Simulation in Production
and Logistics 2015
Markus Rabe & Uwe Clausen (eds.)
Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2015

Beitrag zur Abfallreduktion mittels mathematischer Optimierung und simulationsbasierter Validierung

A Contribution to the Waste Reduction by Mathematical Optimisation and Simulation-based Validation

Larissa Janssen, Thorsten Claus TU Dresden / IHI Zittau, Dresden (Germany), larissa.janssen@mailbox.tu-dresden.de, thorsten.claus@tu-dresden.de

Frank Herrmann, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg (Germany), frank.herrmann@oth-regensburg.de

Abstract: Perishable goods with a shelf life of 3-5 days require frequent inventory controls in the food retail trade. Maintaining a high service level for these products in stores is difficult due to demand uncertainty. A high service level often leads to a lot of stock in stores. In case it is not sold, it is waste. As an approach towards waste volume reduction, the economic order quantity (EOQ) problem is optimised in combination with the delivery frequency problem on the basis of the microperiods, i.e. morning, midday, afternoon, and evening. The presented model is designed for multiple stores with one regional warehouse. The simulation model measures the waste volume in stores. Experiments show that the combined optimisation of both problems leads to a reduction of total costs and waste volume.

1 Einführung und Abgrenzung der Arbeit

Das *operative Beschaffungsmanagement* ist eine wichtige Aufgabe in der betrieblichen Praxis. Es beschäftigt sich mit den Fragen: wann soll eine Bestellung aufgegeben und wieviel soll bestellt werden. Bei verderblichen Gütern kommt die Berücksichtigung der Haltbarkeit der Ware hinzu, die das Problem deutlich erschwert (Nahmias 2011). Eine aktuelle Literaturübersicht mit Publikationen zu verderblichen Gütern wurde von den Autoren dokumentiert (Janssen et al. 2015). Laut EHI Retail Institute spielt das Beschaffungsmanagement bei der Verringerung von Lebensmittelabfällen eine wichtige Rolle, insbesondere für Frischware mit kurzer Haltbarkeit (Kranert et al. 2012).

Es ist anzunehmen, dass bei der Nachfrage-Unsicherheit eine häufige Lieferung von Frischware in geringen Mengen zu weniger Abfällen führt als eine seltene Lieferung in großen Mengen. Es ist jedoch nicht klar, ob sich eine häufige Belieferung mit Frischware für Filialen finanziell lohnen würde und wie stark Abfälle reduziert werden. Das soll in dieser Arbeit unter Berücksichtigung der entstehenden Abfallentsorgungskosten in Filialen untersucht werden. Ein Beispiel ist das Angebot von vorgepackten frischen Fertigsalaten im Lebensmittelhandel. Die Idee ist, nicht auf Tagesbasis (*Makroperiode*), sondern in Tageszeiten wie Vormittag, Mittag, Nachmittag und Abend (*Mikroperioden*) zu optimieren, um die Liefermengen möglichst gering zu halten. Unter dem *Transportproblem* wird in dem vorliegenden Modell nur die Lieferhäufigkeit und Liefermengen durch ein Regionallager verstanden.

Arbeiten, die sich gleichzeitig auf das Beschaffungs- und Transportproblem für verderbliche Güter konzentrieren, unterscheiden sich in den Schwerpunkten und in den zugrunde liegenden Lagerhaltungsstrategien. Die meisten der Publikationen konzentrieren sich auf den Bereich Produktion oder das Bestellmengenproblem in Distributionszentren. Dagegen wird in dieser Arbeit das Bestellmengenproblem für mehrere Filialen betrachtet. Oft geht es um die Optimierung von Losgrößen und Transporten zwischen eigenen und/oder gemieteten Lagern sowie direkten Auslieferungen an Kunden (vgl. Arianezhad et al. 2013; Bhunia et al. 2014; Kopanos et al. 2012 u.a.). In Bhunia et al. (2015) wird u.a. auf die Inflationsbedingungen und in Gumasta et al. (2012) auf unterschiedliche Kundentypen eingegangen. Cai et al. (2013) berücksichtigen dieses Problem für firmenexterne Logistikdienstleister. Das Beschaffungsproblem und der Warenverderb während des Transports werden untersucht in: Ghare und Schrader (1963); Molana et al. (2012); Leśniewski und Bartoszewicz (2014). In Sazvar et al. (2014) wird eine Balance zwischen finanziellen und ökologischen Kriterien der beiden Probleme gesucht und je nach Menge von Treibhausgasen eine Entscheidung getroffen. In der Arbeit Amorim et al. (2013) wird, wie in dieser Arbeit, in Mikroperioden geplant, jedoch widmet sich diese Arbeit einem anderen Transportproblem (Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern).

Die Optimierung der beiden Probleme in kleineren Zeiteinheiten als ein Tag stellt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu anderen kombinierten Modellen dar, weil dort bei einer Periode in der Regel von einem Tag ausgegangen wird. Die Optimierung in Mikroperioden erfordert wegen der Umrechnung der Haltbarkeit die Entwicklung eines neuen Optimierungsmodells. In anderen Bereichen (wie zum Beispiel der Automobilindustrie) besteht das Problem des Warenverderbs nicht oder in der Produktion (Gebhard 2009) wird oft ein Teilproblem in Mikroperioden und das gesamte Problem in Makroperioden optimiert. In dieser Arbeit wird dagegen das kombinierte Problem ausschließlich in Mikroperioden betrachtet.

2 Optimierungsmodell

In diesem Abschnitt wird das Optimierungsmodell schrittweise entwickelt. Die Formulierung des bekannten Bestellmengenproblems von Wagner und Whitin (1958) ist als binäres lineares Optimierungsmodell in Häselbarth und Scholl (2003) angegeben.

2.1 Ausgangsmodell von Häselbarth und Scholl

Das Optimierungsmodell von Häselbarth und Scholl (2003) erweitert das Wagner-Whitin-Modell um dynamische Einstandspreise, Lagerkapazitäts- und Haltbarkeitsbeschränkungen von Frischwaren sowie Verlust aus Qualitätsgründen (Schwund, Mortalität, Schimmel und anderes). Alle Parameter sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: *Parameter und Entscheidungsvariablen*

c_t: variable Einkaufskosten	LK_t: Lagerhaltungskosten in Periode t
BK_t: fixe Bestellkosten	q_t: Bestellmenge in Periode t
d_t: Nachfrage inklusive Abfallmenge	τ: eine Folgeperiode nach t
G_t: maximale Lagerkapazität	X_{th}: Lagerbestand in Periode t von Alter h
ε_h, ε_j: Faktor der verbliebenen Ware	z_t: binärer Bestellflag in Periode t

$$Min\ C = \sum_{t=1}^{T} BK_t \cdot z_t + LK_t \cdot X_t + c_t \cdot q_t \tag{1}$$

$$q_t \leq \widetilde{D}_t^{\overline{T}(t)} \cdot z_t \quad t = 1,...,T \tag{2}$$

$$X_{tH} = 0 \quad t = H + 1,...,T \tag{3}$$

$$X_{t,h=0} = q_t - d_{t,h=0} \quad t = 1,...,T \tag{4}$$

$$X_{th} = \varepsilon_h \cdot X_{t-1,h-1} - d_{th}, \quad t = 2,...,T \quad h = 1,...,\overline{H}(t) \tag{5}$$

$$\sum_{h=0}^{\overline{H}(t)} d_{th} = d_t \quad t = 1,...,T \tag{6}$$

$$X_t = \sum_{h=0}^{\overline{H}(t)} X_{th} \quad t = 1,...,T \tag{7}$$

$$X_t \leq G \quad t = 1,...,T-1 \tag{8}$$

$$\begin{array}{l} X_{th} \geq 0, d_{th} \geq 0, X_t \geq 0,\ q_t \geq 0, X_T = 0 \quad t = 1,...,T \quad h = 0,...,\overline{H}(t) \\ z_t \in \{0,1\} \end{array} \tag{9}$$

Indizes:

h: Alter	*H:* max. Alter	$h = 0..H$
t: Periode	*T:* Planungshorizont	$t = 1..T$

Gleichung 2 ergibt sich aus der Beachtung der spätesten Verbrauchsperiode $\overline{T}(t) = min\{T,t+H\}$. $\tilde{D}_t^{\tau}$ ist die kumulierte modifizierte Bedarfsmenge, die wie folgt berechnet wird: $\tilde{D}_t^{\tau} = d_t + \Sigma_{k=t+1}^{\tau}\ \tilde{d}_t^{k}$. Die modifizierte Bedarfsmenge $\tilde{d}_t^{k \epsilon \tau}$ ist anstatt d_t^{τ}

Tabelle 2: *Parameter und Entscheidungsvariablen*

BK_{ft}: fixe Bestellkosten	ω^{fix}_{ft}: fixe Transportkosten in Filiale f
c_{ft}: variable Bestellkosten	ω^{var}_{ft}: variable Transportkosten in Fil.
d_{ft}: Nachfragemenge in t der Filiale f	ωRL^{fix}_{t}: fixe Transportkosten des RL
d^{FIFO}_{fth}: FIFO-Nachfrage vom Alter h	ωRL^{var}_{t}: variable Transportkosten des RL
d^{LIFO}_{fth}: LIFO-Nachfrage vom Alter h	q_{ft}: Bestellmenge in Periode t der Filiale f
$\tilde{d}^{k \in \tau}_{ft}$: modifizierte Nachfrage in Periode k der Filiale f	Q^{max}_{t}: max. Kapazität eines LKW
$\tilde{D}^{\tau}_{t}$: kumulierte Nachfrage von t bis τ	τ: eine der Folgeperioden von t
ε_{fh}, $\varepsilon_{f,j \in h}$: Verbleibfaktor der Ware	*Vormittag:* erste Periode t an einem Tag
φ^{LIFO}: Nachfrageanteil, LIFO-Prinzip	x_{fh}: Restlagerbestand nach Alter h
G_f: maximale Lagerkapazität	X_{fth}: Lagerbestand in t vom Alter h
LK_{ft}: Lagerhaltungskosten in t der f	X^{free}_{fth}: abfallfreier Lagerbestand in t
LT: Wiederbeschaffungszeit	y_{ft}: Lieferung in Periode t, h=0
	z_{ft}: binärer Bestellflag in Periode t

mit zu bestellen. Die Bedarfsmenge $\tilde{d}^{k}_{t}$ enthält zusätzlich die Abfallmenge aus Qualitätsgründen: $\tilde{d}^{k}_{t}=d_\tau / \Pi^{\tau-t}_{j=1}\, \varepsilon_j$. Die Folgeperiode τ liegt im Intervall: $\tau \in [t+1,...,\overline{T}(t)]$. Die maximale Lagerfähigkeit wird durch Gleichung 3 berücksichtigt, da die Frischware mit Lageralter H nicht weiter gelagert werden darf. Die Lagerbilanzgleichung wird durch die Gleichungen 4-6 repräsentiert. Mit einer Bestellung trifft die Frischware ein, die gemäß Gleichung 4 mit dem Alter $h=0$ eingelagert wird, sofern sie nicht zur Nachfragebefriedigung genommen wird. Der bereits gelagerte Lagerbestand $X_{t-1,h-1}$ wird in Gleichung 5 von dem Abfall aus Qualitätsgründen bereinigt. Es verbleibt nur ein Anteil ε_h der Frischware auf dem Lager (der abfallfreie Lagerbestand). Die maximal mögliche Haltbarkeit der Ware in Periode t beträgt: $\overline{H}(t)=min\{H,t-1\}$. Durch Gleichung 6 wird garantiert, dass die Nachfrage in jeder Periode aus dem Lagerbestand vom Alter h vollständig gedeckt wird. Der Bestand in t ergibt sich gemäß Gleichung 7 als Gesamtmenge aller in t lagernden Frischwaren verschiedenen Alters. Die beschränkte Lagerkapazität wird durch Gleichung 8 abgebildet. Die Variablen für Lager- und Verbrauchsmengen werden in Gleichung 9 auf nichtnegative Werte beschränkt. Gleichung $X_t=0$ bewirkt die Leerung des Lagers am Ende des Horizonts T. z_t nimmt nur Werte 0 oder 1 an.

2.2 Optimierungsmodell ohne Transportkosten

Das entwickelte Modell erweitert das Bestellmengenproblem von Häselbarth und Scholl um Mikroperioden, Last-In-First-Out (LIFO)- und First-In-First-Out (FIFO)-Entnahmeart sowie Wiederbeschaffungszeit>0. Alle Parameter sind in Tabelle 2 angegeben. Vorausschauend wird für den Planungshorizont entschieden, in welchen Mikroperioden t und wieviel bestellt wird. Falls es zu Fehlmengen in der rollierenden Planung kommt, wird der Fehlbestand nicht aufgebaut und er gilt als verloren. Die Lieferung y_{ft} und der Restlagerbestand x_{fh} werden jedoch in dem Optimierungsmodell berücksichtigt. Der Sicherheitsbestand (Herrmann 2011) wird in der rollierenden Planung ermittelt und zu der Nachfrage d_{ft} aufaddiert.

Geltungsbereich für *Indizes* in allen Gleichungen, falls nicht anders angegeben ist:

f: Filiale	*F*: Filialenanzahl	$f = 1..F$
h: Alter	*H*: max. Alter	$h = 0..H$
t: Periode	*T*: Planungshorizont	$t = 1..T$

Die Zielfunktion (Gl. 10) und alle Gleichungen des Ausgangsmodells von Häselbarth und Scholl (2003) werden unter anderem um einen Filialen-Index *f* erweitert. Das Optimierungsmodell sieht zum Schluss wie folgt aus:

$$Min\ C = \sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T} BK_{ft} \cdot z_{ft} + LK_{ft} \cdot X_{ft} + c_{ft} \cdot q_{ft} \tag{10}$$

$$X_{ft,h=0}^{free} = 0 \quad t \in Vormittag \tag{11}$$

$$X_{ft,h>0}^{free} = \varepsilon_{fh} \cdot X_{f,t-1,h-1} \quad t \in Vormittag \tag{12}$$

$$X_{fth}^{free} = \varepsilon_{fh} \cdot X_{f,t-1,h} \quad t \notin Vormittag \tag{13}$$

$$X_{f,t=1,h>0}^{free} = x_{f,h>0} \tag{14}$$

$$X_{ft,h=0} = X_{ft,h=0}^{free} + y_{ft} - d_{ft0}^{LIFO} - d_{ft0}^{FIFO} \forall t = 1,...,LT \tag{15}$$

$$X_{ft,h=0} = X_{ft,h=0}^{free} + q_{f,t-LT} + y_{ft} - d_{ft0}^{LIFO} - d_{ft0}^{FIFO} \forall t = LT+1,...,T \tag{16}$$

$$X_{ft,h>0} = X_{ft,h>0}^{free} - d_{ft,h>0}^{LIFO} - d_{ft,h>0}^{FIFO} \tag{17}$$

$$d_{ft}^{LIFO} = d_{ft} \cdot \varphi^{LIFO} \tag{18}$$

$$d_{ft}^{FIFO} = d_{ft} - d_{ft}^{LIFO} \tag{19}$$

$$X_{fth} = 0 \vee d_{fth}^{LIFO} = d_{ft}^{LIFO} - \sum_{j=0}^{h-1} d_{ftj}^{LIFO} \tag{20}$$

$$X_{ft,H-h} = 0 \vee d_{ft,H-h}^{FIFO} = d_{ft}^{FIFO} - \sum_{j=H-h+1}^{H} d_{ftj}^{FIFO} \tag{21}$$

$$\sum_{h=0}^{H} d_{fth}^{LIFO} = d_{ft}^{LIFO}, \sum_{h=0}^{H} d_{fth}^{FIFO} = d_{ft}^{FIFO} \qquad (22)$$

$$\sum_{h=0}^{H} X_{fth} \leq G_f \qquad (23)$$

$$X_{fth}^{free} \geq 0, d_{fth}^{LIFO} \geq 0, d_{ft}^{FIFO} \geq 0 \qquad (24)$$

Die Bestimmung des Makroperiodenwechsels ist notwendig, um das Alter der Frischware in Mikroperiode t zu ermitteln. Betrachtet man eine Mikroperiode relativ zu einer Makroperiode, so entspricht die relative Mikroperiode den Tageszeiten wie Vormittag, Mittag, Nachmittag und Abend. Der Wechsel einer Makroperiode findet am Vormittag statt und ist durch $t \in Vormittag$ festzustellen. Die relative Mikroperiode eines Tages wird aus dem Modulo bestimmt: $Ergebnis=t \bmod V$, wobei V die Anzahl von Mikroperioden in einer Makroperiode ist. In unserem Fall ist $V=4$. Ein Beispiel der Berechnung ist in Tabelle 3 gezeigt.

Tabelle 3: *Berechnung der relativen Mikroperiode aus t mod V*

Ergebnis	*t* mod *V*	relative Mikroperiode
1=	5 mod 4:	Vormittag
2=	6 mod 4:	Mittag
3=	7 mod 4:	Nachmittag
0=	8 mod 4:	Abend

Aufgrund der Mikroperiodenplanung ist die späteste Verbrauchsperiode aus Gleichung 2 wie folgt zu berechnen: $\overline{T}=min\{T,t+H \cdot V\}$. Das maximale Alter $\overline{H}$ der Frischware in Periode t aus Gleichung 5 gilt nicht mehr, da in dem entwickelten Modell der Restlagerbestand x_{fh} aus der rollierenden Planung berücksichtigt wird und dieser kann verschiedene Alter h der Frischware enthalten.

Der abfallfreie Lagerbestand wird als X_{fth}^{free} bezeichnet. Am Morgen gibt es bei der ganz frischen Ware ($h=0$) keine Abfälle (Gl. 11). Ansonsten ($h>0$) wird am Morgen nach einem Alterswechsel ($h-1$) der abfallfreie Lagerbestand ermittelt (Gl. 12). Am Mittag, Nachmittag und Abend wird X_{fth}^{free} aus der vorigen Mikroperiode $t-1$ des gleichen Alters ermittelt (Gl. 13). Der Restlagerbestand x_{fh} aus dem vergangenen Planungshorizont wird in $t=1$ angerechnet, wobei das Alter $h=0$ beim Restlagerbestand nicht vorhanden ist (Gl. 14).

Die Gleichung $X_T=0$ wird entfernt, da das Angebot der Frischware im Gegensatz zum Ausgangsmodell zeitlich unbegrenzt ist und zum Beispiel der Restlagerbestand aus dem letzten Planungshorizont die Nachfrage theoretisch übersteigen kann. Auf die Entscheidungsvariable X_t wird verzichtet. Die Lagerbilanzgleichungen 4 und 5 werden durch Gleichungen 15-17 ersetzt. Ist die Wiederbeschaffungszeit $LT>0$ und $h=0$, trifft in $t \epsilon [1,..., LT]$ keine Lieferung q_{ft} ein (Gl. 15). In Periode $t \epsilon [LT+1,...,T]$ kann eine Lieferung mit $h=0$ aus der Bestellperiode $t\text{-}LT$ eintreffen (Gl. 16). Ist das Alter $h>0$, so entfällt aus der Lagerbilanz die Bestellung q_{ft} und die Lieferung y_{ft} (Gl. 17).

Die Nachfrage d_{ft} wird nach Entnahmearten in zwei Nachfragen d_{ft}^{LIFO} und d_{ft}^{FIFO} zerlegt (Gl. 18 und Gl. 19). Falls der Lagerbestand X_{fth} mit der Frischware des Alters h geringer oder gleich wie die benötigte Nachfragemenge aus d_{ft}^{LIFO} ist, wird dieser Bestand ganz entnommen (Gl. 20). Falls der Lagerbestand X_{fth} größer ist, wird aus dem Lager so viel entnommen, wie für die Nachfrage d_{ft}^{LIFO} noch fehlt. Das Gleiche gilt auch für die Nachfrage d_{ft}^{FIFO} (Gl. 21). d_{fth}^{LIFO} und d_{fth}^{FIFO} sind jeweils nach Alter h aufgeteilte Nachfragemengen, die je nach verfügbarem Lagerbestand die Nachfrage d_{ft}^{LIFO} und d_{ft}^{FIFO} wiedergeben (Gl. 22). Die Lagerkapazitätsbegrenzung bleibt erhalten (Gl. 23). Weitere Nichtnegativitätsbedingungen sind in Gleichung 24 zusammengefasst.

2.3 Modellerweiterung um Transportkosten

Das Modell aus dem vorigen Abschnitt wird um Transportkosten des Regionallagers (*RL*) und Filialen (*Fil.*) erweitert:

$$\begin{aligned} Min\ C = & \sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}(BK_{ft} \cdot z_{ft} + LK_{ft} \cdot X_{ft} + c_{ft} \cdot q_{ft} \\ & + \omega_{ft}^{fix} \cdot z_{ft} + \omega_{ft}^{\text{var}} \cdot q_{ft}) + \sum_{f=1}^{F}\sum_{t=1}^{T}(q_{ft} / Q_{t}^{\max} \cdot \omega RL_{t}^{fix} + q_{ft} \cdot \omega RL_{t}^{\text{var}}) \end{aligned} \tag{25}$$

Die Transportkosten von Filialen setzen sich aus den fixen ω_{ft}^{fix} und variablen ω_{ft}^{var} Kosten zusammen. Die variablen Kosten sind von Bestellmengen und die fixen Kosten sind von der Lieferanzahl und LKW-Größe abhängig. Die Transportkosten des Regionallagers enthalten fixe ωRL_{t}^{fix} und variable ωRL_{t}^{var} Kosten. Die variablen Kosten beziehen sich auf die Menge der transportierten Frischware. Die Summe der Bestellmengen geteilt durch die Anzahl der maximalen LKW-Kapazität in Periode t ergibt die Anzahl der hierfür benötigten LKWs. Die Anzahl der LKWs wird in realen Zahlen dargestellt. Nach der Optimierung muss die LKW-Anzahl auf die nächstgrößere Zahl aufgerundet werden.

3 Simulationsumgebung

Das entwickelte Optimierungsmodell wird unter einer rollierenden Planung in einer Simulationsumgebung für die unten beschriebene Fallstudie erprobt. Zum Aufbau der Simulationsumgebung wird das Simulationstool Tecnomatix Plant Simulation der Firma Siemens eingesetzt. Die Erzeugung von statischen und dynamischen Parametern (Nachfrage, Anfangslagerbestand, Kostensätze usw.) erfolgt in der Simulationsumgebung. Diese Informationen sind Input-Daten für das Optimierungsmodell und werden über die Schnittstelle an den IBM ILOG Solver übergeben, der für das vorliegende Problem eine optimale Lösung ermittelt. Diese Lösung ist Optimierungs-Output und wird anschließend in der Simulationsumgebung weiterverarbeitet. Der Solver wird mit dem Aufruf der Datei oplide.exe gestartet. Die Pfade zu den Dateien mit dem Optimierungsmodell und den Input-Daten werden als Parameter beim Aufruf der Exe-Datei übergeben. Danach werden diese ausgelesen.

4 Numerisches Beispiel zur Fallstudie Fertigsalate

Es wird eine Fallstudie für vorgepackte Fertigsalate im Lebensmitteleinzelhandel betrachtet. Die Fertigsalate gibt es ganzjährig im Angebot. Es werden drei Optimierungsfälle betrachtet: (a) *getrennte* bzw. (b) *gemeinsame* Optimierung und (c) Optimierung bei einer *täglichen Belieferung*. In den Fällen a und c wird das Modell aus Abschnitt 2.2 und im Fall b aus dem Abschnitt 2.3 verwendet. D.h. in den Fällen a und c sind Transportkosten in dem Optimierungsmodell nicht enthalten. Dagegen werden im Fall b die Transportkosten in dem Modell berücksichtigt. In allen Fällen werden Transportkosten seitens der rollierenden Planung zu den Gesamtkosten hinzugerechnet, sobald eine Lieferung stattgefunden hat. In den Fällen a und b beträgt die Wiederbeschaffungszeit LT=1 Mikroperiode, im Fall c ist $LT=4$, d.h. die Frischware kann im Fall c max. einmal täglich geliefert werden.

Tabelle 4 liefert eine Übersicht von Parametern des RL und der Filialen. Alle Kosten sind in Geldeinheiten (*GE*) pro eine Mengeneinheit (*ME*) angegeben. Die Nachfrage in Filialen ist normalverteilt (Erwartungswert $\mu=E(d)=200$ mit Standardabweichung $\delta=50$). Die maximale Haltbarkeit beträgt mit dem Liefertag 4 Tage ($H=3$).

Tabelle 4: *Parameter*

Kostenparameter in *GE*:		Weitere Parameter:	
Fixe Transp.kosten Fil. ω_{ft}^{fix}:	1000	Nachfrage in Filiale:	μ=200, δ=50
Var. Transp.kosten Fil. ω_{ft}^{var}:	1 je *ME*	LIFO-Anteil φ^{LIFO}:	0,4
Fixe Transp.kosten RL ωRL_t^{fix}:	500/*LKW*	LKW-Kapazität Q_t^{max}:	15000 *ME*
Var. Transp.kosten RL ωRL_t^{var}:	1 je *ME*	Planungshorizont T:	12
Bestellkosten BK_{ft}:	1000	max. Alter H:	3 Tage
Lagerkosten LK_{ft}:	1-3 je *ME*	Filialenanzahl F:	1;2
Abfallentsorgungskosten		Wiederbesch.zeit LT:	1;4
in Filialen:	5 je *ME*	Verbleibsfaktor ε_h der Ware bei $h \in \{0,1,2,3\}$:	{1,1,1,1}

Tabelle 5 zeigt die Simulationsergebnisse ohne und mit der gemeinsamen Optimierung des Beschaffungs- und Transportproblems sowie Ergebnisse bei einer täglichen Belieferung von Filialen. Die Gesamtkosten sind bei einer *gemeinsamen* Optimierung am niedrigsten. Der Anteil der Transportkosten (1.115 GE) an den Gesamtkosten (3.292 GE) beträgt in Filialen mit der *gemeinsamen* Optimierung 34%. Die durchschnittliche Lieferhäufigkeit pro Tag beträgt 1,42 und die durchschnittliche

Bestellmenge steigt gegenüber der getrennten Optimierung. Die Kosten bei der *täglichen Belieferung* sind am höchsten. Dies liegt hauptsächlich an den deutlich gestiegenen Lagerhaltungskosten (wegen der LT=4) und an den Abfallentsorgungskosten. Die hohe Zunahme der Abfallmengen (23%) ist in diesem Fall auf die reduzierte Lieferhäufigkeit zurückzuführen, die dazu beigetragen hat, dass die durchschnittliche Bestellmenge (1075) größer wurde. Die Abfälle entstehen aufgrund der Nachfrage-Unsicherheit, die durch den Sicherheitsbestand in der Simulationsumgebung kompensiert wird. Die *getrennte* Optimierung führt zu Mehrkosten von ca. 10% im Vergleich zum *gemeinsamen* Optimierungsfall.

Tabelle 5: *Durchschnittliche Optimierungsergebnisse*

Mengeneinheit (*ME*) Geldeinheiten (*GE*)	getrennte Optimierung	gemeinsame Optimierung	tägliche Belieferung
Bestellmenge q (*ME*):	322	472	1075
Abfallmenge (bei $h>H$):	0%	0,25%	23%
Lieferanzahl pro Tag:	2,15	1,42	1
Fil. Beschaffung (*GE*):	1.626	1.792	5.739
Fil. Transport (*GE*):	1.520	1.115	655
RL Transport (*GE*):	475	385	398
Gesamtkosten (*GE*):	3.621	3.292	6.792

5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Optimierung von Bestellmengen zusammen mit der Lieferhäufigkeit zur Minimierung von Gesamtkosten im Lebensmitteleinzelhandel führen kann. Bei einer häufigeren Belieferung als einmal pro Tag nehmen in Experimenten die Abfallmengen bei Frischwaren mit einer kurzen Haltbarkeit (3-5 Tage) ab. Außerdem haben die Experimente gezeigt, dass bei dieser Frischwarengruppe die gemeinsame Planung in Mikroperioden insgesamt günstiger ist als in Makroperioden (Tagen), weil dadurch die Lagerhaltungs- und die Abfallentsorgungskosten gesenkt werden können.

In weiteren Untersuchungen werden die Abfallentsorgungskosten und die unsichere Nachfrage (auf Basis von Szenarien) in dem Modell selbst berücksichtigt. Darüber hinaus wird eine Tourenplanung in Mikroperioden entwickelt, um die Gesamtkosten und die Abfallmengen weiter zu senken.

Literatur

Amorim, P.; Belo-Filho, M.; Toledo, F.; Almeder, C.; Almada-Lobo, B.: Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. International Journal of Production Economics 146 (2013) 1, S. 208–218.

Arianezhad, M.; Makuie, A.; Khayatmoghadam, S.: Developing und solving two-echelon inventory system for perishable items in a supply chain: Case study

(Mashhad Behrouz Company). Journal of Industrial Engineering International (2013) 9:39, S. 1-10.

Bhunia, A.; Jaggi, C.K.; Sharma, A.; Sharma, R.: A two-warehouse inventory model for deteriorating items under permissible delay in payment with partial backlogging. Applied Mathematics und Computation (2014) 232, S. 1125–1137.

Bhunia, A.K.; Shaikh, A.A.; Gupta, R.K.: A study on two-warehouse partially backlogged deteriorating inventory models under inflation via particle swarm optimisation. International Journal of Systems Science 46 (2015) 6, S. 1036-1050.

Cai, X.; Chen, J.; Xiao, Y.; Xu, X.; Yu, G.: Fresh-product supply chain management with logistics outsourcing. Omega 41 (2013) 4, S. 752–765.

Gebhard, M.: Produktion und Logistik: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Wiesbaden: Gabler 2009.

Ghare, P.M.; Schrader, G.H.: A model for exponentially decaying inventory system. The Journal of Industrial Engineering 14 (1963) 5, S. 238–243.

Gumasta, K.; Chan, F.T.; Tiwari, M.: An incorporated inventory transport system with two types of customers for multiple perishable goods. International Journal of Production Economics 139 (2012) 2, S. 678–686.

Häselbarth, L.; Scholl, A.: Dynamische Bestellmengenplanung für verderbliche Luxusgüter. Arbeitspapier Friedrich-Schiller-Universität Jena, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, 2003. ISSN 1611-1311.

Herrmann, F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung. Wiesbaden: Springer 2011.

Janssen, L.; Claus, T.; Herrmann, F.: Review of inventory systems with deterioration 2012-2015. Zittau: IHI 2015, http://bit.ly/1fez7UM.

Kopanos, G.M.; Puigjaner, L.; Georgiadis, M.C.: Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries. Omega 40 (2012) 5, S. 634–650.

Kranert, M.; Hafner, G.; Barabosz, J.; Schuller, H.; Leverenz, D.; Kölbig, A.; Schneider, F.; Lebersorger, S.; Scherhaufer, S.: Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Stuttgart: Institut für Siedlungswasserbau; Wassergüte- und Abfallwirtschaft 2012, http://bit.ly/1JHrAu7.

Leśniewski, P.; Bartoszewicz, A.: LQ optimal sliding mode control of periodic review perishable inventories with transportation losses. Advances in Intelligent Systems and Computing 240 (2014), S. 45–55.

Molana, S.M.H.; Davoudpour, H.; Minner, S.: An (r, nQ) inventory model for packaged deteriorating products with compound poisson demand. Journal of the Operational Research Society 63 (2012) 11, S. 1499–1507.

Nahmias, S.: Perishable inventory systems. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer 2011.

Sazvar, Z.; Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J.; Baboli, A.; Akbari Jokar, M. R.: A bi-objective stochastic programming model for a centralized green supply chain with deteriorating products. International Journal of Production Economics 150 (2014), S. 140–154.

Wagner, H.M.; Whitin, T.M.: Dynamic version of the economic lot size model. Management Science 5 (1958) 1, S. 89-96.