

RESEARCH

Marco Lübbecke
Adrian Weiler
Brigitte Werners *Hrsg.*

Zukunftsperspektiven des Operations Research

Erfolgreicher Einsatz und Potenziale



Springer Gabler

Zukunftsperspektiven des Operations Research

Marco Lübbecke • Adrian Weiler
Brigitte Werners (Hrsg.)

Zukunftsperspektiven des Operations Research

Erfolgreicher Einsatz und Potenziale

Herausgeber

Marco Lübbecke
Aachen, Deutschland

Brigitte Werners
Bochum, Deutschland

Adrian Weiler
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-658-05706-0
DOI 10.1007/978-3-658-05707-7

ISBN 978-3-658-05707-7 (eBook)

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-gabler.de

Vorwort zur Festschrift zu Ehren von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hans-Jürgen Zimmermann

Im Mai 2014 vollendet Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hans-Jürgen Zimmermann sein 80. Lebensjahr, wozu wir sehr herzlich gratulieren. Aus diesem Anlass und zu seiner Ehre haben ehemalige Schüler, Weggefährten und ihm verbundene Persönlichkeiten die vorliegende Festschrift erstellt. Damit wird ein Ausschnitt der vielfältigen Entwicklungen aufgezeigt, die durch Hans-Jürgen Zimmermann erforscht, gelehrt, angeregt und beeinflusst sind. Der Lebenslauf des Jubilars in diesem Buch fasst wichtige Stationen und Aktivitäten knapp zusammen. Gut nachvollziehbar ist, wie positiv, unermüdlich und vorausschauend das Wirken von Hans-Jürgen Zimmermann ist, welches mit vielfältigen Preisen und Ehrenwürden ausgezeichnet wurde. Mit der von H.-J. Zimmermann vorbildlich verkörperten Vorgehensweise, Bewährtes zu verbessern, neue Forschungsergebnisse aufzugreifen, zu fördern und zu erweitern, theoretische Erkenntnisse und praktische Umsetzung über wechselseitigen Einfluss zu verzahnen und Ansätze verschiedener Fachdisziplinen zu vernetzen, steht er beispielhaft für die erfolgreiche Entwicklung des Operations Research. Dies wird entsprechend mit diesem Buch dokumentiert, in welchem über bisher erzielte, umfangreiche Erfolge des Operations Research hinaus auch die darauf aufbauenden zukünftigen Potenziale aufgezeigt werden, welche der Jubilar weiterhin höchst aktiv beeinflusst.

Die Bedeutung des Operations Research für die Praxis steigt ständig. Bedingt durch den weltweiten Wettbewerb wächst einerseits die Komplexität der vorhandenen Probleme, andererseits steigen die Anforderungen an die Qualität der entsprechenden Lösungen. Diese sollen beispielsweise kurzfristig verfügbar, kostenoptimal, kundenorientiert und auch bei unsicheren zukünftigen Entwicklungen bestgeeignet sein. Hier bietet das Operations Research vielfältige hervorragende Möglichkeiten, problemspezifisch derartige Anforderungen zu erfüllen. Aufgrund technologischer Entwicklung im Bereich der IT sind Rechengeschwindigkeit und Datenverfügbarkeit exponentiell gestiegen. Parallel dazu führten entsprechende Forschungen zu Verbesserungen von Optimierungsalgorithmen und Heuristiken mit einer enormen Steigerung der Lösungsgeschwindigkeit. Mit Einsatz von OR-Methoden lassen sich heute Entscheidungen für komplexe Probleme in vielfältigsten Anwendungsbereichen hervorragend unterstützen, wie die Beiträge dieses Buches anschaulich darlegen. Theoretische und anwendungsorientierte Weiterentwicklungen erlauben die geeignete Analyse und Berücksichtigung der heute verfügbaren riesigen Datenmengen. Hier entwickeln sich vielfältige Potenziale in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen für das Operations Research auf der Schnittstelle zwischen Wirtschaftswissenschaft, Informatik, Mathematik und Fachdisziplin, die bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

Mit diesem Buch wird durch erfolgreiche Beispiele aus unterschiedlichen Anwendungsgebieten des Operations Research ein hervorragender Einblick gegeben. Die Beiträge aus dem Bereich Produktion und Logistik behandeln etwa die Kundenbelieferungen eines Online-Lebensmittelhändlers, Bestandsverteilungen in Produktions- und Distributionsnetzwerken, Standortentscheidungen oder Einsätze im Gesundheitswesen. Der Transportbereich wirft vielfältige Probleme auf, die durch passende Operations Research Methoden gelöst werden, wie die teils sehr großen, realen Beispiele Autoreisezugverladung, Terminalmanagement in der Fahrzeugdisposition am Hafen, Revenue Management bei Fluggesellschaften, vielfältige Optimierungen für Bus, Bahn und Flug, Personaleinsatzplanung am Flughafen oder Schienenanbindung der festen Fehmarnbeltquerung aufzeigen. Unter

anderem werden neue Optimierungsverfahren, Weiterentwicklungen zum Umgang mit Unsicherheit und Risiko, Simulation und Szenarioanalysen erfolgreich eingesetzt. Beispielhaft für die Unterstützung durch Operations Research Methoden bei der Herstellung ziviler Sicherheit werden Evakuierungsplanungen für Städte behandelt. Derartig große Probleme lassen sich durch Netzwerkalgorithmen lösen, für die auch robuste Ansätze existieren. Eine angemessene Visualisierung mit entsprechenden Tools unterstützt die Entscheidungsträger bei der Optimierung. Wichtig für die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes ist die Planung einer ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Energieversorgung. Beispielhaft werden hier die Emissionsminderung durch den Einsatz von Biokraftstoffen und die Optimierung eines Energieerzeugungsportfolios dargestellt. Auf Basis mathematischer Optimierungsmodelle lassen sich mittels Data Envelopment Analyse Unternehmensbereiche oder auch Länder hinsichtlich ihrer Effizienz bezüglich der verschiedensten Kriterien miteinander vergleichen, wie am Beispiel der Wohlstandsmessung europäischer Länder und neuer Interpretationsvorschläge entwickelt wird. Auf die Möglichkeiten der Analyse und Berücksichtigung großer Datenmengen wird neben den auf die Anwendungen fokussierten Beiträgen auch im Teil über Analytics eingegangen. So werden Visualisierungen von Graphen mittels Landkarten vorgestellt, auf intelligente Entscheidungsunterstützungssysteme eingegangen und Weiterentwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten von dynamischem Data Mining aufgezeigt. Damit sind nur einige der Bereiche angesprochen, die Hans-Jürgen Zimmermann mit eigenen wissenschaftlichen Beiträgen während seines langjährigen Wirkens behandelt, zeigen jedoch bereits die hervorragenden Potenziale des Einsatzes von Operations Research Methoden auf.

Es wird sichtbar, welche wertvollen Impulse für die persönliche Entwicklung vieler Personen und für die Weiterentwicklung der Forschung von Hans-Jürgen Zimmermann gegeben wurden, wofür wir ihm herzlich danken. Wir haben die Gelegenheit dieser Festschrift genutzt, die Erfolge und Potenziale des Operations Research anhand unterschiedlicher Anwendungen und Entwicklungen aufzuzeigen und wünschen unseren Leserinnen und Lesern, dass sie unsere Begeisterung

für dieses Fachgebiet teilen und sich zu verbesserten Entscheidungen inspirieren lassen.

Wir danken allen, die mit ihrem Einsatz zu diesem Buch beigetragen haben. Besonders hervorzuheben sind Herr Dipl.-Handelslehrer Dirk Degel, Frau Dipl.-Mathematikerin Sarah Kirchner und Frau Anne Kücke, ohne deren intensive und kompetente Unterstützung die Erstellung nicht möglich gewesen wäre.

Marco Lübbecke

Adrian Weiler

Brigitte Werners

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
I Produktion und Logistik	1
Bestandsverteilung in Liefernetzwerken	3
<i>Ulrich Dorndorf und Thomas Wensing</i>	
Lieferservice-Planung im Lebensmittelhandel	15
<i>Jörg Homberger und Hermann Gehring</i>	
Online-Optimierung und Simulation in der Logistik	33
<i>Fabian Dunke, Jan Necil und Stefan Nickel</i>	
Facility Location Choice and Facility Location Planning	49
<i>Sabrina Bangert, Peter Letmathe und Matthias Schinner</i>	
Problemdekomposition durch Graphenpartitionierung	73
<i>Frank Schneider und Ulrich Dorndorf</i>	
Dynamische Vergabe von Patiententerminen	83
<i>Sarah Kirchner und Marco Lübbecke</i>	

II Transport	97
Optimierung der Autozugverladung	99
<i>Pascal Lutter und Brigitte Werners</i>	
Terminalmanagement in der Fahrzeugdistribution	117
<i>Ulrich Dorndorf und Joachim Kneis</i>	
Simulation als Werkzeug der Entscheidungsunterstützung	129
<i>Catherine Cleophas</i>	
Optimierung in der Planungspraxis für Bus, Bahn und Flug	147
<i>Leena Suhl, Natalia Kliewer und Taïeb Mellouli</i>	
Personaleinsatzplanung bei Aviapartner Düsseldorf	165
<i>Jörg Herbers</i>	
Szenario-Analysen zur Schienenanbindung der FFBQ	175
<i>Wilhelm Hummeltenberg</i>	
III Netzwerke und Evakuierung	201
Von Straßenkarten bis zur Evakuierung von Städten!	203
<i>Horst W. Hamacher und Bob Grün</i>	
Visualisierung von Optimierungsergebnissen	227
<i>Stefan Droste</i>	
Robuste Netzwerkalgorithmen	237
<i>Tom McCormick, Gianpaolo Oriolo und Britta Peis</i>	

IV Energie	249
Emissionsminderung durch den Einsatz von Biokraftstoffen	251
<i>Grit Walther und Laura Elisabeth Hombach</i>	
On the Use of Fuzzy Set Theory for Optimizing Portfolios	263
<i>Barbara Glensk and Reinhard Madlener</i>	
V Ökonomische Evaluation	275
Wohltandsmessung mit Methoden des Operations Research	277
<i>Harald Dyckhoff, Eleazar Mbock und Katrin Waletzke</i>	
Eine ökonomische Analyse verdeckter Outputs in der DEA	297
<i>Wilhelm Rödder, Andreas Kleine und Andreas Dellnitz</i>	
VI Analytics	315
Visualisierung verschachtelter Graphen als Landkarten	317
<i>Martin Gronemann und Michael Jünger</i>	
Intelligente Decision Support Systeme	329
<i>Roland Gabriel</i>	
Dynamic Data Mining	343
<i>Richard Weber</i>	
Lebenslauf H.-J. Zimmermann	357
Autorenverzeichnis	359

Teil I

Produktion und Logistik

Bestandsverteilung in Produktions- und Distributionsnetzwerken

Ulrich Dorndorf und Thomas Wensing

When You Are Down to Four, Order More

(J.A. Muckstadt und A.Sapra)

1 Motivation

Es kann alles ganz einfach sein: „When You Are Down to Four, Order More“¹, empfehlen Muckstadt und Sapra (2010) auf dem Titel ihres Lehrbuchs zum Bestandsmanagement. In der Tat sind damit schon die beiden zentralen Fragen beantwortet, die sich bei der Disposition eines Einprodukt-Lagers stellen. Es ist festgelegt, wann nachbestellt werden soll, nämlich sobald der Bestand auf vier Stück abgesunken ist, und es wird ein Hinweis auf das angemessene Bestellvolumen gegeben, auch wenn dieser noch quantifiziert werden müsste. Abgesehen davon lässt sich vermuten, dass die Restmenge 4 nicht in jeder Situation das richtige Bestellsignal abgibt und es bleibt die speziellere Frage offen, ob die empfohlene Bestellung unverzüglich ausgelöst werden soll oder ob sich das betriebliche Bestellwesen, insbesondere im Hinblick auf die Koordination mehrerer Bestandspositionen, durch eine zeitliche Taktung vereinfachen lässt.

Damit befindet man sich schon inmitten der praktischen und wissenschaftlichen Überlegungen, die zum Bestandsmanagement bei unsicherer Umwelt angestellt werden. Die grundsätzliche Fragestellung bleibt

¹Frei übersetzt: Sind wir angelangt bei vier, bestellen wir.

einfach, aber sie richtig zu beantworten wird umso komplizierter, je größer man den Kontext fasst und je genauer man hinschaut.

Führt ein Unternehmen ein Softwaresystem zur Bestandsdisposition ein, so ist es ein naheliegender erster Schritt, jede Position einzeln unter Kontrolle zu nehmen und sich dabei an einer einfachen Bestellregel wie der oben skizzierten zu orientieren. Weitere Schritte könnten dann beinhalten, spezielle Sonderbedingungen wie Gebindegrößen, Mindestbestellmengen oder Mengenrabatte in das Kalkül miteinzubeziehen. Fasst man die Perspektive weiter, so geraten die Beziehungen der Bestandspositionen untereinander in den Blick, und es lässt sich bspw. die Frage stellen, wie ein Verbund von Positionen das übergeordnete Ziel der Versorgungssicherheit in Richtung des Kunden möglichst kostengünstig erreichen kann.²

Dieses Vorgehen vom Einfachen zum Komplizierten spiegelt auch die Entwicklung der Bestandsmanagementfunktion in unserer Software add*ONE wider, welche die INFORM GmbH in mittlerweile weit über 200 individuellen Kunden-Installationen betreibt und weiterentwickelt. Wurde in der Vergangenheit ein umfassendes Instrumentarium zur Abdeckung der vielfältigen Sonderbedingungen bei der Einzeldisposition zusammengetragen, so rückt in jüngster Zeit die gezielte Abstimmung mehrstufiger Bestandssysteme verstärkt in den Fokus.

Hierbei werden zwei Wege beschritten. Zum einen schlägt ein Modul zur mehrstufigen *deterministischen* Losgrößenplanung Produktions- und Bestellmengen vor, bei deren Dimensionierung sowohl die lokalen Kosten und Kapazitäten als auch die Auswirkungen auf vor- oder nachgelagerte Stufen berücksichtigt werden. Ergänzend dazu bestimmt ein Modul zur mehrstufigen *stochastischen* Sicherheitsbestandsplanung, wo sich die umweltbedingte Nachfrage- und Versorgungsunsicherheit im Sinne des Gesamtsystems am günstigsten abfangen lässt.

Diesen zweiten Aspekt beleuchtet der vorliegende Artikel. In Abschnitt 2 wird der verfolgte Optimierungsansatz in seinen Grundzügen vorgestellt und anhand eines Beispiels illustriert. Zur Veranschauli-

²Für eine Beschreibung der möglichen Schwierigkeiten bei der Bereitstellung von Pfeifentabak in einem mehrstufigen Lagersystem verweisen wir auf Zimmermann und Sovereign (1974, S. 400).

chung des Anwendungsbereichs werden in Abschnitt 3 Ergebnisse einer numerischen Studie mit typischen Produktions- und Distributionsnetzwerken aus der industriellen Praxis diskutiert. Abschnitt 4 beschließt den Artikel mit einem kurzen Fazit.

2 Optimierungsansatz

Wir begegnen bei der Anwendung von add*ONE in Projekten vom Mittelstand bis zum weltweit tätigen Konzern Produktions- und Distributionsnetzwerken, die reaktiv nach dem sogenannten *Pull-Prinzip* organisiert sind. Anstatt die unbekannte Nachfrage zu schätzen und antizipativ zu beschaffen, reagieren die einzelnen Lagerknoten auf den beobachteten Verbrauch und verwalten ihre Bestände durch die lokale Anwendung einer entsprechend konfigurierten Lagerhaltungspolitik.

Unser Optimierungsansatz widmet sich nun der Frage, welche Serviceziele die inneren Knoten des Lagersystems verfolgen sollen, jene Knoten also, die nicht in direktem Kundenkontakt stehen. Das Vorgehen entstammt der Gedankenwelt des sogenannten *Guaranteed Service Model* (GSM), wobei die folgende Situation betrachtet wird.

Ein Unternehmen will eine vorgegebene Lieferzeit zum Kunden durch Lagerbestände im Netzwerk absichern, und zwar für die in einem bestimmten Anteil, z. B. in 95%, der Perioden maximal erwartete Nachfrage. Höherer Spitzenbedarf wird durch andere Maßnahmen, z. B. Überstunden oder Eiltransporte, die im Modell nicht betrachtet werden, behandelt. Die Kosten für den Sicherheitsbestand sollen minimiert werden.

An welchen Knoten des Netzes soll Bestand gehalten werden, und welche internen Lieferzeiten sollen vereinbart werden? Das Lieferzeitversprechen soll garantiert eingehalten werden – daher der Name des Modells. Hierzu müssen die Bestände so dimensioniert sein, dass sie zur Deckung der maximalen Nachfrage ohne besagte Bedarfsspitzen ausreichen.

Wir nehmen an, dass die Knoten des Netzes nach einem zeitdiskreten *Base-Stock*-Prinzip arbeiten: In jeder Periode wird der lokale Bestand

auf den Zielbestand aufgefüllt, falls dieser unterschritten wurde. Dazu wird umgehend eine Bestellung an die vorangehenden Knoten ausgelöst bzw. die eigene Produktion angestoßen.³

Wenn in jeder Periode Wiederauffüllaufträge ausgelöst werden, dann ist in einer bestandskostenminimierenden Lösung die mittlere Nachfrage pro Periode ein durchlaufender Posten: für sie braucht kein Lagerbestand gehalten zu werden, sondern es wird *just in time* so produziert, dass die Produkte sofort an die nachfolgenden Knoten weitergegeben werden können. Der erwartete Lagerbestand entspricht daher dem Sicherheitsbestand.

Eine zentrale Idee des Modells ist es, nicht den Bestand eines Knotens direkt zu betrachten, sondern die Höhe des Sicherheitsbestands aus einer bestimmten Zeitspanne abzuleiten, die durch den Knoten abgesichert werden soll.

2.1 Beispiel

Abb. 1 zeigt ein Beispiel aus der Produktion und Distribution von Computerzubehör.⁴ Die zweite Stufe des Graphen enthält die Produktionsprozesse P_1 und P_2 . Die Weiterverarbeitung erfolgt in der vierten Stufe in den Knoten P_3 und P_4 . Die fünfte Stufe enthält die Distributionsknoten D_1 bis D_4 .⁵ Jeder Knoten kann die von ihm ausgehenden Produkte lagern. Eingangslager werden über zusätzliche Stufen abgebildet: Die erste Stufe dient der Beschaffung und Lagerung der Rohmaterialien R_1 bis R_5 , und die dritte Stufe bildet die zeitbehafteten Transportvorgänge T_1 bis T_4 ab; diese Knoten können als Eingangslager der Knoten P_3 , P_4 und D_1 interpretiert werden.

Ein Knoten i ist durch seine Prozesszeit p_i , eine höchstens zulässige ausgehende Lieferzeit L_i^{\max} sowie die Lagerkosten für eine Einheit des Produkts charakterisiert. Die Zeiten sind in Tagen angegeben.

³Dieses Prinzip entspricht einer (r, S) -Lagerhaltungspolitik mit $r = 1$. Simpson (1958) hat für lineare und divergierende Netze, deren Bestand nach diesem Prinzip kontrolliert wird, gezeigt, dass die ausgehende Lieferzeit für lagerhaltende Knoten null sein sollte.

⁴Die Beispieldaten stammen aus der Benchmark-Sammlung von Willems (2008).

⁵Aus Darstellungsgründen ist D_1 auf Stufe vier und R_5 auf Stufe zwei gezeigt.

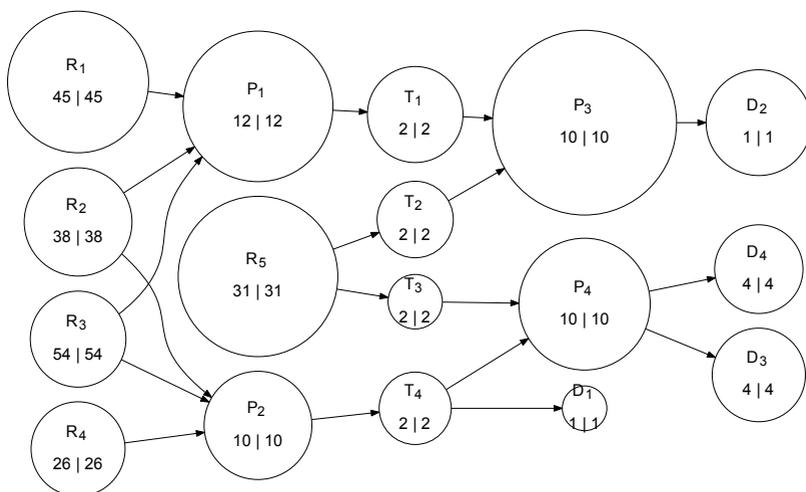


Abbildung 1: Beispiel eines realen Produktions- und Distributionsnetzwerks. Die Knoten zeigen die Prozesszeit p_i und die durch Bestand abgesicherte Zeit τ_i bei lokaler Planung, in der sich jeder Knoten auf sofortige Lieferbereitschaft eingestellt hat. Ihre Fläche entspricht den Lagerkosten.

Gegeben ist die Verteilung der exogenen Nachfrage an den Distributionsknoten; wir nehmen hier an, dass deren Eintritte im Zeitverlauf konstant und voneinander unabhängig sind.⁶ Die Nachfrage auf vorgelagerten Stufen kann rückwärts durch geeignete stochastische Operationen aus den Verteilungen der Periodennachfrage ermittelt werden.

Gesucht ist die Zeitdauer τ_i , für die ein Knoten Lagerbestand vorhalten soll. Aus dieser Zeit folgt unmittelbar die Höhe des Bestands, der für den Fall maximaler Nachfrage gehalten werden muss: Er wird so dimensioniert, dass in einem Mindestanteil von Fällen, in den abgebildeten Beispielen 95%, die Nachfrage in den τ_i abzusichern-

⁶Schon Simpson (1958) weist darauf hin, wie von der Annahme der Unabhängigkeit abgesehen werden kann.

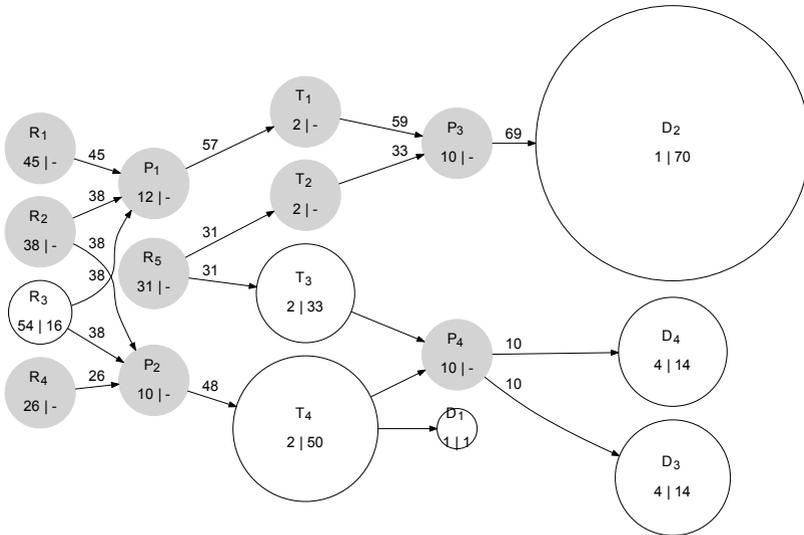


Abbildung 2: Lösung des Beispiels aus Abb. 1 bei globaler Planung. Nur die weißen Knoten halten Bestand. Die Kantengewichte zeigen die von null abweichenden Lieferzeiten. Durch Bestandsverlagerung und Bündelungseffekte sinken die Gesamtkosten bei gleichem Service um 21%.

den Perioden erfüllt wird. Dies entspricht einem ereignisorientierten Service-Kalkül, das auch als α -Servicegrad oder *Ready Rate* bezeichnet wird (Schneider, 1981).

Lokale Planung

Wir fordern, dass jeder Knoten sofort lieferfähig ist, d.h. $L_i^{\max} = 0$. Da auch vorgelagerte Knoten sofort liefern, hält ein Knoten dazu Bestand in Höhe der innerhalb seiner Prozesszeit maximal erwarteten Nachfrage, d.h. $\tau_i = p_i$. Diese Lösung ist in Abb. 1 dargestellt.

Globale Planung

In der mehrstufigen (globalen) Planung ist im Beispiel nur für die ausgehenden Distributionsknoten $L_i^{\max} = 0$ vorgegeben. Dadurch bleibt die Lieferfähigkeit des Systems nach außen unverändert. Alle anderen Knoten können höhere Lieferzeiten nennen; diese Zeiten sind in der Lösung in Abb. 2 als Kantengewichte dargestellt.

Das Maximum der eingehenden Lieferzeiten eines Knotens i wird mit L_i^{in} bezeichnet. Im Beispiel ist $L_{P_2}^{\text{in}} = \max\{38, 26\}$. Hält ein Knoten keinen eigenen Bestand, dann kann er eine bestellte Menge nach $L_i^{\text{in}} + p_i = L_i^{\text{out}}$ Zeiteinheiten zur Verfügung stellen. In der Beispiellösung ist $L_{P_2}^{\text{out}} = 38 + 10$. Diese ausgehende Lieferzeit lässt sich durch Lagerbestand um die Zeit τ_i reduzieren. Im Beispiel ist $L_{R_3}^{\text{out}} = 0 + 54 - 16 = 38$, d.h. R_3 passt sich durch Vorhalten von Bestand für 16 Perioden an die Lieferzeit des Knotens R_2 an.

2.2 Formales Modell

Das Netzwerk wird durch einen Graphen $G(\mathcal{V}, \mathcal{A})$ mit Knotenmenge \mathcal{V} und Pfeilmenge \mathcal{A} abgebildet. Das Modell lautet als nichtlineares Programm:

$$\min \sum_{i \in \mathcal{V}} c_i(\tau_i) \quad (1)$$

$$L_i^{\text{in}} + p_i - \tau_i = L_i^{\text{out}} \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (2)$$

$$L_i^{\text{out}} \leq L_j^{\text{in}} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (3)$$

$$L_i^{\text{in}}, \tau_i \in \mathbb{N}_0, \quad L_i^{\text{out}} \in [0, L_i^{\max}] \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (4)$$

(1) minimiert die Summe der durch die Funktionen $c_i(\tau_i)$ angegebenen Lagerkosten. (2) beschreibt die Lieferzeitbilanz, und (3) beschränkt die eingehende Lieferzeit eines Knotens gemäß den ausgehenden Lieferzeiten seiner Vorgänger. In den Wertebereichsdefinitionen (4) der Entscheidungsvariablen wird die ausgehende Lieferzeit beschränkt.

Die nichtlinearen Funktionen $c_i(\tau_i)$ messen die Kosten, um Sicherheitsbestand für die maximale Nachfrage im Zeitraum τ_i vorzuhalten. Wenn die Nachfrage unabhängig normalverteilt ist, haben sie die Form

$$c_i(\tau_i) = \hat{c}_i \cdot k \sigma_i \sqrt{\tau_i}$$

mit \hat{c}_i als Lagerkosten des Knotens pro Produkteinheit, k als Quantilwert der Standardnormalverteilung für die maximale Nachfrage, und σ_i als Standardabweichung.⁷

Will man (1)–(4) als ganzzahliges Lineares Programm lösen, muss die Zielfunktion linearisiert werden. Wir verwenden zu diesem Zweck für jeden Knoten i und jede Zeitdauer t Binärvariablen, die anzeigen, welchen Wert τ_i annimmt.

Bestimmte Werte der τ_i lassen sich durch eine Voranalyse, die auf dem von Simpson (1958) beschriebenen Ansatz aufbaut, ausschließen, weil sie in einer optimalen Lösung nicht auftreten können. Durch die Wertebereichsreduktion kann in vielen Fällen eine deutliche Verkürzung der Rechenzeit erzielt werden.

2.3 Wahl des Servicegrads und der Lieferzeit

Abb. 3 illustriert, wie sich unser Ansatz auch nutzen lässt, um den Entscheider bei der Abwägung zwischen Servicegrad und Lieferzeit einerseits sowie Lagerkosten andererseits zu unterstützen. Die Abbildung zeigt, wie sich unterschiedliche Lieferzeitversprechen gegenüber den Kunden sowie Basisservicegrade auf die optimierten Gesamtkosten des Systems auswirken. Ein Punkt der Fläche bezieht sich auf eine bestimmte Lieferzeit, die für alle vier Endprodukt-Knoten des Beispiels aus den Abb. 1 und 2 festgelegt wird, und ein für das gesamte System gültiges Serviceziel.

Ist ein Lagerkostenbudget vorgegeben, so kann die Abwägung zwischen Lieferzeit und Servicegrad auf der zweidimensionalen Paretofront erfolgen, die man für einen festen Kostenwert erhält.

⁷Eine Einführung in die Behandlung allgemeiner Verteilungsannahmen geben Zimmermann und Sovereign (1974, S. 365 ff.).

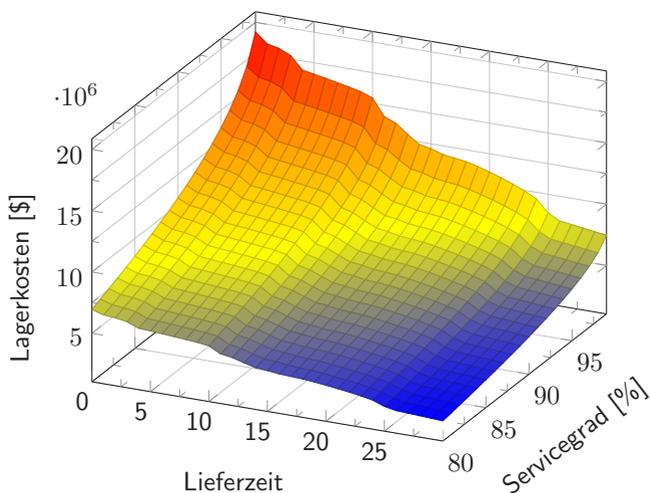


Abbildung 3: Jährliche Lagerkosten in Abhängigkeit des Servicegrads und der Lieferzeit zum Kunden für das Beispiel aus den Abb. 1 und 2.

2.4 Literatur

Der Gedanke des GSM geht auf Simpson (1958) zurück. Er wurde insbesondere von Inderfurth (1991) und Graves und Willems (2000) aufgegriffen, die Verfahren der Dynamischen Programmierung für Netze mit Baumstruktur entwickelt haben. Ausgehend von dem dort beschriebenen Basismodell sind jüngst zahlreiche Arbeiten erschienen, die sich mit dessen Anwendung, (bspw. Wieland et al., 2012), und Erweiterung, (bspw. Humair et al., 2013; Lesnaia, 2004), befassen.

Der oben beschriebene Ansatz folgt der Idee von Magnantia et al. (2006), das Problem als gemischt-ganzzahliges Lineares Programm zu formulieren und zu lösen. Ein vergleichbares problemspezifisches Lösungsverfahren entwickeln Humair und Willems (2011), wobei ihre numerischen Ergebnisse keinen systematischen Leistungsvorteil versprechen.

Tabelle 1: Ergebnisse einer numerischen Studie für die Benchmark-Sammlung von Willems (2008).

Lager	Daten- sätze	Optimal gelöst in			Offen	Gap \leq	Lokale Mehr- kosten
		1s	60s	3600s			
8 – 100	12	9	3			38,1%	
100 – 500	15	2	6	5	2	3,6%	
500 – 2025	11		5	2	4	5,2%	

3 Ergebnisse

Willems (2008) stellt eine Sammlung von 38 typischen Lagersystemen aus der industriellen Praxis zur Verfügung, mit denen sich Optimierungsansätze nachvollziehbar evaluieren lassen. Anhand dieser Instanzen soll nun abschließend ein Eindruck von der Größe der Netze gegeben werden, deren Konfiguration sich mit dem GSM unterstützen lässt.

Die 38 Netzwerke enthalten zwischen 8 und 2025 Knoten; das Verhältnis der Kanten- und Knotenzahl liegt zwischen 1 und 8,01. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse für drei Größenklassen zusammen, die Netze mit bis zu 100, 500 und gut 0200 Knoten enthalten.⁸

Es werden 25 der 38 Instanzen in jeweils höchstens einer Minute optimal gelöst. Bei einem Rechenzeitlimit von einer Stunde können für sechs Instanzen keine beweisbar optimalen Lösungen gefunden werden, bei einer verbleibenden maximalen Dualitätslücke von 3,6% bzw. 5,2%.

⁸Für die numerische Studie wurden folgende Annahmen getroffen, die über die Angaben in den Testinstanzen hinausgehen. Von allen (deterministischen und stochastischen) Zeiten wurden die Mittelwerte genommen und wenn nötig auf die nächste ganze Zahl gerundet. Zur Bewertung der Bestandskosten $c_i(\tau_i)$ wurde angenommen, dass die Periodennachfrage stochastisch unabhängig normalverteilt ist. Der Servicegrad wurde für jedes Lager auf 95% eingestellt. Die Lösungen wurden mit SCIP 3.0.2 (Achterberg, 2009) unter Verwendung von SoPlex 1.7.2 auf einer Intel Core i7-2720QM CPU mit 2.2 GHz berechnet.

Die letzte Spalte der Tabelle gibt die mittleren Mehrkosten an, die sich aus einer einstufigen Bestandsplanung ergeben, in der alle Lager gezwungen werden, die Nachfrageunsicherheit während ihrer Prozesszeit lokal abzudecken. Bei drei Instanzen erweist sich diese Strategie als optimal auch im mehrstufigen Sinne. Für die übrigen 35 Instanzen ist dagegen ein z.T. erheblicher Mehraufwand zu verzeichnen, der in zwei Fällen sogar über eine Verdopplung der Kosten hinausgeht.

4 Fazit

Ziel dieses Artikels war es, einen praktikablen Ansatz aufzuzeigen, mit dem sich das anspruchsvolle Problem der mehrstufigen Sicherheitsbestandsallokation auch in großen Netzwerken quantitativ unterstützen lässt. Erläutert wurden der Kerngedanke und ein mathematisches Modell, das die wesentlichen Zusammenhänge fasst.

Wichtige künftige Aufgaben ergeben sich aus der systematischen Quantifizierung der Bestandskosten $c_i(\tau_i)$ insbesondere als Verbindungsglied zwischen dem mehrstufigen Modell und einstufigen Ansätzen, die in der operativen Ausdifferenzierung der Einzelknoten verwendet werden. Ferner lässt die Genese der einstufigen Ansätze vermuten, dass sich aus dem praktischen Gebrauch Anregungen zur Erweiterung und Modifikation des Grundmodells ergeben werden.

Literaturverzeichnis

- T. Achterberg. SCIP: solving constraint integer programs. *Mathematical Programming Computation*, 1(1):1–41, 2009.
- S.C. Graves und S.P. Willems. Optimizing strategic safety stock placement in supply chains. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2(1):168–83, 2000.
- S. Humair und S.P. Willems. Optimizing strategic safety stock placement in general acyclic networks. *Operations Research*, 59(3): 781–787, 2011.

- S. Humair, J.D. Ruark, B. Tomlin und S.P. Willems. Incorporating stochastic lead times into the guaranteed service model of safety stock optimization. *Interfaces*, 43(5):421–434, 2013.
- K. Inderfurth. Safety stock optimization in multi-stage inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 24(1–2): 103–113, 1991.
- E. Lesnaia. *Optimizing Safety Stock Placement in General Network Supply Chains*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- T. L. Magnantia, Z.-J. M. Shenb, J. Shuc, D. Simchi-Levi und C.-P. Teoe. Inventory placement in acyclic supply chain networks. *Operations Research Letters*, 34:228–238, 2006.
- J.A. Muckstadt und A. Sapro. *Principles of Inventory Management*. Springer, New York, 2010.
- H. Schneider. Effect of service-levels on order-points or order-levels in inventory models. *International Journal of Production Research*, 19(6):615–631, 1981.
- K.F. Simpson. In-process inventories. *Operations Research*, 6(6): 862–873, 1958.
- B. Wieland, P. Mastrantonio, S.P. Willems. und G. Kempf. Optimizing inventory levels within Intel’s channel supply demand operations. *Interfaces*, 42(6):517–527, 2012.
- S.P. Willems. Real-world multiechelon supply chains used for inventory optimization. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(1):19–23, 2008.
- H.-J. Zimmermann und M.G. Sovereign. *Quantitative Models for Production Management*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.

Planung des Lieferservices eines Online-Lebensmittelhändlers

Jörg Homberger und Hermann Gehring

1 Einleitung

Die Logistikkette, auch bezeichnet als Supply-Chain, die Teilelieferanten, Produzenten, Handelsunternehmen, Logistikdienstleister und Endverbraucher durch Material-, Informations- und Zahlungsflüsse miteinander verbindet, ist schon seit vielen Dekaden Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Der Betrachtungsschwerpunkt hat sich im Zeitverlauf allerdings sukzessive vom Kettenanfang zu ihrem Ende, der sogenannten „letzten Meile“, verschoben. Entsprechend standen z. B. bei der Diskussion von Managementstrategien für Lieferketten unterschiedliche Logistikkonzepte im Vordergrund: So etwa die Lean-Production in den 1970er Jahren, das Cross-Docking und Vendor-Managed-Inventory in den 1980er und 1990er Jahren sowie Konzepte für die Last-Mile-Supply-Chain seit etwa der Jahrtausendwende (vgl. Boyer et al., 2004). Abbildung 1 veranschaulicht diese Schwerpunktverschiebung der wissenschaftlichen Diskussion in Anlehnung an Boyer et al. (2004).

Die besondere Bedeutung der „Last-Mile-Supply-Chain“ kommt dadurch zum Ausdruck, dass ihr etwa eine Schlüsselrolle mit Blick auf den Unternehmenserfolg zugebilligt wird. So führen Boyer et al. (2004) das Scheitern vieler BtC-Geschäftsmodelle auf das Versäumnis der Unternehmen zurück, ihre Lieferkette nicht bis zum Endverbraucher erweitert zu haben. Zur Behebung dieses Defizits wurden inzwischen

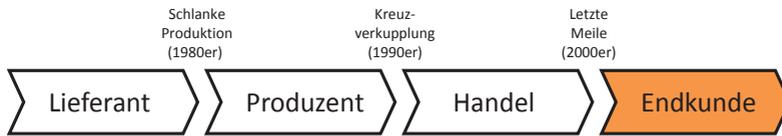


Abbildung 1: Zeitliche Einordnung einiger Konzepte des Supply-Chain-Managements (vgl. Boyer et al., 2004).

verschiedene Logistikstrategien und Planungsansätze entwickelt, die auf die effiziente und kostengünstige Belieferung von Endverbrauchern abzielen (vgl. Siebel und Ten Hompel, 2001).

Die Gestaltung des letzten Abschnitts der Lieferkette, die als Last-Mile-Supply-Chain Unternehmen und Endverbraucher verbindet, ist keinesfalls eine triviale Aufgabe. Vielmehr sind besondere Herausforderungen zu bewältigen, die vor allem die Prozesse der Kommissionierung und Belieferung betreffen. Sie resultieren u. a. aus der Vielzahl von Ladungseinheiten (viele Päckchen an Stelle weniger Paletten), der relativ schlechten Erreichbarkeit der Kunden, den nicht seltenen Retouren, den heterogenen Sendungen, den hohen Bedarfschwankungen und den wechselnden Anlieferungspunkten (vgl. Klaus, 2000). Diesen Herausforderungen kann auf zwei Ebenen begegnet werden: Einerseits durch die Wahl einer geeigneten Strategie für die Kommissionierung und Belieferung, sowie andererseits durch den Einsatz eines leistungsfähigen Planungsverfahrens für das mit der Kommissionierung und Belieferung verbundene Planungsproblem.

Hinsichtlich der Gestaltung der Kommissionierung und Belieferung unterscheiden Boyer et al. (2004) folgende Strategien:

- Kommissionierung der auszuliefernden Waren entweder in den Filialen des Unternehmens oder aber in einem Zentrallager.
- Belieferung der Endverbraucher direkt, auch bezeichnet als „Home-Delivery“, oder aber indirekt über Abholstationen (vgl. z. B. Punakivi und Saranen, 2001; Punakivi et al., 2001).

Speziell für den Online-Lebensmittelhandel, der im vorliegenden Beitrag im Vordergrund steht, wird eine zentrale Kommissionierung in Kombination mit einer direkten Belieferung empfohlen. Demnach werden die Online-Bestellungen in einem Zentrallager kommissioniert und von dort aus werden die zusammengestellten Sendungen direkt an die Kunden ausgeliefert. Diese Strategie ermöglicht eine besonders schnelle Belieferung der Kunden, was im Falle verderblicher Waren auch geboten ist. In Kauf zu nehmen sind allerdings hohe Lagerinvestitionen sowie die relativ hohen Kosten der Direktlieferung.

Das mit der Kommissionierung und (Direkt-)Belieferung verbundene Planungsproblem umfasst zwei Teilprobleme: Einerseits die Bildung von Kundengruppen, die je mit einem Transportmittel zu bedienen sind (Gruppierungsproblem), und andererseits die Bestimmung der Reihenfolge der Bedienung der Kunden für jede Kundengruppe (Reihenfolgeproblem). Beide Probleme bilden zusammen ein Tourenplanungsproblem. Praktische Tourenplanungsprobleme stellen äußerst komplexe Optimierungsprobleme dar, die sich einer exakten Lösung hartnäckig widersetzen. Insofern hängt die Erschließung von Verbesserungspotenzialen innerhalb der Last-Mile-Supply-Chain in Bezug auf Transportkosten und Termineinhaltung unmittelbar von der Qualität des Planungsverfahrens ab. Als Verfahren kommen in der Regel nur Metaheuristiken in Frage, bei geringeren Problemgrößen ggf. auch exakte Verfahren wie etwa das Branch-and-Bound-Verfahren (vgl. z. B. Zimmermann, 2008, S. 252) oder die vollständige Enumeration.

Die skizzierte Problemstellung der Gestaltung der Last-Mile-Supply-Chain wird im vorliegenden Beitrag für ein der Praxis entnommenes Beispiel konkretisiert und einer Lösung zugeführt. Das Beispiel betrifft ein Lebensmittel-Einzelhandelsunternehmen, das in einer Großstadt für seine Kunden zwar einen Lieferservice für Online-Bestellungen anbietet, jedoch das mit der Kommissionierung und der Belieferung verbundene Planungsproblem noch manuell löst. Um vorhandene Verbesserungspotenziale aufzuzeigen und ihre Ausschöpfung zu ermöglichen, wurde ein metaheuristischer Planungsansatz entwickelt und einer Evaluation unterzogen. Der Rest des Beitrags behandelt dieses Vorgehen. Im folgenden Abschnitt 2 wird die Ausgangssituation, d. h.

die bislang praktizierte Abwicklung des Lieferservices, beschrieben. In Abschnitt 3 wird der entwickelte Planungsansatz vorgestellt, der das formulierte Planungsproblem und das auch formal notierte Lösungsverfahren umfasst. Abschnitt 4 befasst sich mit der Verfahrensevaluation und Abschnitt 5 enthält einige Schlussbetrachtungen.

2 Ausgangssituation

Ein in einer Großstadt ansässiges Lebensmittel-Einzelhandelsunternehmen betreibt die Einrichtung eines neuen Vertriebsweges und bietet seinen Kunden die Möglichkeit der Bestellung per Internet sowie einen Lieferservice an. Dieser innovative Bestell- und Lieferservice, der den klassischen Vertrieb über Filialen ergänzt, richtet sich z. B. an berufstätige, ältere oder behinderte Personen. Aufgegebene Bestellungen werden gebündelt und gegen eine geringe Gebühr zu einer vereinbarten Zeit am Arbeitsplatz oder an der Wohnung ausgeliefert. Dieser Lieferservice wird in Kombination mit einem Einsammeldienst angeboten. Kunden wird also die Möglichkeit eingeräumt, Waren, Transportbehälter, Leergut usw. zurückzugeben. Das Liefern und Einsammeln wird durch beauftragte Frachtführer gegen eine pauschale Vergütung pro eingesetztem Transportmittel bzw. Fahrzeug besorgt.

Für das Handelsunternehmen stellt sich das Problem, den Bestell- und Lieferservice in effizienter Weise und in Abstimmung mit den Kundenbedürfnissen zu organisieren. Der Service wurde zunächst wie folgt eingerichtet (hier bezeichnet als Ausgangssituation):

Den Kunden werden drei mehrstündige Bedienungszeitfenster für die Belieferung und das Einsammeln angeboten: am Morgen, über Mittag und am Abend. Eingehende Bestellungen der Kunden werden von einem Disponenten gesammelt, nach Zeitfenstern sortiert und zu Gruppen von Kundenbestellungen, im Folgenden bezeichnet als Kundengruppen, gebündelt. Die Bildung der Kundengruppen für jedes der drei Zeitfenster erfolgt manuell unter Anwendung des Nearest-Neighbor-Kriteriums auf der Basis der aus den Kundenadressen entnommenen Postleitzahlen. Jede der so gebildeten Kundengruppen

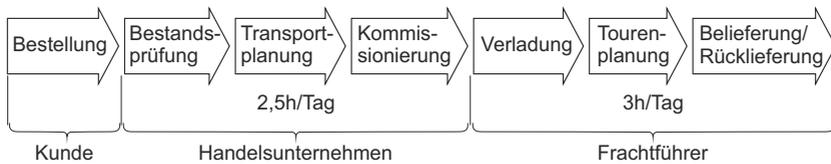


Abbildung 2: Lieferkette der Ausgangssituation

repräsentiert eine ungeordnete Menge von Kunden, die durch ein Auslieferungsfahrzeug zu bedienen sind, und wird daher auch als Tour bezeichnet (vgl. Domschke und Scholl, 2010). Die tägliche Planung der Touren für etwa 300 Kunden pro Zeitfenster erfordert einen Zeitaufwand von rund 2,5 Stunden.

Die von dem Disponenten gebildeten Kundengruppen bzw. Touren werden nun als Lieferaufträge an Frachtführer übergeben. Diese übernehmen die Lieferung der bestellten Waren von dem Zentrallager des Handelsunternehmens an die Kunden sowie das Einsammeln von Retouren, Leergut usw. einschließlich des Rücktransports zu dem Zentrallager. Die Frachtführer erhalten pro Tour eine Pauschalvergütung. Um ihre Transportkosten möglichst gering zu halten, planen die Frachtführer kostengünstige Touren. Dies geschieht manuell mit einem Zeitaufwand von 10 bis 15 Minuten pro Tour.

Die Lieferkette der Ausgangssituation wird in Abbildung 2 veranschaulicht. Sie weist Schwachstellen bzw. ungenutzte Verbesserungspotenziale auf:

- Die manuelle Transportplanung und die manuelle Tourenplanung sind mit einem Zeitaufwand von etwa 5,5 Stunden pro Tag ineffizient und führen zu Ergebnissen mit mäßiger Qualität.
- Die beiden Teilprobleme der Bildung von Kundengruppen (Gruppierungsproblem) und der Bestimmung der Bedienungsreihenfolge (Reihenfolgeproblem) werden sequentiell gelöst. Die damit verbundene Einschränkung des Suchraums hat Einbußen hinsichtlich der Lösungsqualität zur Folge.

3 Planungsansatz

3.1 Planungsproblem

Zwecks Behebung der genannten Schwachstellen wird auf einen zentralen Planungsansatz zurückgegriffen, der ausschließlich in der Verantwortung des Handelsunternehmens liegt und die bisherige von zwei Instanzen nacheinander ausgeführten manuellen Planungsschritte (Transportplanung und Tourenplanung) in einer computergestützten Simultanplanung bzw. Tourenplanung zusammenfasst. Die von dem Handelsunternehmen automatisiert geplanten Touren werden folglich künftig zusammen mit den auszuführenden Aufträgen an die Frachtführer übergeben. Der Übergang zu einer automatisierten und zentralisierten Simultanplanung eröffnet mehrfache Kostensenkungspotenziale. Sie ergeben sich aus dem Wegfall manueller Planungstätigkeiten bei dem Handelsunternehmen und den Frachtführern sowie aus der automatisierten Berechnung kostengünstiger Touren für die Warendistribution. Von der Senkung der reinen Distributionskosten kann auch das Handelsunternehmen profitieren, indem es mit den Frachtführern eine reduzierte Pauschalvergütung pro Belieferungs-/Einsammeltour vereinbart. Die Lieferkette für den Fall der zentralen Simultanplanung durch das Handelsunternehmen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Das Planungsproblem, das sich im Fall der zentralen Simultanplanung dem Handelsunternehmen stellt, ist eine spezielle Ausprägung des Tourenplanungsproblems mit Zeitfensterrestriktionen, auch bezeichnet als Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) (vgl. zum VRPTW z. B. Gambardella et al. (1999), Homberger (2000) und

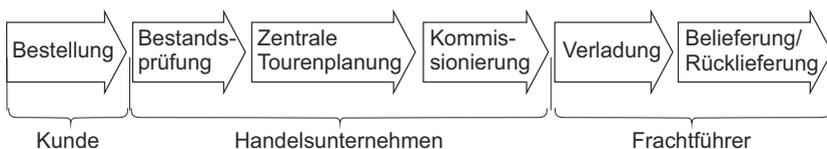


Abbildung 3: Lieferkette bei zentraler Simultanplanung