

Operations Research

**Tobias J. Winkelkotte**

**Strategische Optimierung von  
Distributionsnetzwerken**

Ein Optimierungsmodell und heuristische  
Lösungsverfahren zur Planung von Standorten und  
Absatzgebieten mit approximativer Berücksichtigung  
der taktischen und operativen Logistikprozesse

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9947-7

ISSN 1862-6327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*„Far better an approximate answer to the right question, which is often vague, than the exact answer to the wrong question, which can always be made precise.“*  
(John F. Tukey)



# Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen. Mehrere interessante Forschungsprojekte, an denen ich Teil haben durfte, haben mein besonderes Interesse an der strategischen quantitativen Planung von Logistiknetzwerken geweckt. Ein mehrwöchiger Forschungsaufenthalt an der University of California in Berkeley trug ebenfalls zur Themenfindung bei. Dies hat mich dazu ermutigt, die vorliegende Arbeit anzufertigen.

An dieser Stelle möchte ich den Personen meinen Dank aussprechen, die am Zustandekommen der Dissertation beteiligt waren. Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian, der mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl betreut und mir die Möglichkeit zur freien Entfaltung meiner wissenschaftlichen Interessen gewährt hat. Insbesondere danke ich ihm für die Gelegenheit, unter Nutzung seiner Kontakte für eine längere Zeit in Berkeley zu arbeiten, was einen wesentlichen Beitrag zur Arbeit geleistet hat. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. Michael Bastian, der freundlicherweise als Zweitberichter tätig war.

Alle derzeitigen und früheren Kollegen haben durch die Diskussion vieler Details sowie das immer angenehme Arbeitsklima und die freundliche Zusammenarbeit einen wichtigen Anteil am erfolgreichen Abschluss meiner Promotion. Ein besonderer Dank gebührt Martin Baumung, Astrid Hörhammer, Ansgar Luttrupp und Dirk Steffensen, die große Teile der Arbeit zum Teil mehrfach gelesen und dabei mehr Fehler entdeckt haben, als ich zugeben würde. Außerdem haben sie mich mit vielen wertvollen Hinweisen bei der Vorbereitung der mündlichen Prüfung unterstützt.

Schließlich danke ich meiner Mutter, Jutta Baumann, und meinem Bruder, Roland Winkelkotte, für die Unterstützung in allen meinen Entscheidungen.

Aachen, im Februar 2011

Tobias Winkelkotte



# Einleitung

Wohl jeder kennt die Situation, bestellte Waren durch einen Spediteur nach Hause geliefert zu bekommen. Das geschieht manchmal aus Bequemlichkeit, oft deshalb, weil das empfangene Gut nicht selbst transportiert oder aufgebaut werden kann, und immer häufiger auch aus dem Grund, dass der Verkäufer das Gut nicht auf herkömmlichem Wege im Einzelhandel anbietet. Seit einigen Jahren haben sich vermehrt Firmen etablieren können, die andere Verkaufskanäle nutzen, z.B. Kataloge, Call-Center oder das Internet.

Für den Kunden ist dies sicherlich die bequemste Art des Einkaufens – er muss sich keine Gedanken darüber machen, wie er die gekauften Waren nach Hause transportiert. Für das verkaufende Unternehmen bedeutet diese Verkaufsform jedoch einen enormen Mehraufwand. Es muss dafür sorgen, dass die nachgefragten Gegenstände sicher, unbeschadet und schnell beim Kunden ankommen, und das mit möglichst geringen Kosten. Mit der Frage, wie solche Lieferprozesse bestmöglich zu gestalten sind, beschäftigt sich die Logistik, der dementsprechend in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung zugekommen ist.

Neben der Belieferung von Privatkunden gibt es natürlich noch sehr viel mehr Anwendungsgebiete; das Privatkundengeschäft hat sogar häufig einen eher geringen Anteil an der gesamten Logistikleistung. Logistikleistungen zwischen Geschäftspartnern finden öfter statt, es werden größere Mengen transportiert, und es wird i.d.R. auch ein höheres Qualitätsniveau erwartet, z.B. was die Geschwindigkeit der Lieferung oder die Lieferfähigkeit betrifft.

In jedem Fall muss sich das liefernde Unternehmen mit der Frage auseinandersetzen, wie die Logistik effizient durchgeführt werden kann. Ob diese Firmen dabei selbst produzierte Güter verteilen oder als Transportdienstleister auftreten – die Logistikkosten stellen häufig einen der größten Kostenblöcke dar. Um sich langfristig in diesem hart umkämpften Markt halten zu können, müssen die Unternehmen ein effizientes Logistikkonzept vorweisen können.

Die logistische Leistung besteht dabei nicht nur aus dem reinen Transport, der für den räumlichen Transfer der Güter zuständig ist. Zur Aufrechterhaltung etwa der Lieferfähigkeit ist auch ein zeitlicher Transfer der Waren erforderlich, welcher durch ein effizientes Lagermanagement ermöglicht wird. Damit ist nicht nur die eigentliche Bestandsführung gemeint; bei der Planung von Logistiksystemen geht es vielmehr auch um die Lagerstruktur, sowie um die Anzahl, Position und Größe der Lager.

Besondere Bedeutung bei der Planung komplexer Logistiksysteme haben die unterschiedlichen zeitlichen Ebenen, auf denen die Logistikprozesse stattfinden. So gibt es einerseits langfristige Entscheidungen – z.B. über Standortpositionen –, die das Unternehmen über mehrere Jahre hinweg bindet. Auf der anderen Seite sind aber auch kürzfristi-

ge Planungen durchzuführen, wie etwa das Bestandsmanagement oder das Durchführen von Auslieferungstouren. Daraus ergeben sich verschiedene zu lösende Probleme, die aber nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können: Da z.B. die Standortplanung die Infrastruktur für die Tourenplanung vorgibt, müssen auch die Distributionskosten in ihr berücksichtigt werden.

## Ziel der Arbeit

Zur strategischen, also langfristigen, Planung von Logistiksystemen gibt es in der Literatur vielfältige Ansätze, mit denen Standorte und Kundenzuordnungen durch Lösen von Optimierungsproblemen konkret geplant werden können. Weitere Ansätze beschäftigen sich mit der approximativen Beschreibung von Logistiksystemen, mit denen zwar nicht die Planung konkreter Standorte möglich ist, jedoch können sie auch die kürzerfristigen Prozesse berücksichtigen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Kombination der beiden Ansätze, um einerseits exakte Standortpositionen zu bestimmen, gleichzeitig aber mit analytischen Mitteln die mittel- und kurzfristigen Logistikprozesse zu berücksichtigen.

Ziel ist dabei die Entscheidung über Positionen und Größen von Standorten, in denen die Güter bereitgestellt werden und bei denen eine ggf. mehrstufige Distribution beginnt. Das Gesamtgebiet, in dem das Logistikunternehmen arbeitet, ist dabei in Absatzregionen einzuteilen, die den Standorten zugeordnet werden müssen. Gefragt ist nach der Formulierung eines Modells, welches Standorte plant und ihnen Absatzregionen zuordnet. Letztere müssen zusammenhängende Flächen ergeben, da es ansonsten nicht sinnvoll möglich ist, kurzfristige Planungsprozesse zu approximieren.

Mit Entscheidungen über Standorte, in denen ggf. teure technische Anlagen betrieben werden, bindet sich ein Unternehmen über mehrere Jahre oder Jahrzehnte. Das Problem bei solchen in die Zukunft gerichteten Maßnahmen ist immer die Unkenntnis, wie sich die Rahmenbedingungen entwickeln werden, insbesondere dann, wenn eine Vorausplanung für lange Zeiträume erfolgt. Aus diesem Grund sollten Szenarioanalysen durchgeführt werden. So kann man viele verschiedene Fälle über mögliche zukünftige Entwicklungen betrachten und miteinander vergleichen. Voraussetzung dafür ist, dass man in relativ kurzer Zeit eine gute Lösung des Modells berechnen kann, die insbesondere eine Aussage über die zu erwarteten Kosten zulässt. Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist es demnach, mit effizienten Verfahren eine gute Lösung für das oben geforderte Modell bestimmen zu können. Diese sind zu entwickeln, zu implementieren und mit entsprechenden Testrechnungen zu validieren.

## Gliederung

Methodisch geht die Arbeit so vor, dass im ersten Kapitel zunächst die Logistik als Teil der unternehmerischen Leistungserbringung genauer beleuchtet wird. Dabei geht es um die Frage, was genau man unter Logistik versteht und welche ihrer Teilgebiete hier relevant sind. Wichtig ist dabei auch ein Blick auf das Supply-Chain-Management, mit dem eine

allgemeinere Sicht auf Logistiksysteme möglich ist. Weiter ist es notwendig, sich grundsätzlich mit der Auswahl eines Lösungsansatzes zu beschäftigen. Deshalb werden in Kapitel 1 auch verschiedene Fakten über Optimierungsprobleme, Modelle und Lösungsverfahren zusammengetragen und verglichen. So kann schließlich die für das gegebene Problem beste Vorgehensweise ausgewählt werden. Schließlich kann am Ende des ersten Kapitels die oben umrissene Aufgabenstellung genau beschrieben und der Lösungsweg begründet werden.

Zur Lösung des dargestellten Problems ist in jedem Fall ein geeignetes Modell zu entwickeln, welches die Standort- und Zuordnungsentscheidungen adäquat abbildet. Dieses Modell soll über die optimalen Standorte und ihre Kapazitäten entscheiden. Weiterhin ist nach der Zuordnung von Kundengebieten gefragt: Eine Lösung des Modells darf nur dann zulässig sein, wenn die Gebiete sich nicht überschneiden und sich keine Enklaven in ihnen bilden. Ein entsprechendes Modell wird in Kapitel 2 formuliert werden.

Für die gleichzeitige Berücksichtigung kurz- und langfristiger Prozesse gibt es mehrere denkbare Ansätze. Eine exakte Lösung beider Probleme ist aus Gründen, die in Kapitel 1 näher erläutert werden, nur begrenzt möglich und sinnvoll. Man kann jedoch auch auf eine genaue Planung operativer Details verzichten. Ein Ansatz dafür wird in Kapitel 3 vorgestellt. Dieser wird dafür verwendet, die Zielfunktion des in Kapitel 2 formulierten Modells realitätsnah zu formulieren.

In Kapitel 4 wird das Modell aus Kapitel 2 mit einem MIP-Solver gelöst. Da die Zielfunktion aus Kapitel 3 im Allgemeinen nicht linear ist, wird eine Linearisierung durchgeführt. Das schränkt zwar die Aussagekraft des Modells ein, jedoch könnte es ohne diese Maßnahme nicht mit einem MIP-Solver gelöst werden. Trotzdem bleibt ein komplexes Optimierungsmodell, welches sehr viele Restriktionen enthält. Deshalb wird ein relaxationsbasiertes Verfahren implementiert, welches sukzessive Nebenbedingungen generiert und so schließlich die global optimale Lösung des Problems berechnen kann.

Trotz dieser Manipulation sind nur relativ kleine Instanzen mit einem MIP-Solver lösbar. Von Problemen realistischer Größe sind diese weit entfernt. Deshalb widmet sich Kapitel 5 der Entwicklung eines heuristischen Lösungsverfahrens. Ausgehend von den klassischen Standortplanungs-Methoden werden verschiedene Verfahren der lokalen Suche entwickelt. Um gute lokal optimale Lösungen finden zu können, werden die Verfahren mit einer Metaheuristik gesteuert.

Die entwickelten Verfahren müssen auf ihre Tauglichkeit zur Lösung des Problems überprüft werden. Insbesondere ist es notwendig, die verschiedenen Parameter der Metaheuristik festzulegen. In Kapitel 6 werden deshalb die umfangreich durchgeführten Rechentests dargestellt. Die gefundenen Lösungen kleiner Instanzen werden mit den exakten Lösungen aus Kapitel 4 verglichen, für die Lösungen größerer Beispiele sind nur die Ergebnisse unterschiedlicher Parametereinstellungen verfügbar.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel schließlich auf ein konkretes Logistiksystem angewendet. Es handelt sich dabei um Distributionsnetzwerke im Paketdienst. Modelle und Algorithmen sind entsprechend zu erweitern. Hier soll insbesondere auch die Frage beantwortet werden, wie das Logistiksystem langfristig aufgebaut sein sollte. Deshalb werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um eine Aussage darüber machen zu können, wie sich die optimale Lösung bei der Veränderung verschiedener Parameter entwickelt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>16</b>
<b>1 Logistik und Optimierung von Logistiksystemen</b>	<b>17</b>
1.1 Logistik	17
1.1.1 Der Logistikkbegriff und Logistikkbereiche	18
1.1.2 Supply-Chain-Management	20
1.1.3 Zeitliche Reichweite von Logistikkentscheidungen	22
1.1.4 Standortplanung in der Distributionslogistik	23
1.2 Lösungsansatz	24
1.2.1 Abstraktion	26
1.2.2 Lösungsverfahren	29
1.3 Konkretisierung der Aufgabe und der Vorgehensweise	33
<b>2 Formulierung eines Optimierungsmodells</b>	<b>39</b>
2.1 Modelle der Standortplanung und Gebietsschneidung	39
2.1.1 Modelle der betrieblichen Standortplanung	39
2.1.2 Facility-Location-Probleme	44
2.1.3 Modellierung von Zusammenhang	46
2.2 Modellerweiterung	48
2.3 Zusammenfassung	56
<b>3 Berechnung der Logistikkosten</b>	<b>57</b>
3.1 Distributionsstrategien	57
3.2 Logistikkosten	62
3.3 Tourlängen	66
3.4 Berechnung der Logistikkosten im Anwendungsfall	72
3.5 Bewertung der Ergebnisse	77
<b>4 Berechnung der exakten globalen Optima</b>	<b>81</b>
4.1 Generierung von Testinstanzen	81
4.2 Berechnungsverfahren	83
4.3 Zusammenhangsprüfung	85
4.4 Rechenergebnisse	85

<b>5</b>	<b>Entwicklung heuristischer Lösungsverfahren</b>	<b>89</b>
5.1	Verfahrenswahl . . . . .	89
5.2	Tabu-Search . . . . .	92
5.2.1	Allgemeine Konzeption . . . . .	92
5.2.2	Anspruchskriterien . . . . .	95
5.2.3	Tabulisten . . . . .	95
5.2.4	Intensivierung und Diversifizierung . . . . .	96
5.2.5	Kandidatenlisten . . . . .	98
5.2.6	Abbruchkriterien . . . . .	99
5.3	Lokale Suche . . . . .	100
5.3.1	Verfahren: Add/Open . . . . .	102
5.3.2	Verfahren: Drop/Close . . . . .	106
5.3.3	Das Switch-Verfahren . . . . .	108
5.3.4	Das Centralize-Verfahren . . . . .	110
5.3.5	Das Partition-Verfahren . . . . .	111
5.3.6	Konstruktionsverfahren: Nearest-Facility . . . . .	112
5.3.7	Zulässigkeitsprüfung . . . . .	113
5.4	Anwendung von Tabu-Search auf das CFLP-CC . . . . .	114
5.4.1	Tabulisten . . . . .	114
5.4.2	Anspruchskriterium . . . . .	116
5.4.3	Kandidatenlisten . . . . .	117
5.4.4	Intensivierung und Diversifizierung . . . . .	117
5.4.5	Abbruchkriterien . . . . .	120
5.4.6	Postprocessing . . . . .	121
5.4.7	Möglichkeiten zur Beschleunigung des Verfahrens . . . . .	122
5.5	Zusammenfassung . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Testrechnungen</b>	<b>127</b>
6.1	Bestimmung der Tabu-Search-Parameter . . . . .	128
6.1.1	Apriori festgelegte Parameter . . . . .	128
6.1.2	Nachbarschaften . . . . .	129
6.1.3	Länge der Kandidatenlisten . . . . .	131
6.1.4	Tabulisten . . . . .	133
6.1.5	Postprocessing . . . . .	135
6.1.6	Vergleich mit exakten Lösungen . . . . .	138
6.2	Stabilität der Ergebnisse . . . . .	140
6.2.1	Auswirkungen der Linearisierung . . . . .	140
6.2.2	Feinheit der Parzellierung . . . . .	141
6.3	Fazit . . . . .	142

---

<b>7 Anwendung: Netzwerkdesign in der KEP-Logistik</b>	<b>145</b>
7.1 Netzwerkstrukturen in der KEP-Logistik	146
7.2 Modellanpassungen	149
7.2.1 Vorlauf	150
7.2.2 Nachlauf	154
7.3 Anpassung der Algorithmen	157
7.3.1 Open	157
7.3.2 Add	157
7.3.3 Close	158
7.3.4 Drop	158
7.3.5 Switch	159
7.3.6 Centralize	160
7.3.7 Partition	161
7.3.8 Nearest-Facility und Cover	161
7.3.9 Tabu-Search	161
7.4 Optimierung eines KEP-Netzwerkes	162
7.5 Zusammenfassung	164
<b>Fazit</b>	<b>167</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>168</b>
<b>A Exakte Lösung der Testinstanzen</b>	<b>177</b>
<b>B Auswertungen der Testläufe für das CFLP-CC</b>	<b>179</b>
B.1 Nachbarschaften	180
B.2 Länge der Kandidatenlisten	183
B.3 Tabulistenlängen	186
B.4 Postprocessing	189
B.5 Kontrollgruppe	193
B.6 Linearisierung	194
B.7 Parzellenzuschnitt	195
B.8 Paketnetz	195
<b>C Erweiterung des CFLP-CC</b>	<b>197</b>
C.1 Standortnutzung, Vor- und Nachlauf	197
C.2 Hauptlauf	198
C.3 Zusammenfassung in einem Gesamtmodell	200