

Kostenoptimierung für Transporte auf dem europäischen Festland am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers

Jens Peter Kempkes, Achim Koberstein, Abdullah Sag

DSOR Lab, Universität Paderborn, Warburgerstr. 100, 33098 Paderborn
{kempkes,koberstein}@dsor.de

Abstract

Im Rahmen der operativen Logistik werden kostengünstige Bestellmengen für Standardverbrauchsgüter festgelegt. Dieser Artikel stellt eine Methode zur Bestimmung dieser Mengen unter Verwendung eines Logistiknetzwerkes mit mehreren Zulieferwegen und Rabattstufen.

Die vorliegende Ausarbeitung zeigt auf, dass zwei gängige Verfahren, das Verfahren von Groff und das EOQ-Modell, zur Berechnung der Bestelllosgröße auf Grund der Netzwerkeigenschaften nicht verwendet werden können und weist eine Alternative aus. Als Lösung des Problems wird ein gemischt-ganzzahliges Modell, basierend auf dem kapazitierten Losgrößenproblem (CLSP)¹, vorgestellt. Dieses Modell wurde prototypisch als Software implementiert.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Durch Änderung der Verträge der Versorgungslogistik eines Automobilkonzerns sind neue Rahmenbedingungen für die Disposition geschaffen worden. Diese erfordern eine Neubewertung und gegebenenfalls Parametrisierung des Zuliefernetzwerkes. Im Rahmen der Bewertung werden für alle Bauteile die optimalen Bestelllosgrößen ermittelt. Diese Losgrößen

¹ Vgl. Reith-Ahlemeier, G. 2002, Kap. 2.4

hängen von den Eigenschaften des Netzwerkes ab. Neben den externen Lieferkosten werden sie auch von den internen Kosten beeinflusst.

Folgende Netzwerkeigenschaften bedingen das Ergebnis der Bestellmengenbestimmung:

- Das Vertragssystem sieht drei externe Versorgungswege für den Transport der Waren vor: die Komplettlieferteilung, konsolidierte Lieferung und den Paketversand. Die Bedingungen zur Verwendung eines Weges sind vertraglich festgelegt (vgl. Kapitel 2).
- Für jeden Versorgungsweg gelten individuelle Kapazitätsbeschränkungen, die Mindest- und/oder Maximalbestellmengen darstellen können.
- Jeder Transportweg hat eigene Rabattstufen. Es handelt sich um Stufenrabatte.
- Es kann maximal einmal pro Planungsperiode bestellt werden.
- Das vorliegende Problem hat damit die folgenden charakteristischen Eigenschaften:
 - Einstufige Produktfertigung: Es werden keine Bauteile verwendet, zu deren Fertigung das Netzwerk bereits Komponenten zur Verfügung stellen muss.
 - Die Liefergeschwindigkeit jedes Produktes ist endlich.
 - Die Nachfragen sind zeitlich veränderlich.
 - Kapazitätsbeschränkungen im Lieferbereich sind vorhanden.
 - Über die Zeit existieren unveränderliche fixe Bestellkosten.
 - Die variablen Transportkosten sind vertraglich festgelegt und damit über die Zeit unveränderlich.
 - Nichtbefriedigung eines Bedarfs ist nicht erlaubt.
 - Die Menge der Planungsperioden T ist endlich und bekannt.

Verglichen mit den Eigenschaften des *CLSP* (*Capacitated Lot-Sizing Problem*)² liegt eine Übereinstimmung vor. Werden die Produktionskosten auf Transportkosten übertragen, so kann dieses Modell für die weiteren Betrachtungen verwendet werden. Dass das *CLSP* für den Mehrproduktfall ausgelegt ist, kann vernachlässigt werden.

1.2 Aufbau des Artikels

Der Artikel führt über die Beschreibung des Problems über die Abgrenzung eines Lösungsansatzes zur praktischen Umsetzung.

Im folgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen des Versorgungsnetzwerkes beschrieben. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um

² Vgl. Domschke, Scholl, Voß (1993)

die zur Auswahl stehenden Lieferwege mit den zugehörigen Rabattstrukturen und Restriktionen. Dies beinhaltet auch einen Überblick über die Kombinationsmöglichkeiten dieser Wege.

Kapitel 4 stellt ein gemischt-ganzzahliges Modell vor, das zur Lösung des Problems geeignet ist.

Abschließend wird in Kapitel 5 die praktische Umsetzung beschrieben. Im Rahmen dieser Untersuchung ist basierend auf dem mathematischen Modell ein Softwareprodukt entstanden, das geeignete Berechnungen vornimmt.

2 Logistikkonzept

Im Folgenden wird auf die vorliegende Struktur der Versorgungslogistik eines OEMs eingegangen. Abbildung 1 stellt drei mögliche Wege der Anlieferung dar. Die Komplettlieferrung ist als Lieferung vollständig beladener Fahrzeuge, in diesem Fall LKW, zu verstehen. Die Gebietsspedition ist ein Verfahren, das Ladungen aus einem Gebiet zunächst an einem Punkt innerhalb des Gebietes konsolidiert. Nach diesem Vorlauf sieht sie im Hauptlauf den Transport in einem Fahrzeug zum Empfänger vor. Als Alternative wird der Versand über Kurier-, Paket- oder Expressdienste (PEK) vorgestellt.

2.1 Gebietsspedition

Das Konzept der Gebietsspedition sieht vor, dass Waren von verschiedenen Lieferanten aus demselben Gebiet in einem Konsolidierungspunkt gesammelt und anschließend durch einen weiteren Transport zum Werk befördert werden. Dabei ist jedem Gebiet ein eigener Konsolidierungspunkt zugeordnet. Das System ist daher mit einem „Hub & Spoke“-System vergleichbar. Für die Realisierung dieses Konzeptes werden grenzübergreifende Gebiete auf Basis des Transportmengengerüsts definiert. Jedem Gebiet ist genau ein Spediteur zugeordnet.

Die Aufteilung der Gebiete orientiert sich an geographischen und logistischen Merkmalen. Abbildung 2 zeigt die Aufteilung innerhalb Zentraleuropas, Abbildung 3 für die restlichen Gebiete Europas.

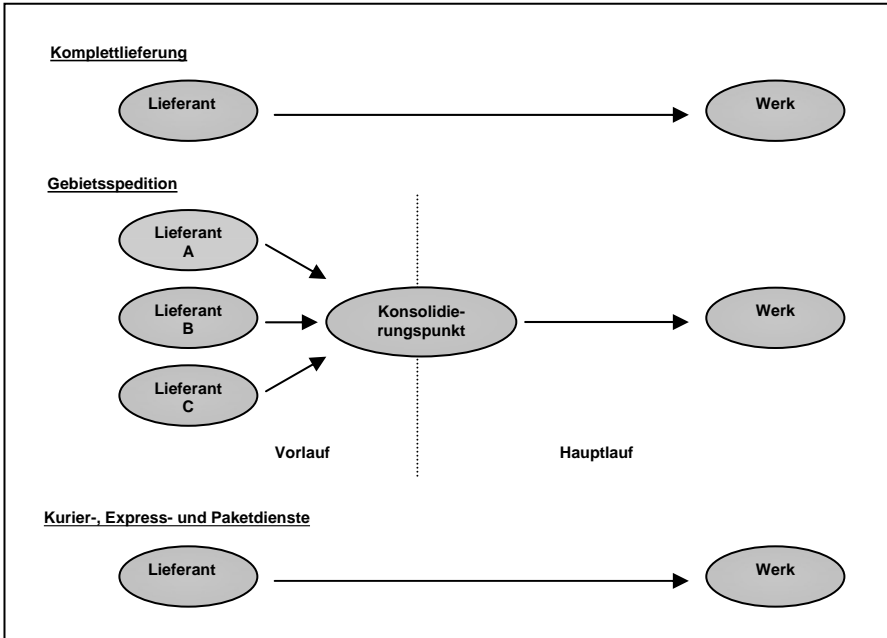


Abb. 1: Mögliche Transportwege

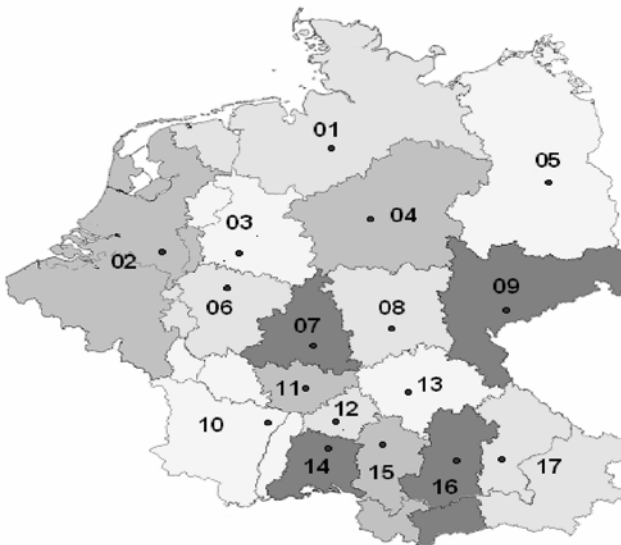


Abb. 2: Gebietsaufteilung Nahbereich mit Konsolidierungspunkten

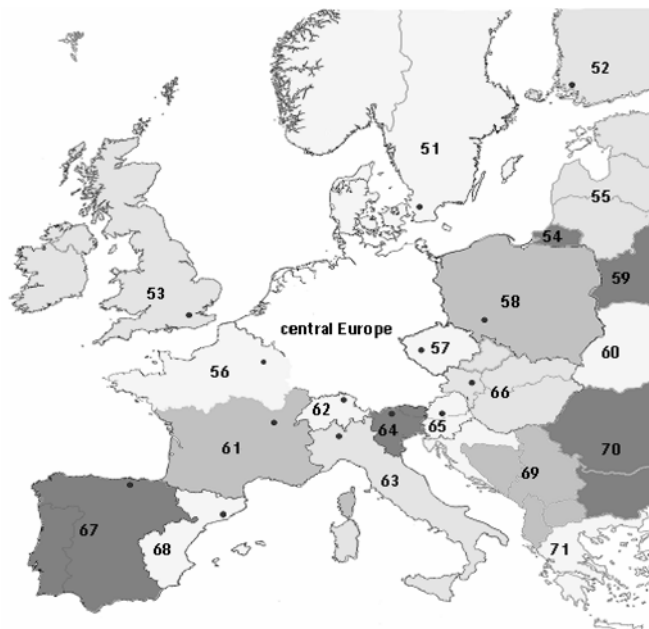


Abb. 3: Gebietsaufteilung Europa

Der Transportweg eines über die Gebietsspedition gelieferten Teils unterteilt sich in Vorlauf und Hauptlauf. Der Vorlauf entspricht dem Weg vom Lieferanten zum Konsolidierungspunkt, der Hauptlauf dem vom Konsolidierungspunkt zum Werk. Die Tarifkonditionen beider Abschnitte unterscheiden sich strukturell: Während die Vorlaufkosten rabattsystembedingt mit den Gewichtsstufen variieren, wird im Hauptlauf mit einem konstanten Betrag pro angebrochene 100kg gerechnet. Im Hauptlauf wird zusätzlich ein Sockelbetrag für jeden LKW berechnet. Die Kosten für die Gebietsspedition ergeben sich durch Summierung beider Teilläufe.

2.1.1 Vorlauf

Die Vorlaufkosten richten sich zum einen nach der Entfernung des Lieferanten zum Konsolidierungspunkt und zum anderen nach dem Bruttogewicht der Losgröße. Beide Einflussfaktoren sind jeweils in ca. zehn Gruppen geordnet. Dies entspricht Rabatten für längere Entfernungen und größere Massen. Zusätzlich kann jede Kombination mit einer Marge zur Erhöhung oder Reduzierung verrechnet sein.

2.1.2 Hauptlauf

Die Hauptlaufkosten ergeben sich für den Transport vom Konsolidierungspunkt bis zum Werksgelände. Die Anzahl der Kombinationen ist überschaubar, so dass für alle Transportströme – von jedem Konsolidierungspunkt zu jedem Werk und Lager – die Kosten pro begonnene 100kg und LKW festgelegt sind. Außerdem fällt pro LKW eine fixe, margenfremde Pauschale (Sockelbetrag) an. Dieser Sockelbetrag wird anteilig nach Volumen bzw. Gewicht der Ware auf das jeweilige Los verrechnet. Ferner ist durch einen Maximalpreis pro LKW eine obere Schranke für die Kosten gegeben. Diese Schranke enthält bereits eine Marge.

2.2 Komplettlieferung

Komplettlieferungen sind für den Fall vorgesehen, dass ein Fahrzeug mit den Produkten eines Herstellers voll beladen werden kann. Die Kapazitätsgrenzen des LKW sind durch sein Gewicht- und Volumenlimit festgelegt. Die Kosten des Transports jeder Relation vom Hersteller zum Werk sind bestimmt.

2.3 Kurier-, Express- und Paketdienstleister (KEP-Dienste)

Ein weiterer Zulieferweg ist der Transport via KEP-Dienst³. Diese haben sich auf die Zustellung von Kleingut (bis ca. 32kg) und Stückgut (bis ca. 2000kg) spezialisiert. Das Konzept sowie die Konditionen werden mit der Formalisierung im Abschnitt 3.3 aufgegriffen.

Werden KEP-Dienste zum Transport von Kleingut eingesetzt, so müssen diese Güter bestimmte Voraussetzungen erfüllen: Die längste Kante (vgl. Abb. 4) darf maximal nur 270cm betragen. Zusätzlich muss ein Bandmaß von 330cm eingehalten werden. Das Bandmaß stellt die Gesamtlänge aus Gurtumfang (1) und der längsten Kante (2) dar. Das Entgelt für diese Transportart ist pauschal pro Paket.

³ Vgl. Vahrenkamp, R. (2005), S.137

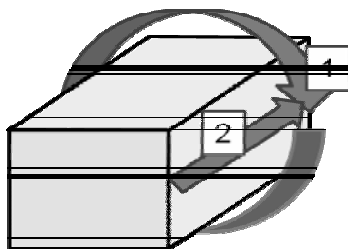


Abb. 4: UPS-Bandmaß

Aufgrund der günstigen Konditionen ist festgelegt, dass alle Bestellungen, solange sie die genannten Konditionen erfüllen, über UPS versandt werden. Lose, die eine Aufsplittung auf mehrere Pakete erforderlich machen, werden nicht mit UPS transportiert. Dies vermeidet höhere Abfertigungskosten beim Zulieferer. Es gelten Pauschalpreise pro Paket.

2.4 Kombinationen

Im Allgemeinen ist die Auftrennung einer Lieferung auf mehrere Transportwege nicht gewünscht. So wird verhindert, dass für die Spediteure unverhältnismäßige Kosten bei der Abfertigung der Fracht entstehen. Ausnahmen sind nur in Verbindung mit Komplettlieferungen erlaubt. Ist ein Fahrzeug bereits voll ausgelastet, darf für das verbleibende Gut der Transportweg frei gewählt werden. Tabelle 1 zeigt erlaubte Kombinationen:

Tabelle 1: Zugelassene Transportwegkombinationen

	Komplett- lieferung	Gebiets- spedition	UPS
Komplettlieferung	Ja	Ja	Ja
Gebietsspedition	Ja	Ja	
UPS	Ja		Ja

3 Losgrößenverfahren

Dieses Kapitel beschreibt die Problematik der Anwendung zwei gängiger Losgrößen-Verfahren, des EOQ-Modells und des Verfahrens von Groff, auf das vorliegende Problem. Diese Losgrößenverfahren sind geeignet, um auf Basis fixer und variabler Kosten eine günstige Losgröße zu berechnen.

3.1 Verfahren nach Groff

Das Verfahren nach Groff⁴ erhöht sukzessiv die Losgröße, indem Periodenbedarfe nacheinander zu der Losgröße aufsummiert werden. Das Verfahren terminiert sobald die Optimalitätsbedingung erfüllt ist: Die Reduzierung der fixen Kosten pro Stück ist kleiner als die marginale Zunahme der variablen Stückkosten. Die fixen Kosten bestehen aus den Kosten pro Anlieferung, den Kosten pro Auftrag und den Transportkosten. Die variablen Kosten werden beispielhaft durch die Lagerhaltungskosten beschrieben. Die Verrechnung und die Aufbereitung der Kosten erfolgt dabei wie im vorherigen Modell.

Das Konzept des Verfahrens von Groff betrachtet Periodenbedarfe als nicht-aufsplittbare Einheit. Daher kann unmittelbar eine Transportart zugewiesen werden. Dies ist nicht mehr uneingeschränkt möglich, falls das Aufsplitten möglich ist. Zur Berücksichtigung der Rabattstufen ist dies jedoch eine notwendige Voraussetzung.

3.2 Economic-Order-Quantity (EOQ)

Das EOQ-Verfahren zur Berechnung einer Losgröße basiert auf sehr restriktiven Annahmen. Das Modell ist für eine kontinuierliche Bestandsüberwachung formuliert. Für weitere Beschreibungen und Erweiterungen sei auf (Neumann, K., 1996), (Minner, S., 2000) und (Schneider, H., 1978 und 1981) verwiesen.

Dieses Verfahren betrachtet die Nachfrage unter statistischen Aspekten als Durchschnittswert. Da der erwünschte Vorteil der Logistikkostenverringerung jedoch durch die Ausnutzung der Übergangseffekte also an den Randbereichen der Tarife liegt, ist dieses Verfahren ungeeignet. Die folgende Grafik vermittelt einen Eindruck, wie die Transportkosten approximiert werden. g_1 und g_2 stellen jeweils die Obergrenze einer Tarifgruppe dar:

⁴ Vgl. Groff, G.K., (1979)

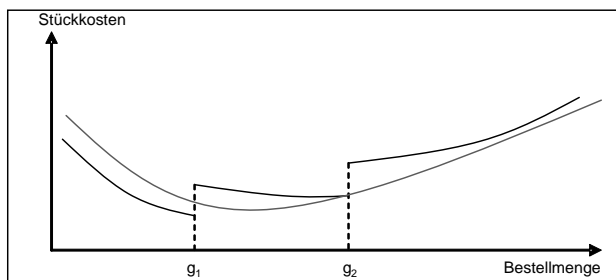


Abb. 5: Approximation der Stufentarife

Wie in Abb. 5 dargestellt, ist es zwar möglich eine Kostenfunktion zu approximieren, jedoch kann sie die Stufenrabatte nicht vollständig erfassen. Weiterhin müsste der Graph für die einzelnen Güter individuell angepasst werden. Dies gestaltet sich für die große Anzahl betrachteter Bauteile aufwändig.

3.3 Exakte Optimierung

In diesem Abschnitt wird ein gemischt-ganzzahliges Modell vorgestellt, das zur Lösung des dargestellten Problems geeignet ist. Dieses Modell berücksichtigt alle Transportwege und kombiniert sie mit den vorhandenen Rabattstufen. Es ist an die Notation des $CLSP_{\text{Beschaff}}$ ⁵ angelehnt und zeichnet sich durch eine hohe Erweiterbarkeit aus.

Ursprünglich wurde das $CLSP$ zur Berechnung von Losgrößen im Produktionswesen verwendet. Die Tarifstufen des vorliegenden Anwendungsfalls werden entsprechend den Rabattstufen des $CLSP_{\text{Beschaff}}$ modelliert.

Als Eingangsgrößen für das Modell dienen die entscheidungstheoretisch aufbereiteten Kostensätze und die prognostizierte Nachfrage über den Planungszeitraum T .

Das folgende Modell wurde mittels MPL ⁶ und *Excel* (zur Bereitstellung der Ausgangsdaten) umgesetzt und ist für verbrauchsgesteuerte Lieferketten beschrieben. Eine für programmgesteuerte Lieferketten angepasste Variante kann leicht abgeleitet werden. Folgende Symbole werden verwendet:

⁵ Vgl. Reith-Ahlemeier, G. 2002, Kap. 2.4

⁶ MPL vertrieben von Maximal Software (www.maximalsoftware.com)

Mengen

T :	Anzahl der Planungsperioden
t :	betrachtet Periode, $t = 1, \dots, T$
R^{GV} ,	Menge der Rabattstufen bei Gebietsspedition, jeweils Vorlauf (R^{GV}) und Hauptlauf (R^{GH}), Komplettliefereung (R^K) und UPS (R^U)
R^{GH} , R^K ,	
R^U :	

Parameter

c_h :	Lagerhaltungskostensatz (Kapitalkosten)
$c_t^{Auftrag}$:	Auftragsabhängige Kosten (z.B. Dispositionskosten) in
$c_t^{Anlieferung}$:	Anlieferungsabhängige Kosten in
c_t^{LKW} :	Kosten pro LKW (z.B. Wareneingangs-, Lagerarbeiten) in
c_t^{UPS} :	UPS-Paket abhängige Kosten
c_r^K :	Fixe Kosten der Komplettliefereung in Tarifstufe r , $r \in R^K$
$c_{t,r}^{GV}$:	Variable Kosten, die in Periode t und Tarifstufe r im Vorlauf der Gebietsspedition anfallen, $t \in T, r \in R^{GV}$
c_{Socket}^{GH} :	Anteilige LKW-Sockelbetrag des Hauptlaufs Gebietsspedition
$c_{t,r}^{GH}$:	Variable Kosten des Hauptlaufs der Gebietsspedition der Periode t , Rabattstufe r , $t \in T, r \in R^{GH}$
c_{max}^{GH} :	Kostenobergrenze pro LKW im Hauptlauf
$c_{r,t}^U$:	Variable Kosten für den Transport über UPS in Tarifstufe r und Periode t , $t \in T, r \in R^U$
D_t :	Erwartete Nachfrage in Periode t , $t \in T$
$V_{max}^{G,K}$	Maximale LKW-Lademenge in Stück
V_{max}^U	Maximale Lademenge eines UPS-Pakets in Stück
g_r^{GV} :	Obergrenze einer Tarifstufe r im Vorlauf der Gebietsspedition, $g_r^{GV} < V_{max}^{G,K}, \forall r \in R^{GV}$
g_r^{GH} :	Obergrenze einer Tarifstufe r im Hauptlauf der Gebietsspedition, $g_r^{GH} < V_{max}^{G,K}, \forall r \in R^{GH}$

- g_r^K : Obergrenze einer Tarifstufe r der Komplettliefere-
 rung, $g_r^K = n \cdot V_{\max}^{G,K}, \forall r \in R^K, n \in N$
- g_r^U : Obergrenze einer Rabattstufe r des UPS-
 Transports, $g_r^U \leq V_{\max}^U, \forall r \in R^U$
- g_r^U : Obergrenze einer Rabattstufe r des UPS-
 Transports, $g_r^U \leq V_{\max}^U, \forall r \in R^U$

Entscheidungsvariablen

- l_t : Lagerbestand in Periode $t, t \in T$
- δ_t : Globale Bestellentscheidung in Periode $t, t \in T$
- $\delta_{r,t}^K$: Bestellung per Komplettliefereung in Tarifstufe r
 und Periode $t, t \in T, r \in R^K$
- $\delta_{r,t}^{GV}$: Bestellung per Vorlauf der Gebietsspedition in
 Tarifstufe r und Periode $t, t \in T, r \in R^{GV}$
- $\delta_{r,t}^{GH}$: Bestellung per Hauptlauf der Gebietsspedition in
 Tarifstufe r und Periode $t, t \in T, r \in R^{GH}$
- $\delta_{r,t}^U$: Bestellung per UPS in Tarifstufe r und Periode $t,$
 $t \in T, r \in R^U$
- $q_{r,t}^K$: Bestellmenge per Komplettliefereung in Tarifstufe
 r und Periode $t, t \in T, r \in R^K$
- $q_{r,t}^{GV}$: Bestellmenge per Gebietsspedition (Vorlauf) in
 Tarifstufe r und Periode $t, t \in T, r \in R^{GV}$
- $q_{r,t}^{GH}$: Bestellmenge per Gebietsspedition (Hauptlauf) in
 Tarifstufe r und Periode $t, t \in T, r \in R^{GH}$
- $q_{r,t}^U$: Bestellmenge per UPS in Tarifstufe r und Periode
 $t, t \in T, r \in R^U$

Zielfunktion

$$\min C = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{t \in T} (c_h \cdot l_t + c_t^{Auftrag} \cdot \delta_t + c_t^{Anlieferung}) + \\ & \sum_{t \in T} \left[\sum_{r \in R^{GV}} [c_{r,t}^{GV} \cdot \delta_{r,t}^{GV}] \right. \\ & \left. + \sum_{r \in R^{GH}} \left[\delta_{r,t}^{GH} \cdot \min \left\{ c_{\max}^{GH}; c_{r,t}^{GH} + \frac{q_{r,t}^{GH}}{V_{\max}^{G,K}} \cdot c_{\text{Sockel}}^{GH} \right\} \right] \right] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^K} c_{r,t}^K \cdot \delta_{r,t}^K + \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^U} c_{r,t}^U \cdot \delta_{r,t}^U \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung von

$$c_t^{Anlieferung} = \left[\begin{aligned} & \sum_{r \in R^G} (\delta_{r,t}^{GH} \cdot c_t^{LKW}) + \\ & \sum_{r \in R^K} \left(\delta_{r,t}^K \cdot \frac{q_{r,t}^K}{V_{\max}^{G,K}} \cdot c_t^{LKW} \right) + \\ & \sum_{r \in R^U} \left(\delta_{r,t}^U \cdot \frac{q_{r,t}^U}{V_{\max}^U} \cdot c_t^{UPS} \right) \end{aligned} \right] \quad \forall t \in T \quad (2)$$

Die Zielfunktion (9) bestimmt die Gesamtkosten des Liefersystems unter Berücksichtigung der Entscheidungsvariablen. Es werden die Kosten der Kapitalbindung im Lager, der Auftragsauslösung und der Entgegennahme der Transporteinheiten summiert. Desweiteren finden die Transportkosten, bestehen aus Gebietsspeditionsvorlauf, -hauptlauf, begrenzt durch einen Maximalkostensatz pro Fahrzeug, sowie die Komplettlieferungs- und Kurierdienstkosten Einfluss. Gleichung (2) bestimmt die gemeinsamen Kosten der Anlieferungen pro Periode für alle ankommenden Transportein-

heiten wie LKW und Pakete. $\frac{q_{r,t}^K}{V_{\max}^{G,K}}$ stellt die Anzahl der per Komplettlieferung anfahrenden Fahrzeuge da. $q_{r,t}^K$ ist ein ganzzahliges Vielfaches von $V_{\max}^{G,K}$. Dies gilt analog für die Bestellung via UPS. Über

die Gebietsspedition darf nicht mehr als ein Fahrzeug pro Periode anliefern.

Diese Nebenbedingungen bilden die realen Beschränkungen des Problems ab:

Lagerrestriktionen

$$l_t = l_{t-1} + \sum_{r \in R^{GV}} q_{r,t}^{GV} + \sum_{r \in R^K} q_{r,t}^K + \sum_{r \in R^U} q_{r,t}^U - D_t \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$l_T = 0 \quad (4)$$

Die Lagerbilanzgleichung (3) garantiert einen gültigen Lagerbestand, (4) gibt vor, dass der Bestand zum Ende der betrachteten Zeitspanne vollständig geräumt ist. Sie kann ggf. entfernt oder durch $l_T = l_1$ ersetzt werden.

Restriktionen der Gebietsspedition

$$q_{r,t}^{GH} \leq g_{r,t}^{GH} \cdot \delta_{r,t}^{GH} \quad \forall t \in T, r \in R^{GH} \quad (5)$$

$$q_{r,t}^{GH} \geq (g_{r-1,t}^{GH} + 1) \cdot \delta_{r,t}^{GH} \quad \forall t \in T, r \in R^{GH} \quad (6)$$

$$q_{r,t}^{GV} \leq g_{r,t}^{GV} \cdot \delta_{r,t}^{GV} \quad \forall t \in T, r \in R^{GV} \quad (7)$$

$$q_{r,t}^{GV} \geq (g_{r-1,t}^{GV} + 1) \cdot \delta_{r,t}^{GV} \quad \forall t \in T, r \in R^{GV} \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R^{GV}} q_{r,t}^{GV} = \sum_{r \in R^{GH}} q_{r,t}^{GH} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

Restriktionen der Komplettlieferung

$$q_{r,t}^K = g_r^K \cdot \delta_{r,t}^K \quad \forall t \in T, r \in R^K \quad (10)$$

Restriktionen des KEP- Dienstes

$$q_{r,t}^U \leq g_r^U \cdot \delta_t^U \quad \forall t \in T, \forall r \in R^U \quad (11)$$

$$q_{r,t}^U \geq (g_{r-1,t}^U + 1) \cdot \delta_{r,t}^U \quad \forall t \in T, r \in R^U \quad (12)$$

Die Nebenbedingungen (5)-(9) beschreiben die Rabattstruktur der Gebietspedition für Vor- und Hauptlauf. Die mathematische Trennung der Tarifstufen erlaubt es, unterschiedliche Fahrzeugtypen auf diesen beiden Abschnitten einzusetzen. Jedoch muss über beide Abschnitte die gleiche Anzahl Einheiten transportiert werden (9). Mittels (10) ist sichergestellt, dass die Tarifstufen der Komplettlieferungen eingehalten werden. Die Komplettlieferung ist auf vollständig beladene Fahrzeuge zu beschränken (es gilt $g_r^K = n \cdot V_{\max}^{G,K}, \forall r \in R^K, n \in N$ und $g_r^K = g_{r-1}^K + V_{\max}^{G,K}, \forall r \in R^K$). Beim Versand mit UPS ist darauf zu achten, dass die Obergrenze der höchsten Tarifstufe in R^U der maximal transportierbaren Menge entspricht. In dem vorliegenden Fall wird nur eine Tarifstufe verwendet, da maximal ein Paket versendet werden darf (es gilt $g_r^U = V_{\max}^U$ für $\forall r \in R^U$).

Restriktionen der Transportkombinationen

$$\sum_{r \in R^{GH}} \delta_{r,t}^{GH} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{r \in R^{GV}} \delta_{r,t}^{GV} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{r \in R^K} \delta_{r,t}^K \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{r \in R^{GV}} \delta_{r,t}^{GV} + \sum_{r \in R^U} \delta_{r,t}^U \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$2 \cdot \delta_t \geq \sum_{r \in R^K} \delta_{r,t}^K + \sum_{r \in R^{GV}} \delta_{r,t}^{GV} + \sum_{r \in R^U} \delta_{r,t}^U \quad \forall t \in T \quad (17)$$

Nichtnegativität- und Integralitätsbedingung

$$\delta_{r,t}^K \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, r \in R^K \quad (18)$$

$$\delta_{r,t}^{GV} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, r \in R^{GV} \quad (19)$$

$$\delta_{r,t}^{GH} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, r \in R^{GH} \quad (20)$$

$$\delta_{r,t}^U \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, r \in R^U \quad (21)$$

$$\delta_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$q_{r,t}^K \geq 0 \quad \forall t \in T, r \in R^K \quad (23)$$

$$q_{r,t}^{GV} \geq 0 \quad \forall t \in T, r \in R^{GV} \quad (24)$$

$$q_{r,t}^{GH} \geq 0 \quad \forall t \in T, r \in R^{GH} \quad (25)$$

$$q_{r,t}^U \geq 0 \quad \forall t \in T, r \in R^U \quad (26)$$

$$l_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (27)$$

Die Restriktionen (13)-(16) begrenzen die Kombinationsmöglichkeiten der Transportmodi. Die Gleichung (17) bestimmt, ob über einen der Transportwege während der Periode t bestellt wird. Der Hauptlauf der Gebietspedition muss hier nicht berücksichtigt werden, da bereits durch (9) sichergestellt ist, dass er nur in Verbindung mit dem Vorlauf verwendet wird.

Gleichungen (18-22) und (23-27) stellen die notwendigen Nichtnegativitäts- und Integralitätsbedingungen dar.

4 Praktische Umsetzung

Aus gegebenen Gründen wurde für die Weiterverfolgung der gemischt-ganzzahlige Ansatz gewählt.

Mit *MPL* als Modellierungssprache und *CPLEX* als Solver wurde bewährte Software gewählt. Als Datenbasis dient *Ms Access*. *Excel* wird zum Vorbereiten des Datenmaterials verwendet. In diesem Schritt wird z.B. die Anzahl der Elemente, die in die verschiedenen Transportmittel geladen werden können, berechnet. Ein User-Frontend wird zur einfachen Handhabung der Optimierung verwendet.

Die prototypisch realisierten Werkzeuge dienen bereits zur:

- Bewertung und zum Vergleich verschiedener Lieferketten,
- Berechnung verschiedener Szenarien für die Lieferketten,
- Ermittlung der optimalen Losgrößen für die jeweilige Lieferkette.

Die folgende Darstellung (Abb. 6) zeigt das Vorgehen der Berechnung: Der Prototyp stellt die in Abbildung 7 dargestellte Oberfläche zur Verfügung. Vom Benutzer wird die Wahl der Versorgungskette vorgenommen. Alle weiteren Informationen bezüglich der Sachnummer und Elementen der Versorgungskette werden aus einer Stammdatenbank entnommen.

Die restlichen Schritte werden automatisch durchgeführt, sie laufen im Hintergrund ab und sind für den Benutzer nicht sichtbar. Das Resultat der Berechnungen wird in einem interaktiven Excel-Report ausgegeben.

1. Auswahl aller zulässigen Lieferketten einer Sachnummer i
2. Ermittlung aller entscheidungsrelevanten Kosten
3. Ermittlung aller spezifischen Restriktionen und Transporttarife
4. Separate Optimierung jeder Lieferkette
5. Bewertung der Lieferketten mit der optimalen Losgröße q^* aus (4.)
6. Kostenvergleich der Lieferketten
→ Optimale Losgröße q^* und zugeordnete Lieferkette für Sachnummer i

Abb. 6: Ablauf der Optimierung einer Sachnummer

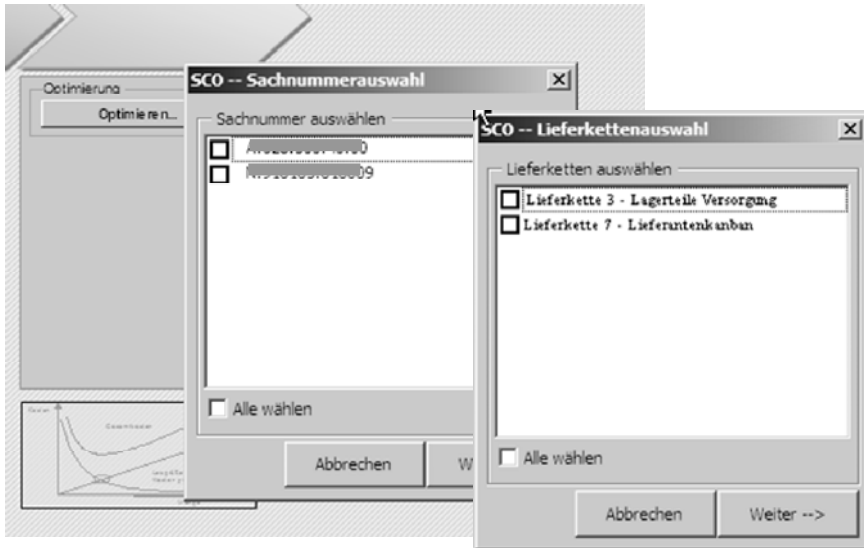


Abb. 7: Oberfläche des SCO, Benutzerangaben vor dem Start der Optimierung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das erstellte Softwareprodukt wird bereits in mehreren Projekten zur Verringerung der Logistikkosten eingesetzt. Es wird dabei zur Berechnung der IST-Kosten und den Kosten von abgeleiteten Szenarien verwendet. Die jetzigen Erfahrungen zeigen, dass Einsparungen von durchschnittlich 20% bei Artikeln unterschiedlicher Menge und Andienart erwartet werden dürfen.

Geplant ist, das zugrunde liegende Modell um einige Freiheitsgrade zu erweitern. Diese beinhalten den Mehrproduktfall, weitere Lieferketten und Landungsträger.

Anzumerken ist, dass es bei Auswertungen über eine große Zahl Perioden (>50) zu Rechenzeiten von mehr als 30 Sekunden kommen kann. Diese sind bei Tests in Fällen mit langen Bedarfsreihen und insbesondere für solche mit einem hohen Anteil von Nullbedarfen aufgetreten. Eine quantitative Auswertung der Performance findet zurzeit statt.

Bei der Weiterentwicklung ist dieser Problematik besondere Aufmerksamkeit zu schenken. In (Reith-Ahlemeier, G. 2002) sind Algorithmen be-

schrieben, die mit einem Mehrproduktfall umgehen können. Ein ebenfalls sehr interessanter Ansatz wird in (Rossi, H. 2003) diskutiert.

Literatur

- Alicke, K., (2005) Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management, Berlin, Springer 2005
- Domschke, Scholl, Voß (1993) Produktionsplanung - Ablauforganisatorische Aspekte, Berlin ,Springer 1993
- Graves, S.C.; Rinnooy Kan, A.H.G.; Zipkin, P.H., (Hrsg.), (1993) Logistics of Production and inventory, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 4, Amsterdam, North Holland 1993
- Groff, G.K., (1979) A lot sizing rule for time-phased component demand, Production and Inventory Management, Vol.20, No.1, 1979, S.47-53
- Minner, S., (2000) Strategic Safety Stocks in Supply Chains, Berlin, Springer 2000
- Neumann, K., (1996) Produktions- und Operationsmanagement, Berlin, Springer 1996
- Reith-Ahlemeier, G., (2002) Ressourcenorientierte Bestellmengenplanung und Lieferantenauswahl: Modell und Algorithmen für Supply Chain Management und E-Commerce, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2002
- Rossi, H., (2003) Ein heuristisches Dekompositionsverfahren für mehrstufige Losgrößenprobleme, Dissertation 2003, vorgelegt an der FU Berlin
- Schneider, H., (1978) Methods for Determining the Re-Order Point of an (s,S) Ordering Policy when a Service Level is Specified, J. Opl. Res. Soc., Vol. 12, 1978, S.1181-1193
- Schneider, H., (1981) Effect of service-levels on order-points or order-levels in inventory models, Int. J. Prod. Res., Vol. 19, No.6, 1981, S.615-631
- Vahrenkamp, R. (1998) Produktionsmanagement, 3.Auflage, München, Oldenbourg Verlag 1998
- Vahrenkamp, R. (2005) Logistik, 5.Auflage, München, Oldenbourg Verlag 2005