

Produktions- und Logistikmanagement

Festschrift für Günther Zäpfel zum 65. Geburtstag

herausgegeben von

Hans Corsten und Hubert Missbauer

mit Beiträgen von

Thorsten Blecker • John A. Buzacott • Marcel Clermont •
Hans Corsten • Harald Dyckhoff • Christoph Falkensammer •
Günter Fandel • Joy M. Field • Matthias Freund • Ludo F. Gelders •
Ralf Gössinger • Manfred Gronalt • Robert W. Grubbström •
Martin Grunow • Hans-Otto Günther • Richard F. Hartl •
Hans H. Hinterhuber • Arnd Huchzermeier • Karl Inderfurth •
Bernd Kaluza • Klaus-Peter Kistner • Herbert Kopfer •
Herbert Kotzab • Marta Anna Krajewska • Efreng Lengauer •
Michael Lorth • Hubert Missbauer • Marco Perona •
Margaretha Preusser • Tatiana Pykhtina • Sylvia Rassenhövel •
Larry P. Ritzmann • Sandra Rothenberger • Thomas Rücker •
M. Hossein Safizadeh • Herfried Schneider • Hans-Horst Schröder •
Tobias Schulz • Thomas Spengler • Stefan Spinler •
Ernst Troßmann • Grit Walther • Gerhard Wäscher •
Michael Wasner • D. Clay Whybark • Jacob Wijngaard •
Horst Wildemann • Gang Yang • Lucio Zavanella • Stephan Zelewski

Verlag Franz Vahlen München

VERLAG
VAHLEN
MÜNCHEN
www.vahlen.de

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. habil. Hans Corsten, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft
der Universität Kaiserslautern

Univ.-Prof. Dr. Hubert Missbauer, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft & Logistik
der Universität Innsbruck

ISBN 978 3 8006 3438 5

© 2007 Verlag Franz Vahlen GmbH, Wilhelmstraße 9, 80801 München

Satz: DTP-Vorlagen der Herausgeber

Druck und Bindung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH

Neustädter Str. 1–4, 99947 Bad Langensalza

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier

(hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff)

Palettenbeladung in der Praxis

- Wie gut sind die realisierten Lösungen? -

Gerhard Wäscher

1	Einleitung	461
2	Grundlagen der Palettenbeladung	462
2.1	Das Manufacturer's Pallet Loading Problem	462
2.2	Das Problem der optimalen Nutzung der Packfläche	463
2.2.1	Problemdefinition	463
2.2.2	Modellierung	464
2.2.3	Lösungsverfahren	467
2.3	Das Problem der optimalen Nutzung der Stauraumhöhe	467
2.3.1	Problemdefinition	467
2.3.2	Modellierung	468
2.3.3	Lösungsverfahren	468
2.4	Restriktionen	468
3	Ursachen ineffizienter Stauraumnutzung	470
3.1	Unzureichende Packflächennutzung	470
3.2	Unzureichende Nutzung der Stauraumhöhe	470
4	Ergebnisse der Untersuchung	471
4.1	Daten	471
4.2	Grundlegende Beobachtungen	471
4.3	Flächennutzung	472
4.4	Höhennutzung	473
4.5	Einsparungspotential	475
5	Zusammenfassung und Ausblick	476
	Anmerkungen	477
	Literatur	477

1 Einleitung

Zur Lösung von Palettenbeladungsproblemen steht mittlerweile eine Reihe von ausgereiften Softwarepaketen zur Verfügung. Mit ihrer Hilfe lassen sich Paletten grundsätzlich beliebiger Abmessungen optimal beladen, und zwar nicht nur hinsichtlich der Paletten(grund)fläche, sondern auch in Bezug auf den darüber aufgespannten Stauraum. Nichtsdestoweniger zeigt sich in der Praxis, dass derartige Hilfsmittel oft nicht oder nicht sinnvoll eingesetzt werden. Eine unzureichende Palettenbeladung hat aber zusätzliche Transport-, Umschlags- und Lagervorgänge zur Folge, wodurch wiederum zusätzliche - und letztlich vermeidbare - Logistikkosten verursacht werden.

In dieser Arbeit soll aufgezeigt werden, wie groß das Rationalisierungspotential noch ist, das durch eine verbesserte Palettenbeladung ausgeschöpft werden kann. Dazu wurden in einem Distributionszentrum zunächst Daten darüber erhoben, wie Paletten in der Praxis tatsächlich beladen werden. Auf der Grundlage dieser Daten wurden dann für unterschiedliche Beladungsstrategien und unter Beachtung der relevanten Restriktionen die jeweiligen optimalen Beladungsmuster berechnet. Die Gegenüberstellung von tatsächlichen und zugehörigen optimalen Beladungsmustern macht deutlich, dass nach wie vor ein erheblicher Spielraum zur Verbesserung der Palettenbeladung besteht, der sich durch unterschiedliche, zum Teil einfach zu realisierende Maßnahmen ausschöpfen ließe.

Die Datenerhebung beschränkte sich auf den Wareneingangsbereich des Distributionszentrums. Die dort ankommenden Paletten waren fast ohne Ausnahme homogen (d.h. mit einem einheitlichen Packstücktyp) beladen. Dementsprechend werden hier auch nur die auf solche Fälle bezogenen Ergebnisse dargestellt. Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In dem sich anschließenden Abschnitt 2 werden zunächst die Grundlagen (optimaler) Palettenbeladung mit einheitlichen Packstücken behandelt; die Problemstellung wird herausgearbeitet und präzisiert, ein Modellierungsansatz vorgestellt und Lösungsmöglichkeiten skizziert. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden in Abschnitt 3 Ansatzpunkte zur verbesserten Stauraumnutzung vorgestellt. Vorgehensweise und Ergebnisse der Untersuchung werden in Abschnitt 4 dargestellt und erläutert. Dabei wird insbesondere aufgezeigt, welche Verbesserungen der Stauraumnutzung mit den zuvor herausgearbeiteten Maßnahmen erreichbar sind. In Abschnitt 5 erfolgt eine kurze Würdigung der Ergebnisse. Dabei wird auch auf weitere Rationalisierungspotentiale im Zusammenhang mit der Palettenbeladung hingewiesen.

2 Grundlagen der Palettenbeladung

2.1 Das Manufacturer's Pallet Loading Problem

Das hier ausschließlich betrachtete Problem der Beladung einer Palette mit einem einheitlichen Packstücktyp bezeichnet man in der Literatur (vgl. Hodgson 1982) üblicherweise als „*Manufacturer's Pallet Loading Problem*“. Formal geht es darum, auf einer (rechteckigen) Palette der Breite B und der Länge L möglichst viele *Packstücke* eines einheitlichen, quaderförmigen Packstücktyps mit den Abmessungen $b \times l \times h$ unterzubringen. Die Packstücke lassen sich grundsätzlich übereinander stapeln, wobei der über der Palette aufgespannte *Stauraum* maximal bis zur Höhe H genutzt werden kann. Gesucht ist eine Vorschrift, die angibt, wie die Packstücke auf der Palette anzuordnen sind. Eine solche Vorschrift sei ein *Beladungs-* bzw. *Stapelplan* genannt. Speziell sprechen wir von einem *optimalen Beladungs-* bzw. *Stapelplan*, wenn der Stauraum bei der betreffenden Anordnung mit einer maximalen Anzahl von Packstücken ausgefüllt wird.

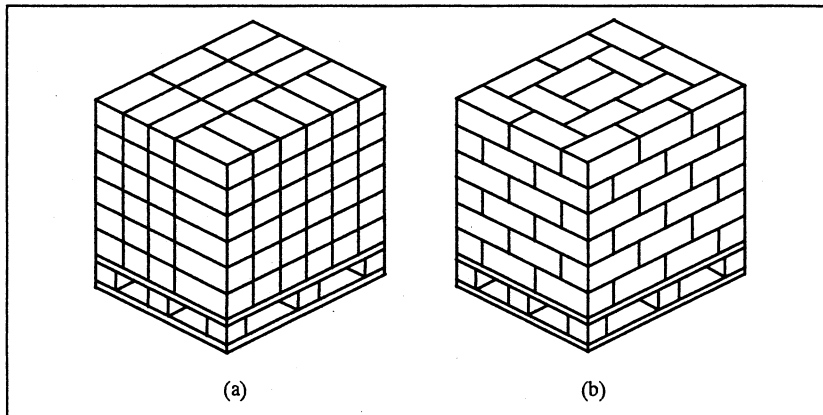


Abbildung 1: Lagenweise Anordnung von Packstücken auf einer Palette
(a) Turmstapelung, (b) Verbundstapelung

Die vertikale Anordnung (Stapelung) der Packstücke auf der Palette erfolgt in der Praxis typischerweise in Lagen, und zwar entweder in Form einer Turm- oder Verbundstapelung (vgl. Abbildung 1). In jeder Lage sind die Packstücke nur nebeneinander, nicht aber übereinander angeordnet. Sie besitzen außerdem jeweils die gleiche vertikale Orientierung, d.h. die Packstücke einer Lage ruhen alle auf der gleichen Packstückfläche. Damit weist eine Lage stets eine einheitliche Höhe auf, sodass ihre Oberfläche wieder als Auflagefläche für eine weitere Lage dienen kann.

Die Ermittlung eines (optimalen) Beladungsplans lässt sich dann in zwei Schritte zerlegen: In einem ersten Schritt bestimmt man für jede der (maximal drei) möglichen vertikalen Packstückorientierungen eine (einlagige) Anordnung (auch *Lagentyp*

genannt) einer möglichst großen Anzahl von Packstücken auf der Palettengrundfläche (*Packfläche*) mit den Abmessungen $B \times L$ (*Problem der optimalen Nutzung der Packfläche*), in einem zweiten Schritt kombiniert man diese Lagentypen dann vertikal miteinander zu einem *Lagenstapel*, und zwar so, dass einerseits die Gesamthöhe der übereinander gestapelten Lagen die Stauraumhöhe H nicht überschreitet und andererseits die Anzahl der Packstücke, die sich insgesamt auf der Palette befinden, möglichst groß wird (*Problem der optimalen Nutzung der Stauraumhöhe*).

2.2 Das Problem der optimalen Nutzung der Packfläche

2.2.1 Problemdefinition

Bei dem Problem der optimalen Packflächennutzung wird grundsätzlich die Orientierung des Packstücks als gegeben unterstellt. Damit ist auch die Packstückfläche festgelegt, mit der das Packstück auf der Palette ruhen soll. Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit seien die Dimensionen, in denen sich die Packstückgrundfläche ausdehnt, mit „Breite“ und „Länge“ bezeichnet, die betreffenden Abmessungen seien b und l .

Die formale Struktur des Problems der optimalen Packflächennutzung lässt sich damit wie folgt charakterisieren: Auf einem „großen“ Rechteck (Packfläche) der Breite B und der Länge L ($B \leq L$) sind möglichst viele „kleine“ Rechtecke (Packstückflächen; zur Vereinfachung des Sprachgebrauchs soll in diesem Zusammenhang ebenfalls von Packstücken gesprochen werden) der Breite b und der Länge l ($b \leq l$) anzuordnen, und zwar so, dass (Bed. 1) alle kleinen Rechtecke innerhalb des großen Rechtecks liegen und (Bed. 2) sich die kleinen Rechtecke nicht (auch nicht teilweise) überdecken. Gesucht ist die Anzahl der kleinen Rechtecke, die unter Beachtung dieser Bedingungen maximal auf dem großen Rechteck untergebracht werden können, sowie eine Vorschrift, die angibt, wie die kleinen Rechtecke zu positionieren sind. Dieses Problem bezeichnet man auch als *homogenes, zweidimensionales Packproblem* (H2DPP).

Jede Positionierungsvorschrift, die über die Lage der Packstücke auf der Packfläche Auskunft gibt und den Bedingungen (Bed. 1) und (Bed. 2) genügt, repräsentiert eine (zulässige) Lösung des Problems. Sie wird im Folgenden auch als (zulässiges) *Packmuster* bezeichnet. Ist die Anzahl der darin angeordneten Packstücke maximal, so heiße das Packmuster *optimal*. Unterstellt man sinnvollerweise $b \leq B$ und $l \leq L$, dann ist die Existenz sowohl einer zulässigen als auch einer optimalen Lösung gesichert.

Die folgende Darstellung beschränkt sich auf Packmuster, bei denen sämtliche Packstücke so angeordnet sind, dass ihre Kanten parallel zu den Packflächenkanten verlaufen. Derartige Packmuster bezeichnet man als *orthogonal*. Sofern ein Packstück mit der Seite ihrer größeren Ausdehnung parallel zur längeren Seite der Packfläche platziert wird, sei die Anordnung *längsorientiert* genannt. Wird die Seite der

geringeren Ausdehnung parallel zur längeren Seite der Packfläche ausgelegt, liege eine *querorientierte* Anordnung vor.

Zwar kann es vorkommen, dass bei gewissen Ausprägungen des H2DPP nicht-orthogonale Packmuster eine bessere Nutzung der Packfläche erlauben (für ein Beispiel vgl. Isermann 1987, S. 239). Nicht-orthogonale Packmuster werden trotzdem nicht weiter berücksichtigt, zum einen, weil reale Problemausprägungen, bei denen das vorkommen kann, selten sind, zum anderen, weil nicht-orthogonale Packmuster für die Praxis der Palettenbeladung kaum Bedeutung besitzen. Sie sind vergleichsweise schlecht zu packen und beinhalten ein erhöhtes Risiko zur Beschädigung der Packstücke beim Transport und beim Umschlag.

2.2.2 Modellierung

Es sei zunächst angemerkt, dass es - bei einer Beschränkung auf orthogonale Packmuster - zur vollständigen Beschreibung der Lage eines Packstücks auf der Packfläche ausreicht, die Lage einer Ecke des Packstücks sowie dessen Längs- oder Queranordnung anzugeben. Im Folgenden wird in diesem Zusammenhang stets auf den Punkt (i, j) Bezug genommen, der von der linken unteren Ecke der Packfläche eingenommen wird. Dieser Punkt sei durch seine Breitenkoordinate i und seine Längenkoordinate $j(i, j)$ charakterisiert, wobei der Koordinatenursprung $(0, 0)$ in der linken unteren Ecke der Packfläche liege. Wir sagen auch, ein Packstück sei im Punkt (i, j) (längsorientiert oder querorientiert) angeordnet. Aus dieser Information lassen sich die Koordinaten der Punkte, die von den übrigen Ecken der Packfläche belegt werden, unmittelbar ableiten.

Zur Bestimmung eines optimalen (orthogonalen) Packmusters für ein H2DPP (Packmusteroptimierung) kann man sich auf die Betrachtung der sogenannten *Basisanordnungen* (vgl. Dowland 1984; Isermann 1998) beschränken. Bei einer solchen Basisanordnung ist zunächst ein Packstück im Koordinatenursprung $(0, 0)$ angeordnet. Alle übrigen Packstücke befinden sich in solchen Positionen, aus denen sich kein Packstück weiter nach links oder weiter nach unten verschieben lässt. Die Punkte (i, j) , die bei Zugrundelegung derartiger Basisanordnungen überhaupt für eine Anordnung der Packstücke in Betracht kommen, seien als *Anordnungspunkte* bezeichnet. Für ein H2DPP der Ausprägung (B, L, b, l) sind die Menge K_B der Breitenkoordinaten und die Menge K_L der Längenkoordinaten der Anordnungspunkte durch alle innerhalb der Breite B bzw. Länge L der Packfläche zulässigen Summen von ganzzahligen Vielfachen der Packstückbreite b und der Packstücklänge l gegeben, d.h.

$$K_B = \{k_B \mid k_B = p \cdot b + q \cdot l; k_B \leq B - b; p, q \in N_0\}$$

bzw.

$$K_L = \{k_L \mid k_L = m \cdot b + n \cdot l; k_L \leq L - b; m, n \in N_0\}$$

(N_0 ist die Menge der natürlichen Zahlen einschließlich 0). Daraus bestimmt sich die Menge K der Anordnungspunkte als

$$K = \{(k_B, k_L) \mid (k_B, k_L) \in K_B \times K_L, (k_B \leq B - l) \wedge (k_L \leq L - l)\}$$

Zur Erstellung eines Modells des H2DPP ordnet man nun jedem Anordnungspunkt (i, j) (maximal) zwei Binärvariablen $x(i, j)$ und $y(i, j)$ zu, die zum Ausdruck bringen sollen, ob in dem betreffenden Punkt ein Packstück längsorientiert oder querorientiert angeordnet werden soll. Insbesondere gelte

$$x(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{wenn auf dem Anordnungspunkt } (i, j) \text{ ein Packstück} \\ & \text{längsorientiert angeordnet wird,} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

für alle $(i, j) \in K$ mit $j \leq L - 1$

und

$$y(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{wenn auf dem Anordnungspunkt } (i, j) \text{ ein Packstück} \\ & \text{querorientiert angeordnet wird,} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

für alle $(i, j) \in K$ mit $i \leq B - 1$

Da in jedem Anordnungspunkt (i, j) höchstens ein Packstück - unabhängig von dessen Orientierung - angeordnet werden kann, muss offensichtlich dafür Rechnung getragen werden, dass

$$x(i, j) + y(i, j) \leq 1 \quad \text{für alle } (i, j) \in K \quad (1)$$

erfüllt ist. Außerdem ist zu gewährleisten, dass die durch das in (i, j) angeordnete Packstück „überdeckten“ Anordnungspunkte nicht zur Anordnung weiterer Packstücke gewählt werden. Wird das Packstück in (i, j) längsorientiert angeordnet, so ist die zugehörige Menge $\bar{K}_X(i, j)$ der unzulässigen Anordnungspunkte durch

$$\bar{K}_X(i, j) = \{(k_B, k_L) \mid (k_B, k_L) \in K_B \times K_L, i \leq k_B < i + b, j \leq k_L < j + l\}$$

festgelegt. Bei einer querorientierten Anordnung ist die Menge $\bar{K}_Y(i, j)$ der unzulässigen Anordnungspunkte entsprechend:

$$\bar{K}_Y(i, j) = \{(k_B, k_L) \mid (k_B, k_L) \in K_B \times K_L, i \leq k_B < i + l, j \leq k_L < j + b\}$$

Damit lässt sich für das H2DPP das in Tafel 1 dargestellte binäre Optimierungssystem formulieren (vgl. z.B. Isermann 1998, S. 254 ff.; Naujoks 1995, S. 124 ff.). In diesem System (2)-(6) steht M für eine hinreichend große, positive (ganze) Zahl ($M \geq |K|$). Wird in einer Restriktion von (3) der Wert der Variablen $x(i, j)$ auf eins gesetzt, also auf dem Anordnungspunkt (i, j) ein Packstück längsorientiert angeordnet, kann diese Restriktion nur noch erfüllt sein, wenn sämtliche anderen Variablen

$x(r,s)$ und $y(r,s)$, $(r,s) \in \overline{K_X}(i,j)$ sowie $y(i,j)$ jeweils den Wert null annehmen. Restriktionen des Typs (3) sorgen also dafür, dass bei einer längsorientierten Packstückanordnung in (i,j) keine der dadurch überdeckten, unzulässigen Anordnungspunkte $(r,s) \in \overline{K_X}(i,j)$ mehr für eine weitere Anordnung gewählt werden kann. Durch die Addition der Variablen $y(i,j)$ wird außerdem eine querorientierte Anordnung eines Packstücks in (i,j) ausgeschlossen. Damit ist automatisch gewährleistet, dass auch die zugehörige Bedingung (1) erfüllt ist, die dementsprechend nicht mehr explizit aufgeführt wird. Die Restriktionen des Typs (4) werden in analoger Weise bei einer querorientierten Packstückanordnung in (i,j) wirksam. Die Zielfunktion (2) ermittelt die Anzahl (PZF) der angeordneten Packstücke aus der Summe der für eine Anordnung ausgewählten Anordnungspunkte.

Maximiere

$$(2) \text{ PZF} = \sum_{(i,j) \in K} x(i,j) + \sum_{(i,j) \in K} y(i,j)$$

u.B.d.R.

$$(3) M \cdot x(i,j) + \sum_{(r,s) \in \overline{K_Y}} x(r,s) + \sum_{(r,s) \in \overline{K_Y}} y(r,s) + y(i,j) \leq M$$

für $(i,j) \in K$ mit $i+l \leq L, j+b \leq B$

$$(4) x(i,j) + \sum_{(r,s) \in \overline{K_Y}} x(r,s) + \sum_{(r,s) \in \overline{K_Y}} y(r,s) + M \cdot y(i,j) \leq M$$

für $(i,j) \in K$ mit $i+b \leq L, j+l \leq B$

$$(5) x(i,j) \in \{0,1\} \quad \text{für } (i,j) \in K \text{ mit } i+l \leq L, j+b \leq B$$

$$(6) y(i,j) \in \{0,1\} \quad \text{für } (i,j) \in K \text{ mit } i+b \leq L, j+l \leq B$$

Tafel 1: Binäres Optimierungssystem zur Lösung des H2DPP

Die gegebenenfalls große Anzahl von Anordnungspunkten (bzw. die - unmittelbar davon abhängende - Zahl der Variablen wie auch die Zahl der Restriktionen des Optimierungssystem (2)-(6)) lässt sich durch die Identifikation *redundanter Anordnungspunkte* reduzieren. In diesem Zusammenhang nennen wir einen Anordnungspunkt redundant, wenn er weggelassen werden kann, ohne dass sich dadurch die maximale Anzahl der auf der Packfläche unterzubringenden Packstücke ändert. Eine systematische Darstellung der Vorgehensweise zur Identifizierung redundanter Anordnungspunkte findet sich etwa in Dowsland (1984).

2.2.3 Lösungsverfahren

Zur Bestimmung einer optimalen Lösung für das Optimierungssystem (2)-(6) kann man grundsätzlich auf die allgemeinen Methoden der ganzzahligen beziehungsweise der binären Optimierung (vgl. z.B. Schrijver 1994), wie sie zum Teil auch in kommerzieller Software verfügbar sind, zurückgreifen. Mit abnehmenden Packstückabmessungen steigt allerdings die Anzahl der Variablen und Restriktionen des Optimierungssystems und mit ihnen auch der Rechenaufwand sehr schnell auf ein prohibitives Niveau, sodass dieser Ansatz nur in Ausnahmefällen und bei vergleichsweise großen Packstückabmessungen erfolgversprechend erscheint. Spezielle exakte Lösungsverfahren, welche die spezielle Struktur des H2DPP berücksichtigen, wurden etwa von Dowsland (1985 und 1987), Exeler (1988) und Isermann (1987) vorgeschlagen. In Softwarepaketen zur Lösung des H2DPP sind jedoch üblicherweise leistungsfähige Heuristiken (vgl. z.B. Exeler 1988; Morabito/Morales 1998) implementiert, die in den meisten Fällen für Praxisprobleme optimale Lösungen liefern und diese - wegen der Verfügbarkeit guter unterer Schranken (vgl. z.B. Naujoks 1995, S. 94 ff.; Nelißen 1995, S. 19 ff. und S. 117 ff.) für den optimalen Zielwert (2) - sogar als optimal nachweisen können.

2.3 Das Problem der optimalen Nutzung der Stauraumhöhe

2.3.1 Problemdefinition

Ist für das Packstück lediglich eine einzige vertikale Orientierung möglich, so erreicht man eine maximale Nutzung des über der Palette aufgespannten Stauraums, indem man mehrere, dem ermittelten Packmuster gemäß gebildete Lagen bis zur maximalen Packhöhe H übereinander anordnet. Sofern sich das Packstück dagegen mit mehr als einer vertikalen Orientierung anordnen lässt, sind dementsprechende Lagentypen mit unterschiedlichen Packmustern und Höhen im Hinblick auf eine möglichst gute Stauraumnutzung miteinander zu kombinieren.

Für ein Packstück mit den Abmessungen $b \times l \times h$, das in jeder vertikalen Orientierung angeordnet werden kann, lassen sich drei Typen von Lagen bilden (vgl. Liu/Hsiao 1997, S. 727), nämlich

- eine sogenannte *B-Lage* (**B**odenlage) der Höhe h , bei der die (Anordnungs-) Grundfläche des Packstücks die Abmessungen $b \times l$ besitzt,
- eine sogenannte *S-Lage* (**S**eitenlage) der Höhe b , bei der die (Anordnungs-) Grundfläche des Packstücks die Abmessungen $l \times h$ besitzt und
- eine sogenannte *E-Lage* (**E**ndlage) der Höhe l , bei der die (Anordnungs-) Grundfläche des Packstücks die Abmessung $b \times h$ aufweist.

Dann besteht das Problem der optimalen Nutzung der zur Verfügung stehenden Stauraumhöhe darin, für jeden der (maximal drei) zulässigen Lagentypen die Häufigkeit festzulegen, mit der dieser in dem Lagenstapel vorkommen soll.

2.3.2 Modellierung

Für jeden Lagentyp lässt sich auf der Grundlage des in Abschnitt 2.2 dargestellten Ansatzes ein optimales bzw. möglichst gutes Packmuster ermitteln. Die zugehörige Anzahl von Packstücken sei n_B , n_S und n_E . Die jeweilige Häufigkeit, mit der ein bestimmter Lagentyp in einem die maximale Packhöhe H möglichst gut ausschöpfenden Lagenstapel vorkommt, sei mit z_B , z_S bzw. z_E bezeichnet. Diese Größen lassen sich aus dem in Tafel 2 dargestellten Optimierungssystem zur Maximierung der Anzahl PZH der auf der Palette insgesamt untergebrachten Packstücke bestimmen.

Maximiere:

$$(7) \quad PZH = n_B \cdot z_B + n_S \cdot z_S + n_E \cdot z_E$$

u.B.d.R.

$$(8) \quad n_B \cdot z_B + n_S \cdot z_S + n_E \cdot z_E \leq H$$

$$(9) \quad z_B \leq [H/h]$$

$$(10) \quad z_S \leq [H/b]$$

$$(11) \quad z_E \leq [H/l]$$

$$(12) \quad z_B, \quad z_S, \quad z_E \geq 0 \text{ und ganzzahlig}$$

Tafel 2: Ganzzahliges Optimierungssystem zur Bestimmung der maximalen Höhennutzung

2.3.3 Lösungsverfahren

Bei diesem Optimierungssystem handelt es sich um ein sogenanntes (*Constrained*) *Knapsack Problem* (vgl. Wäscher/Haußner/Schumann 2007). Zur Bestimmung einer optimalen Lösung bietet es sich bei vergleichsweise großen Packstücken an, sämtliche effizienten Kombinationen von Lagentypen zu enumerieren. Diese werden repräsentiert durch die Kombinationen (z_B, z_S, z_E) mit der Eigenschaft:

$$H - \min(h, b, l) < h \cdot z_B + b \cdot z_S + l \cdot z_E \leq H$$

Ansonsten lassen sich die für das Knapsack-Problem entwickelten speziellen Lösungsverfahren (vgl. z.B. Martello/Toth 1990) einsetzen.

2.4 Restriktionen

Grundsätzlich hat die Beladung einer Palette so zu erfolgen, dass die darauf angeordneten Packstücke die Abmessungen des Stauraums nicht überschreiten (*Stauraumre-*

striktionen). Für den hier ausschließlich betrachteten Palettentyp, die Euro- (Flach-) Palette, betragen die Abmessungen der Packfläche 800 mm × 1200 mm. In Bezug auf die vertikale Nutzung des Stauraums existieren zwei Normen, CCG I und CCG II¹⁾, die eine Beschränkung des Lagenstapels auf die Höhe von 900 mm bzw. 1800 mm (unter Ausschluss der Palettenhöhe) vorsehen.

Bei der Durchführung der Untersuchung wurde allerdings deutlich, dass die Abmessungen des Stauraums eher als „weiche“ Restriktionen zu interpretieren sind. In dem betreffenden Distributionszentrum wurden regelmäßig Paletten akzeptiert, die eine Überschreitung der Packflächenabmessungen (*Überhang*) um bis zu 50 mm (in jeder der beiden horizontalen Richtungen) aufwiesen. Die betreffenden Paletten ließen sich auch dann noch problemlos transportieren, umschlagen und einlagern. In Bezug auf die nach der CCG I-Norm beladenen Paletten (nicht aber bei den nach der CCG II-Norm beladenen Paletten) wurden auch Überschreitungen der Höhenrestriktionen (*Überstapelung*) beobachtet, die sich aber - im Gegensatz zum (horizontalen) Überhang - in der Praxis als durchaus problematisch erwiesen.

Eine vollständige Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Stauraums über einer Palette ist nicht immer realisierbar, wenn Beschränkungen des Ladungsgewichts (*Gewichtsrestriktion*) wirksam werden. Das Höchstgewicht ist nach einer weiteren CCG-Norm für die Euro-Palette auf 1.000 kg (einschl. des Gewichts der Palette) festgelegt. Die Palette selbst ist zwar grundsätzlich bis 1.500 kg belastbar, Regalbediengeräte in Hochregallagern und andere Transport- bzw. Lagereinrichtungen sind aber oft nur auf ein Maximalgewicht von 1.000 kg ausgelegt.

Werden zur Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Stauraumhöhe Lagen mit identischen Packmustern einfach übereinandergelegt (vgl. Abbildung 1a), so erweist sich eine solche Turmstapelung häufig als nicht sehr stabil und es besteht die Gefahr, dass die Palettenladung beim Transport und Umschlag auseinander fällt (*Stabilitätsrestriktionen*). Dem kann man grundsätzlich durch geeignete Ladungssicherungsmaßnahmen (Umhüllung mit Schrumpffolie, Umreifung usw.) vorbeugen, allerdings strebt man in der Praxis von vornherein möglichst stabile Ladungen durch Verbundstapelung an, durch die sich aufwändige Sicherungsmaßnahmen vermeiden oder zumindest reduzieren lassen. Ausgehend von einem vorliegenden Packmuster kann man Lagen für eine solche Verbundstapelung durch eine Drehung des Packmusters um 180 Grad oder Spiegelungen erzeugen (vgl. Carpenter/Dowland 1985, S. 491).

Beim Übereinanderstapeln von Lagen ist auch die Stabilität der Verpackungen der Packstücke zu beachten. Eine zu geringe Verpackungsstabilität kann ebenfalls verhindern, dass der gesamte Stauraum ausgenutzt wird.

3 Ursachen ineffizienter Stauraumnutzung

Auf der Grundlage des bisher Gesagten lassen sich die im Folgenden dargestellten Ursachen ineffizienter Stauraumnutzung identifizieren.

3.1 Unzureichende Packflächennutzung

Eine unzureichende Nutzung des Stauraums kann zunächst darauf zurückzuführen sein, dass bei einer gegebenen Packstückorientierung die zur Verfügung stehende Packfläche nicht mit der maximalen Anzahl von Packstücken belegt wird. Durch den Einsatz von moderner Palettenbeladungssoftware lassen sich derartige Ineffizienzen leicht identifizieren und vermeiden.

3.2 Unzureichende Nutzung der Stauraumhöhe

Die zur Verfügung stehende Stauraumhöhe wird offensichtlich nicht vollständig genutzt, wenn es möglich ist, den Lagenstapel bei gegebener Packstückorientierung noch durch eine weitere Lage desselben Lagentyps zu erhöhen. Dieser Fall einer ineffizienten Höhennutzung war im Wareneingang des hier betrachteten Distributionszentrums allerdings kaum zu beobachten. Er trat lediglich im Zusammenhang mit schweren Packstücken auf, bei denen eine bis zur maximalen Stauraumhöhe beladene Palette die Gewichtsrestriktion verletzt hätte. In einer solchen Situation ist allenfalls in Betracht zu ziehen, dass eine Ergänzung des Lagenstapels mit einer unvollständigen Lage an Packstücken die Stauraumnutzung verbessern kann.

Sollen Paletten zwar mit einem einheitlichen Lagentyp beladen werden, sind aber grundsätzlich mehrere Packstückorientierungen erlaubt, so stellt sich zusätzlich die Frage, welcher Lagentyp - übereinandergestapelt - den Stauraum am besten ausfüllt. Ein Lagentyp, der einerseits die Packfläche gut ausfüllt, führt andererseits möglicherweise nur zu einer schlechten Höhennutzung. Zur Vermeidung derartiger Ineffizienzen muss für jede zulässige Packstückorientierung zunächst das optimale Packmuster mit der maximal auf der Packfläche unterzubringenden Packstückzahl sowie die zugehörige maximale Lagenanzahl ermittelt werden.

Sind mehrere Packstückorientierungen möglich und lassen sich die entsprechenden Lagentypen miteinander in einem Lagenstapel kombinieren, so besteht die Möglichkeit, dass diese mit ungeeigneten Häufigkeiten in den Beladungsplan eingehen. Eine optimale Lösung des entsprechenden Optimierungssystems (7)-(12) informiert dagegen über die beste Zusammensetzung des Lagenstapels. In der Praxis wird diese Möglichkeit zur Verbesserung der Stauraumnutzung oft nicht ausgeschöpft. Als Begründung wird in solchen Fällen auf die mangelnde Stabilität des betreffenden Lagenstapels, die mangelnde Leistungsfähigkeit der eingesetzten Packroboter und/oder die unzureichende Qualifikation des im Packbereich tätigen Personals verwiesen. In Anlehnung an eine in der Praxis verbreitete Vorgehensweise kann man in solchen

Fällen eine verbesserte Höhennutzung dadurch herbeiführen, dass man einen Lagenstapel mit einem einheitlichen Lagentyp bildet und lediglich für die oberste Lage einen abweichenden Lagentyp zulässt. Welche Kombination von Lagentypen dabei zur besten Stauraumnutzung führt, lässt sich wieder in Anlehnung an das Optimierungsmodell durch Enumerierung der (wenigen) relevanten Kombinationsmöglichkeiten entscheiden.

4 Ergebnisse der Untersuchung

4.1 Daten

Die bei der im Folgenden dargestellten Untersuchung zugrunde gelegten Daten wurden an vier Arbeitstagen im Wareneingangsbereich eines Distributionszentrums für Lebensmittel erhoben. Die Auswahl der zu analysierenden Paletten wurde mit Hilfe eines Zufallsmechanismus getroffen. Berücksichtigt wurden nur homogen mit quaderförmigen Packstücken beladene Paletten, was in Bezug auf das betreffende Distributionszentrum jedoch keine wesentliche Einschränkung des Untersuchungsgegenstandes bedeutete, da im Beobachtungszeitraum nahezu keine gemischt bzw. mit nicht-quaderförmigen Objekten beladenen Paletten angeliefert wurden.

Für jede Palette wurden zunächst der Artikeltyp, die Abmessungen und das Gewicht der Packstücke sowie das verwendete Beladungsmuster (gegebenenfalls einschließlich Überhang und Überpackung) aufgenommen. In einem weiteren Schritt wurden dann weitere Eigenschaften der Packstücke ermittelt. Dazu gehörten insbesondere die zulässigen Orientierungen der Packstücke sowie Stabilitätseigenschaften ihrer Verpackungen. Artikel, die auf mehreren, nach identischen Mustern beladenen Paletten vorkamen, wurden lediglich einmal berücksichtigt. Insgesamt lieferte diese Vorgehensweise 88 auswertbare Datensätze.

4.2 Grundlegende Beobachtungen

Aus einer ersten Analyse der Datensätze ging hervor, dass lediglich bei 35 der 88 Paletten (39,7 %) sämtliche Stauraumrestriktionen eingehalten wurden. In den verbleibenden 53 Fällen waren dagegen Überhänge und/oder Überstapelungen festzustellen, zum Teil gleichzeitig in allen drei beschränkten Dimensionen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht darüber, inwieweit die vorgegebenen Abmessungen des über der Palette aufgespannten Stauraums verletzt wurden. Besonders auffällig ist, dass Überschreitungen der Stauraumhöhe vor allem bei den gemäß der CCG I-Norm (900 mm) beladenen Paletten (13 Datensätze, 14,8 %) zu beobachten waren, während die nach der CCG II-Norm (1800 mm) beladenen Paletten überhaupt keine Überstapelungen aufwiesen. Tatsächlich wurden überpackte, nach der CCG I-Norm beladene Paletten zwar angenommen, deren Einlagerung konnte wegen der Überschreitung der Stauraumhöhe allerdings nicht - wie eigentlich vorgesehen - in „halben“ Lagerfächern

erfolgen, vielmehr mussten „große“ Lagerfächer bereit gestellt werden, was auf erhebliche Ineffizienzen bei der Nutzung des Lagerraums schließen lässt.

	CCG I (900 mm)		CCG II (1.800 mm)	
	Anzahl Paletten	Anteil [%]	Anzahl Paletten	Anteil [%]
Innerhalb der (horizontalen) Packflächenabmessungen				
- ohne (vertikale) Überpackung	20	22,7	15	17,0
- mit einer Überpackung bis zu 50 mm	9	10,2	-	-
Mit einem (horizontalen) Überhang zwischen 1 und 25 mm				
- ohne (vertikale) Überpackung	19	21,6	9	10,2
- mit einer Überpackung bis zu 50 mm	4	4,5	-	-
Mit einem (horizontalen) Überhang zwischen 26 und 50 mm				
- ohne (vertikale) Überpackung	7	8,0	5	5,7
- mit einer Überpackung bis zu 50 mm	-	-	-	-
Anzahl Paletten, gesamt	59	67,0	29	33,0
davon:				
Anzahl Paletten mit (horizontalem) Überhang	30	34,1	14	15,9
Anzahl Paletten mit (vertikaler) Überpackung	13	14,8	-	-

Tabelle 1: Beladungsnormen und Überhang-/Überpackungsnutzung (N = 88)

Tabelle 2 gibt eine Übersicht darüber, in welchen Datensätzen Packstücke enthalten waren, die auch mit einer anderen als der vorgefundenen Orientierung hätten angeordnet werden können. Die Daten sind dabei wieder differenziert nach dem Aspekt, ob und gegebenenfalls in welchem Ausmaß dabei eine Verletzung der Stauraumrestriktionen zu beobachten war. Es zeigt sich, dass bei einem großen Teil der Packstücke (in 30 von 88 Fällen, entspricht 34,9 %) mindestens eine andere Abschlusslage („anderer Lagentyp oben“) hätte benutzt werden können. In 19 der 88 Fälle (21,6 %) wären sogar alle drei Orientierungen zulässig und die betreffenden Lagentypen frei miteinander kombinierbar gewesen.

4.3 Flächennutzung

Tabelle 3 zeigt, in wie vielen Fällen das vorgefundene Packmuster (in der Ebene) optimal war. Bei denjenigen Datensätzen, bei denen ein (horizontaler) Überhang vorlag, wurde dieser auch als zulässig für die Packmusteroptimierung angesehen. In immerhin 14 der 88 Fälle (15,9 %) konnte beobachtet werden, dass bei sorgfältiger Analyse mindestens ein Packstück mehr auf der Palette hätte angeordnet werden können. Die dadurch insgesamt erzielbare Verbesserung der Flächennutzung verbleibt aber gering, sie würde lediglich von 90,9 % auf 91,7 % ansteigen.

	CCG I (900 mm)			CCG II (1.800 mm)		
	Anzahl Paletten			Anzahl Paletten		
	Gesamt	Anderer Lagentyp oben	Lagen frei kombinierbar	Gesamt	Anderer Lagentyp oben	Lagen frei kombinierbar
Innerhalb der (horizontalen) Packflächenabmessungen	29	9	7	14	5	3
Mit einem (horizontalen) Überhang zwischen 1 und 25 mm						
- ohne (vertikale) Überpackung	19	7	3	10	3	3
- mit einer Überpackung bis zu 50 mm	4	1	1	-	-	-
Mit einem (horizontalen) Überhang zwischen 26 und 50 mm						
- ohne (vertikale) Überpackung	7	3	0	5	2	2
- mit einer Überpackung bis zu 50 mm	-	-	-	-	-	-
Anzahl Paletten, gesamt	59	20	11	29	10	8

Tabelle 2: Zulässige Packstückorientierungen und Kombinationen von Lagentypen (N = 88)

	Ausgangssituation		Nach Packmusteroptimierung	
	Anzahl Paletten	Durchschnittl. Flächennutzung [%]	Anzahl Paletten mit besserer Nutzung	Durchschnittl. Flächennutzung [%]
Zulässiger (horizontaler) Überhang				
Kein Überhang zulässig	44	90,5	5	91,4
Überhang erlaubt zwischen 1 und 25 mm	32	91,3	9	93,3
Überhang erlaubt zwischen 26 und 50 mm	12	91,0	0	91,0
Gesamt	88	90,9	14	91,7

Tabelle 3: Packmusteroptimierung - Möglichkeiten und Auswirkungen auf die Flächennutzung (N = 88)

4.4 Höhennutzung

Tabelle 4 zeigt Ineffizienzen auf, die in einer unzureichenden Nutzung der zur Verfügung stehenden Stauraumhöhe begründet sind. Bei den nach der Höhennorm CCG I (900 mm) beladenen Paletten hätte in elf von 59 Fällen (18,6 %) noch mindestens eine Lage von Packstücken (in der gleichen Orientierung) ergänzt werden können. Die Stauraumnutzung würde sich dadurch insgesamt aber nur geringfügig verbes-

sern, nämlich von 85,0 % auf 86,9 %. Bei den nach der Norm CCG II (1800 mm) beladenen Paletten konnten in 17 von 29 Fällen (58,6 %) Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Wären entsprechende Lagen noch ergänzt worden, wäre die Stauraumnutzung von 70,2 % auf 80,9 % angestiegen. Dieser signifikante Unterschied zwischen den Ergebnissen für die beiden Höhennormen CCG I und CGG II ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass in der Ausgangssituation in Bezug auf CCG I bereits in 13 der 59 Fälle eine Überschreitung der Höhenrestriktion vorlag, insofern auch keine weitere Lage mehr ergänzt werden konnte.

Maßnahmen der Optimierung von Packmuster und Höhennutzung	CCG I (900 mm)				CCG II (1800 mm)			
	Ausgangssituation		Nach Optimierung		Ausgangssituation		Nach Optimierung	
	Anzahl Paletten	Grad der Raumnutzung [%]	Anzahl Paletten mit besserer Nutzung	Grad der Raumnutzung [%]	Anzahl Paletten	Grad der Raumnutzung [%]	Anzahl Paletten mit besserer Nutzung	Grad der Raumnutzung [%]
Identische Lagen in ursprünglicher Packstückorientierung	59	85,0	11	86,9	29	70,2	17	80,9
Identische Lagen in bester Packstückorientierung	11	84,3	5	88,0	8	69,9	5	84,8
Frei kombinierte Lagen	11	84,3	5	88,8	8	69,9	7	88,0
Identische Lagen mit anderem Lagentyp oben	20	83,0	10	86,6	10	70,8	8	83,9

Tabelle 4: Raumnutzungsgrad in Abhängigkeit der Maßnahmen der Optimierung von Packmuster und Höhennutzung

Tabelle 4 zeigt weiterhin eine Analyse der vorgefundenen Situation - wieder getrennt nach den beiden Höhennormen CCG I und II - unter dem Aspekt, welche Verbesserungsmöglichkeiten hätten realisiert werden können, sofern die Paletten zwar mit einem einheitlichen Packmuster beladen worden wären, dabei aber eine andere als die verwendete Packstückorientierung (soweit zulässig) Verwendung gefunden hätte. In Bezug auf die CGG I-Norm wurden nur solche Datensätze berücksichtigt, in denen keine Überpackung vorlag. Von diesen 46 Datensätzen war in elf Fällen (23,9 %) mindestens eine andere Packstückorientierung erlaubt. In fünf Fällen (10,9 %) hätte eine von der vorgefundenen Lösung abweichende Packstückorientierung zu einer Verbesserung der Stauraumnutzung geführt, die - bezogen auf die zugrundegelegten elf Datensätze - anstelle von 84,3 % bei 88,0 % gelegen hätte. Bei den nach der Höhennorm CCG II beladenen Paletten war in acht der 29 Fälle (27,6 %) eine andere Packstückorientierung zulässig, in fünf Fällen (17,2 %) wäre

eine höhere Packraumnutzung möglich gewesen, wodurch der Nutzungsgrad (bezogen auf die acht Paletten) von 69,9 % auf immerhin 84,8 % gestiegen wäre.

In den genannten elf (CCG I) bzw. acht (CCG II) Fällen wäre es ebenfalls möglich gewesen, eine völlig freie Kombination von mindestens zwei Lagentypen zu realisieren. Für die auf die Höhennorm CCG I bezogenen Datensätze hätte sich dadurch gegenüber einer Beladung mit identischen Lagen jedoch keine weitere Verbesserung erreichen lassen. Unter den auf die CCG II-Norm bezogenen Datensätze konnten jedoch zwei weitere Paletten identifiziert werden, auf denen es möglich gewesen wäre, zusätzliche Packstücke unterzubringen. Gegenüber der vorgefundenen Beladung hätte sich also in insgesamt sieben Fällen (27,1 %) eine Verbesserung erzielen lassen. Die Stauraumnutzung (bezogen auf die acht Paletten, für die eine freie Kombination zulässig war) hätte damit von 69,9 % auf 88,0 % gesteigert werden können.

Die grundsätzliche Möglichkeit, den Lagenstapel einheitlich aufzubauen, dann aber von oben mit einer Lage abzuschließen, die eine andere Packstückorientierung aufweist, konnte in Bezug auf 20 (33,9 %) der auf die Höhennorm CCG I bezogenen Datensätze (59; hier wurden auch wieder die überpackten Paletten einbezogen, wobei allerdings nur diejenigen Lagen Berücksichtigung fanden, die noch innerhalb der maximalen Packhöhe von 900 mm angeordnet waren) und in Bezug auf 10 (34,5 %) der auf die Höhennorm CCG II bezogenen Datensätze (29) aufgezeigt werden. In 10 der 20 Fälle bzw. acht der zehn Fälle hätte eine solche Form der Palettenbeladung tatsächlich eine Verbesserung der Stauraumnutzung bewirkt. Diese hätte sich von 83,0 % auf 86,6 % (auf die 20 nach CGG I beladenen Paletten bezogen) bzw. von 70,8 % auf 83,9 % (auf die 10 nach CGG II beladenen Paletten bezogen) erhöht.

4.5 Einsparungspotential

Nachdem einzelne Ansatzpunkte zur Verbesserung der Stauraumnutzung untersucht wurden, verbleibt die Frage zu beantworten, welche Auswirkungen es gehabt hätte, wenn statt der ermittelten Praxislösungen der jeweils optimale Beladungsplan realisiert worden wäre. Dabei wird unterstellt, dass der jeweils beobachtete (horizontale) Überhang auch bei einer derartigen Optimierung zulässig sei. Eine (vertikale) Überpackung wird dagegen - aus den oben dargelegten Gründen - nicht akzeptiert. Dementsprechend wurden die 13 Datensätze, die sich auf Paletten bezogen, die der CCG I-Beladungsnorm nicht entsprachen, von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Die Paletten der verbliebenen 46, auf die CCG I-Norm bezogenen Datensätze wiesen in der realisierten Praxislösung einen durchschnittlichen Raumnutzungsgrad von 82,3 % auf. Durch eine systematische Optimierung könnte dieser Grad auf 83,0 % gesteigert werden. Eindrucksvoller sind dagegen die Auswirkungen bei den 29 nach der CCG II-Norm beladenen Paletten. Hier würde der Nutzungsgrad von aktuell 70,2 % auf 81,7 % steigen.

Insgesamt, d.h. über alle 75 Datensätze, ergäbe sich eine Verbesserung des Raumnutzungsgrads von 76,95 % auf 82,43 %. Anders ausgedrückt: Würden für die Praxislösung 100 Paletten benötigt, so wären nach einer Optimierung lediglich noch 94 erforderlich gewesen, d.h. es könnte Reduzierungen bei den betreffenden Transport-, Umschlags- und Lagerprozessen im Umfang von bis zu 6 % realisiert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich konnte aufgezeigt werden, dass nach wie vor ein erhebliches Potential zur Verbesserung der Palettenbeladung existiert. Trotz der Verfügbarkeit ausgereifter Software sind die in der Praxis verwendeten Beladungspläne häufig nicht optimal. Dies gilt vor allem für Paletten, die der CCG-II Norm gemäß (1800 mm Stapelhöhe) beladen sind. Besonders geeignet im Hinblick auf eine Erschließung des Rationalisierungspotentials ist die Bildung mehrerer, auf unterschiedlichen Packstückorientierungen beruhender Lagetypen sowie ihre Kombination miteinander zu einem Lagenstapel. Die zu palettierenden Produkte bzw. ihre Verpackungen lassen solche Vorgehensweisen oft zu, werden in der Praxis aber nicht hinreichend beachtet. Allerdings machen sie möglicherweise auch zusätzliche, ergänzende Maßnahmen zur Ladungssicherung (z.B. durch Schrumpffolie), gegebenenfalls auch eine andere Technik zur automatischen Beladung von Paletten (Palettierungsroboter) erforderlich.

Die Untersuchung hat auch gezeigt, dass die Restriktionen bezüglich des zur Verfügung stehenden Stauraums keineswegs exakt fixiert sind. Zumindest in dem Distributionszentrum, in dem die Untersuchung durchgeführt wurde, war es üblich, dass Paletten zum Teil mit einem erheblichen horizontalen Überhang (bis zu 50 mm) akzeptiert wurden. Sollte dies stets der Fall sein, ließe sich durch systematisches Ausnutzen der größeren Beladungsfläche die Anzahl der für ein gewisses Packstückvolumen benötigten Paletten weiter senken.

Daneben besteht auch nach wie vor ein erheblicher Bedarf, die Abmessungen der betreffenden Packstücke an die Palettenabmessungen so anzupassen, dass eine bessere Nutzung des Palettenstauraums möglich wird. Dies wird deutlich, wenn man die Ergebnisse betrachtet, die sich selbst bei einer optimalen Palettenbeladung für die hier untersuchten Packstücktypen ergaben. Wie gezeigt, betrug der maximal erreichbare Nutzungsgrad des Stauraums für den gegebenen Packstückmix unter der CCG I-Norm lediglich 83,0 % und unter der CCG II-Norm lediglich 81,7 %.

Schließlich bleibt zu beachten, dass in dieser Arbeit vor allem Paletten betrachtet wurden, die homogen beladen waren. Das betreffende „Manufacturer's Pallet Loading Problem“ ist noch vergleichsweise leicht zu lösen. Tendenziell schwieriger ist das sogenannte „Distributor's Pallet Loading Problem“, bei dem Paletten mit unterschiedlichen Packstücktypen zu beladen sind. Deshalb kann auch erwartet werden, dass in Bezug auf derartige Probleme in der Praxis ein noch größeres Rationalisierungspotential besteht.

Anmerkungen

- 1) Von der Centrale für Coorganisation wurden 1985 in Abstimmung zwischen Industrie und Handel Empfehlungen für die Konsumgüterindustrie entwickelt, die sich in der Praxis weitgehend durchgesetzt haben.

Literatur

- Carpenter, H.; Dowsland, W.B.: Practical Considerations of the Pallet Loading Problem, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 36 (1985), S. 489-497
- Dowsland, K.A.: The Three-Dimensional Pallet Chart: An Analysis of the Factors Affecting the Set of Feasible Layouts for a Class of Two-Dimensional Packing Problems, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 35 (1984), S. 895-905
- Dowsland, K.A.: A Graph-Theoretic Approach to a Pallet Loading Problem, in: *New Zealand Operational Research*, Vol. 13 (1985), S. 77-86
- Dowsland, K.A.: An Exact Algorithm for the Pallet Loading Problem, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 31 (1987), S. 78-84
- Exeler, H.: *Das homogene Packproblem in der betriebswirtschaftlichen Logistik*, Heidelberg 1988
- Hodgson, T.J.: A Combined Approach to the Pallet Loading Problem, in: *IIE Transactions*, Vol. 14 (1982), S. 175-182
- Isermann, H.: Ein Planungssystem zur Optimierung der Palettenbeladung mit kongruent rechteckigen Versandgebänden, in: *OR Spektrum*, 9. Jg. (1987), S. 235-249
- Isermann, H.: *Stauraumplanung*, in: *Logistik*, hrsg. v. H. Isermann, 2. Aufl., Landsberg a. Lech 1998, S. 245-286
- Liu, F.-H.F.; Hsiao, C.-J.: A Three-Dimensional Pallet Loading Method for Single-Size Boxes, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 48 (1997), S. 726-735
- Martello, S.; Toth, P.: *Knapsack Problems - Algorithms and Computer Implementations*, Chichester 1990
- Morabito, R.; Morales, S.: A Simple and Effective Recursive Procedure for the Manufacturer's Pallet Loading Problem, in: *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49 (1998), S. 819-828
- Naujoks, G.: *Optimale Stauraumnutzung*, Wiesbaden 1995
- Nelißen, J.: *Neue Ansätze zur Lösung des Palettenbeladungsproblems*, Aachen 1995
- Schrijver, A.: *Theory of Linear and Integer Programming*, Chichester 1994 (Nachdruck der 1. Aufl. von 1987)
- Wäscher, G.; Haußner, H.; Schumann, H.: An Improved Typology for Cutting and Packing Problems, in: *European Journal of Operational Research*, 2007 (im Druck)