

Produktion und Logistik

RESEARCH

Sören Koch

# Genetische Algorithmen für das Order Batching- Problem in manuellen Kommissioniersystemen



Springer Gabler

---

# Produktion und Logistik

## Herausgegeben von

B. Fleischmann, Augsburg, Deutschland  
M. Grunow, München, Deutschland  
H.-O. Günther, Berlin, Deutschland  
S. Helber, Hannover, Deutschland  
K. Inderfurth, Magdeburg, Deutschland  
H. Kopfer, Bremen, Deutschland  
H. Meyr, Stuttgart, Deutschland  
Th. Spengler, Braunschweig, Deutschland  
H. Stadtler, Hamburg, Deutschland  
H. Tempelmeier, Köln, Deutschland  
G. Wäscher, Magdeburg, Deutschland

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.

**Herausgegeben von**

Professor Dr. Bernhard Fleischmann  
Universität Augsburg

Professor Dr. Herbert Meyr  
Universität Stuttgart

Professor Dr. Martin Grunow  
Technische Universität München

Professor Dr. Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig

Professor Dr. Hans-Otto Günther  
Technische Universität Berlin

Professor Dr. Hartmut Stadler  
Universität Hamburg

Professor Dr. Stefan Helber  
Universität Hannover

Professor Dr. Horst Tempelmeier  
Universität Köln

Professor Dr. Karl Inderfurth  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Gerhard Wäscher  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Herbert Kopfer  
Universität Bremen

**Kontakt**

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

---

Sören Koch

# Genetische Algorithmen für das Order Batching- Problem in manuellen Kommissioniersystemen

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Gerhard Wäscher

 Springer Gabler

Sören Koch  
Magdeburg, Deutschland

Dissertation Universität Magdeburg, 2013

An der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg unter dem Titel „Hybride Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen“ vorgelegte und angenommene Inauguraldissertation.

ISBN 978-3-658-05345-1  
DOI 10.1007/978-3-658-05346-8

ISBN 978-3-658-05346-8 (eBook)

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 2014

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 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-gabler.de](http://www.springer-gabler.de)

## Geleitwort

Trotz vielfältiger Automatisierungsansätze erfordern Kommissionierprozesse nach wie vor einen hohen Personaleinsatz. Das gilt ganz besonders für die sog. Personen-zur-Ware-Kommissioniersysteme, in denen sich Arbeitskräfte (Kommissionierer), i.d.R. auf Rundgängen, durch das Lagerhaus bewegen und von Kunden angeforderte Artikel an deren jeweiligen Lagerstandorten einsammeln. Der Kommissionierung kommt als Lagerhausfunktion im Rahmen des Supply Chain-Managements eine besondere, in der Praxis jedoch häufig nicht wahrgenommene Bedeutung zu. Unzureichend geplante, gesteuerte bzw. ausgeführte Kommissionierprozesse führen zu einer mangelhaften Logistikleistung (lange Durchlaufzeiten von Kommissionieraufträgen, schlechte Termintreue, fehlerhafte Zusammenstellung von Kundenaufträgen) und zu hohen Logistikkosten (insbes. Personalkosten durch überhöhten Personaleinsatz, Kapitalbindungskosten, Kosten von zusätzlichen Lieferungen und Notfallmaßnahmen).

Eine der zentralen Aufgaben bei der Planung von Kommissionierprozessen in Personen-zur-Ware-Kommissioniersystemen stellt das sog. Order Batching dar. Dabei geht es darum, Kundenaufträge so zu Kommissionieraufträgen zusammenzufassen, dass der Gesamtweg, der im Lagerhaus zur Zusammenstellung aller angeforderten Waren zurückzulegen ist, minimiert wird. Es handelt sich dabei um ein NP-schweres, kombinatorisches Optimierungsproblem, das für Probleminstanzen realistischer Größenordnungen mit exakten Algorithmen nicht mehr in angemessener Rechenzeit gelöst werden kann. In der Vergangenheit fanden deshalb in diesem Zusammenhang vor allem Heuristiken Verwendung, deren Einsatz sich allerdings im Wesentlichen auf einfache Konstruktionsverfahren beschränkte. Die Entwicklung von anspruchsvollen, auf metaheuristischen Ansätzen beruhenden Lösungsverfahren ist dagegen erst in jüngerer Zeit zum Gegenstand des wissenschaftlichen Interesses geworden. Da Genetische Algorithmen ein weit verbreitetes Lösungskonzept für kombinatorische Optimierungsprobleme darstellen, liegt es nahe, ihre Eignung zur Lösung des Order Batching-Problems in Personen-zur-Ware-Kommissioniersystemen zu untersuchen. Diesem Themenkreis widmet sich der Verfasser in der

vorliegenden Arbeit. Auf der Grundlage unterschiedlicher Codierungsformen entwickelt Herr Koch mehrere Genetische Algorithmen und demonstriert ihre jeweilige Lösungsgüte für eine Vielzahl von einander verschiedenen Rahmenbedingungen. Dabei zeigt sich, dass die für das Order Batching-Problem vorgestellten Genetischen Algorithmen über eine ausgezeichnete Lösungsqualität verfügen und insbesondere auch eine signifikante Verbesserung gegenüber den klassischen Konstruktionsverfahren darstellen.

Die Arbeit wendet sich an Wissenschaftler und Praktiker, die sich mit Fragestellungen im Zusammenhang mit der Planung von Kommissionierprozessen befassen. Sie möge diesen Personen vielfältige Anregungen bieten und eine weite Verbreitung finden.

Prof. Dr. Gerhard Wäscher

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Management Science der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entstanden. Im Laufe dieser Zeit haben mich viele Menschen in und außerhalb der Universität begleitet, inspiriert und unterstützt, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Gerhard Wäscher sowohl für die wissenschaftliche Betreuung und Begleitung meiner Dissertation als auch für die schöne und abwechslungsreiche Zeit am Lehrstuhl. Seine fachlichen Anregungen, die fruchtbaren Diskussionen und die persönliche Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich werde die Zeit am Lehrstuhl immer in sehr guter Erinnerung behalten. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Karl Inderfurth für die Übernahme des Zweitgutachtens, sein der Arbeit entgegengebrachtes Interesse und sein wertvolles Feedback. Weiterhin gilt mein Dank den Mitgliedern des Disputationsausschusses Herrn PD Dr. Andreas Bortfeldt, Herrn Prof. Dr. Elmar Lukas und Herrn Jun.-Prof. Dr. Guido Voigt.

Ein großes Dankeschön gebührt ebenfalls allen meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl Management Science für die sehr angenehme Zusammenarbeit, die erlebnisreichen Konferenz- und Workshopbesuche sowie die vielen konstruktiven Diskussionen – nicht nur zum Thema Order Batching. Insbesondere denke ich dabei an Alexander Förster, Tino Henke, Dr. Sebastian Henn, Annett König und Nadine Pieper. Die Arbeit mit ihnen war nicht nur ausgesprochen produktiv, sondern hat auch immer sehr viel Spaß gemacht – eine seltene Kombination, die ich sehr genossen habe.

Auch die regelmäßigen fachübergreifenden Diskussionen mit den Kolleginnen und Kollegen der anderen Lehrstühle waren eine wichtige Bereicherung für meine wissenschaftliche Arbeit, für die ich mich bedanken möchte. Ich hoffe sehr, dass die dabei geknüpften Freundschaften auch über die Universitätszeit hinaus Bestand haben werden.



Mein größter Dank gilt jedoch meinen Eltern und meiner Freundin. Meiner Freundin Nina Kurzidim danke ich dafür, dass sie mich mit viel Geduld und Verständnis begleitet hat und mir immer die für eine solche Arbeit benötigte Kraft und Ruhe geschenkt hat. Meine Eltern Adelheid und Friedhelm Koch haben mir durch ihre uneingeschränkte Unterstützung und ihre Ermutigungen den notwendigen familiären Rückhalt gegeben. Sie waren immer für mich da und haben mir in allen Lebenslagen mit Rat und Tat zur Seite gestanden – hierfür bin ich unendlich dankbar. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Sören Koch

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>Tafelverzeichnis .....</b>	<b>XXV</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Gegenstand und Motivation der Arbeit .....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Grundlagen der Kommissionierung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Kommissionierung als Lagerhausfunktion .....	5
2.1.1 Einordnung der Kommissionierung in das Lagerhausmanagement .....	5
2.1.2 Betriebswirtschaftliche Bedeutung der Kommissionierung .....	7
2.2 Struktur von Kommissioniersystemen.....	8
2.2.1 Abgrenzung verschiedener Kommissioniersysteme .....	8
2.2.2 Aufbau und Layout von manuellen Kommissioniersystemen.....	9
2.2.3 Ablauf der manuellen Kommissionierung .....	11
2.2.4 Optimierungsziele in der Kommissionierung.....	12
2.3 Operative Planungsprobleme der Kommissionierung.....	15
2.3.1 Artikelanordnung (Storage Location) .....	15
2.3.2 Tourenplanung (Picker Routing).....	19
2.3.3 Auftragsbildung (Order Batching) .....	23
2.4 Zusammenfassung: Grundlagen der Kommissionierung .....	27

<b>3 Modelle und Lösungsansätze für das Order Batching-Problem</b> .....	<b>30</b>
3.1 Mathematische Modellierung .....	30
3.2 Exakte Lösungsverfahren .....	32
3.3 Konstruktionsheuristiken.....	33
3.3.1 Prioritätsregeln .....	33
3.3.2 Seed-Verfahren .....	35
3.3.3 Savings-Verfahren.....	37
3.4 Metaheuristiken .....	40
3.4.1 Iterated Descent .....	40
3.4.2 Iterated Local Search.....	44
3.4.3 Variable Neighbourhood Search.....	48
3.4.4 Tabu Search .....	50
3.4.5 Ameisenalgorithmen .....	52
3.5 Zusammenfassung: Lösungsansätze für das Order Batching-Problem.....	56
<b>4 Genetische Algorithmen – Allgemeine Grundlagen</b> .....	<b>59</b>
4.1 Terminologie und Konzept Genetischer Algorithmen.....	59
4.2 Ablauf Genetischer Algorithmen .....	63
4.3 Komponenten Genetischer Algorithmen .....	66
4.3.1 Auswahl eines Codierungsschemas .....	66
4.3.2 Bestimmung der Ausgangspopulation .....	71
4.3.3 Berechnung der Fitnesswerte.....	73
4.3.4 Durchführung der Elternselektion .....	75
4.3.5 Durchführung der Crossover-Operationen.....	79
4.3.6 Durchführung der Mutation-Operationen .....	83
4.3.7 Auswahl eines Reproduktionsmodells .....	87
4.3.8 Auswahl einer Terminierungsbedingung.....	88
4.4 Umgang mit unzulässigen Lösungen.....	90
4.5 Zusammenfassung: Genetische Algorithmen – Allgemeine Grundlagen.....	91

---

<b>5 Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem .....</b>	<b>94</b>
5.1 Genetische Algorithmen mit Integer Encoding-Schema .....	94
5.2 Genetische Algorithmen mit Binary Encoding-Schema .....	98
5.3 Genetische Algorithmen mit Random-Key Encoding-Schema.....	106
5.4 Genetische Algorithmen mit einem Gruppierungsschema .....	110
5.5 Zusammenfassung: Genetische Algorithmen für das Order Batching- Problem .....	116
<b>6 Zielsetzung und Aufbau der numerischen Experimente .....</b>	<b>119</b>
6.1 Zielsetzung .....	119
6.2 Lagerhausparameter .....	120
6.3 Problemklassen und Testinstanzen .....	121
6.4 Vergleichsverfahren .....	122
6.5 Parametereinstellung der Algorithmen.....	122
6.6 Implementierung und Hardware.....	125
<b>7 Ergebnisse der numerischen Experimente .....</b>	<b>126</b>
7.1 Anwendung der Routingstrategie S-Shape.....	126
7.2 Anwendung der Routingstrategie Largest Gap .....	150
7.3 Zusammenfassung: Ergebnisse der numerischen Experimente.....	171
<b>8 Schlussbetrachtung.....</b>	<b>175</b>
8.1 Zusammenfassung .....	175
8.2 Ausblick .....	177
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>179</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AS	Ameisenalgorithmus
BGA	Binary Genetic Algorithm
BRKGA	Biased Random-Key Genetic Algorithm
COI	Cube-per-Order-Index
C&W	Clarke-and-Wright
FCFS	First-Come-First-Served
GA	Genetischer Algorithmus
GGA	Grouping Genetic Algorithm
GTL	Gesamttourlänge
ID	Iterated Descent-Verfahren
IGA	Integer Genetic Algorithm
ILS	Iterated Local Search-Verfahren
I/O	Input/Output
LE	Längeneinheit
MIG	Migration
NP	Nicht-Polynomial
POP	Population
RKW	Random-Key-Wert
TS	Tabu Search
TSP	Traveling Salesman-Problem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VNS	Variable Neighbourhood Search-Verfahren

## Symbolverzeichnis

$a_{ij}$	Binärer Zuordnungskoeffizient mit
	$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Kundenauftrag } j \ (j \in J) \text{ in Batch } i \ (i \in I) \text{ enthalten ist,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$
$C$	Kapazität des Kommissioniergerätes
$c_j$	Kapazitätsbedarf von Kundenauftrag $j \ (j \in J)$
$d_i$	Länge der Kommissioniertour, auf der alle Kundenaufträge von Batch $i \ (i \in I)$ eingesammelt werden
$d_{ij}$	Länge der Kommissioniertour bei einer gemeinsamen Kommissionierung der Kundenaufträge $i$ und $j \ (i, j \in J)$
$fit$	Fitnesswert
$fit_{mod}$	Modifizierter Fitnesswert
$h^*$	Anzahl der Batches in der besten Lösung beim Iterated Local Search-Verfahren
$I$	Menge aller zulässigen Batches
$J$	Menge der Kundenaufträge
$m$	Anzahl der zu berücksichtigenden besten Lösungen beim Ameisenalgorithmus
$MIG$	Teilmenge der Population, bestehend aus neuen, zufällig generierten Chromosomen
$ MIG $	Anzahl der Elemente (Chromosomen) in $MIG$
$n$	Anzahl an Kundenaufträgen
$n_k, n_l$	Anzahl an Kundenaufträgen in den Batches $k$ und $l$
$N_{AS-1/2}$	Nachbarschaften beim Ameisenalgorithmus
$N_{GA-1/2}$	Nachbarschaften bei den Genetischen Algorithmen

---

$N_{ID}$	Nachbarschaft beim Iterated Desecent-Verfahren
$N_{ILS-1/2}$	Nachbarschaften beim Iterated Local Search-Verfahren
$N_{TS}$	Nachbarschaft beim Tabu Search-Verfahren
$N_{VNS-1/2/3}$	Nachbarschaften beim Variable Neighbourhood Search-Verfahren
$p_{kl}$	Wahrscheinlichkeit im Ameisenalgorithmus, dass die beiden Batches $k$ und $l$ kombiniert werden
$p_{cross}$	Crossover-Wahrscheinlichkeit
$p_{mut}$	Mutationswahrscheinlichkeit
$p_{kum}$	Kummulierte Selektionswahrscheinlichkeit
$p_{puc}$	Auswahlwahrscheinlichkeit beim Parameterized Uniform Crossover
$p_{sel}$	Selektionswahrscheinlichkeit
$POP_g$	Population (Menge bestehend aus Chromosomen) in Generation $g$
$ POP $	Anzahl der Elemente (Chromosomen) in $POP$
$r_j$	Zuordnungshäufigkeit von Kundenauftrag $j$ ( $j \in J$ )
$s_0$	Ausgangslösung
$s, s', s'', \hat{s}$	Lösungen
$s^*$	Beste Lösung
$S$	Lösungsraum
$sav_{ij}$	Savings-Wert der Kombination der Kundenaufträge $i$ und $j$ ( $i, j \in J$ )
$t$	Zeitschranke beim Iterated Local Search-Verfahren
$T$	Tabumenge
$TOP$	Teilmenge der Population, bestehend aus den Chromosomen mit den besten Zielfunktionswerten
$ TOP $	Anzahl der Elemente (Chromosomen) in $TOP$
$x_0(s)$	Zielfunktionswert der Lösung $s$

$x_i$	Binäre Entscheidungsvariable mit $x_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn Batch } i \text{ (} i \in I \text{) ausgewählt wird,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$
$y$	Zufallsvariable aus $[0, 1]$ beim Crossover
$z$	Zufallsvariable aus $[0, 1]$ bei der Mutation
$\alpha, \beta$	Steuerungsparameter beim Ameisenalgorithmus
$\gamma$	Anzahl der Batchmodifikationen beim Iterated Local Search-Verfahren
$\delta$	Anzahl der Batchmodifikationen beim Iterated Descent-Verfahren
$\varepsilon$	Epsilonwert für die Berechnung der Fitnesswerte bei Genetischen Algorithmen
$\Delta\tau_{ij}$	Zusätzliche Pheromonintensität für die Auftragskombination $(i, j)$ ,
$\Delta\tau_{ij}^w$	Zusätzliche Pheromonintensität für die Auftragskombination $(i, j)$ , falls diese in einem Batch der $w$ -besten Lösung vorkommt
$\Delta\tau_{ij}^*$	Zusätzliche Pheromonintensität für die Auftragskombination $(i, j)$ , falls diese in einem Batch der insgesamt besten Lösung vorkommt
$\kappa$	Größe der Batchmodifikation beim Iterated Descent-Verfahren
$\lambda$	Veränderungsparameter beim Iterated Local Search-Verfahren
$\mu$	Thresholdparameter beim Iterated Local Search-Verfahren
$\rho$	Pheromonreduzierungsfaktor beim Ameisenalgorithmus
$\Theta$	Pheromonerhöhungsfaktor beim Ameisenalgorithmus
$\tau_{ij}$	Pheromonintensität der Kundenauftragskombination $(i, j)$
$\tilde{\tau}_k$	Pheromonintensität der Batchkombination $(k, l)$
$\Omega$	Menge der zulässigen Batchkombinationen im Ameisenalgorithmus



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Darstellung der Lagerhausbereiche .....	6
Abbildung 2.2: Klassifikation von Kommissioniersystemen.....	8
Abbildung 2.3: Darstellung eines Lagerhauses im Ein-Block-Layout.....	10
Abbildung 2.4: Aufteilung der Arbeitszeit eines Kommissionierers .....	14
Abbildung 2.5: Darstellung verschiedener Artikelanordnungsmuster.....	19
Abbildung 2.6: Kommissioniertouren für verschiedene Routingstrategien .....	22
Abbildung 2.7: Verkürzung der Gesamttourlänge durch Order Batching .....	24
Abbildung 2.8: Einordnung des Dissertationsthemas in die Systemcharakteristika und die operativen Planungsprobleme der Kommissionierung .....	28
Abbildung 3.1: Grundprinzip der iterativen lokalen Suche .....	42
Abbildung 3.2: Grundprinzip der Pheromonmarkierung bei Ameisenalgorithmen....	53
Abbildung 4.1: Darstellung der Begriffe Chromosom, Gen und Allel .....	61
Abbildung 4.2: Allgemeiner Ablauf Genetischer Algorithmen.....	65
Abbildung 4.3: Darstellung eines Chromosoms für das Order Batching-Problem unter Verwendung des Integer Encoding-Schemas .....	67
Abbildung 4.4: Darstellung eines Chromosoms für das Order Batching-Problem unter Verwendung des Binary Encoding-Schemas.....	68
Abbildung 4.5: Darstellung eines Chromosoms für das Order Batching-Problem unter Verwendung des Random-Key-Schemas .....	68
Abbildung 4.6: Decodierungsverfahren für das Random-Key-Schema.....	69
Abbildung 4.7: Darstellung eines Chromosoms für das Order Batching-Problem unter Verwendung des Gruppierungsschemas .....	70
Abbildung 4.8: Bestimmung der Fitnesswerte – Zusammenhang zwischen Phänotyp- und Genotyp-Ebene.....	73
Abbildung 4.9: Darstellung der kumulierten Selektionswahrscheinlichkeiten am Roulette-Rad für das Beispiel aus Tabelle 4.2 .....	78

Abbildung 4.10: Darstellung eines One-Point Crossovers.....	80
Abbildung 4.11: Darstellung eines Two-Point Crossovers.....	81
Abbildung 4.12: Darstellung des Parameterized Uniform Crossover.....	82
Abbildung 4.13: Darstellung der Inversion.....	83
Abbildung 4.14: Darstellung einer Point Mutation.....	85
Abbildung 4.15: Darstellung einer SWAP Mutation .....	85
Abbildung 4.16: Darstellung einer Bit-Flip Mutation.....	86
Abbildung 5.1: Übergang von einer Generation zur nächsten beim IGA.....	97
Abbildung 5.2: Übergang von einer Generation zur nächsten .....	102
Abbildung 5.3: Darstellung und Interpretation des Chromosoms mit Random- Key Encoding-Schema.....	106
Abbildung 5.4: Beispiel für eine Redundanz bei Chromosomen .....	111
Abbildung 5.5: Beispiel für den Verlust problemspezifischer Zusammenhänge durch einen Crossover .....	112
Abbildung 5.6: Darstellung des Crossover-Operators für das Gruppierungsschema.....	114
Abbildung 7.1: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 30$ und S-Shape Routing .....	134
Abbildung 7.2: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 45$ und S-Shape Routing .....	135
Abbildung 7.3: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 60$ und S-Shape Routing .....	135
Abbildung 7.4: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 75$ und S-Shape Routing .....	136
Abbildung 7.5: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 20$ , $n = 30$ und S-Shape Routing.....	139
Abbildung 7.6: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 40$ , $n = 50$ und S-Shape Routing.....	140

Abbildung 7.7: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 60$ , $n = 70$ und S-Shape Routing.....	141
Abbildung 7.8: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 80$ und S-Shape Routing .....	142
Abbildung 7.9: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 20$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und S-Shape Routing.....	144
Abbildung 7.10: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 50$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und S-Shape Routing.....	146
Abbildung 7.11: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 80$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und S-Shape Routing.....	147
Abbildung 7.12: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 30$ und Largest Gap Routing.....	157
Abbildung 7.13: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 45$ und Largest Gap Routing.....	158
Abbildung 7.14: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 60$ und Largest Gap Routing.....	159
Abbildung 7.15: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl an Kundenaufträgen bei $C = 75$ und Largest Gap Routing.....	159
Abbildung 7.16: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 20$ , $n = 30$ und Largest Gap Routing.....	161
Abbildung 7.17: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 40$ , $n = 50$ und Largest Gap Routing.....	162

---

Abbildung 7.18: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 60$ , $n = 70$ und Largest Gap Routing.....	162
Abbildung 7.19: Entwicklung der Lösungsqualität in Abhängigkeit von der Größe des Kommissioniergerätes bei $n = 80$ und Largest Gap Routing ...	163
Abbildung 7.20: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 20$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und Largest Gap Routing .....	165
Abbildung 7.21: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 50$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und Largest Gap Routing .....	167
Abbildung 7.22: Lösungsentwicklung in Abhängigkeit von der Rechenzeit bei $n = 80$ , verschiedenen Größen des Kommissioniergerätes und Largest Gap Routing .....	168

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Nachbarschaften für das Iterated Local Search-Verfahren von Henn et al. (2010) .....	47
Tabelle 3.2: Nachbarschaften für das Variable Neighbourhood Search-Verfahren von Albareda-Sambola et al. (2009) .....	50
Tabelle 4.1: Übersicht der wichtigsten Begriffe von Genetischen Algorithmen und ihre Erklärung .....	62
Tabelle 4.2: Berechnung der Selektionswahrscheinlichkeiten .....	77
Tabelle 4.3: Übersicht der Gestaltungsmöglichkeiten in Genetischen Algorithmen .....	93
Tabelle 5.1: Zuordnung der Random-Key-Werte zu Zuordnungsstrategien.....	107
Tabelle 5.2: Darstellung der Charakteristika der vier Genetischen Algorithmen ....	118
Tabelle 6.1: Charakteristika der Problemklassen.....	122
Tabelle 6.2: Parametereinstellung der Genetischen Algorithmen .....	124
Tabelle 6.3: Vorgegebene Rechenzeit in Abhängigkeit von der Kundenauftragszahl n .....	125
Tabelle 7.1: Verbesserung der durchschnittlichen Gesamttourlänge gegenüber C&W(ii) bei Anwendung der Routingstrategie S-Shape .....	127
Tabelle 7.2: Darstellung der Lösungsqualität für die Problemklassen bei Anwendung der S-Shape-Strategie.....	128
Tabelle 7.3: Optimale Lösungen für die Routingstrategie S-Shape .....	131
Tabelle 7.4: Vergleich der heuristischen Ergebnisse mit den optimalen Lösungen für die Routingstrategie S-Shape.....	132
Tabelle 7.5: Analyse der Batchanzahl bei S-Shape Routing.....	143
Tabelle 7.6: Durchschnittliche Generationenanzahl in Abhängigkeit von der Problemgröße bei S-Shape Routing .....	149
Tabelle 7.7: Verbesserung der durchschnittlichen Gesamttourlänge gegenüber C&W(ii) bei Anwendung der Routingstrategie Largest Gap .....	151

---

Tabelle 7.8: Darstellung der Lösungsqualität für die Problemklassen bei Anwendung der Largest Gap-Strategie .....	152
Tabelle 7.9: Optimale Lösungen für die Routingstrategie Largest Gap.....	155
Tabelle 7.10: Vergleich der Ergebnisse mit den optimalen Lösungen bei Anwendung der Routingstrategie Largest Gap .....	156
Tabelle 7.11: Analyse der Batchanzahl bei Largest Gap Routing .....	164
Tabelle 7.12: Durchschnittliche Generationenanzahl in Abhängigkeit von der Problemgröße bei Largest Gap Routing.....	170