

# Diplomarbeit

Zur Erlangung

des Grades eines Magisters der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften der  
betriebswirtschaftlichen Studienrichtung „Management and International  
Business“

über das Thema

## **ACO (Ant Colony Optimization) im Logistikbereich**

Eingereicht am

**Institut für Innovations- und**

**Umweltmanagement**

**der Universität Graz bei**

**Univ.-Doz. Dr. Alfred Posch**

Von

**Thomas Zsifkovits**

**8184 Anger 21**

Graz, November 06

# EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich kenntlich gemacht.

Graz, 7.11.2006



Ort, Datum

Unterschrift

# DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle recht herzlich bei jenen Personen bedanken, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt vor allem Dr. Gerald Steiner, der diese Arbeit in allen Phasen beratend und anregend begleitet hat und mich immer wieder von neuem motivieren konnte und Univ.-Doz. Dr. Alfred Posch.

Danken möchten ich auch der Firma AntOptima für den zustande gekommenen Informationsaustausch. Auch jenen Unternehmen, die mir für die Befragungen zur Verfügung standen und ohne die das Zustandekommen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre, danke ich recht herzlich.

Darüber hinaus möchte ich auch meiner Familie und meinen FreundenInnen für Ihre Unterstützung danken.

Thomas Zsifkovits

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Double Bridge Experiments .....	11
Abbildung 2: Einsatzgebiete von Ameisenalgorithmen .....	13
Abbildung 3: Vergleich Optimierungsverfahren City Set Problem 10 Ameisen/2500 Durchläufe pro Ameise/25 Durchgänge .....	31
Abbildung 4: Vergleich Optimierungsverfahren Eil50 und KroA100 10 Ameisen/1000 Durchläufe pro Ameise/15 Durchgänge .....	33
Abbildung 5: Vergleich Optimierungsverfahren Oliver30 und 132 Städte Problem 30 Ameisen/30sec. Laufzeit/30 Durchgänge: Oliver30 132 Ameisen/120sec. Laufzeit/30 Durchgänge: 132 Städte Problem .....	34
Abbildung 6: Vergleich Optimierungsverfahren ry48p und ftv170 Anzahl der Ameisen = Anzahl der Städte/Durchläufe $nV/10$ bzw. 25 Durchgänge .....	35
Abbildung 7: Vergleich Optimierungsverfahren C1, C2, R1, R2, RC1 und RC2 10 Ameisen/Durchlauf nach bestimmter Zeit (unbekannt) gestoppt/3 Durchgänge .....	37
Abbildung 8: NICHT TOP 100, befragte Branchen.....	44
Abbildung 9: NICHT TOP 100, Branchen mit weniger als 3% .....	44
Abbildung 10: TOP 100, Anzahl der Länder, in denen das U. tätig ist .....	45
Abbildung 11: NICHT TOP 100, Anzahl der Länder, in denen das U. tätig ist .....	46
Abbildung 12: TOP 100, Anzahl der Mitarbeiter.....	47
Abbildung 13: NICHT TOP 100, Anzahl der Mitarbeiter .....	47
Abbildung 14: TOP 100, Mittelwert und Standardabw. v. Umsatz .....	48
Abbildung 15: TOP 100, Normalverteilungskurve v. Umsatz.....	49
Abbildung 16: NICHT TOP 100, Mittelwert und Standardabw. v. Umsatz .....	49
Abbildung 17: NICHT TOP 100, Normalverteilungskurve v. Umsatz.....	50
Abbildung 18: TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung, Mittelwert, Min-Max .....	52
Abbildung 19: NICHT TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung, Mittelwert, Min-Max .....	52
Abbildung 20: TOP 100 und NICHT TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung .....	53
Abbildung 21: TOP 100, zur Verfügung stehende Zeit für die Tourenplanung .....	54
Abbildung 22: NICHT TOP 100, zur Verfügung stehende Zeit für die Tourenplanung .....	55
Abbildung 23: TOP 100, Korrelation von Anzahl d. Orte und Zeit f. Tourenplanung.....	56

Abbildung 24: NICHT TOP 100, Korrelation von Anzahl d. Orte und Zeit f. Tourenplanung .....	56
Abbildung 25: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kehren KFZ z. Startpunkt zurück.....	57
Abbildung 26: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kapazität f. einen Kunden ausreichend .....	58
Abbildung 27: TOP 100 und NICHT TOP 100 Unternehmen, KFZ mit gleicher Kapazität..	59
Abbildung 28: TOP 100 und NICHT TOP 100, Transportkosten bekannt.....	60
Abbildung 29: TOP 100 und NICHT TOP 100, warum stand der ACO nicht zur Diskussion .....	61
Abbildung 30: TOP 100 und NICHT TOP 100, warum kam ACO nicht zum Einsatz .....	62
Abbildung 31: TOP 100 und NICHT TOP 100, Klare und einfache Bedienung.....	64
Abbildung 32: TOP 100 und NICHT TOP 100, Integration von mehrfach Zielsetzungen ....	65
Abbildung 33: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kosteneinsparungspotenzial .....	66
Abbildung 34: TOP 100 und NICHT TOP 100, Zeitbedarf bei der Berechnung .....	67
Abbildung 35: TOP 100 und NICHT TOP 100, Optimierungsverf. ohne Umstrukturierungen .....	68
Abbildung 36: TOP 100 und NICHT TOP 100, Berücksichtigung von Zeitfenster.....	69
Abbildung 37: TOP 100, Rangliste v. allgemeinen Anforderungen an Optimierungsv. ....	70
Abbildung 38: NICHT TOP 100, Rangliste v. allgemeinen Anforderungen an Optimierungsv. .....	71

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony System
AG	Annealing Genetic
AS	Ant System
AS <sub>rank</sub>	Rank Based Version of Ant System
CR	Chiang und Russel
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
Ebd.	Ebenda
EN	Elastic Net
EP	Evolutionäre Programmierung
FI	Farthest Insertion
GA	Genetischer Algorithmus
HAS	Hybrid Ant System
HE	Heuristik
MACS	Multiple Ant Colony Optimization
MMAS	Max-Min Ant System
MMAS <sub>+sm</sub>	Max-Min Ant System with Smoothing
nV	nicht vorhanden
PB	Potvin und Bengio
RT	Rochat und Taillard
TB	Taillard et al.
TH	Thangiah
TSP	Travelling Salesman Problem
SA	Simulated Annealing
SA <sub>nn</sub>	Simulated Annealing with Nearest Neighbour Heuristic
SOM	Self Organizing Map
SPSS	Statistical program for social sciences
Std. Dev	Standard Deviation
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows

## SYMBOLVERZEICHNIS

$(b_j, e_j)$	Zeitfenster von Knoten $j$
$d_{ij}$	Distanz vom Knoten $i$ zum Knoten $j$
$i$	Ausgangsknoten
$IN_j$	Zeitspanne, seit dem der Knoten $j$ nicht mehr besucht wurde
$j$	Nächster Knoten
$J_i^k$	Liste der bereits besuchten Knoten
$k_{ib}$	Ameise, die die beste Tour gefunden hat
$L_k(t)$	Länge der Tour ( $t$ ) der Ameise ( $k$ )
$L_\mu$	Tourenlänge des jeweiligen Ranges
$L^*$	Kürzeste Tour
$m$	Anzahl der Ameisen
$n$	Anzahl der Knoten
$p$	Verdunstungsfaktor
$P_{ij}^k(t)$	Übergangsregel
$Q$	Heuristisch ermittelte, optimale Länge einer Tour
$t_{max}$	Maximale Anzahl an Touren/Durchläufen
$\alpha$	Parameter für globale Information
$\beta$	Parameter für lokale Information
$\psi^{gh}$	MACS-Variable für die Lösung von VRPTW
$\tau_{ij}$	Pheromonmenge der Kante ( $i, j$ )
$\tau_{max}$	Maximale Menge an Pheromon
$\tau_{min}$	Minimale Menge an Pheromon
$\Delta A_Q(i, j)$	Delayed Reinforcement
$\Delta \tau_{ij}^k(t)$	Pheromon-Update Regel
$\Delta \tau_{ij}^\mu$	Pheromon-Update-Regel aus den besten Ameisen

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Der Ameisenstaat als Vorbild?.....	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit .....	4
1.3 Methodik .....	5
<b>2 LOGISTIKPROBLEMSTELLUNGEN.....</b>	<b>5</b>
2.1 Travelling Salesman Problem .....	5
2.2 Vehicle Routing Problem .....	7
2.2.1 Capacitated Vehicle Routing Problem .....	7
2.2.2 Vehicle Routing Problem with Time Windows .....	7
<b>3 AMEISENALGORITHMEN.....</b>	<b>8</b>
3.1 Futtersuche der Ameisen .....	9
3.2 Algorithmen mit künstlichen Ameisen .....	12
3.2.1 Heuristik – Metaheuristik .....	14
3.2.2 NP-vollständige Probleme.....	16
3.3 Ameisenalgorithmen für die Lösung von TSP und VRP.....	17
3.3.1 Ant System, AS .....	18
3.3.2 Hybrid Ant System, HAS .....	21
3.3.3 Ant-Q.....	21
3.3.4 Ant Colony System, ACS.....	23
3.3.5 Rank Based Version of Ant System, AS <sub>rank</sub> .....	24
3.3.6 Max-Min Ant System, MMAS.....	25
3.3.7 Multiple Ant Colony System for VRPTW, MACS-VRPTW .....	26
3.4 Ameisenalgorithmen im Vergleich zu anderen Metaheuristiken .....	28



3.4.1	Vorgehensweise.....	29
3.4.2	Vergleich von Optimierungsverfahren für das symmetrische TSP.....	31
3.4.3	Vergleich von Optimierungsverfahren für das asymmetrische TSP .....	35
3.4.4	Vergleich von Optimierungsverfahren für das VRPTW .....	36
<b>3.5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>EMPIRISCHE UNERSUCHUNG .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Vorgehensweise.....</b>	<b>39</b>
4.1.1	Auswahl der Grundgesamtheit .....	39
4.1.2	Gestaltung des Fragebogens .....	41
4.1.3	Ablauf der Befragung .....	42
4.1.4	Auswertung.....	42
<b>4.2</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse.....</b>	<b>43</b>
4.2.1	Allgemeine strukturelle Merkmale der Stichprobe .....	43
4.2.2	Problemstellungen im Bereich Logistik in den befragten Unternehmen .....	50
4.2.3	Anwendung von Ameisenalgorithmen in den befragten Unternehmen .....	60
4.2.4	Allgemeine Anforderungen der befragten Unternehmen an Optimierungsverfahren.....	63
<b>4.3</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>RESÜMEE .....</b>	<b>73</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>79</b>

# 1. EINLEITUNG

Das Heranziehen von Phänomenen aus der Natur ist eine weitgehend verbreitete Methode zum Lösen komplexer Probleme. Der Begriff „Bionik“ beschreibt dabei die Verbindung zwischen BIOlogie und TechNIK. Die Bionik befasst sich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme und stellt ein interdisziplinäres Forschungsgebiet dar. Es geht dabei nicht um ein „Zurück zur Natur“ oder um einfache Nachahmung. „Vielmehr geht es um ein geduldiges Bemühen, die drei Facetten ‚Mensch‘, ‚Technik‘ und ‚Umwelt‘ zu einem möglichst nur positiv vernetzten Beziehungsgefüge zusammenzufassen.“<sup>1</sup>

Nicht nur im technischen Bereich, sondern auch in der Betriebswirtschaft finden Analogien aus der Natur Beachtung. Ameisen bei der Futtersuche stellen in dieser Arbeit die Basis für Lösungsansätze im Logistikbereich dar.

## 1.1 Der Ameisenstaat als Vorbild?

Die zunehmende Vernetzung auf unserem Planeten führt zwangsläufig zu immer mehr Komplexität. Die Denkweise in Ursache-Wirkung bringt immer weniger brauchbare Ergebnisse hervor, da das Umfeld immer dynamischer reagiert und Zusammenhänge nicht mehr durchschaut werden können. Hinzu kommt, dass vernetzte Systeme anderes reagieren als das Individuum. Eine Nervenzelle in unserem Gehirn kann Impulse feuern oder nicht, mehr nicht. Im Kollektiv mit 100 Milliarden anderen jedoch, kann dieses Organ höchst komplexe Aufgaben lösen.<sup>2</sup> Auch im Management von Unternehmen hat man dynamische Umfelder erkannt und entfernt sich von der Abfolge der fünf Managementfunktionen Planung, Organisation, Personaleinsatz, Führung und Kontrolle. Neue Managementansätze wie die Systemtheorie liefern Herangehensweisen für die Bildung eines Systems, das sich selbst organisiert.<sup>3</sup> Forscher aus verschiedenen Wissensgebieten untersuchen Phänomene

---

<sup>1</sup>Nachtigall Werner, zitiert nach Kreuzer Franz (Hrsg.), **Nobelpreis für den lieben Gott**, Verlag: Kremayr & Scheriau/Orac, Wien 2004, S. 47.

<sup>2</sup>Vgl. WWF World Wide Fund for Nature (Hrsg.), **Visionen des Machbaren**, Pro Futura Verlag, Waldbröl 2005, S. 41.

<sup>3</sup>Vgl. Schreyögg Georg, **Der Managementprozess – neu gesehen**, in: Staehle W. H., Sydow J. (Hrsg.), **Managementforschung 1**, o. V., Berlin/New York 1991, S. 257ff.

die von inhärenter Kreativität, von spontanem Auftreten neuartiger Strukturen oder von autonomen Anpassungen an eine sich verändernde Umgebung geregelt zu werden scheinen – die Wissenschaft der Selbstorganisation. Nach *Heylighen* sind Selbstorganisierte Systeme durch folgende Merkmale gekennzeichnet:<sup>4</sup>

- Globales Verhalten aus lokalen Interaktionen  
Das Ganze ist mehr als die Summe der einzelnen Teile. Die Interaktionen zwischen den Systemkomponenten erzeugen vielmehr ein größeres System als es alle einzelnen Komponenten könnten.
- Verteilte Kontrolle  
Es gibt kein zentrales Kontrollorgan. Jede Systemkomponente kontrolliert sich selbst.
- Robustheit und Belastbarkeit  
Selbstorganisierte Systeme sind durch den Ausfall einzelner Systemkomponenten nicht wesentlich gefährdet. Sie besitzen die Fähigkeit, sich selbst wiederherzustellen.
- Nichtlinearität und Feedback  
Der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung ist bei selbstorganisierenden Systemen im Gegensatz zu traditionellen Systemen nicht linear, d. h. kleine Ursachen können eine große Wirkung besitzen und umgekehrt. Die Reaktion auf ein Ereignis kann zudem unterschiedlich sein und führt nicht immer zum gleichen Ergebnis.
- Dynamische Veränderungsprozesse  
Selbstorganisierende Systeme sind ständig in Bewegung. Sie verändern ihre Umwelt und werden umgekehrt durch ihre Umwelt verändert.
- Organisatorische Geschlossenheit  
Selbstorganisierende Systeme bilden eine geschlossene, geordnete Organisation, um eine Funktion zu erfüllen. Sie ziehen ihre Grenzen zur Umwelt selbst, sind aber wie im vorangehenden Punkt nicht starr und nicht abgekapselt von ihrer Umwelt.

Selbstorganisationsmechanismen sind notwendig, um ein Selbstorganisiertes System aufrecht zu erhalten. Unter dem Begriff Stigmergie wird eine Möglichkeit für einen Selbstorganisationsmechanismus beschrieben. Ein Beispiel für Stigmergie wäre, wenn ein

---

<sup>4</sup>Vgl. Heylighen Francis, **The Science of Selforganization and Adaptivity**, Free University of Brussels, o. J., S. 5-14, URL: <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf>, 02.06.2006, 09:09.

Individuum die Umwelt verändert und ein anderes Individuum zu einem späteren Zeitpunkt auf diese neue Umwelt reagiert. „Die darauf beruhenden Selbstverstärkenden Prozesse führen in Verbindung mit individuellen Verhaltensweisen der einzelnen Teilnehmer eines Schwarmes zu emergenten Koordinationsstrukturen, die der Erfüllung der Aufgaben eines Schwarmes dienen.“<sup>5</sup> Ameisenkolonien sind ein perfektes Beispiel für selbstorganisierende Systeme, die nach den Regeln der Stigmergie ablaufen. Nicht nur der Vorgang bei der Futtersuche, der in dieser Arbeit näher beschrieben wird (siehe *Kapitel 3.1*), sondern das gesamte Zusammenleben der Ameisen ist ein selbstorganisierendes System – der Nestbau, die Aufteilung der Arbeitsabläufe (Ameisen bringen beispielsweise eine so flexible Arbeitsteilung zu Stande, dass trotz ständiger Veränderung des Aufwandes und der Priorität der zu erledigenden Aufgaben, die Arbeit nahezu optimal verteilt wird), der Bau eines Termitenhügels bei ihren nahen Verwandten, ihr Sortierverhalten, wenn sie ihre Larven positionieren, die Symbiose mit Bäumen usw..<sup>6</sup>

Die charakteristischen Punkte für eine funktionierende Selbstorganisation erfüllt die Organisation der Ameisen. Man spricht von Schwarm Intelligenz<sup>7</sup>, d.h. das Ameisenvolk löst komplexe Probleme wozu ein einzelnes Individuum nicht fähig wäre. Ameisen bewältigen die Komplexität ihrer Umwelt, indem sie die Komplexität in ihren Arbeitsabläufen auf ein Minimum reduzieren. Alle Lebensräume (außer die Antarktis) vom Regenwald über die Wüste bis in unseren Haushalt sind von Ameisen erschlossen. Eine perfekte Überlebensstrategie auf den ersten Blick. Auf den zweiten Blick sollte man das Leben unter menschlichem Gesichtspunkt näher unter die Lupe nehmen. Im Ameisenstaat zählt nicht das einzelne Individuum, sondern die Gemeinschaft. Dies kann nicht unbedingt ausschließlich als Nachteil gesehen werden, jedoch gibt es auch keinen freien Willen, keine Verantwortung für die eigene Person und die Person des Nächsten und keine Unterscheidung von Gut und Böse. „Indessen sind die Ameisen keineswegs Gemeinschaftsautomaten; sie zeigen vielmehr in besonderen Situationen manchmal eine erstaunliche Plastizität. Im Ganzen aber müssen sich die Ameisen so verhalten, wie sie

---

<sup>5</sup>Heeren Menno, **Swarm Intelligence Strategie zur Lösung reaktiver Planungsprobleme in Wertschöpfungsketten**, Fachbereich Informatik an der Carl v. Ossietzky Universität, o. J., o. S., URL: [http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/~sauer/puk2003/paper/heeren\\_puk2003.pdf](http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/~sauer/puk2003/paper/heeren_puk2003.pdf), 05.06.06, 08:56.

<sup>6</sup>Vgl. Bonabeau Eric u.a., **Swarm Intelligence From Natural to artificial Systems**, Verlag: Oxford University Press, New York 1999, S. 14ff.

<sup>7</sup>Der Begriff wurde das erste Mal im Zusammenhang mit Robotersystemen verwendet. Einzelne Roboter orientierten sich dabei an ihrem Nachbarn. Vgl. Bonabeau Eric und andere, **Swarm Intelligence From Natural to artificial Systems**, Verlag: Oxford University Press, New York 1999, S. 7.

veranlagt sind: als Jäger, Viehzüchter, Ackerbauer, Gärtner, Weber, aber auch als Gastameisen, als Diebe, Räuber, Sklavenhalter<sup>8</sup> und Schmarotzer.“<sup>9</sup>

Auf der anderen Seite heißt das nicht, dass wir nicht vom Ameisenstaat lernen können. Denn genau das soll mit dem Inhalt dieser Diplomarbeit auch bewiesen werden. Es wird aber nur das Phänomen der Futtersuche untersucht. Dieses Ergebnis kann nicht herangezogen werden, um den Ameisenstaat in seinen gesamten Ausprägungen für weitere Analogien als vorbildlich zu bezeichnen.

## 1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

Das Verhalten der Ameisen bei der Futtersuche wird im Hinblick auf ihre Bedeutung für Optimierungsverfahren in der Betriebswirtschaft untersucht. Ein Anwendungsgebiet, um das Vorbild der Ameisen einzusetzen, ist der Logistikbereich. Problemstellungen wie das Travelling Salesman Problem (*Kapitel 2.1*) und das Vehicle Routing Problem (*Kapitel 2.2*) dienen als Ausgangssituation. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einsatz von Ameisenanalogien für Logistikproblemstellungen in der Praxis dargestellt. Anhand einer Befragung von Unternehmen werden Problemstellungen innerhalb des Travelling Salesman Problem eruiert und ein möglicher Einsatz von Ameisenalgorithmen festgestellt. Ziel dieser Arbeit ist herauszufinden, ob die befragten Unternehmen das Potenzial von Optimierungsverfahren mit Hilfe von Ameisenalgorithmen nutzen. Das Zutreffen folgender Hypothese wird im Rahmen dieser Diplomarbeit überprüft: „In den untersuchten Unternehmen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, Ameisenalgorithmen erfolgsversprechend für TSP und VRP einzusetzen, sie werden aber in nur wenigen Fällen genutzt.“ Anhand dieser Untersuchung wird die Schnittstelle zwischen den Anforderungen der Unternehmen an Optimierungsverfahren und jenen Anforderungen von mathematischer Seite, die als Grundvoraussetzungen für die Optimierung mit Ameisenalgorithmen notwendig sind, betrachtet. Falls die Hypothese sich bewahrheitet, werden die Gründe dafür ausreichend beleuchtet werden.

---

<sup>8</sup>Die sogenannte Amazonenameise dringt in ein Nest ein und tötet die Königin. Ihre Arbeiterinnen, die kurz danach schlüpfen, sind mit ihren dolchförmigen Waffen zwar ausgezeichnete Kämpfer, können aber selbständig keine Nahrung aufnehmen und werden ständig von Sklavenameisen gefüttert. Vgl. Bellmann Heiko, **Bienen, Wespen, Ameisen**, Verlag: Franckh-Kosmos, Stuttgart 1995, S. 111.

<sup>9</sup>Gößwald Karl, **Organisation und Leben der Ameisen**, Verlag: Wissenschaftliche Gesellschaft, Stuttgart 1985, S. 54.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchung von ausgewählten Unternehmen wird die formulierte Hypothese verifizieren oder falsifizieren. Auch wird in dieser empirischen Untersuchung der Vergleich von zwei Unternehmensgruppen vorgenommen. Einerseits werden Unternehmen die im Logistikbereich in Europa und Deutschland marktführend sind und andererseits werden Unternehmen in Österreich, die ebenfalls Logistikaufgaben zu lösen haben, aber nicht unmittelbar in der Logistikbranche tätig sein müssen, befragt. Es wird sich zeigen, welche Unterschiede die zwei Gruppen – bezogen auf die Fragestellung – aufweisen.

### **1.3 Methodik**

In den beiden Kapiteln „Travelling Salesman Problem“ (TSP) und „Vehicle Routing Problem“ (VRP) wird vor allem die Problemstellung dieser Forschungsgebiete präzisiert. Beide Problemstellungen werden auf Gemeinsamkeiten und Unterschiedlichkeiten geprüft und stellen daraufhin die Basis für die Anwendung eines Ameisenalgorithmus in *Kapitel 3* dar. Der erste Teil des *Kapitel 3* befasst sich mit der Beschreibung der Ameisen bei der Futtersuche bis zur Entwicklung eines geeigneten Werkzeuges für die Umsetzung dieser Analogie. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Anwendungsmöglichkeiten künstlicher Ameisen in Bezug zu den Problemstellungen aus den ersten beiden Kapiteln dargestellt. Der dritte und letzte Teil dieses Kapitels wird den Lösungsansatz „Ameisenalgorithmen“ mit anderen Lösungsansätzen vergleichen. Der theoretische Teil dieser Arbeit dient vor allem dazu, Ameisenalgorithmen näher zu beschreiben und einen sinnvollen Einsatz dieser aufzuzeigen. Nach dem theoretischen Teil dieser Diplomarbeit folgt die empirische Untersuchung. Die genaue Vorgehensweise der Untersuchung wird in *Kapitel 4.1* erklärt. Die Darlegung der Untersuchungsergebnisse, anhand derer sich die Hypothese verifizieren oder falsifizieren lässt, erfolgt in *Kapitel 4.2*.

## **2 LOGISTIKPROBLEMSTELLUNGEN**

### **2.1 Travelling Salesman Problem**

Der historische Ursprung des TSP (Travelling Salesman Problem) wird zu Beginn des 19. Jahrhunderts vermutet. „Die erste Erwähnung des TSP geht wahrscheinlich auf ein Buch

von B. F. Voigt zurück, das 1832 mit dem Titel ‚Der Handlungsreisende, wie er sein soll und was er zu thun hat, um Aufträge zu erhalten und eines glücklichen Erfolgs in seinen Geschäften sicher zu sein.‘<sup>10</sup> Wie bereits in diesem Buch erwähnt, behandelt das TSP auch heute das Problem von Handelsreisenden bei ihrer Routenwahl. Ein Handelsreisender möchte seine Kunden an unterschiedlichen Orten besuchen. Die Fragestellung für ihn lautet, in welcher Reihenfolge er die Kunden besuchen muss, um die kürzeste Wegstrecke zurückzulegen. Als „kürzeste Wegstrecke“ wird nicht unbedingt die kürzeste Entfernung gesehen, sondern jene mit dem geringsten Kostenaufwand. Da auch in der Literatur von der kürzesten Strecke gesprochen wird, aber die kostenminimalste Strecke gemeint ist, wird auch in dieser Arbeit die kürzeste Strecke als Synonym für die kostenoptimale verwendet.<sup>11</sup> Die zu besuchenden Städte, Kunden, Orte, usw., d.h. alle Stationen einer Route bzw. Rundreise, werden als Knoten bezeichnet. Knoten werden mit Kanten untereinander verbunden und diese Kanten stellen somit die Wegstrecke zwischen Knoten dar.

Als Beschränkung gilt, dass die Orte nur einmal besucht werden dürfen und dass der Handlungsreisende an einem Ausgangsort startet, an dem er auch nach seiner Route wieder zurückkehrt. Weiters sollen alle Städte optimal zu einer Route verbunden werden und die Bildung von einzelnen Kurzzyklen (abgegrenzten Teilrouten) soll vermieden werden, da nur eine Gesamtroute zum kostenoptimalen Ergebnis führt. Das beste Ergebnis wird dann erreicht, wenn der Handelsreisende die kürzeste Wegstrecke zurücklegt. Unterschieden wird zwischen symmetrischen TSP und asymmetrischen TSP. Für das symmetrische TSP ist die Strecke von A nach B gleich lang wie die Strecke von B nach A. Das asymmetrische TSP geht davon aus, dass die Strecke von A nach B nicht gleich lang wie jene von B nach A ist.

---

<sup>10</sup>Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band II: Wege und Touren, Verlag: Shaker, Aachen 2005, S. 316.

<sup>11</sup>Vgl. Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band I: Grundlagen, Verlag: Shaker, Aachen 2005, S. 44.

## 2.2 Vehicle Routing Problem

### 2.2.1 Capacitated Vehicle Routing Problem<sup>12</sup>

Das TSP dient vielen Optimierungsproblemen als Grundlage. Deshalb kann auch das VRP (Vehicle Routing Problem) bzw. das CVRP als Erweiterung des TSP gesehen werden und steht im engen Zusammenhang damit. Als Ergänzung werden die Kunden nicht nur „besucht“, sondern je nach Nachfrage von einem Depot aus mit Waren versorgt. Dadurch ergeben sich weitere Beschränkungen durch die Kapazitätsgrenze eines Fahrzeuges und die Tourlänge, die von einem Fahrzeug zu bewältigen ist. Gestartet und beendet wird die Tour beim Depot bzw. Lager. Zur Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage eines Kunden durch die Kapazität eines Fahrzeuges befriedigt werden kann. Nicht nur die Reihenfolge ist beim VRP entscheidend für die optimale Reise, sondern auch die Zuordnung der Kunden zu einer bestimmten Tour. Die Unterteilung in einzelne TSP dient der Reduzierung des Problems. Alle Kunden sollten aber zuvor einer Tour zugeordnet sein, um die einzelnen TSP zu optimieren. „Andererseits kann aber auch vor einer Optimierung der einzelnen Touren nicht entschieden werden, welcher Tour ein Kunde zuzuordnen ist. Das Zuordnungs- und das Reihenfolgeproblem sind somit interdependent.“<sup>13</sup>

### 2.2.2 Vehicle Routing Problem with Time Windows

Das Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) lässt das vorangegangene Problem noch ein wenig komplexer werden, da der Kunde nur innerhalb einer gewissen Zeitspanne beliefert werden kann. Diese kann zum Beispiel innerhalb der Geschäftszeit von 8:00 bis 19:00 liegen oder der Kunde muss z.B. innerhalb von zwei Stunden nach seiner Nachfrage beliefert werden, was wiederum eine hohe Anforderung an das Logistikmanagement stellt.

---

<sup>12</sup>Abgekürzt in weiterer Folge mit CVRP

<sup>13</sup>Müller Daniel Kai, **Analyse und Verbesserung von iterierter lokaler Optimierung für das Kapazitive Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern**, Diplomarbeit im Bereich Informatik/Wirtschaftsinformatik an der Fachhochschule Konstanz, 2003, S. 8.



Diese zuletzt erwähnte Beispiel wird in der Literatur auch unter dem Begriff Dial-a-Ride<sup>14</sup> angeführt, da der Kunde unmittelbar auf seine Nachfrage beliefert werden will (z.B. Maschinenreparatur, Behebung von Kommunikationsproblemen, Notfälle...). Einer besonderen Problemformulierung bedarf es im Bereich Gesundheitswesen. So stehen beispielsweise bei Rettungseinsätzen nicht unmittelbar die Kosten, sondern die rasche medizinische Versorgung bei einem Notfall im Vordergrund.

Nicht nur aus Kundensicht ergeben sich zeitliche Beschränkungen des Liefervorganges, sondern auch auf Unternehmerseite. Beispielsweise steht nicht jeder LKW zu jeder Zeit zur Verfügung (Wochenendfahrverbot, Wartungsarbeiten, gesetzlich vorgeschriebene Pausen des Lenkers, ...). Daraus ergeben sich Zeitfenster innerhalb dieser Lieferungen zum Kunden durchgeführt werden können.

### 3 AMEISENALGORITHMEN

Dieses Kapitel gibt eine detaillierte Einführung in die Theorie der Ameisenalgorithmen und zeigt wie diese eingesetzt werden können. Um überhaupt Ameisenalgorithmen bilden zu können, dient das System der Ameisen bei der Futtersuche als Vorbild und Grundlage. Im *Kapitel 3.1 Futtersuche der Ameisen* werden der Vorgang und die Besonderheiten auf dem Weg vom Nest bis zu einer Futterstelle erklärt und der Grundstein für Ameisenalgorithmen gelegt. Im anschließenden *Kapitel 3.2 Algorithmen mit künstlichen Ameisen* wird beschrieben, wie aus dem Vorbild der Natur Optimierungsaufgaben gelöst werden können. Aufbauend auf die Problemstellungen der *Kapitel 2.1 Travelling Salesman Problem* und *Kapitel 2.2 Vehicle Routing Problem* werden Ameisenalgorithmen hinsichtlich ihres Lösungsbeitrages analysiert. Geklärt wird unter anderem, in welchen Fällen der Einsatz von Ameisenalgorithmen Sinn macht und wann man an Grenzen für deren Einsatz stößt. Im letzten *Unterkapitel 3.4 Ameisenalgorithmen im Vergleich zu*

---

<sup>14</sup>Vgl. Savelsberg M.W.P/Sol M., **The General Pickup and Delivery Problem**, Georgia Institut of Technology and Eindhoven University of Technology, 2001. S. 1-41, URL: <http://www2.isye.gatech.edu/~mwps/publications/ts29.pdf>, 11.06.06, 17:30. Vgl. auch Cordeau Jean Francois/Laporte Gilbert, **The Dial-a-Ride Problem (DARP): Variants, modelling issues and algorithms**, GERAD-HEC Montréal, 2002, S. 1-13, URL: [https://www.univie.ac.at/bwl/prod/teaching/LVAs/KFK-Seminar/WS0506/Cordeau\\_DialARide.pdf](https://www.univie.ac.at/bwl/prod/teaching/LVAs/KFK-Seminar/WS0506/Cordeau_DialARide.pdf), 11.06.06, 18:07.

anderen Lösungsansätzen wird der Einsatz von Ameisenalgorithmen im Vergleich zu anderen Optimierungsansätzen kritisch betrachtet.

### 3.1 Futtersuche der Ameisen

Im Jahr 1911 erhält der Belgier Maeterlinck den Nobelpreis für seine Arbeit, "Das Leben der Termiten und das Leben der Ameisen" und rätselt in einem Experiment über die Verständigung der Ameisen: "... von siebzig Stecknadeln, die in einer Korkscheibe stecken, tragen drei ein Stückchen honiggetränkter Pappe auf dem Kopfe. Nach fünf Tagen zeigt die Endstatistik, dass von 157 Ameisen 104 zu den Honignadeln gingen und 43 zu den 67 anderen."<sup>15</sup> Daraus folgert Maeterlinck: „Die Fühlersprache muss recht primitiv sein, was daraus erhellt, dass die Ameisen, können sie sich sonst kein Gehör verschaffen, die Sache selbst vormachen und die anderen geradewegs dazu zwingen."<sup>16</sup> Maeterlinck erahnte nur zum Teil das dahinter steckende System der Ameisen bei der Futtersuche. Die Ameisen werden weder von anderen gezwungen einen bestimmten Weg einzuschlagen, noch erfolgt die Kommunikation über die Fühler. Wie kann deshalb ein einzelnes, blindes<sup>17</sup> Lebewesen wie die Ameise, den kürzesten Weg vom Nest zur Futterstelle finden, wenn ein Grashalm bereits ein Hindernis darstellt?

Eine einzelne Ameise würde solange „herumirren“<sup>18</sup>, bis sie die Futterstelle mit ihrem Geruchssinn wahrnimmt. Somit ist der Erfolg abhängig von der Wahrscheinlichkeit des Findens einer Futterstelle von einer Ameise. Die einzelne Ameise ist also sehr ineffektiv bei ihrer Futtersuche. In der Gruppe sind Ameisen aber so gut organisiert, dass sie solche komplexen Probleme sehr erfolgreich lösen. Was eine einzelne Ameise nicht bewältigen könnte, wird durch die so genannte „Schwarm-Intelligenz“ gelöst.

---

<sup>15</sup>Maeterlinck Maurice, **Nobelpreis für Literatur 1911**, Verlag: Coron, Stuttgart 1911, S. 293f.

<sup>16</sup>Maeterlinck Maurice, **Nobelpreis für Literatur 1911**, Verlag: Coron, Stuttgart 1911, S. 293f.

<sup>17</sup>Die Ameisen sind in ihrem Artenreichtum sehr unterschiedlich mit Sehorganen ausgestattet. Der Großteil der Ameisen besitzt sehr zurückgebildete Sehorgane. Einige Arten kommen ohne jegliche Sehorgane aus. Die Futtersuche funktioniert aber bei allen nach demselben Prinzip. Vgl. Gößwald Karl, **Organisation und Leben der Ameisen**, Verlag: Wissenschaftliche Gesellschaft, Stuttgart 1985, S. 99.

<sup>18</sup>Mit „herumirren“ ist nicht Orientierungslosigkeit gemeint. Zumindest die mit Sehvermögen ausgestatteten Ameisen besitzen die Fähigkeit der Sonnenorientierung und allen Ameisen wurden Reaktionen auf elektromagnetische Wellen nachgewiesen. Vgl. Gößwald Karl, **Organisation und Leben der Ameisen**, Verlag: Wissenschaftliche Gesellschaft, Stuttgart 1985, S. 99ff.

Die Aufgaben innerhalb eines Ameisenstaates werden durch streng zugeteilte Arbeitsgruppen erfüllt, deshalb ist nicht nur eine einzelne Ameise, sondern ein ganzer Arbeitstrupp mit der Futtersuche vertraut. Je mehr Ameisen es gibt, desto mehr unterschiedliche Wege zur Futterstelle werden erschlossen. Die Auswahl der Wege wird zu Beginn, d.h. wenn noch keine Ameise den Weg zu einer Futterstelle gefunden hat, nur durch Zufall bestimmt. Die Besonderheit ist, dass Ameisen über Duftstoffe miteinander kommunizieren. Jede Ameise besitzt auf ihrem Hinterleib eine Drüse, wodurch sie ein Pheromon freisetzt. „Der Begriff ‚Pheromon‘ stammt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Wörtern ‚pherein‘ = tragen und ‚hormon‘ = antreibend, zusammen. ... Pheromone sind Ektohormone, das bedeutet, chemische Botenstoffe, die außerhalb des Körpers transportiert werden und im Organismus des Empfängers ganz bestimmte Reaktionen, wie physiologische Prozesse oder bestimmte Verhaltensweisen, auslösen können.“<sup>19</sup> Bei dem Spurpheromon der Ameisen handelt es sich um ein so genanntes Releaser-Pheromon, das dadurch gekennzeichnet ist, dass es eine Verhaltensänderung auslöst.<sup>20</sup> Auf der Suche nach Nahrung legt jede Ameise ihren individuellen Duftpfad. Folglich erschließen Ameisen im Kollektiv ein für das Auge unsichtbares Netz an möglichen Straßen zur Futterstelle. Wesentliche Bedeutung liegt aber darin, die kürzeste Verbindung zwischen Nahrung und Nest zu finden. Ein Pheromon hat die Eigenschaft, dass es sich nach einer gewissen Zeit verflüchtigt. Die Ameise, die den kürzesten Weg genommen hat, ist auch als erste wieder im Nest. Für alle nachfolgenden Ameisen bedeutet dies, dass ihr Weg noch sehr viel Pheromon aufweist. Anhand des Pheromons orientieren sich die nachfolgenden Individuen und wählen mit hoher Wahrscheinlichkeit den Weg, der am stärksten mit Pheromonen angereichert wurde, also den kürzesten. Außerdem unterscheiden sich Ameisenvölker durch diesen Pheromonduft untereinander und die Straßen werden so angelegt, dass sie sich nie mit einer Straße eines anderen Ameisenvolkes kreuzen.

Die nachfolgende *Abbildung 1* verdeutlicht die Futtersuche der Ameisen mit einem Experiment. Eine bestimmte Anzahl von Ameisen wird auf dem Weg vom Nest zur Nahrung beobachtet. Im Beispiel A sind die Entfernungen zur Futterstelle gleich lang.

---

<sup>19</sup>Atzmüller M./Grammer K., **Biologie des Geruchs: Die Bedeutung von Pheromonen für Verhalten und Reproduktion**, in: Speculum – Zeitschrift für Gynäkologie und Geburtshilfe 2000, Ausgabe 18, S. 13, URL: <http://www.kup.at/kup/pdf/286.pdf>, 25.05.2006, 07:46.

<sup>20</sup>Vgl. Rietdorf Matthias, **Identifizierung und Synthese flüchtiger Substanzen aus Säugetieren**, Dissertation am Institut für Organische Chemie an der Universität Hamburg, 2002, S. 10, URL: <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2002/670/pdf/dissertation.pdf>, 06.06.06, 08:20.

Beide Wege werden bis auf einen geringen Anteil gleich häufig frequentiert. Zwei unterschiedlich lange Wege zu einer Nahrungsquelle kennzeichnen das Beispiel B. Nach einer gewissen Zeit kristallisiert sich heraus, dass sich der Großteil für den kürzeren Weg entscheidet.

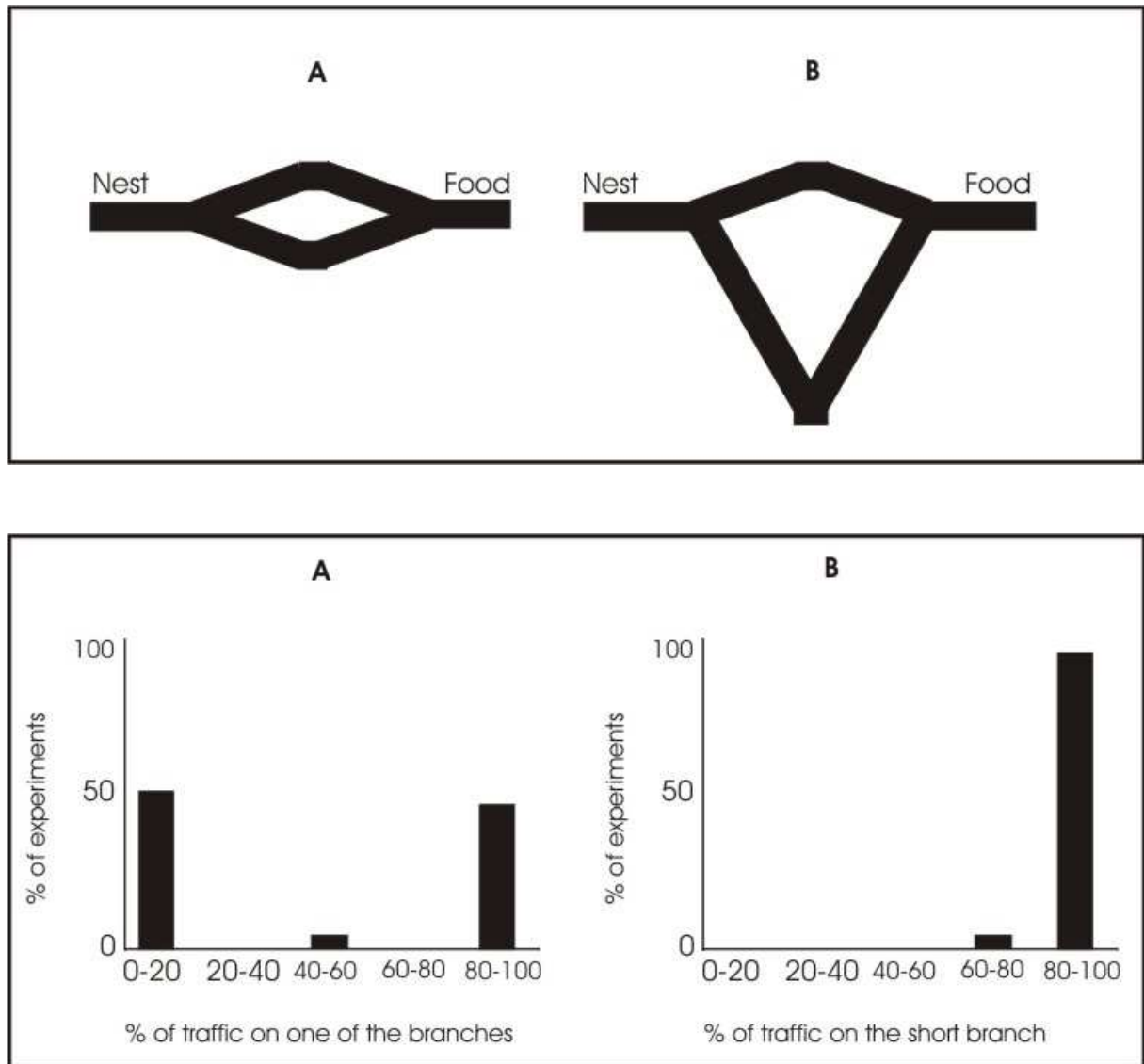


Abbildung 1: Double Bridge Experiments<sup>21</sup>

Eine geringe Anzahl von Ameisen hebt sich im Beispiel B von der Masse ab. Das könnte damit begründbar sein, dass dieser Teil weiter die Aufgabe besitzt, neue Wege zu erkunden. Eine bestehende Ameisenstraße bedeutet nicht zwangsläufig, dass es sich

<sup>21</sup>Quelle: Dorigo Marco/Stützle Thomas, **Ant Colony Optimization**, Verlag: a Bradford book, Cambridge 2004, S. 3.

tatsächlich um den kürzesten Weg handelt, sondern, dass die Ameisenstraße den kürzesten zurzeit gefundenen Weg darstellt. Obwohl dieses Finden des kürzesten Weges keine exakte Berechnung darstellt, ist sie doch in der Welt der Ameisen sehr erfolgreich. Aus der Sicht der Ameisen alle möglichen Wege vom Nest zur Futterquelle in einer Wiese (man stelle sich wieder unzählige Hindernisse vor) zu kennen, um überhaupt den exakten Weg herausfiltern zu können, ist unmöglich. In so einem komplexen System mit unvollständiger Information stellt die Futtersuche mit Hilfe von Pheromonspuren ein erfolgreiches Instrument dar. Die Futtersuche ist ein gut nachvollziehbares Beispiel für einen positiven Feedback Prozess in einem selbstorganisierenden System, stößt aber auch an ihre Grenzen. In einem weiteren Experiment wurde festgestellt, dass – hat sich einmal eine Ameisenstraße etabliert – es schwierig ist, den bestehenden Verbindungsweg zur Futterstelle auf einen anderen Weg umzulenken. Zum Beispiel wenn sich ein kürzerer Weg nach Entfernen eines Hindernisses eröffnet. Die Pheromonspur auf dem stark frequentierten Weg dominiert, obwohl es einen kürzeren Weg gibt. Der Großteil der Ameisen wählt weiterhin den längeren Weg.<sup>22</sup>

### 3.2 Algorithmen mit künstlichen Ameisen

Nicht nur für das TSP und VRP werden Ameisenalgorithmen eingesetzt, sondern für eine Vielzahl von Problemstellungen. Einen Überblick zeigt die nachfolgende *Abbildung 2*:

Problemstellung	Fundort
Travelling Salesman Problem	Dorigo u.a. (1991), Dorigo u.a. (1996), Dorigo und Gambardella(1997), Stützle und Dorigo (1999), Bullnheimer u.a. (1997)
Vehicle Routing Problem	Bullnheimer u.a. (1999), Gambardella u.a. (1999)
Quadratic Assignment Problem	Stützle und Hoss (1998), Stützle und Dorigo (1999), Gambardella u.a. (1999)
JIT Sequencing Problem	McMullen (2001)
Graph Coloring	Costa und Hertz (1997)

<sup>22</sup>Vgl. Dorigo Marco/Stützle Thomas, **Ant Colony Optimization**, Verlag: a Bradford book, Cambridge 2004, S. 4f.

Shortest Common Supersequence Problem	Michel und Middendorf (1999)
Constraint Satisfaction Problem	Roli u.a. (2001)
Sequential Ordering Problem	Gambardella und Dorigo (2000)
Routing in Telekommunikationsnetzwerken	Di Caro und Dorigo (1997 und 1998), Schoonderwoerd u.a. (1997)
Project Scheduling Problem	Merkle u.a. (2000), Boysen u.a. (2002)
Physikalische Speicherung von Daten im Data Warehouse	Maniezzo u.a. (2001)
Graph Partitioning	Kuntz und Snyers (1994)
Scheduling	Colorni u.a. (1994); Stützle (1998), Merkle und Middendorf (2000), Stützle u.a. (2000), Gagne u.a. (2001 und 2002), T'kindt u.a. (2002)
Assembly Line Balancing	Bautista und Pereira (2000)
Zuweisung von Radiofrequenzen	Maniezzo und Carbonaro (2000)
Portfolio-Selection	Maringer (2002)
Anordnung der Tasten auf einer Tastatur	Eggers u.a. (2003)

Abbildung 2: Einsatzgebiete von Ameisenalgorithmen<sup>23</sup>

Künstliche Ameisen werden in Form eines Computerprogramms ihren natürlichen Vorbildern nachempfunden. Wenn man ein Computerprogramm schreibt, benötigt man zuerst ein Verfahren zur Lösung eines Problems, einen Algorithmus. „Der Begriff *Algorithmus* wird in der Informatik verwendet, um ein Verfahren zur Lösung eines Problems zu beschreiben, das für eine Realisierung in Form eines Programms geeignet ist.“<sup>24</sup> Das Optimierungsverfahren mit künstlichen Ameisen funktioniert nach natürlichem Vorbild. Eine Anzahl von (künstlichen) Ameisen wird losgeschickt, um durch „Ausprobieren“ den kürzesten Weg zu finden. Ebenso verstärkt in der Nachbildung eine „Pheromonspur“ den kürzesten Weg. Die künstlichen Ameisen verhalten sich ähnlich wie ihre Vorbilder, aber sie unterscheiden sich von ihnen insofern, als sie einerseits sehr wohl

<sup>23</sup>Quelle: (leicht modifiziert) Boysen Nils, **Ameisenalgorithmen**, Institut für Industriebetriebslehre und Organisation an der Universität Hamburg, S. 10, URL: <http://www.ibl-unihh.de/ameisenalgorithmen.pdf>, 08.06.06, 08:17.

<sup>24</sup>Sedgewick Robert, **Algorithmen**, 2. Aufl., Verlag: Pearson Studium, München 2002, S. 22.

„sehen“ können, also Informationen über ihre Umgebung haben und diese auch nutzen und andererseits über ein gutes „Gedächtnis“ verfügen, wodurch sichergestellt wird, dass nur zulässige Lösungen als Ergebnis in Frage kommen.<sup>25</sup> Bei der Konstruktion der künstlichen Ameisenkolonie sind folgende Punkte von Bedeutung:<sup>26</sup>

- Die gewählte Anzahl der Ameisen für das Modell
- Der Startort der Ameisen in dem Graphen des Problems
- Die problemtypischen Informationen, die die Ameise speichern soll
- Die Wahl der „Duftintensität“ der Futterquelle
- Die Wahl der „Duftintensität“ der Pheromonspur
- Das Bilden einer genauen Funktion
- Die Festlegung des Zeitpunkts, wann die Pheromonspur „verdampfen“ soll

Auf diese zu beachtenden Punkte für die Erstellung eines Ameisenalgorithmus wird in weiterer Folge (*Kapitel 3.3*) noch genau – speziell zugeschnitten auf das TSP und VRP – eingegangen.

### 3.2.1 Heuristik – Metaheuristik

Für die Zuordnung der Ameisenalgorithmen zu den Metaheuristiken sind einige Begriffserklärungen nötig. Einerseits, um bewusst zu machen, für welche Probleme Ameisenalgorithmen eingesetzt werden können und andererseits, um die Vorgehensweise dieser Metaheuristik näher zu erklären.

"Heuristik" bedeutet "finden, entdecken" und stammt aus dem Griechischen.<sup>27</sup> Die Lösung eines Optimierungsproblems mit Hilfe einer Heuristik ist dann relevant, wenn es sich um sogenannte *NP*- Probleme<sup>28</sup> handelt.

Aus der Sicht der Mathematik sind Heuristiken aus zwei Gründen anwendbar:<sup>29</sup>

---

<sup>25</sup>Vgl. Bullnheimer Bernd/Strauß Christine, **Tourenplanung mit dem Ant System**, Forschungsberichte des Instituts für Betriebswirtschaftslehre der Universität Wien, o. V., 1996, S. 3.

<sup>26</sup>Vgl. Rosenow Silke, **Effiziente Heuristiken für das Probabilistische Travelling Salesman Problem**, Verlag: Peter Lang, Frankfurt 2002, S. 131.

<sup>27</sup>Vgl. Fiedler Claudia u.a., **Meta-Heuristiken als moderne Lösungskonzepte für komplexe Optimierungsprobleme**, S. 2, URL: [http://www.uni-graz.at/ifwwwwww\\_meta\\_wisu\\_2000.pdf](http://www.uni-graz.at/ifwwwwww_meta_wisu_2000.pdf), 20.09.06, 15:27.

<sup>28</sup>Siehe *Kapitel 3.2.2 NP-vollständige Probleme*.



- Eine exakte Berechnung würde die zur Verfügung stehende Zeit überschreiten.
- Der notwendige Speicherbedarf übertrifft die vorhandene Speicherkapazität.

Aus der Sicht von Unternehmen können Heuristiken aber auch zum Einsatz kommen, wenn die oben genannten Kriterien nicht zutreffen:

- Das Verständnis und somit die Akzeptanz für Heuristiken kann größer sein, falls diese einfacher zu verstehen sind als exakte Methoden.
- Die Software (Implementierungsaufwand) als auch die Hardware (z.B. Rechnerleistung) können bei Heuristiken kostengünstiger sein.
- Heuristiken können als Lehrmittel verwendet werden, um Unternehmen das Potential verschiedener Entscheidungsstrategien zu vermitteln.

Im Gegensatz zu optimierenden bzw. exakten Verfahren wird die Lösung nicht exakt berechnet, sondern ihr angenähert. Ein Optimierungsproblem soll mit einer Heuristik mit möglichst geringem Aufwand möglichst gut gelöst werden. "Der geringe Aufwand" bezieht sich auf den Rechen- und Speicheraufwand einer Heuristik. Eine "gute Lösung" ist dann gefunden, wenn die Lösung sehr nahe an dem Ergebnis liegt, das die exakte Methode ergeben hätte. Im *Kapitel 3.4* wird ein Vergleich mit verschiedenen Heuristiken vorgenommen, um zu sehen wie nahe verschiedene heuristische Verfahren am Optimum liegen und wie erfolgreich ein Ameisenalgorithmus eingesetzt werden könnte.

Oft sind Heuristiken problemspezifisch, d.h. eine Methode, die für ein Problem geeignet ist kann für ein anderes Problem nicht verwendet werden.<sup>30</sup> Metaheuristiken stellen Techniken dar, die eine große Zahl von Problemen lösen können. "Eine Metaheuristik ist ein übergeordneter Algorithmus, der die Lösungssuche eines oder mehrerer abhängiger Algorithmen steuert. Sie beruht auf eine Sammlung von (Meta-) Strategien, die

---

<sup>29</sup>Vgl. Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band I: Grundlagen, Verlag: Shaker, Aachen 2005, S. 183.

<sup>30</sup>Vgl. Boryczka Urszula/Boryczka Mariusz, **Multi-cast ant colony system for the bus routing problem**, in: Resende Mauricio (Hrsg.)/de Sousa Jorge Pinho (Hrsg.), **Metaheuristics: Computer Decision-Making**, Verlag: Kluwer Academic Publishers, Boston u.a. 2004, S. 98f.



unabhängig vom zugrundeliegenden Problem und den abhängig gesteuerten Algorithmen sind."<sup>31</sup>

Man kann Metaheuristiken daran unterscheiden, ob sie auf so genannten Construction Algorithm oder Local Search basieren. Bei Construction Algorithm wird Schritt für Schritt eine Lösung aufgebaut. Bei Local Search wird eine Anfangslösung durch Veränderungen verbessert. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist, ob gleichzeitig eine Population von Lösungen oder nur eine Lösung hervorgebracht wird. Die Ant Colony Optimization basiert auf Construction Algorithm und arbeitet mit einer Population von Metaheuristiken.<sup>32</sup>

Für den Einsatz von Ameisenalgorithmen muss man sich vor Augen halten, dass die Lösung nicht das Optimum darstellt. Die Verwendung eines Ameisenalgorithmus macht aus mathematischer Sicht nur dann Sinn, wenn es sich um *NP* Probleme (siehe nachfolgendes *Kapitel 3.2.2*) handelt und daher exakte Optimierungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. In den darauffolgenden Kapiteln werden verschiedene Ameisenalgorithmen erklärt, die alle zur Lösung des TSP und VRP beitragen.

### 3.2.2 NP-vollständige Probleme

Mit Aufwandsabschätzungen soll eine Beurteilung von Komplexität bei Algorithmen hinsichtlich Rechenzeit und benötigtem Speicher vorgenommen werden. Dazu werden Algorithmen in zwei Klassen eingeteilt.

#### **Klasse *P***

Mit der Klasse *P* werden Probleme bezeichnet, bei denen der Rechenaufwand des Algorithmus höchstens polynomial mit der Größe der Eingabe wächst. Diese Probleme gelten als einigermaßen handhabbar, da Polynome langsamer als jede exponentielle Funktion wachsen.<sup>33</sup> Für diese Probleme werden deterministische Algorithmen eingesetzt. Existiert für einen Algorithmus – egal zu welchem Zeitpunkt – für das, was er als nächstes tun kann, nur eine Möglichkeit, spricht man von deterministisch. Bestehen mehrere Möglichkeiten handelt es sich um einen nichtdeterministischen Algorithmus.

---

<sup>31</sup>Vgl. Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band I: Grundlagen, Verlag: Shaker, Aachen 2005, S. 188.

<sup>32</sup>Vgl. Hemmelmayr Vera, **Ant Colony Optimization für das periodische Traveling Salesman Problem**, Diplomarbeit, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Wien, 2005, S. 8.

<sup>33</sup> Vgl. Gerdes Ingrid/Klawonn Frank/Kruse Rudolf, **Evolutionäre Algorithmen**, 1. Auflage, Verlag: Vieweg, Wiesbaden 2004, S. 228.

## Klasse NP

Unter der Klasse *NP* versteht man alle Probleme, die mit Hilfe nichtdeterministischer Algorithmen in polynomialer Zeit gelöst werden können. „Man vermutet, dass *P* echt in *NP* enthalten ist. Einen Beweis dafür hat man aber bisher noch nicht gefunden. Man müsste dafür ein Problem in *NP* finden, für das man zeigen kann, dass es keinen (deterministischen) Algorithmus gibt, der es in polynomialer Zeit löst.“<sup>34</sup> Lässt sich ein *NP*-Problem – davon wird ausgegangen, da noch kein Gegenbeweis erbracht wurde – auf *P* zurückführen, spricht man von *NP-harten* Problemen. Ein vertretener Ansatz um ein Argument zu finden, dass Probleme ausschließlich der Klasse *NP* – man spricht dann von *NP-vollständig* – angehören, ist die polynomiale Reduzierbarkeit.<sup>35</sup> Darunter versteht man ein *NP-vollständiges* Problem, das mit einem polynomialer Zeit ablaufenden Algorithmus gelöst werden kann. Dies würde dann die Existenz von in polynomialer Zeit ablaufenden Algorithmen für die Lösung von allen *NP*-Problemen implizieren. Ein Beispiel eines *NP-vollständigen* Problems wäre das Problem des Handlungsreisenden (TSP).

## 3.3 Ameisenalgorithmen für die Lösung von TSP und VRP

Für die Problemstellungen von TSP und VRP scheinen Ameisenalgorithmen bestens geeignet zu sein, denn beide sind *NP-vollständig*. Bereits die Speicherung einer Distanzmatrix ist beim TSP mit großem Aufwand verbunden. Ein symmetrisches 10.000-Städte-TSP benötigt 50 Millionen Einträge.<sup>36</sup> Im schlechtesten Fall müssen zum Beispiel zur optimalen Lösung eines symmetrischen TSP mit 10 Städten 181.440 (Formel:  $(n-1)!/2$ )<sup>37</sup> verschiedene Rundreisen untersucht werden. Steigt die Anzahl der Städte auf 20,

---

<sup>34</sup>Gerdtes Ingrid/Klawonn Frank/Kruse Rudolf, **Evolutionäre Algorithmen**, 1. Auflage, Verlag: Vieweg, Wiesbaden 2004, S. 229.

<sup>35</sup>Vgl. Sedgewick Robert, **Algorithmen**, 2. Aufl., Verlag: Pearson Studium, München 2002, S. 721.

<sup>36</sup>Vgl. Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band II: Wege und Touren, Verlag: Shaker, Aachen 2005, S. 318.

<sup>37</sup>Vgl. Vinay Kumar K./ Yogeeshha C.B., **Design of Combinatorial Optimization Problem using Neurodynamic Hopfield Networks**, National Institute of Technology Karnataka, o. J., S. 3, URL: <http://www.nitcrs.com/iccs/iccs2004/Papers/247%20C%20B%20Yogeeshha.pdf#search=%22tsp%2B181440%22>, 02.09.06, 20:45.

liegt die Zahl der möglichen Rundreisen bei ungefähr 61 Billionen.<sup>38</sup> In den nächsten Kapiteln werden Ameisenalgorithmen vorgestellt, deren Einsatz vor allem für TSP und VRP zugeschnitten ist. An der Entwicklung von Ameisenalgorithmen waren *Dorigo*, *Gambardella* und *Stützle* maßgebend beteiligt. Auf Werke dieser Autoren und auf Arbeiten von *Bullnheimer* und *Hartl* wird bei der Erklärung der folgenden Ameisenalgorithmen Bezug genommen.

### 3.3.1 Ant System, AS

Mit dem Algorithmus „Ant System“ (AS) wird die Analogie aus der Futtersuche der Ameisen für das TSP und VRP realisiert. Bei Ant System handelt es sich um das Basisinstrument. Alle weiteren vorgestellten Algorithmen stellen Erweiterungen des AS dar.

Die Bestimmung der Variablen, die hier näher erklärt werden, ist für die Optimierung von zentraler Bedeutung. Der Weg der Ameisen<sup>39</sup> wird durch einen Graphen abgebildet, der aus Knoten und Kanten<sup>40</sup> besteht. Die Kanten sind aber im Gegensatz zum natürlichen Vorbild vorgegeben (z.B. durch die vorhandene Infrastruktur, Verkehrsbeschränkungen, usw.). Die Entfernung vom Knoten  $i$  zum Knoten  $j$  wird mit  $d_{ij}$  angegeben und stellt die Gewichtung der Kanten dar. Es wird im Weiteren von einem nicht gerichteten – im Gegensatz zu einem gerichteten – Graphen ausgegangen, das heißt, es handelt sich um ein symmetrisches TSP. Mit  $m$  wird die Anzahl der Ameisen und mit  $t_{max}$  die Anzahl der Durchläufe ( $t$ ) bis der Algorithmus beendet ist, definiert. Die Anzahl der Städte wird mit  $n$  definiert. Abhängig von der Art des Ameisenalgorithmus sollte die Anzahl der gewählten Ameisen beim symmetrischen TSP generell genau der Anzahl der Städte entsprechen.<sup>41</sup> Im

---

<sup>38</sup>Müller Daniel Kai, **Analyse und Verbesserung von iterierter lokaler Optimierung für das Kapazitive Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern**, Diplomarbeit im Bereich Informatik/Wirtschaftsinformatik an der Fachhochschule Konstanz, 2003, S. 16.

<sup>39</sup>Zur Beschreibung des Algorithmus wird „Ameise“ als Synonym für „künstliche Ameise“ verwendet.

<sup>40</sup>Die Erklärung der Begriffe „Kanten“ und „Knoten“ wurde bereits im Kapitel 2 vorgenommen.

<sup>41</sup>Vgl. Bullnheimer Bernd u.a., **A New Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, S. 6, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:12.

Kapitel 3.3.4 erklärten Ant Colony System werden 10 Ameisen eingesetzt.<sup>42</sup> Für jede Ameise gelten bestimmte Restriktionen:

- Die Ameise darf keinen Knoten zweimal besuchen. Um das zu erreichen, besitzt die Ameise eine Art Gedächtnis. Für jede Ameise  $k$  und jeden Knoten  $i$  existiert eine Liste  $J_i^k$  worin ersichtlich ist, welcher Knoten von dieser Ameise noch nicht besucht wurde. Hat die Ameise ihren Durchlauf beendet und startet einen Neuen, ist die Liste wieder leer.
- Hat die Ameise einen Knoten erreicht, stellt sich die Frage, welchen Knoten sie als nächstes besucht. Dazu verfügt die Ameise über das Wissen, welcher Knoten ihr am nächsten ist. Das setzt voraus – wie bereits vorher erwähnt – dass die Kanten (geographischen Daten bzw. Entfernungen) bekannt sind. Diese lokale Information über das Wissen des nächstgelegenen Knotens kann als statisch betrachtet werden, da es sich nicht verändert.
- Neben der lokalen Information existiert auch eine globale Information in Form der Pheromonmenge  $\tau_j$  jeder Kante. Im Gegensatz zur lokalen Information ist die globale Information nicht statisch, sondern verändert sich im Laufe der Durchgänge. Sie zeigt die bisherigen Erfahrungen der Ameisen.

Die Wahrscheinlichkeit, für welchen Knoten sich die Ameise als nächstes entscheidet, kann durch eine **Übergangsregel** abgebildet werden:<sup>43</sup>

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[t_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} ([\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta)} \quad (1)$$

Die Formel kann natürlich nur angewendet werden wenn  $j$  in der Liste  $J_i^k$  enthalten, d.h. wenn der Knoten noch nicht besucht wurde. Die Variablen  $\alpha$  und  $\beta$  können frei gewählt werden und stellen die Einflussgrößen von lokaler und globaler Information dar.  $\alpha$  stellt die globale Information dar. Ist  $\alpha = 0$  bedeutet das, dass keine Erfahrungen – ausgedrückt durch das Pheromon – existieren. Die lokale Information wird durch  $\beta$  ausgedrückt. Ist

---

<sup>42</sup>Vgl. Dorigo Marco/Stützle Thomas, **Ant Colony Optimization**, Verlag: a Bradford book, Cambridge 2004, S. 71.

<sup>43</sup>Vgl. Colomi Alberto u.a., **Distributed Optimization by Ant Colonies**, Dipartimento die Elettronica, Politecnico di Milano, S. 2, URL: <http://www.cs.ualberta.ca/~bulitko/F02/papers/IC.06-ECAL92.pdf>, 11.06.06, 12:21.

dieser Wert = 0, heißt das, es wird nur der Weg begangen, der am häufigsten benutzt wird. Mit der Wahl des Verhältnisses von  $\alpha$  und  $\beta$  soll dem beschriebenen Problem in *Kapitel 5.4*<sup>44</sup> entgegen gewirkt werden.

Mit der Übergangsregel werden nicht nur Knoten mit lokaler und globaler am besten erscheinender Information ausgewählt, sondern die Ameisen können aufgrund der Wahrscheinlichkeit auch Knoten mit niedriger Qualität wählen. Damit wird ermöglicht, dass die Ameisen – bezogen auf die gesamte Tour – kürzere Wege finden.

Nicht nur das Verhältnis von  $\alpha$  und  $\beta$  ist für den Algorithmus von Bedeutung, sondern auch die **Pheromon-Update-Regel**.

Eine Ameise hinterlässt auf ihrer beschrittenen Kante  $(i, j)$  eine Pheromonspur  $\tau_{ij}$ . Die Menge an Pheromon ist aber abhängig von der Qualität der Lösung:<sup>45</sup>

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \frac{Q}{L_k(t)} \quad (2)$$

$L_k$  bezeichnet die Länge der Tour  $t$  der Ameise  $k$ . Mit  $Q$  wird ein Parameter bezeichnet, dessen Wert möglichst nahe an der optimalen Tourlänge liegen sollte.  $Q$  wird deshalb vorab mittels einer heuristischen Methode berechnet. Ist eine Kante  $(i, j)$  nicht in Tour  $(t)$  der Ameise  $(k)$  enthalten, so  $\Delta \tau_{ij}^k(t) = 0$ .

$p$  gibt weiters einen Faktor von 0 bis 1 für die Verdunstung des Pheromon an. Die **Pheromon-Update-Regel** lautet:<sup>46</sup>

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - p) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (3)$$

Die Pheromon-Update-Regel besagt einerseits durch den Verdunstungsfaktor, wie lange der Pheromonduft wirken soll und andererseits wird die Intensität anhand der Qualität der Lösung bestimmt. Damit sollen zwei Probleme gelöst werden:

- Der Verdunstungsfaktor beeinflusst das Erkunden neuer Wege. Je rascher das Pheromon verdunstet, desto mehr Wege werden erforscht.

---

<sup>44</sup>Zur Erinnerung: Hat sich bei den natürlichen Ameisen einmal ein Weg durchgesetzt – es muss nicht unbedingt der kürzeste sein – ist es schwer einen neuen Weg zu etablieren. Um aber im Modell den möglichst kürzesten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu finden, gibt es die lokale Information.

<sup>45</sup>Bonabeau Eric u.a., **Swarm Intelligence From Natural to artificial Systems**, Verlag: Oxford University Press, New York 1999, S. 41.

<sup>46</sup>Bonabeau Eric u.a., **Swarm Intelligence From Natural to artificial Systems**, Verlag: Oxford University Press, New York 1999, S. 41.

- Mit der Bestimmung der Intensität des Pheromons anhand der Qualität der Lösung soll vermieden werden, dass sich eventuell Wege durchsetzen, die nicht den Kürzesten darstellen.

### 3.3.2 Hybrid Ant System, HAS

Mit dem Hybrid Ant System (HAS) werden zwei Methoden miteinander kombiniert. Neben dem AS kommt eine Lokale Suchmethode zum Einsatz. Lokale Suchmethoden haben den Vorteil, dass sie aus einer Menge von guten Lösungen rasch eine sehr gute Lösung finden. In einem Umfeld von schlechten Lösungen dauert es aber sehr lange, bis eine gute Lösung gefunden wird. Ant Colony Algorithmen arbeiten genau gegenteilig. Sie finden aus schlechten Lösungen sehr schnell gute Lösungen, haben aber Probleme beim Finden von sehr guten Lösungen aus einer Menge von guten Lösungen. Nachdem also Ameisenalgorithmen gute Lösungen gefunden haben, werden je nach Problemstellung unterschiedliche lokale Suchmethoden eingesetzt, um das Ergebnis weiter zu verbessern.<sup>47</sup> Einer der ersten Beispiele eines HAS Algorithmus ist der Ant-Q Algorithmus:

### 3.3.3 Ant-Q

Eine Weiterentwicklung des Ant System stellt der Ant-Q Algorithmus dar.  $Q$  leitet sich von dem Begriff *Q-learning*<sup>48</sup> ab, der das selbstverstärkende Lernen beschreibt. Bereits im Ant System werden selbstverstärkende Lerneffekte angewandt. Im Ant-Q Algorithmus werden diese Lerneffekte nun noch stärker eingesetzt. Die Anwendung des Ant Systems geschieht vor allem am symmetrischen TSP. Bei der Lösung des asymmetrischen TSP stößt Ant System an seine Grenzen. Als Weiterentwicklung soll Ant-Q zur weitaus komplexeren Problemstellung – dem asymmetrischen TSP – beitragen.

Wie beim AS wird die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Ameise die nächste Stadt auswählt durch die Formel (1) bestimmt. Die Entscheidung wird durch die Heuristik ( $\eta_{ij}$ ), die den

---

<sup>47</sup>Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **An Ant Colony System Hybridized with a new Local Search for the Sequential Ordering Problem**, Freie Universität Brüssel/IDSIA, 2000, S. 237, URL: [http://www.idsia.ch/~luca/fd18cc00a0\\_article.pdf](http://www.idsia.ch/~luca/fd18cc00a0_article.pdf), 01.07.2006, 15:26.

<sup>48</sup>Vgl. Watkins C.J.C.H., **Learning with delayed rewards**, Dissertation am Institut für Psychologie der Universität Cambridge, o. J. zitiert nach Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., S. 1, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48.

nächst liegenden Knoten ermittelt und so eine Wertung über zur Auswahl stehende Knoten abgibt, mit beeinflusst.

Wesentlich sind aber im Vergleich zu AS die Lerneffekte und somit die Pheromon-Update-Regel. Man spricht dabei von **delayed Reinforcement**. Zwei Methoden werden bei Ant-Q für delayed Reinforcement eingesetzt. Die *Global-best* und die *Iteration-best* Methode. Im Weiteren wird aber nur auf die *Iteration-best* Methode eingegangen, da beide sehr ähnliche Ergebnisse liefern, aber in einigen Situationen der *Iteration-best* Methode der Vorzug zu geben ist. Erstens, weil sie schneller ist und zweitens, weil diese Methode auf den Parameter  $\gamma$ , der in der Formel enthalten ist, weniger stark reagiert.<sup>49</sup> Dorigo und Gambardella weisen aber daraufhin, dass die Ergebnisse zu delayed Reinforcement noch weiterer Forschung bedürfen.<sup>50</sup>

$$\Delta AQ(i, j) = \begin{cases} \frac{W}{L_{k_{ib}}} & \text{wenn}(i, j) \in \text{aus Touren von Ameise } k_{ib} \\ 0 & \text{andererseits} \end{cases} \quad (4)$$

$k_{ib}$  steht für die Ameise, die im gegenwärtigen Durchlauf die beste Tour gefunden hat.  $L_{k_{ib}}$  ist die Tourlänge. Der Parameter  $W$  wurde mit 10 definiert und unverändert bei allen Experimenten verwendet. Diese Formel dient dazu, für nachfolgende Ameisen nur die Kanten mit „Pheromonduft“ anzureichen, die jeweils mit der besten Ameise in einem Durchgang gefunden wurden. Im Vergleich zu AS tragen somit nicht alle Ameisen zu einem Lerneffekte bei, sondern nur die besten. Das Ergebnis der Formel (4) wird in die Pheromon-Update-Regel eingebaut:

$$AQ(i, j) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot AQ(i, j) + \alpha \cdot (\Delta AQ(i, j) + \gamma \cdot \text{Max}_{z \in J_k(j)} AQ(j, z)) \quad (5)$$

Der Ant-Q Algorithmus beginnt damit, dass jede Ameise  $k$  auf einem Knoten  $i_{k1}$  platziert wird. Ebenfalls wird die Liste der noch nicht besuchten Knoten  $J_k(i_{k1})$  erstellt. Im darauffolgenden Schritt werden die Ameisen in Bewegung gesetzt. Die Wahl des nächsten Knotens erfolgt dabei, wie oben erwähnt, mit Hilfe einer einfachen Heuristik, die den nächstgelegenen Knoten ermittelt. Dieser Schritt ist erst abgeschlossen, wenn jede Ameise ihre Tour beendet hat und zu ihrem Ausgangsknoten zurückgekehrt ist. Dann wird die Länge der Tour  $L_k$  von Ameise  $k$  ermittelt und die kürzeste Tour als delayed reinforcement  $\Delta AQ(i, j) \cdot j$  verwendet. Die Pheromon-Update-Regel wird im nächsten Schritt angewandt. Zum Abschluss wird überprüft, ob Bedingungen zur Beendigung des Algorithmus

<sup>49</sup>Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., S. 4f., URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48.

<sup>50</sup>Ebd.



vorhanden sind oder ob ein nächster Durchgang gestartet werden soll. Gründe für die Beendigung des Algorithmus können eine vorher definierte begrenzte Anzahl von Durchläufen sein oder wenn nach einigen Durchläufen keine positiven Veränderungen mehr auftreten.

### 3.3.4 Ant Colony System, ACS

Ebenso wie der Ant-Q Algorithmus stellt der ACS Algorithmus eine Erweiterung von AS dar. Der Ant-Q und ACS Algorithmus sind sehr ähnlich aufgebaut und liegen auch bei ihrer Performance nahe beisammen. Aufgrund der Lokalen Pheromon-Update-Regel ist der Rechenaufwand aber bei ACS geringer als bei Ant-Q.<sup>51</sup> Deshalb wird hauptsächlich der ACS Algorithmus angewandt. ACS und Ant-Q unterscheiden sich in ihrer Lokalen Pheromon-Update-Regel, wobei bei AS überhaupt keine Lokale Pheromon-Update-Regel verwendet wird.

Die Aufgabe der Lokalen Pheromon-Update-Regel beim ACS ist das Mischen von unterschiedlichen Touren, damit die Attraktivität von einzelnen Kanten dynamisch geändert wird. Würde keine Lokale Pheromon-Update-Regel existieren, würden Ameisen nahe an der vorerst kürzesten Tour suchen und das Finden von neuen und vielleicht besseren Wegen würde nicht gefördert werden. Der Einsatz der Lokalen Pheromon-Update Regel funktioniert, indem die „Pheromonmenge“ bei stark besuchten Kanten reduziert wird. Ausgehend von der Pheromon-Update Regel<sup>52</sup>

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta \tau_{ij}(t) \quad (6)$$

wird  $\Delta \tau_{ij}$  von  $\tau_0$  ersetzt (bei Ant-Q durch  $\gamma \cdot \text{Max}_{z \in J_k(j)} AQ(j, z)$ ). Die Lokale Pheromon-Update Regel lautet dann:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (7)$$

Es besteht die Überlegung, künstliche Ameisen ohne jegliche „Pheromon-Beeinflussung den kürzesten Weg suchen zu lassen. Damit würden sie immer neue Wege erkunden. Experimente von *Dorigo* und *Gambardella* (1996) zeigten aber, dass „kooperative“

---

<sup>51</sup> Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 7, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 25.06.06, 14:25.

<sup>52</sup> Ebd.



Ameisen das beste Ergebnis liefern. Aufgrund der Testergebnisse werden folgende Aussagen getroffen:<sup>53</sup>

- „Kooperative“ Ameisen finden die bessere Lösung, als Ameisen die ohne Pheromonduft Wege suchen.
- „Kooperative“ Ameisen finden die bessere Lösung in einer kürzeren Zeit.

Da der ACS ein sehr ausbaufähiger Algorithmus ist, wird er auch mit anderen Optimierungsverfahren kombiniert. Eine Variante ist die Kombination mit einer Lokalen Suchmethode ACS-3opt. Da die Basisberechnung identisch mit dem ACS Algorithmus ist, wird der ACS-3opt Algorithmus nicht explizit erklärt. Um aber zu zeigen, welche Ergebnisse solche Erweiterungen bringen können, wird dieser Algorithmus in den Vergleichen in *Kapitel 3.4* nochmals aufgegriffen.

### **3.3.5 Rank Based Version of Ant System, AS<sub>rank</sub>**

Variieren Wege sehr stark in ihrer Qualität, werden die guten Wege durch positive Feedbackprozesse verstärkt frequentiert und führen zu einer guten Lösung. Existieren jedoch Wege ähnlicher Qualität, ist es schwer eine gute Lösung herauszufiltern. Mit dem AS<sub>rank</sub> Algorithmus soll dieses Problem vermieden werden. Nachdem die Ameisen die erste Tour hinter sich gebracht haben, wird eine Reihung hinsichtlich der Tourlängen vorgenommen. Die Ameise mit der kürzesten Tour steht dabei an erster Stelle. Im Gegensatz zum Ant-Q Algorithmus wird nicht nur der Pfad der besten Ameise mit „Pheromon“ versehen, sondern die Markierung ist abhängig von der Reihung der gefundenen Touren. Durch die Reihung bzw. durch die eingeschränkte Markierung wird verhindert, dass zu viele Ameisen nicht optimale Touren verstärken.

Daher muss auf die ausgewählte Anzahl an Ameisen, die Pheromonspuren aktualisieren dürfen und auf die Gewichtung der Pheromonmenge entsprechend dem Rang der Ameisen

---

<sup>53</sup> Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 10ff., URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 27.06.06, 10:25.

bei der Berechnung von  $\Delta \tau_{ij}(t)$  (Pheromon-Update-Regel) Rücksicht genommen werden.<sup>54</sup>

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^* \quad (8)$$

wenn

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} \Delta \tau_{ij}^{\mu}$$

und

$$\Delta \tau_{ij}^{\mu} = \begin{cases} (\sigma-\mu) \frac{Q}{L_{\mu}} & \text{wenn die } \mu\text{-th beste Ameise sich auf der Kante } (i, j) \text{ befindet} \\ 0 & \text{andererseits} \end{cases}$$

und

$$\Delta \tau_{ij}^* = \begin{cases} \frac{Q}{L^*} & \text{wenn die Kante } (i, j) \text{ Teil der besten Lösung ist} \\ 0 & \text{andererseits} \end{cases} \quad 55$$

Die beste Lösung wird mit  $\sigma$  gewichtet. Die Gewichtung des Ranges mit  $\sigma - \mu$  ( $\mu$  = Rang der gefundenen Lösung) und die Anzahl der Ameisen, die Pheromonspuren aktualisieren dürfen, wird mit  $\sigma - 1$  festgelegt. Dies führt dazu, dass die höchste Gewichtung der Ränge um eins geringer ist als die Gewichtung der besten Ameise und die niedrigste Gewichtung genau 1 beträgt ( $\mu = 1$ ).  $L_{\mu}$  bezeichnet die Tourlänge des jeweiligen Ranges und  $L^*$  die kürzeste gefundene Tourlänge. Die Pheromon-Update-Regel ergibt sich somit aus der Summe der besten Ameisen  $\Delta \tau_{ij}^{\mu}$ .

### 3.3.6 Max-Min Ant System, MMAS

Wie bei den oben genannten Algorithmen, kann die Performance des AS-Algorithmus erhöht werden, wenn man nur die Pheromonmenge der besten Ameise bzw. der besten Ameisen verstärkt. Dies kann aber dazu führen, dass ein nicht optimaler Weg zu früh eine so hohe Pheromonspur aufweist, dass kein anderer Weg mehr ausgewählt wird. Bei ACS und Ant-Q versucht man, dies durch die lokale Pheromon-Update-Regel zu verhindern, bei Ant<sub>rank</sub> schützt man sich davor, indem eine Rangliste erstellt wird.

Das MAX-MIN Ant System (MMAS) stellt eine Erweiterung von AS dar, das den Vorteil des Performancegewinns durch das alleinige Aktualisieren der Pheromonspur der besten Lösung nutzt, und den Nachteil der zu frühen Stagnation durch Begrenzung der

<sup>54</sup>Vgl. Bullnheimer Bernd u.a., **A New Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, S. 8, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:12.

<sup>55</sup>Bullnheimer Bernd u.a., **A New Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, S. 8, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:45.

Pheromonmenge jeder Kante vermeidet. Das bedeutet, dass der Wert  $\tau_{\max}$  die maximale Menge an Pheromonen pro Kante repräsentiert und ein Wert  $\tau_{\min}$  die Mindestmenge an Pheromonen pro Kante festlegt. Die untere Grenze bewirkt, dass jede Kante zumindest zu einer geringen Wahrscheinlichkeit gewählt wird, die obere Grenze sorgt dafür, dass es nicht zu der Situation kommt, in der Kanten mit einer Pheromonmenge  $\tau_{\min}$  gegenüber Kanten mit einer weitaus höheren Pheromonmenge vernachlässigt werden. Diese Grenzen sollen vermeiden, dass es weder Kanten, die nie, noch Kanten die immer gewählt werden, gibt.<sup>56</sup>

Um dennoch eine möglicherweise auftretende Stagnation zu vermeiden, wird das trail-smoothing (MMAS+sm) angewandt. Dabei wird die Pheromonmenge aller Kanten proportional zur Differenz zwischen  $\tau_{\max}$  und der momentanen Pheromonstärke  $\tau_{ij}(t)$  erhöht.<sup>57</sup>

$$\text{increase} \sim \tau_{\max} - \tau_{ij}(t) \quad (9)$$

Wie bei ACS wird auch bei MMAS Algorithmen versucht, die Performance durch eine lokale Suchmethode zu erhöhen. Für das symmetrische TSP kommt die 2-opt Heuristik und für das asymmetrische TSP die reduced 3-opt Methode zum Einsatz.

### 3.3.7 Multiple Ant Colony System for VRPTW, MACS-VRPTW

Mit dem Multiple Ant Colony System (MACS) wird zum Abschluss ein Ameisenalgorithmus zur Lösung des Vehicle Routing Problems with Time Windows (VRPTW) vorgestellt. Mit diesem Algorithmus sollen zwei Ziele erreicht werden, erstens die Reduzierung der benötigten Touren bzw. Fahrzeuge und zweitens die kürzeste Gesamtlänge aller Touren. Diese Ziele können auf den ersten Blick widersprüchlich sein, denn nicht immer ist mit der geringeren Anzahl von Fahrzeugen auch die Gesamtlänge aller Touren zu verkürzen. Das Wesentliche von Optimierungsverfahren ist aber die Reduzierung von Kosten und diese können bei weniger Fahrzeugen geringer ausfallen, als

---

<sup>56</sup>Vgl. Hoos Holger/Stützle Thomas, **Max-Min Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem**, Institut für Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, o. J., S. 2ff., URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/pub.html#ACO>, 02.07.06, 07:33.

<sup>57</sup>Vgl. Hoos Holger/Stützle Thomas, **Improvements on the Ant-System: Introducing the Max-Min Ant System**, Institut für Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, o. J., S. 3, URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/pub.html#ACO>, 02.07.06, 07:33.

die Realisierung der kürzesten gefundenen Gesamtlänge der Touren. Der MACS Algorithmus baut auf dem in *Kapitel 3.3.4* beschriebenen ACS Algorithmus auf. Es werden zwei „Ameisenvölker“ eingesetzt, wobei ein Volk die Aufgabe hat, die Touren bzw. Fahrzeuge zu reduzieren und das zweite mit der vorgegebenen Anzahl an Touren bzw. Fahrzeugen die kürzeste Gesamtstrecke zu finden versucht. Beide Ameisenvölker benutzen einen unabhängigen Pheromon Weg, wobei aber beide durch die Variable  $\psi^{gh}$ , koordiniert durch den MACS-VRPTW Algorithmus, kommunizieren. Dadurch entscheidet sich der MACS Algorithmus auch in seiner Pheromon-Update-Regel vom ACS Algorithmus:<sup>58</sup>

$$\tau_{ij} = (1 - p) \cdot \tau_{ij} + \frac{p}{J_{\psi}^{gh}} \quad \forall (i, j) \in \psi^{gh} \quad (10)$$

Die  $\psi^{gh}$  Variable stellt die Lösung des VRPTW dar, und wird vorerst mittels einer einfachen Heuristik (Nearest neighbor heuristic) ermittelt. Danach werden die Ameisenvölker eingesetzt, um das Ergebnis zu verbessern. Das erste Volk versucht eine Lösung mit einem Fahrzeug weniger als die gefunden Lösung zu finden. Hat das erste Volk eine Lösung gefunden, wird  $\psi^{gh}$  aktualisiert und das zweite Volk versucht mit der vorhandenen Anzahl an Fahrzeugen den kürzesten Weg zu finden.

Um das Problem mit Zeitfenstern zu integrieren, werden Kunden bzw. Knoten – abhängig von drei Merkmalen – favorisiert:

- Zeit  $t_{ij}$  vom Knoten  $i$  zum Knoten  $j$
- Eventuell vorhandene Zeitfenster  $[b_j, e_j]$  von Knoten  $j$
- Zeitspanne  $IN_j$ , seit dem der Knoten  $j$  nicht mehr beliefert wurde

Diese Bedingungen werden dann für die Wahl des nächsten Knotens verwendet:<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup>Vgl. Gambardella Luca M. u.a., **MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing with Time Windows**, 1999, S. 5ff., URL: <ftp://ftp.idsia.ch/pub/luca/papers/tr-idsia-06-99.pdf>, 30.07.06, 17:39.

<sup>59</sup>Vgl. Gambardella Luca M. u.a., **MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing with Time Windows**, 1999, S. 5 u. 10f., URL: <ftp://ftp.idsia.ch/pub/luca/papers/tr-idsia-06-99.pdf>, 30.07.06, 17:39.

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij} \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il} \cdot [\eta_{il}]^\beta} & \text{if } j \in N_u \\ 0 & \text{andererseits} \end{cases} \quad (11)$$

Die vorgestellten Ameisenalgorithmen stellen Werkzeuge für die Lösung des TSP bzw. VRP dar. Der Einsatz dieser Algorithmen für spezielle Probleme wie zum Beispiel Pick up & Delivery oder Mehrdepotprobleme bedürfen aber noch weiterer Modifikationen.

Es sei darauf hingewiesen, dass es noch weitere Optimierungsverfahren auf Basis der Ameisen gibt, z.B. ACS mit GA (ACSGA)<sup>60</sup> oder verschiedenen Erweiterungen von MMAS. Für einen generellen Überblick werden in dieser Arbeit aber nur die grundlegenden Ameisenalgorithmen erklärt.

Eine Gegenüberstellung mit anderen Lösungsansätzen wird im nächsten Kapitel Aufschluss darüber geben, ob die Anwendung von Ameisenalgorithmen Vorteile gegenüber anderen Methoden bringt.

### 3.4 Ameisenalgorithmen im Vergleich zu anderen

#### Metaheuristiken

Das TSP eignet sich als Problemstellung für einen Vergleich aus zweierlei Gründen. Erstens handelt es sich – wie in *Kapitel 2.1* bereits erwähnt – um einen Basisansatz, der allen erweiterten Problemstellungen, wie z.B. dem VRP, zu Grunde liegt. Zweitens ist das TSP eine häufig behandelte Problemstellung innerhalb von Logistikanwendungen.

Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Metaheuristiken ein *NP-hartes* bzw. *-vollständiges* Problem voraussetzt (*siehe Kapitel 3.2.2 NP-vollständige Probleme*). Beim TSP (ohne erweiterte Problemstellung) ist die Anzahl der Städte für die Komplexität verantwortlich. (Beim ATSP ergibt sich Komplexität auch daraus, dass die Kante von A nach B ungleich der Kante von B nach A ist.) Die Grenze, ab welcher Anzahl von Städten es sich um ein *NP*-Problem handelt, verschiebt sich aufgrund von stetig steigender Rechenleistung von Computern nach oben. Der Einsatz von Heuristiken anstatt von optimalen, das Ergebnis exakt berechnenden Rechenmethode ist natürlich individuell

---

<sup>60</sup>Vgl. Pilat Marcin L./White Tony, **Using Genetic Algorithms to optimize ACS-TSP**, School of Computer Science, Carleton University, o. J., S. 1-6, URL: <http://www.scs.carleton.ca/~arpwhite/documents/ANTS2002.pdf>, 02.08.06, 18:23.

abhängig von der zur Verfügung stehenden Zeit, um eine Tourenplanung durchzuführen und von der Anzahl der Knoten. Die nachfolgenden Problemstellungen in der Gegenüberstellung von Metaheuristiken sind ausschließlich *NP-harte* bzw. *-vollständige* Probleme.

### 3.4.1 Vorgehensweise

Verglichen werden Testergebnisse, die von unterschiedlichen Autoren erzielt wurden. Innerhalb der Gruppen symmetrisches TSP, asymmetrisches TSP und VRPTW werden häufig verwendete Metaheuristiken mit unterschiedlichen Ameisenalgorithmen unter Vergleich gestellt:

#### Symmetrisches TSP

Problemstellung: City Set 1 – 5

- ACS
- Ant-Q
- SA (Simulated Annealing)
- EN (Elastic Net)
- SOM (Self Organizing Map)
- FI (Farthest Insertion)
- FI+2-opt
- FI+3-opt

Problemstellung: Eil50 und KroA100

- AS
- ACS
- MMAS+local search
- SA
- GA (Genetischer Algorithmus)
- EP (Evolutionäre Programmierung)
- AG (Annealing Genetic)
- Optimum

Problemstellung: oliver30 und 132 Städte Problem

- AS
- AS<sub>rank</sub>
- SA
- SA<sub>nn</sub> (Simulated Annealing mit nearest neighbour heuristic)
- GA
- Optimum

#### Asymmetrisches TSP

Problemstellung: ry48p und ftv170

- ACS
- ACS-3opt
- AS<sub>rank</sub>
- Ant-Q
- MMAS
- GA
- FT-92
- Optimum

### Vehicle Routing Problem with Time Windows

Problemstellung: C1, C2, R1, R2, RC1 und RC2

- MACS-VRPTW
- RT (Rochat und Taillard)
- TB (Taillard et al.)
- CR (Chiang und Russel)
- PB (Potvin und Bengio)
- TH (Thangiah et al.)

Um von verschiedenen Autoren durchgeführte Tests miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, standardisierte Problemstellungen zu verwenden. Solche Problemstellungen beschreibt die Travelling Salesman Problem Library (TSPLIB)<sup>61</sup>. Es werden nicht nur standardisierte Problemstellung für das TSP angeboten, sondern in Folge auch eine einheitliche Bezeichnung.

Die zwei Faktoren für die bessere oder schlechtere Performance einer Berechnungsmethode gegenüber einer anderen sind die Qualität des Ergebnisses (je näher am Optimum desto besser) und die benötigte Zeit der Berechnung. Faktoren wie z.B. die Handhabung einer Heuristik sind im Vergleich nicht enthalten (*siehe Kapitel 3.3.1 Heuristiken – Metaheuristiken*).

---

<sup>61</sup>Vgl. Reinelt Gerhard, **TSPLIB – A Traveling Salesman Problem Library**, in: ORSA Journal of Computing, Vol. 3, 1991., S. 376 – 385, URL: <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/index.html>, 17.06.06, 11:15.

### 3.4.2 Vergleich von Optimierungsverfahren für das symmetrische TSP

Das symmetrische TSP wird für den ersten Vergleich herangezogen. Zuerst wird eine virtuelle, zufällig generierte Problemstellung (City Set 1-5) für 50 Städte gewählt. Dabei werden die Standorte der Städte innerhalb eines Quadrats zufällig generiert. Danach wird ein Problem mit vorgegebenen Städten und Entfernungen aus der realen Welt erstellt (in unserem Fall Eil50 mit 50 Städten und KroA100 mit 100 Städten). Das Heranziehen der ersten Problemstellung ist insofern von Bedeutung, da beide Problemstellungen unterschiedliche Strukturen hervorbringen. Das kann dazu führen, dass ein Algorithmus möglicherweise in der einen Problemstellung gute und in der anderen schlechte Ergebnisse liefert.<sup>62</sup>

Problemname	Optimierungsverfahren							
	ACS	Ant-Q	SA	EN	SOM	FI	FI+2-opt	FI+3-opt
City set 1	5,88	5,87	5,88	5,98	6,06	6,03	5,99	5,90
City set 2	6,05	6,06	6,01	6,03	6,25	6,28	6,20	6,07
City set 3	5,58	5,57	5,65	5,70	5,83	5,85	5,80	5,63
City set 4	5,74	5,76	5,81	5,86	5,87	5,96	5,96	5,81
City set 5	6,18	6,18	6,33	6,49	6,70	6,71	6,61	6,48

Abbildung 3: Vergleich Optimierungsverfahren City Set Problem  
10 Ameisen/2500 Durchläufe pro Ameise/25 Durchgänge<sup>63</sup>

Bei den Werten in der in Abb. 3 dargestellten Tabelle handelt es sich um durchschnittlich gefundene Streckenlängen. In diesem Experiment wurden die Ameisenalgorithmen 25mal mit 10 Ameisen und 2500 Durchläufen pro Ameise angewandt und aus den Ergebnissen ein Durchschnittswert gebildet. Da diese Optimierungsverfahren keine exakte Berechnungsmethode verwenden, können die Ergebnisse in jedem Durchlauf variieren. Deshalb werden auch mehrere Durchgänge – um daraus einen Durchschnittswert zu bilden

<sup>62</sup>Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 25, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 25.06.06, 14:25.

<sup>63</sup>Quelle: In Anlehnung an Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 13, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 25.06.06, 14:25, und vgl. auch Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., S. 8, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48.



– durchgeführt. Die Ergebnisse (hinsichtlich der gefundenen Streckenlänge) eines Experiments mit City Set Problemstellungen können unterschiedlich sein, weil die Problemlandschaft nach dem Zufallsprinzip erstellt wird. Weiters ist das Ergebnis auch abhängig von der Setzung der Parameter wie zum Beispiel Anzahl der Ameisen, Durchgänge und so weiter (*siehe Kapitel 3.3 Ameisenalgorithmen für die Lösung von TSP und VRP*). Ein Beispiele für unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der gefundenen Streckenlänge liefert eine weiter Untersuchung von *Dorigo* und *Gambardella*. Die gefundene Streckenlänge variiert zwar geringfügig von den oben dargestellten Zahlen (Abb. 3), aber das Verhältnis gegenüber den anderen Optimierungsverfahren ist identisch.<sup>64</sup> Dieses Verhältnis zu den anderen Optimierungsverfahren ist bei diesem Vergleich auch der wesentliche Punkt. Die durchschnittlich kürzeste gefundene Tourlänge ist grün markiert. Mit diesem Vergleich wird eindeutig gezeigt, dass Ameisenalgorithmen wie ACS und Ant-Q in den meisten Fällen die besten Ergebnisse liefern. Einen weitem Aufschluss über die Qualität von Ameisenalgorithmen liefert der nächste Vergleich aus der realen Welt. Interessant sind dabei diese Ergebnisse nicht nur, weil die Problemstellung direkt aus der Praxis kommt, sondern auch, weil eine exakte Berechnung vorliegt.

---

<sup>64</sup>Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 5, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15.

Problemname	Optimierungsverfahren							
	AS <sup>65</sup>	ACS <sup>66</sup>	MMAS+local search <sup>67</sup>	SA <sup>68</sup>	GA <sup>69</sup>	EP <sup>70</sup>	AG	Optimum
<b>Eil50</b>	nV	425	NV	443	428	426	436	425
<b>KroA100</b>	2247,4	21282 (21420)	21282 (21285,3)	nV	nV	nV	nV	21282

**Abbildung 4: Vergleich Optimierungsverfahren Eil50 und KroA100  
10 Ameisen/1000 Durchläufe pro Ameise/15 Durchgänge<sup>71</sup>**

Die Abbildung 4 stellt die Lösungen bei 50 (Eil50) bzw. 100 (KroA100) Städten eines symmetrischen TSP dar. Nur die kürzeste gefundene Tourenlänge des ACO (Ant Colony Optimization) Algorithmus (425) entspricht auch der exakten Berechnung. Nahe dem Optimum liegt auch das Ergebnis des EP Algorithmus. Wobei zu sagen ist, dass ACO von allen dargestellten Optimierungsverfahren das Schnellste ist. Bereits nach 1,83

<sup>65</sup>Gong Shihua/Li Yong, **Dynamic ant colony optimization for TSP**, in: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2003, Ausgabe 22, S. 5.

<sup>66</sup>Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 6, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15.

<sup>67</sup>Hoos Holger/Stützle Thomas, **Improvements on the Ant-System: Introducing the Max-Min Ant System**, Institut für Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, S. 3f., URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/pub.html#ACO>, 02.07.06, 07:33.

<sup>68</sup>Lin Feng-Tse u. a., **Applying the genetic approach to simulated annealing insolving some NP-hard problems**, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Ausgabe 23, S. 1752-1767.

<sup>69</sup> Lin Feng-Tse u. a., **Applying the genetic approach to simulated annealing insolving some NP-hard problems**, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Ausgabe 23, S. 1752-1767.

<sup>70</sup>Fogel David, **Applying Evolutionary programming to selected traveling salseman problems**, in: Cybernetics and Systems 1993, Ausgabe 24, S. 27-36.

<sup>71</sup>Quelle: In Anlehnung an Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, Belgien, 1996, S. 6, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15 und Hoos Holger/Stützle Thomas, **Improvements on the Ant-System: Introducing the Max-Min Ant System**, Institut für Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, S. 3f., URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/pub.html#ACO>, 02.07.06, 07:33.

Durchgängen (bei EP nach 100 Durchgängen) wurde bei ACO die kürzeste Tourlänge gefunden.<sup>72</sup>

Obwohl beim 100 Städte Problem (KroA100) die Ergebnisse der anderen Optimierungsverfahren nicht vorhanden sind (nV), wird deutlich, dass ACS und MMAS + local search eine sehr gute Performance liefern. Beide Verfahren finden die kürzeste Tourlänge gleich dem Optimum. Bei den durchschnittlichen gefundenen Tourlängen (in Klammer dargestellt, 15 Durchgänge) liegt der MMAS + local search Algorithmus vor dem ACO Algorithmus. Ihm ist demnach der Vorzug zu geben.

Um die Qualität der Ergebnisse von AS<sub>rank</sub> im Vergleich zu anderen Ameisenalgorithmen zu analysieren, werden noch zwei weitere Problemstellung, in denen auch AS<sub>rank</sub> angewandt wurde, abgebildet. Es handelt sich dabei um ein 30 Städte und ein 132 Städte Problem.

Problemname	Optimierungsverfahren					
	AS	AS <sub>rank</sub>	SA	SA <sub>nn</sub>	GA	Optimum
<b>Oliver30</b>	423,91 (426,24)	423,74 (425,72)	423,74 (424,52)	423,74 (424,26)	423,74 (424,42)	423,74
<b>132 Städte P.</b>	1544,3 (1568,02)	1533,54 (1556,65)	1558,53 (1596,09)	1537,23 (1577,69)	1543,14 (1588,99)	1528,78

Abbildung 5: Vergleich Optimierungsverfahren Oliver30 und 132 Städte Problem

30 Ameisen/30sec. Laufzeit/30 Durchgänge: Oliver30

132 Ameisen/120sec. Laufzeit/30 Durchgänge: 132 Städte Problem<sup>73</sup>

Die kürzeste Tourlänge wird wieder durch die erste und die durchschnittlich gefundene Tourlänge durch jene Zahl in Klammer dargestellt. Die Durchführung des Experiments wurde aber nicht durch die Anzahl der Durchläufe wie im zuvor angeführten Vergleichen begrenzt, sondern pro Durchgang wurden jeweils 30 bzw. 120 Sekunden als Zeitlimit jedes

<sup>72</sup>Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 6, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15.

<sup>73</sup>Quelle: In Anlehnung an Bullheimer Bernd u.a., **A new Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, S. 11, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:12.

Algorithmus gesetzt. Beim 30 Städte Problem (Oliver30) erreichen beinahe alle Algorithmen das Optimum. Die durchschnittlich gefundene Tourlänge ist aber beim SA<sub>nn</sub> Algorithmus am kürzesten. Dieser Vergleich zeigt außerdem, dass die Qualität spezieller Ameisenalgorithmen im Verhältnis zu anderen Optimierungsverfahren mit der Anzahl von Städten steigt. Kein Algorithmus findet innerhalb des 132 Städte Problems das Optimum. Der AS<sub>rank</sub> Algorithmus liefert aber die kürzeste gefundene und die kürzeste durchschnittlich gefundene Tourlänge und schlägt somit alle anderen Algorithmen.

### 3.4.3 Vergleich von Optimierungsverfahren für das asymmetrische TSP

Problemname	Optimierungsverfahren							
	ACS	ACS-3opt	AS <sub>rank</sub>	Ant-Q	MMAS	GA	FT-92	Optimum
<b>ry48p</b>	14422 (14565,4)	14422 (14422)	14459 (14511,4)	14422	14422 (14523,4)	nV (14440)	14422	14422
<b>ftv170</b>	2774 (2826,5)	2755 (2755)	2820 (2854,2)	nV	2761 (2817,7)	nV (2766,1)	nV	2755

Abbildung 6: Vergleich Optimierungsverfahren ry48p und ftv170

Anzahl der Ameisen = Anzahl der Städte/Durchläufe nV/10 bzw. 25 Durchgänge<sup>74</sup>

Der einfache AS Algorithmus wurde, obwohl Testergebnisse vorhanden sind, nicht mehr in diesen Vergleich aufgenommen, da er aufgrund der gestiegenen Komplexität keine brauchbaren Ergebnisse mehr liefert.

<sup>74</sup>Quelle: In Anlehnung an Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 17, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 25.06.06, 14:25 (ACS-3-opt, GA und Optimum) und vgl. auch Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., S. 8, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48 (Ant-Q) und vgl. auch Stützle Thomas, **Local Search Algorithms for Combinatorial Problems - Analysis, Improvements and new Applications**, Dissertation im Fachbereich Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, 1998, S. 87, URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/publications/Thesis.ThomasStuetzle.pdf>, 25.07.06, 07:23 (ACS, AS<sub>rank</sub> und MMAS).

Der GA Algorithmus zeigt sehr gute durchschnittlich gefundene Tourlängen und wird nur von einem Ameisenalgorithmus übertroffen. Der ACS Algorithmus verbunden mit einer „Local Search“ Methode (3opt) findet in beiden Problemstellungen das Optimum.

#### 3.4.4 Vergleich von Optimierungsverfahren für das VRPTW

Wie auch im vorangegangenen Vergleichen wird beim VRPTW eine einheitliche Problemstellung zugrunde gelegt. In diesem Vergleich werden sechs Problemstellungen (C1, C2, R1, R2, RC1, RC2) behandelt. Jede Problemstellung besteht aus acht bis zwölf 100-Städte Problemen. Zu lösende Probleme mit einem C an erster Stelle haben gebündelte Kunden/Kundinnen zu beliefern. Diese Problemstellung bildet in erster Linie die Praxis ab, da die Kunden/Kundinnen in zahlreichen Fällen um das Depot gruppiert zu beliefern sind. Im Gegensatz dazu werden bei der R Gruppe die Standorte der Kunden/Kundinnen innerhalb eines Quadrates zufällig generiert. Die Problemstellung RC besitzen ein Teil aus beiden (gebündelte und zufällig generierte Standorte der Kunden/Kundinnen). Die Ziffer 2 bezeichnet lange Zeitfenster und eine große Kapazität der Fahrzeuge. Ziffer 1 beschreibt genau das Gegenteil. Lösungen der Gruppe 2 enthalten deshalb wenige Routen und mehr Kunden/Kundinnen pro Route als die Gruppe mit der Ziffer 1.<sup>75</sup>

---

<sup>75</sup>Vgl. Chen Chia-Ho/Ting Ching-Jung, **A Hybrid Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows**, Department of Industrial Engineering and Management, Yuan Ze University, o. J., S. 2830f., URL: [http://www.easts.info/on-line/journal\\_06/2822.pdf](http://www.easts.info/on-line/journal_06/2822.pdf), 01.08.06, 07:59.

Problemname	Optimierungsverfahren					
	MACS-VRPTW <sup>76</sup>	RT <sup>77</sup>	TB <sup>78</sup>	CR	PB <sup>79</sup>	TH
R1	12 (1217,73)	12,25 (1208,5)	12,17 (1209,35)	12,42 (1289,95)	12,58 (1296,8)	12,33 (1238)
C1	10 (828,38)	10 (828,38)	10 (828,38)	10 (885,86)	10 (838,01)	10 (832)
RC1	11,63 (1382,42)	11,88 (1377,39)	11,50 (1389,22)	12,38 (1455,82)	12,13 (1446,20)	12 (1284)
R2	2,73 (967,75)	2,91 (961,72)	2,82 (980,27)	2,91 (1135,14)	3 (1117,7)	3 (1005)
C2	3 (589,86)	3 (589,86)	3 (589,86)	3 (658,88)	3 (589,93)	3 (650)
RC2	3,25 (1129,19)	3,38 (1119,59)	3,38 (1117,44)	3,38 (1361,14)	3,38 (1360,57)	3,38 (1229)

Abbildung 7: Vergleich Optimierungsverfahren C1, C2, R1, R2, RC1 und RC2  
10 Ameisen/Durchlauf nach bestimmter Zeit (unbekannt) gestoppt/3 Durchgänge<sup>80</sup>

Die Ergebnisse der Abbildung 7 stellen Durchschnittswerte über 3 Durchgänge dar. Der erste Wert gibt die Anzahl der Fahrzeuge wieder und der Wert in Klammer beschreibt die kürzeste Tourlänge mit dieser Anzahl an Fahrzeugen. Die besten Ergebnisse sind wieder grün hervorgehoben.

<sup>76</sup>Gambardella Luca M. u.a., **MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing with Time Windows**, 1999, S. 13, URL: <ftp://ftp.idsia.ch/pub/luca/papers/tr-idsia-06-99.pdf>, 30.07.06, 17:39.

<sup>77</sup>Rochat Yves/Taillard Èric D., **Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing**, in: Journal of Heuristics 1, 1995, S. 155, URL: [http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/crt95\\_13.pdf](http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/crt95_13.pdf), 02.08.06, 11:56.

<sup>78</sup>Vgl. Badeau Philippe u.a., **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows**, in: Transportation Science 31, 1997, S. 170-186, URL: <http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/articles.html>, 02.08.06, 13:00.

<sup>79</sup>Vgl. Potvin Jean-Yves/Bengio Samy, **The Vehicle Routing Problem with Time Windows – Part II: Genetic Search**, in: INFORMS Journal of Computing 8, 1996, S. 15-18, URL: [http://www.idiap.ch/~bengio/cv/publications/pdf/potvin\\_1996\\_informs.pdf](http://www.idiap.ch/~bengio/cv/publications/pdf/potvin_1996_informs.pdf), 02.08.06, 11:48.

<sup>80</sup>Quelle: (leicht modifiziert) Gambardella Luca M. u.a., **MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing with Time Windows**, 1999, S. 13, URL: <ftp://ftp.idsia.ch/pub/luca/papers/tr-idsia-06-99.pdf>, 30.07.06, 17:39.

Mit Ausnahme der RC1 Problemstellung liefern alle Ergebnisse des MARC-VRPTW Algorithmus entweder gleichwertige Ergebnisse wie die besten Optimierungsverfahren oder übertreffen diese.

### 3.5 Zusammenfassung

Mit der steigenden Anzahl von Städten, steigt auch die Komplexität der Problemstellung. Exakte Berechnungsmethoden können für die Lösung nicht mehr herangezogen werden, wie *Kapitel 3.2.2* anführt. Metaheuristiken liefern eine Möglichkeit sich einer „guten Lösung“ anzunähern.

Die Vielfältigkeit der Ameisenalgorithmen wird in *Kapitel 3.3* abgebildet und dient zur Erklärung der Funktionsweise von Algorithmen mit künstlichen Ameisen.

In *Kapitel 3.4* wird aufgezeigt, dass Ameisenalgorithmen erfolgreich eingesetzt werden können. Sie liefern zum großen Teil ebenso gute Ergebnisse wie die bekanntesten Metaheuristiken und übertreffen diese sogar in zahlreichen Problemstellungen. Ein weiterer Vorteil der Ameisenalgorithmen stellt ihre Möglichkeit zur Kombination mit anderen Optimierungsverfahren, wie zum Beispiel ACS-3opt<sup>81</sup>, dar.

Die durchgeführten Experimente zeigen auch auf, dass mit Zunahme der Städteanzahl, die Ergebnisqualität der meisten Ameisenalgorithmen im Verhältnis zu anderen Optimierungsverfahren steigt.

Den einzigen Hinweis, ob Ameisenalgorithmen auch weniger Zeit als andere Algorithmen in Anspruch nehmen, geben die benötigten Durchgänge für das Finden der kürzesten Route in *Kapitel 3.4.2*. Obwohl es Vergleiche für den Zeitbedarf bei der Berechnung gibt, wurden sie in diese Arbeit nicht miteinbezogen, da die Berechnungen von unterschiedlichen Experimenten stammen und somit auch auf Computern, deren Leistung nicht identisch ist, durchgeführt wurden. Somit können nach Meinung des Autors diese Ergebnisse nicht miteinander verglichen werden.

Die Vielzahl an Varianten der Ameisenalgorithmen setzt ein hohes Verständnis der Problematik voraus. Einerseits sind die Parametersetzung und andererseits die Verwendung des geeignetsten Ameisenalgorithmus der jeweiligen Problemstellung für den

---

<sup>81</sup>Vgl. auch IACS-SA (improved Ant Colony System mit Simulated Annealing) Chen Chia-Ho/Ting Ching-Jung, **A Hybrid Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows**, Department of Industrial Engineering and Management, Yuan Ze University, o. J., S. 2822 – 2836, URL: [http://www.easts.info/on-line/journal\\_06/2822.pdf](http://www.easts.info/on-line/journal_06/2822.pdf), 01.08.06, 07:59.

Erfolg unerlässlich. Dieser Variantenreichtum stellt aber auch eine Stärke von Ameisenalgorithmen, nämlich die individuelle Einsetzbarkeit, dar.

## 4 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG

Die in der Einleitung genannte Hypothese – „In den untersuchten Unternehmen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, Ameisenalgorithmen erfolgsversprechend für TSP und VRP einzusetzen, sie werden aber in nur wenigen Fällen genutzt.“ – wurde mit Hilfe einer schriftlichen Befragung untersucht. Dabei wurde ein Vergleich von Unternehmen, die nach einer Studie<sup>82</sup> zu den TOP 100 Logistikunternehmen innerhalb Deutschlands und Europas zählen, mit österreichischen Unternehmen durchgeführt, um festzustellen ob führende Logistikunternehmen im Vergleich zu Unternehmen, die nicht zu den führenden Logistikgrößen zählen, aber ähnliche Probleme zu bewältigen haben, Ameisenalgorithmen vermehrt einsetzen. Nicht nur die Frage, ob Ameisenalgorithmen in Unternehmen zahlreich eingesetzt werden oder nicht, sondern auch die dahinterliegenden Gründe stellen einen Untersuchungsgegenstand dieser Befragung dar. Die allgemeinen Erwartungen von Unternehmen an Optimierungsverfahren bzw. –software beleuchtet den Blickwinkel der Unternehmen.

In der Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgegenstand und bezogen auf die Fragestellung wurde ein geeignetes Untersuchungs-Design<sup>83</sup> entworfen, dessen Planung und Vorbereitung in den nachfolgenden Kapiteln erklärt wird.

### 4.1 Vorgehensweise

#### 4.1.1 Auswahl der Grundgesamtheit

Die Grundgesamtheit ergibt sich aus der Gruppe von Unternehmen, die in der TOP 100-Liste angeführt sind, das TSP zu lösen haben und jener Gruppe von österreichischen Unternehmen, die nicht in dieser Liste zu finden sind, aber ähnliche Logistikaufgaben zu

---

<sup>82</sup>Vgl. Klaus Peter, **Die „Top 100“ der Logistik, Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft, Deutschland und Europa**, 3. Auflage, Verlag: Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2003.

<sup>83</sup>Vgl. Kromrey Helmut, **Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung**, 9. Auflage, Verlag: Leske + Budrich, Opladen 2000, S. 68.



lösen haben. Mit „ähnlichen Logistikaufgaben“ ist gemeint, dass das TSP ein Grundproblem für diese Unternehmen darstellt. Unternehmen werden dann in die TOP-100 Liste aufgenommen, wenn sie im Logistikbereich tätig sind und aufgrund ihrer Marktgröße (Umsatz) zu den größten 100 ihrer Branche zählen.<sup>84</sup>

Bei beiden Gruppen wurden nur solche Unternehmen in die Befragung miteinbezogen, die eine Tourenplanung mittels PKW, LKW oder Motorrad durchführen. Unternehmen die ausschließlich Touren auf dem See-, Bahn- und Luftweg planen, wurden von der Befragung ausgeschlossen, da sich die Berechnung ihres kürzesten Weges im Vergleich zu jenem via Straßennetz wesentlich unterscheidet. Weitere Unternehmen der TOP 100-Liste schieden von der Befragung aus, da sie zwar in der Logistikbranche tätig sind, aber selbst keine Tourenplanung vornehmen. Hinsichtlich dieser Kriterien kamen von den TOP 100 Unternehmen im Vorfeld 26 Unternehmen nicht in die Zielgruppe. Aufgrund der Berücksichtigung, dass Unternehmen sowohl in der TOP 100 Liste Deutschland als auch in der TOP 100 Liste Europa angeführt sind und den 26 Unternehmen, von denen bekannt ist, dass sie die Kriterien nicht erfüllen, wurde die Grundgesamtheit auf 180 Unternehmen eingeschränkt.

Nun geht es um die zweite Gruppe, jener Unternehmen in Österreich<sup>85</sup>, die für den Vergleich herangezogen werden. In erster Linie boten sich Logistikunternehmen, Transportunternehmen bzw. Speditionen an. Aber nicht nur die Logistikbranche, sondern auch Industrie und Handel sind mit dem Travelling Salesman Problem konfrontiert. Deshalb wurden Unternehmen aus sehr unterschiedlichen Branchen befragt, die ihre Kunden mit einem eigenen Fuhrpark oder in enger Zusammenarbeit mit einem Frächter beliefern. Wie die empirische Untersuchung zeigt, handelt es sich dabei um sehr hohe Anforderungen an das Logistikmanagement. Es gelten natürlich die gleichen Aufnahmekriterien (eigene Tourenplanung, Durchführung der Touren mit LKW, PKW oder Motorrad) wie bei den TOP 100 Unternehmen. Weiteres kamen auch Speditionen, die Ware „nur“ zu einem Standort transportieren, für die Untersuchung nicht in Frage. Die Adressen der Unternehmen wurden aus einer Datenbank (Daten aus dem Jahr 2003) herausgefiltert.

---

<sup>84</sup>Vgl. Klaus Peter, **Die „Top 100“ der Logistik, Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft, Deutschland und Europa**, 3. Auflage, Verlag: Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2003, S. 193-199.

<sup>85</sup>In weiterer Folge werden diese Unternehmen als NICHT TOP100 Unternehmen bezeichnet.

Die zahlreichen Ausscheidungskriterien konnten nur begrenzt aus der Datenbank gewonnen werden und einige Firmen, die aufgrund dieser Kriterien nicht in die Grundgesamtheit vielen, wurden erst bei Rückmeldung oder Rücksendung des Fragebogens aussortiert. 43 Unternehmen (32 per Email und 11 per Telefon) bekundeten, dass sie die Kriterien für die Zielgruppe nicht erfüllen. Weitere 17 Unternehmen (9 per Email und 8 per Telefon) wollten an der Befragung nicht teilnehmen. Von 118 Unternehmen fehlt die Antwort. Deshalb ist es aber auch schwierig die Grundgesamtheit zahlenmäßig exakt zu bestimmen, da die Beantwortung der Frage, ob das TSP vorliegt oder nicht, erst bei Beantwortung des Fragebogens oder bei Rückmeldung geschehen konnte. Für die Befragung wurden 311 Unternehmen aus verschiedenen Branchen ausgesucht, die innerhalb der Branche eine möglichst hohe Mitarbeiteranzahl und einen hohen Umsatz aufweisen. Von den österreichischen Firmen wurden in den angeführten Branchen (siehe *Kapitel 6.10*) insgesamt 58 befragt.

#### **4.1.2 Gestaltung des Fragebogens**

Als Methode der Datenerhebung kam eine Befragung mittels standardisiertem Fragebogen zum Einsatz. Der standardisierte Fragebogen besteht überwiegend aus geschlossenen Fragen, bei denen formulierte Antwortalternativen vorgegeben sind. Daneben wurden zusätzlich offene Fragen (ohne Antwortvorgaben) berücksichtigt. Der vollständige Fragebogen<sup>86</sup> umfasst vier Seiten und besteht aus vier Teilen. Der erste Teil umfasst allgemeine Angaben zum Unternehmen wie Branche, Mitarbeiteranzahl, Umsatz und in wie vielen Ländern der Konzern tätig ist (Fragen 1-4). Der zweite Teil des Fragebogens bildet die Problemlandschaft und die Komplexität bei der Tourenplanung ab (Fragen 5-14). Aus dieser abgefragten Problemdarstellung wird der mögliche Einsatz von Ameisenalgorithmen analysiert. Inwieweit Ameisenalgorithmen im Unternehmen eingesetzt werden und mögliche Gründe für keine Verwendung von Ameisenalgorithmen werden im dritten Themenblock (Fragen 15-18) behandelt. Der vierte und letzte Teil des Fragebogens spiegelt die allgemeinen Anforderungen der Unternehmen an Optimierungsverfahren bzw. Optimierungssoftware wider (Fragen 19-25).

Vor Beginn der Untersuchung wurde der Fragebogen einigen Personen vorgelegt, um eventuelle Unklarheiten bei der Formulierung der einzelnen Fragen zu eruieren. Die bei

---

<sup>86</sup>Siehe Anhang.

diesem Vortest von den Befragten artikulierten Verbesserungsvorschläge wurden bei der Erstellung der letzten Version des Fragebogens berücksichtigt. Wesentlichen Input zum Fragenentwurf lieferte die Firma *AntOptima*<sup>87</sup>, die im Bereich Optimierung mit Ameisenalgorithmen tätig ist und somit über Erfahrung im Bereich der Implementierung von Optimierungsverfahren in Unternehmen verfügt.

### **4.1.3 Ablauf der Befragung**

Der ausgearbeitete Fragebogen wurde per Email an die Geschäftsleitung bzw. an den/die Logistikverantwortliche(n) versendet. Da auch Unternehmen außerhalb des deutschsprachigen Raumes in die Zielgruppe vielen, wurde der Fragebogen auch in Englisch erstellt. Neben dem Ausfüllen am Computer und der Rückübersendung per Email wurde auch die Option zum Faxversand von einigen Unternehmen in Anspruch genommen. Die erste Aussendung begann Mitte Juli. Nach ca. zwei Wochen erfolgte eine zweite Rundsendung an jene Firmen, von denen bis zu diesem Zeitpunkt keine Rückmeldung erfolgte. Obwohl die Rücklaufquote durch ein zweites Email gesteigert werden konnte, bedurfte es nach weiteren zwei Wochen einer telefonischen Kontaktaufnahme, um eine ausreichende Anzahl an ausgefüllten Fragebögen zu erhalten. Ende August wurde die Befragung beendet und es konnte eine Rücklaufquote von 25,5% der TOP 100 Unternehmen (46 Fragebögen) erreicht werden. Die Rücklaufquote der NICHT TOP 100 Unternehmen beläuft sich auf 21,64% (58 Fragebögen). Da aber bei den übrigen Unternehmen der NICHT TOP 100 Gruppe, die auf die Befragung nicht reagierten, nicht eruiert werden kann, ob sie die Bedingungen für die Zielgruppe erfüllen, ist die Rücklaufquote als nicht exakt bestimmbare Zahl anzusehen.

Zu bemerken ist, dass nach dem ersten Rundmail viele Unternehmen ihr Interesse an den Ergebnissen der Untersuchung bekundeten. Es gab auch einige Unternehmen, die telefonisch mit dem Autor Kontakt aufnahmen und Interesse an der Studie zeigten.

### **4.1.4 Auswertung**

Die statistische Berechnung der gesammelten Daten erfolgt mit SPSS 11.5 (Statistical program for social sciences). Mit Hilfe der deskriptiven Statistik wird die Auswertung der Fragebögen vorgenommen. Mit den Verfahren der deskriptiven Statistik sind Schlüsse von

---

<sup>87</sup><http://www.antoptima.ch>

der Stichprobe (befragte Unternehmen) auf die Grundgesamtheit (alle österreichischen Unternehmen, die mit dem TSP und VRP konfrontiert sind) nicht möglich.<sup>88</sup> Die damit ausgewerteten Ergebnisse beziehen sich daher nur auf diese Stichprobe.

## 4.2 Darstellung der Ergebnisse

### 4.2.1 Allgemeine strukturelle Merkmale der Stichprobe

Die folgenden *Abbildungen 8 bis 17* spiegeln den ersten Teil des Fragebogens und somit die strukturellen Unterschiede hinsichtlich Branche, Mitarbeiteranzahl, Umsatz und Anzahl der Länder, in denen die Unternehmen der TOP 100 und NICHT TOP 100 tätig sind, wider.

Die *Abbildung 8* zeigt die prozentuellen Anteile der jeweiligen Branche an der Befragung der NICHT TOP 100 Unternehmen. Dabei nimmt die Logistikbranche mit 31 % den größten Teil ein. Unter dem Begriff Logistik wurden alle jene Unternehmen eingeordnet, die sich hauptsächlich mit dem Transport von Waren bzw. Personen beschäftigen (Speditionen, Transportunternehmen, Verkehrsbetriebe usw.). Die Lebensmittelbranche hat mit 14% den zweitgrößten Anteil, gefolgt von Baustoff- und Getränkeindustrie mit jeweils 12%. Aufgrund von persönlichen Kontakten des Autors in der Lebensmittel- und Baustoffbranche kam der große Anteil dieser Branchen an der Befragung zustande.

Um eine bessere Übersicht zu gewähren, wurden alle Branchen, die nicht mehr als einen 3% Anteil an der Befragung ausmachen, unter den Begriff „Other“ eingeordnet. Die Aufzählung dieser Unternehmen wird in der *Abbildung 9* dargestellt.

---

<sup>88</sup>Vgl. Berekoven Ludwig u.a., **Marktforschung**, 9. Auflage, Verlag: Gabler, Wiesbaden 2001, S. 191.

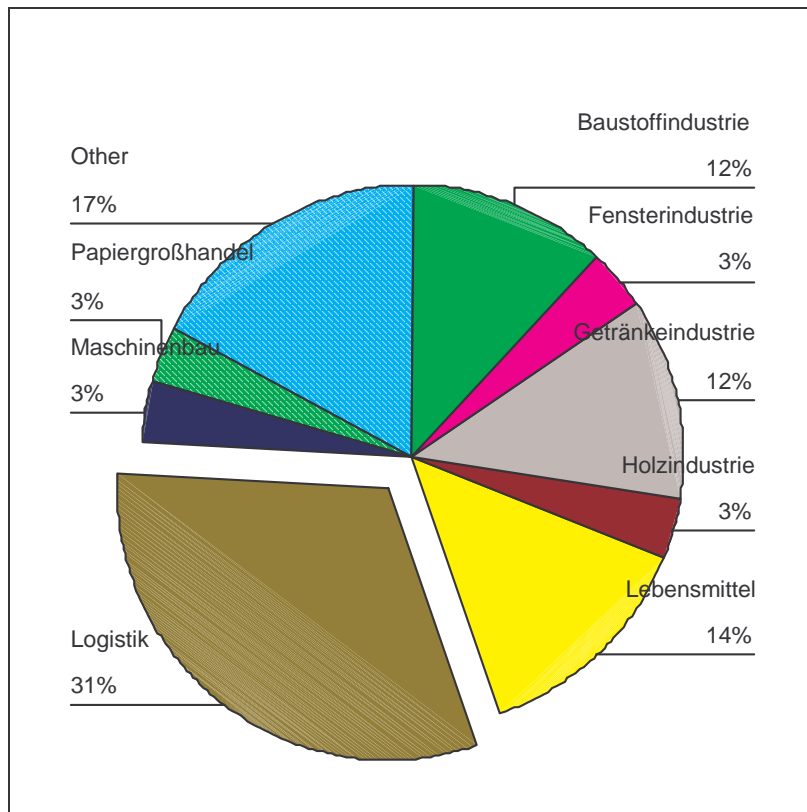


Abbildung 8: NICHT TOP 100, befragte Branchen

Anteil der Branchen an der Befragung unter 3%	
Branche	Prozent
<b>Baubranche</b>	1,7
<b>Druckerei</b>	1,7
<b>Finanzdienstleistung</b>	1,7
<b>Getränkegroßhandel</b>	1,7
<b>Handel</b>	1,7
<b>Maschinenhandel</b>	1,7
<b>Möbelindustrie</b>	1,7
<b>Nahrungsmittelindustrie</b>	1,7
<b>Parketterzeugung</b>	1,7
<b>Telekommunikation</b>	1,7

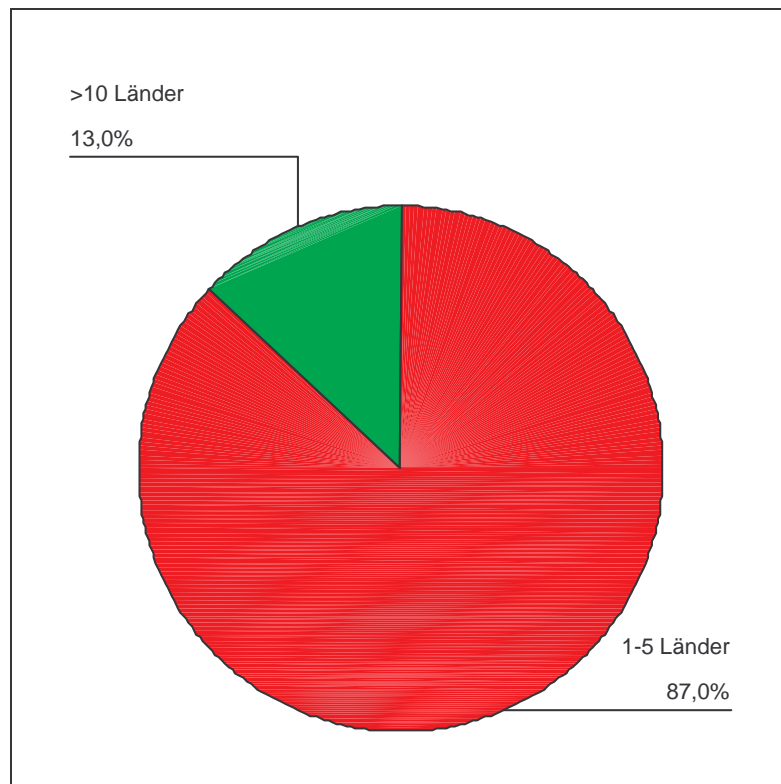
Abbildung 9: NICHT TOP 100, Branchen mit weniger als 3%

Anteil an der Befragung

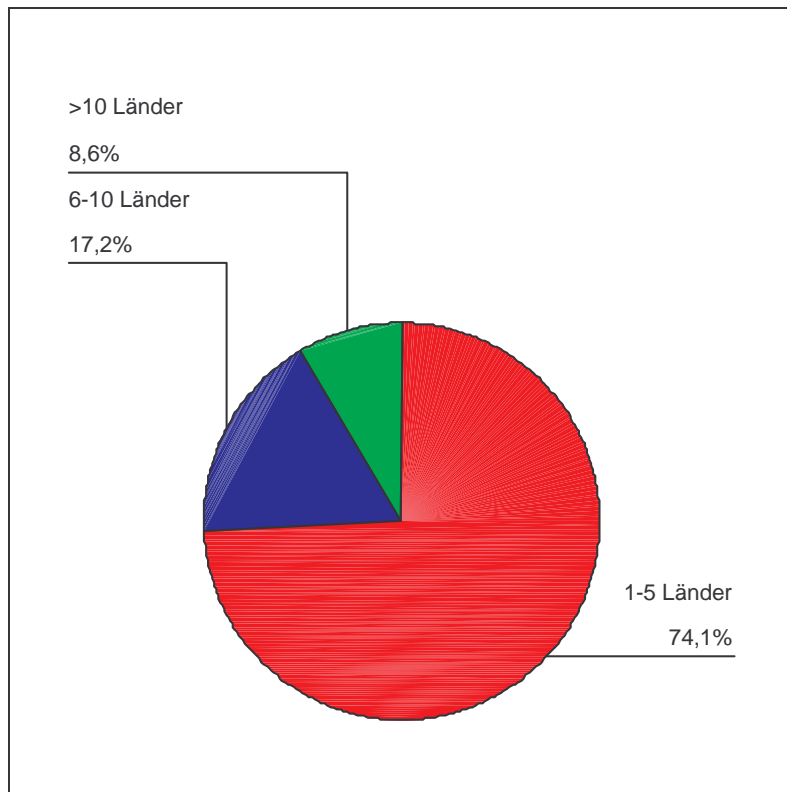
Da es sich bei den TOP 100 Unternehmen um eine Studie über Logistikbetriebe handelt, liegt der prozentuelle Anteil der Logistikbranche folglich bei 100%. Unter dem Begriff

Logistik wurden auch hier verschiedene Ausprägungen wie zum Beispiel Tiefkühllogistik, Logistik für bestimmte Branchen (z.B. Automobilbranche), Güterlogistik usw. zusammengefasst.

In den *Abbildungen 10* (TOP 100) und *11* (NICHT TOP 100) wird die Anzahl der Länder, in denen die Unternehmen tätig sind, dargestellt. Auffallend ist, dass von den TOP 100 Unternehmen keines im Mittelfeld (6-10 Länder) vertreten ist. Hingegen sind bei den NICHT TOP 100 Unternehmen 17,2% in 6-10 Ländern tätig. 87% der befragten TOP 100 Unternehmen sind in 1-5 Ländern tätig. Dieser hohe Anteil kommt wahrscheinlich dadurch zustande, weil die Zusammensetzung der Stichprobe aus den größten Logistikkonzernen aus Europa und den Größten aus Deutschland besteht. Der Anteil an den erhaltenen Fragebögen von Logistikkonzernen aus Deutschland war wesentlich höher. Das schließt natürlich nicht aus, dass die größten Logistikunternehmen aus Deutschland nicht auch in zahlreichen anderen Ländern tätig sind, aber es könnte ein Indiz für die 87% (1-5 Länder) sein.



**Abbildung 10: TOP 100, Anzahl der Länder, in denen das U. tätig ist**



**Abbildung 11: NICHT TOP 100, Anzahl der Länder, in denen das U. tätig ist**

Die Anzahl der Mitarbeiter, dargestellt in *Abbildung 12* (TOP 100) und *13* (NICHT TOP 100), ist ein Indiz dafür, wie groß die befragten Unternehmen sind. Die TOP 100 Unternehmen beschäftigen zum größten Teil (84,8%) über 200 Mitarbeiter. Den größten Anteil nimmt bei den NICHT TOP 100 Unternehmen zwar auch die Klasse mit über 200 Mitarbeitern ein, aber nur mit 36,2%. Der Rest ist auf die anderen Klassen (siehe *Abbildung 13*) verteilt.

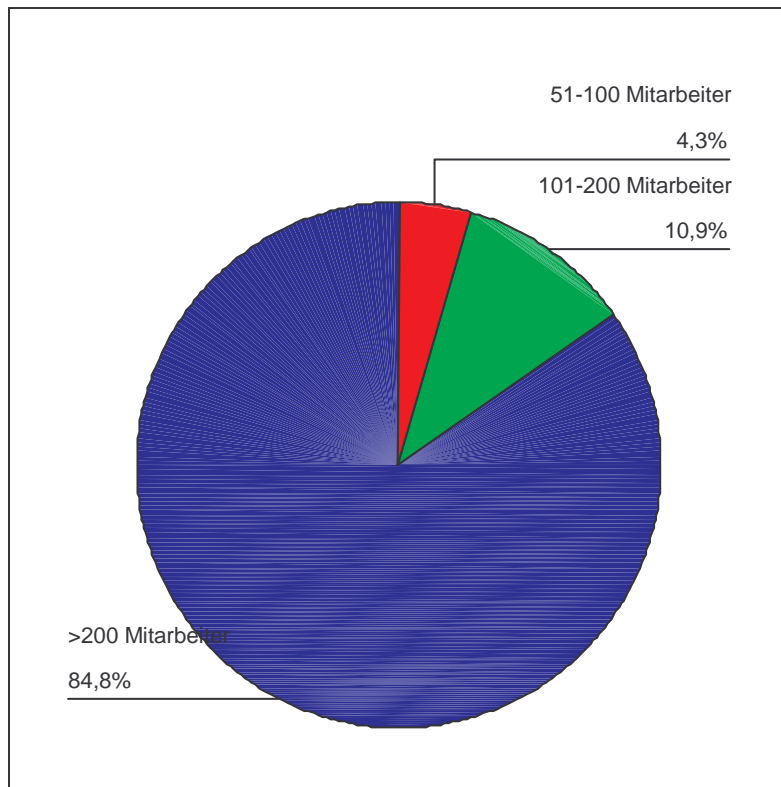


Abbildung 12: TOP 100, Anzahl der Mitarbeiter

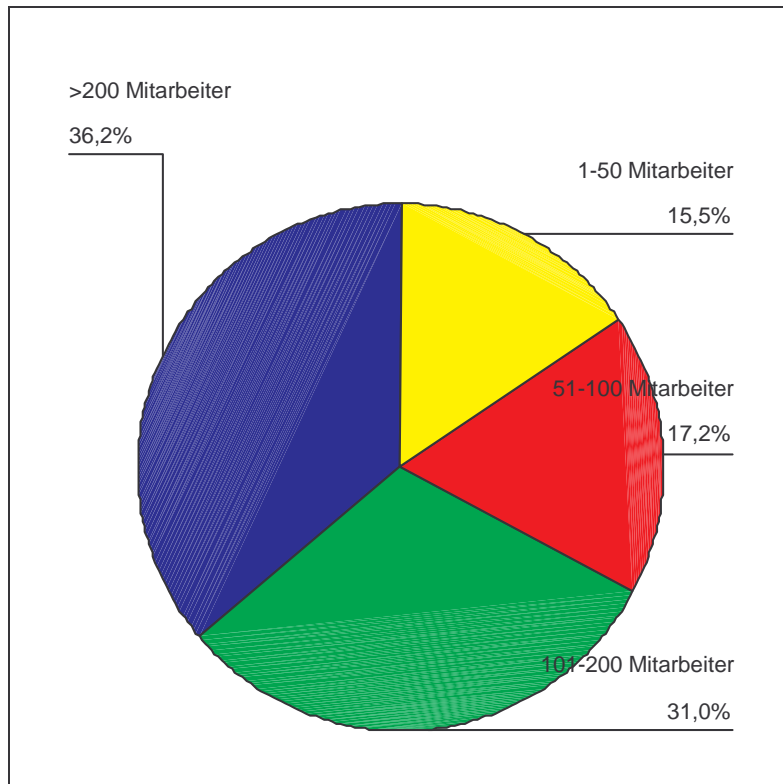


Abbildung 13: NICHT TOP 100, Anzahl der Mitarbeiter



Ein weiteres Indiz für die Größe eines Unternehmens ist der Umsatz. In den folgenden Darstellungen *Abbildung 14* bis *17* wurde der Umsatz nicht in Klassen eingeteilt, sondern der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Anzumerken ist, dass 9 der befragten TOP 100 Unternehmen (*Abbildung 14*) und sogar 28 der befragten NICHT TOP 100 Unternehmen (*Abbildung 16*) die Frage bezüglich des Umsatzes nicht ausfüllten. Aufgrund dieser fehlenden Informationen kann der errechnete Mittelwert bzw. die Standardabweichung der TOP 100 und vor allem der NICHT TOP 100 Unternehmen für diese Stichprobe nur bedingt als repräsentativ gesehen werden.

Die *Abbildung 14* gibt den Mittelwert des Umsatzes der TOP 100 Unternehmen mit ca. 392 Millionen Euro wieder. Die Standardabweichung mit ca. 870 Millionen Euro zeigt, dass es sehr große Unterschiede innerhalb der befragten Unternehmen gibt. Um zu zeigen, wie sich der Mittelwert zusammensetzt und wie viele Unternehmen wirklich einen Umsatz nahe dem errechneten Wert erzielen, wurde die Normalverteilungskurve in *Abbildung 15* dargestellt. Diese zeigt, dass es zwar Unternehmen gibt, die im Vergleich zu den übrigen Unternehmen sehr hohe Umsätze erwirtschaften, aber der Großteil der befragten Unternehmen doch Umsätze nahe dem Mittelwert erzielt.

N	Valid	37
	Missing	9
Mean		392629391
Std. Deviation		868716301

**Abbildung 14: TOP 100, Mittelwert und Standardabw. v. Umsatz**

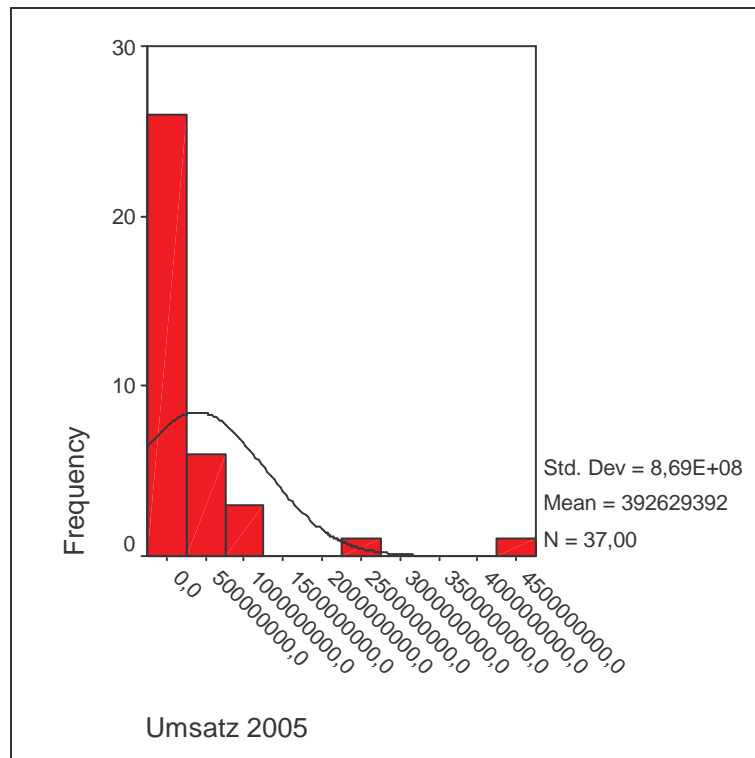


Abbildung 15: TOP 100, Normalverteilungskurve v. Umsatz

Der errechnete Mittelwert (*Abbildung 16*) des Umsatzes der NICHT TOP 100 Unternehmen ist mit ca. 60 Millionen deutlich kleiner als der Mittelwert der TOP 100 Unternehmen. Die Standardabweichung ist im Verhältnis zwar nicht so hoch wie bei den TOP 100 Unternehmen, zeigt aber dennoch große Unterschiede hinsichtlich des Umsatzes innerhalb der NICHT TOP 100 Unternehmen. Die *Abbildung 17* zeigt die Normalverteilungskurve des Umsatzes der NICHT TOP 100 Unternehmen. Aus dieser *Abbildung* wird ersichtlich, dass der Anteil der Unternehmen mit einem Umsatz von 75 Millionen bzw. 100 Millionen am größten ist. Es sei aber noch einmal auf die fehlenden 28 Umsätze hingewiesen.

N	Valid	30
	Missing	28
Mean		59906666
Std. Deviation		46238310

Abbildung 16: NICHT TOP 100, Mittelwert und Standardabw. v. Umsatz

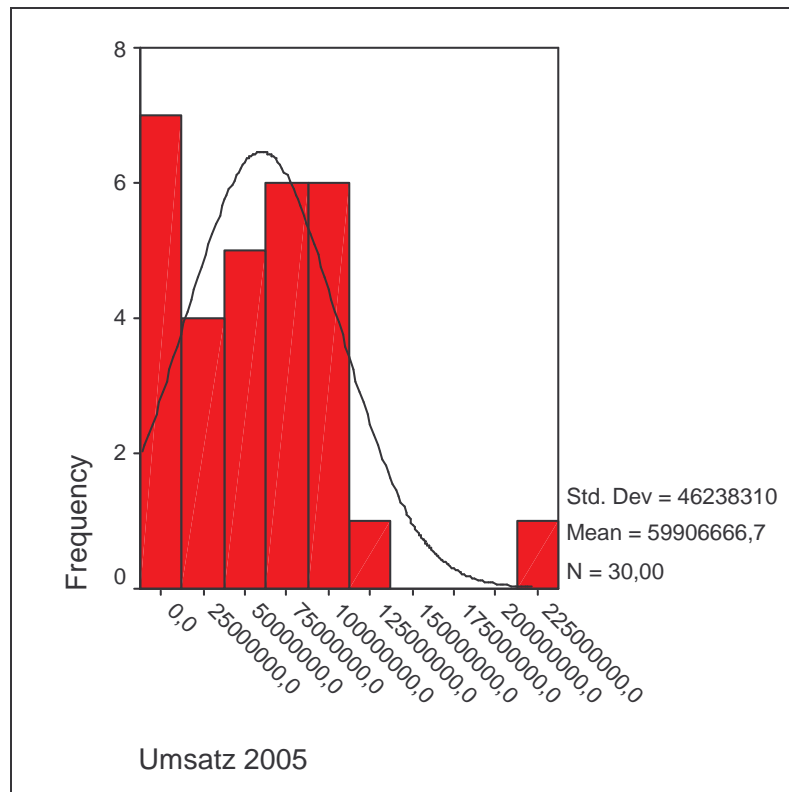


Abbildung 17: NICHT TOP 100, Normalverteilungskurve v. Umsatz

Die strukturellen Unterschiede wurden mit Hilfe der vorangegangenen Abbildungen dargestellt. Unterschiede ergeben sich in erster Linie bei den befragten Branchen. In der Befragung der TOP 100 Unternehmen sind im Gegensatz zur Befragung der NICHT TOP 100 Unternehmen nur Logistikbetriebe enthalten. Es kann die klare Aussage getroffen werden, dass der Großteil der befragten Unternehmen der TOP 100 Liste hinsichtlich der Mitarbeiterzahl und des Umsatzes deutlich größer ist als die befragten Unternehmen, die nicht aus der TOP 100 Liste stammen.

#### 4.2.2 Problemstellungen im Bereich Logistik in den befragten Unternehmen

Die Logistikproblemstellungen der befragten Unternehmen stehen in diesem Kapitel im Vordergrund. Unter Logistikproblemstellungen werden in dieser Arbeit alle Problemstellungen rund um das TSP und des VRP gesehen. Tatsächlich existieren noch zahlreiche weitere Problemstellungen im Logistikbereich, auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

Grundvoraussetzung für die Aufnahme von Fragebögen in die Statistik, ist das Vorhandensein des TSP. Die Komplexität des TSP ist in erster Linie abhängig von der Anzahl der zu besuchenden Kunden/Kundinnen bzw. Orte. Die Anzahl der Orte stellt

daher auch einen wesentlicher Faktor in Bezug auf den Einsatz von Ameisenalgorithmen dar. Darüber hinaus spielt die zur Verfügung stehende Zeit in der Anwendung von Optimierungsverfahren eine zentrale Rolle.

Die Grenze, ab welcher Anzahl von Städten Ameisenalgorithmen sinnvoll eingesetzt werden können, wurde im Rahmen der Ergebnisauswertung auf 100 Städte gesetzt. Das soll aber nicht vermitteln, dass Ameisenalgorithmen generell erst ab einer Anzahl von 100 Städten eingesetzt werden können. Ein befragtes Unternehmen gab an, ACO bereits bei 15 Städten anzuwenden und nach Rücksprache mit der Firma *AntOptima* können Ameisenalgorithmen auch bei sehr geringer Anzahl von Städten (ab ca. 10 Städten) lukrativ eingesetzt werden. Um aber eine Aussage treffen zu können, ob bei einer geringen Städteanzahl Ameisenalgorithmen sinnvoll wären, sind eine Reihe von Faktoren notwendig (Anzahl der Stops, gesetzliche Auflagen, Entfernungen zwischen den Orten, ...), die durch eine Befragung schwer im Detail zu erfahren sind. Natürlich ist es unter Umständen problematisch eine Städteanzahl festzulegen, ab dieser Ameisenalgorithmen sinnvoll eingesetzt werden können. Für den Einsatz in Unternehmen spielt das Kosteneinsparungspotential die zentrale Rolle<sup>89</sup> und diese kann nur individuell beurteilt werden. Dennoch wurde eine Grenze von 100 Städten für die Auswertung der Ergebnisse aus zweierlei Gründen herangezogen:

- Das Kosteneinsparungspotenzial ist von vielen Faktoren abhängig. Tatsache ist aber, dass bei vielen Städten und Entfernungen das Potenzial für Kostenvorteile höher ist, als bei einer niedrigen Anzahl von Städten.
- Der wesentliche Punkt für 100 Städte als untere Grenze für den Einsatz von ACO sind vorangegangene Tests<sup>90</sup>. Aus diesen Tests ist ersichtlich, dass es bei einer Städteanzahl unter 100 noch einige andere Lösungsmöglichkeiten gibt, die ein sehr gutes Resultat hinsichtlich der kürzesten Strecke liefern. Bei einer Städteanzahl von beispielsweise 100 Städten liefern aber vor allem Ameisenalgorithmen das beste Ergebnis. Bei einer Städteanzahl unter 100 müsste also vielmehr auf Kosten und Nutzen der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten im Einzelfall geachtet werden.

---

<sup>89</sup>Vgl. Ergebnisse in Kapitel 6.10.4.

<sup>90</sup>Vgl. Bullnheimer Bernd u.a., **A New Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, S. 11, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virlib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:12 und Vgl. Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, S. 6, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15.

Eine weiterer Notwendigkeit für den Einsatz von Ameisenalgorithmen die Kenntnis der Transportkosten und zwar nicht nur von einem Kunden zum nächsten, sondern von einem Kunden zu allen anderen Kunden. Die Beschaffung dieser Daten, sofern sie nicht vorhanden wären, ist mit zusätzlichen Kosten verbunden. Das Ergebnis, ob diese Daten in den Unternehmen schon im Vorhinein bekannt sind, zeigt die *Abbildung 28*.

Mit weiteren Fragen werden Probleme aufbauend auf dem TSP (VRP, VRPTW CVRP) identifiziert, um die Problemlandschaft klassifizieren zu können.

Die *Abbildungen 18* (TOP 100) und *19* (NICHT TOP 100) geben zunächst den Mittelwert, die kleinste Kundenanzahl und die größte Kundenanzahl in der Tourenplanung wieder. Beide Befragungsgruppen beinhalten Unternehmen die nur 10 Kunden zu beliefern haben bzw. in ihre Tourenplanung einbeziehen. Die maximale Kundenanzahl beträgt bei TOP 100 Unternehmen 20.000 und bei NICHT TOP 100 Unternehmen 15.000. Den wesentlichen Unterschied zwischen TOP 100 und NICHT TOP 100 Unternehmen zeigt der Mittelwert. Die mittlere Kundenanzahl beträgt bei TOP 100 Unternehmen 1.712 Kunden/Kundinnen und bei NICHT TOP 100 Unternehmen 734 Kunden/Kundinnen. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass die befragten TOP 100 Unternehmen viel mehr Kunden/Kundinnen in ihre Tourenplanung miteinbeziehen als NICHT TOP 100 Unternehmen. Das könnte höchstwahrscheinlich mit der Größe der Unternehmen in Verbindung stehen.<sup>91</sup>

N	Valid	46
	Missing	0
Mean		1711,85
Minimum		10
Maximum		20000

**Abbildung 18: TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung, Mittelwert, Min-Max**

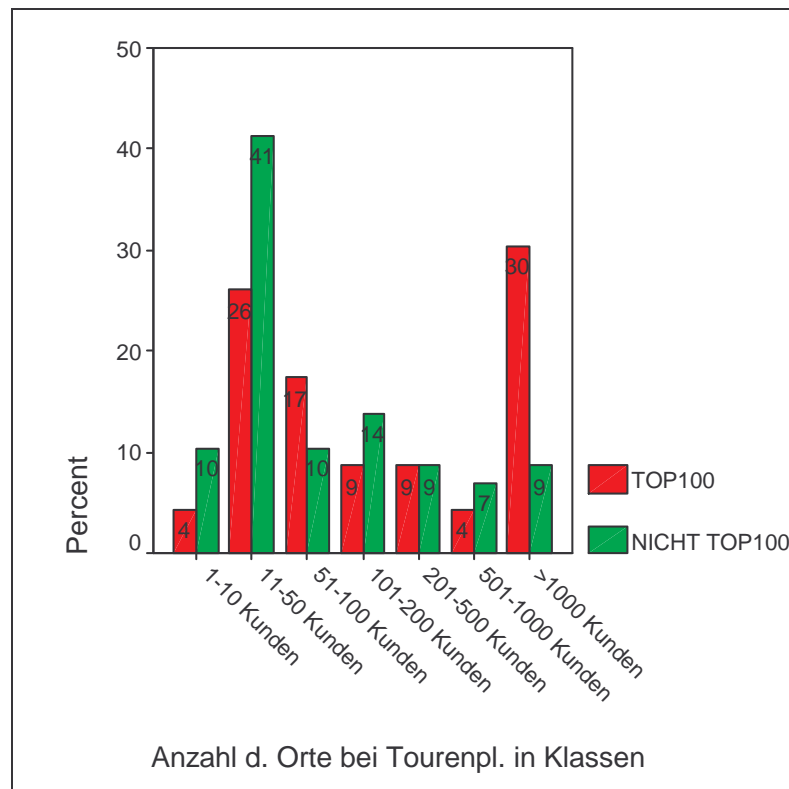
N	Valid	58
	Missing	0
Mean		734,41
Minimum		10
Maximum		15000

**Abbildung 19: NICHT TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung, Mittelwert, Min-Max**

---

<sup>91</sup>Vgl. Ergebnisse in *Kapitel 6.10.1*.

Eine Übersicht über die Verteilung der Kundenanzahl in der Tourenplanung gibt die *Abbildung 20*. Die Anzahl der Unternehmen, die über 1000 Kunden/Kundinnen in die Tourenplanung integrieren, ist bei TOP 100 Unternehmen (roter Balken) mehr als dreimal so hoch wie bei NICHT TOP 100 Unternehmen. Der Großteil der NICHT TOP 100 Unternehmen beliefert 11-50 Kunden/Kundinnen. Ausgehend von der gesetzten Grenze für den sinnvollen Einsatz von Ameisenalgorithmen von 100 Kunden/Kundinnen beträgt der Anteil der TOP 100 Unternehmen, die über 100 Orte bzw. Kunden/Kundinnen in die Tourenplanung integrieren, 52% (24 Unternehmen). 38% (22 Unternehmen) der NICHT TOP 100 Unternehmen beziehen ebenfalls über 100 Orte bzw. Kunden/Kundinnen in ihre Tourenplanung mit ein.



**Abbildung 20: TOP 100 und NICHT TOP 100, Anzahl d. Orte bei Tourenplanung**

Die zur Verfügung stehende Zeit für die Planung einer neuen Tour ist bei beiden Befragungsgruppen gering. Der Zeitbedarf in Stunden für die jeweilige Kundenanzahl wird in *Abbildung 21* und *22* aufgezeigt. Nur bis zu drei Stunden stehen 57% (*Abbildung 21*, blau hinterlegt) der befragten TOP 100 Unternehmen bzw. 54% (*Abbildung 22*, blau hinterlegt) der befragten NICHT TOP 100 Unternehmen für die Tourenplanung zur Verfügung.

Das grün hinterlegte Ergebnis stellt den Zeitbedarf von mindestens 50% der Gruppe, die hinsichtlich ihrer Kundenanzahl<sup>92</sup> am häufigsten auftritt, dar. Das rot hinterlegte Ergebnis zeigt die zur Verfügung stehende Zeit von mindestens 50% der Gruppe, die hinsichtlich ihrer Kundenanzahl am zweithäufigsten auftritt. Das gelb hinterlegte Ergebnis gibt den Zeitbedarf der dritthäufigsten Gruppe wieder.

Folgende Aussagen über den Zeitbedarf der TOP 100 Unternehmen können getroffen werden:

58% der Unternehmen, die 11-50 Kunden/Kundinnen in die Tourenplanung miteinbeziehen, haben 1 Stunde für die Tourenplanung zur Verfügung. 50% der Unternehmen, die 51-100 Kunden/Kundinnen in die Tourenplanung miteinbeziehen, haben 3 Stunden zur Verfügung und 57% der Unternehmen, die über 1000 Kunden/Kundinnen miteinbeziehen, stehen ebenfalls 3 Stunden zur Verfügung.

Zeitbedarf für die Tourenplanung, gegliedert nach Anzahl d. Orte bei der Tourenplanung															
Std.	1-10 Kunden		11-50 Kunden		51-100 Kunden		101-200 Kunden		201-500 Kunden		501-1000 Kunden		>1000 Kunden		kumuliert gesamt
	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	
1	0	0%	7	58%	0	0%	0	0%	1	25%	0	0%	3	21%	25%
2	1	50%	1	67%	2	25%	0	0%	1	50%	0	0%	1	29%	39%
3	0	50%	2	83%	2	50%	0	0%	0	50%	0	0%	4	57%	57%
4	0	50%	0	83%	1	63%	1	50%	1	75%	1	50%	1	64%	68%
5	0	50%	0	83%	0	63%	0	50%	0	75%	0	50%	1	71%	70%
7	0	50%	0	83%	0	63%	0	50%	0	75%	0	50%	1	79%	73%
8	0	50%	0	83%	0	63%	1	100%	0	75%	0	50%	0	79%	75%
24	0	50%	0	83%	1	75%	0	100%	1	100%	0	50%	3	100%	86%
48	1	100%	0	83%	0	75%	0	100%	0	100%	1	100%	0	100%	91%
71	0	100%	1	92%	0	75%	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	93%
72	0	100%	0	92%	1	88%	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	95%
120	0	100%	1	100%	1	100%	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	100%

Abbildung 21: TOP 100, zur Verfügung stehende Zeit für die Tourenplanung

Folgende Schlüsse über den Zeitbedarf der NICHT TOP 100 Gruppe können aus der *Abbildung 22* getroffen werden:

<sup>92</sup>Vgl. Ergebnisse in *Abbildung 20*.

58% der Unternehmen, die 11-50 Kunden in die Tourenplanung miteinbeziehen, stehen 2 Stunden für die Tourenplanung zur Verfügung. Der Hälfte der Unternehmen, die 51-100 Kunden/Kundinnen in die Tourenplanung integrieren, steht eine Zeitspanne von 3 Stunden zur Verfügung. 50% der Unternehmen, die 101-200 Kunden/Kundinnen und 1-10 Kunden/Kundinnen miteinbeziehen, stehen 5 Stunden zur Verfügung.

**Zeitbedarf für die Tourenplanung, gegliedert nach Anzahl d. Orte bei der Tourenplanung**

Std.	1-10 Kunden		11-50 Kunden		51-100 Kunden		101-200 Kunden		201-500 Kunden		501-1000 Kunden		>1000 Kunden		kumuliert gesamt
	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	Anzahl	kumuliert	
1	1	17%	4	17%	2	33%	1	13%	1	20%	1	33%	0	0%	18%
2	1	33%	10	58%	0	33%	1	25%	0	20%	2	100%	2	40%	46%
3	0	33%	4	75%	1	50%	0	25%	0	20%	0	100%	0	40%	54%
4	0	33%	2	83%	1	67%	0	25%	1	40%	0	100%	0	40%	61%
5	1	50%	0	83%	0	67%	2	50%	1	60%	0	100%	0	40%	68%
6	0	50%	1	88%	0	67%	1	63%	0	60%	0	100%	0	40%	72%
8	0	50%	1	92%	0	67%	0	63%	0	60%	0	100%	0	40%	74%
12	0	50%	1	96%	1	83%	1	75%	0	60%	0	100%	0	40%	79%
24	1	67%	1	100%	1	100%	1	88%	2	100%	0	100%	0	40%	89%
48	1	83%	0	100%	0	100%	0	88%	0	100%	0	100%	2	80%	95%
120	1	100%	0	100%	0	100%	1	100%	0	100%	0	100%	0	80%	98%
168	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	0	100%	1	100%	100%

**Abbildung 22: NICHT TOP 100, zur Verfügung stehende Zeit für die Tourenplanung**

Bei der Betrachtung von Anzahl der Orte und zur Verfügung stehender Zeit drängt sich die Frage auf, ob diese beiden Faktoren miteinander in Verbindung stehen. Bei einer hohen Anzahl von Orten in der Tourenplanung müsste auch die zur Verfügung stehende Zeit größer sein. Um das zu Überprüfen wird die Korrelation nach Pearson durchgeführt. Die Korrelation der beiden Faktoren Städteanzahl und Zeit innerhalb der TOP 100 Gruppe zeigt die *Abbildung 23*. Aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit eines Zufallsfehlers (Signifikanz 0,557) kann anhand dieser Berechnung keine Aussage über den Zusammenhang der Variablen Städteanzahl und Zeit innerhalb der TOP 100 Gruppe getroffen werden.



		Anzahl d. Orte bei Tourenpl.	Zeit für Tourenplanung
Anzahl d. Orte bei Tourenpl.	Pearson Correlation	1	-,091
	Sig. (2-tailed)	.	,557
	N	46	44
Zeit für Tourenplanung	Pearson Correlation	-,091	1
	Sig. (2-tailed)	,557	.
	N	44	44

**Abbildung 23: TOP 100, Korrelation von Anzahl d. Orte und Zeit f. Tourenplanung**

Im Gegensatz zur TOP 100 Gruppe in *Abbildung 23*, zeigt die *Abbildung 24* ein eindeutiges Ergebnis. Es besteht eine mittlere Korrelation<sup>93</sup> (Korrelationskoeffizient von 0,636) zwischen Anzahl der Orte und der zur Verfügung stehender Zeit. Der lineare Zusammenhang der untersuchten Variablen ist also gegeben. Das Ergebnis ist außerdem sehr signifikant, d.h. die Wahrscheinlichkeit für einen Zufallsfehler ist sehr gering.

		Anzahl d. Orte bei Tourenpl.	Zeit für Tourenplanung
Anzahl d. Orte bei Tourenpl.	Pearson Correlation	1	,636(**)
	Sig. (2-tailed)	.	,000
	N	58	57
Zeit für Tourenplanung	Pearson Correlation	,636(**)	1
	Sig. (2-tailed)	,000	.
	N	57	57

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

**Abbildung 24: NICHT TOP 100, Korrelation von Anzahl d. Orte und Zeit f. Tourenplanung**

Ein möglicher Grund für die unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten der beiden Gruppen, könnte damit begründet werden, dass die befragten Logistikbetriebe der TOP 100 Gruppe die Nachfrage ihrer Kunden schlechter planen können. Im Vergleich dazu verfügt ein befragter Handelsbetrieb der NICHT TOP 100 Gruppe möglicherweise über einen festen Kundenstock und kann somit die Zeit der Anzahl der Kunden anpassen. Eventuell kennt dieser Betrieb auch ungefähr die Nachfrage seiner Kunden/Kundinnen.

<sup>93</sup>Vgl. Schlittgen Rainer, **Einführung in die Statistik, Analyse und Modellierung von Daten**, 10. Auflage, Verlag: Oldenbourg, München 2003, S. 179.

Neben der Anzahl der Kunden/Kundinnen und der zur Verfügung stehenden Zeit werden nun weitere Problemstellungen klassifiziert. Die *Abbildung 24* macht erkenntlich, ob es sich um das klassische VRP der befragten Firmen handelt. In diese Grafik wurden nur Unternehmen miteinbezogen, die erstens ein Städteproblem  $\geq 100$  haben und zweitens das Transportservice ohne externe Spedition durchführen. Wird das Transportservice durch eine externe Spedition durchgeführt, startet das Fahrzeug wahrscheinlich immer vom gleichen Ort und kehrt dorthin auch wieder zurück, aber ob diese Problemstellung auf den Auftraggeber zutrifft, ist nicht ersichtlich. Deshalb werden die Fragebögen auch nach dieser Bedingung gefiltert.

Diese Voraussetzungen erfüllen 25 TOP 100 Unternehmen und 22 NICHT TOP 100 Unternehmen. Einige Unternehmen haben die Frage, ob die Fahrzeuge nach Tourende zum Ausgangspunkt zurückkehren, mit ja und nein beantwortet. Ein Grund dafür könnte zum Beispiel sein, dass ein Logistikdienstleister verschiedene Dienstleistungen anbietet. Es wird daher angenommen, dass das VRP daher teilweise besteht. Von den 25 TOP 100 Unternehmen haben 72% das klassische VRP zu lösen. Von den 22 NICHT TOP 100 Unternehmen sind es 87%. Erstaunlich ist, dass der Großteil der insgesamt befragten Unternehmen Zeitfenster in die Tourenplanung integriert. Nur 6 Unternehmen aller befragten Betriebe berücksichtigen bei ihrer Tourenplanung keine Zeitfenster.

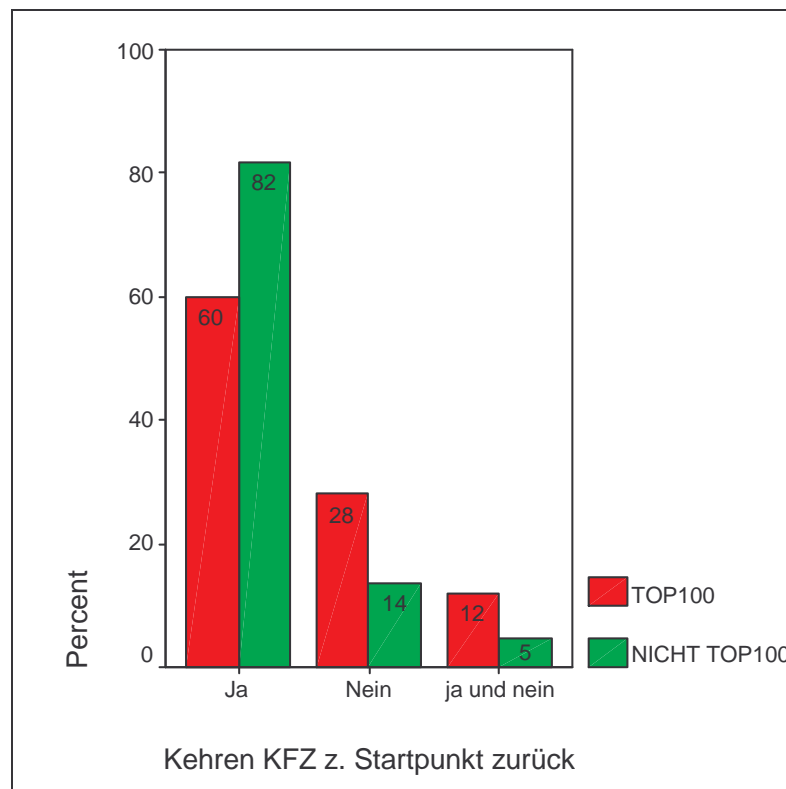
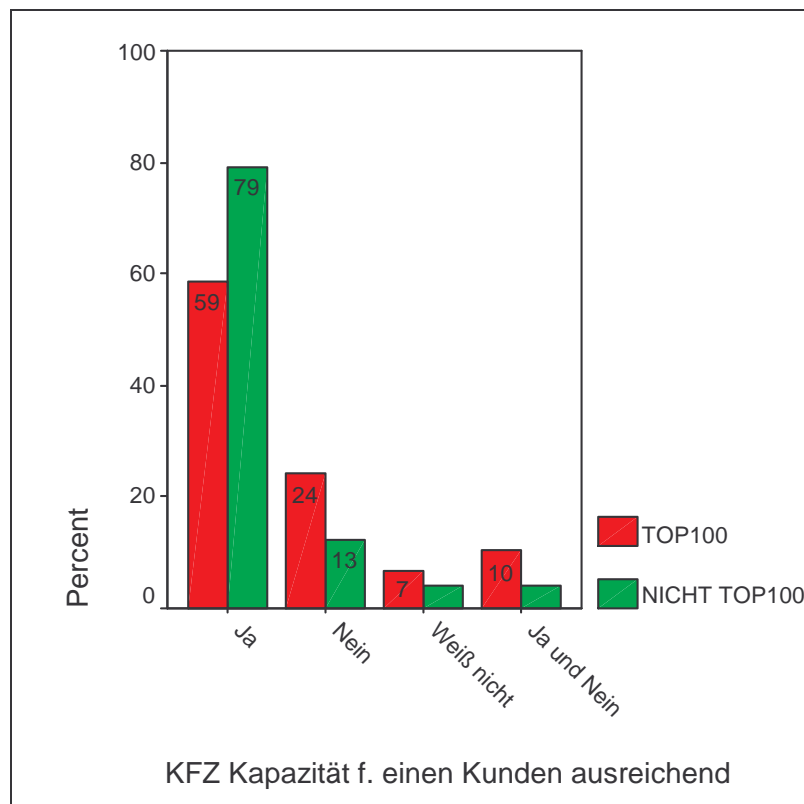


Abbildung 25: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kehren KFZ z. Startpunkt zurück

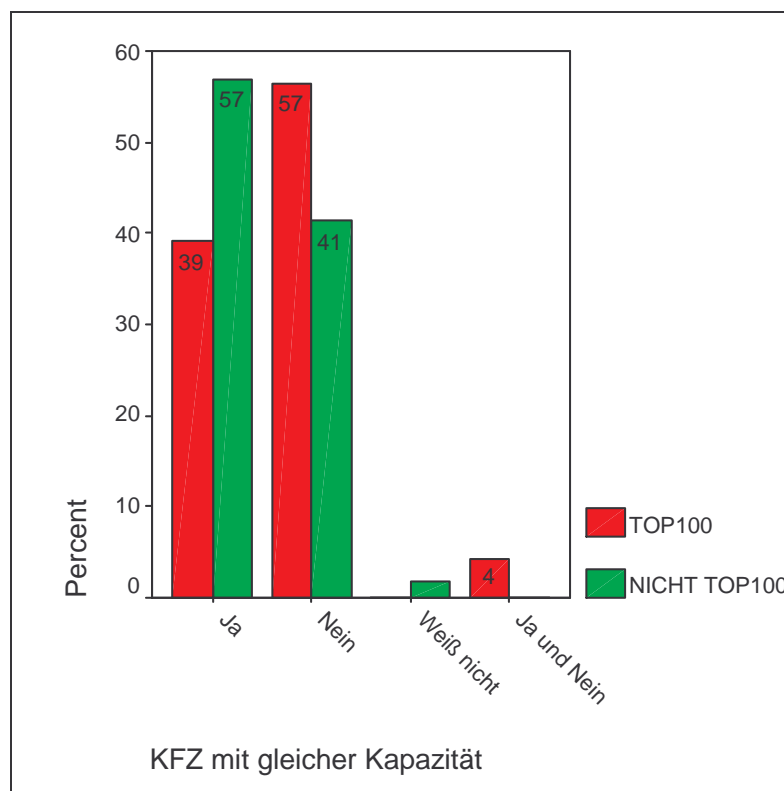
Innerhalb des TSP und VRPTW gibt es noch weitere Problemstellungen, wie das CVRP<sup>94</sup>. Für die errechnete Anzahl von Unternehmen, die das klassische VRP als Problemstellung haben, gibt es kein Unternehmen die auch die Bedingungen für das CVRP erfüllen. Die Bedingung wäre, wenn die Nachfrage eines Kunden/Kundin nicht mit der Kapazität eines Fahrzeuges zu befriedigen wäre. Es soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Kapazitäten eines Fahrzeuges immer ausreichen. Die Kapazität eines Fahrzeuges spielt fast immer eine Rolle. Wenn aber mehrere Fahrzeuge für die Erfüllung der Nachfrage eines Kunden notwendig sind und viele unterschiedliche Mengen geliefert werden müssen, steigert sich wiederum die Problemkomplexität. Die *Abbildung 26* zeigt, ob die Kapazität eines Fahrzeuges jener Firmen, die ein Städteproblem über 100 Städte aufweisen, ausreichend ist. Mit „Nein“ antworteten 24% der TOP 100 und 13% der NICHT TOP 100 Unternehmen.



**Abbildung 26: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kapazität f. einen Kunden ausreichend**

<sup>94</sup>Vgl. *Kapitel 4.1.*

Um die Komplexität bei der Tourenplanung hervorzuheben, wird mit einer Frage geklärt, ob für die Tourenplanung Fahrzeuge mit der gleichen Kapazität zur Verfügung stehen, was die Tourenplanung natürlich erleichtern würde. Die Ergebnisse zeigen sich in *Abbildung 27*. Betrachtet werden in diesem Fall wieder alle befragten Unternehmen. Bei 57% der TOP 100 Unternehmen sowie bei 41% der NICHT TOP 100 Unternehmen sind Fahrzeuge mit unterschiedlichen Kapazitäten im Einsatz. Allerdings sollte man hierbei auch die unterschiedliche Branchenzusammensetzung bei der Befragung miteinbeziehen. Ein Logistikanbieter, der, um ein extremes Beispiel zu nennen, Paketdienste und Schwertransporte durchführt, wird unterschiedliche Fahrzeuge benutzen. Ein Handelsunternehmen, das immer mit den gleichen bzw. ähnlichen Produkten am Markt ist, wird sich eher auf einen Fahrzeugtyp spezialisieren können.



**Abbildung 27: TOP 100 und NICHT TOP 100 Unternehmen, KFZ mit gleicher Kapazität**

Die Antworten auf die Frage, ob die Transportkosten zwischen den einzelnen Kunden/Kundinnen bekannt sind, zeigt die *Abbildung 28*. Das Wissen über die Kosten von einem Kunden/Kundin zu allen anderen (nicht nur zum nächst liegenden) ist eine Voraussetzung für den Einsatz von Ameisenalgorithmen. Sind die Transportkosten zwischen den Kunden noch nicht bekannt, ist die Erhebung mit weiteren Kosten

verbunden. Bei 93% der TOP 100 und bei 58% der NICHT TOP 100 Unternehmen ist diese Voraussetzung bereits bekannt.

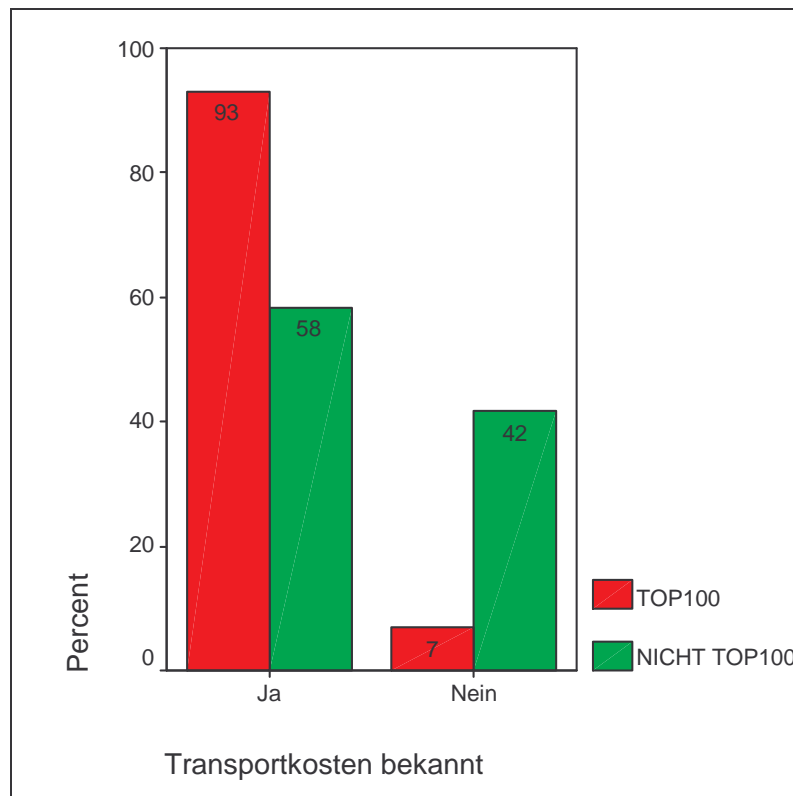


Abbildung 28: TOP 100 und NICHT TOP 100, Transportkosten bekannt

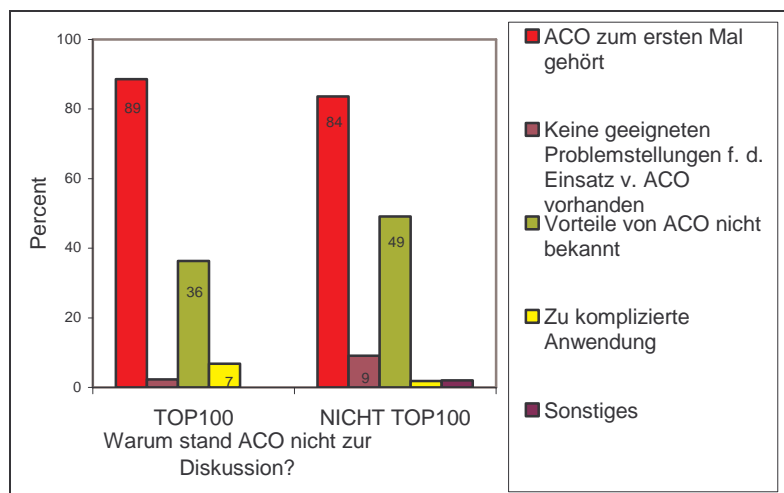
Die dargestellten Ergebnisse in den *Abbildungen 18 bis 20* lassen den Schluss vermuten, dass die befragten TOP 100 Unternehmen aufgrund der großen Anzahl an Städten/Orten mehr Ameisenalgorithmen einsetzen als die befragten NICHT TOP 100 Unternehmen. Auch weitere Merkmale, wie die kurze zur Verfügung stehende Zeit und erweiterte Problemstellungen, die in den *Abbildungen 21 bis 28* dargestellt sind, sprechen für den Einsatz von Ameisenalgorithmen. Ob diese auch eingesetzt werden, zeigen die Ergebnisse im folgenden Kapitel.

#### 4.2.3 Anwendung von Ameisenalgorithmen in den befragten Unternehmen

Der Einsatz von Ameisenalgorithmen für Logistikanwendungen stand für zwei (4,35%) Unternehmen der TOP 100 Liste und für drei (5,17%) Unternehmen der NICHT TOP 100 Betriebe zur Diskussion. Aus welchen Gründen für die restlichen Firmen Ameisenalgorithmen nicht zur Diskussion standen, zeigen die Ergebnisse in der *Abbildung 29*. Mehrfachnennungen waren bei dieser Frage möglich, deshalb ergibt die Summer der Prozente mehr als 100. Der Großteil der Unternehmen sowohl bei TOP 100 als auch bei

NICHT TOP 100 Unternehmen, hat ACO zum ersten Mal gehört bzw. kennt die Vorteile von ACO nicht. Alle Unternehmen, die „keine geeigneten Problemstellungen f. d. Einsatz v. ACO vorhanden“ wählten (außer einem NICHT TOP 100 Unternehmen), kreuzten auch „ACO zum ersten Mal gehört“ an. Deshalb kann auch davon ausgegangen werden, dass diesen Unternehmen Ameisenalgorithmen ebenfalls unbekannt sind. Ein NICHT TOP 100 Unternehmen gab als sonstige Gründe „Eigenentwicklung eines Tourenoptimierungstool/SAP kompatibel. Optimierung hinsichtlich Gewicht (Banknoten/Münzen), Geldwert, Anfahrtszeit, Zeitfenster, Rückkunftszeit, Versicherungslimit“ an und ein NICHT TOP 100 Unternehmen wählte nur „Sonstiges“ ohne einen Text hinzuzufügen.

Anhand der Auswertung dieser Ergebnisse kann der Schluss gezogen werden, dass aufgrund der *Frage 15*<sup>95</sup> („Stand für Sie der Einsatz von ACO für Logistikanwendungen bereits zur Diskussion?“) und der Nennungen „zu komplizierte Anwendungen“, „keine geeigneten Problemstellungen f. d. Einsatz von ACO“ und „Sonstiges“ ohne „ACO zum ersten Mal gehört“ oder „Vorteile von ACO nicht bekannt“ zu wählen, nur 7 (15,21%) der befragten TOP 100 Unternehmen sowie 5 (8,62%) der befragten NICHT TOP 100 Unternehmen, Ameisenalgorithmen als Optimierungsmöglichkeit kennen.

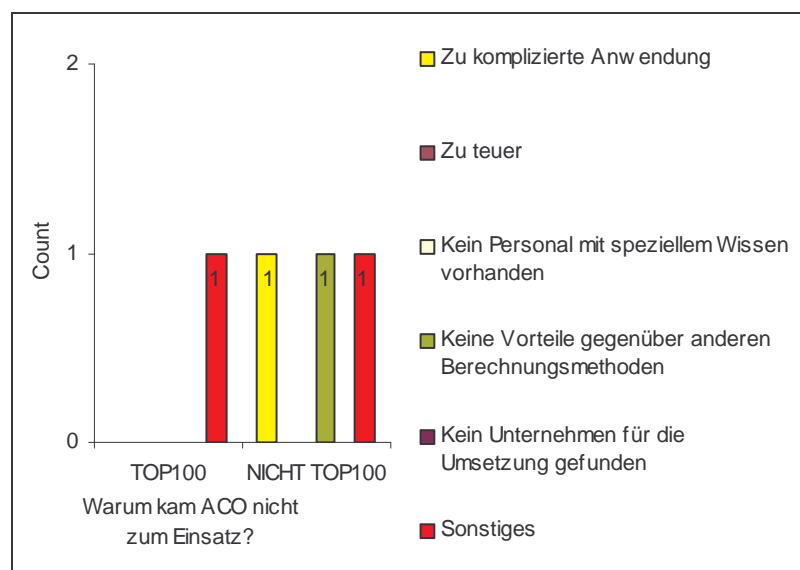


**Abbildung 29: TOP 100 und NICHT TOP 100, warum stand der ACO nicht zur Diskussion**

Nachdem geklärt wurde, bei welchen Firmen Ameisenalgorithmen zur Diskussion standen und welche Gründe es gibt, warum sie nicht zur Diskussion standen, ist nun interessant zu wissen, ob Ameisenalgorithmen für die Optimierung wirklich eingesetzt wurden und wenn

<sup>95</sup>siehe Anhang.

nein, warum nicht. Von den Firmen, in denen Ameisenalgorithmen bereits zur Diskussion standen (2 Unternehmen der TOP 100 Liste und für 3 Unternehmen der NICHT TOP 100 Betriebe), setzen 2 Unternehmen (ein Unternehmen der TOP 100 Liste und ein NICHT TOP 100 Unternehmen) Ameisenalgorithmen ein, alle Anderen nicht. Die genannten Gründe zeigt die *Abbildung 30*. Bei der betreffenden Frage waren wiederum Mehrfachnennungen möglich. Von den NICHT TOP 100 Unternehmen wurden als Antwort jeweils einmal „zu komplizierte Anwendung“, „keine Vorteile gegenüber anderen Berechnungsmethoden“ und „Sonstiges“ gegeben. Die Antwort „Sonstiges“ wurde bei den TOP 100 Unternehmen einmal genannt. Die zwei Angaben unter „Sonstiges“ waren: „hat sich nicht gerechnet, da sich die Routen täglich ändern“ und „ständige Änderung der Tourenplanung“. Um von diesen Antworten Schlüsse zu ziehen, sind die Auswertungen von drei Unternehmen sicherlich nicht repräsentativ. Die Anzahl der befragten Firmen, denen Ameisenalgorithmen bekannt sind, müsste dabei viel höher sein.



**Abbildung 30: TOP 100 und NICHT TOP 100, warum kam ACO nicht zum Einsatz**

Aufgrund jener Firmen, die Ameisenalgorithmen einsetzen, wirft sich die Frage auf, ob der Einsatz von Ameisenalgorithmen mit der Anzahl der Städte und der zur Verfügung stehenden Zeit in Verbindung steht. Dieses Kriterium ist aus mathematischer Sicht eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von Ameisenalgorithmen für die Optimierung. Das Auseinandersetzen mit dieser Frage wird in diesem Punkt die Sicht der Unternehmen erkennen lassen. Die Stichprobe ist von einer sehr geringen Anzahl (2 Unternehmen) geprägt. Das NICHT TOP 100 Unternehmen setzt Ameisenalgorithmen zur Optimierung

erstaunlicherweise bereits bei einem Städteproblem von 15 Städten ein. Der Tourenplan ändert sich dabei täglich und es stehen 3 Stunden für die Planung zur Verfügung. Ameisenalgorithmen werden in einem TOP 100 Unternehmen bei 1500 Städten angewandt. Dabei stehen 5 Stunden zur Verfügung und die Tourenzusammenstellung ändert sich ebenfalls täglich. Die Städteanzahl von beiden Unternehmen liegt aber deutlich unter dem errechneten Mittelwert in *Abbildung 18* und *19* (ca. 1712 Städte bei TOP 100 und ca. 734 Städte bei NICHT TOP 100). Die Annahme, dass vor allem Unternehmen mit vielen Städten Ameisenalgorithmen einsetzen, kann mit diesen zwei Beispielen nicht bestätigt werden. Hingewiesen sei aber wiederum auf die kleine Stichprobe, die repräsentative Schlüsse nicht zulässt.

#### **4.2.4 Allgemeine Anforderungen der befragten Unternehmen an Optimierungsverfahren**

Die *Abbildungen 31* bis *38* bilden die Ergebnisse zu den Fragen über die allgemeinen Anforderungen an Optimierungsverfahren bzw. -software ab. Die Unternehmen wurden über die Relevanz von klarer und einfacher Bedienung, Integrationsmöglichkeit von Mehrfachzielsetzung, Kosteneinsparungspotenzial, Zeitbedarf bei der Berechnung, Optimierungsverfahren ohne Umstrukturierungen und Berücksichtigung von Zeitfenstern in Optimierungsverfahren befragt. Außerdem hatten die Unternehmen noch die Möglichkeit sonstige Punkte hinzuzufügen. Als Antwortmöglichkeit wurde eine fünfstufige Rating-Skala verwendet (sehr wichtig – wichtig – indifferent – weniger wichtig – unwichtig). In den *Abbildungen 31* bis *36* werden zuerst nur die Unterschiede der beiden Gruppen (TOP 100 und NICHT TOP 100) gezeigt. In den *Abbildung 37* bis *38* wird dann eine Rangfolge erstellt um schließlich zu erkennen, welche Anforderungen für Optimierungsverfahren aus der Sicht der Unternehmen besonders wichtig sind.

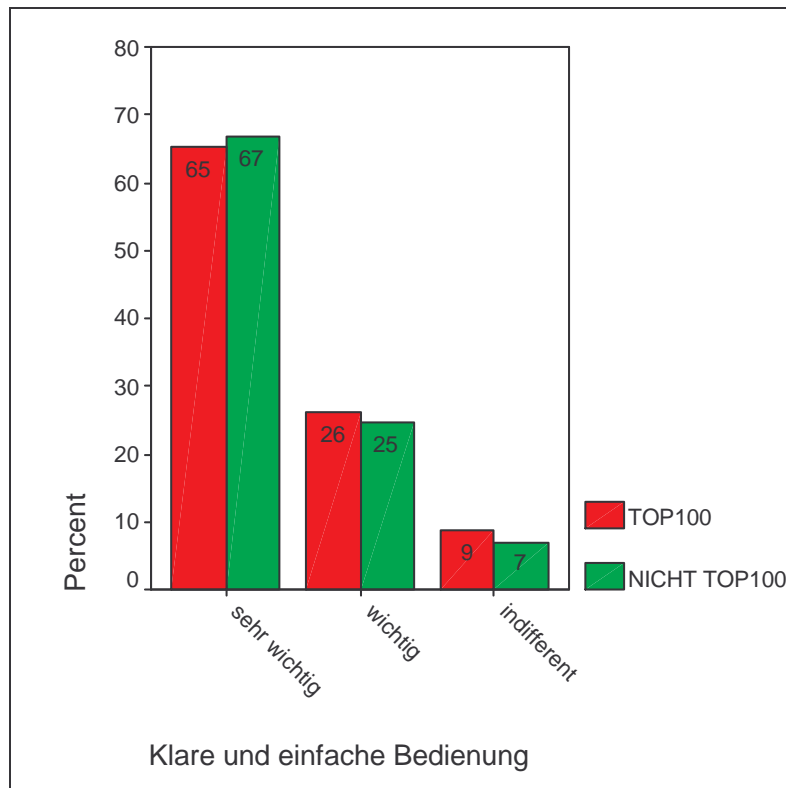
Der Grund für den Entwurf von Fragen mit allgemeinen Anforderungen der Unternehmen liegt darin, auch die Anwenderseite zu befragen, um so eventuell Diskrepanzen oder Übereinstimmungen für den Einsatz von Ameisenalgorithmen zu finden.

Fehlende Antworten wurden in den *Abbildungen* nicht dargestellt, deshalb ist die Summe der Antworten einiger Ergebnisse (TOP 100) nicht 100%.

In der *Abbildung 31* ist ersichtlich, dass die Meinung über eine klare und einfache Bedienung von Optimierungswerkzeugen sowohl von TOP 100 und NICHT TOP 100

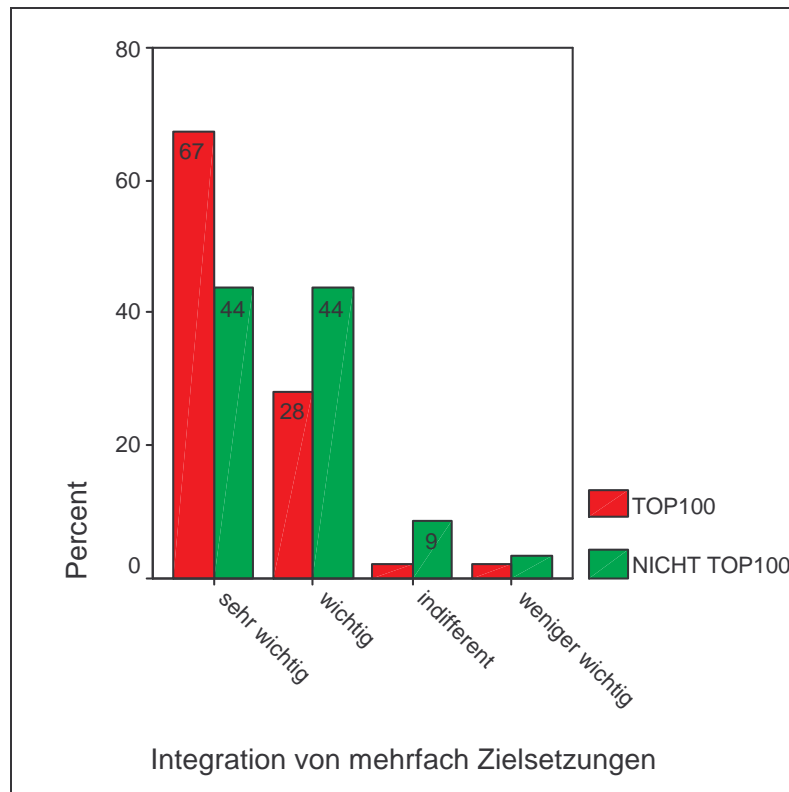


Unternehmen relativ identisch ist. Der Großteil beider Gruppen sieht diesen Punkt als sehr wichtig oder wichtig an.



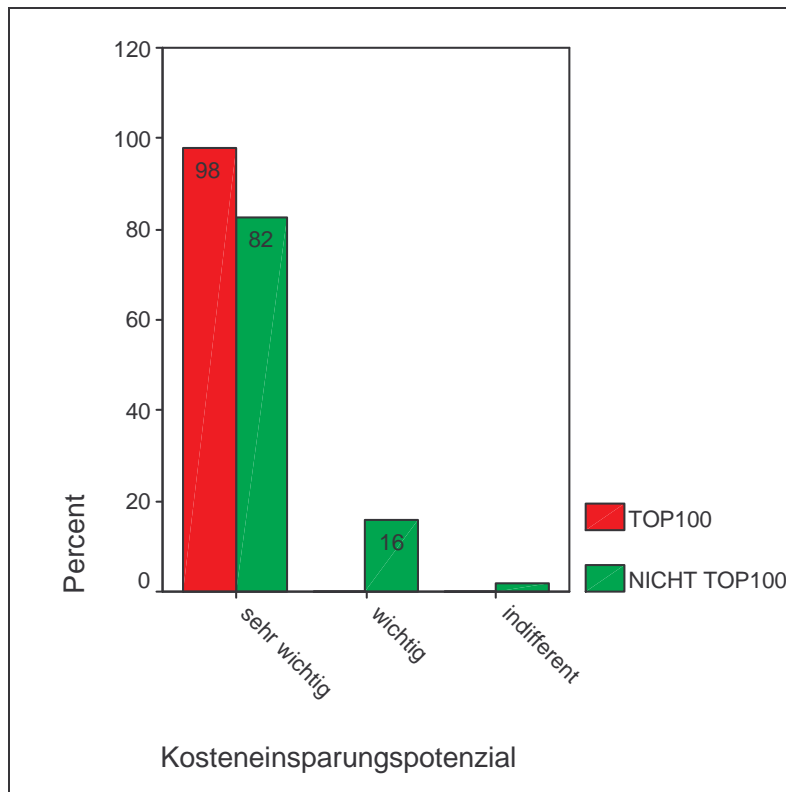
**Abbildung 31: TOP 100 und NICHT TOP 100, Klare und einfache Bedienung**

Die Integration von mehrfach Zielsetzungen in die Optimierung wird von TOP 100 Unternehmen generell als wichtiger angesehen als von NICHT TOP 100 Unternehmen. Dies zeigt die *Abbildung 32*. Von 9% der NICHT TOP 100 Unternehmen wird die Integration von mehrfach Zielsetzungen als indifferent angesehen.



**Abbildung 32: TOP 100 und NICHT TOP 100, Integration von mehrfach Zielsetzungen**

Die *Abbildung 33* zeigt, wie relevant das Kosteneinsparungspotential für Unternehmen ist. Dieses ist für beide Gruppen besonders wichtig. Innerhalb der NICHT TOP 100 Unternehmen wurde von einem Unternehmen auf der Rating-Skala „indifferent“ gewählt.



**Abbildung 33: TOP 100 und NICHT TOP 100, Kosteneinsparungspotenzial**

Auch in Bezug auf die Relevanz des Zeitbedarfs eines Optimierungsverfahrens bei der Berechnung zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Gruppen (siehe *Abbildung 34*). Dieses Ergebnis trifft mit den Erkenntnissen aus *Abbildung 21* und *22* zusammen, die darlegen, dass mehr als der Hälfte der Unternehmen wenige Stunden für die Tourenplanung zur Verfügung stehen.

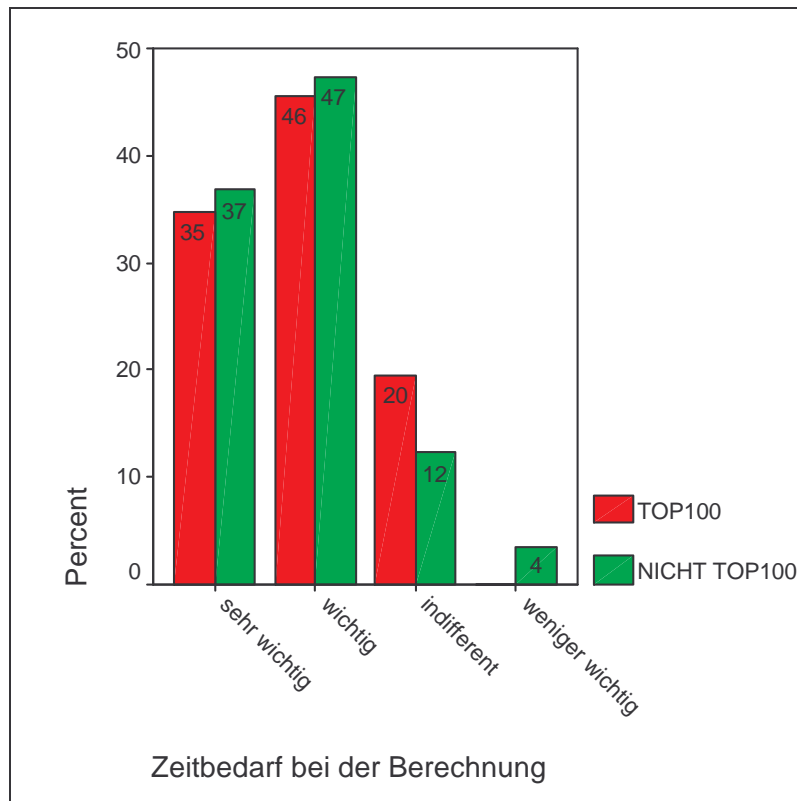
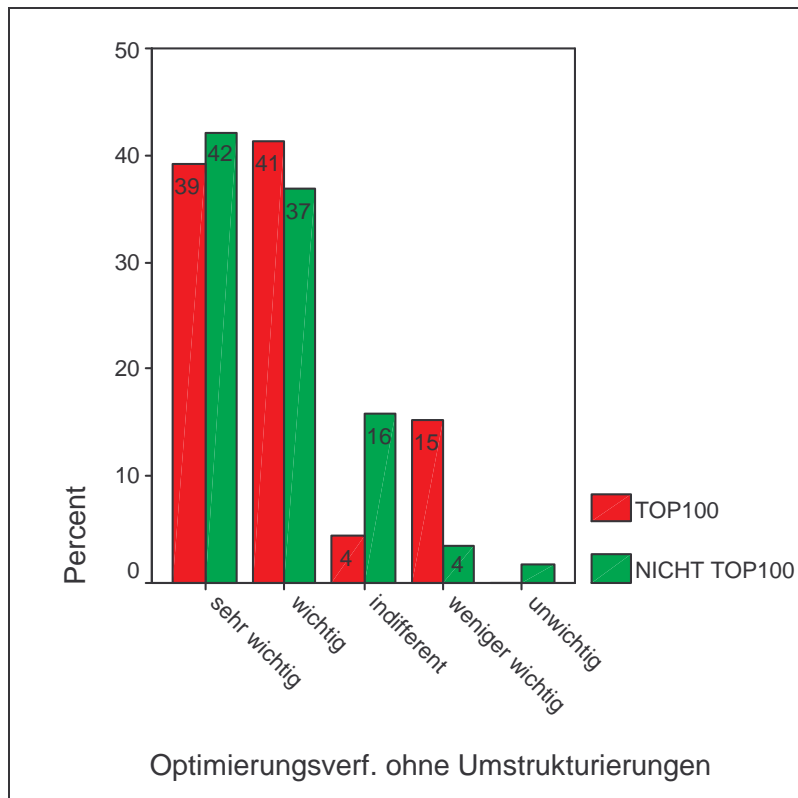


Abbildung 34: TOP 100 und NICHT TOP 100, Zeitbedarf bei der Berechnung

Die folgende Frage, deren Ergebnis in *Abbildung 35* präsentiert ist, wurde auf Anregung des Unternehmens *AntOptima* in die Befragung integriert. Aus der Erfahrung der Firma *AntOptima* ist bekannt, dass Optimierungsverfahren Ablehnung erfahren, da viele Firmen Optimierung mit Umstrukturierung gleichsetzen. Ameisenalgorithmen sind aus diesem Grund auch für diese Firmen geeignet, da dieses Optimierungsinstrument nicht auf Umstrukturierungen aufbaut. Die folgende *Abbildung 35* stellt daher dar, wie wichtig es für Firmen ist, dass ein Optimierungsverfahren nicht mit Umstrukturierung verbunden ist.

Der Unterschied zwischen TOP 100 und NICHT TOP 100 Unternehmen tritt bei den gewählten Antworten „indifferent“ und „weniger wichtig“ auf. 16% der NICHT TOP 100 und 4% der TOP 100 Unternehmen sehen ein Optimierungsverfahren ohne notwendige Umstrukturierung als indifferent an. Eine Umstrukturierung ist 15% der TOP 100 und 4% der NICHT TOP 100 Unternehmen weniger wichtig. Der Großteil gibt aber die Anwendung eines Optimierungsverfahrens ohne notwendige Umstrukturierung als wichtig bzw. sehr wichtig an.



**Abbildung 35: TOP 100 und NICHT TOP 100, Optimierungsverf. ohne Umstrukturierungen**

Wie relevant Zeitfenster in einem Optimierungsverfahren für die befragten Unternehmen sind, wird aus *Abbildung 36* ersichtlich. Obwohl bei der Befragung insgesamt nur 6 Unternehmen keine Zeitfenster in der Tourenplanung berücksichtigen, antworteten bei der Frage bezüglich der Relevanz der Zeitfenster in einem Optimierungsverfahren 9 Unternehmen entweder „indifferent“ oder „weniger wichtig“. Ein Grund für diesen Unterschied, könnte sein, dass zwar Unternehmen Zeitfenster berücksichtigen, aber diese sehr groß sind und sie deshalb „indifferent“ wählten.

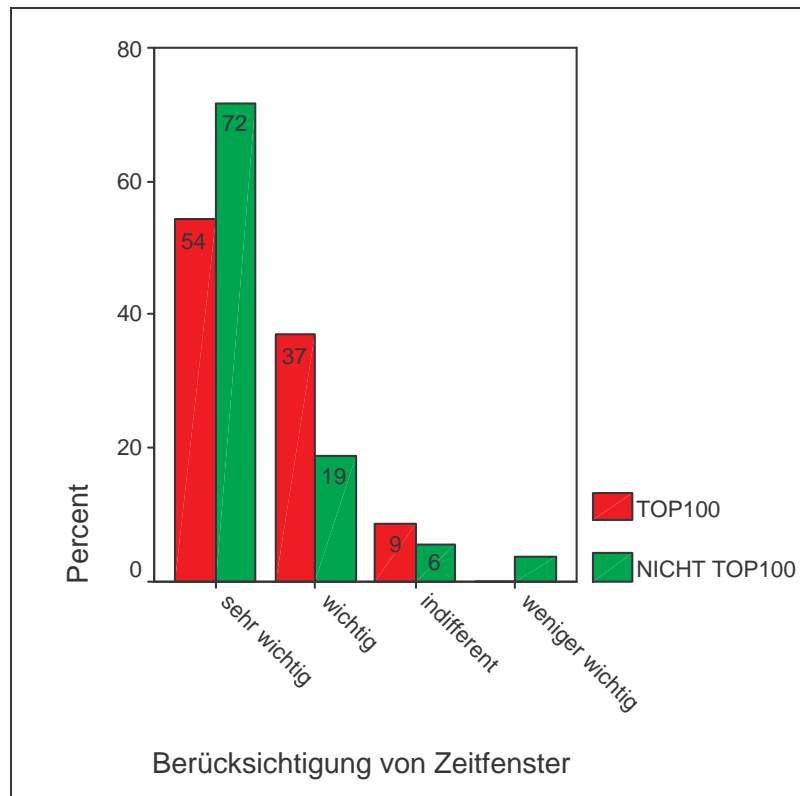


Abbildung 36: TOP 100 und NICHT TOP 100, Berücksichtigung von Zeitfenster

Folgende Antworten wurden unter „Sonstiges“ genannt:

- „Anpassung an die Sicherheitsvorschriften für den Transport mit streng verrechenbaren Werten (Euro etc.) in Ö.“
- „Berücksichtigung von Mehrdepot-Problemen im Sinne einer kompletten Netzwerkoptimierung sowie Optimierung von Hub-Standorten.“
- „Es ist abhängig, ob ich den Kunden einfach mit einem Mann bedienen kann, oder ob ich zwei Personen brauche.“
- „Etwaige Mehrwertleistungen beim Kunden durchzuführen (Abtragen von Ware etc.) –Zeitfaktor.“
- „SAP Schnittstelle.“
- „Vor dem Optimieren kommt etwas anderes.“

Mit der Anzahl der gegebenen Antworten „sehr wichtig“ wird eine Rangliste der allgemeinen Anforderungen erstellt und in den *Abbildungen 37* (TOP 100) und *38* (NICHT TOP 100) dargestellt. Die Prozentwerte beziehen sich auf die vorangegangenen *Abbildungen 31* bis *36*. In beiden Gruppen ist das Kosteneinsparungspotenzial das

wichtigste Merkmal, das ein Optimierungsverfahren mitbringen muss. An zweiter Stelle steht bei TOP 100 Unternehmen die Integration von mehrfach Zielsetzungen, wie zum Beispiel die Reduzierung des Fuhrparks bei gleichbleibender Lieferzeit. Die Integration hat natürlich unmittelbare Auswirkungen auf die Kosten. NICHT TOP 100 Unternehmen platzieren dieses Merkmal an vierter Stelle (Abbildung 38). An zweiter Stelle steht bei den NICHT TOP 100 Unternehmen die Anforderung, Zeitfenster in das Optimierungsverfahren zu integrieren. Die übrigen Merkmale verlaufen bei beiden Gruppen in der gleichen Rangfolge.

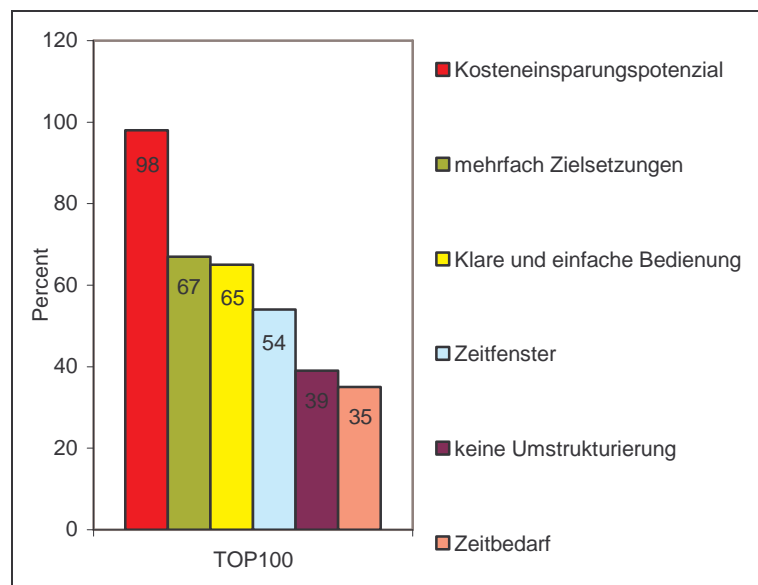
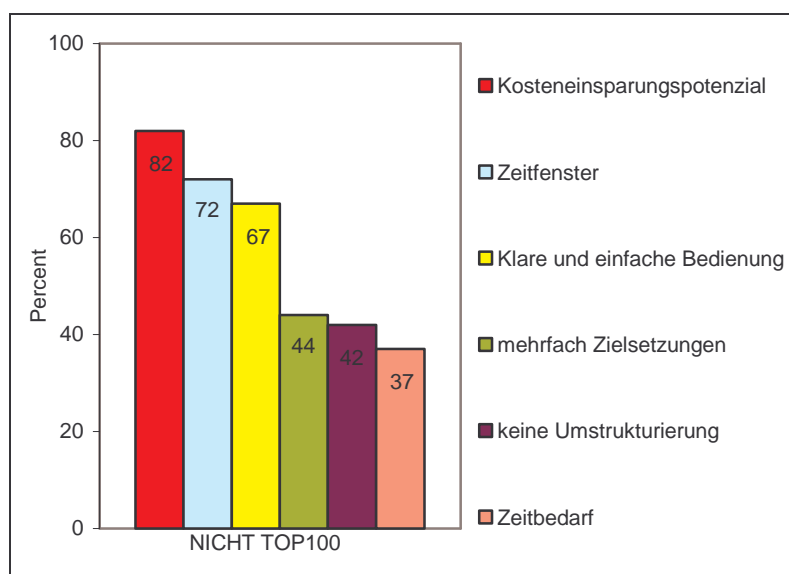


Abbildung 37: TOP 100, Rangliste v. allgemeinen Anforderungen an Optimierungsv.



### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der empirischen Untersuchung zusammengefasst und in Hinblick auf die Fragestellung Erkenntnisse gezogen. Die Stichprobe der befragten Unternehmen der TOP 100 und NICHT TOP 100 Gruppe unterscheidet sich hinsichtlich Branchenzusammensetzung, Anzahl der Länder, in denen die Unternehmen tätig sind, Mitarbeiteranzahl und Umsatz. Hinsichtlich dieser Merkmale sind die befragten Unternehmen der TOP 100 Gruppe, die ausschließlich in der Logistikbranche tätig sind, wesentlich größer als die Unternehmen der NICHT TOP 100 Gruppe. Die unterschiedliche Größe der Unternehmen spiegelt sich auch in der Anzahl der Orte in der Tourenplanung wieder. Im Mittel haben TOP 100 Unternehmen ein TSP von 1712 Städten und NICHT TOP 100 Unternehmen von 734 Städten. 52% der TOP 100 Unternehmen und 38% der NICHT TOP 100 Unternehmen beziehen über 100 Orte in ihre Tourenplanung mit ein und sind, geht man von der gesetzten Grenze von 100 Orten (siehe *Kapitel 4.2.2*) aus, besonders geeignet, Ameisenalgorithmen einzusetzen.

Innerhalb der NICHT TOP 100 Unternehmen konnte ein positiver Zusammenhang zwischen zur Verfügung stehender Zeit und Anzahl der Orte festgestellt werden. Das heißt, je höher die Anzahl der Städte, desto mehr Zeit steht zur Verfügung. Keine Aussage kann über diesen Zusammenhang innerhalb der TOP 100 Unternehmen getroffen werden. Generell kann angemerkt werden, dass bei 57% der TOP 100 Unternehmen und bei 54% der NICHT TOP 100 Unternehmen ein Zeitrahmen von 1 – 3 Stunden für die Tourenplanung zur Verfügung steht. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass sehr wenig Zeit für die Tourenplanung genützt werden kann und die Lösung des TSP durch eine exakte Berechnungsmethode im vorhandenen Zeitraum nicht mehr möglich ist.<sup>96</sup>

Aufbauend auf dem TSP sind erweiterte Problemstellungen wie das VRP zu finden. Mit der Bedingung, dass zumindest 100 Städteprobleme vorhanden sind, haben mindestens 18 TOP 100 Unternehmen und 19 NICHT TOP 100 Unternehmen das VRP zu lösen. Das sind 75% der TOP 100 und 86% der NICHT TOP 100 Unternehmen, die auch ein Städteproblem  $\geq 100$  aufweisen. Auffallend ist, dass fast alle Unternehmen Zeitfenster in

---

<sup>96</sup>Vgl. Almiròn Marta, **Ant System**, Diplomarbeit, Universidad Nacional de Asunción, 2000, S. 33f., URL: <http://www.cnc.una.py/cms/invest/download.php?id=778622,136,4#search=%22tsp%2B181440%22,22.09.06,21:40>.



die Tourenplanung miteinbeziehen und es sich daher fast immer um das VRPTW handelt. Jene Unternehmen, die das VRPTW als Problemstellung haben, können den Bedarf eines Kunden mit einem Fahrzeug befriedigen. Das CVRP stellt bei der Tourenplanung dennoch ein zentrales Thema dar. Von jenen Firmen, die ein Städteproblem über 100 Städte aufweisen, aber nicht in VRPTW Problemstellung fallen, reicht die Kapazität eines Fahrzeuges bei 24% der TOP 100 und bei 13% der NICHT TOP 100 Unternehmen nicht aus. In mehr als der Hälfte der TOP 100 Unternehmen (57%) und in etwas weniger als der Hälfte der NICHT TOP 100 Unternehmen (41%) stehen Fahrzeuge mit unterschiedlichen Kapazitäten zur Verfügung.

Das TSP, VRP, VRPTW und CVRP sind einige Beispiele für den Einsatz von Ameisenalgorithmen. Diese Problemstellungen sind in den befragten Unternehmen zahlreich vertreten. Da aber individuelle Nebenbedingungen in Unternehmen vorliegen und diese in der Optimierung berücksichtigt werden können bzw. müssen (z.B. gesetzliche Bestimmungen), ist der Einsatz von Ameisenalgorithmen in jedem Unternehmen individuell zu klären. Die Basisproblemstellungen sind auf jeden Fall gegeben und lassen den Schluss zu, dass Unternehmen, die kostenminimal wirtschaften wollen, auch Ameisenalgorithmen anwenden. In diesem Fall müsste es mehr Unternehmen innerhalb der TOP 100 Gruppe geben, die als Optimierungsverfahren Ameisenalgorithmen einsetzen. Die Anzahl der Unternehmen, die ein Städteprobleme über 100 Städte aufweisen ist nämlich um 14% höher als bei den NICHT TOP 100 Unternehmen.

Einerseits sind es die Optimierungsmöglichkeiten, die angewandt auf die bestehenden Probleme den Einsatz von ACO als sinnvoll erscheinen lassen und andererseits die Anforderungen der Unternehmen an Optimierungsverfahren allgemein. Alle Punkte, die in *Kapitel 4.2.4* als sehr wichtig für Optimierungsverfahren eingestuft werden, erfüllen Ameisenalgorithmen. Als wichtigste Anforderung wird natürlich das Kosteneinsparungspotenzial gesehen, gefolgt von Berücksichtigung von Zeitfenster und Mehrfach Zielsetzung, klarer und einfacher Bedienung und keiner Notwendigkeit zur Umstrukturierung. Die allgemeinen Anforderungen an Optimierungsverfahren bzw. –software sprechen ebenfalls für den Einsatz von Ameisenalgorithmen.

Von den befragten Unternehmen setzen allerdings nur zwei Unternehmen (jeweils ein Unternehmen aus der TOP 100 und NICHT TOP 100 Gruppe) Ameisenalgorithmen ein. Bezogen auf die vorherrschenden Problemstellungen ist das ein sehr kleiner Anteil. Die Hypothese: „In den untersuchten Unternehmen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, Ameisenalgorithmen erfolgsversprechend für TSP und VRP einzusetzen, sie werden aber

in wenigen Fällen genutzt“, wird damit bestätigt. Die Gründe, warum Unternehmen Ameisenalgorithmen selten einsetzen, werden in den Ergebnissen in *Kapitel 4.2.3* beschrieben. Der wesentlichste Grund, warum für viele Unternehmen der Einsatz von Ameisenalgorithmen nicht zur Diskussion stand, ist, dass den Unternehmen dieses Optimierungsverfahren zum größten Teil unbekannt ist. Nur 15% der TOP 100 und 9% der NICHT TOP 100 Unternehmen ist ACO bekannt. Von den wenigen Unternehmen, denen Ameisenalgorithmen bekannt sind, wurden folgende Gründe, warum sie dennoch nicht zum Einsatz kamen, genannt: „zu komplizierte Anwendung“, „keine Vorteile gegenüber anderen Berechnungsmethoden“ und unter „Sonstiges“: „hat sich nicht gerechnet, da sich die Routen täglich ändern“ und „ständige Änderung der Tourenplanung“.

## 5 RESÜMEE

Der Einsatz von Optimierungsverfahren nach dem Vorbild der Ameisen für Logistikprobleme steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Die Anwendung von Ameisenalgorithmen wird dabei aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Die Funktionsweise solcher Algorithmen erklärt, für welche Problemstellungen Ameisenalgorithmen überhaupt herangezogen werden können. Der Vergleich mit anderen Metaheuristiken zeigt ihr Potenzial. Eine durchgeführte empirische Untersuchung beleuchtet einerseits, ob in den befragten Unternehmen Problemstellungen für Ameisenalgorithmen vorzufinden sind und andererseits welche Anforderungen Unternehmen an Optimierungsverfahren bzw. –software im Allgemeinen stellen. Mit Hilfe eines Fragebogens wurde erhoben, ob von den befragten Unternehmen Ameisenalgorithmen eingesetzt werden bzw. welche Gründe für den Nicht-Einsatz angegeben werden. Obwohl es zahlreiche Problemstellungen innerhalb der Unternehmen gibt, setzen nur zwei befragte Unternehmen, ein Unternehmen aus der TOP 100 Gruppe (die größten Logistikunternehmen aus Europa und Deutschland) und ein Unternehmen aus der NICHT TOP 100 Gruppe (österreichische Firmen, die ähnliche Problemstellungen aufweisen) Ameisenalgorithmen ein. Neben den Problemstellungen in den Unternehmen sprechen auch die allgemeinen Anforderungen der Unternehmen an Optimierungsverfahren für den Einsatz von Ameisenalgorithmen, da alle für wichtig empfundenen Merkmale von Ameisenalgorithmen erfüllt werden. Der am häufigsten genannte Grund, warum Ameisenalgorithmen nicht eingesetzt werden, liegt darin

begründet, dass dem Großteil der Unternehmen Optimierungsverfahren nach dem Vorbild der Ameisen gänzlich unbekannt sind. Obwohl es hinsichtlich der Unternehmensgröße und der vorhandenen Problemstellungen Unterschiede zwischen der TOP 100 und NICHT TOP 100 Gruppe gibt, ist der Einsatz von Optimierungsverfahren nach dem Vorbild der Ameisen in beiden Gruppen nicht weit verbreitet.

Mit dieser Arbeit wird ein Beitrag für die Verbindung von Wissenschaft und Praxisanwendung geliefert. Für weitere Untersuchungen wäre es interessant ein Unternehmen in allen Phasen eines Optimierungsprozesses mit Ameisenalgorithmen zu begleiten und dadurch die entsprechenden Erwartungen, die vorliegenden Problemstellungen, sich ergebende Kostenersparnis und die Zufriedenheit der Unternehmen untersuchen zu können.

## LITERATURVERZEICHNIS

Almiròn Marta, **Ant System**, Diplomarbeit, Universidad Nacional de Asunción 2000,  
URL: <http://www.cnc.una.py/cms/invest/download.php?id=778622,136,4#search=%22tsp%2B181440%22>, 22.09.06, 21:40.

AntOptima (Unternehmen), URL: <http://www.antoptima.ch>.

Atzmüller M./Grammer K., **Biologie des Geruchs: Die Bedeutung von Pheromonen für Verhalten und Reproduktion**, in: Speculum – Zeitschrift für Gynäkologie und Geburtshilfe 2000, Ausgabe 18, S. 12-18, URL: <http://www.kup.at/kup/pdf/286.pdf>, 25.05.2006, 07:46.

Badeau Philippe u.a., **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows**, in: Transportation Science 31, 1997, S. 170-186, URL: <http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/articles.html>, 02.08.06, 13:00.

Bellmann Heiko, **Bienen, Wespen, Ameisen**, Verlag: Franckh-Kosmos, Stuttgart 1995.

Berekoven Ludwig u.a., **Marktforschung**, 9. Auflage, Verlag: Gabler, Wiesbaden 2001.

Bonabeau Eric u.a., **Swarm Intelligence From Natural to artificial Systems**, Verlag: Oxford University Press, New York 1999.

Boryczka Urszula/Boryczka Mariusz, **Multi-cast ant colony system for the bus routing problem**, in: Resende Mauricio (Hrsg.)/de Sousa Jorge Pinho (Hrsg.), **Metaheuristics: Computer Decision-Making**, Verlag: Kluwer Academic Publishers, Boston u.a. 2004, S. 91-125.

- Boysen Nils, **Ameisenalgorithmen**, Institut für Industriebetriebslehre und Organisation an der Universität Hamburg, o. J., URL: <http://www.ibl-unihh.de/ameisenalgorithmen.pdf>, 08.06.06, 08:17.
- Bullnheimer Bernd/Strauß Christine, **Tourenplanung mit dem Ant System**, Forschungsberichte des Instituts für Betriebswirtschaftslehre der Universität Wien, o. V., 1996.
- Bullnheimer Bernd u.a., **A New Rank Based Version of the Ant System – a Computational Study**, Vienna University of Economics and Business Administration, 1997, URL: [http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virilib/wp/mediate/epub-wu-01\\_22c.pdf?ID=epub-wu-01\\_22c](http://epub.wu-wien.ac.at/dyn/virilib/wp/mediate/epub-wu-01_22c.pdf?ID=epub-wu-01_22c), 24.06.06, 19:12.
- Chen Chia-Ho/Ting Ching-Jung, **A Hybrid Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows**, Department of Industrial Engineering and Management, Yuan Ze University, o. J., URL: [http://www.easts.info/on-line/journal\\_06/2822.pdf](http://www.easts.info/on-line/journal_06/2822.pdf), 01.08.06, 07:59.
- Coloni Alberto u.a., **Distributed Optimization by Ant Colonies**, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, o. J., URL: <http://www.cs.ualberta.ca/~bulitko/F02/papers/IC.06-ECAL92.pdf>, 11.06.06, 12:21.
- Cordeau Jean Francois/Laporte Gilbert, **The Dial-a-Ride Problem (DARP): Variants, modelling issues and algorithms**, GERAD-HEC Montréal, 2002, URL: [https://www.univie.ac.at/bwl/prod/teaching/LVAs/KFK-Seminar/WS0506/Cordeau\\_DialARide.pdf](https://www.univie.ac.at/bwl/prod/teaching/LVAs/KFK-Seminar/WS0506/Cordeau_DialARide.pdf), 11.06.06, 18:07.
- Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48.
- Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/acs-ec97.pdf>, 25.06.06, 14:25.
- Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem**, Freie Universität Brüssel, 1996, URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.15-BIOSYS97.pdf>, 22.07.06, 11:15.
- Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **An Ant Colony System Hybridized with a new Local Search for the Sequential Ordering Problem**, Freie Universität Brüssel/IDSIA, 2000, URL: [http://www.idsia.ch/~luca/fd18cc00a0\\_article.pdf](http://www.idsia.ch/~luca/fd18cc00a0_article.pdf), 01.07.2006, 15:26.

- Dorigo Marco/Stützle Thomas, **Ant Colony Optimization**, Verlag: a Bradford book, Cambridge 2004.
- Fogel David, **Applying Evolutionary programming to selected travelling salesman problems**, in: Cybernetics and Systems 1993, Ausgabe 24, S. 27-36.
- Fiedler Claudia u.a., **Meta-Heuristiken als moderne Lösungskonzepte für komplexe Optimierungsprobleme**, o. J., URL: [http://www.uni-graz.at/ifwwwwww\\_meta\\_wisu\\_2000.pdf](http://www.uni-graz.at/ifwwwwww_meta_wisu_2000.pdf), 20.09.06, 15:27.
- Gambardella Luca M. u.a., **MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing with Time Windows**, 1999, URL: <ftp://ftp.idsia.ch/pub/luca/papers/tr-idsia-06-99.pdf>, 30.07.06, 17:39.
- Gerdes Ingrid/Klawonn Frank/Kruse Rudolf, **Evolutionäre Algorithmen**, 1. Auflage, Verlag: Vieweg, Wiesbaden 2004.
- Gong Shihua/Li Yong, **Dynamic ant colony optimization for TSP**, in: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2003, Ausgabe 22, S. 528-533.
- Gößwald Karl, **Organisation und Leben der Ameisen**, Verlag: Wissenschaftliche Gesellschaft, Stuttgart 1985.
- Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band I: Grundlagen, Verlag: Shaker, Aachen 2005.
- Grünert Tore/Irnich Stefan, **Optimierung im Transport**, Band II: Wege und Touren, Verlag: Shaker, Aachen 2005.
- Heeren Menno, **Swarm Intelligence Strategie zur Lösung reaktiver Planungsprobleme in Wertschöpfungsketten**, Fachbereich Informatik an der Carl v. Ossietzky Universität, o. J., URL: [http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/~sauer/puk2003/paper/heeren\\_puk2003.pdf](http://www-is.informatik.uni-oldenburg.de/~sauer/puk2003/paper/heeren_puk2003.pdf), 05.06.06, 08:56.
- Hemmelmayr Vera, **Ant Colony Optimization für das periodische Travelling Salesman Problem**, Diplomarbeit, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Wien, 2005.
- Heylighen Francis, **The Science of Selforganization and Adaptivity**, Free University of Brussels, o. J., URL: <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf>, 02.06.2006, 09:09.
- Hoos Holger/Stützle Thomas, **Improvements on the Ant-System: Introducing the Max-Min Ant System**, Institut für Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, o. J., URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/pub.html#ACO>, 02.07.06, 07:33.

- Klaus Peter, **Die „Top 100“ der Logistik, Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft, Deutschland und Europa**, 3. Auflage, Verlag: Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2003.
- Kreuzer Franz, **Nobelpreis für den lieben Gott**, Verlag: Kremayr & Scheriau/Orac, Wien 2004.
- Kromrey Helmut, **Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung**, 9. Auflage, Verlag: Leske + Budrich, Opladen 2000.
- Lin Feng-Tse u. a., **Applying the genetic approach to simulated annealing insolving some NP-hard problems**, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Ausgabe 23, S. 1752-1767.
- Maeterlinck Maurice, **Nobelpreis für Literatur 1911**, Verlag: Coron, Stuttgart 1911.
- Müller Daniel Kai, **Analyse und Verbesserung von iterierter lokaler Optimierung für das Kapazitive Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern**, Diplomarbeit im Bereich Informatik/Wirtschaftsinformatik an der Fachhochschule Konstanz 2003.
- Nachtigall Werner zitiert nach Kreuzer Franz, **Nobelpreis für den lieben Gott**, Verlag: Kremayr & Scheriau/Orac, Wien 2004, o.s.
- Pilat Marcin L./White Tony, **Using Genetic Algorithms to optimize ACS-TSP**, School of Computer Science, Carleton University, o. J., URL: <http://www.scs.carleton.ca/~arpwhite/documents/ANTS2002.pdf>, 02.08.06, 18:23.
- Potvin Jean-Yves/Bengio Samy, **The Vehicle Routing Problem with Time Windows – Part II: Genetic Search**, in: INFORMS Journal of Computing 8, 1996, S. 1-21, URL: [http://www.idiap.ch/~bengio/cv/publications/pdf/potvin\\_1996\\_informs.pdf](http://www.idiap.ch/~bengio/cv/publications/pdf/potvin_1996_informs.pdf), 02.08.06, 11:48.
- Reinelt Gerhard, **TSPLIB – A Travelling Salesman Problem Library**, in: ORSA Journal of Computing , Vol. 3, 1991., S. 376–385, URL: <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/index.html>, 17.06.06, 11:15.
- Resende Mauricio (Hrsg.)/de Sousa Jorge Pinho (Hrsg.), **Metaheuristics: Computer Decision-Making**, Verlag: Kluwer Academic Publishers, Boston u.a. 2004.
- Rietdorf Matthias, **Identifizierung und Synthese flüchtiger Substanzen aus Säugetieren**, Dissertation am Institut für Organische Chemie an der Universität Hamburg, 2002, URL: <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2002/670/pdf/dissertation.pdf>, 06.06.06, 08:20.



- Rochat Yves/Taillard Èric D., **Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing**, in: Journal of Heuristics 1, 1995, S. 147-167, URL: [http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/crt95\\_13.pdf](http://ina2.eivd.ch/collaborateurs/etd/articles.dir/crt95_13.pdf), 02.08.06, 11:56.
- Rosenow Silke, **Effiziente Heuristiken für das Probabilistische Travelling Salesman Problem**, Verlag: Peter Lang, Frankfurt 2002.
- Savelsberg M.W.P/Sol M., **The General Pickup and Delivery Problem**, Georgia Institut of Technology and Eindhoven University of Technology, Atlanta-Eindhoven, 2001. URL: <http://www2.isye.gatech.edu/~mwps/publications/ts29.pdf>, 11.06.06, 17:30.
- Schlittgen Rainer, **Einführung in die Statistik, Analyse und Modellierung von Daten**, 10. Auflage, Verlag: Oldenbourg, München 2003.
- Schreyögg Georg, **Der Managementprozess – neu gesehen**, in: Staehle W. H., Sydow J. (Hrsg.), **Managementforschung 1**, o.V., Berlin/New York 1991, S. 255-289.
- Sedgewick Robert, **Algorithmen**, 2. Aufl., Verlag: Pearson Studium, München 2002.
- Staehle W. H., Sydow J. (Hrsg.), **Managementforschung 1**, Berlin/New York 1991.
- Stützle Thomas, **Local Search Algorithms for Combinatorial Problems - Analysis, Improvements and new Applications**, Dissertation im Fachbereich Informatik an der Technischen Universität Darmstadt, 1998, URL: <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/publications/Thesis.ThomasStuetzle.pdf>, 25.07.06, 07:23.
- Vinay Kumar K./ Yogeeshha C.B., **Design of Compinatorial Optimization Problem using Neurodynamic Hopfield Networks**, Research Laboratory, Department of Computer Engineering, National Institute of Technology Karnataka, o. J., URL: <http://www.niitcrs.com/iccs/iccs2004/Papers/247%20C%20B%20Yogeeshha.pdf#search=%22tsp%2B181440%22>, 02.09.06, 20:45.
- Watkins C.J.C.H, **Learning with delayed rewards**, Dissertation am Institut für Psychologie der Universität Cambridge, o. J., zitiert nach Dorigo Marco/Gambardella Luca M., **Ant-Q: a reinforcement learning approach to the travelling salesman problem**, o. J., S. 1, URL: <http://www.idsia.ch/~luca/ml95-antq.pdf>, 17.06.06, 12:48.
- WWF World Wide Fund for Nature (Hrsg.), **Visionen des Machbaren**, Pro Futura Verlag, Waldbröl 2005

# ANHANG

FRAGEBOGEN zur Diplomarbeit über Ant Colony Optimization am Institut für Innovations- und Umweltmanagement der Karl Franzens Universität Graz.

1. In welcher Branche ist das Unternehmen tätig?

2. In wie vielen Ländern ist das Unternehmen tätig?

3. Wie viele Mitarbeiter beschäftigt das Unternehmen?

4. Wie hoch war der Jahresumsatz 2005?

Euro                      US\$                      sonstige Währung (bitte angeben)

Mit den folgenden Fragen soll die Problemlandschaft bei einer Tourenplanung (z.B. Belieferung von Kunden) abgebildet werden. Bitte berücksichtigen Sie nur Touren, die mit PKW, LKW oder Motorrad durchgeführt werden und mindestens 10 Kundenbesuche vorsehen.

5. In welchen Abständen ändert sich die Tourenzusammenstellung?

täglich            wöchentlich            monatlich            jährlich            ändert sich unregelmäßig

6. Wie viel Zeit steht im Durchschnitt zur Verfügung, um eine neue Tour zu planen?

Tage                      Stunden

7. Wie viele Orte bzw. Kunden/Kundinnen werden in die Tourenplanung miteinbezogen?



**8. Werden Zeitfenster, d.h. Zeitspannen, innerhalb dieser der/die Kunde/Kundin beliefert werden muss, in Ihrer Tourenplanung berücksichtigt?**

Ja  Nein

**9. Werden Waren auch bei Kunden/Kundinnen abgeholt und zu anderen Kunden/Kundinnen geliefert?**

Ja  Nein

**10. Wird das Lieferservice durch eine externe Spedition durchgeführt?**

Ja  Nein

**11. Sind die Transportkosten zwischen den einzelnen Kunden/Kundinnen bekannt?**

(von einem Kunden zu allen anderen Kunden, nicht nur zum nächst liegenden?)

Ja  Nein  Weiß nicht

**12. Kehren die Fahrzeuge nach Tourende wieder zum Ausgangspunkt zurück?**

Ja  Nein  Weiß nicht

**13. Ist die Nachfrage eines/einer Kunden/Kundin mit der Kapazität eines Fahrzeuges zu befriedigen?**

Ja  Nein  Weiß nicht

**14. Stehen für die Tourenplanung Fahrzeuge mit der gleichen Kapazität zur Verfügung?**

Ja  Nein  Weiß nicht

Ant Colony Optimization (ACO) ist ein Berechnungsschema - nach dem Vorbild der Ameisen bei der Futtersuche – um den kürzesten Weg auf einer Tour zu finden.

**15. Stand für Sie der Einsatz von ACO für Logistikanwendungen bereits zur Diskussion?**

Ja  Wenn Ja, weiter mit Frage 17.

Nein

**16. Warum stand der Einsatz von ACO für Sie nicht zur Diskussion?**

*Mehrfachnennungen möglich.*

ACO zum ersten Mal gehört.

Keine geeigneten Problemstellungen für den Einsatz von ACO vorhanden.

Vorteile von ACO nicht bekannt.

Zu komplizierte Anwendung.

Sonstiges.

*Weiter mit Frage 19.*

**17. Wenn für Sie ACO bereits zur Diskussion stand, haben Sie ACO auch angewandt?**

Ja  *Wenn Ja weiter mit Frage 19.*

Nein

**18. Warum kam ACO nicht zum Einsatz?**

*Mehrfachnennungen möglich.*

Zu komplizierte Anwendung

Zu teuer.

Kein Personal mit speziellem Wissen vorhanden.

Keine Vorteile gegenüber anderen Berechnungsmethoden.

Kein Unternehmen für die Umsetzung gefunden.

Sonstiges

Wie wichtig sind folgende Punkte für den Einsatz von Optimierungsverfahren bzw. Optimierungssoftware zur Berechnung von Touren?

**19. Klare und einfache Bedienung?**

sehr wichtig

wichtig

indifferent

weniger wichtig

unwichtig

**20. Integration von mehrfach Zielsetzungen, d.h. z.B. Minimierung der Anzahl der Fahrzeuge bei gleich bleibenden Lieferzeiten?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig  
                                                                                       

**21. Kosteneinsparungspotenzial?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig  
                                                                                       

**22. Zeitbedarf bei der Berechnung?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig  
                                                                                       

**23. Eingliederung des Optimierungsverfahren in die Unternehmensprozesse, ohne Umstrukturierungen durchführen zu müssen?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig  
                                                                                       

**24. Berücksichtigung von Zeitfenstern, d.h. Zeitspannen innerhalb dieser der/die Kunde/Kundin beliefert werden soll?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig  
                                                                                       

**25. Sonstiges?**

sehr wichtig      wichtig      indifferent      weniger wichtig      unwichtig