbeitsvorgänge auf der Grundlage lokaler Informationen gelten oder aber global für den gesamten Fertigungsauftrag. Derartige Prioritätsregeln gewährleisten aber nicht verlässlich genug das Erreichen der gesetzten Ziele und führen darüber hinaus für einzelne Aufträge auch zu negativen Effekten. Daher hat es nicht an Versuchen gefehlt, diese traditionellen Methoden der Fertigungssteuerung durch neuere Ansätze zu ersetzen.

In diese Kategorie ist die vorliegende Forschungsarbeit einzuordnen. Die Autorin stellt sich darin die Frage, ob auf der Basis einer naturanalogen Methode eine Fertigungssteuerung entwickelt werden kann, die bessere Ergebnisse bezüglich der Zielerreichung ermöglicht, als dies mit traditionellen Methoden auf der Basis von Prioritätsregeln möglich ist. Hierbei kann allerdings bereits vermutet werden, dass eine bestimmte naturanaloge Lösungsmethode auch nur für bestimmte Arten von Fertigungssystemen und darin zu fertigende Auftragsprogramme gute Steuerungslösungen liefert. Weiterhin ist zu erwarten, dass für eine solche naturanaloge Methode auch noch geeignete Einstellparameter gefunden werden müssen, da diese die Qualität des Steuerungsergebnisses maßgeblich beeinflussen werden.

Für ihre Untersuchungen wählt die Autorin die Ant-Colony-Optimierung aus, eine in der Literatur vielfach diskutierte Methode der Schwarm-Intelligenz. Diese Methode wird jedoch bislang nur für deterministische Planungsprobleme eingesetzt, bei denen sich die Systemelemente nicht verändern. Dies ist in der Praxis aber vielfach nicht gegeben, da z.B. die Fertigungsressourcen Störungen unterliegen können. Steuerungsmethoden, die auf dem Prinzip der Selbstorganisation beruhen und mit denen auf stochastische Veränderungen im Fertigungssystem reagiert werden kann, versprechen diesbezüglich bessere Ergebnisse. Eine solche Selbstorganisation liegt in der Natur bei der Futtersuche bestimmter Ameisenarten vor. Ihr Verhalten bildet die Grundlage für heuristische Optimierungsmethoden, die seit etwa zwanzig Jahren erforscht werden, bislang jedoch nicht für die reaktive Fertigungssteuerung.

Auf diesem Ansatz basierend wird in dieser Forschungsarbeit ein geeignetes heuristisches Steuerungsverfahren entwickelt. Anwendungsbereich hierfür sind Teilefertigungen nach dem Verrichtungsprinzip mit alternativen Fertigungsressourcen und Bearbeitungsfolgen. Entsprechend den mehrkriteriellen Zielsetzungen in der Praxis wird dabei die Erreichung sowohl produktionslogistischer als auch kostenbezogener Ziele als Bewertungskriterium herangezogen. Die entsprechende Zielerreichung wird mithilfe eines Simulationsverfahrens ermittelt.

Dass sich der Ansatz der Ant-Colony-Optimierung als wenig erfolgreich, aber als sehr risikoreich erweist und die wichtigsten Arbeitshypothesen nicht bestätigt werden können, ist eine fundierte wissenschaftliche Erkenntnis dieser Forschungsarbeit. Unvermutete negative Ergebnisse sind keineswegs als Mangel zu werten. Für die Qualität der vorliegenden Forschungsarbeit zeugt vielmehr die Gründlichkeit der Formalisierung, der wohl durchdachte Versuchsplan und die kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der Untersuchung.

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

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	1
1. Steuerung moderner Fertigungssysteme	7
1.1 Anforderungen an die Fertigungssteuerung	7
1.2 Selbstorganisierende Fertigungssteuerung als Erfolgsfaktor	9
1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	10
1.4 Aufbau und Vorgehensweise	13
2. Stand der Technik	17
2.1 Fertigungssteuerung	18
2.1.1 Ziele der Fertigungssteuerung	18
2.1.2 Systematisierung der Fertigungssteuerung	18
2.1.3 Ausgewählte Verfahren zur Fertigungssteuerung	22
2.1.3.1 Steuerung nach Prioritätsregeln	22
2.1.3.2 Strategien der Losgrößenbildung	26
2.1.4 Selbstorganisation in der Fertigungssteuerung	29
2.2 Schwarmintelligenz und Ant-Colony-Optimierung	32
2.2.1 Selbstorganisation	32
2.2.2 Schwarmintelligenz	34
2.2.2.1 Biologische Schwärme	34
2.2.2.2 Autonome Robotersysteme als erste technische Umsetzung des Schwarmverhaltens	37
2.2.2.3 Schwarmintelligenz als Technik der künstlichen Intelligenz	38
2.2.3 Ant-Colony-Optimierung	38
2.2.3.1 Verhalten von Ameisen	38

2.2.3.2	Künstliche Ameisen	43
2.2.3.3	ACO-Metaheuristik	44
2.2.3.4	ACO-Algorithmen	47
2.2.3.4.1	Problemklassen	47
2.2.3.4.2	Formalisierung der Problemklassen	49
2.2.3.4.3	Das Ant-System	52
2.2.3.4.4	Erweiterungen des Ant- Systems	60
2.2.3.4.5	Ant-Q und das Ant-Colony- System	61
2.2.3.4.6	Weitere Ameisen- algorithmen	65
2.2.3.5	Multi-Colony-Ant-Algorithmen	65
2.2.3.6	Multikriterielle Ant-Algorithmen	67
2.2.4	Anwendungsgebiete der ACO-Algorithmen	68
2.3	ACO-Algorithmen in der Fertigungssteuerung	70
2.3.1	Anwendungsgebiete	70
2.3.2	Ant Colony Control	75
2.3.3	ACO-basierte Fertigungssteuerung mit <i>PROSA</i>	77
2.3.4	Pheromonbasierte Fertigungssteuerung für die flexible Fließfertigung	81
2.3.5	Geführte Fertigungssteuerung für die flexible Fließfertigung	82
2.3.6	Pheromonbasierte Steuerung für produktions- logistische Prozesse	85
2.4	Fazit zum Stand der Technik	88
3.	Modellierungskonzept für Fertigungssysteme	91
3.1	Kennzahlenarten im Fertigungssystem	91
3.2	Systemelemente des Fertigungssystems	93
3.3	Entscheidungen im Fertigungssystem	97
3.4	Kennzahlen für Aufträge und Ressourcen	100
3.4.1	Durchlaufzeit	101
3.4.2	Termtreue und -abweichung	105
3.4.3	Auslastung der Belegungsressourcen	108

3.4.4	Fertigungskosten	113
3.4.5	Kapitalbindungskosten	117
3.5	Prognosegrößen für Aufträge und Ressourcen	120
3.5.1	Prognostizierte Durchlaufzeit eines Auftrags für einen Teilgraphen	124
3.5.2	Prognostizierte Terminabweichung und Termintreue eines Auftrags	126
3.5.3	Prognostizierte Auslastung einer Ressource	128
3.5.4	Prognostizierte Fertigungskosten eines Auftrags für einen Teilgraph	130
3.5.5	Prognostizierte Kapitalbindungskosten eines Auftrags für einen Teilgraph	131
3.6	Prospektive Bewertung von Handlungsalternativen	132
3.6.1	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Durchlaufzeit einer Handlungsalternative	132
3.6.2	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Termintreue einer Handlungsalternative	133
3.6.3	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Terminabweichung einer Handlungsalternative	134
3.6.4	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Auslastung einer Handlungsalternative	135
3.6.5	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Fertigungskosten bei einer Handlungsalternative	137
3.6.6	Lokaler Präferenzwert der prognostizierten Kapitalbindungskosten bei einer Handlungsalternative	138
4.	Generisches Modell eines Steuerungsverfahrens auf der Basis eines Multi-Colony-Ant-Systems	140
4.1	Modellierung des Fertigungssystems mittels eines Multi-Colony-Ant-Systems	141
4.2	Formale Beschreibung der Steuerungsstrategie <i>ACS-CTRL</i>	146
4.3	Das Steuerungsverfahren <i>AntControl</i>	153
4.3.1	Zielsysteme der Aufträge	153
4.3.2	Entscheidungen der Fertigungssteuerung	155

4.3.2.1	Einordnung in den Strategischen Steuerungsraum	155
4.3.2.2	Berücksichtigte Ziele	156
4.3.2.3	Wahl alternativer Arbeitsvorgangsfolgen	157
4.3.2.4	Veränderung der Auftragsreihenfolge	158
4.3.2.5	Veränderung der Losgröße	159
4.3.2.6	Kombination der Steuerungsmaßnahmen	160
4.3.3	Pheromonwerte und deren Aktualisierung	160
4.3.3.1	Pheromoninitialisierung	160
4.3.3.2	Pheromonaktualisierung	161
4.3.4	Heuristikwerte	163
4.4	Einführung von <i>AntControl</i> in die Praxis	168
5.	Realisierung des Steuerungsverfahrens <i>AntControl</i>	170
5.1	Integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen	171
5.2	Objektmodell zur Realisierung des Steuerungsverfahrens <i>AntControl</i>	174
5.2.1	Grundgedanke von <i>AntControl</i>	174
5.2.2	Verwendete Notation	177
5.2.3	Systemelemente von <i>AntControl</i>	181
5.2.3.1	Modellierung der Auftragsart	181
5.2.3.2	Modellierung der Steuerungsaufgabe	182
5.2.3.3	Modellierung von Steuerungsmaßnahmen	186
5.2.3.3.1	Veränderung der Auftragsreihenfolge	186
5.2.3.3.2	Veränderung der Auftragslosgröße	191
5.3	Das Simulationsverfahren <i>OSim-Ant</i>	192
5.3.1	Aufbau des Verfahrens <i>OSim-Ant</i>	192
5.3.2	Benutzungsoberfläche von <i>OSim-Ant</i>	194
5.3.2.1	Modellierung des Fertigungssystems	194
5.3.2.2	Modellierung von Auftragsstypen	197

5.3.2.3	Modellierung der Steuerungsmaßnahmen von <i>AntControl</i>	198
5.3.3	Bewertung eines Simulationslaufs	199
6.	Praktische Anwendung zur Verifizierung von <i>AntControl</i>	202
6.1	Ausgangssituation des Anwendungsmodells	202
6.2	Erweiterung der Ausgangssituation für die Anwendung von <i>AntControl</i>	206
6.2.1	Modellierung der Ausgangssituation mit <i>AntControl</i>	206
6.2.2	Modellierung der Auftragsarten	207
6.2.3	Modellierung der Fertigstellungstermine	213
6.2.4	Modellierung der Störungen	214
6.3	Design des Versuchsplans	215
6.3.1	Betrachtete Szenarien des Fertigungssystems	215
6.3.2	Variation der Einstellparameter von <i>AntControl</i>	218
6.3.3	Modellierung von Vergleichslösungen	221
6.4	Ergebnisse der Simulationsstudie	224
6.4.1	Auswertung der Szenarien	224
6.4.2	Detaillierte Auswertung ausgewählter Szenarien	231
6.4.2.1	Simulation des vierwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-SLZ</i>	231
6.4.2.2	Simulation des vierwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-FFT</i>	237
6.4.3	Untersuchung des Einflusses der Gewichtungsfaktoren des Zielsystems	240
6.4.4	Untersuchung des Einflusses der Gewichtung der Auftragsarten	248
6.5	Fazit der Simulationsstudie	250
7.	Zusammenfassung und weiterführende Aspekte	253
7.1	Zusammenfassung	253
7.2	Ausblick und weiterführende Aspekte	255
8.	Literaturverzeichnis	257
8.1	Quellen	257

8.2	Verwendete Software	301
9.	Anhang	302
9.1	Verzeichnis der Objekttypen	302
9.2	Stereotypen für die Objekttypen	303
9.3	Ergebnisse der übrigen Szenarien des Anwendungsbeispiels	304
9.3.1	Simulation des vierwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-FIFO</i>	304
9.3.2	Simulation des zwölfwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-FIFO</i>	306
9.3.3	Simulation des zwölfwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-FFT</i>	308
9.3.4	Simulation des zwölfwöchigen Auftragsprogramms mit <i>AntControl-SLZ</i>	310
10.	Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	312
10.1	Formelzeichen	312
10.2	Abkürzungen	330