



Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge zur schlanken Versorgung der Automobilmontage

Matthias Holger Conze

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 04.03.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.06.2014 angenommen.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, TU München, 2014

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Matthias Conze

Copyright © Matthias Conze 2014

ISBN: 978-3-941702-43-1

Printed in Germany 2014

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München im Rahmen des Forschungsprojektes „Trailerkonzepte für B- und C-Teilfamilien zur schlanken Montageversorgung“ in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG.

Zu allererst möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Hrn. Professor Dr.-Ing. Willibald A. Günthner, und meinem Mentor bei MAN, Hrn. Dipl.-Ing. Michael Ulverich, bedanken, die mir das Projekt ermöglichten und mir stets das richtige Maß an Freiheit sowie konstruktiver Kritik zuteilwerden ließen. Hrn. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhardt danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie Hrn. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen sowohl am Lehrstuhl fml als auch bei MAN für die angenehme, freundschaftliche Arbeitsatmosphäre sowie die wertvollen Anregungen und Diskussionen. Namentlich hervorheben möchte ich Hrn. Stefan Galka, der für meine Belange stets ein offenes Ohr hatte und mir mit hilfreichen Ratschlägen Orientierung für meine Forschungstätigkeit gab. Großer Dank gebührt darüber hinaus den zahlreichen Studenten, die unter meiner Betreuung mit großem Engagement ihre Studienarbeiten anfertigten und einen nicht unerheblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leisteten. Nicht unerwähnt bleiben sollen vor allem aber auch die Kolleginnen und Kollegen vom Sekretariat, der Werkstatt bzw. der IT-Administration, die durch ihre Unterstützung ein effektives Arbeiten erst ermöglichten.

Der größte Dank jedoch gilt meinen Eltern für die ausnahmslose Förderung und Unterstützung während meines gesamten Lebensweges. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

München, im Juli 2014

Matthias Conze

Kurzzusammenfassung

Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge zur schlanken Versorgung der Automobilmontage

Matthias Conze

Heutige Just-in-Time-Abrufsteuerungssysteme der Automobilindustrie erlauben nicht nur eine bestandsarme und lagerlose Belieferung, sondern auch eine hohe Auslastung der Transportmittel. Dadurch wird der zunehmenden Bedeutung der Transportkosten Rechnung getragen. Für die Mehrzahl der Zulieferteile ist jedoch weiterhin eine Lagerstufe notwendig. Der Versorgungsprozess dieser lagerhaltigen Teileumfänge ist durch einen vergleichsweise hohen Transportaufwand und hohe Bestände geprägt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Abrufsteuerungssystem entworfen, das auch für Lagerteile eine effiziente Belieferung ermöglicht. Neben neuartigen Algorithmen zur Nettobedarfs- und Bestellrechnung beinhaltet dieses u.a. auch ein Monitoring-Konzept sowie Werkzeuge zur praktikablen Planung und Steuerung von Milk-runs.

Mit der entwickelten Nettobedarfsrechnung können aktiv Sicherheiten in die Supply-Chain eingesteuert werden, die der Reduktion von Abrufnervosität und Beständen dienen. Kernelement der Bestellrechnung ist ein Packalgorithmus zur Erzeugung möglichst dicht gepackter, intuitiv reproduzierbarer Beladeschemen unter Berücksichtigung aller relevanten Praxisrestriktionen. Darüber hinaus ist das System derart konzipiert, dass erstmalig lagerlose und lagerhaltige Teileumfänge gemeinsam disponiert werden können.

In Simulationsstudien können die erwarteten Effekte der Algorithmen weitgehend bestätigt werden. Bei einer Betrachtung der Eingangsparameter in geeigneten Wertebereichen liegt die Erhöhung der Abrufstabilität bei bis zu 22%, die Senkung des mittleren Bestands bei bis zu 5%. Eine hohe Leistungsfähigkeit des Packalgorithmus zeigt sich vor allem anhand von Realdaten beispielhafter Lieferrelationen. Im Mittel wird bei diesen eine Transportauslastung von 94% erzielt.

Abstract

Integrated call-off and transport control of stock parts for a lean automotive assembly supply

Matthias Conze

Contemporary just in time call-off systems in the automotive industry not only allow for a low inventory supply without warehouse, but also a high capacity utilization of the means of transport. Thus, the increased importance of transport costs is taken into account. However, for the majority of supplier parts an intermediate warehousing stage is still needed. The procurement process of these stock parts is coined by a comparably high transport effort and high levels of inventory.

In the doctoral thesis at hand a call-off system is developed which also facilitates an efficient supply of stock parts. Besides innovative algorithms for the net demand and order quantity calculation it also comprises, amongst others, a monitoring concept and tools for a practicable planning and steering of milk runs.

The net demand calculation enables the active dispatching of safety parts in the supply chain which serve the stabilization of call-offs and the reduction of inventories. Core element of the order quantity calculation is a packing algorithm for creating densely packed and intuitively reproducible loading patterns considering all relevant practical conditions. Moreover, the system is designed in a way that for the first time stockless and stock part supplies can be scheduled conjointly.

In simulation studies the expected effects of the algorithms can be largely confirmed. By considering adequate value ranges for the input parameters the call-off stability increases by up to 22%, the average inventory decreases by up to 5%. Especially when using real-world data the packing algorithm provides a high performance. On average, a transport capacity utilization rate of 94% can be reached.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundkonzepte der automobilen Beschaffungslogistik	7
2.1 Lean Logistics	8
2.2 Perlenkettenkonzept	9
2.3 Physischer Versorgungsprozess	11
2.3.1 Belieferungskonzepte	12
2.3.2 Materialbereitstellungs- und Abladekonzepte	15
2.3.3 Transportmodi	17
2.4 Materialdisposition	21
2.4.1 Bedarfsgesteuerte Disposition	22
2.4.2 Verbrauchsgesteuerte Disposition	25
3 Methoden zur Erhöhung der Transportauslastung	29
3.1 Technische Rahmenbedingungen	29
3.1.1 Begriffsbestimmungen	29
3.1.2 Lastkraftwagen und Ladungsträger	31
3.1.3 Laden und Sichern	36
3.2 Containerbeladungsprobleme	39
3.2.1 Klassifizierung von Containerbeladungsproblemen	39
3.2.2 Praxisrelevante Nebenbedingungen	41
3.2.3 Allgemeine Lösungsansätze und Algorithmen	43
	IX

3.2.4	Automobilspezifische Lösungsansätze	49
3.2.5	Integrierte Tourenplanung und Stauraumoptimierung	53
3.2.6	Logistiksoftware zur Stauraumoptimierung	55
3.3	Erhöhung der Transportauslastung in der Praxis auf Basis bestehender Dispositionsverfahren	55
3.3.1	Trailerbasierte Abrufsteuerung für lagerlose Teileumfänge	55
3.3.2	Weitere Verfahren zur Erhöhung der Transportauslastung	59
4	Anforderungsklä rung und Forschungslücke	61
4.1	Anforderungen an die Steuerung und den physischen Prozess	61
4.1.1	Allgemeine Anforderungen an das Steuerungssystem	61
4.1.2	Anforderungen an das Dispositionsverfahren, die Lieferantenkommunikation und den physischen Prozess	64
4.1.3	Anforderungen an den Packalgorithmus	73
4.2	Ableich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen	74
4.2.1	Beurteilung bestehender Dispositionsansätze	75
4.2.2	Beurteilung bestehender Packalgorithmen	79
4.2.3	Fazit	83
5	Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge	85
5.1	Konzeptstrukturierung	85
5.2	Nettobedarfsrechnung	87
5.3	Bestellrechnung	95
5.3.1	Begriffsbestimmungen und Datenstruktur	95
5.3.2	Bildung einer HU-Perlenkette	100
5.3.3	Packalgorithmus für Teilladungen	102
5.3.4	Packalgorithmus für Komplettladungen	107
5.3.5	Fixierungslogik	135
5.4	Lieferüberwachung und manuelle Überplanung	136
5.5	Abruf- und Lieferkommunikation	138
5.6	Erweiterungen zur Steuerung von Milkruns	139
5.6.1	Kommunikation von Abholzeiten	140
5.6.2	Leergutintegration	141
5.7	Werksinterne Prozesse	144
5.7.1	Abladekonzept	144

5.7.2 Bestandsführung und -kontrolle	145
5.8 Konzeptbewertung	147
5.8.1 Abgleich mit den Anforderungen	148
5.8.2 Abschätzung des monetären Potenzials am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	149
6 Simulative Validierung und Analyse des Konzepts der integrierten Abruf- und Transportsteuerung	153
6.1 Simulationsstudie zum Konzept der Nettobedarfsrechnung	153
6.1.1 Simulationsmodell	154
6.1.2 Kennzahlen	158
6.1.3 Experimente und Ergebnisse	161
6.1.4 Fazit	165
6.2 Simulationsstudie zum Packalgorithmus für Komplettladungen	166
6.2.1 Simulationsmodell	166
6.2.2 Kennzahlen	169
6.2.3 Experimente und Ergebnisse	173
6.2.4 Fazit	180
7 Zusammenfassung und Ausblick	183
7.1 Zusammenfassung	183
7.2 Ausblick	186
Literaturverzeichnis	189
Abbildungsverzeichnis	205
Tabellenverzeichnis	209

Abkürzungsverzeichnis

akt_HU	aktuelle Handling Unit
B&B	Branch-and-Bound
BAF	Best Area Fit
BD_BVZ	Bedarfsgesteuerte Disposition mit Bedarfsvorlaufzeit
BD_SB	Bedarfsgesteuerte Disposition mit Sicherheitsbestand
BF	Best Fit
BFD	Best Fit Decreasing
BFDH	Best Fit Decreasing Height
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften
BL	Bottom Left
BLF	Bottom Left Fill
BL _{MOD}	Modified Bottom Left
bspw.	beispielsweise
BVZ	Bedarfsvorlaufzeit
bzw.	beziehungsweise
FF	First Fit
FFD	First Fit Decreasing
FFDH	First Fit Decreasing Height
ggf.	gegebenenfalls
GLT	Großladungsträger
HGB	Handelsgesetzbuch
HU	Handling Unit
i.e.S.	im engeren Sinne
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
KLT	Kleinladungsträger
ldm	Lademeter
LKW	Lastkraftwagen
MDVRP	Multi-Depot Vehicle Routing Problem
MFFD	Modified First Fit Decreasing
MILOPP	Multiple Identical Large Objects Placement Problem
MTB	MAN Truck & Bus AG
NF	Next Fit

Abkürzungsverzeichnis

NFDH	Next Fit Decreasing Height
NFS	Next Fit Shelf
ODP	Open Dimension Problem
OEM	Original Equipment Manufacturer
R^∞	asymptotisches Worst-Case-Performance-Verhältnis
RBF	Reichweitenbegrenzungsfaktor
SB	Sicherheitsbestand
SLOPP	Single Large Object Placement Problem
SSSCSP	Single-Stock-Size Cutting Stock Problem
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrszulassungsverordnung
TMS	Transportmanagementsystem
TP	Touching Perimeter
TP_{MOD}	Modified Touching Perimeter
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
VD	Verbrauchsgesteuerte Disposition
vgl.	vergleiche
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPHF	Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Die Automobilindustrie ist heute schon einem intensiven Wettbewerb ausgesetzt. Geht es nach der Studie FAST 2025, wird sich die Situation in Zukunft noch verschärfen. Infolge des anhaltenden Kostendrucks, immer komplexerer Produktstrukturen und kürzerer Produktlebenszyklen ist zudem mit einer weiter zunehmenden Konzentration der Automobil-OEM auf ihre Kernkompetenzen und Verlagerung von Wertschöpfung auf die Lieferanten zu rechnen [Wym-2012]. Darüber hinaus geht die Tendenz weiterhin zu einer vermehrt globalen Beschaffung der Zulieferteile, um Lohngefälle auszunutzen [Göp-2013].

Diese Trends gehen einher mit einer Zunahme der Komplexität der Liefernetzwerke, des Transportaufkommens und damit auch der gesamten Logistikkosten. Den höchsten Anteil an diesen nehmen dabei die Transportkosten ein, gefolgt von den Lager- und Bestandskosten ([Str-2008], [Gün-2013]). Doch während die Bestandskosten infolge der aktuellen Entwicklung der Marktzinsen immer geringer ausfallen, nimmt die Bedeutung der Transportkosten zu ([Str-2008], [Kil-2012]). Dies ist u.a. auf steigende Rohstoffkosten, die Einführung der LKW-Maut in Deutschland, geänderte Lenkzeitverordnungen und größere Entfernungen zwischen Zulieferern und OEM zurückzuführen ([Möl-2008], [Coy-2011]).

Nicht zuletzt aufgrund der gestiegenen Transportkosten konzentrieren die Unternehmen ihre Anstrengungen zur Kostenreduktion vermehrt auf die Logistik. Dass ein nicht unerhebliches Einsparpotenzial besteht, unterstreichen bspw. typische Transportauslastungen in der Automobilindustrie von lediglich 60-70% [Wil-2002].

Zur Optimierung der logistischen Beschaffungsprozesse greifen die OEM immer häufiger auf schlanke Methoden und Prinzipien zurück, die ihren Ursprung in der durch Toyota begründeten Lean Production (schlanke Produktion) haben. Grundgedanke dieser Produktionsphilosophie ist es, dass der Kunde nur für jene Tätigkeiten bereit ist zu zahlen, die einen Mehrwert am Produkt schaffen. Entsprechend ist es die Zielsetzung von Lean Production, Verschwendung in Form von nicht wertschöpfenden Aktivitäten zu eliminieren.

In der Produktion hat sich die Anwendung von Lean-Konzepten bewährt. Durch die Einführung schlanker Produktionssysteme bei in Europa ansässigen OEM konnte die Produktivität bspw. um bis zu 50% gesteigert werden [Hol-2004].

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Mit der Übertragung und Adaption von Lean-Methoden und -Prinzipien auf die Logistik wird u.a. das Ziel verfolgt, den Ressourceneinsatz zu minimieren. Insbesondere wird die Reduktion von Beständen, Transport- und Handhabungsaufwand angestrebt.

Ein in der automobilen Beschaffungslogistik weit verbreitetes Lean-Konzept ist das Just-in-Time(JIT)- bzw. Just-in-Sequence(JIS)-Prinzip (siehe z.B. [Klu-2010]). JIT/JIS beschreibt die produktionssynchrone Belieferung der Montage ohne Lagerzwischenstufe von Teilefamilien mit in der Regel hohem Bedarfswert, -volumen oder -gewicht sowie im Falle von JIS hoher Variantenzahl. Basis einer JIT/JIS-Abrufsteuerung sind minutengenaue Bedarfsinformationen, die aus verbindlich eingeplanten zukünftigen Fahrzeugaufträgen innerhalb eines eingefrorenen Produktionshorizonts abgeleitet werden. Die enge Taktung mit der Produktion ermöglicht geringe Bestände. Der Wegfall der Lagerstufe bewirkt zudem eine Reduktion des Handhabungsaufwands.

Der zunehmenden Bedeutung von Transportkosten trägt eine auf JIT/JS aufbauende Lösung Rechnung, die in die Abrufsteuerung einen Packalgorithmus integriert. Dadurch können voll ausgelastete Trailer berechnet und beim Lieferanten abgerufen werden [Pea-2008].

Für einen Großteil der Zulieferteile sind jedoch die Voraussetzungen für einen lagerlosen Prozess nicht gegeben. Sie werden weiterhin entweder direkt auf dem OEM-Werksgelände oder in Werksnähe zwischengelagert. Die Abrufsteuerung erfolgt vorwiegend bedarfsbezogen, im Gegensatz zu JIT werden die Materialbedarfe aber zu Tagespaketen und ggf. mehrtägigen Zeitscheiben aggregiert. Abrufe werden für jedes Bauteil einzeln generiert. Ein lieferantenbezogenes System mit integriertem Packalgorithmus zur Generierung transportoptimierter Bestellmengen ist derzeit nicht verfügbar.

Im Rahmen von Lean-Initiativen wird häufig die Einführung einer verbrauchsbezogenen Kanban-Steuerung in Erwägung gezogen. Diese hat sich insbesondere bei mehrstufigen Fertigungssystemen bewährt. Bisher beschränkt sich die Anwendung von Kanban in der Beschaffungslogistik jedoch primär auf den Nachschub von Standard- und Normteilen (siehe z.B. [Web-2008]). Analog zu einer Zeitscheibensteuerung sind zudem keine Systeme bekannt, die für den Abruf transportoptimierter Mengen sorgen.

Als weitere Lean-Maßnahme zur Optimierung der Beschaffungsprozesse wird in der Literatur das Milkrun-Konzept vorgeschlagen (siehe z.B. [Bau-2004]). Hierunter versteht man das sukzessive Einsammeln von Teilladungen mehrerer Lieferanten mit oder ohne integrierte Leergutrückführung. Das Konzept ist sowohl für lagerlose als auch lagerhaltige Teileumfänge denkbar und verspricht eine Erhöhung der Auslastung bei gleichzeitiger Senkung der Bestände. Zur weiteren Steigerung der Auslastung sind in bestehende Softwaresysteme Packalgorithmen eingebunden (siehe [inc-2013]). Trotz der genannten Vorteile ist eine weitreichende Umsetzung des Milkrun-Konzepts in der Beschaffungslogistik bislang jedoch nicht erfolgt [Con-2012a].

Während also JIT/JIS-Teileumfänge effizient gesteuert werden können, sind die bestehenden Konzepte für Lagerteile entweder nicht auf die Erzeugung transportoptimierter Bestellmengen ausgelegt und/oder werden nicht in der Breite angewendet. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es daher, für lagerhaltige Teileumfänge ein System zur integrierten Abruf- und Transportsteuerung zu entwerfen, das:

- für eine schlanke Versorgung der Montage von Automobil-OEM sorgt,
- Packalgorithmen zur Bestimmung transportoptimierter Bestellmengen unter Berücksichtigung aller relevanten Praxisrestriktionen enthält und
- Funktionen bereithält, die für einen breiten Einsatz in der Praxis notwendig sind.

Hieraus leiten sich folgende Fragestellungen ab, die es im Rahmen der Arbeit zu beantworten gilt:

- Welche Anforderungen an die Steuerung lagerhaltiger Belieferungen ergeben sich aus Lean-Logistics-Sicht?
- Welche Anforderungen ergeben sich aus der Analyse bestehender Grundkonzepte der automobilen Beschaffungslogistik?
- Wodurch sind existierende Steuerungsansätze geprägt?

- Aus welchen Gründen haben es bestimmte Ansätze nicht zu einem weitreichenden Einsatz in der Praxis geschafft?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in insgesamt sieben Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 1-1). Nach der Einleitung erfolgt in den Kapiteln 2 und 3 eine Beschreibung des Stands der Wissenschaft und Technik. In Kapitel 2 werden zunächst grundlegende Konzepte der automobilen Beschaffungslogistik vorgestellt. Eingangs werden die Prinzipien von Lean Logistics und das Konzept der stabilen Perlenkette als ein wichtiger Baustein eines schlanken Produktions- und Logistiksystems präsentiert. Danach wird auf die unterschiedlichen Konzepte des physischen Materialflusses und der Materialdisposition eingegangen. Hierbei werden sowohl lagerlose als auch lagerhaltige Beschaffungsprozesse näher beleuchtet und deren Eigenheiten herausgearbeitet. Da insbesondere in einer hohen Transportauslastung ein großes Potenzial gesehen wird, widmet sich Kapitel 3 spezifischen Methoden aus Wissenschaft und Praxis zur Erreichung dieses Ziels. Bevor einzelne Ansätze erläutert werden, werden die technischen Rahmenbedingungen skizziert, die es bei der Beladung von Trailern zu beachten gibt.

Im anschließenden Kapitel 4 erfolgt eine Anforderungsanalyse. Zunächst werden aus den Lean Prinzipien und einer kritischen Auseinandersetzung mit existierenden Grundkonzepten wesentliche Anforderungen an ein zukünftiges Konzept zur Steuerung von Lagerteilen abgeleitet. Diese werden strukturiert in allgemeine Anforderungen an das Gesamtsystem sowie spezifische Anforderungen an das Dispositionsverfahren, die Lieferantenkommunikation und den physischen Prozess. Zusätzlich werden die Anforderungen an einen in das Gesamtsystem zu integrierenden Packalgorithmus formuliert. Anschließend werden die in Kapitel 3 skizzierten bestehenden Methoden und Verfahren mit allen aufgestellten Anforderungen abgeglichen, um hieraus die Forschungslücke aufzuzeigen und den Entwicklungsbedarf zu konkretisieren.

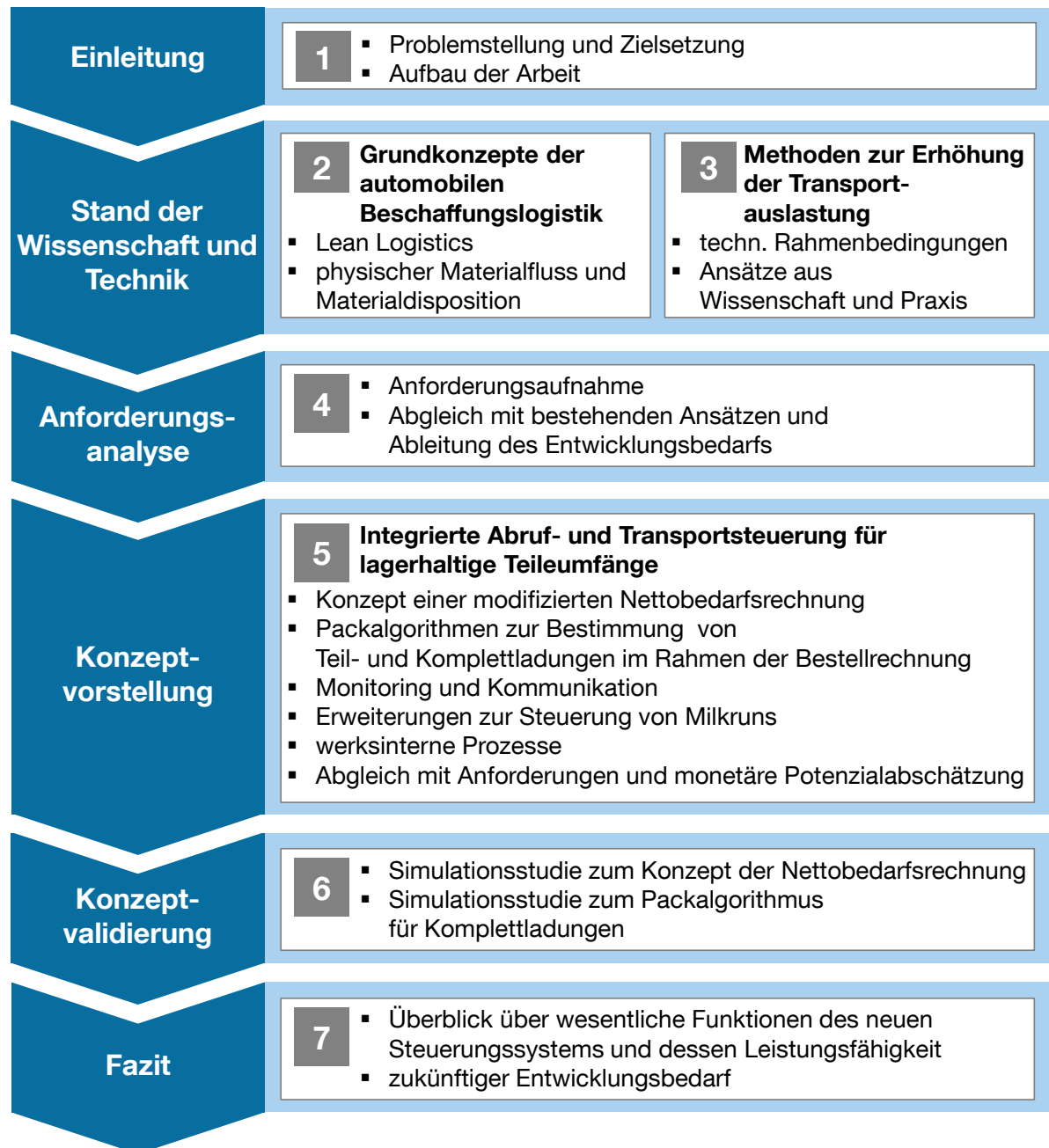


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

In Kapitel 5 wird das entwickelte Gesamtsystem zur Steuerung lagerhaltiger Beschaffungsprozesse vorgestellt. Als erstes werden die Konzepte zu den Materialdispositionsphasen der Nettobedarfsrechnung und Bestellrechnung erläutert. Letztere enthält u.a. verschiedene Packalgorithmen. Des Weiteren werden Konzepte zur Überwachung der Lieferprozesse und Kommunikation mit den Lieferanten beschrieben. Ebenso wird auf Erweiterungen zur Steuerung des Transportmodus Milkrun eingegangen. Überdies werden Anpassungen hinsichtlich der physischen Prozesse vorgeschlagen. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung des entwickelten Systems.

Hierzu werden dessen Eigenschaften mit den in Kapitel 4 formulierten Anforderungen abgeglichen. Zudem wird das monetäre Potenzial einer Einführung bei einem OEM am Beispiel der MAN Truck & Bus AG (MTB) abgeschätzt.

Nach der Beschreibung des entwickelten Systems erfolgt im anschließenden Kapitel dessen Validierung und quantitative Analyse mittels der ereignisorientierten Ablaufsimulation. Hierzu werden zwei Simulationsstudien vorgestellt, in denen durch die Variation von Parametern anhand spezifischer Kennzahlen die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren zur Nettobedarfs- und Bestellrechnung überprüft wird.

Im letzten Kapitel wird ein Resümee gezogen bezüglich des konzipierten Systems zur Steuerung lagerhaltiger Teileumfänge. Zudem werden potenzielle zukünftige Entwicklungsschritte aufgezeigt.

2 Grundkonzepte der automobilen Beschaffungslogistik

In den nachfolgenden Abschnitten sollen zunächst die Grundlagen der Beschaffungslogistik erörtert werden, auf denen das in Kapitel 4 vorgestellte Abrufsteuerungskonzept fußt. Die Beschaffung stellt jenes Teilgebiet der Logistik dar, welches die „wirtschaftliche Versorgung des Unternehmens mit betriebsfremden Gütern“ zum Inhalt hat [Gün-2013]. Die Einordnung der Beschaffungslogistik in den Gesamtkontext der Unternehmenslogistik ist Abbildung 2-1 zu entnehmen.

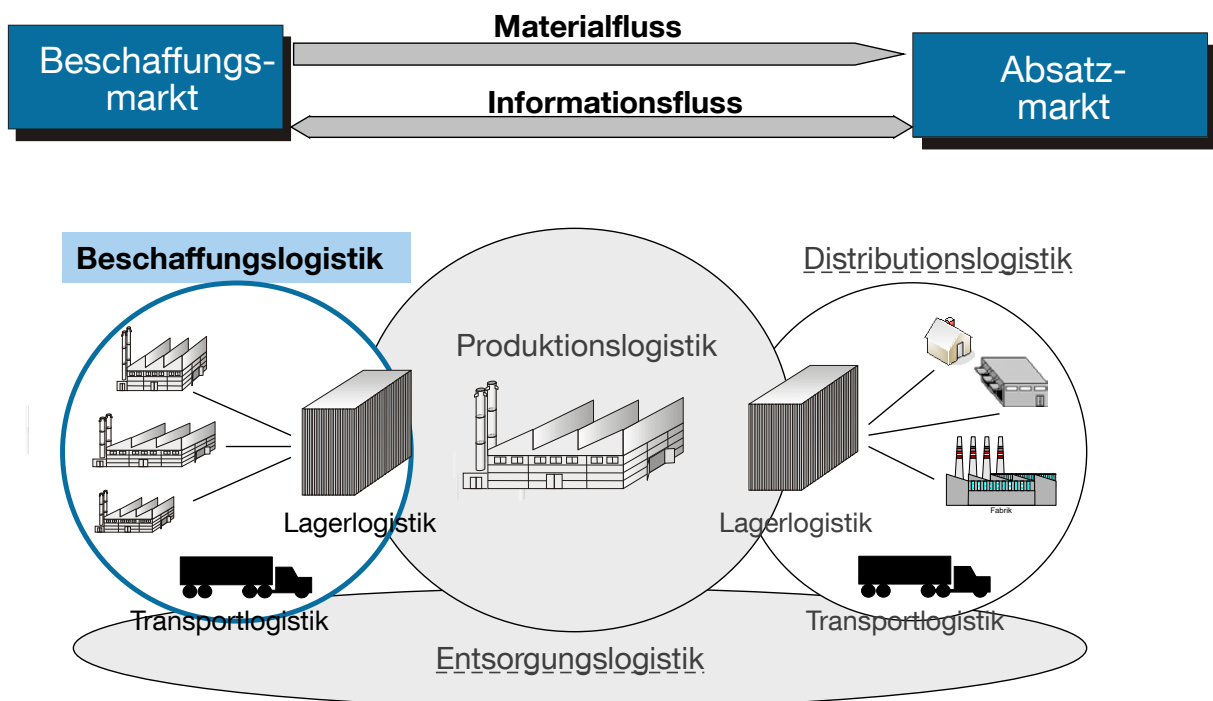


Abbildung 2-1: Einordnung der Beschaffungslogistik (in Anlehnung an [Gün-2013])

Die Beschaffungslogistik kann in eine strategische und operative Komponente aufgliedert werden. Während auf strategischer Ebene Entscheidungen über die grundsätzliche Ausrichtung des Unternehmens, die Struktur des Liefernetzwerks, geeignete Sourcingstrategien sowie Belieferungsformen getroffen werden, deckt die operative Seite die Beschaffungsabwicklung von der Bedarfsplanung, dem Materialabruf, der Belieferung bis hin zur Lagerung ab.

Den strategischen Rahmen für die vorliegende Arbeit bilden die Prinzipien der Lean Logistics (schlanke Logistik), die als erstes dargelegt werden. Des Weiteren wird das

in der Automobilindustrie gängige Konzept der stabilen Auftragsperlenkette beschrieben, das einen wesentlichen Baustein eines schlanken Produktions- und Logistiksystems darstellt. Anschließend wird der Fokus auf die operative Beschaffung gelegt. Es wird ein Überblick über wesentliche Materialfluss- und Steuerungsprozesse gegeben, die der Versorgung von Endmontagen von Automobil-OEM dienen.

2.1 Lean Logistics

Die Prinzipien der Lean Logistics geben die Rahmenbedingungen für das zu entwickelnde Abrufsteuerungssystem vor. Prinzipiell handelt es sich bei der Anwendung von Lean Logistics nicht um einen einzelnen Ansatz, sondern um eine umfassende Management-Philosophie oder Logik, die sich aus Grundsätzen und Methodenbaukästen zusammensetzt (vgl. auch [Jon-1997]).

Im Sinne des Prozessgedankens setzt dabei Lean Logistics direkt an den Prinzipien von Lean Production (schlanke Produktion) an (vgl. [Pal-2008]). Baudin beschreibt Lean Logistics als die Logistikdimension der Lean Production, mit dem Ziel, das richtige Material an den richtigen Ort, in der richtigen Qualität und Quantität möglichst effizient zu liefern [Bau-2004]. Klug sieht Lean Logistics als koordinierendes Bindeglied zwischen Wertschöpfungsprozessen schlanker Fabriken [Klu-2010].

Kernelemente der von Toyota geprägten schlanken Produktion sind Kundenorientierung, Konzentration auf wertschöpfende Tätigkeiten und Vermeidung von Verschwendung. Wertschöpfung stellen dabei jene Prozessschritte dar, für die der Kunde bereit ist zu zahlen [Lik-2004].

Aus Sicht der Lean Production stellen logistische Prozesse wie das Transportieren oder Kommissionieren von Ware per se Verschwendung dar, da sie dem physischen Produkt keinen zusätzlichen Wert hinzufügen (vgl. [Ōno-2009], [Wom-2003], [Tak-2013], [Erl-2010]). Interpretiert man die Logistik als einen nachfolgenden Prozess wie bspw. der Produktion gewünschte Dienstleistung, kann diese auch einen Mehrwert leisten. Vor diesem Hintergrund ergibt sich an ein schlankes Logistiksystem die Forderung nach hohem Servicegrad, möglichst effizienten, ressourcenschonenden Prozessen und der Minimierung von Schnittstellenverlusten (vgl. [Gün-2010]).

Nachfolgend werden in Anlehnung an Meißner und Günthner sowie Womack und Jones Lean-Prinzipien aufgeführt, die zur Erreichung eines schlanken Logistiksystems herangezogen werden können (vgl. [Mei-2009a], [Wom-2003]):

- Die Planung von Logistikprozessen hat die Supply Chain flussaufwärts zu erfolgen (Line-back-Prinzip). Die Auslegung erfolgt entsprechend den Kundenanforderungen des jeweils nachfolgenden Prozesses (Kunden-Prinzip).
- Bei der Materialbelieferung und -bereitstellung sind das Just-in-time- und Flussprinzip anzuwenden, bei dem die Güter nachfolgenden Prozessschritten mit minimalen Durchlaufzeiten/Beständen und möglichst wenig Handhabungsaufwand zur Verfügung gestellt werden.
- Die genauen Liefer- bzw. Bedarfszeitpunkte leiten sich von der Montage als Taktgeber und Ort der Wertschöpfung ab (Takt-Prinzip).
- Die Materialabrufsteuerung soll dabei so ausgelegt werden, dass nur die Materialmenge geliefert wird, die auch tatsächlich benötigt wird (Pull-Prinzip).
- Des Weiteren sind die Prozesse eines schlanken Logistiksystems standardisiert, flexibel und robust zu gestalten, um effektiv und effizient auf sich verändernde Rahmenbedingungen reagieren zu können.
- Zur Beurteilung der aktuellen Situation ist Transparenz über Material- und Informationsflüsse sowie Bestände in den Supply Chains notwendig. Dies schließt auch das Erkennen und Beseitigen von Fehlern mit ein.
- Die Identifikation von Fehlern und Ineffizienzen ist wiederum Basis für einen permanenten Verbesserungsprozess und das Streben nach Perfektion.

Mit Anwendung der genannten Prinzipien und Grundsätze können schlanke Logistiksysteme einen direkten Beitrag zur Steigerung des Unternehmenswerts leisten, indem die Logistikleistung gesteigert sowie Prozess- und Bestandskosten reduziert werden [Lam-2000].

2.2 Perlenkettenkonzept

Als wesentlicher Baustein eines schlanken Produktions- und Logistiksystems hat sich in der Automobilindustrie das Konzept der stabilen Auftragsreihenfolge etabliert. Dieses ist auch als Perlenkettenkonzept bekannt. Hierunter wird eine „Methode der operativen Produktionsplanung und -steuerung (...)“ verstanden, welches der „Optimierung der Produktionsauslastung und Teileversorgung“ dient [Cop-2012].

Auf Basis eines für mehrere Tage eingefrorenen Produktionsprogramms (auch eingefrorener Horizont genannt) kann eine unternehmensübergreifende Stabilität und eine Synchronisierung der Logistik- und Produktionsprozesse erreicht werden. Hierdurch lassen sich die Produktionsprozesse optimal auslegen, Anlieferungen exakt planen, Bestände reduzieren und den Endkunden im Sinne der Kundenorientierung frühzeitig verlässliche Liefertermine kommunizieren.

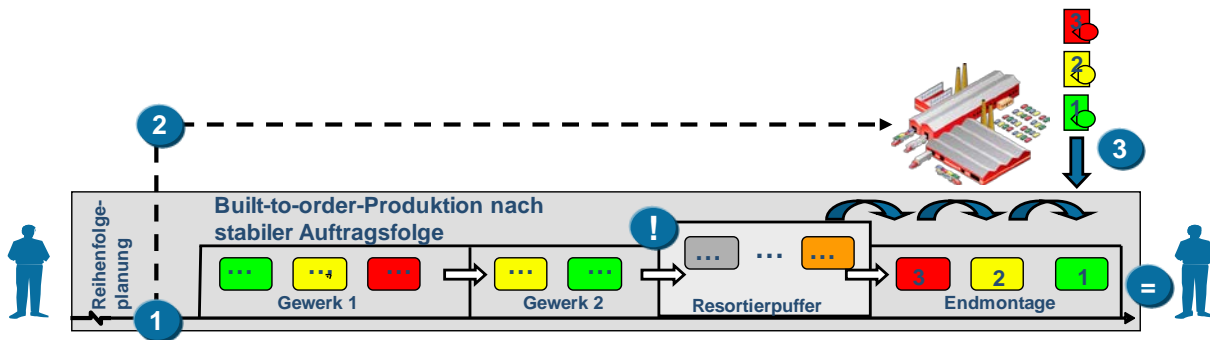


Abbildung 2-2: Wirkungsweise des Konzepts der stabilen Auftragsfolge [Con-2012a]

Die Wirkungsweise lässt sich anhand Abbildung 2-2 veranschaulichen. Einige Tage vor Produktionsbeginn werden Fahrzeugaufträge eingelastet und eine Produktionsreihenfolge mit exakten Produktionsterminen gebildet (1), die bis zur Fertigstellung des Produkts unangetastet bleiben soll (=). Unter Berücksichtigung von Montagerestriktionen und der Dringlichkeit von Aufträgen wird bei der Auftragseinplanung und Reihenfolgebildung eine möglichst gleichmäßige Montageauslastung angestrebt [Klu-2010]. Auf Basis der Montageperlenkette lassen sich wiederum Perlenketten für interne oder externe Lieferanten bilden, indem über Stücklisten der Teilebedarf je Fahrzeugauftrag ermittelt wird und auf Basis der den Montagetakten zugeordneten Verbauinhalte exakte Bedarfstermine bestimmt werden. Die Bedarfsmengen und -inhalte werden anschließend in Form verbindlicher Abrufe an die Lieferanten übertragen (2). Durch die deterministische Datengrundlage kann eine Optimierung der beim OEM eingehenden Zulieferströme erfolgen (3). Bspw. können durch die genaue Kenntnis von Bedarfen und Bedarfszeitpunkten auslastungsmaximierte Transporte gebildet werden. Einen zusammenfassenden Überblick über die Ziel- und Steuergrößen einer perlenkettenbasierten Produktion gibt Abbildung 2-3.

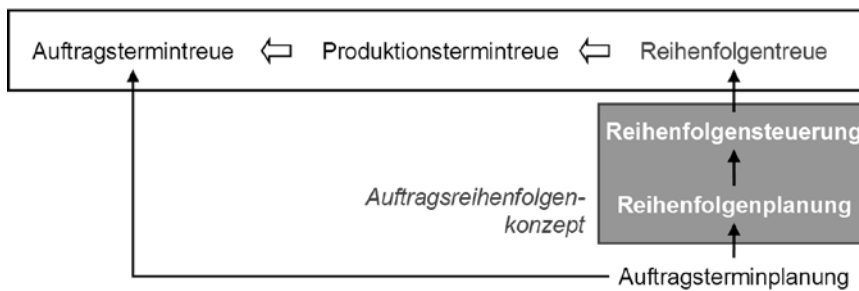


Abbildung 2-3: Ziel- und Steuergrößen des Auftragsreihenfolgekonzepts [Mei-2009b]

2.3 Physischer Versorgungsprozess

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Ausprägungen des physischen Versorgungsprozesses vom Montageband bis zum Lieferanten betrachtet. Zuerst werden die Standardbelieferungskonzepte der Automobilindustrie vorgestellt, die wesentlichen Einfluss auf die einzelnen Teilprozessschritte des Materialflusses vom Montageband bis zum Lieferanten haben. Diese setzen sich aus dem Materialbereitstellkonzept, dem werksinternen Abladekonzept und dem Transportkonzept zusammen, die in dieser Reihenfolge nach dem Line-back-Prinzip näher beleuchtet werden. Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 zeigen wesentliche Ausprägungen der physischen Teilprozessschritte in Abhängigkeit der Belieferungskonzepte. Zusätzlich enthalten die Tabellen Varianten der Materialdisposition, die in Abschnitt 2.4 erläutert werden.

Tabelle 2-1: Ausprägungen der Teilprozessschritte und der Materialdisposition bei lagerloser Belieferung

	Lagerlose Belieferung		
Belieferung	JIT		JIS
Bereitstellung	Yard → Dock → Montage	Dock → Montage	Footprint → Montage
Abladen	dezentral		
Transport	Komplettlading direkt		Komplettlading Milkrun
Materialdisposition	bedarfsgesteuert		

Tabelle 2-2: Ausprägungen der Teilprozessschritte und der Materialdisposition bei lagerhaltiger Belieferung

	Lagerhaltige Belieferung			
Belieferung	Einstufig		Mehrstufig	
Bereitstellung	Lager → Montage	Lager → Supermarkt → Montage	Kommissionierlager → Montage	Supermarkt → Montage
Abladen	zentral		dezentral	
Transport	Komplettlading direkt	Komplettlading Milkrun	Teillading Sammelgut	
Materialdisposition	bedarfsgesteuert		verbrauchsgesteuert	

2.3.1 Belieferungskonzepte

Belieferungskonzepte fassen die häufigsten Formen des physischen Materialflusses vom Lieferanten bis zur ersten Pufferstufe im Werk des OEM nach dem Gesichtspunkt der Materialpufferung in der Supply-Chain zusammen. Unterschieden wird zwischen lagerlosen und lagerhaltigen Belieferungskonzepten [VDA 5010].

Lagerlose Belieferungskonzepte

Lagerlose Belieferungskonzepte verfolgen das Ziel möglichst geringer Materialbestände sowie geringen Handhabungs- und Transportaufwands. Dies wird erreicht, indem die Materialströme von den Lieferanten als ganze LKW-Ladungen hochfrequent, bedarfssynchron und direkt ohne Handling- und Lagerstufen im OEM-Werk eingehen sowie in Nähe der Verbauorte abgeladen werden. Sicherheiten liegen gar nicht oder nur im geringen Maße vor.

Über das Konzept der lagerlosen Belieferung werden in der Regel eine oder mehrere Teilefamilien eines Lieferanten abgewickelt [Sch-2007]. Im Rahmen von Milkruns

(siehe 2.3.3) können aber auch Teilefamilien unterschiedlicher Lieferanten konsolidiert werden. Bei einer Teilefamilie handelt es sich um Bauteile, die sich in ihrer Geometrie ähneln, die gleiche Funktion ausüben und in ähnlichem Produktionsverfahren hergestellt werden können (vgl. [Hoi-1985]). Darüber hinaus werden diese am selben Montagetak oder in unmittelbarer Nähe verbaut, sodass eine Versorgung aus demselben Puffer erfolgen kann. Variantenreiche Teilefamilien werden in Verbaureihenfolge (JIS) angeliefert, bei einer nur geringen Anzahl von Varianten wird in der Regel eine sortenreine Belieferung (JIT) gewählt.

Beim JIT/JIS-Prozess kommen häufig Sonderladungsträger zum Einsatz, die nur zwischen dem OEM und den jeweiligen Lieferanten zirkulieren. Leergut wird zurückgeführt, indem im Verhältnis 1:1 (Behälter nicht klappbar) oder 1:n (Behälter klappbar) Leerguttrailer gegen im Werk eingehende Vollguttrailer ausgetauscht werden.

Das Potenzial einer lagerlosen Belieferung kann insbesondere dann ausgeschöpft werden, wenn hochpreisige Teilefamilien mit hohem Bedarfsvolumen vorliegen. Vorteilhaft wirkt sich auch eine begrenzte Zahl an Abladestellen aus.

Voraussetzung für das Konzept ist das Vorliegen eines eingefrorenen Horizonts und einer stabilen Auftragsperlenkette, sodass die Bedarfstermine und Verbaureihenfolge exakt ermittelt werden können. Der gänzliche oder teilweise Verzicht auf Sicherheiten erfordert zudem eine hohe Lieferqualität, Liefertreue und Lieferbereitschaft der Lieferanten.

Lagerhaltige Belieferungskonzepte

Sind die oben genannten Bedingungen und Voraussetzungen für eine lagerlose Belieferung nicht gegeben, können Zulieferteile über einen lagerhaltigen Prozess beschafft werden. Dabei wird das Material an mindestens einem Ort in der Lieferkette bevorratet. Die gängigsten Formen sind ein- und zweistufige Prozessketten mit ausschließlich OEM-naher bzw. OEM- und lieferantennaher Teilebevorratung. Im Sinne einer schlanken Logistik gilt es, Lagerstufen aufgrund des zusätzlichen Aufwands für Handhabung und Lagerhaltung möglichst zu vermeiden [Eve-1996].

Im Gegensatz zur lagerlosen Belieferung werden bei Lagerhaltung Vollgut- und Leergutprozesse in der Regel separat voneinander abgewickelt. Auf zentralen Höfen werden Leerbehälter gesammelt und anschließend an die Lieferanten zurückgeführt. Bei Universalladungsträgern kommt hierbei häufig das Hauptversorger-

Nebenversorger-Prinzip zum Tragen. Wenn mehrere Werke dieselben Behältertypen von unterschiedlichen Lieferanten beziehen, werden die Lieferanten von jenen Werken mit Leergut versorgt, die im Sinne geringer Transportkosten zu ihnen jeweils am nächsten liegen. Kann das Werk, das als Hauptversorger für einen bestimmten Lieferanten festgelegt wurde, nicht liefern, springt ein anderes Werk als Nebenversorger ein.

Gegen Lagerhaltung sprechen erforderliche Investitionen für Lagerinfrastruktur sowie Lagerbetriebskosten. Zudem verursacht sie hohen Handhabungsaufwand bei Ein- und Auslagervorgängen. Außerdem verleiten Lager dazu, hohe Sicherheitsbestände aufzubauen, um damit Mängel der Planung und operativen Durchführung des Beschaffungsprozesses zu verbergen. Der Aufwand zur Überprüfung der Versorgungssituation seitens der Materialdisponenten kann dann zwar reduziert werden. Jedoch besteht die Gefahr, dass sich bei auslaufenden Bauteilen oder Material mit sporadischem Bedarf unnötig hohe Bestände aufbauen. In der Folge werden Lagerkapazitäten gebunden oder es drohen hohe Verschrottungskosten. Hinsichtlich des Bestands muss eine lagerhaltige Belieferung aber nicht unbedingt von Nachteil sein gegenüber der lagerlosen Belieferung. Ein geringes Bedarfsvolumen kann bei den für JIT/JIS geforderten vollen LKW-Ladungen zu langen Bestandsreichweiten von mehreren Tagen oder sogar Wochen führen. Beim lagerhaltigen Prozess kann dann auf Transportkonzepte zurückgegriffen werden, die den Abruf von Teilladungen und damit höhere Frequenzen erlauben (siehe Abschnitt 2.3.3). Weitere Vorteile ergeben sich durch nachfolgend skizzierte Lagerfunktionen (in Anlehnung an [Ott-2002], [Kle-2010], [Klu-2010]):

- Entkopplungsfunktion:
Der Beschaffungsprozess kann vom Bedarfsprozess entkoppelt werden. Bei zu erwartenden Beschaffungsengpässen besteht die Möglichkeit, frühzeitig Material zu bestellen, das erst später benötigt wird (zeitliche Entkopplung). Daneben kann durch Losbildung eine mengenmäßige Entkopplung erfolgen.
- Sicherheitsfunktion:
Durch Sicherheitsbestände können Risiken auf Beschaffungs- und Bedarfsseite abgesichert werden.
- Spekulationsfunktion:
Ist ein Preisanstieg zu erwarten, besteht die Möglichkeit, größere Mengen zum noch günstigeren Preis zu beschaffen.

- **Sammelfunktion:**
Von unterschiedlichen Lieferanten stammende Bauteile können nach der Auslagerung gebündelt weitertransportiert werden.
- **Verteilfunktion:**
Für unterschiedliche Verbrauchsstellen bestimmte Behälter werden bei der Einlagerung separaten Lagerfächern zugewiesen. Paletten mit Kleinladungsträgern können beim Ein- oder Auslagern vereinzelt werden. Im Bedarfsfall kann dann auf jeden einzelnen Behälter wahlfrei zugegriffen werden. Bei Paletten kann dadurch die Losgröße und somit der Flächenbedarf für die nachfolgende Stufe reduziert werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, Behälterlose durch Umpacken in kleinere Behälter zu reduzieren und diese dem nächsten Prozess zuzuführen. Dies bezeichnet man auch als Portionieren.
- **Sortimentsfunktion:**
Durch den wahlfreien Zugriff können Bauteile fahrzeugauftragsbezogen kommissioniert oder sequenziert werden (Sortimentieren). Das der Produktion in Losgröße eins („One-piece-flow“) zugeführte Material reduziert den Flächenbedarf, die Effizienz in der Montage steigt (kürzere Gehwege, Suchzeiten etc.). Dem gegenüber steht ein erhöhter Aufwand in der Logistik zur Herstellung des One-piece-flows.

2.3.2 Materialbereitstellungs- und Abladekonzepte

Materialbereitstellungskonzepte beschreiben den physischen Materialfluss von der ersten Pufferstufe im Werk bis ans Montageband (vgl. [Bul-1994]). Sie beeinflussen maßgeblich die innerbetriebliche Durchlaufzeit und die zu ihrer Aufgabenerfüllung entstandenen Kosten [Grü-2004].

Materialbereitkonzepte können nach der Anzahl an Handhabungsstufen unterschieden werden. Eine Handhabungsstufe entspricht dabei dem Übergang von einer Pufferstufe zur nächsten. Eine weitere Differenzierung kann nach den Funktionen der Pufferstufen sowie der Art und Anzahl an Materialbewegungen innerhalb dieser (Handhabungsschritte) erfolgen [Mei-2012].

Ausgangspunkt für die prozessuale Gestaltung der Materialbereitstellung sind einerseits die Bereitstellart in der Montage und andererseits das Belieferungskonzept. Bei der Bereitstellart wird zwischen sortenreiner, sequenzierter sowie kommissionierter Bereitstellung unterschieden [Sch-2008]. Entsprechend sind für die beiden letzteren

Fälle innerhalb der Supply Chain Pufferstufen vorzusehen, in denen die Varianten einer Teilefamilie in Montagereihenfolge gebracht werden (Sequenzierung) bzw. auftragsbezogene Sets zusammengestellt werden (Kommissionierung) [Kla-2012] [Gud-2011].

Im Falle der lagerlosen Belieferung existieren zwei wesentliche Formen des Materialbereitstellungsprozesses. Beim Warehouse-on-Wheels-Konzept (siehe z.B. [Ost-2008]) wird die Montage von einem montagenahen Dock direkt aus dem Trailer versorgt. Dem Dock kann zusätzlich noch ein Yard als Sicherheitspuffer vorgeschaltet werden. Alternativ kann das Material auf einer markierten Fläche (Footprint) abgeladen und von dort die Montage versorgt werden.

Bei lagerhaltiger Belieferung und sortenreiner Bereitstellart erfolgt die Versorgung des Bandes aus einem Lager heraus. Soll das Material am Band kommissioniert oder in Sequenz bereitgestellt werden, kann die Durchführung dieser Sortimentsfunktion im Lager oder einem Supermarkt erfolgen (zur Unterscheidung von Lager und Supermarkt siehe [Mei-2012]).

Im Sinne einer handhabungsarmen schlanken Versorgung ist eine einstufige Materialbereitstellung mit Direktbelieferung in einen dezentralen Supermarkt anzustreben. Bei instabilen Prozessen, niedrigen Anlieferfrequenzen und stark begrenzter Supermarktfäche ist dem Supermarkt ggf. noch ein Lager vorzuschalten (zweistufiger Supermarkt-Prozess).

Das Abladekonzept beschreibt den werksinternen Prozessabschnitt vom Wareneingang bis zur ersten Pufferstufe. Im Wareneingang erfolgt die administrative Warenvereinnahmung. Dies umfasst die Annahme, Überprüfung und IT-technische Erfassung von Frachtpapieren und Lieferscheinen. Daneben wird eine Kontrolle der eingehenden Lieferungen hinsichtlich ihrer Vollständigkeit auf Behälter- oder Einzelteilenebene sowie der Unversehrtheit der Behälter durchgeführt [Hom-2007]. Soll-Ist-Mengenabweichungen werden dabei systemtechnisch erfasst. Im Rahmen von Stichproben werden die Zulieferteile zudem bezüglich Material- und Funktionsfehler untersucht [Klu-2010]. Aus Materialdispositionssicht ist vor allem die Verbuchung der Ware im Werksbestand von Relevanz, da dieser wesentliche Grundlage unterschiedlicher Abrufsteuerungsverfahren ist (siehe Abschnitt 2.4.). Als weitere Aufgaben des Wareneingangs kommen ggf. das Entladen, Puffern und Umsortieren hinzu [Mar-2011]. Dies hängt davon ab, ob das Material zentral oder dezentral abgeladen wird und welches Belieferungskonzept vorliegt.

Beim lagerlosen Footprint-Prozess wird das Material vollständig und direkt an einer oder mehreren Abladestellen entladen. Liegen mehr als eine Abladestelle vor, erfolgt eine Sortierung der Ware bereits beim Lieferanten. Beim Warehouse-on-Wheels-Konzept verbleibt das Material auf dem Trailer, bis es peu à peu in Verbauortnähe entnommen wird. Ist ein Yard (Hof) vorgeschaltet, wird der Trailer zunächst zu einem zentralen Yard gebracht. Beim reinen Dock-Prozess wird der Trailer direkt am Dock (verbauortnaher Stellplatz) abgestellt. Ggf. wird der Vollguttrailer gegen einen Leerguttrailer getauscht, der an den jeweiligen Lieferanten zurückgeht.

Wird das Material eingelagert, kann das Material entweder zentral oder dezentral abgeladen werden. Zur Reduktion der internen Durchlaufzeit ankommender LKW wird bei hoher Anzahl an Abladestellen und unsortierter Ware das Material zentral entladen, nach Abladestellen sortiert und ggf. mit Ware anderer Lieferanten konsolidiert. Anschließend werden die Zulieferteile bspw. über Routenverkehre an die entsprechenden Lagerorte verteilt. Bei dezentraler Abladung dagegen werden die Trailer direkt an den Lagerorten entleert.

2.3.3 Transportmodi

Während Belieferungskonzepte durch die Anzahl an Lagerstufen und die zeitliche Granularität ihrer Steuerung geprägt sind, beschreiben Transportmodi den Beschaffungsweg vom Lieferanten bis zur ersten Pufferstufe im OEM-Werk anhand der Konsolidierung zufließender Materialströme. Haupttransportmittel in der Automobilindustrie ist u.a. aufgrund der engmaschigen Verkehrsinfrastruktur und der hohen Flexibilität der LKW [Klu-2010]). Wesentliche Transportkonzepte sind Direktverkehre, Sammelguttransporte und Milkruns, die nachfolgend erläutert werden.

Direktverkehr

Der Direktverkehr ist die einfachste Transportform. Ohne Zwischenstopp wird das Material direkt vom Lieferanten zum OEM geliefert (siehe Abbildung 2-4 links). In diesem Modus wird die Anlieferung von kompletten LKW-Ladungen angestrebt. Demzufolge kommen Direkttransporte insbesondere bei Lieferanten mit hohem Bedarfsvolumen zum Einsatz. Abgerechnet wird häufig zu einem Fixpreis je Trailer.

Direktverkehre kommen sowohl für lagerlose als auch lagerhaltige Belieferung infrage. Vorteile des Konzepts sind geringe Frachtkosten und geringer Aufwand im Wa-

reneingang aufgrund der hohen Transportauslastung, eine einfache Steuerung und geringer Handhabungsaufwand [Klu-2010]. Bei geringem Bedarfsvolumen führt das Konzept jedoch zu niedrigen Anlieferfrequenzen und hohen Bestandsreichweiten. Dann kommen die Konzepte Sammelgutverkehr und Milkrun zum Einsatz, bei denen Teilladungen mehrerer Lieferanten gebündelt werden.

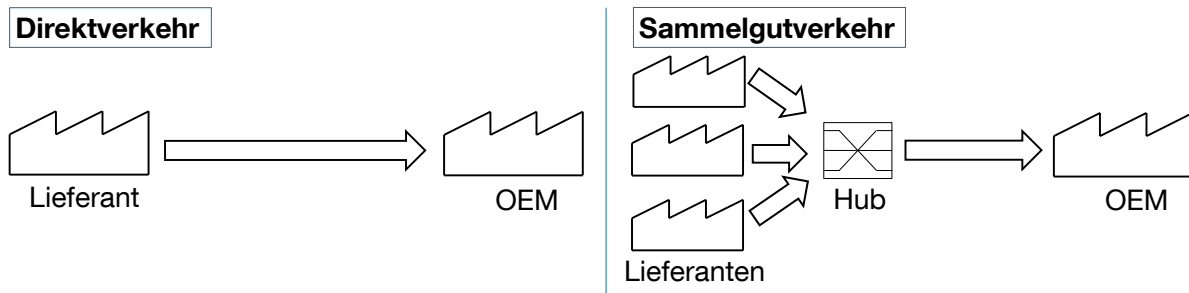


Abbildung 2-4: Direktverkehr und Sammelgutverkehr

Sammelgutverkehr

Bei Sammelgutverkehren teilt sich die Transportkette in mindestens zwei Abschnitte auf: einen Vorlauf und Hauptlauf, ggf. zusätzlich einen Nachlauf [Gün-2013]. Sammelgutverkehre werden in der Regel im Rahmen des Gebietsspeditionskonzepts abgewickelt. Hierzu wird der komplette geographische Beschaffungsraum des OEM in feste Gebiete aufgeteilt. Diese können bspw. Postleitzahlengebiete, Bundesländer oder Länder sein. Für die Planung und Durchführung der Transporte aus den jeweiligen Gebieten heraus werden Spediteure beauftragt, die in der Regel bereits über eigene Hub-and-Spoke-Netzwerke verfügen. Im Vorlauf werden die Teilladungen der Lieferanten zu einem nahegelegenen Hub innerhalb des Speditionsgebiets gebracht und von dort gebündelt im Hauptlauf zu den Werken des OEM transportiert (siehe Abbildung 2-4 rechts).

Häufig übernimmt der Gebietsspediteur die Transporte für mehrere unterschiedliche OEM. Dann wird in OEM-Nähe ein weiterer Umschlagspunkt eingesetzt, um von dort im Nachlauf die Feinverteilung der Ware auf die einzelnen OEM vorzunehmen. Auf diese Weise können Synergien gehoben werden. Die Fixkosten für den Betrieb der Hubs werden von mehreren Unternehmen gemeinsam getragen. Zudem sind bei einem insgesamt gestiegenen Transportvolumen Glättungseffekte zu erwarten, so dass die Betriebseinrichtungen des Spediteurs effizienter genutzt werden können. Des Weiteren verspricht eine unternehmensübergreifende Konsolidierung höhere Transportauslastungen in Vor- und Hauptläufen. Nachteilig gegenüber Direktverkeh-

ren erweist sich aber der Umstand, dass die Hubs in jedem Falle zusätzlichen Handhabungsaufwand verursachen. Zudem ist die Steuerung der Transporte deutlich komplexer. Das Konzept wird ausschließlich zur lagerhaltigen Belieferung genutzt. [Con-2012b]

Im Modus des Sammelgutverkehrs werden die Teilladungen der jeweiligen Lieferanten separat abgerechnet. Je größer die einzelnen Teilladungen, desto geringer wird der Aufwand für den Spediteur zur Transportkonsolidierung. Entsprechend weisen die Transporttarife mit steigender Transportmenge in der Regel einen degressiven Kostenverlauf auf (vgl. [Ghi-2004]).

Milkrun

Im Transportmodus Milkrun werden in einem Transport und ohne Konsolidierungshub nacheinander die Teilladungen mehrerer, geographisch nah aneinander liegender Lieferanten eingesammelt und zum OEM gebracht. Im Gegensatz zum Gebietsspeditionskonzept werden die Transporte in der Regel vom OEM selbst geplant. Beim Milkrun i.e.S. beginnt der Transport bereits beim OEM mit Leergut, das mit jedem Stopp bei den jeweiligen Lieferanten gegen Vollgut getauscht wird. Demgegenüber steht die Sammeltour, bei der die Leergutrückführung nicht integriert ist (siehe Abbildung 2-5). Da in der Praxis für beide Transportformen häufig der Begriff Milkrun synonym benutzt wird, soll im Rahmen der Arbeit an dieser Konvention festgehalten werden.

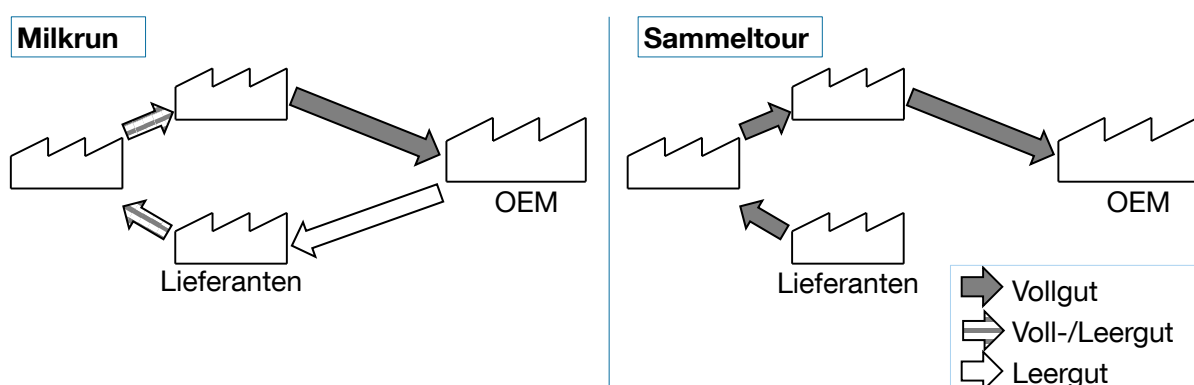


Abbildung 2-5: Milkrun mit und ohne integrierte Leergutrückführung

Neben dem Aspekt der Leergutintegration können Milkruns noch anhand zahlreicher anderer Merkmale differenziert werden. Eine Übersicht gibt Tabelle 2-3. Zum einen eignen sich Milkruns sowohl zur lagerlosen als auch lagerhaltigen Belieferung. Aus

Transportsicht können sie im Vorlauf oder Hauptlauf eingesetzt werden. Baudin gibt als weiteres Unterscheidungsmerkmal die Milkrun-Entfernung an [Bau-2004]. Dieses Kriterium ist insofern von Relevanz, als bei größeren Entfernungen die gesetzlich vorgeschriebenen Lenk- und Ruhezeiten bei der Planung mit zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus können Milkruns auch mehr als ein Empfangswerk haben. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine geographische Nähe der Werke. In der Praxis sind die einzelnen Werke der OEM jedoch in der Regel weiter voneinander entfernt. Des Weiteren kann es im Werk eine oder mehrere Abladestellen geben. Hinsichtlich der Leergutrückführung kann noch weiter unterteilt werden in 1:1- und flexiblen Tausch. Beim flexiblen Tausch erfolgt eine integrierte Leergutrückführung bspw. mit jedem zweiten Milkrun. Der flexible Modus wird bei stauchbaren Behältern eingesetzt.

Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Route, der Transportzyklus und die Abhol- und Ankunftszeiten. Praxislösungen sind entweder vollständig statisch mit regelmäßiger Überplanung der Routen oder vollständig dynamisch (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3.2).

Tabelle 2-3: Milkrun-Morphologie (in Anlehnung an [Bau-2004], [Con-2012b], [Geh-2004], [Klu-2010])

Merkmal		Ausprägung		
1	Belieferungskonzept	lagerlos		lagerhaltig
2	Transportstufe	Vorlauf		Hauptlauf
3	Entfernung zum OEM	klein		groß
4	Anzahl Empfänger	1		> 1
5	Anzahl Abladestellen	1		> 1
6	Leergutrückführung	flexibel	1:1-Tausch	separat
7	Route	statisch		dynamisch
8	Transportzyklus	statisch		dynamisch
9	Abhol- und Ankunftszeiten	statisch		dynamisch

Insbesondere bei dynamischen Milkruns ist ein erhöhter Steuerungs- und Kommunikationsaufwand zu verzeichnen. Im Vergleich zum Gebietsspeditionskonzept kann aber der Handhabungsaufwand in den Hubs vermieden werden. Synergien im Verbund mit anderen Unternehmen können jedoch nicht gehoben werden. Wird ein Milkrun aus ehemaligen Direktrelationen gebildet, können die Transportfrequenz erhöht und somit Bestandskosten reduziert werden. Gleichzeitig steigen die Kosten durch häufigere Stopps und Transportumwege.

2.4 Materialdisposition

In diesem Abschnitt wird auf grundlegende Merkmale und Verfahren der Materialdisposition eingegangen. Diese umfasst alle planerischen und steuernden Tätigkeiten, die durchgeführt werden müssen, um ein Unternehmen mit betriebsfremden Gütern mengen- und termingerecht unter Beachtung der entstehenden Kosten zu versorgen [Jun-2006]. Hierbei gilt es für den Materialdisponenten, einen Kompromiss aus den gegenläufigen Hauptkostenblöcken, den Bestands- und Transportkosten, zu finden [Esc-1990]. Auf diese hat der Disponent durch die Wahl und Auslegung des Dispositionsverfahrens Einfluss, welches auf unterschiedliche Art und Weise Bestellungen bei den Lieferanten generiert.

Bei den Verfahren kann zwischen bedarfs- und verbrauchsgesteuerter Disposition unterschieden werden. Als Dispositionsphasen werden außer bei der bestandsorientierten und reinen Verbrauchssteuerung die Bruttobedarfsrechnung, Nettobedarfsrechnung und Bestellrechnung in jeweils unterschiedlicher Ausprägung durchlaufen. Das Ergebnis der Berechnung wird den Lieferanten in Form von Materialabrufen übermittelt. Hierbei unterscheidet man zwischen dem Lieferabruf (LAB), Feinabruf (FAB) und produktionssynchronen Abruf (PAB) [Her-2005]. Der Lieferabruf deckt einen Bedarfszeitpunkt ab zwei Wochen bis zu 18 Monate im Voraus ab. Die Bedarfe werden erst auf Wochen, ab einem festzulegenden Vorlauf zum tatsächlichen Bedarfszeitpunkt dann auf Monatsebene im Sinne einer Bedarfsvorschau aggregiert und dienen dem Lieferanten zur mittel- bis langfristigen Produktionsplanung. Tagesgenaue Bedarfe für die nächsten zwei Wochen werden dem Lieferanten im Rahmen eines Feinabrufs übermittelt. Unternehmens- und lieferantenspezifisch wird ein Zeitraum definiert, ab dem Bestellungen verbindlich werden. Der produktionssynchrone Abruf, der für die lagerlose Belieferung eingesetzt wird, hat in der Regel einen noch kürzeren Vorlauf und beinhaltet zusätzlich minutengenaue Bedarfsinformationen.

Für die genannten Abrufarten existieren entsprechende Industriestandards. Bekannte Formate sind der Lieferabruf 4905, Feinabruf 4915 und produktionssynchrone Abruf 4916 des Verbandes der Automobilindustrie [VDA 4905] [VDA 4915] [VDA 4916]. Gängig sind auch die europaweit bzw. global standardisierten Odette- oder EDifact-Abrufprotokolle [Klu-2010]. Versandinformationen des Lieferanten werden an den OEM in Form von elektronischen Lieferscheinen übermittelt. Auch hier wurden Standards wie bspw. die VDA-Empfehlung 4913 entwickelt [VDA 4913].

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Dispositionsverfahren - auch im Hinblick auf die Belieferungsform - näher beschrieben.

2.4.1 Bedarfsgesteuerte Disposition

Bei der bedarfsgesteuerten Disposition sind der Auslöser für den Materialnachschub zukünftige Bedarfe. Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung zukünftiger Bedarfe mittels einer deterministischen Rechnung. Voraussetzung ist ein bekanntes zukünftiges Produktionsprogramm, wie es im Rahmen des Perlenkettenkonzepts vorliegt. Anhand der Fahrzeugaufträge, der zugehörigen Produktionsstartzeitpunkte, der Verbautakte und einer Stücklistenauflösung können Bruttosekundärbedarfsmengen und -zeitpunkte auf Einzelteilebene ermittelt und somit auch zur taktgenauen Einplanung von JIT/JIS-Belieferungen herangezogen werden (vgl. [Arn-2013], [Wan-2007]). Eine Einordnung des Sekundärbedarfs in die Materialbedarfsarten ist Abbildung 2-6 zu entnehmen.

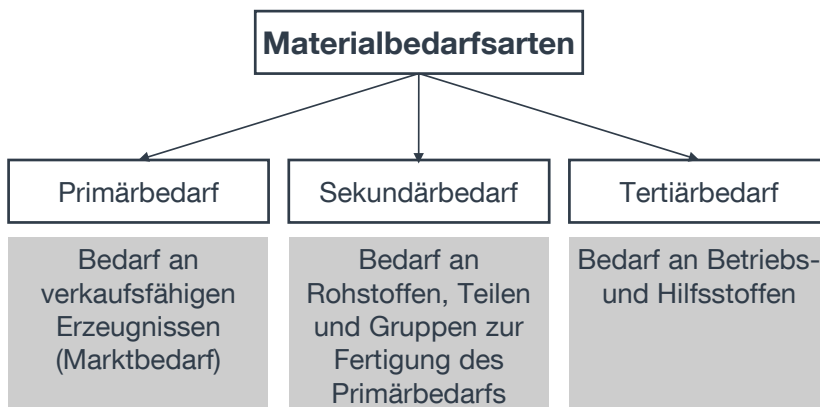


Abbildung 2-6: Differenzierung von Materialbedarfsarten nach Ursprung und Erzeugnisebene (in Anlehnung an [Har-2002])

Bei lagerloser Belieferung können aus den Bruttobedarfen abzüglich der Werksbestände und verbindlicher Bestellungen die Nettobedarfe ermittelt werden. Anschließend werden die Nettobedarfe um den Betrag einer einzustellenden Bedarfsvorlaufzeit (BVZ) vorgezogen. Abzüglich der werksinternen Durchlaufzeit entspricht diese einem zeitlichen Sicherheitspuffer, auch Sicherheitsreichweite genannt. Die so ermittelten Bedarfsmengen und -zeitpunkte werden an den Lieferanten als Materialabruf mindestens täglich übermittelt. Die Zusammenstellung der Transporte auf Basis der Materialabrufdaten wird in der Regel den Lieferanten überlassen. Da es im eingefrorenen Produktionshorizont zu Planabweichungen kommen kann, sind in der Indust-

rie mehrstufige Materialabrufe hin zum Lieferanten üblich, die ab einem mit dem Lieferanten vereinbarten Vorlauf zum Verbaupunkt verbindlichen Charakter haben.

Zur Steuerung lagerhaltiger Teile werden die Bruttobedarfe analog zu JIT/JIS deterministisch ermittelt. Darüber hinaus erfolgt eine Aggregation der Bedarfe auf Planperioden. Diese entsprechen in der Regel Tagen. Im Anschluss erfolgt die Nettobedarfsrechnung. Ist in einer Planperiode der Bruttobedarf größer als der verfügbare Bestand, entsteht ein Nettobedarf in Höhe der Differenz. Der verfügbare Bestand entspricht dem Lagerbestand zu Beginn der Planperiode zuzüglich verbindlich eingepannter Bestellungen und ggf. abzüglich eines Sicherheitsbestandes (SB) und von Materialreservierungen (vgl. z.B. [Sch-2001], [Arn-2013]). Danach erfolgt ggf. eine Vorverlegung der Nettobedarfe um den Betrag einer einzustellenden BVZ.

Im Rahmen der Bestellrechnung werden Losgrößen gebildet. Basis hierfür sind Rundungsparameter wie etwa das Behälterlos (auch Packlos genannt) und ein Lieferplankalender. Tabelle 2-4 beschreibt die einzelnen Dispositionsphasen anhand eines Beispiels. Die ermittelten stückgenauen Nettobedarfe werden zunächst auf Tagesbasis zu ganzzahligen Vielfachen des Packloses zusammengefasst. Diese Tagesbedarfe werden anschließend möglichen Anliefertagen auf Basis eines Lieferplankalenders zugeordnet. Das Ergebnis sind über die Woche verteilte ein- oder mehrtägige Zeitscheiben als Abrufmengen. Im Beispiel sieht der eingestellte Lieferplankalender lediglich eine Belieferung am ersten und dritten Tag der Woche vor. Die erste Abrufmenge beinhaltet folglich packlosaggregierte Bedarfe der ersten zwei Wochentage, die zweite Abrufmenge jene Bedarfe der anschließenden drei Wochentage.

Tabelle 2-4: Beispielhafte Durchführung der drei Dispositionsphasen bei bedarfsgesteuerter Disposition

		Tag	1	2	3	4	5
		Bruttobedarf	80	100	60	90	120
Nettobedarfsrechnung	Lagerbestand	280					
	Sicherheitsbestand	50					
	Materialreservierungen	0					
	Verfügbarer Bestand	230	150	50	0	0	0
	Nettobedarf		0	0	10	90	120
	Nettobedarf inkl. BVZ (=2d)		10	90	120	80	70
Bestellrechnung	Aggregation Packlos (=50)		50	50	150	50	100
	Bestellmenge nach Aggregation		100		300		
	Lieferplankalender						

Im Rahmen einer rollierenden Planung erfolgt die Neuberechnung der Nettobedarfe und Bestellmengen, die an die Lieferanten in Form von Materialabrufen kommuniziert werden. In der Regel geschieht dies täglich oder wöchentlich. Die Häufigkeit kann vom Disponenten individuell vorgegeben werden.

Im Vergleich zu JIT/JIS kann es im lagerhaltigen Prozess vermehrt zu Unter- oder Überlieferungen und Mehr- oder Minderverbräuchen kommen. Mehr- oder Minderverbräuche sind fehlerhaften Teilen, Schwund, Stücklistenfehlern oder unerwarteten Auftragsverschiebungen trotz eingefrorenen Produktionshorizonts geschuldet. Wird systemisch ein bisher dem Lieferanten noch nicht kommunizierter zusätzlicher Bedarf festgestellt, dessen Bedarfszeitpunkt heute ist oder bereits in der Vergangenheit liegt, wird dieser als Sofortbedarf deklariert, der im nächsten Planungslauf zu Lieferrückstand wird. Diese Position bleibt so lange offen, bis die entsprechende Menge durch den Lieferanten oder ggf. Minderverbräuche ausgeglichen ist.

Sofortbedarfe müssen jedoch nicht zwangsläufig zu einem Bandstopp führen. Unter Umständen können Sicherheitspuffer und zukünftig eingeplante Materialzugänge zur Deckung von Bedarfen herangezogen werden, für die sie ursprünglich nicht vorgesehen waren. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies als Kannibalisierungseffekt bezeichnet.

Durch die genannten Planabweichungen kann sich der neue Materialabruf vom letzten unterscheiden. Dies führt zu einer Abrufnervosität, die negative Auswirkungen sowohl für den Disponenten als auch den Lieferanten hat. Für den Disponenten ist die Versorgungssituation nur noch schwer zu überschauen. Dem Lieferanten fehlt

eine verlässliche Datenbasis für seine eigene Produktionsplanung. Abhilfe kann ein mit dem Lieferanten individuell vereinbarter Fixierungshorizont schaffen. Für diesen Zeitraum eingeplante Bestellmengen können nicht mehr angetastet werden. Tritt nun innerhalb des Fixierungshorizonts ein Mehrbedarf auf, wird dieser beim nächsten Rechenlauf ans Ende des Fixierungshorizonts gelegt und fixiert. Hierbei besteht die Gefahr, dass das Material zu spät im Werk eingeht und somit ein Bandstopp provoziert wird. Durch ausreichende Bemessung von SB und/oder Sicherheitsreichweite kann dies verhindert werden.

2.4.2 Verbrauchsgesteuerte Disposition

Varianten der Verbrauchssteuerung sind die stochastische Disposition, bestandsorientierte Verfahren oder eine reine Verbrauchssteuerung per Kanban. Bei der stochastischen Disposition werden zukünftige Bedarfe anhand historischer Verbräuche prognostiziert. Hierzu werden bspw. Methoden der Mittelwertbildung (gleitender Mittelwert, gewichteter gleitender Durchschnitt), Methoden der exponentiellen Glättung (exponentielle Glättung erster oder zweiter Ordnung) oder die Regressionsanalyse herangezogen [Har-2002]. Die nachfolgenden Dispositionsphasen der Nettobedarfsrechnung und Bestellrechnung erfolgen analog zur bedarfsgesteuerten Disposition.

Bestandsorientierte Dispositionsverfahren sind in der Literatur auch als Bestellpolitiken oder Lagerhaltungsmodelle (siehe z.B. [Ali-2005]) bekannt. Der erste Schritt der Materialbedarfsplanung, die Bruttobedarfsrechnung, dient der Auslegung der Steuerungsparameter. Sie sollte in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, ist aber im Gegensatz zur bedarfsgesteuerten und stochastischen Disposition nicht permanenter Bestandteil der operativen Steuerung. Auf Basis historischer Verbräuche ist der zukünftige Bedarf grob abzuschätzen. Anschließend werden die Dispositionsparameter festgelegt, die von der gewählten Bestellpolitik abhängen. Hierbei kann zwischen dem Bestellpunktverfahren und der rhythmischen Disposition unterschieden werden.

Beim Bestellpunktverfahren wird der Lagerbestand zuzüglich offener Bestellungen permanent überprüft. Es wird dann eine Bestellung ausgelöst, wenn ein festzulegender Bestellpunkt unterschritten wird. Dieser wird auch als Meldebestand s bezeichnet. Er ist so hoch zu wählen, dass der Bedarf bis zum Eintreffen der Bestellung in der Wiederbeschaffungszeit gedeckt ist. Anhaltspunkt hierfür sollte der

durchschnittliche Bedarf in der Wiederbeschaffungszeit sein, der sich aus der Bedarfsschätzung der ersten Dispositionsphase ableiten lässt. Aufgrund stochastischer Schwankungen ist zusätzlich ein SB zu wählen. Die Bestellmenge richtet sich nach dem gewählten Losgrößenverfahren. Mittels der Andler-Formel lässt sich bspw. die optimale Bestellmenge in Abhängigkeit bestellfixer und Lagerhaltungskosten ermitteln. Bei der rhythmischen Disposition wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen nachbestellt. Die Bestellmenge entspricht einem einzustellenden Maximalbestand abzüglich des Lagerbestands und offener Bestellmengen [Jun-2006]. Daneben existieren noch Mischformen wie beispielweise eine Bestellpunktdisposition mit täglicher Überprüfung.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer dynamischen Festlegung der Parameter Bestellpunkt, Bestellmenge bzw. Maximalbestand auf Basis der aktuellen Bedarfssituation [Gud-2002]. In diesem Fall ist dann eine permanente, feingranulare Bedarfsprognose notwendig.

Als reine Verbrauchssteuerung ist das Kanban-Prinzip zu betrachten. Es wird immer genau die Menge nachbestellt, die verbraucht wurde. Bestände oder zukünftige Bedarfe müssen nicht herangezogen werden. Kanban stammt aus dem Japanischen und bedeutet „Karte“ [Klu-2010]. Eine erste Umsetzung bei Toyota in der Fertigungssteuerung geht bereits auf das Jahr 1953 zurück [Ōno-2009]. In seiner ursprünglichen Form wurden an Behältern Karten angebracht, die nach dem Leerwerden des Behälters von diesem gelöst, dem vorausgehenden Prozess zugeführt wurden und als Signal zur Nachproduktion eines Behälterloses dienten. Durch eine vorgegebene Anzahl an Karten ist der Maximalbestand nach oben hin begrenzt.

In der Beschaffungslogistik kommen in der Regel eKanban-Systeme zum Einsatz. Der Verbrauch eines Packloses wird dabei durch Einscannen eines leer gewordenen Behälters registriert und diese Information elektronisch an den Lieferanten übermittelt. Mit diesem ist eine feste Wiederbeschaffungszeit für einen Vollbehälter vereinbart. Die Ermittlung der für eKanban erforderlichen Behälterzahl leitet sich aus dem durchschnittlichen Materialbedarf ab, der sich analog zur Bestandssteuerung aus historischen Verbräuchen ermitteln lässt. Die Formel lautet wie folgt [Dic-2009]:

$$\begin{aligned} & \text{Anzahl}_{\text{Kanbanbehälter}} && (2-1) \\ & = \left(\left\lceil \frac{\text{Tagesverbrauch}_{\text{durchschnittlich}} \cdot \text{Wiederbeschaffungszeit}}{\text{Packlos}} \right\rceil \right. \\ & \left. + 1 \right) \cdot \text{Sicherheitsfaktor} \end{aligned}$$

Für die Standardformel wird der durchschnittliche Verbrauch herangezogen. Dies bedingt jedoch auch einen relativ gleichmäßigen Bedarf. Bei stark schwankenden Bedarfen ist der maximale Tagesverbrauch zu wählen. Auf einen Sicherheitsfaktor kann dann verzichtet werden.

3 Methoden zur Erhöhung der Transportauslastung

Bei Teilladungen obliegt die Bildung möglichst hoch ausgelasteter Transporte dem Gebietsspediteur. Bei Komplettladungen dagegen kann der OEM die Laderaumausnutzung der Transportmittel selbst beeinflussen. Ansätze zur Erhöhung des Auslastungsgrades werden nun in diesem Kapitel vorgestellt. Die Grundlage für deren Entwicklung bilden die technischen Rahmenbedingungen bei der Beladung, dem Transport und der Entladung, die als erstes skizziert werden. Eine optimale Ausnutzung von Laderäumen haben Lösungsverfahren des Operations Research zu so genannten Containerbeladungsproblemen zum Ziel, die im Anschluss näher beleuchtet werden. Darauf folgt eine Beschreibung kommerzieller Softwarelösungen, die sich ebenfalls mit der Optimierung von Stauräumen befassen. Den Schluss bildet die Vorstellung von Verfahren in der Praxis, die auf bestehenden Dispositionssystemen aufbauen.

3.1 Technische Rahmenbedingungen

Bei der Entwicklung von Verfahren zur Erhöhung der Transportauslastung ist eine Kenntnis der technischen Rahmenbedingungen bei der Beladung, dem Transport und der Entladung unabdingbar. Dies umfasst sowohl Verpackungs- und Transporttechnik als auch prozesstechnische Aspekte. Im Sinne eines einheitlichen Verständnisses werden zunächst grundlegende Begriffe definiert. Anschließend wird auf allgemeine und automobilspezifische Eigenschaften von Verpackungen eingegangen. Danach wird auf Transportmittel mit Fokus auf Lastkraftwagen eingegangen, da diese vornehmlich in der Beschaffungslogistik der Automobilbranche eingesetzt werden. Darüber hinaus werden die Rahmenbedingungen beschrieben, die sich aus dem Lade- und Transportprozess ergeben. Dies umfasst primär Grundlagen der Umschlagstechnik und der Ladungssicherung.

3.1.1 Begriffsbestimmungen

In der Literatur herrscht keine einheitliche Nomenklatur und Beschreibung grundlegender Begriffe des Lade- und Transportprozesses. Nachfolgend werden eigene,

zum Teil aber auch auf anderen Arbeiten basierende Definitionen vorgenommen (vgl. [DIN 30781-1], [VDA 5002], [Kaß-2011], [Hom-2007]).

- **Packgüter:**
Allgemein werden als Packgüter zu verpackende Gegenstände bezeichnet. Diese können somit de facto selbst auch Verpackungen sein. Als Packgüter werden in dieser Arbeit jedoch ausschließlich noch unverpackte Zulieferteile adressiert.
- **Ladungsträger:**
Der Ladungsträger beschreibt eine Verpackung, welche die Zulieferteile trägt und ggf. umschließt. Es besteht die Möglichkeit, dass ein Ladungsträger andere Ladungsträger beinhaltet. Es wird unterschieden zwischen sowohl tragenden als auch umschließenden Ladungsträgern (Behälter) und nur tragenden Ladungsträgern (Palette). Des Weiteren wird nach Klein- und Großladungsträgern (KLT/GLT) unterschieden.
- **Packhilfsmittel:**
Hierunter ist ergänzendes Verpackungsmaterial ohne tragende Funktion wie bspw. Deckel oder Zwischenlagen zu verstehen.
- **Packlos/Behälterlos:**
Das Packlos/Behälterlos entspricht einer festgelegten Zahl an Zulieferteilen je Behälter.
- **Handling Unit (HU):**
Die HU beschreibt einen Behälter auf unterster Verpackungsstufe einschließlich der darin enthaltenen Packgüter, deren Anzahl dem Packlos entspricht. Sie wird charakterisiert durch das Gesamtgewicht und die äußeren Abmessungen.
- **Ladeinheit/Transporteinheit/Ladeobjekt/Transport-HU:**
Als Ladeinheit/Transporteinheit/Ladeobjekt/Transport-HU wird eine unterfahrbare Verpackung inkl. Packgut bezeichnet, die von einem Gabelstapler aufgenommen werden kann, transport- und lagerfähig ist. Diese Eigenschaften werden in der Regel von Großladungsträgern erfüllt. Kleinladungsträger bilden dagegen erst im Verbund mit anderen Ladungsträgern eine transportfähige Einheit. Ein Beispiel ist eine Palette mit mehreren Lagen von Kleinladungsträgern und abschließendem Deckel, auch als Gebinde bezeichnet. Transport-HUs sind u.a. geprägt durch das Gesamtgewicht, die Außenmaße, Stapelbarkeit und maximale Traglast. Im Rahmen der Arbeit werden die Be-

griffe Transport-HU und HU synonym verwendet. Nicht transportierfähige HUs werden gesondert mit dem Präfix KLT gekennzeichnet.

- **Belade-/Packschema/Packmuster:**
Das Belade-/Packschema/Packmuster beschreibt die exakte Anordnung der Ladeeinheiten im Laderaum des Transportmittels.
- **Laden/Verladen/Beladen:**
Hierunter versteht man das Einbringen der Ladeeinheiten in den Laderaum z.B. mittels Stapler.
- **Stauen:**
Das Stauen beschreibt die konkrete Anordnung der Ladeeinheit im dreidimensionalen Raum. Durch diesen Vorgang wird somit das Beladeschema erzeugt.

3.1.2 Lastkraftwagen und Ladungsträger

Im Folgenden werden LKW als auch Ladungsträger anhand zahlreicher Kriterien charakterisiert. Zu Beginn werden unterschiedliche Ausprägungen von LKW präsentiert.

Wie in 2.3.3 beschrieben, stellt der LKW das Hauptverkehrsmittel in der Beschaffungslogistik von Automobilherstellern dar. Grundsätzlich wird zwischen Motorwägen, Sattelzügen und Gliederzügen unterschieden, wobei diese aus Motorwagen und Anhänger bestehen, siehe auch Abbildung 3-1. Diese sind charakterisiert durch unterschiedliche Achszahlen, Laderäume und maximale Nutzlasten. Der Sattelzug besteht aus Zugmaschine und Sattelaufleger, der auch Trailer genannt wird. Beim Motorwagen sind Chassis, Fahrerhaus und Laderaum in einem Fahrzeug integriert. Entsprechend verfügt ein Gliederzug über zwei separate Laderäume. Die Nutzlast ergibt sich aus dem maximal zulässigen Gesamtgewicht abzüglich des Fahrzeuggewichts. Bei den im Fernverkehr vornehmlich eingesetzten Glieder- und Sattelzügen ist bei einem maximalen Gesamtgewicht von 40 t eine Nutzlast von etwa 24 t üblich [Kra-2007] [Vas-1998].



Abbildung 3-1: Überblick LKW-Typen

Als Sattelaufleger wird in der automobilen Beschaffungslogistik häufig der Megatrailer genutzt. Dieser hat die Grundfläche eines Standardsattelauflegers von 2,48 m Breite mal 13,6 m Länge und eine Höhe von 3 m [Hey-2010]. Die maximale Zuladung ist beschränkt durch die Innenmaße des Trailers und die maximale Nutzlast. Als Kapazitätsdimension des Laderaums wird der Lademeter (Abkürzung: ldm) herangezogen. Die Lademeterzahl orientiert sich an der eingenommenen Länge des Laderaums bzw. am Ladegewicht. Entsprechend beträgt die Kapazitätsgrenze beim Megatrailer 13,6 ldm, die bei vollständiger volumenmäßiger Ausfüllung des Laderaums bzw. 24 t erreicht ist.

Bei den Ladungsträgern, die in den LKW-Laderaum eingebracht werden, gibt es ebenso zahlreiche Unterscheidungsmerkmale. Einen Überblick gibt Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Klassifizierung von Ladungsträgern

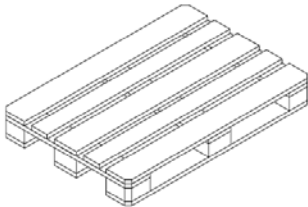
Merkmal		Ausprägung	
1	Grundfunktion	tragend	umschließend
2	Größe	Kleinladungsträger	Großladungsträger
3	Stapelbarkeit	stapelbar	nicht stapelbar
4	Klappbarkeit	klappbar	nicht klappbar
5	Behälterumlauf	Mehrweg	Einweg
6	Standardisierung	Standardladungsträger	Sonderladungsträger
7	Modularisierung	Modulmaße	keine Modulmaße

Wie in 3.1.1 beschrieben, können Ladungsträger nach ihrer Grundfunktion sowie ihrer Größe differenziert werden. Alle Ladungsträger haben eine tragende Funktion, die durch eine umschließende und ggf. abschließende Funktion ergänzt werden kann. Ein rein tragender Ladungsträger ist die Palette. Sie werden aus Holz oder Kunststoff angefertigt. Häufig treten sie in den Maßen 1200 x 800 mm (Euro-Palette) oder 1200 x 1000 mm auf (ISO-Palette) [DIN 15141] [DIN 15145] [DIN 15146]. Weitere Vertreter sind Gestelle oder Rungenpaletten, die zwar die Außenmaße des Ladungsträgers bestimmen, jedoch nach außen offen sind. Zu umschließenden Ladungsträgern zählen die Boxpalette, Gitterboxpalette, Vollwandboxpalette, nicht unterfahrbare Behälter oder eine Palette mit faltbarem Aufsetzrahmen [DIN 15142] [Hom-2007]. Nicht unterfahrbare Behälter sind Kleinladungsträger mit einer maximalen Grundfläche von 600 x 400 mm [DIN 30820]. Erst zusammen mit anderen Ladungsträgern können sie eine Transport-HU bilden. Großladungsträger ab einer Grundfläche von 800 x 600 mm sind dagegen direkt transportfähig. Einen beispiel-

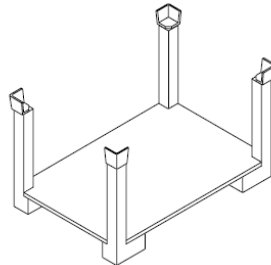
haften Überblick über tragende und umschließende Ladungsträger gibt Abbildung 3-2.

Tragende Ladungsträger

Europalette

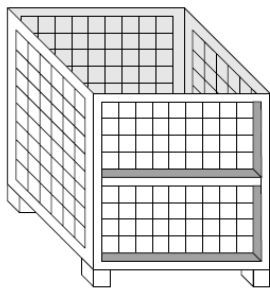


Rungenpalette

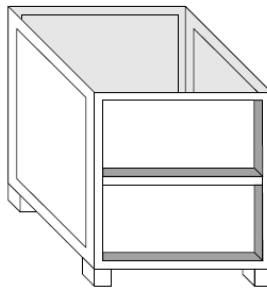


Umschließende Ladungsträger

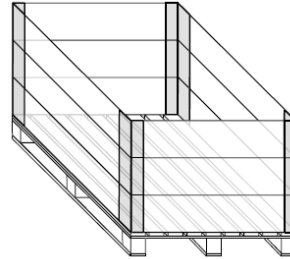
Gitterboxpalette



Vollwandboxpalette



Palette mit faltbarem Aufsetzrahmen



Kleinladungsträger

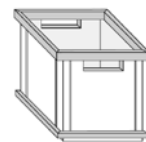


Abbildung 3-2: Überblick über eine Auswahl an tragenden und umschließenden Ladungsträgern (in Anlehnung an [Hom-2007])

Daneben werden Ladungsträger dadurch charakterisiert, ob sie stapelbar sind oder nicht. Ist eine Stapelung möglich, ist die Stapelhöhe durch die maximale Traglast der Ladungsträger bestimmt. Dabei können nur Ladungsträger derselben Grundfläche aufeinander gestapelt werden. Weitere Voraussetzung ist eine Kompatibilität von Schulter- und Bodentyp der Ladungsträger. Der Schultertyp beschreibt die Art und Weise der Lastaufnahme, während der Bodentyp die Beschaffenheit der Ladungsträgerunterseite ausdrückt. Je nach Ausprägung liegt eine Flächen-, Linien- oder Punktbelastung vor, siehe auch Abbildung 3-3. Li beschreibt mögliche Kombinationsmöglichkeiten von Schulter- und Bodentypen, die er in Stapelklassen aufteilt [Li-2003].

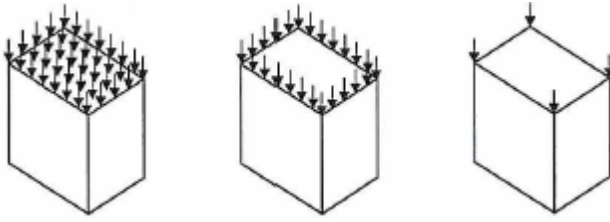


Abbildung 3-3: Belastungsarten bei der Stapelung: Flächenbelastung (links), Linienbelastung (Mitte) und Punktbelastung (rechts) [Li-2003]

Darüber hinaus gibt es Ladungsträger in klappbarer oder nicht klappbarer Form. Klappbare Behälter kommen nur dann zum Einsatz, wenn sie in Gestalt von Mehrwegladungsträgern wiederverwendet werden. Bei diesen muss das Leergut immer wieder zum Lieferanten zurückgeführt werden. Als Formen der Rückführung treten geschlossene Behälterkreisläufe oder offene Poolsysteme auf (vgl. hierzu auch [Lan-1997]). Ist eine Klappbarkeit gegeben, kann die Anzahl der Leerguttransporte reduziert werden. Dennoch verursachen diese über die Vollgutströme hinausgehend zusätzliche Transportkosten. Als Vorteil eines Mehrwegsystems ergibt sich jedoch, dass Ladungsträger nur einmal beschafft werden müssen. Im Gegensatz hierzu stehen Einwegbehälter, die für jeden Transport neu hergestellt und nach Teileentnahme entsorgt werden müssen. Einwegverpackungen kommen im Automobilbau in der Regel nur für weit entfernte Lieferanten bspw. aus den USA oder Japan zum Einsatz.

Zudem werden Ladungsträger in Standard- und Sonderladungsträger unterteilt. In der Automobilindustrie kommen neben branchenübergreifenden Standards wie der Euro-Palette automobilspezifische Standards zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um die vom Verband der Automobilindustrie genormten VDA-KLTs und VDA-GLTs, die optimal auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie zugeschnitten sind und gleichzeitig bezogen auf die Außenmaße kompatibel mit branchenübergreifenden Standardladungsträgern sind. Sie ermöglichen u.a. eine Reduktion der Behältervarianz, eine „Rationalisierung der Transport-, Lager- und Fördertechnik“, eine „Humanisierung der Arbeit durch ergonomische Gestaltung“, einen „selbstsichernden Behälterverbund durch formschlüssige Verschachtelung im Stapel“ zur „Vermeidung von Ladungssicherungen“, „Ressourcenschonung ... durch Entfall von Einwegverpackungen“, eine „Erhöhung der Flexibilität in der Leergutversorgung“ sowie eine Nutzung von Behälterpoolsystemen [VDA 4500]. VDA-KLTs sind aus Kunststoff, haben starre oder faltbare Wände, zwei Höhenraster (147 mm, 280 mm) und drei Flächenraster (200 x 300 mm, 300 x 400 mm, 400 x 600 mm). Das maximale Füllgewicht beträgt 20 oder 50 kg. Zur Bildung von Gebinden können diese mit Euro- oder

ISO-Paletten kombiniert werden. Für Identifikationsprozesse lassen sich Label anbringen. Einen Überblick über Funktionen und Gestalt der VDA-KLTs gibt Abbildung 3-4. VDA-GLTs liegen in zwei unterschiedlichen Flächenrastern (800 x 600 mm, 1000 x 1200 mm) und Höhenrastern vor (700 mm, 975 mm) [VDA 4500] [VDA 4520]. Neben VDA-GLTs werden auch europaweit oder weltweit genormte GLTs wie bspw. die Euro-Gitterbox mit den Maßen 1200 x 800 x 970 mm eingesetzt.

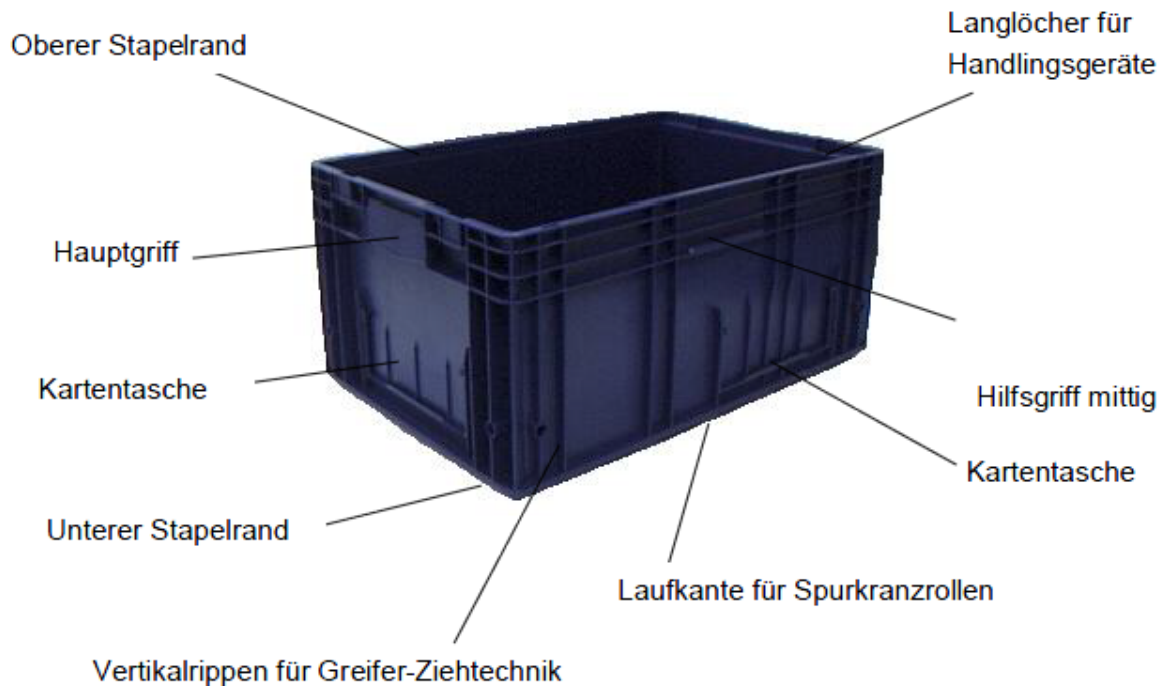


Abbildung 3-4: Gestalt und Funktionen eines VDA-KLTs [VDA 4500]

Die Flächen der VDA-KLTs haben Modulmaße (siehe hierzu auch [DIN 55510]). Dies ermöglicht eine verschnittfreie Lagenbildung von KLTs unterschiedlichen Flächenmaßes auf Euro- oder ISO-Paletten. Gebinde und standardisierte GLTs haben in der Regel ebenfalls Modulmaße. In der Höhe entspricht dies 1000 mm. Dadurch lassen sich standardisierte Stauräume wie bspw. eines Megatrailers optimal ausfüllen.

Eine optimale Staubarkeit muss für Sonderladungsträger nicht unbedingt gegeben sein, da diese bauteilspezifisch konstruiert sind. Gerade bei sperrigen Gütern können die Ladungsträgerdimensionen über die üblichen Maße hinausgehen. Sonderladungsträger können bspw. aber auch durch spezielle Innenleben zur Fixierung und zum Schutz von Bauteilen charakterisiert sein. Häufig sind sie bei JIT/JIS-Belieferungen anzutreffen.

3.1.3 Laden und Sichern

Im physischen Prozess vom Lieferanten bis zum OEM durchläuft die Ware die Schritte Bereitstellen, Beladen, Stauen, Sichern und Entladen. Die Ladeeinheiten werden in der Regel mit einem Stapler von einer Bereitstellfläche aufgenommen und in den Trailer eingebracht. Abhängig vom Aufliegertyp kommen im Wesentlichen zwei Ladeverfahren zum Einsatz [Gro-2007]:

- Heckladen:
Über eine Öffnung im Heck werden die HUs im Auflieger verstaut. Hierzu ist in der Regel eine Rampe notwendig.
- Seitenladen:
Die Transporteinheiten werden von der Seite eingebracht. Entsprechend muss die seitliche Trailerwand vollständig geöffnet werden können. Weiter wird unterschieden zwischen ein- und beidseitiger Seitenverladung. Kann das Material nur von einer Seite aus eingebracht werden und liegt keine Rampe vor, ist ein Langzinkenstapler mit Zinken der Länge 2,40 m notwendig. Andernfalls genügen kürzere Zinken. Das Seitenladen ist im Vergleich zum Heckladen geprägt durch einen höheren manuellen Aufwand zur Freilegung des Laderaums. Gleichzeitig ermöglicht es einen wahlfreien und flexiblen Zugang zur Ware, der insbesondere bei Milkruns mit mehreren Belade- und Abladestellen von Vorteil ist. Aufgrund dieser Vorteile wird in der Automobilindustrie häufig auf diese Ladeweise zurückgegriffen.

Die Art der Ladeweise beeinflusst nicht nur den Handhabungsaufwand sowie die Zugänglichkeit der Güter. Unter Umständen kann auch die Orientierung einzelner zu verstauender Ladeeinheiten vorgegeben sein. Dies ist der Fall, wenn diese vom Stapler nur von einer Seite aufgenommen werden können [Li-2003].

Bei der Festlegung der Ladung und der Ladungsverteilung auf dem Trailer sind die technischen Randbedingungen des Transportmittels einzuhalten. Beim Verstauen der HUs ist zudem zu berücksichtigen, dass diese während des Transports der Einwirkung physikalischer Kräfte ausgesetzt sind. Vertikal und horizontal auftretende Kräfte infolge von Brems-, Beschleunigungsvorgängen, Kurvenfahrten oder Fahrbahnunebenheiten können zum Verrutschen, Kippen, Rollen oder Wandern der Ware führen [Gro-2007]. Dadurch besteht die Gefahr, dass nicht nur Bauteile, sondern auch Personen zu Schaden kommen. Daher ist es notwendig, sowohl die einzelnen Ladeeinheiten als auch die gesamte Ladung zu sichern.

Allgemeine Hinweise zur Herstellung einer verkehrssicheren Ladung geben gesetzliche Vorschriften der Straßenverkehrsordnung (StVO), Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO), des Handelsgesetzbuches (HGB) und betriebsgenossenschaftliche Vorschriften (BGV D29) [Ber-2002]. Diese berufen sich auf anerkannte Regeln der Technik, die in Normen und Richtlinien wiedergegeben sind (siehe z.B. [VDI 2700], [Bun-1999]).

Ist die Ladeeinheit ein Großladungsträger, sind keine gesonderten Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Bei Gebinden ist jedoch auf ein Zusammenhalten der Ware und eine günstige Verteilung des Gewichts zu achten. Darüber hinaus ist ein niedriger und über der Grundfläche zentrierter Schwerpunkt anzustreben. Entsprechend sollten schwere KLTs möglichst weit unten und mittig platziert werden [Gro-2007]. Verfügen die KLTs über einen Verbundboden mit verteilten Stapelfüßen, kann eine in sich gesicherte Ladeeinheit gebildet werden [VDA 4500]. Bei glattem KLT-Boden können die Gebinde durch Stretch-, Schrumpffolie oder Umreifungen gesichert werden. Durch organisatorisch-technische Verfahren wie bspw. die Verbundstapelung kann die Stabilität der Ladeeinheiten weiter erhöht werden [VDI 3968, Blatt 2].

Werden nun die gesicherten Ladeeinheiten im Trailer verstaut, sollte die Last gleichmäßig auf die Ladefläche verteilt werden. Der Ladungsschwerpunkt sollte möglichst niedrig und über der Längsmittellinie des Trailers liegen, um die Kippgefahr des Trailers bei Kurvenfahrt gering zu halten. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass das zulässige Gesamtgewicht und die maximalen Achslasten des Transportmittels nicht überschritten werden. Für dieses kann ein Lastverteilungsplan erstellt werden. Darin ist eine Linie eingezeichnet, die abhängig von der Lage des Ladungsschwerpunktes die maximale Zuladung angibt (siehe Abbildung 3-5) [VDI 2700].

3 Methoden zur Erhöhung der Transportauslastung

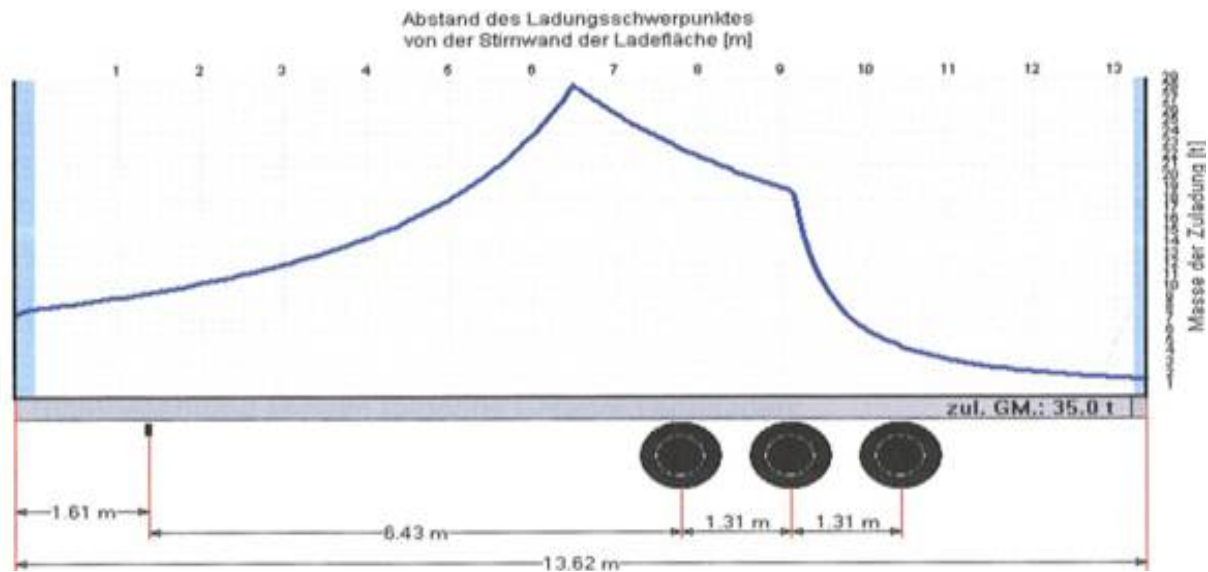


Abbildung 3-5: Beispiel eines Lastverteilungsplanes [Lem-2007]

Unter Berücksichtigung der maximalen Traglasten werden beim Stauen von Ladeeinheiten mit zueinander kompatiblen Schulter- und Bodentypen Säulenstapel gebildet, die es anschließend zu sichern gilt. Als Verfahren kommen der Formschluss, Kraftschluss oder Kombinationen davon zum Einsatz. Beim Formschluss werden „horizontale Bewegungskräfte in die Laderaumbegrenzungen eingeleitet“ [Gro-2007]. Die effektivste Methode des Formschlusses ist die bündige und lückenlose Anordnung der Ladeeinheiten an Stirn- und Seitenwänden. Angrenzende Stapel fixieren sich somit selbst. Alle anderen Verfahren des Form- und Kraftschlusses sind mit Handhabungsaufwand verbunden. Beim Formschluss per Festlegen werden die Ladeeinheiten bspw. durch Keile am Boden fixiert. Das Direktzurren erfordert das Anbringen von Zurrgurten. Lücken gilt es mit Füllmaterial wie bspw. Luftpolstern oder Holzpaletten zu schließen. Beim Kraftschluss kommen Varianten des Niederzurrens zum Einsatz [Lem-2007] [Gro-2007] [VDI 2700]. Die verschiedenen Prinzipien sind in Abbildung 3-6 veranschaulicht.

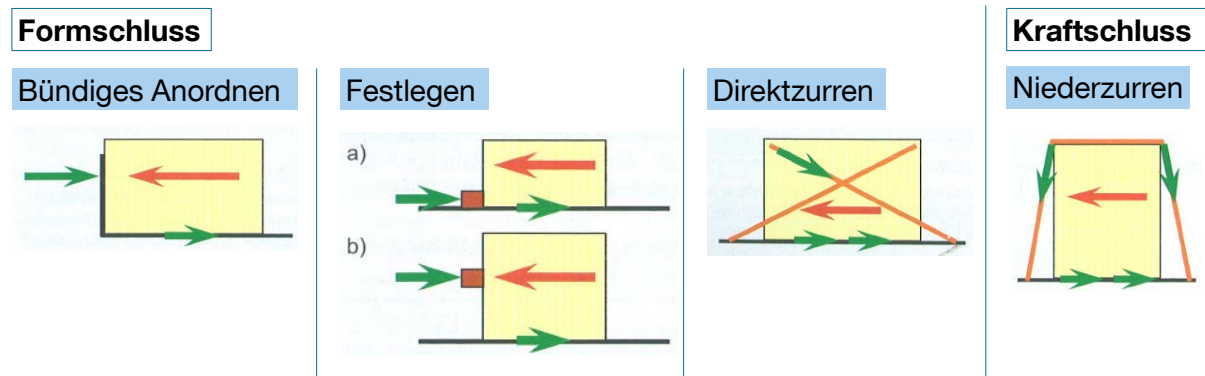


Abbildung 3-6: Verfahren zur Ladungssicherung. Rote Pfeile: Bewegungskraft, grüne Pfeile: Gegenkräfte in Form von Haltekraft, Reibungskraft und Zurrkraft. (in Anlehnung an [Gro-2007])

3.2 Containerbeladungsprobleme

Im Rahmen der Arbeit sollen Algorithmen zur Erhöhung der Auslastung von LKW-Laderäumen entworfen werden. Diese Zielsetzung wird im Operations Research in Form von Containerbeladungsproblemen behandelt. Zunächst erfolgt eine Einordnung und Erläuterung verschiedener Problemtypen. Danach werden praxisrelevante Nebenbedingungen aufgeführt, ehe unterschiedliche allgemeine Ansätze und Algorithmen zur Lösung von Containerbeladungsproblemen vorgestellt werden. Es folgt eine Erläuterung automobilspezifischer Ansätze. Im Anschluss werden Verfahren vorgestellt, bei denen die Lösung des Packproblems in Tourenplanungsalgorithmen integriert ist. Diese sind insbesondere bei der Bildung von Milkruns relevant. Abschließend wird ein Überblick über Logistiksoftware zur Stauraumoptimierung gegeben.

3.2.1 Klassifizierung von Containerbeladungsproblemen

In diesem Abschnitt werden wesentliche Typen des Containerbeladungsproblems beschrieben. Die nachfolgende Einordnung und Nomenklatur der Probleme orientiert sich am Klassifikationsschema nach Wäscher, das auf Vorarbeiten von Dyckhoff basiert [Wäs-2007] [Dyc-1990]. Bei Containerbeladungsproblemen, die zur Klasse der Zuschnitt- und Packprobleme gehören, handelt es sich um ein geometrisches Zuordnungsproblem, bei dem dreidimensionale Ladeeinheiten einem oder mehreren Containern derart zuzuordnen sind, dass eine bestimmte Zielfunktion optimiert wird. Die Ladeeinheiten müssen dabei vollständig im Laderaum liegen und dürfen sich nicht überlappen [Mor-1994].

Unterschieden werden die Containerbeladungsproblemtypen u.a. anhand folgender Kriterien:

- Art der Anordnung der Ladeeinheiten im Container:
Sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis findet man vorwiegend orthogonale Packprobleme vor, bei der ausschließlich eine hinsichtlich der Laderaumbegrenzungen kantenparallele Anordnung der Ladeeinheiten erlaubt ist.
- Informationsstand hinsichtlich der zu platzierenden Ladeeinheiten:
Sind alle zu platzierenden Ladeeinheiten im Vorhinein bekannt, spricht man von einem Offline-Problem. Andernfalls handelt es sich um ein Online-Problem, bei dem Ladeobjekte in gegebener Reihenfolge ohne Kenntnis zukünftig zu verstauender HUs im Laderaum angeordnet werden [Csi-1989]. Somit kann vor Ausführung eines Lösungsalgorithmus keine Vorsortierung der Ladeeinheiten erfolgen.
- Optimierungstyp:
Beim Optimierungstyp der Output-Maximierung liegt nur eine begrenzte Zahl an Containern vor, sodass nicht alle Ladeobjekte verladen werden können. In der Regel wird das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen Volumennutzungsgrad zu erreichen. Dem gegenüber steht der Input-Minimierungs-Problemtyp, bei dem ausreichend Stauraum für alle Ladeeinheiten zur Verfügung steht. Ziel ist es bspw., die HUs auf möglichst wenige Container zu verteilen.
- Sortiment der Container:
Unterschieden wird zum einen, ob einer oder mehrere Container vorliegen. Darüber hinaus wird differenziert zwischen Problemen mit identischen, schwach oder stark heterogenen Containern. Bei schwach heterogener Menge an Containern ist die Anzahl unterschiedlicher Container gering, die Anzahl je Container hoch. Bei stark heterogenen Containern kehrt sich dieses Verhältnis um. In der automobilen Beschaffungslogistik sind die Container in der Regel in Form von standardisierten Aufliegern identisch, siehe Abschnitt 3.1.2.
- Sortiment und Form der Ladeeinheiten:
Analog zum Container können identische, schwach oder stark heterogene Ladeobjekte auftreten. In der Automobilindustrie kann die Ladeeinheiten-Struktur als schwach heterogen eingestuft werden. Auch wenn die Anzahl unterschiedlicher Ladeeinheiten bei Automobil-OEM häufig mehrere hundert

betragen kann, ist diese doch im Vergleich zum Behälterumschlag je Handling-Unit-Typ eher gering. Hinsichtlich der Geometrie wird zwischen regulären (Quader, Kegel, Kugel etc.) und irregulären Formen unterschieden. In der automobilen Beschaffungslogistik sind die zu transportierenden Behältnisse in der Regel quaderförmig.

Je nach Anwendungsfall können im automobilen Umfeld unterschiedliche Kombinationen der genannten Ausprägungen je Kriterium in Betracht kommen. Nachfolgend wird eine Auswahl relevanter Problemtypen aufgeführt:

- **Single-Stock-Size Cutting Stock Problem (SSSCSP):**
Input-Minimierung; offline oder online; schwach heterogene HU-Menge; identische Container
- **Open Dimension Problem (ODP):**
Input-Minimierung; offline oder online; ein in eine Dimension offener Container; häufig auch als Strip Packing Problem bezeichnet
- **Single Large Object Placement Problem (SLOPP):**
Output-Maximierung; offline oder online; schwach heterogene HU-Menge; ein Container
- **Multiple Identical Large Object Placement Problem (MILOPP):**
Output-Maximierung; offline oder online; schwach heterogene HU-Menge; mehrere identische Container
- **Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem (MHLOPP):**
Output-Maximierung; offline oder online; schwach heterogene HU-Menge; schwach oder stark heterogene Container-Menge

3.2.2 Praxisrelevante Nebenbedingungen

Bei der Lösung des Zuordnungsproblems gilt es, die dem jeweiligen Anwendungsfall zugrunde liegenden Restriktionen zu berücksichtigen. Nachfolgend wird ein Überblick über wesentliche praxisrelevante Nebenbedingungen gegeben (in Anlehnung an [Bis-1995a], [Bor-2012]):

- **Containerbezogene Restriktionen:**
Standardmäßige Restriktion ist die volumenmäßige Laderaumbegrenzung durch die Containerinnenmaße. Daneben kann die Zuladung auch durch eine maximale Nutzlast limitiert sein. Als weitere Nebenbedingung kann die Lastverteilung auf den Laderaum berücksichtigt werden.

- **HU-bezogene Restriktionen:**
Bezüglich der zu verladenden Ladeobjekte können Beladeprioritäten ebenso berücksichtigt werden wie mögliche Orientierungen auf der Ladefläche oder Aspekte hinsichtlich der Stapelung. Im Hinblick auf die Beladepriorität kann zwischen absolut und relativ differenziert werden. Eine absolute Beladepriorität liegt vor, wenn HUs höherer Priorität keinesfalls durch HUs geringerer Priorität verdrängt werden. Eine relative Priorität ergibt sich, wenn Ladeobjekte unterschiedliche Werte einnehmen können und diese in die Zielfunktion eingehen. Bezüglich der vertikalen und horizontalen Orientierung sind sechs verschiedene Positionen denkbar. In der Praxis und in wissenschaftlichen Abhandlungen sind häufig jedoch nur eine Orientierung oder die vertikale Drehbarkeit der Ladeeinheiten um 90° zugelassen. Die Berücksichtigung von Stapelaspekten kann bspw. durch maximale Traglasten oder Stapelhöhen erfolgen.
- **Lieferungsbezogene Restriktionen:**
Besteht die HU-Menge aus mehreren Einzelaufträgen, kann gefordert werden, dass die einzelnen Ladeobjekte der jeweiligen Aufträge nur vollständig im selben Container angeliefert werden dürfen. Des Weiteren kann auch vorgegeben sein, dass Untermengen des HU-Vorrats nicht im selben Container platziert werden dürfen.
- **Positionierungsrestriktionen:**
Hierunter fallen bspw. Vorgaben hinsichtlich der absoluten Position von Ladeobjekten oder der relativen Position untereinander. Auch die Einhaltung von Be- und Entladereihenfolge wird Positionierungsrestriktionen zugeordnet.
- **Ladungsbezogene Restriktionen:**
Ladungsbezogene Restriktionen umfassen im Wesentlichen Aspekte der Ladungsstabilität und -komplexität. Bei der Ladungsstabilität wird in vertikal und horizontal unterschieden. Bspw. kann gefordert sein, dass HUs vollständig von unten durch den Containerboden oder andere HUs gestützt sein müssen. Oder es muss gewährleistet sein, dass HUs in horizontaler Richtung durch andere HUs fixiert sind. Hinsichtlich der Komplexität kann bspw. ein Guillotine-Beladeschema angestrebt werden, bei dem durch eine Aneinanderreihung von so genannten Guillotineschnitten die Ladeeinheiten Stück für Stück freigelegt werden können. Im Kontext des dreidimensionalen Containerbeladungsproblems versteht man unter einem Guillotineschnitt einen Parallelschnitt zu zwei Containerwänden, der zwei neue quaderförmige Teilräume er-

zeugt [Mor-1994]. Ein Guillotine-Beladeschema vereinfacht die Be- und Entladung. Alternativ kann bspw. auch ein Beladeschema gefordert sein, dass automatisiert per Roboter erzeugt werden kann.

3.2.3 Allgemeine Lösungsansätze und Algorithmen

Unabhängig ihrer Dimension handelt es sich bei Packproblemen einschließlich des dreidimensionalen Containerbeladungsproblems um NP-schwere Probleme (siehe z.B. [Sch-1992], [Lod-2002], [Gar-1979]). Sie sind damit mindestens so schwer wie alle anderen Probleme der Komplexitätsklasse NP. Diese beinhaltet Entscheidungsprobleme, für die vermutlich keine exakten Optimierungsverfahren gefunden werden können, welche die Probleme in polynomieller Zeit lösen.

Aufgrund der hohen Komplexität und des zu erwartenden Laufzeitverhaltens gibt es nur wenige exakte Verfahren zur Lösung des Containerbeladungsproblems. Bestehende Ansätze greifen bspw. auf Branch-and-Bound(B&B)-Methoden oder dynamische Programmierung zurück [Mar-2000] [Hif-2004]. Der überwiegende Teil von Lösungsverfahren beruht auf Heuristiken, mit denen sich in der Regel schnellere Ergebnisse in ausreichender Lösungsqualität erzielen lassen. Handelt es sich bei den Heuristiken um so genannte Approximationsalgorithmen, können Gütegarantien für die Ergebnisqualität angegeben werden. Für den Fall eines Minimierungsproblems entsprechen diese oberen Schranken des Verhältnisses aus durch einen Approximationsalgorithmus erreichtem Zielfunktionswert und optimalem Zielfunktionswert, die nicht überschritten werden können. Absolute Worst-Case-Performance-Ratios R geben obere Schranken bezogen auf alle erdenklichen Probleminstanzen an, asymptotische Worst-Case-Performance-Ratios R^∞ entsprechen Grenzwerten der oberen Schranke, wenn die Anzahl der Ladeobjekte gegen unendlich läuft. Bei Maximierungsproblemen werden zur Ermittlung der Worst-Case-Performance-Ratios die Brüche umgedreht [Gon-2007]. Obwohl bei nichtapproximativen Heuristiken keine Gütegarantien angegeben werden können, werden durch diese insbesondere bei realitätsnahen Probleminstanzen unter Einbindung zahlreicher Praxisrestriktionen häufig bessere Ergebnisse erzielt [Bor-2012].

Bekannte heuristische Ansätze zur Lösung des dreidimensionalen Containerbeladungsproblems sind Wallbuilding-, Layerbuilding-, Stackbuilding-, Guillotine-Cut- und Cuboid-Arrangement-Algorithmen [Pis-2002] [Arn-2008]. Beim Wallbuildingverfahren werden schrittweise vertikale Schichten gebildet und zu einem Beladesche-

ma aneinander gereiht (siehe z.B. [Geo-1980]). Beim Layerbuilding-Ansatz werden horizontale Schichten zusammengestellt, wie dies häufig auch bei Optimierungsproblemen zur Bildung von Gebinden der Fall ist (siehe z.B. [Bis-1995b]). Beim Stackbuilding-Ansatz werden zunächst Stapel erzeugt und diese dann auf die zweidimensionale Ladefläche verteilt (siehe z.B. [Gil-1965]). Bei den genannten Ansätzen kann das dreidimensionale Problem in einfacher zu lösende ein- und zweidimensionale Packprobleme zerlegt werden. Bei Guillotine-Cut-Ansätzen werden Packmuster durch Guillotine-Schnitte erzeugt (siehe z.B. [Mor-1994]), Cuboid-Arrangement-Algorithmen fassen ähnliche Ladeobjekte zum Zwecke einer hohen Packdichte und stabilen Ladung zusammen und platzieren diese im Stauraum (siehe z.B. [Bor-1998]).

Die eingesetzten Heuristiken kann man in Konstruktions- und Verbesserungsverfahren aufteilen. Zulässige Startlösungen werden häufig durch Greedy-Konstruktionsalgorithmen erzeugt, die nach bestimmten Regeln für jedes neu zu platzierende Ladeobjekt die Koordinaten im Stauraum festlegen. Alternativ bieten sich vorausschauende Algorithmen an, die den Effekt der Verstauung eines Objekt an einem spezifischen Punkt im Laderaum auf zukünftig zu platzierende Ladeobjekte berücksichtigen [Bor-1995]. Durch Metaheuristiken wie bspw. Tabu Search, Simulated Annealing, Hill Climbing oder evolutionäre Algorithmen werden aufbauend auf Startlösungen iterativ neue Lösungen erzeugt (siehe z.B. [Six-1996], [Hif-2002], [Geh-1997]).

Im Automotive-Bereich sind die Grundflächen sowie Schulter- und Bodentypen der HUs häufig aufeinander abgestimmt. Aus Gründen der Ladungssicherung ist eine Säulenstapelung kompatibler HU-Typen in der Regel von den Automobilherstellern vorgeschrieben (siehe z.B. [Dai-2008]). Vor diesem Hintergrund ist es naheliegend, Containerbeladungsprobleme der automobilen Beschaffungslogistik über den Stackbuilding-Ansatz zu lösen. Bei der Bildung der Stapel handelt es sich um ein eindimensionales Packproblem. Es gilt, unter Beachtung maximaler Stapelhöhen bzw. der maximalen Containerinnenhöhe die HUs unterschiedlicher Höhe derart zu stapeln, dass die Anzahl Stapel möglichst klein wird. Die Verteilung der Stapel auf die Ladefläche mit möglichst kleiner Länge ist ein zweidimensionales Packproblem. Nachfolgend werden wesentliche approximative und nichtapproximative heuristische Ansätze zur Lösung ein- und zweidimensionaler Online- oder Offline-Probleme vorgestellt.

Das eindimensionale Packproblem

Bekannte Online-Heuristiken für das eindimensionale Packproblem sind der Algorithmus Next-Fit (NF), die Any-Fit-Algorithmen First-Fit (FF) und Best-Fit (BF) sowie der Algorithmus Harmonic_k [Hoc-1997]. Beim NF-Algorithmus wird versucht, das nächste Ladeobjekt auf einem aktiven Stapel zu platzieren. Findet die HU auf einem aktiven Stapel keinen Platz, wird der Stapel geschlossen und ein neuer aktiver Stapel begonnen. Gleiches gilt, falls noch gar kein aktiver Stapel vorhanden ist. Der Algorithmus sorgt dafür, dass immer nur ein Stapel aktiv ist. Dadurch kann mit $O(n)$ eine lineare Laufzeit erreicht werden [Gon-2007]. Der FF-Algorithmus platziert ein Ladeobjekt im ersten Stapel, der noch Restkapazität hat. Falls kein Stapel gefunden werden kann, wird ein neuer Stapel begonnen. Dem gegenüber wird beim BF-Algorithmus das Ladeobjekt in jenem Stapel mit geringstmöglicher, noch ausreichender Resthöhe angeordnet. Bei beiden Algorithmen sind stets alle bereits begonnenen Stapel aktiv. Die Laufzeitkomplexität beträgt jeweils $O(n \log n)$ [Gon-2007]. Beim Harmonic_k -Algorithmus werden bei normierter maximaler Stapelhöhe von 1 und entsprechend angepassten Höhen der Ladeobjekte k Intervalle mit den Intervallgrenzen $0, 1/k, 1/(k-1), 1/(k-2), \dots$ und 1 gebildet. Für jede dieser Intervalle wird ein aktiver Stapel begonnen, sobald ein Ladeobjekt zu platzieren ist, das in entsprechendem Intervall liegt. Reicht die Restkapazität des Stapels nicht mehr aus, wird dieser geschlossen und für dieselbe Intervallklasse ein neuer Stapel begonnen. Es liegen also immer maximal k aktive Stapel vor. Dadurch kann eine $O(n)$ -Laufzeit erreicht werden. Das asymptotische Worst-Case-Performance-Verhältnis $R_{\text{Harmonic}_k}^\infty$ beträgt gerundet 1,691 und liegt damit knapp unter R_{FF}^∞ und R_{BF}^∞ mit 1,7 sowie R_{NF}^∞ mit 2. Als untere Grenze für das asymptotische Worst-Case-Performance-Verhältnis für alle eindimensionalen Online-Algorithmen gibt van Vliet gerundet 1,540 an [van-1992]. Wesentlich besser können Offline-Algorithmen abschneiden. Bekannteste Vertreter sind die Heuristiken First-Fit-Decreasing (FFD) und Best-Fit-Decreasing (BFD). Die Objekte werden zunächst absteigend nach Höhe sortiert und dann analog zum FF- bzw. BF-Algorithmus platziert. Beide erreichen ein asymptotisches Worst-Case-Performance-Verhältnis von $11/9$ bei einer Rechenzeit von $O(n \log n)$ [Joh-1974] [Gon-2007]. Der derzeit beste Offline-Approximationsalgorithmus Modified-First-Fit-Decreasing-Algorithmus (MFFD) erreicht eine asymptotische Gütegarantie R_{MFFD}^∞ von gerundet 1,183. Das Vorgehen ist analog zum FFD-Algorithmus, außer für so genannte Schlüsselobjekte im Intervall $(1/6, 1/3]$ bei normierter maximaler Stapelhöhe von 1. Der Algorithmus versucht hier,

nach gewissen Regeln sogenannte Schlüssel-Stapel mit jeweils zwei Schlüsselobjekten zu füllen [Joh-1985].

Das zweidimensionale Packproblem

Sobald alle Stapel gebildet sind, können diese als zweidimensionale Elemente auf die Container-Ladefläche verteilt werden. In problemunspezifischen Lösungsansätzen der Fachliteratur wird diese hochkant betrachtet. Die Breite wird meist auf 1 festgelegt. Die zu platzierenden zweidimensionalen Elemente sind durch ihre Höhe und Breite bestimmt. Die linke Container-Begrenzungslinie entspricht der y-Achse, der Container-Boden der x-Achse. Der Koordinatenursprung liegt in der unteren linken Ecke des Containers. Aus Gründen der Einfachheit soll an diesen Konventionen nachfolgend festgehalten werden.

Zur Lösung des zweidimensionalen Online- oder Offline-Pack-Problems wurden zahlreiche unterschiedliche Konstruktionsheuristiken entwickelt. Jylänki klassifiziert diese in Regal-, Guillotine-, Maximal-Rechteck- und Skyline-Algorithmen [Jyl-2010].

Die ersten Regal-Algorithmen für das zweidimensionale Online-Pack-Problem haben Baker und Schwarz eingeführt [Bak-1983]. Regale (englisch: Shelves) entsprechen Rechtecken der Breite des Containers und begrenzter Höhe, in welche die rechteckigen zweidimensionalen Ladeobjekte nach bestimmten Strategien eingefügt werden. Online-Regalalgorithmen werden zum einen durch einen Parameter $r \in (0; 1]$, der die Ladeobjekte in Höhenklassen einteilt und mögliche Regalhöhen festlegt, und zum anderen durch Slave-Algorithmen zur Lösung des eindimensionalen Online-Packproblems charakterisiert. Ist ein Ladeobjekt der Höhe h zu platzieren, wird eine ganze Zahl k bestimmt, für die $r^{k+1} < h \leq r^k$ gilt, und das Objekt der Klasse C_k zugeordnet. Die Elemente der Klasse C_k werden am Boden von Regalen der Höhe r^k und Breite 1 platziert. Der Verschnitt im Regal in y-Richtung entspricht somit jeweils maximal der r -fachen Regalhöhe. Die Verteilung der Rechtecke auf die Regale der passenden Höhenklasse kann dann bspw. mittels der Algorithmen NF, FF, BF oder Harmonic_k erfolgen [Bak-1983] [Csi-1997]. Die vollständige Bezeichnung der Regalalgorithmen ergibt sich durch den Zusatz „Shelf“ und der Angabe des Parameterwertes von r , z.B. Next-Fit-Shelf_{0,5} (NFS_{0,5}). Regalalgorithmen erreichen ein asymptotisches Worst-Case-Ratio von bestenfalls 1,691, die Laufzeiten für Ihre Durchführung verhalten sich analog zu ihren jeweiligen Slave-Algorithmen [Csi-1997]. Durch Ab-

kehr von Regalen hin zu vertikalen „Slips“ kann das asymptotische Worst-Case-Ratio auf gerundet bis zu 1,589 gesenkt werden [Han-2007].

Bekannte Vertreter von Offline-Regalalgorithmen sind die Verfahren Next-Fit-Decreasing-Height (NFDH), First-Fit-Decreasing-Height (FFDH) und Best-Fit-Decreasing-Height (BFDH) [Cof-1980] [Cof-1990]. Sie sortieren die Rechtecke zunächst absteigend nach Höhe und ordnen diese von links nach rechts in Ebenen an, beginnend in der linken unteren Ecke des Containers. Analog zu den Online-Regalalgorithmen wird jedes Rechteck direkt auf dem jeweiligen Regalboden platziert, die Höhe der Ebenen wird jedoch durch das jeweils höchste Element bestimmt. Beim NFDH wird eine neue Ebene begonnen, sobald ein Rechteck im obersten Regal keinen Platz mehr findet. FFDH ordnet ein Rechteck in der erstmöglichen Ebene an, BFDH in jenem Level mit geringster ausreichender Restbreite. NFDH und FFDH erreichen asymptotische Worst-Case-Performance-Ratios von 2 bzw. 1,7, für BFDH ist diese nicht bekannt. Die Zeitkomplexität der drei Algorithmen beträgt $O(n \log n)$, $O(n \log n)$ bzw. $O(n^2)$ [Ort-2010].

Bei klassischen Regalalgorithmen dürfen die Rechtecke lediglich am Regalboden angeordnet werden. Darüber hinaus existieren Offline-Verfahren, bei denen die Ladeobjekte überall innerhalb der Regalfläche angeordnet werden können. Als Beispiel ist der Floor-Ceiling-Algorithmus zu nennen [Lod-1999]. Dieser versucht zunächst, die Rechtecke von links nach rechts direkt an der unteren Regalbegrenzungslinie anzusetzen. Falls dies nicht gelingt, wird die Möglichkeit in Betracht gezogen, die Elemente unterhalb der Regaldecke von rechts nach links zu platzieren. Die Zeitkomplexität beträgt $O(n^3)$ [Lod-2002].

Eine Gütegarantie des Algorithmus ist nicht bekannt, ebensowenig wie für Guillotine-, Maximal-Rechteck- und Skyline-Algorithmen. Jedoch kann deren Performance im Rahmen gewählter Probleminstanzen getestet werden. Tabellarische Übersichten zur Leistungsfähigkeit und zum Zeitverhalten unterschiedlicher Algorithmusausprägungen dieser Lösungsansätze finden sich bspw. bei Jylänki [Jyl-2010]. Ohne Vorsortierung eignen sich diese in der Regel auch zur Lösung von Online-Packproblemen.

Bei der Anordnung eines Ladeobjekts in der linken unteren Ecke eines freien Rechtecks entsteht eine L-förmige, noch belegbare Restfläche. Kommen Guillotinealgorithmen zum Einsatz, wird diese durch einen horizontalen oder vertikalen Schnitt entlang der entsprechenden Kante des platzierten Rechtecks in zwei freie Recht-

ecke aufgeteilt, in denen wiederum von neuem weitere Ladeobjekte angeordnet und durch Guillotineschnitte freie Rechtecke erzeugt werden können. Diese Prozedur wird so lange iterativ fortgeführt, bis keine Ladeobjekte mehr platziert werden können. Die verschiedenen Ausprägungen des Guillotine-Algorithmus unterscheiden sich hinsichtlich Regeln der Auswahl des Guillotineschnitts (horizontal oder vertikal), der zu belegenden Restfläche und ggf. der Orientierung des zu platzierenden Rechtecks. Ein Beispiel ist der Algorithmus Best-Area-Fit (BAF), der die kleinstmögliche Restfläche auswählt, in welche das nächste Ladeobjekt noch hineinpasst. Jylänki stellt als Vorteil von Guillotinealgorithmen heraus, dass im Gegensatz zu den klassischen Regalalgorithmen alle freien Rechtecke stets zur Anordnung weiterer Ladeobjekte in Betracht gezogen werden und somit der Verschnitt gering gehalten werden kann [Jyl-2010].

Bei Guillotinealgorithmen entstehen freie Rechtecke, deren Begrenzungslinien bei der Platzierung von Rechtecken nicht überschritten werden dürfen. Dies kann den negativen Effekt haben, dass die gesamte Restfläche zwar für das nächste Ladeobjekt ausreichend wäre, aber die Begrenzungslinien der einzelnen Restflächen eine Platzierung verbieten. Dieser Nachteil wird durch Maximal-Rechteck-Algorithmen aufgehoben. Sowohl beim horizontalen als auch vertikalen Guillotineschnitt innerhalb eines ehemals freien Rechtecks besitzt jeweils immer nur eines der zwei entstehenden Rechtecke eine Seite, die sich über die ganze Breite bzw. Höhe des ursprünglichen freien Rechtecks erstreckt. Diese Rechtecke werden als Maximal-Rechtecke bezeichnet. Nach jeder Platzierung eines Ladeobjekts werden jeweils beide Maximal-Rechtecke als potenzielle Anordnungsflächen für weitere Elemente gespeichert. Das Vorgehen sorgt dafür, dass der Fall eines nicht platzierbaren Rechtecks trotz ausreichender Restfläche nicht mehr eintreten kann. Ein Beispiel für einen Maximal-Rechteck-Algorithmus ist die bereits genannte Heuristik BAF, die sich bis auf die Speicherung der freien Rechtecke analog zum Guillotine-Algorithmus verhält.

Als weitere Klasse an Lösungsverfahren sind zahlreiche Skyline-Algorithmen entwickelt worden. Bekannte Beispiele sind die Heuristiken Bottom-Left-Fill (BLF) und Touching Perimeter (TP) [Cha-1983] [Lod-1999]. Die BLF-Heuristik beruht auf der Bottom-Left-Heuristik (BL) [Bak-1980]. Bei dieser werden die Rechtecke nacheinander am oberen Rand bereits platzierter Elemente angesetzt in einer Position, die so weit unten und links wie möglich ist. Werden die Rechtecke vorher absteigend nach Höhe sortiert, steigert dies die Ergebnisqualität. Die BLF-Heuristik zieht auch die

beim BL-Algorithmus entstehenden Lücken zur Anordnung der Rechtecke in Betracht und kann dadurch die Packdichte erhöhen [Cha-1983]. Die TP-Heuristik sortiert die Rechtecke absteigend nach ihrer Fläche und zieht zur deren Platzierung sogenannte Normalpositionen in Betracht. Hierunter versteht man Punkte entlang des Randes bereits angeordneter Elemente, an denen Rechtecke nicht weiter nach unten links geschoben werden können [Chr-1977]. Für jede Normalposition werden die Strecken aufaddiert, bei denen sich das zu platzierende Rechteck und die vorhandenen Rechtecke oder Strip-Begrenzungslinien berühren. Anschließend wird das Rechteck auf jener Normalposition mit größter Summe angeordnet. Dies kommt einer dichten Bepackung zugute.

3.2.4 Automobilspezifische Lösungsansätze

Verfahren von Li

Li entwirft in seiner Dissertation ein praxisorientiertes Optimierungsverfahren für das Offline-Packproblem MHLOPP (gegebene HU-Menge, Gliederzug mit zwei unterschiedlich großen Laderäumen), welches mehrere Abladestellen, die Stapelsysteme und vielfältigen HU-Typen der Automobilindustrie, die Gewichtsbeschränkung, Gewichtsverteilung und gegenseitige Fixierung der HUs im Laderaum berücksichtigt [Li-2003].

Hierzu wird als Zielfunktion eine Summe definiert, die sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- **Volumennutzungsgrad:**
Verhältnis des durch die Ladung eingenommenen Volumens zum maximalen Ladevolumen
- **Flächennutzungsgrad:**
Verhältnis der durch die Ladung eingenommenen Fläche zur maximalen Ladefläche
- **Gewichtsnutzungsgrad:**
Verhältnis Ladungsgewicht zu maximal zulässigem Gewicht
- **Lademeteranteil:**
Verhältnis aus Länge der belegten Ladefläche zur maximalen Lademeteranzahl. Im Gegensatz zum Flächennutzungsgrad lässt sich aus dieser Kennzahl auf den für zusätzliche HUs nutzbaren Laderaum schließen.

- Fixierungsgrad:
Der Fixierungsgrad gibt an, inwieweit die gepackten HUs durch direkt angrenzende HUs sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung gesichert sind.
- Kippsicherheitsgrad:
Der Kippsicherheitsgrad drückt die Sicherheit vor Umkippen des Transportmittels bei Kurvenfahrt aus. Der Wert ist umso niedriger, je weiter der Ladungsschwerpunkt von der Längsmittelachse und dem Boden des Trailers entfernt ist.

Durch Gewichtungsfaktoren kann eine individuelle Priorisierung der Komponenten erreicht werden. Ein durch das Optimierungsverfahren erzeugtes Beladeschema gilt als zulässig, wenn die maximalen Achslasten nicht überschritten sind und eine vorher zu definierende Mindestkippsicherheit nicht unterschritten ist.

Das Gesamtverfahren von Li zieht unterschiedliche Entladereihenfolgen in Betracht. Je untersuchte Entladereihenfolge wird ein Beladeschema erzeugt. Der Algorithmus zur Bestimmung eines Beladeschemas verfolgt den Stackbuilding-Ansatz und besteht aus zwei Phasen: der Durchführung eines Eröffnungs- sowie Verbesserungsverfahrens. Zur Erläuterung des Algorithmus sind Definitionen zur Beschreibung des dreidimensionalen Laderaums notwendig (siehe Abbildung 3-7).

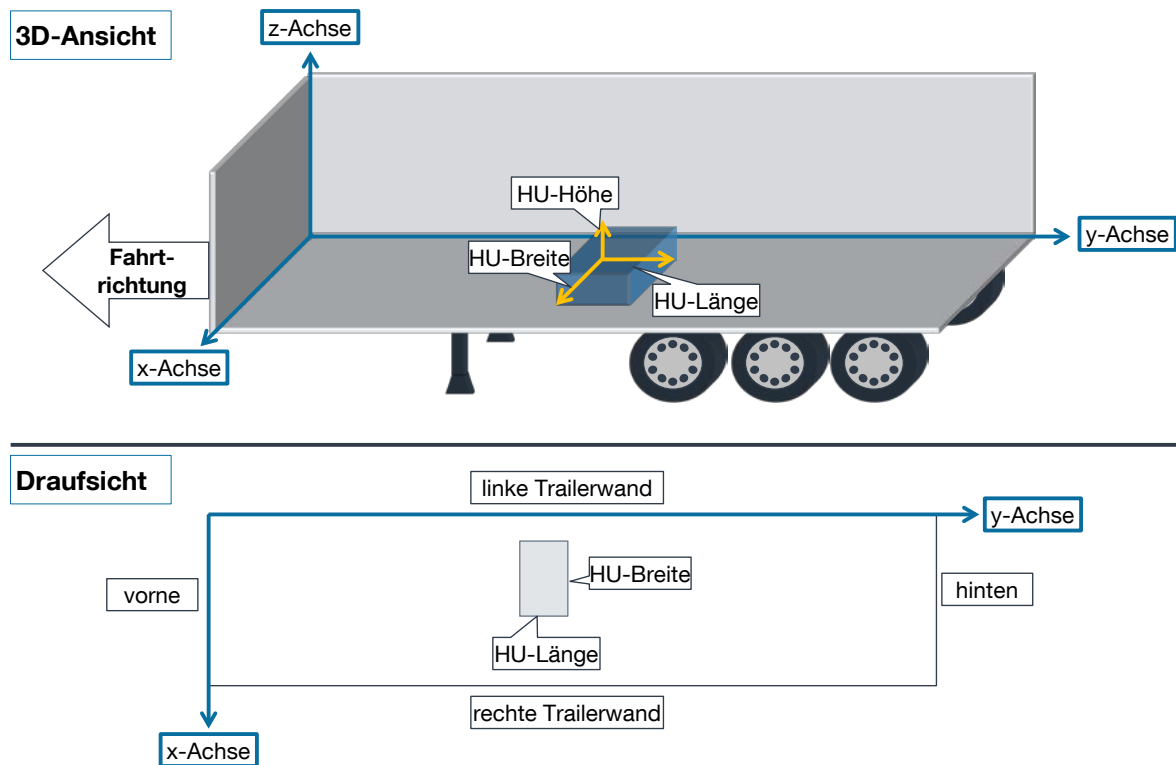


Abbildung 3-7: Definitionen zur Beschreibung des dreidimensionalen Laderaums

Je Abladestelle werden optimale Stapel unter Berücksichtigung kompatibler HU-Typen und der HU-Gewichte bestimmt. Ein Algorithmus hierzu wird nicht beschrieben. Die Stapel werden anschließend nach den Kriterien Stapelbreite, -diagonale und -gewicht sortiert, die individuell gewichtet werden können. Zur Anordnung der Stapel in Reihenfolge der Abladestellen kommt eine Greedy-Konstruktionsheuristik zum Einsatz, die einen an Guillotine-Algorithmen angelehnten Ansatz verfolgt. Durch Linien entlang der Kanten bereits platzierter Stapel werden freie Rechtecke, auch Restflächen genannt, geschnitten. Zur Anordnung weiterer Stapel wird jene Restfläche ausgewählt, die im Laderaum am weitesten nach vorne reicht.

Die Auswahl der als nächstes anzuordnenden Stapel und deren Orientierung erfolgt auf Basis einer Greedy-Zielfunktion, die u.a. die Ausnutzung der Breite und Länge sowie die gegenseitige Fixierung aller Stapelanordnungen in der Restfläche berücksichtigt. Die Befüllung der Restfläche stoppt, wenn der Zielfunktionswert nicht mehr weiter gesteigert werden kann. Anschließend werden weitere Restflächen belegt, bis in beiden Laderäumen keine weiteren Stapel angeordnet werden können.

Nach Bildung eines Beladeschemas wird überprüft, ob die Lösung zulässig ist, und ggf. der Zielfunktionswert ermittelt. Im Anschluss wird das Verbesserungsverfahren

durchgeführt, das auf dem B&B-Ansatz basiert. Hierzu definiert Li den Begriff der Stufe, welche mehrere Stapelanordnungsschritte zur Füllung einer Restfläche umfasst. Die Stufen rückwärtsgehend und bei der vorletzten Stufe beginnend werden der in der entsprechenden Restfläche jeweils erste platzierte Stapel um 90 Grad gedreht, nachfolgende Stapel entfernt und die entstehende Freifläche neu belegt. Ist das neue Packmuster zulässig und kann eine Erhöhung des Zielfunktionswertes erreicht werden, wird die jeweilige Lösung als aktuell bestes Beladeschema gespeichert.

Verfahren von Dawid

Für den Einsatz in der automobilen Distributions- oder Beschaffungslogistik kombiniert Dawid Verfahren zur Routenplanung mit Packalgorithmen (zur integrierten Routenplanung und Stauraumoptimierung siehe 3.2.5) [Daw-2008]. Bei der Berechnung von Beladeschemen werden die Trailerinnenmaße, die maximal zulässige Nutzlast und eine Beladereihenfolge berücksichtigt. Zur Lösung des Offline-Packproblems vom Typ SLOPP (gegebene HU-Menge; ein Container) wird analog zu Li der Stackbuilding-Ansatz verfolgt. Die Stapel werden je Entladestelle (Beladestelle im Falle der Beschaffungslogistik) nach der FFD-Heuristik gebildet.

Für die Verteilung der Stapel auf die Ladefläche hat Dawid eine Heuristik und zwei Optimierungsalgorithmen entwickelt. Als Heuristik wird eine modifizierte TP-Heuristik eingesetzt (TP_{MOD}), bei der die Stapel nach Entladestelle und anschließend absteigend nach Fläche sowie der kürzeren der beiden Stapelseiten sortiert werden. Bei mehreren Normalpositionen mit größter Berührstrecke wird jene Position zur Platzierung des nächsten Stapels gewählt, die am weitesten vorne im Trailer liegt. Können die HUs einer Entladestelle nicht vollständig aufgeladen werden, werden diese entfernt und damit Platz für andere Entladestellen geschaffen. Bei den vorgestellten Optimierungsalgorithmen handelt es sich ebenfalls um Versionen bereits existierender Verfahren. Diese beruhen auf dem B&B-Ansatz (vgl. [Mar-1998], [Cla-2007]).

Automobilspezifische Online-Packalgorithmen werden von der JIT/JIS-Software SupplyCockpit bereitgestellt (vgl. [Bau-2007]). Diese werden im Zuge der Vorstellung des gesamten Dispositionsverfahrens in Abschnitt 3.3.1 näher erläutert.

3.2.5 Integrierte Tourenplanung und Stauraumoptimierung

Häufig liegen in der Transportplanung Teilladungen vor, die alleine nur einen Teil der maximalen Kapazität des Transportmittels ausfüllen. Erst durch Konsolidierungskonzepte kann die Trailerauslastung gesteigert werden. Über das Gebietsspeditionskonzept können die Teilmengen in Hubs gebündelt und dann im Hauptlauf zu den jeweiligen Bestimmungsorten transportiert werden (siehe Abschnitt 2.3.3). Durch Milkruns kann die Auslastung im Vorlauf erhöht werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, durch dieses Transportkonzept die Güter ohne zwischengeschalteten Hub direkt in die Werke zu liefern. Milkruns sind häufig das Ergebnis von Tourenplanungsalgorithmen. Diesen kommt die Aufgabe zu, einerseits Teilladungen Transportmitteln zuzuordnen und andererseits die Abholreihenfolge zu bestimmen [Ban-2006].

Das Standardproblem der Tourenplanung wird als Vehicle Routing Problem bezeichnet (VRP). Es kann sowohl für den Beschaffungs- als auch Distributionsfall definiert werden. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die Beschaffungslogistik. Zur Bildung von Touren liegen ein Depot, mehrere Teilladungen sowie Transportmittel mit beschränkter Kapazität und Einsatzzeit vor. Jeder Transport beginnt und endet beim Depot. Jeder Lieferant darf nur einmal angefahren werden, zudem dürfen die Kapazitäten und Einsatzdauern der Transportmittel nicht überschritten werden. Zielsetzung ist es, die Gesamtstrecke oder Gesamtfahrtdauer aller Touren zu minimieren (siehe z.B. [Dom-2010]).

Neben dem Standardproblem existieren zahlreiche Varianten, bei denen bspw. mögliche Zeitfenster für den Beginn, das Ende der Touren sowie die Abholung bei den Kunden vorgegeben sind (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW), mehrere Depots (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) oder ein heterogener Fuhrpark vorliegen ((Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, VRPHF) [Ban-2006].

Da das Tourenplanungsproblem NP-schwer ist, ist analog zum Containerbeladungsproblem der Großteil existierender Lösungsverfahren heuristischer Natur [Ban-2006]. Diese können ebenfalls in Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren unterteilt werden. Bekannteste Vertreter für Eröffnungsverfahren sind das Savings-Verfahren oder der Sweep-Algorithmus. Beim Savings-Verfahren werden immer dann einzelne Lieferanten in eine Tour aufgenommen, wenn dadurch im Vergleich zu Pendeltouren zwischen einem Depot und einem Lieferanten Wegstrecke eingespart werden kann

[Cla-1964]. Beim Sweep-Algorithmus sind die Lieferantenstandorte durch Koordinaten gegeben. In die geographische Karte mit den Lieferanten wird ein Koordinatenkreuz gelegt. Anschließend werden die Lieferanten mit ansteigendem Polarwinkel sortiert (gegen den Uhrzeigersinn). Beginnend bei einem beliebigen Lieferanten werden solange Lieferanten einer Tour zugeordnet, bis die Fahrzeugkapazität erschöpft ist. Anschließend werden mit den nachfolgenden Lieferanten weitere Touren gebildet, bis kein Lieferant mehr übrig ist [Gil-1974]. Ein bekanntes Verbesserungsverfahren ist bspw. der 2-opt-Algorithmus, bei dem innerhalb bestehender Touren durch Austausch von Kanten nach kürzeren Routen gesucht wird [Cro-1958]. Daneben besteht die Möglichkeit, wie etwa beim int-opt-Verfahren zwischen den Touren Kanten auszutauschen [Aar-2003]. Ebenso werden in der Literatur zahlreiche Metaheuristiken als Lösungsverfahren eingesetzt [Ban-2006].

Bei den in der Literatur formulierten Tourenplanungsproblemen werden die Kapazitätsgrenzen der zur Verfügung stehenden Transportmittel meist simpel durch maximale Mengen- oder Gewichtsangaben modelliert. Somit müssen Sicherheiten eingeplant werden, damit die resultierenden Touren aus Beladungssicht realisierbar sind.

Praxisnäher sind Ansätze, bei denen das Tourenplanungsproblem mit dem Containerbeladungsproblem kombiniert wird. Letztlich besteht die Möglichkeit der isolierten, integrierten sowie sequenziellen Durchführung von Lösungsverfahren für beide Probleme (siehe z.B. [Daw-2008]). Bei der isolierten Variante erfolgt zunächst eine vollständige Tourenplanung. Über einen Packalgorithmus wird anschließend überprüft, ob zulässige Packmuster erzeugt werden können. Teilladungen, die nicht verstaут werden können, werden dann einer erneuten Tourenplanung unterzogen. Hierdurch besteht die Gefahr, dass die entsprechenden Lieferanten geographisch ungünstig zueinander liegen und sich nicht miteinander kombinieren lassen. Wird die integrierte Methode gewählt, wird mit jeder hinzukommenden Teilladung ein neues Packmuster berechnet. Dies wirkt sich einerseits positiv auf die Lösungsqualität, andererseits negativ auf die Rechenzeit aus. Bei der sequenziellen Methode wird zunächst eine Tour gebildet und dann ein Beladeschema ermittelt. Teilladungen, die nicht auf dem Trailer Platz finden, werden wieder entfernt und der Bildung weiterer Touren zur Verfügung gestellt. Dadurch kann zum einen die Rechenzeit begrenzt werden, zum anderen eine für die weitere Tourenbildung ungünstige geographische Verteilung der Lieferantenstandorte wie im isolierten Falle vermieden werden [Daw-2008].

3.2.6 Logistiksoftware zur Stauraumoptimierung

Im Bereich der Packoptimierung und Tourenplanung sind zahlreiche Softwarepakete auf dem Markt, die häufig als Transportmanagementsysteme (TMS) geführt werden (vgl. [Sch-2013]). Ein Überblick findet sich bspw. in einer Ausgabe der Fachzeitschrift Logistik heute [Log-2005]. Da es sich um kommerzielle Produkte handelt, sind die Algorithmen der Anbieter nicht offengelegt. Deren Webseiten geben jedoch eine grobe Beschreibung hinsichtlich des Leistungsspektrums.

Über Referenzen im Automotive-Sektor verfügen bspw. die Unternehmen inconso, leogistics und PearlChain.net. Die distributionsorientierten Softwarepakete von inconso und leogistics sind in die ERP-Software SAP integriert. Die Berechnung von Packmustern erfolgt auf Basis gegebener Teilladungen. Informationsbroschüren und telefonischen Auskünften zufolge können deren Algorithmen unterschiedliche Transportmitteltypen abbilden. Zudem werden Achslasten, Beladereihenfolgen und Stapelregeln berücksichtigt [inc-2013] [Käb-2013]. PearlChain.net bietet in seiner Softwarelösung SupplyCockpit einen Online-Packalgorithmus für JIT/JIS-Transporte an (siehe Abschnitt 3.3.1).

3.3 Erhöhung der Transportauslastung in der Praxis auf Basis bestehender Dispositionsverfahren

Die Automobilhersteller streben nach einer möglichst hohen Auslastung der Inboundtransporte. Bei Teilladungen im Sammelladungsverkehr wird das Transportmanagement den Speditionen überlassen. Bei Direktverkehren oder Milkruns dagegen lässt sich auf Basis bestehender Dispositionsverfahren gezielt auf die Auslastung der Transporte einwirken. Abhängig von der Belieferungsform und dem Transportmodus werden dabei verschiedene Ansätze verfolgt, die nachfolgend erläutert werden.

3.3.1 Trailerbasierte Abrufsteuerung für lagerlose Teileumfänge

Ohne Unterstützung durch eine spezielle Software stellt der Lieferant bei lagerloser Belieferung selbständig Transporte zusammen. Bei leichten JIS-Bauteilen, die im selben HU-Typ mit festem Packlos angeliefert werden, kann meist die maximale HU-Anzahl je Trailer ermittelt und somit eine hohe Packdichte erreicht werden. Bei vari-

ierenden Packlosen und unterschiedlichen HU-Typen gestaltet sich dagegen die Erzeugung hoch ausgelasteter Transporte deutlich komplexer. Eine automatisierte Lösung hierzu bietet die Firma PearlChain.net durch ihre Software SupplyCockpit an, die u.a. bei der MTB im Einsatz ist. Am Beispiel des Nutzfahrzeugherstellers soll nachfolgend die Funktionsweise des trailerbasierten Dispositionsansatzes erläutert werden (vgl. [Bau-2007]).

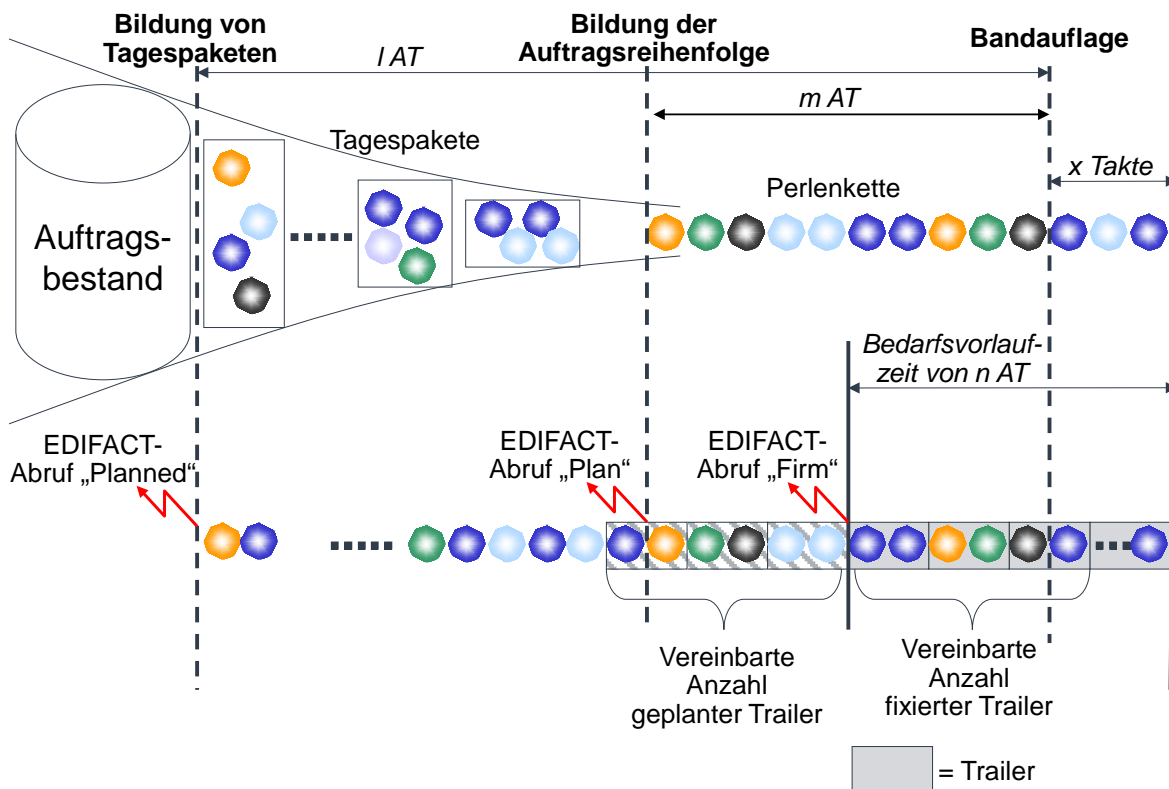


Abbildung 3-8: Perlenkettenbasierte Abrufsteuerung für JIT/JIS-Teileumfänge bei der MTB (in Anlehnung an [Bau-2007])

Maßgeblich für die Steuerung von JIT- oder JIS-Teileumfängen in SupplyCockpit sind sogenannte Teilefamilien und Transportfamilien. Nach SupplyCockpit-Definition fassen Teilefamilien Bauteile zusammen, die am selben Montageort verbaut werden und in aufeinander stapelbaren Behältern mit identischen Außenmaßen sowie bei JIT mit identischem Packlos vom selben Lieferantenwerk aus geliefert werden. Eine Transportfamilie besteht aus einer oder mehreren Teilefamilien desselben Lieferantenwerkes, deren Verbauorte räumlich in der Nähe liegen. Je Transportfamilie ermittelt die Software Inhalt und Ankunftszeitpunkt der zukünftig im Zielwerk einzugehenden Trailer.

Grundlage hierfür ist die Auftragsperlenkette, siehe Abbildung 3-8. l Arbeitstage vor Bandaufgabe werden Tagespakete und eine vorläufige Reihenfolge der zu produzierenden Fahrzeuge festgelegt. m Tage vor Bandaufgabe wird auch die Auftragssequenz fixiert. Über die Perlenkette und Stücklistenauflösung können die exakten Bedarfsmengen und -zeitpunkte der einzelnen Bauteile der Teilefamilien minutengenau berechnet werden. Unter Berücksichtigung systemisch geführter Werksbestände und einer einzustellenden Vorlaufzeit erfolgt die Ermittlung der Nettobedarfe einschließlich zugehöriger Bedarfszeitpunkte. Anschließend wird eine HU-Bildung durchgeführt, bei der die benötigten Bauteile entsprechend ihrer Bedarfszeitpunkte *peu à peu* in die zugehörigen HUs gepackt werden. Im Falle von JIT entstehen sortenreine, bei JIS gemischte HUs. Bedarfszeitpunkt einer jeden HU ist der Bedarfszeitpunkt des jeweils als erstes benötigten Bauteils. Anschließend werden die nach aufsteigendem Bedarfszeitpunkt sortierten HUs über einen Online-Packalgorithmus nacheinander systemisch auf Trailer verladen. Als Zeitstempel wird jedem Trailer der Bedarfszeitpunkt der jeweils als erstes benötigten HU zugewiesen.

Im vereinfachten Beispiel von Abbildung 3-8 findet immer der Transportfamilienbedarf für genau zwei Fahrzeugaufträge Platz auf einem Trailer. Prinzipiell stellt SupplyCockpit drei verschiedene Beladevarianten zur Verfügung. Im einfachsten Fall kann die maximale Zahl an HUs je Trailer vorgegeben werden. Diese Variante ist für Teilefamilien zu wählen, deren HU-Typen immer im selben Verhältnis nachgefragt werden und nie eine Überschreitung des maximal zulässigen Gesamtgewichts zu erwarten ist. Bei schweren Bauteilen kann alternativ auf diejenige Trailerberechnungsmethode zurückgegriffen werden, bei der eine Gewichtsbeschränkung angegeben werden kann. Bei Transportfamilien, bei denen die Ladung dynamisch durch das maximale Trailervolumen oder -gewicht beschränkt sein kann, steht die komplexeste Methode „Geometrie inklusive Gewicht“ zur Verfügung. Bei dieser werden im Trailer virtuell HUs derselben Stapelfamilie in sogenannten Hübchen nach dem FF-Online-Algorithmus verstaut (siehe Abbildung 3-9). Hübchen können nur HUs derselben Grundfläche aufnehmen. Stapelfamilien fassen HU-Typen zusammen, die aufeinander stapelbar sind und im selben Hübchen verstaut werden dürfen. Sie können HUs unterschiedlicher Teilefamilien enthalten. Durch die Angabe von Länge und Breite der HU wird die Orientierung der im Trailer platzierten HUs bestimmt. Die als lang deklarierte HU-Seite ist dabei längs der Trailerflanken anzuordnen. Die Beladung beginnt in der linken Ecke an der Laderaumfront und endet, bis keine HUs mehr Platz finden oder das maximale Trailergewicht erreicht ist.

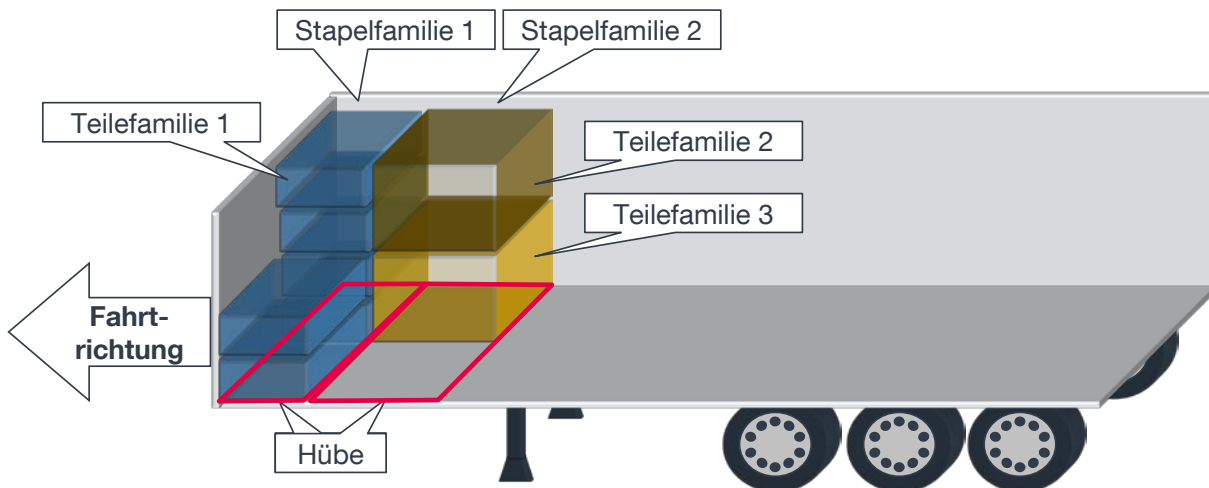


Abbildung 3-9: Beispielhafte virtuelle Verladung von HUs in Hügen

Neben der Beschränkung durch die Anzahl an HUs, das Gewicht bzw. Volumen kann zusätzlich eine maximale Vorgriffszeit vorgegeben werden. Sie gibt die maximale Zeitspanne zwischen dem Bedarfszeitpunkt der als erstes und letztes im Laderaum platzierten HU vor. Dadurch kann die Trailerreichweite begrenzt werden. Greift bei den jeweiligen Methoden eine der entsprechenden Restriktionen oder ist die maximale Vorgriffszeit erreicht, wird mit der Beladung des nächsten Trailers fortgefahren.

Bei den erzeugten Trailern wird zwischen fixierten und geplanten Trailern unterschieden. Bei fixierten Trailern können Inhalt und Ankunftszeitpunkt im Gegensatz zu geplanten Trailern nicht mehr geändert werden. Mit dem Lieferanten ist die Anzahl der fixierten und geplanten Trailer zu vereinbaren. Je größer der Bedarfszeitraum ist, den die fixierten Trailer abdecken, desto größer ist die Planungssicherheit für den Lieferanten. Gleichzeitig sinkt die Planungsflexibilität seitens des OEM. Die Anzahl fixierter Trailer muss jedoch mindestens so hoch eingestellt werden, dass diese die BVZ zuzüglich der Wiederbeschaffungszeit abdecken. Damit ist der Lieferant stets in der Lage, rechtzeitig Trailer für den OEM zu beladen.

Vom physischen Prozess her können sowohl das Warehouse-on-Wheels-Prinzip als auch eine Footprintbelieferung realisiert werden. Mit jedem Leerwerden eines Trailers wird ein neuer Rechenlauf angestoßen, bei dem der am frühesten benötigte geplante Trailer fixiert wird und ein neuer Trailer eingeplant wird. Das Ergebnis des Rechenlaufs wird dem Lieferanten in Form von Bedarfsmengen und -zeitpunkten per EDifact-Abruf übermittelt. Das Beladeschema selbst wird nicht übertragen.

Im Vorfeld sind mit dem Lieferanten auf Basis von durchschnittlichen HU-Verbräuchen und unter Berücksichtigung der Ladungssicherung ein statisches Beladeschema sowie Beladeregeln zu vereinbaren. Dadurch wird der Lieferant befähigt, auch ohne konkretes Packmuster den Trailer in gewünschter Form zu beladen.

Für den Disponenten bietet das Dispositionssystem hohe Transparenz hinsichtlich der physischen Materialflüsse. Er ist jederzeit informiert über den aktuellen Standort und die Beladung der Trailer. Diesen werden eindeutige IDs zugeordnet, die dem Lieferanten übermittelt werden. Dadurch können Abrufe mit Lieferscheinen abgeglichen werden. Ein zuvor als fixiert deklarerter Trailer wechselt den Status zu „Transit“, sobald ein entsprechender Lieferschein des Lieferanten empfangen wurde. Geht der Trailer im Werk ein und wird auf einem Yard abgestellt, nimmt er den Status „Yard“ ein. Im direkten Zugriff der Montage befindliche Trailer werden dem Status „Dock“ zugeordnet. Darüber hinaus wird dem Disponenten eine grafische Oberfläche zur Darstellung der Versorgungssituation zur Verfügung gestellt. Hierbei werden auch im Transit befindliche Trailer berücksichtigt, sodass frühzeitig auf etwaige Versorgungsengpässe reagiert werden kann.

3.3.2 Weitere Verfahren zur Erhöhung der Transportauslastung

Neben der genannten trailerbasierten Abrufsteuerung besteht die Möglichkeit, über eine dynamische Anpassung von Lieferplankalendern, manuelle dynamische Transportsteuerung, Vendor Managed Full Truck Loads oder eine dynamische Tourenplanung auf die Auslastung der Transporte einzuwirken.

Heutige Dispositionssysteme im lagerhaltigen Bereich sind auf den Abruf einzelner Bauteile ausgelegt. Werden Lieferplankalender der Güter desselben Lieferanten individuell festgelegt, kann dies zu einer ungleichen Verteilung von Abrufmengen führen. Abhilfe schafft eine bauteilübergreifende Harmonisierung der Lieferplankalender eines oder mehrerer Lieferanten, wodurch die Liefermengen auf einzelne Liefertage konzentriert und Abrufmengenschwankungen einzelner Bauteile ausgeglichen werden können. Die Lieferfrequenz ist dann derart zu wählen, dass eine möglichst hohe Transportauslastung im Modus Direktverkehr oder Milkrun erreicht werden kann. Da sich mittelfristig Bedarfsniveaus ändern können, ist der Lieferplankalender in regelmäßigen Abständen dynamisch zu überplanen.

3 Methoden zur Erhöhung der Transportauslastung

Alternativ bietet es sich insbesondere bei hohen Bedarfsschwankungen an, Lieferpläne eines oder mehrerer Lieferanten auf täglich einzustellen und anschließend manuell Tagesmengen zu möglichst vollen Trailern zu aggregieren. Anhaltspunkt für die Auslastung kann bspw. das Gewicht der Güter sein, die den Transporten zugeordnet werden. Schwanken die Bedarfe, hat eine derartige manuelle dynamische Transportsteuerung dynamische Lieferfrequenzen zur Folge.

Ebenso können Transporte von den Lieferanten selbst geplant werden. Dieses Konzept wird auch als Vendor Managed Full Truck Load bezeichnet. Es ist nur für den Transportmodus Direktverkehr geeignet. Der Lieferplankalender wird für jedes Bauteil auf täglich eingestellt. Mit dem Lieferanten werden bauteilbezogen Korridore mit minimaler und maximaler Bestandsreichweite vereinbart. Dadurch wird ihm eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der Zusammenstellung von Trailern eingeräumt (vgl. [Kle-2012]).

Darüber hinaus kann auf eine dynamische Tourenplanung zurückgegriffen werden. Grundlage sind bei den Lieferanten abgerufene Teilmengen, die möglichst optimal zu Milkruns zusammengefasst werden. Das Operations Research bietet hierzu eine Fülle an leistungsfähigen Algorithmen. Es existieren zudem bereits zahlreiche Softwaresysteme, die entsprechende Funktionen bereithalten und zudem häufig in bekannte ERP-Systeme integriert werden können (siehe Abschnitt 3.2.6).

4 Anforderungsklä rung und Forschungslücke

Im Rahmen der Anforderungsklä rung gilt es, die Anforderungen an das zu schaffende System einer integrierten Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge vollständig zu erfassen. Als übergeordnete Anforderungsquelle dient zunächst die Zielsetzung eines schlanken Logistiksystems, aus der sich der konzeptionelle Rahmen für das zu entwickelnde Steuerungssystem ableiten lässt. Des Weiteren können konkrete Anforderungen aus einer kritischen Auseinandersetzung mit den bestehenden Basiskonzepten der automobilen Beschaffungslogistik extrahiert werden. Hierbei können identifizierte grundlegende Schwachstellen implizit in Anforderungen umgemünzt werden. Bei unstrittig vorteilhaften Einzelkonzepten kann eine Integration in das zu entwickelnde Steuerungssystem direkt gefordert werden. Kommen mehrere alternative Konzeptausprägungen infrage, sind diese einer qualitativen oder quantitativen Analyse zu unterziehen und anschließend entsprechende Anforderungen zu formulieren. Hierzu können bspw. Nutzwertanalysen oder numerische Simulationen herangezogen werden.

Nachfolgend werden die Anforderungen an das Steuerungssystem erarbeitet. Da sich dessen Ausgestaltung auch auf die physischen Prozesse auswirken kann, werden außerdem die Anforderungen an den physischen Materialfluss bestimmt. Zur Identifikation der Forschungslücke erfolgt im Anschluss ein Abgleich der Anforderungen mit bestehenden transportprozessspezifischen Ansätzen zur Steuerung lagerhaltiger Teileumfänge.

4.1 Anforderungen an die Steuerung und den physischen Prozess

4.1.1 Allgemeine Anforderungen an das Steuerungssystem

Aus der Zielsetzung heraus soll das zu entwickelnde Steuerungssystem in der Lage sein, schlanke physische Prozesse abzubilden. Ebenso sollten die administrativen Prozesse der Planung und Disposition schlanken Kriterien gerecht werden. Vorgaben und Anhaltspunkte für deren Ausgestaltung liefern die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Lean-Logistics-Prinzipien.

Primäre Aufgabe eines Abrufsteuerungssystems ist die Versorgung der Produktion mit betriebsfremdem Material. Aus Lean-Logistics-Sicht sollte dies mit möglichst geringen Beständen sichergestellt werden. Darüber hinaus ist ein robustes Steuerungssystem anzustreben, das auch bei Bedarfsschwankungen und Prozessstörungen für stabile Abrufe sorgt. Gleichzeitig sollte eine gewisse Planungsflexibilität erhalten bleiben.

Hinsichtlich der physischen Prozesse werden u.a. niedrige Durchlaufzeiten, geringer Transport- und Handhabungsaufwand gefordert. In der Werkslogistik kann hierauf bspw. über die Stufigkeit der Materialbereitstellung eingewirkt werden. Für eine Abruf- und Transportsteuerung im lagerhaltigen Bereich sind jedoch nicht die konkrete Ausgestaltung der OEM-internen Prozessabfolge bis zum Montageband, sondern lediglich der Werksbestand oder Verbrauchsinformationen relevant. Da in das System aber eine Transportsteuerung integriert werden soll, sind geeignete Transportmodi zu berücksichtigen. Zur Verfügung stehen der Direktverkehr, Sammelladungsverkehr und Milkrun mit jeweils unterschiedlich ausgeprägten Stärken und Schwächen. Je nach anwendungsfallbezogenen Rahmenbedingungen ist eines den anderen Konzepten vorzuziehen. Keiner der Modi wird allen Anforderungen an einen schlanken Prozess gleichzeitig gerecht. Entsprechend sind alle verfügbaren Transportalternativen abzubilden.

Bei Direktverkehren oder Milkruns sollte das Steuerungssystem im Sinne einer hohen Ressourceneffizienz stets Abrufmengen generieren, die für eine hohe Auslastung der Transportmittel sorgen. Gleichzeitig führen volle Trailer zu einer Senkung der Transportfrequenz und einem Bestandsaufbau im Werk. Werden dann auch noch JIT/JIS-Teile direkt oder per Milkrun und Lagerteile desselben Lieferanten separat über einen Gebietsspediteur mit im Vergleich nachteiligen Transportstückkosten angeliefert, führt dies sowohl zu einem erhöhten JIT/JIS-Sägezahnbestand als auch unvorteilhaften Transportkosten für das lagerhaltige Material. Bei solchen Lieferanten sollten daher alle Teileumfänge idealerweise im selben Transport angeliefert werden.

Während Komplettladungen bei Direktverkehren und Milkruns die Frequenz automatisch vorgeben, kann sie bei Sammelladungsverkehren durch die Höhe der abgerufenen Teilmengen individuell bestimmt werden. Diese werden vom Spediteur in Hubs gebündelt und anschließend zu möglichst vollen Trailern für den Hauptlauf zusammengestellt. Der Konsolidierungsaufwand spiegelt sich in entsprechenden

Transporttarifwerken wider, welche die Transportkosten in Abhängigkeit von der beim Lieferanten abgerufenen Menge angeben. Unter Berücksichtigung von Transport-, Bestands- und Prozesskosten (z.B. administrative und physische Warenver-einnahmung) gilt es, stets die optimale Menge abzurufen.

Bezogen auf die administrativen Prozesse entsteht Aufwand bei der Einrichtung von Lieferrelationen und der operativen Steuerung, der möglichst gering gehalten werden sollte. Dies beinhaltet zum einen die Pflege von Daten sowie das Setzen von Dispositionsparametern und zum anderen die Koordination der Prozesse, die Überwachung der Versorgungssituation, die Reaktion auf Prozessstörungen und die Kommunikation mit den Lieferanten. Zur Vermeidung tendenziell fehleranfälliger manueller Prozesse und des zugehörigen Aufwands sollte zudem das noch zu konkretisierende Dispositionsverfahren automatisiert durchgeführt werden.

Ein Effizienzgewinn im Umgang mit dem System ist zu erwarten, wenn im Sinne des Standardisierungsgedankens die Steuerung aller Teileumfänge auf der derselben Logik fußt. Diese sollte zudem für Planer und Disponenten verständlich und nachvollziehbar sein. Prozesse lassen sich dann bei veränderten Rahmenbedingungen flexibel und schnell im selben System umstellen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungssystem formulieren:

- A1.1.** Das Steuerungssystem soll als Standard basierend auf derselben Logik für alle Belieferungsformen eingesetzt werden können.
- A1.2.** Die Materialversorgung soll mit möglichst geringen Beständen sichergestellt werden.
- A1.3.** Das System soll sich robust und gleichzeitig ausreichend flexibel bei veränderten Rahmenbedingungen verhalten.
- A1.4.** Alle verfügbaren Transportmodi sollen abgebildet werden können.
- A1.5.** Bei Sammelladungsverkehren soll das System optimale Transportmengen abrufen können.
- A1.6.** In den Transportmodi Direktverkehr und Milkrun soll eine hohe Auslastung erreicht werden können.
- A1.7.** Lagerlose und lagerhaltige Teileumfänge sollen in gemeinsamen Transporten angeliefert werden können.
- A1.8.** Die Steuerungslogik soll möglichst einfach, verständlich und nachvollziehbar sein.

A1.9. Das Dispositionsverfahren soll automatisiert ausgeführt werden.

A1.10. Der Aufwand für die Einrichtung von Lieferrelationen soll möglichst gering sein.

A1.11. Der operative Steuerungsaufwand soll gering gehalten werden.

A1.12. Über Bestände, Materialbewegungen und die Versorgungssituation soll Transparenz herrschen, sodass effizient auf Prozessstörungen reagiert werden kann.

4.1.2 Anforderungen an das Dispositionsverfahren, die Lieferantenkommunikation und den physischen Prozess

Anforderungen an das Dispositionsverfahren

Hinsichtlich des zu wählenden Dispositionsverfahrens kommt prinzipiell eine Bedarfs- oder Verbrauchssteuerung infrage. Aus Lean-Perspektive ist ein Materialnachschub nach der Pull-Philosophie anzustreben. Im weiteren Sinne versteht man hierunter eine Steuerung, die Bauteile nachordert, die auch wirklich benötigt werden. In Literatur und Praxis wird das Pull-Prinzip jedoch meist enger gefasst und mit einer dezentral organisierten reinen Verbrauchssteuerung analog zum Kanban-Verfahren gleichgesetzt (vgl. z.B. [Klu-2010]). Bestandsorientierte oder stochastische Dispositionsverfahren, die ebenfalls als Verbrauchssteuerungen aufgeführt werden, werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Bei einer reinen Verbrauchssteuerung wird unterstellt, dass eine verbrauchte Menge, die bspw. über einen leer gewordenen Behälter identifiziert werden kann, in selber Höhe wieder nachgefragt werden wird. Eine Bedarfssteuerung wird dagegen dem Push-Prinzip zugeordnet, bei welchem die Koordination aller Materialflüsse von einer zentralen Steuerungsinstanz aus erfolgt [Gün-2013]. Bedarfsgesteuerte Dispositionsverfahren haben sich in der Automobilindustrie bewährt. Ein Beispiel ist das JIT/JIS-Konzept. Trotz der einer JIT/JIS-Steuerung zugrunde liegenden Push-Philosophie wird diese ebenfalls als „lean“ deklariert, sorgt sie doch für eine Synchronisierung mit den Produktionsprozessen und einen Zufluss exakter Kundenbedarfe. Vor diesem Hintergrund wird eine Bedarfssteuerung als Alternative zu einer Kanban-Verbrauchssteuerung für das zu entwickelnde Dispositionssystem in Betracht gezogen.

Hauptvorteile der Push-Philosophie sind u.a. eine hohe Ressourcenauslastung und die Möglichkeit zur gesamtheitlichen Optimierung. Insbesondere bei bedarfssynchroner Anlieferung per JIT oder JIS können zudem die Bestände gering gehalten werden [Klu-2010]. Als Nachteil wird häufig ein hoher steuerungstechnischer Planungsaufwand für die Bestimmung von Bedarfsmengen und -zeitpunkten betrachtet [Gün-2013]. Dies beinhaltet u.a. die Pflege von Beständen und Stücklisten. Letzteres muss für die Erstellung von Arbeitsplänen für die einzelnen Montagetake aber ohnehin geleistet werden. Alle weiteren Aufgaben wie bspw. die Bestimmung der Bruttobedarfe per Stücklistenauflösung oder die Nettobedarfsrechnung werden heutzutage von leistungsfähigen Rechensystemen übernommen.

Für eine Pull-Steuerung sprechen u.a. ein geringer Steuerungsaufwand, hohe Flexibilität bzgl. der kurzfristigen Programmplanung, eine hohe Prozesssicherheit sowie Abrufstabilität, da einmal abgerufene Mengen nicht mehr geändert werden. Ein wesentlicher Vorteil ist zudem, dass Mehrverbräuche automatisch registriert werden und zu Nachbestellungen führen. Bei einer Bedarfssteuerung ist hierzu eine permanente Transparenz über Bestände notwendig, verbunden mit entsprechendem Inventuraufwand. Des Weiteren gehen Pull-Steuerungen mit niedrigen Beständen einher - einen regelmäßigen Bedarf vorausgesetzt (vgl. z.B. [Klu-2010]). Liegen größere Bedarfsschwankungen vor, müssen bei der Auslegung verbrauchsgesteuerter Abrufsysteme entsprechende Sicherheiten eingeplant werden. Dies lässt einen Bestandsaufbau bei zeitweise geringem Bedarf erwarten. Nachteilig auf Bestände und Platzbedarf wirkt sich überdies eine hohe Variantenvielfalt aus, da bei einem Pull-System stets alle Varianten vorgehalten werden müssen.

Die meisten Argumente für ein Pull-System verlieren in heutigen Produktionssystemen mehr und mehr an Relevanz. Diese beruhen häufig auf dem Perlenkettenprinzip, bei dem die Fahrzeugaufträge und deren Montagereihenfolge für einen bestimmten Produktionszeitraum fixiert werden. Spezielle Konzepte und Methoden sorgen dafür, dass an diesem festgelegten Produktionsplan keine oder kaum noch Änderungen vorgenommen werden müssen [Mei-2009b]. Dadurch kann auch bei einer bedarfsgesteuerten Disposition eine hohe Abrufstabilität erreicht werden. Dies ist insbesondere bei JIS-Belieferung essenziell, da bei kurzfristig veränderter Perlenkette sonst eine aufwändige Resequenzierung notwendig würde. Gleichzeitig wird eine hohe Flexibilität hinsichtlich des Produktionsprogrammes außerhalb des Fixierzeitraumes gewahrt.

Aufgrund zahlreicher Einflussgrößen auf die Perlenkettengüte sind kurzfristige Änderungen bei Materialabrufen dennoch nicht gänzlich auszuschließen (vgl. [Mei-2009b]). Dem kann aber durch eingefrorene Abrufe und eine maßvolle Absicherung durch Zeit- oder Mengenpuffer begegnet werden. Auch das Argument einer einfacheren Steuerungslogik hat inzwischen aufgrund ohnehin automatisierter, leistungsfähiger Rechensysteme kaum mehr Bedeutung.

Während folglich keine eindeutigen Vorteile verzeichnet werden können, sprechen die für die Automobilindustrie übliche hohe Variantenvielfalt und meist größere Bedarfsschwankungen einzelner Variantenbauteile tendenziell gegen den breiten Einsatz einer Pull-Steuerung. Überhaupt liegt die Vermutung nahe, dass ein lediglich auf historischen Verbräuchen basierendes Dispositionsverfahren einer Steuerung unterlegen ist, die auf fein aufgelösten Bedarfsinformationen beruht. Die tatsächliche Leistungsfähigkeit von bedarfs- und verbrauchsgesteuerten Abrufsystemen unter identischen Rahmenbedingungen soll nachfolgend anhand einer Simulationsstudie beurteilt werden (vgl. [fml-12b]).

Hierbei wird eine tagesgenaue eKanban-Steuerung einer ebenfalls tagesgenauen Bedarfssteuerung mit SB und mit BVZ gegenübergestellt. In einem ereignisorientierten, zeitdiskreten Simulationsmodell wird ein lagerhaltiger Versorgungsprozess mit einstufiger Supermarktbereitstellung abgebildet. An jedem Tag kann angeliefert werden. Bedarfe schwanken stochastisch, zudem können Fehlteile auftreten. Für alle Steuerungsvarianten herrschen dieselben Rahmenbedingungen. Die Leistungsfähigkeit der Alternativen spiegelt sich daher in den Beständen wider, die zur Sicherstellung der Materialversorgung notwendig sind. Bezüglich der Kapitalbindung ist der mittlere Bestand maßgeblich, hinsichtlich der erforderlichen Bereitstellflächen ist vor allem der maximale Bestand relevant. Ziel der Studie ist es deshalb, anhand des lagerhaltigen Belieferungsprozesses unter identischen, dynamischen Bedingungen für jede Steuerungsvariante simulativ den minimalen mittleren und maximalen Bestand zu bestimmen.

Schwankungen und Prozessstörungen werden durch die Parameter Variationskoeffizient des Tagesbedarfs, durchschnittliche Ausschussquote und Standardabweichung der Ausschussquote abgebildet. Hinzu kommen die Parameter durchschnittliche Packlosreichweite und Frequenz der Bedarfsübermittlung.

Das Packlos wird auf 100 festgelegt. Unterschiedliche Bedarfsniveaus werden über die durchschnittliche Packlosreichweite eingestellt. Die Wiederbeschaffungszeit ori-

entiert sich an in der Automobilindustrie gängigen Vereinbarungen mit Spediteuren für innerdeutsche Verkehre. Am dritten Tag nach Avisierung beim Spediteur erfolgt die Warenankunft im Werk. Bei eKanban wird Material nach Leerwerden eines Behälters beim Lieferanten geordert. Jeden Morgen erhält der Spediteur den Auftrag zur Abholung der gesamten Bestellmenge des Vortages. Bei Bedarfssteuerung wird täglich abends ein neuer Lieferplan berechnet. Am Morgen des darauffolgenden Tages wird beim Spediteur die laut Lieferplan in drei Tagen benötigte Menge avisiert. Mehrbedarfe innerhalb dieser Frist können erst nach Ablauf der Wiederbeschaffungszeit bedient werden. Dies kommt einer Fixierung der Abrufe innerhalb der Wiederbeschaffungszeit gleich. Unabhängig vom Dispositionsverfahren wird Vollgut immer morgens angeliefert. Interne Durchlaufzeiten werden nicht berücksichtigt.

Für jeden Parameter werden mögliche Ausprägungen, auch Faktorstufen genannt, fein auf eine Skala zwischen Null und einem Maximalwert verteilt, der von Realdaten eines Supermarktes der MTB abgeleitet ist. Gleiches gilt für die Verteilungsfunktionen des Tagesbedarfs bei unterschiedlich hohem Variationskoeffizienten. Die Implementierung des Belieferungsprozesses und der Steuerungsvarianten erfolgt in der Software Plant Simulation.

Im Rahmen der Experimente werden je Steuerungsvariante alle möglichen Kombinationen der Parameterausprägungen simuliert. Als Simulationszeitraum werden 120 Arbeitstage gewählt. Zur Bestimmung der Zielgrößen werden in jedem Simulationslauf täglich die morgendlichen Supermarktbestände gespeichert. Bei bedarfsgesteuerter Disposition mit Sicherheitsbestand (BD_SB) und bei eKanban (verbrauchsgesteuertes Dispositionsverfahren=VD) werden die Bestände mit so hohen Sicherheiten initialisiert, dass die Materialversorgung in jedem Fall gewährleistet ist. Nach Beendigung eines Simulationslaufs wird der minimale morgendliche Bestand ermittelt und von den gespeicherten morgendlichen Tagesbeständen abgezogen. Aus den reduzierten Bestandswerten können dann der mittlere und maximale Bestand ermittelt werden. Bei bedarfsgesteuerter Disposition mit Bedarfsvorlaufzeit (BD_BVZ) wird Schritt für Schritt die BVZ erhöht, bis keine Versorgungslücke mehr auftritt. Anschließend werden für die morgendlichen Bestandswerte ab der letzten BVZ-Erhöhung der mittlere und maximale Bestand berechnet.

Ergebnis der Simulationsläufe ist, dass der maximale Bestand bei BD_SB immer am geringsten ist. Bei täglicher Übermittlung von Lieferabrufen ist der mittlere Bestand entweder bei BD_SB oder BD_BVZ am niedrigsten. Selbst wenn bei den Bedarfs-

steuerungen Lieferabrufe nur einmal pro Woche aktualisiert werden, hat das tagesgenaue Kanbanverfahren fast immer das Nachsehen. Lediglich bei minimalen Bedarfsschwankungen und extrem langer Packlosreichweite liegt es bezogen auf den mittleren Bestand mit den anderen Verfahren gleichauf.

Die negativen Auswirkungen einer Verbrauchssteuerung bei hohen Bedarfsschwankungen können in der Simulation bestätigt werden. Beim höchsten Variationskoeffizienten beträgt der Mehrbestand gegenüber der jeweils besten Bedarfssteuerungsvariante bis zu 779% beim mittleren Bestand und bis zu 96% beim maximalen Bestand. Die in der Regel deutlich schlechtere Performance der BD_BVZ gegenüber der BD_SB ist zum einen dadurch zu erklären, dass Sicherheiten bei BD_SB wesentlich feingranularer angegeben werden können (genaue Stückzahl vs. tagesgenaue BVZ). Zum anderen ist dies auf die Steuerungslogik selbst zurückzuführen. In bestimmten Situationen, in welchen die Ausschussquote gerade hoch und der zukünftige Bedarf niedrig sind, ist eine hohe Bedarfsvorlaufzeit notwendig. In Zeiten hohen zukünftigen Bedarfs schlägt sich diese jedoch in entsprechend hohen Beständen im Werk nieder.

Tabelle 4-1 stellt die Simulationsergebnisse für alle drei Steuerungsvarianten dar. Die einzelnen Bestände werden jeweils als Prozentsatz in Bezug auf den jeweils niedrigsten mittleren bzw. maximalen Bestand angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die fein aufgelösten Faktorstufen der einzelnen Parameter jeweils zu den Klassen „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ zusammengefasst. Wegen des geringen Einflusses auf das Simulationsergebnis wird der Parameter Standardabweichung der Ausschussquote nicht angezeigt. Zudem sind nur jene Ergebnisse einer Bedarfssteuerung berücksichtigt, bei der Lieferabrufe täglich übermittelt werden.

Tabelle 4-1: Simulationsergebnisse

Variationskoeffizient	Durchschn. Ausschussquote	Durchschn. Packlosreichweite	Durchschnittlicher mittlerer Bestand			Durchschnittlicher maximaler Bestand		
			BD_SB	BD_BVZ	VD	BD_SB	BD_BVZ	VD
niedrig	niedrig	niedrig	100%	142%	191%	100%	147%	149%
		mittel	100%	112%	147%	100%	116%	138%
		hoch	100%	108%	112%	100%	107%	128%
	mittel	niedrig	100%	136%	189%	100%	140%	149%
		mittel	100%	109%	148%	100%	115%	139%
		hoch	100%	107%	114%	100%	107%	129%
	hoch	niedrig	100%	125%	185%	100%	133%	148%
		mittel	100%	107%	148%	100%	113%	139%
		hoch	102%	104%	119%	100%	106%	134%
mittel	niedrig	niedrig	100%	139%	411%	100%	139%	167%
		mittel	100%	111%	206%	100%	119%	152%
		hoch	100%	103%	140%	100%	110%	131%
	mittel	niedrig	100%	127%	378%	100%	135%	167%
		mittel	100%	109%	207%	100%	117%	152%
		hoch	101%	103%	143%	100%	110%	135%
	hoch	niedrig	100%	115%	348%	100%	134%	168%
		mittel	100%	104%	205%	100%	116%	153%
		hoch	101%	104%	146%	100%	109%	139%
hoch	niedrig	niedrig	100%	137%	623%	100%	136%	173%
		mittel	100%	111%	259%	100%	119%	151%
		hoch	100%	106%	166%	100%	112%	131%
	mittel	niedrig	100%	119%	534%	100%	133%	171%
		mittel	100%	106%	257%	100%	118%	152%
		hoch	101%	103%	168%	100%	111%	134%
	hoch	niedrig	100%	112%	469%	100%	136%	173%
		mittel	100%	104%	256%	100%	118%	154%
		hoch	101%	102%	171%	100%	111%	138%
Gesamtergebnis			100%	112%	223%	100%	119%	146%

Die Simulationsergebnisse dokumentieren die Überlegenheit einer Bedarfssteuerung gegenüber einer Verbrauchssteuerung unter identischen Rahmenbedingungen. Zur Sicherstellung der Materialversorgung sind wesentlich geringere Werksbestände notwendig. Besonders deutlich wird der Vorteil bei großen Bedarfsschwankungen. Gleichzeitig ist ein gewisser Aufwand zur Pflege von Stücklisten und Beständen notwendig. Im Sinne des Null-Fehler-Prinzips und eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses kann dies aber auch positiv betrachtet werden. Im Gegensatz zu selbstregelnden Kanbansystemen müssen Prozessfehler erkannt und beseitigt werden, um einen stets funktionierenden Prozess zu gewährleisten.

Der Anforderung A1.2 entsprechend sollte daher einer Bedarfssteuerung der Vorzug gegeben werden. Angesichts der positiven Effekte von JIT/JIS u.a. auf Bestände ist zudem eine produktionssynchrone Belieferung anzustreben, die auf minutengenau aufgelösten Bedarfen auf Basis einer stabilen Auftragsperlenkette fußt. Zur Erreichung eines in A1.3 geforderten robusten als auch flexiblen Systems sollte zudem die Fixierung von Abrufen innerhalb eines festzulegenden Zeitraumes vorgesehen werden.

Anforderungen an die Lieferantenkommunikation

Ergebnis eines Dispositionsverfahrens sind Abrufmengen und Ankunftszeitpunkte als notwendige Bestellinformationen für den Lieferanten. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob Abholzeitpunkte kommuniziert werden sollten. Diesbezüglich besteht bei Sammelladungs- und Direktverkehren kein zwingender Handlungsbedarf. Lieferanten bestimmen diese in der Automobilbranche in der Regel selbst, indem sie Liefermengen bei einem Spediteur avisieren. Wird das Material jedoch über einen Milkrun angeliefert, sind mehrere Lieferanten in den Transport involviert. Abholzeitpunkte müssen dann lieferantenübergreifend festgelegt und kommuniziert werden. Um dies zu ermöglichen, sind in das zu entwickelnde Abruf- und Transportsteuersystem entsprechende Funktionen zu integrieren.

Wird die Abrufsteuerung mit einem Algorithmus kombiniert, der Packmuster erzeugt, muss zudem entschieden werden, in welcher Form Beladeinformationen an den Lieferanten übertragen werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, dem Lieferanten keine, statische oder dynamische Informationen zur Verfügung zu stellen. Statische Informationen werden einmalig im Vorfeld einer Lieferantenanbindung festgelegt. Hierbei kann zwischen statischen Regeln und einem statischen Beladeschema unterschieden werden. Mit statischen Regeln kann bspw. vorgegeben werden, welche Behälter aufeinander stapelbar sind. Bei einem statischen Beladeschema wird anhand durchschnittlicher Bedarfe ein exemplarisches Packmuster erzeugt, welches die vom OEM gewünschte Beladereihenfolge von Teileumfängen sowie Anordnung der HUs veranschaulicht. Hierbei können Ladungssicherungs- und werksinterne Vorschriften z.B. durch den Wareneingang berücksichtigt werden. Es kann dem Lieferanten als grobe Orientierungshilfe auch bei dynamischen Abrufmengen je Bauteil dienen. Einen konkreten Abrufbezug haben dagegen dynamische Informationen. Differenziert werden kann zwischen dynamischen Regeln und einem dynamischen Beladeschema. Als dynamische Regel können bspw. die maximal zulässigen Lade-

meter je Lieferant bei einem Milkrun kommuniziert werden. Bei einem dynamischen Beladeschema wird dem Lieferanten mit jedem Materialabruf das exakte zugehörige Packmuster übermittelt.

Eine Einschätzung der einzelnen Kommunikationsalternativen erfolgt auf Basis einer bei der MTB im Expertenkreis durchgeführten Nutzwertanalyse. Dabei werden sowohl OEM- als auch lieferantenseitige Kriterien berücksichtigt. Aus OEM-Sicht sind der Kommunikationsaufwand, die Berücksichtigung werksinterner Restriktionen (z.B. Reihenfolge Abladestellen) und die Möglichkeit zur Einflussnahme auf die Trailerauslastung relevant. Aus Lieferantensicht werden der Aufwand zur IT-Anpassung sowie der operative Steuerungsaufwand betrachtet. Alle Kriterien sind gleichgewichtet, die Bewertungsskala reicht in Einserschritten von -2 bis +2.

Tabelle 4-2: Nutzwertanalyse mehrerer Alternativen zur Kommunikation von Beladeinformationen (in Anlehnung an [fml-12f])

		keine Vorgabe	statische Regeln	statisches Beladeschema	dynamische Regeln	dynam. Beladeschema
OEM	Kommunikationsaufwand	+2	+1	+1	-1	-2
	Berücksichtigung werksinterner Restriktionen	-1	0	+1	0	+2
	Einflussnahme auf Trailerauslastung	-2	0	+1	+1	+2
Lieferant	Aufwand zur IT/Prozess-Anpassung	+2	+2	+2	0	-2
	operativer Steuerungsaufwand	+2	0	0	-1	-2
Gesamt		3	3	5	-1	-2

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ist in Tabelle 4-2 dargestellt. Werden keine Vorgaben gemacht, ist zwar die Gesamtpunktzahl positiv, jedoch kann auf die Trailerauslastung kein Einfluss genommen werden. Damit ist diese Alternative nicht geeignet, um bei Sammelladungsverkehren oder Milkruns den Laderaum möglichst vollständig auszunutzen. Eine ebenfalls positive Bewertung können die statischen Varianten zur Kommunikation verzeichnen. Die höchste Bewertung erhält das statische Beladeschema. Wesentliche Beladeinformationen können übertragen werden. Die Kommunikation hat nur einmalig zu erfolgen, hinsichtlich der IT-Systeme und operativen Prozesse beim Lieferanten sind keine Anpassungen notwendig. Dynamische

Regeln werden insgesamt leicht negativ bewertet. Sie können jedoch einen zusätzlichen Beitrag zur Erhöhung der Trailerauslastung leisten. Werden bspw. bei Milkruns die maximalen Lademeter je Lieferant mitgeteilt, wird das Risiko minimiert, dass einer der Lieferanten zu viel Fläche auf dem Trailer in Anspruch nimmt, sodass ein auf der Tour nachfolgender Lieferant u.U. seine Ware nicht mehr auf dem LKW unterbringt. Alternativ wäre ein hoher Umpackaufwand vonnöten. Infolgedessen können Abrufmengen generiert werden, die eine dichte Beladung der Transportmittel vorsehen. Gleichzeitig müssen dem Belader diese dynamischen Regeln zur Verfügung gestellt werden, einhergehend mit Anpassungen interner Prozesse beim Lieferanten. Dynamische Beladeschemen stellen die optimale Verstauung von HUs im Trailer sicher, da dem Lieferanten die genaue Anordnung der HUs übertragen wird. Dem Belader müssen alle Informationen vollständig vorliegen, um sich exakt an die Vorgaben halten zu können. Dies macht sich insbesondere bei Prozessstörungen kritisch bemerkbar. Kann der Lieferant bspw. gewisse Teilumfänge nicht liefern, verliert das dynamisch erzeugte Packmuster automatisch an Gültigkeit. Vor diesem Hintergrund sollten dynamische Regeln nur im beschränkten Umfang implementiert und von dynamischen Beladeschemen ganz abgesehen werden. Der einmalige Austausch statischer Informationen erscheint dagegen als durchweg sinnvoll. Eine softwaretechnische Integration in ein Steuerungssystem ist hierzu nicht zwingend notwendig.

Anforderungen an den physischen Prozess

Durch die formulierten Anforderungen an die Steuerung werden teilweise auch die physischen Prozesse tangiert. Nach A1.7. sollen lagerlose und lagerhaltige Teileumfänge in gemeinsamen Transporten angeliefert werden können. Für die Werkslogistik bedeutet dies folglich, dass die bei Lager- und JIT/JIS-Teilen unterschiedlich geprägten Abladekonzepte geeignet miteinander kombiniert werden müssen.

Zusätzlicher Gestaltungsbedarf hinsichtlich der physischen Prozesse ergibt sich aus dem zu wählenden Dispositionsverfahren. Eine Gegenüberstellung qualitativer Kriterien und die Simulationsstudie belegen die Vorteilhaftigkeit einer Bedarfssteuerung gegenüber einer Verbrauchssteuerung. Jedoch ist hierzu eine stets korrekte Bestandsführung notwendig. Entsprechend ist ein aufwandsarmes Inventursystem zu konzipieren, um diesen Nachteil abzuschwächen.

Fazit

Zusammenfassend lassen sich folgende Anforderungen aus den Unterabschnitten extrahieren:

- A2.1.** Die Disposition soll bedarfsgesteuert auf Basis einer stabilen Auftragsperlenkette erfolgen.
- A2.2.** Abrufe sollen für einen bestimmten Zeitraum (Fixierhorizont) fixiert werden können.
- A2.3.** Die Belieferung soll bedarfssynchron erfolgen.
- A2.4.** Das Steuerungssystem soll Funktionen zur Festlegung und Kommunikation von Abholzeitpunkten bei Milkruns zur Verfügung stellen.
- A2.5.** Bei Milkruns sollen dynamische Lademetergrenzen je Lieferant übermittelt werden.
- A2.6.** Lagerlose und lagerhaltige Abladekonzepte sollen zu einer praktikablen Prozessabfolge kombiniert werden können.
- A2.7.** Über eine aufwandsarme Inventur soll stets für korrekte Bestände gesorgt werden.

4.1.3 Anforderungen an den Packalgorithmus

In das zu entwickelnde Steuerungssystem soll ein Packalgorithmus integriert werden, der unter Berücksichtigung praxisrelevanter Randbedingungen für eine möglichst hohe Trailerauslastung bei Direktverkehren und Milkruns sorgt (vgl. Abschnitt 3.2.2 und 3.2.4).

Aus Sicht der Ladungssicherung sollte das Verfahren Beladeschemen mit möglichst gleichmäßiger Gewichtsverteilung erzeugen. Zudem dürfen maximale Achslasten nicht überschritten werden. Daneben soll mit möglichst wenigen Sicherheitsmaßnahmen eine hohe Stabilität der Ladung erreicht werden. Überdies sollen automobilspezifische HU-Eigenschaften (z.B. erlaubte Orientierung bei Beladung) und Stapelsysteme berücksichtigt werden. Aus Prozesssicht müssen mehrere Abladestellen und eine u.U. vom Wareneingang vorgegebene Abladereihenfolge abgebildet werden können. Gleiches gilt für mehrere Lieferanten und deren Beladereihenfolge bei Milkruns. Außerdem sollte ein Beladeschema derart aufgebaut sein, dass es vom Lieferanten intuitiv anhand statischer Beladeinformationen und dynamischer Regeln reproduziert werden kann. Dies bedingt nicht zuletzt die Forderung, von einer Über-

mittlung dynamischer Packmuster mit exakter Vorgabe der HU-Positionen abzusehen.

Neben der Berücksichtigung praxisrelevanter Restriktionen sollte das Packverfahren dem Umstand Rechnung tragen, dass sich Transportrelationen hinsichtlich der Anzahl an Lieferanten und Abladestellen, der Anzahl an HU-Typen, der HU-Verbrauchsrate sowie der Verteilung der HU-Verbrauchsrate erheblich unterscheiden können. Unabhängig von den Eigenschaften der Transportrelation sollten daher ähnlich gute Packergebnisse erzielt werden können. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass eine hohe Auslastung nicht auf Kosten einer hohen Trailer- und folglich Bestandsreichweite geht. Aus IT-Sicht sollte der Packalgorithmus zudem zugunsten der Rechenzeit nicht zu komplex gestaltet werden.

Die Anforderungen an den Packalgorithmus können wie folgt zusammengefasst werden:

- A3.1.** Es soll eine möglichst hohe Trailerauslastung unabhängig von den Eigenschaften der jeweiligen Transportrelation erreicht werden.
- A3.2.** Die Trailerreichweite soll begrenzt werden können.
- A3.3.** Restriktionen der Ladungssicherung sollen berücksichtigt werden (Achslasten, Kippsicherheit, Ladungsstabilität).
- A3.4.** HU-bezogene Restriktionen sollen berücksichtigt werden (HUEigenschaften, Stapelsysteme).
- A3.5.** Prozessbezogene Restriktionen sollen berücksichtigt werden (mehrere Abladestellen und Lieferanten sowie deren Reihenfolge).
- A3.6.** Es soll ein intuitiv reproduzierbares Beladeschema erzeugt werden.
- A3.7.** Die Komplexität des Algorithmus und folglich die Rechenzeit sollen möglichst gering gehalten werden.

4.2 Abgleich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen

Kernelement des zu entwickelnden Abrufsystems soll ein Modul sein, mit dem sich Zulieferströme in den jeweiligen Transportmodi möglichst optimal disponieren lassen. Nach der Aufnahme der Anforderungen ist es daher notwendig, bestehende, auf die verschiedenen Transportkonzepte ausgerichtete Dispositionsansätze einer Analyse zu unterziehen und daraus Entwicklungsbedarf abzuleiten. Da in das Steuerungskonzept auch noch ein Verfahren zur Trailerbeladung integriert werden soll, hat

darüber hinaus ein Abgleich relevanter Anforderungen mit existierenden Packalgorithmen zu erfolgen.

4.2.1 Beurteilung bestehender Dispositionsansätze

Zur Beurteilung bestehender Dispositionsansätze sollen sowohl die allgemeinen Anforderungen an das Steuerungssystem sowie die spezifischen Anforderungen an das Dispositionsverfahren herangezogen werden. Die Kernanforderungen A1.5 und A1.6 beziehen sich jeweils auf unterschiedliche, konkrete Transportmodi. Infolgedessen sind diese nur für die entsprechenden Dispositionsansätze relevant. Nicht berücksichtigt werden die Anforderungen A1.1 bis A1.4, A1.7 sowie A2.1, da sich diese aufgrund ihrer allgemeinen Natur nicht auf konkrete Ansätze beziehen lassen oder sich bereits in den spezifischeren Anforderungen hinsichtlich des Dispositionsverfahrens wiederfinden.

Disposition von Teilladungen im Sammelgutverkehr

Im Sammelgutverkehr wird der Abruf einer Liefermenge gefordert, bei der die Summe aus Transport-, Bestands- und Prozesskosten minimiert wird (A1.5). In gegenwärtigen Dispositionssystemen steht hierfür eine Steuerung zur Verfügung, bei der Liefermengen über tagesgenaue Zeitscheiben bestimmt werden, die aus einem für alle Bauteile desselben Lieferanten zu vereinheitlichenden Lieferplankalender resultieren. Die optimale Bestellmenge kann nur dann getroffen werden, wenn sie dem Vielfachen des Tagesbedarfs entspricht. Hinzu kommt, dass aufgrund der groben Granularität des Lieferplankalenders nicht immer äquidistante Liefertage festgelegt werden können. Infolgedessen können Abrufmengen selbst bei konstanten Bedarfsraten stark voneinander abweichen. Dies gilt bspw. für einen Lieferplankalender, der eine Belieferung montags, mittwochs und freitags vorsieht. Während montags und freitags jeweils zwei Tagesbedarfe abgerufen werden, ist es freitags nur einer. Daneben ziehen stochastische Bedarfsraten der Bauteile eines Lieferanten ebenfalls schwankende Abrufmengen nach sich. Es lässt sich somit konstatieren, dass eine Zeitscheibensteuerung kaum auf eine optimale Bestellmenge ausgelegt werden kann. Selbst wenn durch den eingestellten Lieferplankalender im Schnitt ein Wert nahe der optimalen Bestellmenge erreicht werden kann, ist aufgrund ungleicher Zeitscheiben und/oder Bedarfsschwankungen mit variierenden Abrufmengen zu rechnen. In der Folge sind entsprechend negative Auswirkungen auf die Gesamtlo-

gistikkosten zu erwarten. Kernanforderung A1.5 kann demnach nur unzureichend erfüllt werden.

Dem gegenüber stehen eine eingängige Steuerungslogik und eine automatisierte Durchführung des Dispositionsverfahrens. Zur Durchführung sind neben einer begrenzten Anzahl an Dispositionsparametern lediglich valide Gewichts- oder ggf. Volumenangaben der Bauteile notwendig, sodass der Aufwand zur Einrichtung von Lieferrelationen relativ moderat ist. Zudem ist der generelle Steuerungsaufwand als eher gering einzustufen. Darüber hinaus können Abrufe durch einen Fixierhorizont im Kurzfristbereich stabilisiert werden - bei gleichzeitiger Wahrung der Flexibilität im Mittel- bis Langfristbereich. Des Weiteren liegen in der Regel Lieferabrufe, elektronische Lieferscheine und die Möglichkeit zum Einblick in Lagerdaten vor, sodass Transparenz über bestellte und avisierte Mengen sowie Bestände hergestellt werden kann. Die Versorgungssituation ist hingegen nicht immer eindeutig. Bei Sofortbedarfen muss überprüft werden, ob tatsächlich ein Materialabriss droht oder die Materialversorgung aufgrund von Zeit- und Mengenpuffern nicht doch gesichert ist.

Neben einer vollautomatisierten Zeitscheibensteuerung besteht zusätzlich die Möglichkeit, Abrufmengen manuell einzuteilen. Hierdurch kann immer eine optimale Bestellmenge zusammengestellt werden. Dies ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden. Systemisch ermittelte Nettobedarfe müssen täglich auf Einzelebene überplant werden. Aufgrund des manuellen Prozesses können Dispositionsfehler auftreten. In der Folge kann die Bestellmenge vom Optimum abweichen. Des Weiteren nimmt die Transparenz ab, das Versorgungsrisiko steigt. Auch ist eine Zunahme kurzfristiger Dispositionseingriffe zulasten der Systemstabilität zu erwarten. Hieraus resultiert zudem ein erhöhter Aufwand für die Kommunikation mit den Lieferanten.

Sowohl der automatisierten als auch manuellen Variante ist gemein, dass sie auf einer lediglich tagesgenauen Bedarfsplanung beruhen. Eine produktionssynchrone Belieferung analog zu JIT/JIS kann dadurch nicht realisiert werden.

Tabelle 4-3 gibt einen Überblick über den Erfüllungsgrad der Dispositionsansätze bezüglich der einzelnen Anforderungen. Aktuell ist keines der Verfahren geeignet, stets die optimale Bestellmenge abzurufen und gleichzeitig den Steuerungsaufwand gering zu halten. Auch wird keine bedarfssynchrone Belieferung unterstützt.

Tabelle 4-3: Beurteilung von Dispositionsansätzen für Teilladungen

Anforderung	Nr.	A1.5	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A2.2	A2.3
	Kurzbeschreibung	optimale Bestellmenge	eingängige Logik	Dispoverfahren automatisiert	geringer Einrichtungsaufwand	geringer Steuerungsaufwand	Transparenz	robust und flexibel	bedarfs-synchron
Dispositionsansatz	Zeitscheibensteuerung								
	manuelle Bestellplanung								

Disposition von Komplettladungen im Direktverkehr oder Milkrun

Bei Direktverkehren und Milkruns wird das Ziel verfolgt, Transportmittel voll auszulasten. Zur Disposition von Komplettladungen steht analog zu Teilladungen eine zeitscheibenbasierte oder manuelle Steuerung zur Verfügung. Der Abruf von auslastungsmaximierenden Mengen ist daher aus denselben Gründen ebenfalls nur eingeschränkt zu bewerkstelligen. Zudem müssen die geometrischen Dimensionen von Transportmitteln und den HUs sowie Beladungsvorschriften beachtet werden. Bei der Einteilung lediglich von Mengen sind entsprechend Sicherheiten einzuplanen, wodurch die durchschnittlich zu erreichende Auslastung weiter gemindert wird. Ansonsten ergeben sich dieselben Vor- und Nachteile wie bei der Disposition von Teilladungen.

Durch die beschriebenen Ansätze können Milkruns mit statischen Touren und statischem Zyklus realisiert werden. Als alternativer Ansatz bietet sich für Milkruns eine dynamische Tourenplanung mit dynamischen Transportzyklen auf der Grundlage von bei den Lieferanten abgerufenen Teilmengen an. Hierzu sind der Aufbau und die permanente Pflege einer gültigen Lieferantenentfernungsmatrix notwendig. Zur Tourenplanung kann gängige TMS-Software genutzt werden.

Um Laderäume voll ausnutzen zu können, müssen die Teilmengen möglichst optimal miteinander kombinierbar sein. Um große Umwege oder längere Streckenabschnitte mit geringer Auslastung zu vermeiden, müssen die zugehörigen Lieferantenstandorte zudem in geographischer Nähe liegen. Sind diese Voraussetzungen nicht gleichzeitig erfüllt, hat dies entsprechend negative Auswirkungen auf die Transportkosten zur Folge. Hinzu kommt ein erhöhter Abstimmungs- und Koordinationsaufwand mit den Lieferanten infolge ständig wechselnder Touren. Analog zur statischen Zeitscheiben- oder manuellen Steuerung sind zudem ohne spezielle Packalgorithmen Sicherheiten einzuplanen und somit ebenfalls Einbußen hinsichtlich

der zu erreichenden Auslastung zu verzeichnen. Dies kann vermieden werden, wenn in die TMS-Software eine Stauraumoptimierung integriert ist. Dann steigt aber auch der Einrichtungsaufwand, weil zur Berechnung von Beladeschemen eine entsprechende Daten- und Informationsbasis aufgebaut werden muss. Da die dynamische Tourenbildung auf einer Zeitscheibensteuerung aufbaut, ist sie ansonsten analog zu obigen Ansätzen zu beurteilen.

Als zusätzliche Alternative zur Disposition von Komplettladungen im Direktverkehr bietet sich die trailerbasierte Abrufsteuerung mit Online-Packalgorithmus an, die für voll ausgelastete Trailer sorgt. Gleichzeitig passt sich die Anlieferfrequenz automatisch an das Bedarfsniveau des Teileumfangs eines Lieferanten an. Sie bedeutet damit eine Abkehr von einer Zeitsteuerung hin zu einer Mengensteuerung mit dynamischen Lieferintervallen. Die Dispositionslogik gestaltet sich etwas komplexer als einfache Zeitscheiben-Steuerungen. Aufgrund des integrierten Packalgorithmus ist zudem der Aufwand zur Einrichtung von Transportrelationen höher. Ansonsten ist das automatisierte System durch einen geringen Steuerungsaufwand geprägt. Auf Basis eindeutiger Trailer-IDs und der Zuordnung eines Status wird Transparenz über die gesamte Supply-Chain geschaffen. Die Fixierung einer festen Anzahl an Trailern führt zu stabilen Abrufen. Kritisch anzumerken ist aber, dass dies bei schwankenden Bedarfsniveaus zu unterschiedlich langen Fixierungshorizonten zulasten der Abrufstabilität oder Flexibilität führen kann. Aufgrund der Anwendung bei JIT/JIS-Teileumfängen erfolgt die Einsteuerung der Zulieferströme minutengenau auf Basis einer stabilen Auftragsperlenkette und damit bedarfssynchron.

Einen Überblick über die Beurteilung von Dispositionsansätzen für Komplettladungen gibt Tabelle 4-4. Das Ergebnis zeigt, dass eine hohe Lösungsgüte ohne vergleichsweise aufwendige Einstellungen offenbar kaum zu bewerkstelligen ist. Bis auf den Einrichtungsaufwand erhält die trailerbasierte Abrufsteuerung eine durchweg positive Beurteilung. Alle anderen Ansätze weisen zum Teil gravierende Schwächen hinsichtlich der Trailerauslastung auf oder sind mit einem erhöhten Steuerungsaufwand verbunden. Zudem wird von keinem der restlichen Verfahren eine bedarfssynchrone Belieferung unterstützt.

Tabelle 4-4: Beurteilung von Dispositionsansätzen für Komplettladungen

Anforderung	Nr.	A1.6	A1.8	A1.9	A1.10	A1.11	A1.12	A2.2	A2.3
	Kurzbeschreibung	maximale Auslastung	eingängige Logik	Dispoverfahren automatisiert	geringer Einrichtungsaufwand	geringer Steuerungsaufwand	transparent	robust und flexibel	bedarfs-synchron
Dispositionsansatz	Zeitscheibensteuerung								
	manuelle Bestellplanung								
	Tourenplanung ohne Stauraumopt.								
	Tourenplanung mit Stauraumopt.								
	Trailerbasierte Abrufsteuerung								

4.2.2 Beurteilung bestehender Packalgorithmen

Nach der Analyse von Dispositionsansätzen für Teil- und Komplettladungen sollen bestehende Packalgorithmen mit den Anforderungen aus Abschnitt 4.1.3 abgeglichen werden. Betrachtet werden zum einen praxisorientierte Beladeverfahren, die auf die Automobilindustrie zugeschnitten bzw. anwendbar sind. Da aufgrund der spezifischen Gegebenheiten im Automotive-Sektor Stackbuilding-Ansätze anzustreben sind, werden zum anderen allgemeine Verfahren zur Lösungen des ein- und zweidimensionalen Packproblems näher beleuchtet.

Praxisorientierte Packverfahren

Auf die Automobilindustrie zugeschnittene Packalgorithmen werden in den Arbeiten von Li und Dawid vorgestellt (siehe 3.2.4). Weitere Verfahren bieten die Softwaresysteme logistics PAXXS, inconso und SupplyCockpit.

Das Verfahren nach Li erzeugt dem Autor zufolge Beladeschemen mit hohem Erreichungsgrad hinsichtlich der Zielfunktion. Dies beinhaltet neben der Maximierung der Auslastung zahlreiche andere Zielgrößen. Daneben werden Simulationsergebnisse auf Basis individueller Testinstanzen präsentiert. Ein Vergleich mit anderen Verfahren wird dadurch unmöglich gemacht. Infolgedessen kann hinsichtlich der zu erreichenden Auslastungsgrade unter verschiedenen Rahmenbedingungen keine Aussage getroffen werden. Gleiches gilt für die Forderung nach einer begrenzten Trailer-

reichweite, da konkrete Bedarfszeitpunkte gar nicht erst betrachtet werden. Ansonsten berücksichtigt das Verfahren im Wesentlichen alle relevanten Ladungssicherungs-, prozessbezogene und HU-bezogene Restriktionen. Die erzeugten Beladeschemen sind jedoch ohne vorliegenden Detailplan intuitiv nicht reproduzierbar. Aufgrund des zweistufigen, komplexen Optimierungsverfahrens sind zudem entweder längere Rechenzeiten oder Abstriche hinsichtlich der Lösungsgüte zu erwarten.

Das Verfahren von Dawid integriert verschiedene Packalgorithmen in eine Tourenplanung. Die Packalgorithmen selbst sind zweistufig nach dem Stackbuilding-Ansatz aufgebaut. Die Verteilung der Stapel erfolgt entweder heuristisch oder mittels exakter Lösungsalgorithmen. Die Verfahren bilden lediglich mehrere Abladestellen ab. Alle anderen Restriktionen werden nicht berücksichtigt. Die Logik ist gut nachvollziehbar. Die allgemein einsetzbaren Heuristiken sind schnell. Nach Dawid sollen sie gute Ergebnisse liefern. Aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit erfolgt aber keine Beurteilung im Vergleich zu den anderen praxisorientierten Packverfahren.

Letzteres gilt auch für die von leogistics und inconso bereitgestellten Packverfahren. Hinsichtlich des Laufzeitverhaltens und der Begrenzung von Trailerreichweiten kann ebenfalls keine Aussage getroffen werden, da die zugehörigen Algorithmen nicht offenliegen. In Informationsmaterial dargestellte komplexe Beladeschemen lassen darauf schließen, dass diese nur beschränkt intuitiv reproduzierbar sind. Relevante Praxisrestriktionen werden dagegen vollständig berücksichtigt (siehe [Käb-2013], [inc-2013]).

Die Betrachtung der von SupplyCockpit bereitgestellten Algorithmen beschränkt sich auf die leistungsfähigste Berechnungsmethode „Geometrie inklusive Gewicht“. Aufsteigend nach Bedarfszeitpunkt sortiert werden die HUs per Online-Algorithmus nacheinander direkt in Hüben platziert, bis keine HU im Trailer mehr Platz findet. Dadurch kann eine hohe Trailerauslastung erreicht werden. Über eine einzustellende Vorgriffszeit kann zudem die Trailerreichweite begrenzt werden. Gleichzeitig mindert dies den Auslastungsgrad. Zudem bietet die Stapelbildung im simplen Online-Verfahren noch Raum für Verbesserungen. Das Verhalten hinsichtlich unterschiedlicher Konfigurationen von Probleminstanzen ist ebenfalls nicht bekannt.

Die Bildung von Hüben erlaubt es, diese in beliebiger Reihenfolge formschlüssig auf Trailer zu verladen. Zusammen mit einem im Vorfeld abgestimmten statischen Beladeschema und der Kommunikation einfacher Beladeregeln können vom Belader in folgedessen intuitiv Packmuster hergestellt werden, die zudem den Vorschriften zur

Ladungssicherung gerecht werden. Aufgrund der Ausrichtung auf JIT/JIS-Transporte werden jedoch weder unterschiedliche Abladestellen noch Mischpaletten berücksichtigt. Alle anderen Restriktionen sind ansonsten abgebildet.

Tabelle 4-5 fasst den Abgleich mit den Anforderungen an den Packalgorithmus zusammen. Die Forderung A3.1 nach einer hohen Lösungsgüte des Algorithmus wird aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit der untersuchten Ansätze nicht aufgeführt. Alle Verfahren deuten jedoch auf gute Packergebnisse hin. Es fällt auf, dass unter allen Algorithmen lediglich die Methode „Geometrie inklusive Gewicht“ zu einem intuitiv nachvollziehbarem Packmuster führt. Für einen etwaigen Einsatz im lagerhaltigen Teilespektrum ist jedoch eine Integration relevanter Praxisrestriktionen notwendig.

Tabelle 4-5: Beurteilung praxisorientierter Packalgorithmen

Anforderung	Nr.	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
	Kurzbeschreibung	begrenzte Trailerreichweite	Restriktionen Ladungssicherung	Restriktionen HUs	Restriktionen Prozess	intuitiv	schnell
Offline-Verfahren	Verfahren nach Li	k.A.	●	●	●	○	◐
	Verfahren nach Dawid	k.A.	○	◑	●	○	●
	leogistics PAXXS/inconso	k.A.	●	●	●	○	k.A.
Online	Geometrie inklusive Gewicht	●	●	◑	○	●	●

Allgemeine Verfahren zur Lösung des ein- und zweidimensionalen Packproblems

Aufgrund der spezifischen Rahmenbedingungen in der automobilen Beschaffungslogistik ist prinzipiell ein Stackbuildingansatz zur Lösung des Containerbeladungsproblems anzustreben. Im Rahmen dieses Ansatzes werden zunächst Stapel gebildet und diese auf der Ladefläche verteilt. Aus Optimierungssicht sind hierzu ein ein- und zweidimensionales Packproblem zu lösen.

Zur Lösung dieser Probleme sind in der Literatur zahlreiche allgemeine Ansätze entstanden. Da diese prinzipiell als Ausgangspunkt für den zu entwickelnden Packalgo-

4 Anforderungsklärung und Forschungslücke

rithmus infrage kommen, werden sie nachfolgend ebenfalls einer Analyse unterzogen. Der Fokus liegt dabei auf den in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Online- und Offline-Heuristiken, die sich zur effizienten Lösung realer Probleminstanzen besonders eignen.

Aufgrund der allgemeinen Natur der Algorithmen werden diese nicht mit allen Anforderungen abgeglichen. Zudem wird ggf. die Formulierung der Anforderungen angepasst. Das Ergebnis des Abgleichs mit den zum Teil modifizierten Algorithmen ist Tabelle 4-6 zu entnehmen.

Tabelle 4-6: Beurteilung allgemeiner Algorithmen zur Lösung des ein- und zweidimensionalen Packproblems

		Eindimensionales Packproblem									
		Nr.			Anforderung	Nr.	A3.1	A3.3	A3.6	A3.7	
		Kurzbeschreibung	$O(\cdot)$	R^∞		Kurzbeschreibung	Lösungsgüte	Ladungssicherung durch Formschluss	intuitiv	schnell	
Online		NF	$O(n)$	2			☐		●	●	
		FF	$O(n \log n)$	1,7			☐		☐	☐	
		BF	$O(n \log n)$	1,7			☐		☐	☐	
		Harmonic _k	$O(n)$	1,691			☐		☐	●	
		alle		$\geq 1,540$							
Offline		FFD	$O(n \log n)$	1,222			☐		☐	☐	
		BFD	$O(n \log n)$	1,222			☐		☐	☐	
		MFFD	N.N.	1,183			☐		☐		
		Zweidimensionales Packproblem									
Online	Regal	z.B. FFS _{0,5}	$O(n)$	2			☐	○	☐	●	
		alle		$\geq 1,691$							
Offline	Regal	NFDH	$O(n \log n)$	2			☐	○	●	☐	
		FFDH	$O(n \log n)$	1,7			☐	○	☐	☐	
		BFDH	$O(n^2)$	N.N.				○	☐	☐	
	Guillotine	alle							○		
	Max. Rechtecke	alle							○		
	Sky-line	BL	N.N.	N.N.					☐	☐	
		BLF	N.N.	N.N.					☐	☐	
	TP	N.N.	N.N.					☐	☐		

Die Beurteilung der Algorithmen beruht zum einen auf literarischen Angaben zum Laufzeitverhalten in O-Notation und zum asymptotischen Worst-Case-Performance-Verhältnis, sofern verfügbar. Zum anderen sind die grundsätzlichen Vorgehensweisen maßgeblich.

Für das eindimensionale Problem weisen die Online- und Offline-Algorithmen FF, BF bzw. FFD und BFD ein ausgewogenes Verhältnis aus Ergebnisgüte, Intuitivität und Schnelligkeit auf. Die Regalalgorithmen für das zweidimensionale Problem sind zwar in der Regel intuitiv nachvollziehbar und schnell, führen aber zu Lücken in der Beladung auf Kosten der Ladungsstabilität. Guillotine- und Maximal-Rechtecke-Algorithmen sind dagegen intuitiv kaum reproduzierbar. Den besten Kompromiss aus Intuitivität und hoher Ladungsstabilität durch Formschluss bieten Skyline-Algorithmen. Zwar sind keine Angaben zum Laufzeitverhalten in O-Notation und zum Worst-Case-Performance-Ratio vorhanden, anhand Testinstanzen konnten sie jedoch ihre hohe Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen (vgl. z.B. [Jyl-2010]).

4.2.3 Fazit

Heutige Dispositionsansätze für Lagerteile auf Basis einer Zeitscheibensteuerung lassen keine ausreichend effiziente Steuerung der Versorgungsprozesse zu. Mit der trailerbasierten Abrufsteuerung liegt dagegen ein Mengensteuerungsansatz vor, der hinsichtlich einiger wesentlicher Anforderungen einen hohen Erfüllungsgrad aufweisen kann. Jedoch beschränkt sich die Anwendung des Systems bisher ausschließlich auf JIT/JIS-Komplettladungen im Direktverkehr. Für den Einsatz im lagerhaltigen Bereich sind daher entsprechende Anpassungen und Erweiterungen notwendig. Für die Disposition von Komplettladungen müssen zusätzliche Restriktionen wie bspw. mehrere Abladestellen und ggf. Lieferanten berücksichtigt werden. Zudem muss der Abruf optimaler Teilladungen ermöglicht werden, was aber angesichts des Prinzips der Mengensteuerung als umsetzbar erscheint. Kann der Ansatz übertragen werden, lassen sich zudem eine einheitliche Steuerungslogik unabhängig von der Belieferungsform sowie gemeinsame Transporte für JIT/JIS- und Lagerteile realisieren. Das Konzept bietet sich daher grundsätzlich als Basis für das zu entwickelnde Steuerungssystem für lagerhaltige Teileumfänge an. Für etwaige Modifikationen am Packalgorithmus sollten insbesondere der FF-, BF-, FFD-, BFD-Algorithmus sowie Skylinealgorithmen in Betracht gezogen werden.

5 Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge

In diesem Kapitel wird das entwickelte Konzept einer integrierten Abruf- und Transportsteuerung lagerhaltiger Teileumfänge zur schlanken Montageversorgung vorgestellt. Zunächst erfolgt eine Strukturierung des Entwicklungsbedarfs in verschiedene Bausteine. Deren konkrete Ausgestaltung wird danach beschrieben. Hierbei wird stets ein Bezug zu den in Kapitel 4 formulierten Anforderungen hergestellt. Das Kapitel schließt mit einer Konzeptbewertung, die sich in einen Abgleich mit den Anforderungen und einer monetären Potenzialabschätzung am Beispiel der MTB aufgliedert.

5.1 Konzeptstrukturierung

Im Rahmen der Analyse in Abschnitt 4.2 hat sich die trailerbasierte Abrufsteuerung für JIT/JIS-Teileumfänge als vorteilhaft gegenüber alternativen Dispositionsansätzen erwiesen. Die grundsätzliche Logik soll daher als Ausgangspunkt für das zu entwickelnde Steuerungssystem dienen. Bisher erstreckt sich ihre Anwendung lediglich auf Direktverkehre für JIT/JIS-Bauteile. Der Zielsetzung und den formulierten Anforderungen entsprechend ist daher eine Ausweitung auf lagerhaltige Versorgungsprozesse notwendig. Dies umfasst lagerhaltige Direktverkehre, Milkruns und Sammelgutverkehre, aber auch gemischt lagerhaltige und lagerlose Direktverkehre und Milkruns. Einen Überblick über mögliche Versorgungsprozesse gibt Abbildung 5-1. Der abzubildende Anwendungsbereich ist in dieser blau gestrichelt umrahmt.

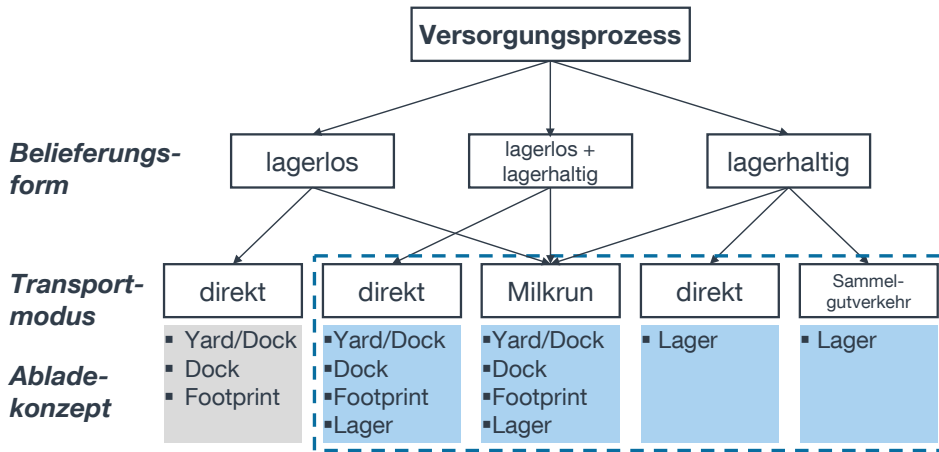


Abbildung 5-1: Anwendungsbereich der integrierten Abruf- und Transportsteuerung

Hieraus leitet sich der Entwicklungsbedarf ab. Dieser wird in die Bausteine Disposition, Erweiterungen zur Steuerung von Milkruns und werksinterne Prozesse aufgesplittet. Hinsichtlich der Disposition bedarf es einer angepassten Nettobedarfs- und Bestellrechnung, eines Konzepts zur Lieferüberwachung und manuellen Überplanung sowie der Beschreibung erforderlicher Kommunikationsprotokolle. Für Milkruns sind ein Kommunikationskonzept und die Integration von Leergutprozessen notwendig. Werksintern sind Konzepte zur Abladung und aufwandsarmen Inventur zu erarbeiten. Abbildung 5-2 gibt einen Überblick über die Bausteine und deren Entwicklungsschwerpunkte. An dieser Struktur wird in den nachfolgenden Abschnitten festgehalten.

Disposition	Erweiterungen für Milkruns	Werksinterne Prozesse
<ul style="list-style-type: none"> • Nettobedarfsrechnung • Bestellrechnung • Lieferüberwachung/manuelle Überplanung • Abruf-/Lieferkommunikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikation von Abholzeiten • Leergutintegration 	<ul style="list-style-type: none"> • Abladekonzept • Bestandsführung und -kontrolle

Abbildung 5-2: Notwendige Entwicklungsbausteine

5.2 Nettobedarfsrechnung

Nettobedarfe werden auf Basis von Bruttobedarfen, Werksbeständen, Sicherheitsparametern und verbindlichen Bestellungen ermittelt. Zur Nettobedarfsrechnung wurde im Rahmen des Gesamtkonzepts ein Verfahren mit dem Ziel entworfen, unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen positive Attribute bestehender bedarfsgesteuerter Dispositionsverfahren aufzugreifen und deren Schwächen abzustellen. Vom trailerbasierten System soll grundsätzlich die Nutzung minutengenauer Perlenketteninformationen genutzt werden, sofern diese vorliegen. Unter Umständen könnten sich OEM dazu entschließen, bei niedrigpreisigen Bauteilen wie etwa Standard- und Normteilen aufgrund des erhöhten Aufwands der Stücklistenpflege auf eine minutengenaue Disposition zu verzichten. Bspw. per stochastische Bedarfsrechnung können Bruttobedarfe dann nur noch tagesgenau ermittelt werden. Daher soll das Verfahren auch mit tagesgenauen Bruttobedarfen umgehen können.

Darüber hinaus sollen in der Nettobedarfsrechnung eingefrorene Bestellmengen zur Stabilisierung von Abrufen im Kurzfristbereich abgebildet werden können. Bei der trailerbasierten Abrufsteuerung erfolgt dies durch die Fixierung von Trailern, bei der Zeitscheibensteuerung durch einen Fixierhorizont. Auf eine geeignete Fixierungslogik wird in Abschnitt 5.3.5 näher eingegangen.

Versorgungsrisiken werden bei den bestehenden Verfahren per BVZ oder ggf. SB (nur bei Zeitscheibensteuerung) abgesichert. Dies führt zu Beständen, die bei planmäßigen Prozessen stets vorrätig sind. Werden sie angegriffen, müssen sie wieder aufgefüllt werden. Hierfür werden zusätzliche Bestellungen aufgegeben oder Bestellmengen vorgezogen. Bis zum Eintreffen des Materials vergeht ohne Sonderprozess eine Zeit, die mindestens der Wiederbeschaffungszeit entspricht. Dieser Zeitraum muss folglich immer gegen Versorgungsrisiken abgesichert werden. Die Einteilung zusätzlicher Bestellmengen oder deren Vorziehen führt zudem zu einer erhöhten Abrufnervosität im noch nicht fixierten Bereich.

Die grundsätzliche Idee des entwickelten Konzepts ist es, negative Effekte der gegenwärtig rein reaktiven Systeme durch das proaktive Einsteuern von Sicherheiten in der Supply-Chain abzuschwächen (vgl. hierzu auch [fml-12f]). Hierzu wird ein relativer Sicherheitsbedarf eingeführt, der einen erforderlichen Sicherheitsbedarf anteilig am Bruttobedarf angibt. Durch die relative Größe passt sich die Anzahl eingeplanter Sicherheiten automatisch an die Bedarfssituation an. Bestellte Bauteile, die der De-

ckung von Bedarfen und Sicherheitsbedarfen dienen, werden nachfolgend als Bedarfsdecker bzw. Sicherheitsbedarfsdecker oder vereinfachend Sicherheiten bezeichnet. Tritt nun ein Mehrbedarf auf, kann zu dessen Deckung auf Sicherheiten in der Supply-Chain zurückgegriffen werden. Indem Sicherheitsbedarfsdecker in Bedarfsdecker umgewandelt werden, können Lücken geschlossen werden, ohne Bestellmengen erhöhen oder vorziehen zu müssen. Der Werkssicherheitsbestand muss nur noch Schwankungen des Mehrbedarfs abfangen. Dies lässt eine Verringerung der Werksbestände und eine Stabilisierung der Abrufe erwarten. Die detaillierte Funktionsweise für lagerhaltige Teileumfänge soll nun anhand des Flussdiagramms in Abbildung 5-3 erläutert werden. Zur Veranschaulichung dient zudem das Beispiel in Abbildung 5-4. Im Anschluss wird auf die Nettobedarfsrechnung für JIT/JIS-Teile eingegangen.

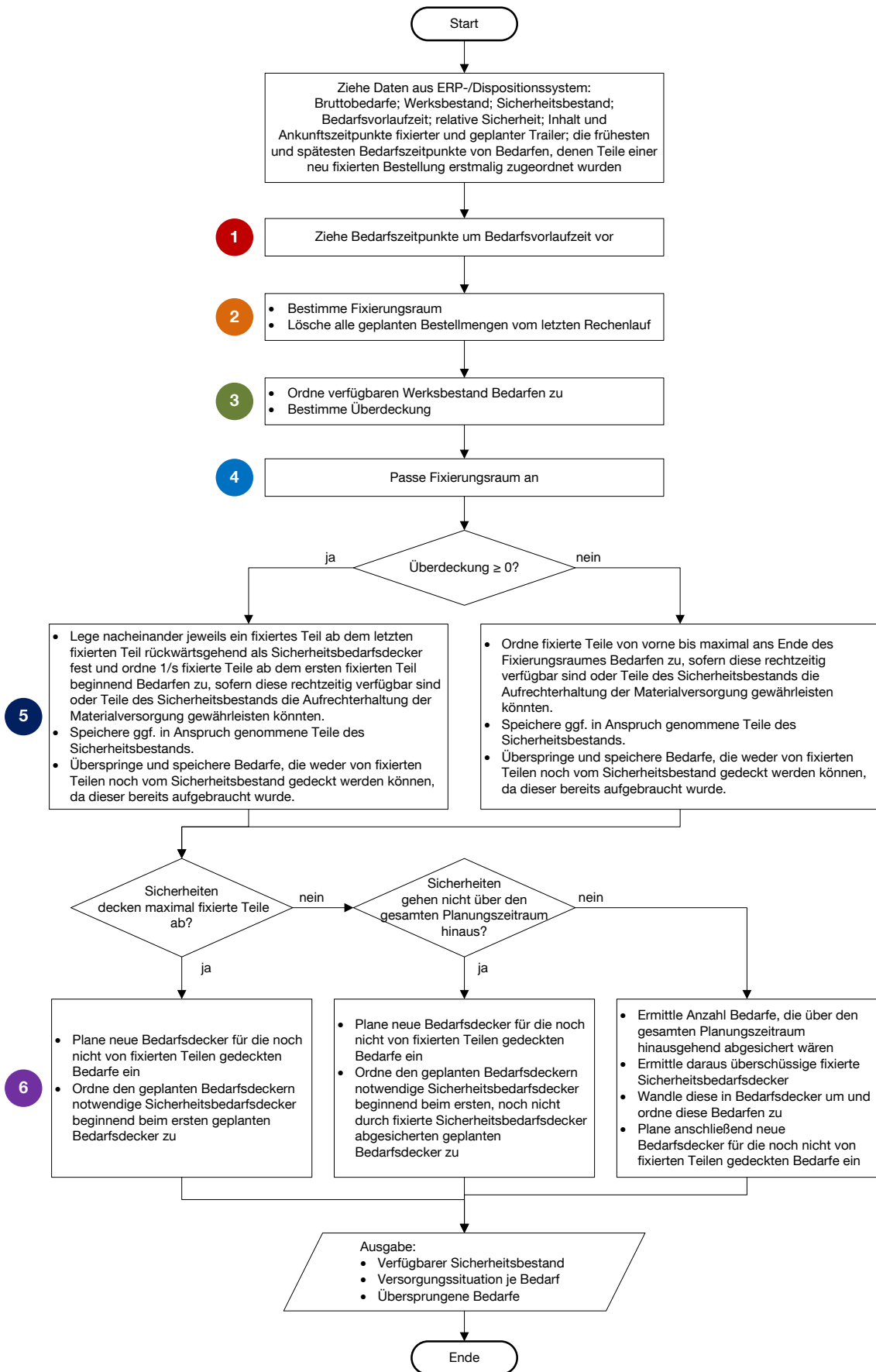


Abbildung 5-3: Algorithmus zur Nettobedarfsrechnung mit relativer Supply-Chain-Sicherheit

5 Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge

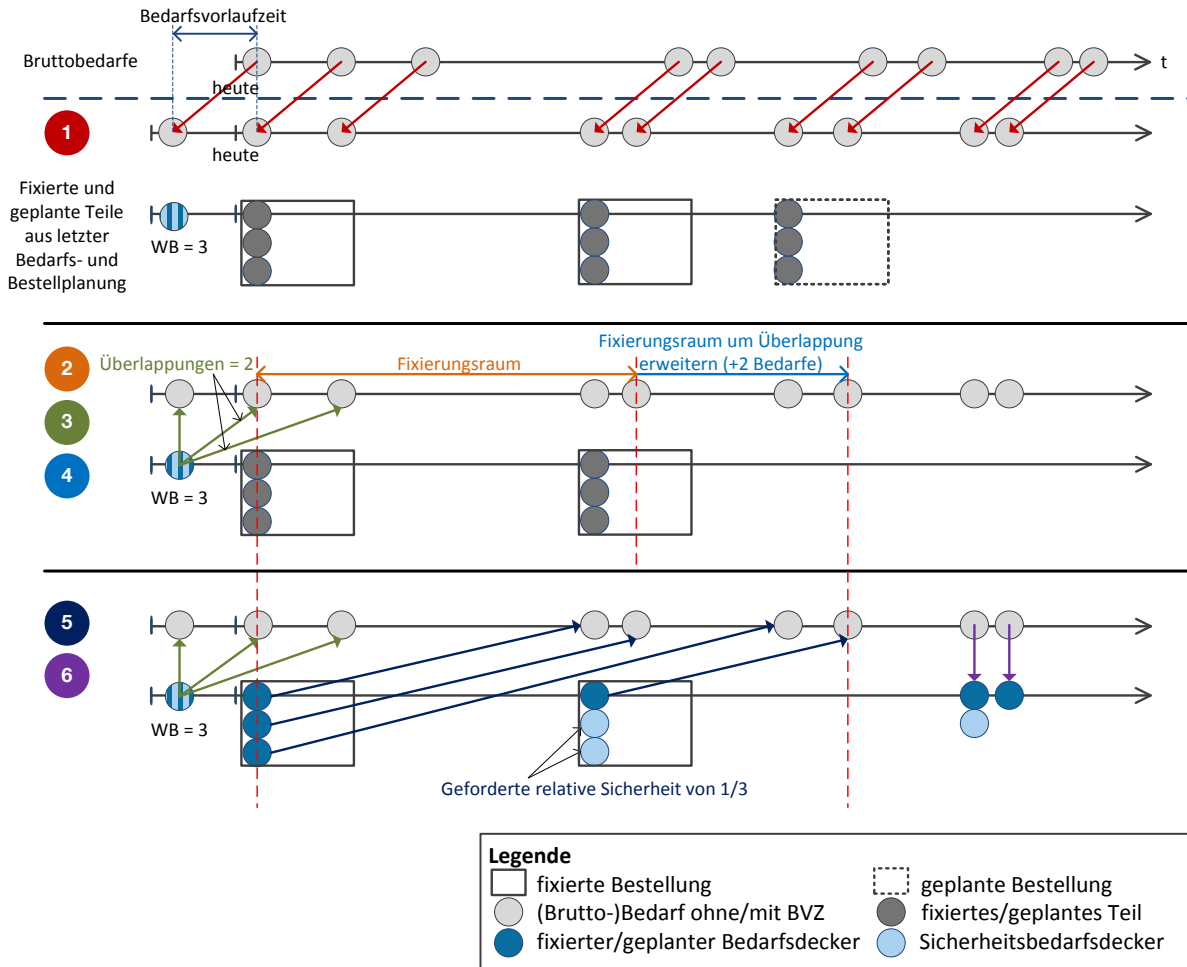


Abbildung 5-4: Beispielhafte Durchführung der Nettopedarfsrechnung (in Anlehnung an [fml-13e])

Das entwickelte Verfahren zur Nettopedarfsrechnung ist nacheinander für alle Bauteile einer Transportrelation durchzuführen. Input für den Algorithmus sind u.a. Bruttobedarfe, nachfolgend vereinfachend als Bedarfe bezeichnet, und die Inhalte sowie Ankunftszeitpunkte fixierter sowie geplanter Bestellungen als Ergebnis des letzten Rechenlaufs. Zudem gehen in das Verfahren die frühesten und spätesten Bedarfszeitpunkte jener Bedarfe ein, denen Teile einer neu fixierten Bestellung zum ersten Mal zur Deckung zugeordnet wurden. Wie die Bruttobedarfe ermittelt wurden und in welcher Granularität sie vorliegen, ist für den Algorithmus irrelevant.

Im ersten Schritt des Verfahrens werden die Zeitpunkte der Bedarfe um die BVZ vorgezogen. Anschließend wird der sogenannte Fixierungsraum bestimmt. Beginn ist der früheste Bedarfszeitpunkt jener Bedarfe, die durch Teile der als nächstes ankommenden Bestellung gedeckt wurden, nachdem diese neu fixiert wurde. Ende ist der späteste Bedarfszeitpunkt jener Bedarfe, die durch Teile der als letztes ankommenden Bestellung gedeckt wurden.

menden Bestellung gedeckt wurden, nachdem diese neu fixiert wurde. Hinter dem Konzept des Fixierungsraumes steckt der Gedanke, zugunsten der Abrufstabilität mit der Einplanung von Bedarfsdeckern zum selben Zeitpunkt wie im letzten Rechenlauf zu beginnen. Zudem lässt sich aus der Differenz aus fixierten Teilen und gedeckten Bedarfen die Höhe an Sicherheiten berechnen.

Im Schritt 3 wird die sogenannte Überdeckung ermittelt. Hierzu wird der systemisch verfügbare Werksbestand, der dem Werksbestand abzüglich eines etwaigen SB entspricht, Bedarfen zugeordnet. Die Anzahl der Überschneidungen mit den Bedarfen im Fixierungsraum entspricht dabei der Überdeckung. Liegt eine positive Überdeckung vor, wird der Fixierungsraum um die entsprechende Anzahl an Bedarfen erweitert (Schritt 4, siehe auch Beispiel). Ansonsten bleibt dieser unverändert. Eine negative Überdeckung bedeutet einen Mehrverbrauch, der von im Werk eingegangenen Sicherheiten nicht kompensiert werden konnte. Bei einer positiven Überdeckung liegt dagegen ein Sicherheitsüberschuss vor.

Im Schritt 5 werden fixierte Bedarfsdecker Bedarfen zugeordnet. Hierbei erfolgt eine Fallunterscheidung. Ist die Überdeckung größer gleich Null, muss im fixierten Bereich zur Bedarfsdeckung nicht auf Sicherheitsbedarfsdecker zurückgegriffen werden. Stattdessen sollten für zukünftige Mehrbedarfe genügend Sicherheiten vorhanden sein. Der Anteil von Sicherheitsbedarfsdeckern im Fixierungsraum soll dabei der geforderten relativen Sicherheit s entsprechen. Alle anderen Teile sollen Bedarfen zugeordnet werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die fixierten Teile rechtzeitig verfügbar sind, um die entsprechenden Bedarfe zu befriedigen. Dies ist dann gegeben, wenn der Ankunftszeitpunkt der Teile zuzüglich einer werksinternen Durchlaufzeit noch vor dem tatsächlichen Bedarfszeitpunkt ohne Bedarfsvorlaufzeit liegt. Andernfalls müssen Bedarfe durch Teile des SB gedeckt werden und diesen zur Wiederauffüllung fixierte Teile zugeordnet werden. Aufgrund der Überdeckung ist es jedoch unwahrscheinlich, dass bei der Bedarfsdeckung im Fixierungsraum Versorgungslücken auftreten, die von SB-Teilen geschlossen werden müssen.

Um eine relative Sicherheit s zu erreichen, wird wie folgt vorgegangen: Iterativ wird das nächste fixierte Teil ab dem letzten fixierten Teil rückwärtsgehend als Sicherheitsbedarfsdecker deklariert und dann die nächsten $1/s$ fixierten Teile ab dem ersten fixierten Teil beginnend Bedarfen zugeordnet, sofern diese rechtzeitig verfügbar sind oder durch Inanspruchnahme des SB die Materialversorgung gewährleistet werden könnte. Muss auf SB-Teile zurückgegriffen werden, ist dies entsprechend zu

speichern. Bedarfe, die weder durch fixierte noch durch SB-Teile befriedigt werden können, werden übersprungen und ebenfalls abgespeichert.

Positive Überdeckungen können unterschiedliche Ursachen haben. Bei der Einplanung von Sicherheitsbedarfsdeckern kann es zu Anhäufungen kommen. Sind diese im Werk eingegangen, kann das zu einer Überdeckung bei gleichzeitigem Mangel an Sicherheiten in fixierten Bestellungen führen. Zwar erweitert sich der Fixierungsraum zunächst in Höhe der Überdeckung, verkürzt sich dann aber wieder, da infolge der geforderten relativen Sicherheit weniger Bedarfe befriedigt werden können. Beide Effekte heben sich im besten Fall auf, sodass die Deckung von Bedarfen im geplanten Bereich im Sinne der Abrufstabilität zum selben Zeitpunkt beginnt wie beim letzten Rechenlauf. Ein anderes Verhalten tritt auf, wenn Sicherheiten wie im Beispiel gleichmäßig verteilt sind, teilweise im Werk eingehen und dann nicht benötigt werden, da kein Mehrverbrauch eingetreten ist. In diesem Fall wird die Deckung von Bedarfen im geplanten Bereich nach hinten geschoben. Dies beeinträchtigt zwar die Abrufstabilität, stellt aber für den Lieferanten ein weitaus geringeres Problem dar als ein Vorziehen oder eine Erhöhung von Bestellmengen im Kurzfristbereich. Positiv wirkt sich das spätere Eintreffen der geplanten Teile auf den Werksbestand aus.

Bei negativer Überdeckung soll bewusst die Möglichkeit eingeräumt werden, Sicherheiten im fixierten Bereich zur Bedarfsdeckung zu nutzen. Daher wird kein Mindestanteil an Sicherheiten eingefordert. Stattdessen werden so viele fixierte Teile von vorne beginnend Bedarfen zugeordnet, bis das Ende des Fixierungsraumes erreicht ist. Analog zur positiven Überdeckung ist zur Aufrechterhaltung der Materialversorgung ggf. auf SB-Teile zurückzugreifen. Ebenso werden Bedarfe übersprungen, die nicht durch fixierte und SB-Teile befriedigt werden können.

Werden Sicherheiten zur Bedarfsdeckung genutzt, konnten sie bereits innerhalb der Supply-Chain ihre Aufgabe erfüllen. Durch dieses Vorgehen kann zum einen u.U. eine Versorgungslücke in der Lieferkette geschlossen werden. Zugunsten der Abrufstabilität ändert sich zum anderen nicht der Startzeitpunkt zur Deckung von Bedarfen im geplanten Bereich.

Unabhängig vom Wert der Überdeckung ergibt sich die Anzahl an Sicherheitsbedarfsdeckern aus der Differenz aus allen fixierten Teile und zugeordneten fixierten Teilen. Hierbei ist zu ermitteln, wie viele Bedarfsdecker bzw. noch nicht gedeckte Bedarfe durch die Sicherheitsbedarfsdecker abgesichert sind. Reichen die Sicherheitsbedarfsdecker nicht über den Fixierungsraum hinaus, müssen im geplanten

Bereich von Anfang an Sicherheitsbedarfsdecker eingeplant werden. Geht die Absicherung über den Fixierungsraum, aber nicht über den gesamten Planungszeitraum hinaus, beginnt die Einplanung von Sicherheitsbedarfsdeckern ab dem ersten, nicht mehr abgesicherten Bedarf. Unter dem gesamten Planungszeitraum ist in diesem Zusammenhang die vollständige Zeitspanne zu verstehen, für welche Bruttobedarfe vorliegen. Reichen die Sicherheiten sogar über den gesamten Planungszeitraum hinaus, muss die Anzahl überschüssiger fixierter Sicherheitsbedarfsdecker ermittelt werden. Diese sind dann ebenfalls zur Bedarfsdeckung heranzuziehen, bevor neue Bedarfsdecker eingeplant werden. Dadurch soll bei Langsamläufern das Einplanen neuer Packlose verhindert werden, da ja bereits genügend Teile unter Einhaltung der relativen Sicherheit bestellt wurden.

Im Schritt 6 sind Teile zur Befriedigung von Bedarfen, die noch nicht von fixierten Bauteilen gedeckt sind, einzuplanen. Anschließend sind ab dem erforderlichen Zeitpunkt Sicherheiten zu verteilen. Dies hat derart zu erfolgen, dass alle nachfolgenden Bedarfe stets abgesichert sind. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, im Sinne einer Bedarfsglättung Bedarfstäler und -berge auszugleichen. Dies soll an nachfolgendem Beispiel veranschaulicht werden (Abbildung 5-5).

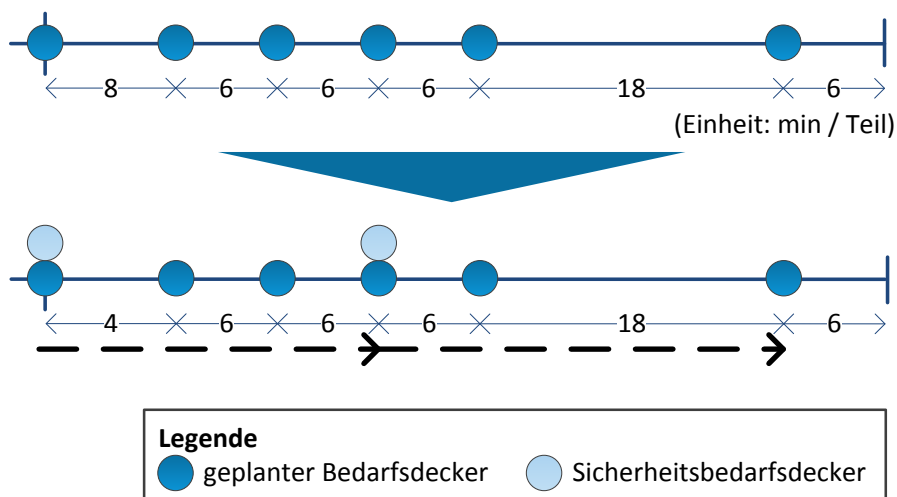


Abbildung 5-5: Einplanung von Sicherheitsbedarfsdeckern (in Anlehnung an [fml-13e])

Ausgangssituation sind eingeplante Bedarfsdecker. Die relative Sicherheit soll $1/3$ betragen. Für jeden Zeitpunkt t_i mit N_i eingeplanten Bedarfsdeckern wird die Größe der Bedarfslücke L_i bis zum nächsten Zeitpunkt t_{i+1} anhand folgender Formel quantifiziert:

$$L_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{N_i} \quad (5-1)$$

Beim letzten Teil wird als nachfolgender Zeitpunkt das Ende des gesamten Planungszeitraumes herangezogen. Die Verteilung der Werte im geplanten Bereich drückt den Grad der Gleichmäßigkeit des Bedarfs aus. Im Beispiel befindet sich die größte Lücke beim vorletzten Teil, die zweitgrößte beim ersten Teil. Beim vorletzten Teil darf aber keine Sicherheit platziert werden, da vorherige Teile dann nicht abgesichert wären. Daher wird die erste Sicherheit dem ersten Teil zugeordnet. Um nicht weitere Sicherheiten hinzuzufügen, wird mit dem zusätzlich eingeplanten Teil die Kennzahl neu berechnet. Anschließend darf wieder keine Sicherheit beim vorletzten Teil eingeplant werden, da ansonsten das vierte Teil ungesichert wäre. Unter den übrigen Teilen mit Lückenwert 6 wird dasjenige Teil zur Platzierung der Sicherheit gewählt, bei dem alle vorigen Bedarfsdecker gerade noch abgesichert sind. Dies gilt für das vierte Teil. Da alle notwendigen Sicherheiten verteilt sind, endet der Algorithmus. Im Beispiel konnte aufgrund der Forderung der Absicherung aller Bedarfe kein glättender Effekt erzielt werden. Wäre die größte Lücke bereits am Anfang aufgetreten, hätten beide Sicherheiten eingeplant werden und diese damit das Bedarfs-tal auffüllen können.

Ergebnis des gesamten Algorithmus sind Nettobedarfe in Form von eingeplanten Bedarfs- und Sicherheitsbedarfsdeckern, die als Input für die nachfolgende Bestellrechnung dienen. Zudem werden alle hinsichtlich der Materialversorgung relevanten Informationen ausgegeben. Dies beinhaltet die Höhe der Inanspruchnahme von Teilen des SB sowie die Versorgungssituation je Bedarf. Zudem werden im Fixierungsraum übersprungene Bedarfe angezeigt. Diese Informationen werden im Rahmen des Monitorings und der Überplanung von Dispositionsergebnissen benötigt, siehe Abschnitt 5.4.

Die vorgestellte Nettobedarfsrechnung unterscheidet sich zum Teil erheblich von den bestehenden Verfahren der trailerbasierten Abrufsteuerung für JIT/JIS-Teileumfänge (vgl. hierzu [Pea-2008]). Bei JIT erfolgt ebenfalls mit jedem Rechenlauf eine Neuordnung von fixierten Teilen und Bedarfen. Ein SB und Sicherheiten in der Supply-Chain sind jedoch nicht vorgesehen. Zudem muss zur Bedarfsdeckung stets die Bedarfsvorlaufzeit eingehalten werden. Dies mindert die Möglichkeit zur Kannibalisierung von Bedarfsdeckern, um Versorgungslücken in der Lieferkette zu schließen. Da aber eine Kannibalisierung prinzipiell erlaubt ist, kann das neue Verfahren auch auf JIT-Teile übertragen werden. Dies gilt jedoch nicht für JIS-

Teileumfänge. Um die physische Teilesequenz aufrechtzuerhalten, besteht bei JIS eine einmalig hergestellte, feste Bindung zwischen Bedarfsdeckern und Bedarfen. Zur Vermeidung von Verwirbelungen ist eine Kannibalisierung von Bedarfsdeckern nicht gewünscht. Daher soll an der bestehenden JIS-Nettobedarfsrechnung festgehalten werden.

5.3 Bestellrechnung

Die im obigen Abschnitt ermittelten Nettobedarfe aller Bauteile sind der Ausgangspunkt der nachfolgend vorgestellten Verfahren der Bestellrechnung zur Steuerung von Teil- und Komplettladungen. Hierzu werden zunächst Begriffsbestimmungen vorgenommen sowie die für die Bestellrechnung notwendige Datenstruktur vorgestellt. Der Vollständigkeit halber sind in dieser auch die für die Nettobedarfsrechnung erforderlichen Parameter aufgeführt. Anschließend wird die Bildung einer HU-Perlenkette beschrieben, die als Input für die separat für Teilladungen und Komplettladungen entwickelten Packalgorithmen dient. Deren Erläuterung folgt danach. Der Abschnitt schließt mit einer Beschreibung der Fixierungslogik sowie der Datenflüsse zwischen OEM und Lieferanten auf Basis bestehender Protokolle.

5.3.1 Begriffsbestimmungen und Datenstruktur

Begriffsbestimmungen

Kernelement der Bestellrechnung sind die entwickelten Packalgorithmen. Zu deren Erläuterung wird im zu beladenden Trailer ein dreidimensionales Koordinatensystem definiert. Aus der Perspektive des Fahrerhauses und gegen die Fahrtrichtung blickend wird dessen Ursprung in die linke vordere Ecke der Ladefläche gelegt. Die x-Achse verläuft entlang der vorderen Kante von links nach rechts, die y-Achse entlang der linken Trailerwand in entgegengesetzter Fahrtrichtung. Vertikal nach oben zeigt die z-Achse, siehe auch Abbildung 5-6. In dieser werden auch wesentliche, in den Algorithmen verwendete Begriffe veranschaulicht.

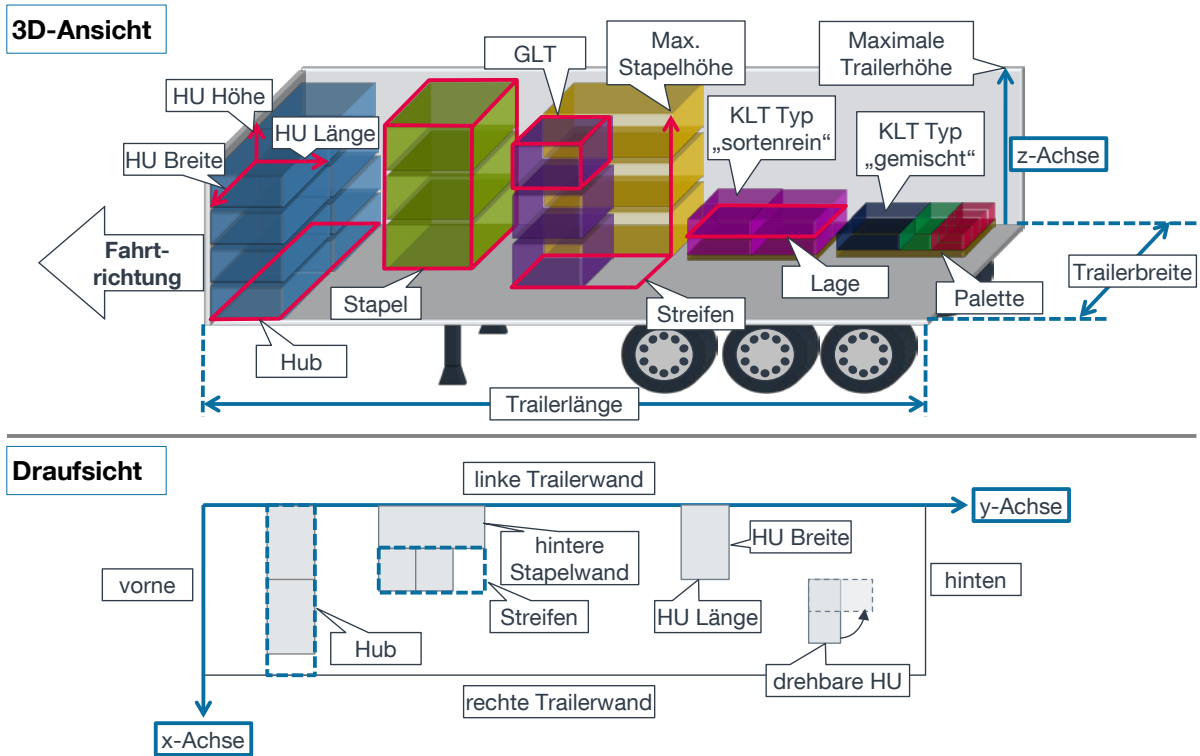


Abbildung 5-6: Festlegungen und Begriffe zur Beschreibung der Packalgorithmen

Die zu platzierenden HUs werden durch Ihre Länge, Breite und Höhe beschrieben. Die Länge verläuft parallel zur y-Achse, die Breite parallel zur x-Achse. Prinzipiell ist nur eine orthogonale Anordnung von HUs im Trailer erlaubt. Durch die Angabe von Länge und Breite wird die Standardorientierung von HUs auf dem Trailer definiert. Drehbare HUs können mit der Längsseite sowohl parallel zur y- als auch x-Achse platziert werden. Während die trailerbasierte Abrufsteuerung für lagerlose Teileumfänge lediglich GLTs betrachtet, müssen bei lagerhaltigen Teilen zusätzlich KLTs berücksichtigt werden. Unterschieden wird dabei zwischen sortenreinen und Mischgebänden. Diese setzen sich aus einer Palette und mindestens einer Lage KLTs zusammen.

Die Definitionen von Teile- und Stapelfamilie werden von der trailerbasierten Abrufsteuerung übernommen, vgl. Abschnitt 3.3.1. Der Begriff Transportfamilie wird erweitert. Sie enthält alle Teilefamilien einer Transportrelation. Bei Milkruns bedeutet dies mehr als einen Lieferantenstandort. Zudem gilt die räumliche Nähe der Verbauorte nur für JIT/JIS-Teileumfänge.

Zusätzlich wird der Begriff Hubfamilie geprägt. Sie enthält Stapelfamilien, deren HUs im selben Hub platziert werden dürfen, HUs unterschiedlicher Stapelfamilien dürfen jedoch nicht aufeinander gestapelt werden. Darüber hinaus wird der Begriff Streifen

eingeführt. Dieser beschreibt eine rechteckige Fläche, auf der Stapel gleicher Breite hintereinander in y-Richtung platziert werden können.

Datenstruktur

Um die Packalgorithmen ausführen zu können, muss im Vorfeld eine Datenbasis mit den notwendigen Parametern angelegt werden. Abbildung 5-7 stellt die erforderliche Struktur in einem relationalen Datenbankschema dar. Der Vollständigkeit halber enthält dieses auch notwendige Daten zur Nettobedarfsrechnung.

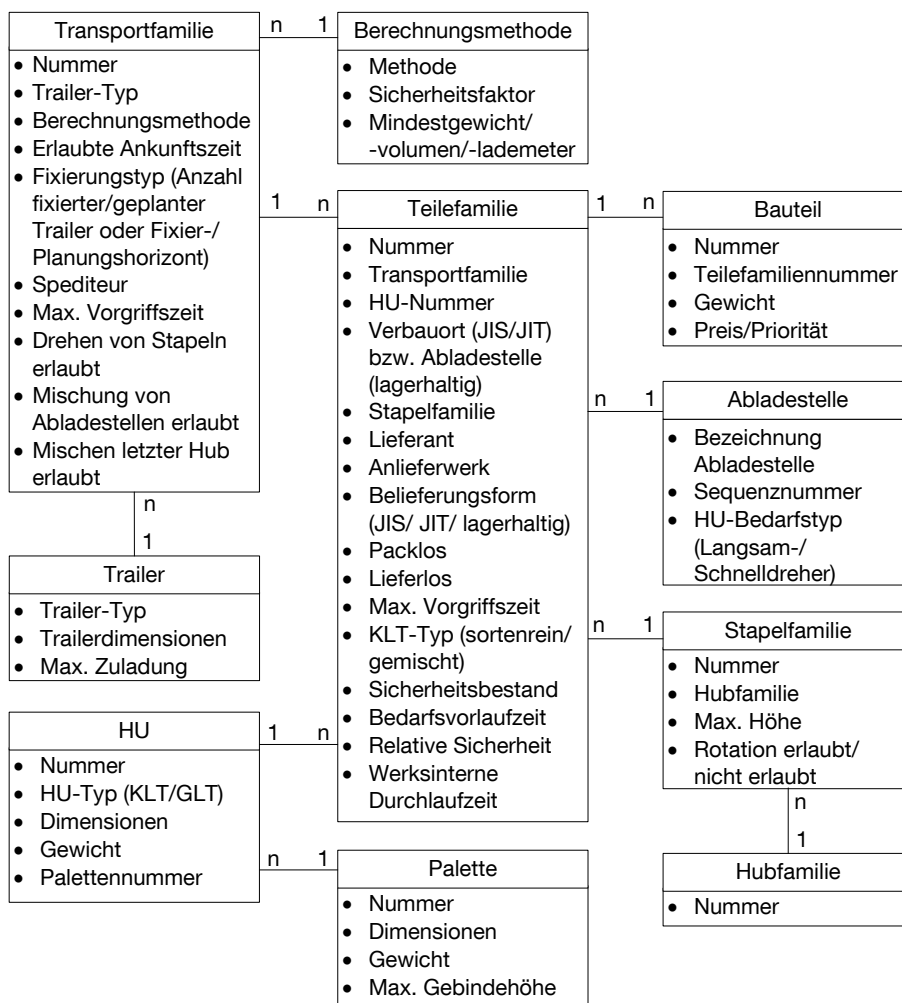


Abbildung 5-7: Strukturierte Datenbasis zur Steuerung von Teil- und Komplettladungen

Allumfassendes Element innerhalb des Datenbankschemas ist die Transportfamilie. Ihr wird eine eindeutige Nummer zugewiesen. Zudem kann optional ein erlaubtes Ankunftszeitfenster zugeordnet werden. Prinzipiell leitet sich der Ankunftszeitpunkt eines Trailers vom Bedarfszeitpunkt jener HU auf dem Trailer ab, die als erstes benötigt wird. Mit der Angabe eines gültigen Ankunftszeitfensters wird der Trailer dann

auf dieses vorgezogen. Durch die Festlegung von unterschiedlichen Ankunftszeitfenstern für alle lagerhaltigen Transportfamilien kann einerseits der Wareneingang geglättet werden. Das Vorziehen von Anlieferungen führt jedoch zu einer Erhöhung der Bestandsreichweiten im Werk. Bei teuren JIT/JIS-Teilen sollte dies jedoch unbedingt vermieden werden. Daher sollte das Feld bei einer Mischbelieferung von JIT/JIS- und lagerhaltigen Teilen leer bleiben und die Ware zum exakten Bedarfszeitpunkt angeliefert werden. Weiteres Attribut ist der Fixierungstyp. Hierauf wird später noch eingegangen. Die maximale Vorgriffszeit dient dazu, Trailerreichweiten zu begrenzen, analog wie das bereits bei der Steuerung von JIT/JIS-Teilen der Fall ist. Der Eintrag Spediteur hat lediglich Informationszwecke. Die letzten drei Felder zur Drehung von Stapeln, Mischen von Abladestellen und zum gemischten letzten Hub sind Einstellungsparameter für den Packalgorithmus für Komplettladungen. Eine Erläuterung erfolgt im entsprechenden Abschnitt zum Packalgorithmus. Des Weiteren muss der Trailer eingetragen werden, der für die betrachtete Transportrelation eingesetzt wird. Er ist ein eigenes Datenobjekt und ist charakterisiert durch die Innenmaße des Laderaums sowie die maximale Zuladung. Zusätzlich ist bei der Transportfamilie die Berechnungsmethode (entspricht dem Packalgorithmus) anzugeben, die sich für Teil- und Komplettladungen unterscheidet. Dabei kann der später beschriebene Packalgorithmus für Komplettladungen auch für Mischbelieferungen eingesetzt werden. Innerhalb der Berechnungsmethode kann ein Sicherheitsfaktor angegeben werden. Dieser bestimmt eine Freifläche, die der Lieferant nutzen kann, falls er nicht das vom OEM gewünschte Packschema herstellen kann. Der Parameter wird im Packalgorithmus für Komplettladungen zur Verstauung von HUs, die selten umgeschlagen werden, verwendet. Die Angabe Mindestgewicht/-volumen/-lademeter bezieht sich auf die Steuerung von Teilladungen.

Der Transportfamilie selbst ist wiederum mindestens eine Teilefamilie zugeordnet. Sie ist ein Konstrukt des JIT/JIS-Konzepts und umfasst alle Teile, die vom selben Lieferanten angeliefert und am selben Verbauort in derselben HU bereitgestellt werden. Für lagerhaltige Teile sind jedoch die Abladestellen der Lager und nicht die Verbauorte relevant, folglich wäre für diese das Datenobjekt der Teilefamilie nicht zwingend notwendig. Da aber alle Belieferungsformen auf der Grundlage derselben Datenbasis gesteuert werden sollen, bleibt die Teilefamilie auch für Lagerteile erhalten.

Neben der Transportfamilie wird die Teilefamilie einer HU, einem Verbauort bei JIT/JIS bzw. einer Abladestelle sowie einer Stapelfamilie zugewiesen, die wiederum

eigene Datenobjekte sind. Die Angabe des Lieferanten ist für den Packalgorithmus notwendig, da HUs unterschiedlicher Lieferanten getrennt voneinander systemisch auf dem Trailer aufgeladen werden müssen. Gleiches gilt für die Abladestelle bzw. den Verbauort. Die Belieferungsform beeinflusst das Vorgehen in der Nettobedarfsrechnung. In diese gehen zudem die Werte für den SB, die Bedarfsvorlaufzeit, die relative Sicherheit und die werksinterne Durchlaufzeit ein. Die maximale Vorgriffszeit kann gesetzt werden, wenn nur die Reichweite einzelner Teilefamilien auf dem Trailer begrenzt werden soll. Die Felder Packlos und Lieferlos dienen der Bildung einer HU-Perlenkette, die Input für die Packalgorithmen ist. Der Eintrag KLT-Typ ist selbstredend nur bei KLTs auszufüllen. Unterschieden wird zwischen sortenreinen und gemischten KLT-Gebinden. Die Wahl des geeigneten Typs hängt vom Bedarfsverhalten des Bauteils ab. „sortenrein“ ist bei einem hohen, „gemischt“ bei einem niedrigen Behälterumschlag zu wählen. Das Feld wird daher nicht der HU, sondern der Teilefamilie angehängt.

Das Datenobjekt Abladestelle enthält neben der Bezeichnung eine Sequenznummer und den HU-Bedarfstyp. Mit der Sequenznummer kann die Abladereihenfolge im Werk festgelegt werden. Beim HU-Bedarfstyp wird zwischen Langsamdreher und Schnelldreher unterschieden. Hintergrund ist, dass die HUs aller Teilefamilien, bei denen der Bedarfstyp auf Langsamdreher gesetzt wird, im Algorithmus zu einer gemeinsamen zentralen Abladestelle zusammengefasst werden, was sich auch in einem zusammenhängenden Block auf dem Trailer widerspiegelt. Das Objekt Stapelfamilie enthält Attribute wie die maximale Stapelhöhe und ist wiederum einer Hubfamilie zugeordnet. Weiteres Datenobjekt ist die HU. Hierbei ist der HU-Typ anzugeben. Handelt es sich um einen KLT, wird von der typischen HU-Definition abgewichen. Entspricht das Lieferlos einer KLT-Lage, sind deren Maße als HU-Dimensionen anzugeben. Als Gewicht ist das Gewicht aller Leerbehälter einer Lage einzutragen. Nur, wenn es sich um einen KLT handelt, sind darüber hinaus die Felder des Objekttyps Gebinde auszufüllen. Falls ein Gebinde von einem Deckel abgeschlossen wird, ist darauf zu achten, beim Eintrag der Palettenhöhe die Deckelhöhe mit zu berücksichtigen.

Der Teilefamilie sind wiederum Bauteile zugeordnet. Sie sind geprägt durch eine Identifikationsnummer, das Gewicht und eine Priorität, die herangezogen wird, wenn der Packalgorithmus indifferent ist gegenüber der Reihenfolge der als nächstes auf den Trailer zu platzierenden HUs.

Während zur Steuerung von Komplettladungen alle Daten eingetragen werden müssen, ist für Teilladungen ein geringerer Datenumfang notwendig. Informationen zur Stapelfamilie und Hubfamilie etwa sind zur Bildung eines systemisch generierten Packschemas nach den Regeln des OEM notwendig. Bei Teilladungen liegt die Verantwortung der Verstauung von HUs jedoch beim Spediteur. Daher können die genannten Datensätze leer bleiben. Gleiches gilt für spezifische Einstellungen für den Packalgorithmus für Komplettladungen wie bspw. das Erlauben von gemischten Abladestellen. Alle anderen Datensätze, die für Teilladungen benötigt werden, sind dem entsprechenden Packalgorithmus zu entnehmen.

5.3.2 Bildung einer HU-Perlenkette

Zur Bestimmung von Bestellmengen mittels Packalgorithmen muss zunächst eine HU-Perlenkette gebildet werden. Hierzu werden alle Bauteile einer Transportfamilie betrachtet.

Im ersten Schritt wird für jedes Bauteil eine HU-Perlenkette hergestellt. Ausgangspunkt sind die ermittelten Nettobedarfe, die aufsteigend nach deren Bedarfszeitpunkten sortiert sind. Eine HU-Perlenkette entsteht durch Aggregation der Nettobedarfe auf Basis des Lieferloses. Jeder HU wird der Bedarfszeitpunkt jenes Nettobedarfs zugeordnet, der als erstes benötigt wird. Anschließend werden die HU-Perlenketten aller Bauteile einer Transportfamilie zu einer gemeinsamen HU-Perlenkette zusammengefasst. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5-8 anhand eines Milkruns mit zwei Lieferanten und insgesamt drei unterschiedlichen Bauteilen skizziert.

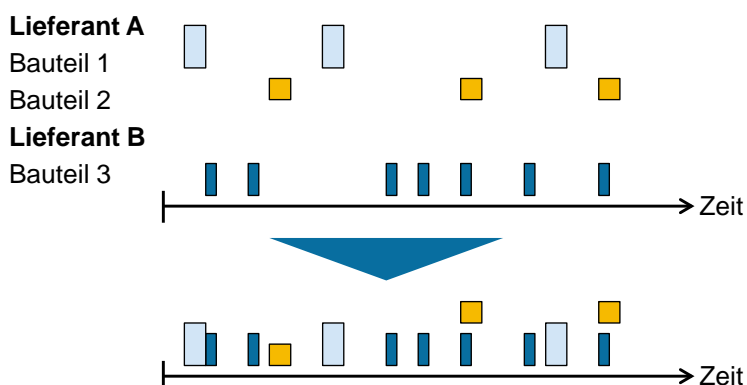


Abbildung 5-8: Beispielhafte Bildung einer HU-Perlenkette für einen Milkrun

Die einzelnen Milkruns sind dabei das Ergebnis einer Tourenplanung auf Basis durchschnittlicher Bedarfsraten. Die Routen sind statisch. Dynamisch verhalten sich aufgrund der perlenkettenbasierten Mengensteuerung dagegen die Transportzyklen und Ankunftszeitpunkte. Eine Neuplanung der Routen kann in regelmäßigen zeitlichen Abständen erfolgen, eine volldynamische Routenplanung wird vom Konzept aber nicht unterstützt. Nachfolgend werden die entwickelten Packverfahren zur Steuerung von Teil- und Komplettladungen vorgestellt.

5.3.3 Packalgorithmus für Teilladungen

Bei Teilladungen steht die Bildung eines Packschemas in der Verantwortung des Gebietsspediteurs. Der OEM kann mit diesem lediglich eine Sortierung der Transportgüter nach Abladestellen sowie allgemeine Stapelvorschriften und maximale Gebindehöhen vereinbaren. Abgerechnet werden die abgerufenen Teilladungen in der Regel nach Gewicht oder Volumen. Zum Teil wird auch das Maß des Lademeters herangezogen, um sowohl das Transportgewicht als auch -volumen zu berücksichtigen. Es kann aus beiden Größen einfach ermittelt werden, siehe Abschnitt 3.1.2.

Mit dem nachfolgend beschriebenen Packalgorithmus wird das Ziel verfolgt, stets die optimale Menge abzurufen, die im Vorfeld unter Berücksichtigung aller tangierten Logistikkosten bestimmt werden muss. Als Mengenmaß kann analog zur Abrechnung von Teilladungen sowohl das Gewicht, Volumen oder der Lademeter herangezogen werden. Der Gesamtalgorithmus wird in Abbildung 5-9, Subalgorithmen werden in Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 dargestellt.

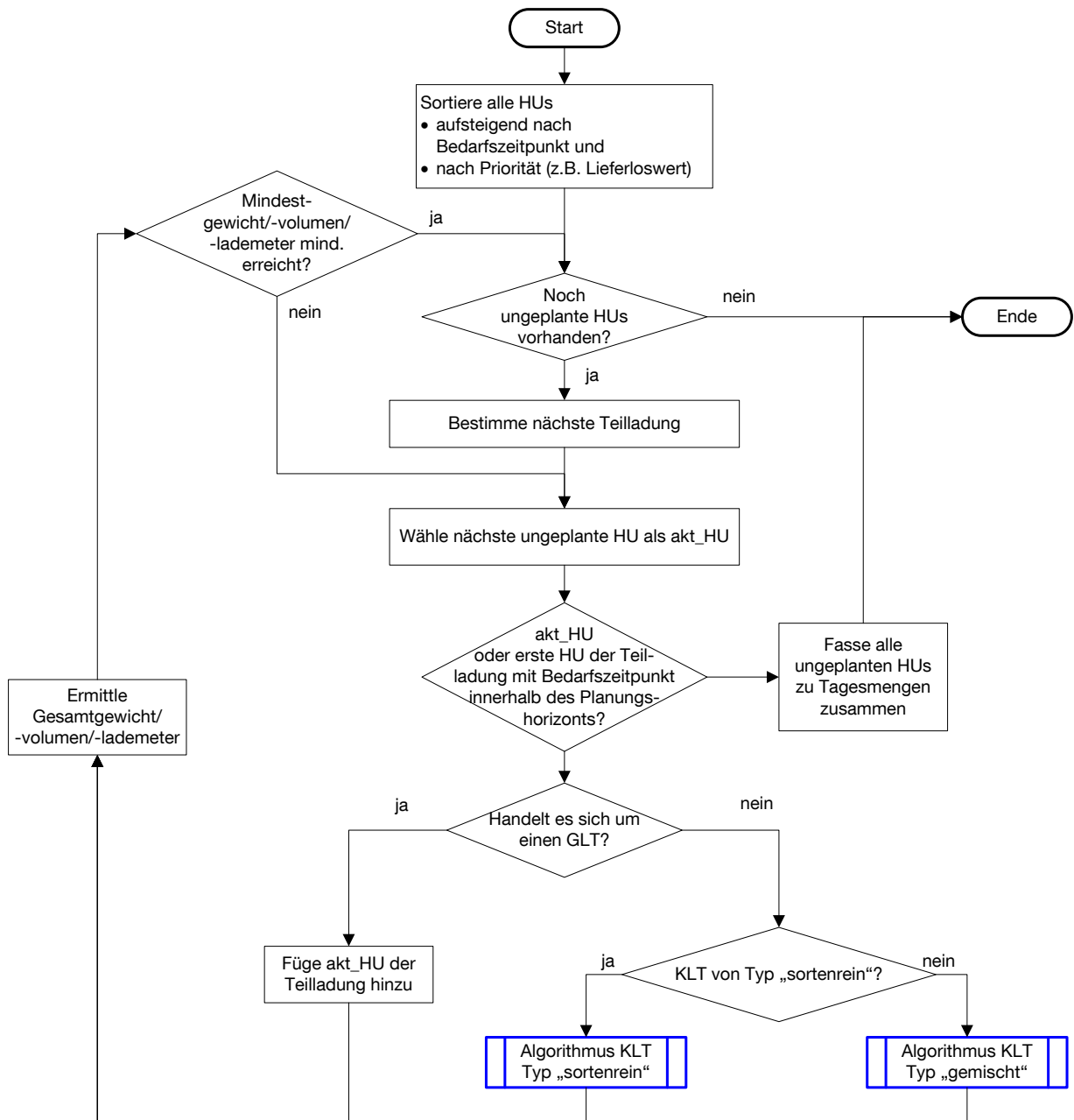


Abbildung 5-9: Gesamtalgorithmus zur Bestimmung von Teilladungen

Zu Beginn werden alle HUs nach aufsteigendem Bedarfszeitpunkt sortiert. Zudem erfolgt eine Priorisierung, falls mehreren HUs derselbe Bedarfszeitpunkt zugeordnet ist. Die Priorität könnte bspw. durch den Lieferloswert ausgedrückt werden. Im Hinblick auf die Kapitalbindungskosten sollten der Teilladung HUs mit niedrigem Lieferloswert bevorzugt zugewiesen werden.

Anschließend werden Teilladungen gebildet. Handelt es sich bei der aktuellen HU (akt_HU) um einen GLT, wird die akt_HU direkt zur Teilladung hinzugefügt. Bei KLTs

wird überprüft, ob ein neues Gebinde begonnen werden muss, da dann nicht nur die akt_HU, sondern auch die zugehörige Palette der Teilladung hinzugefügt werden muss. Zwar ist der Spediteur für die Herstellung eines Packschemas selbst verantwortlich. Bei der Bildung von Gebinden müssen der Lieferant und der Spediteur jedoch den Gebindetyp berücksichtigen. Zudem dürfen in der Regel nur KLTs einer Abladestelle zusammengestellt werden. Folglich ist der OEM in der Lage, die Bildung von Gebinden systemisch zu antizipieren. Hierbei wird zwischen den KLT-Typen „sortenrein“ und „gemischt“ unterschiedlich vorgegangen.

Beim Typ „sortenrein“ (vgl. Abbildung 5-10) wird zunächst geprüft, ob der Teilladung bereits ein angebrochenes Gebinde mit gleicher Bauteilnummer und Abladestelle zugeordnet ist. Falls dem so ist, wird auf dem Gebinde die akt_HU platziert, die einer ganzen Lage entspricht. Anschließend wird überprüft, ob die maximale Gebindehöhe erreicht ist. Ist das der Fall, wird der Gebindestatus auf „voll“ gesetzt. Anschließend wird die akt_HU der Teilladung hinzugefügt. Liegt keine angebrochene Palette vor, muss ein neues Gebinde begonnen werden. In diesem Fall wird der Teilladung sowohl die akt_HU als auch eine Palette hinzugefügt.

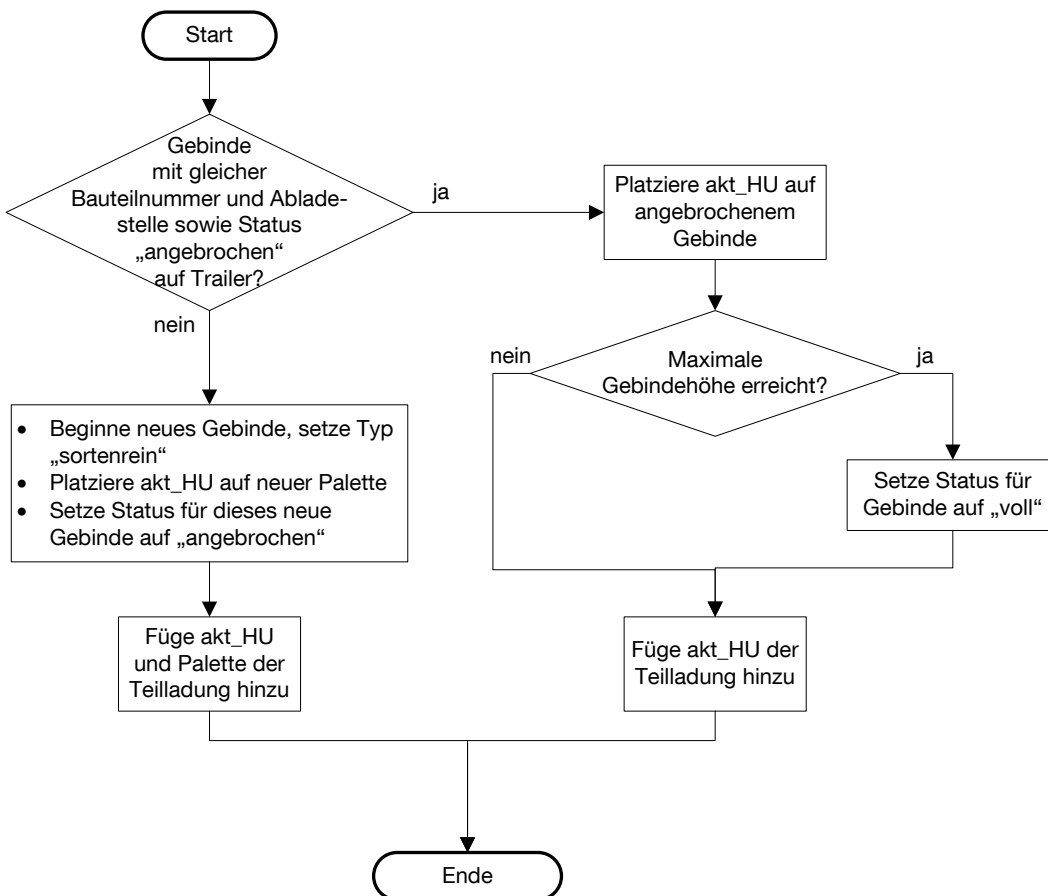


Abbildung 5-10: Subalgorithmus für sortenreine KLT-Gebinde bei Teilladungen

Beim Typ „gemischt“ (vgl. Abbildung 5-11) wird zunächst abgefragt, ob angebrochene Mischgebände derselben Abladestelle vorliegen. Diese werden in der Menge M_{Geb} abgespeichert. Falls die Menge leer ist, muss ein neues Gebinde begonnen werden und dessen Status auf „angebrochen“ gesetzt werden (siehe Markierung i in der Abbildung). Der Teilladung sind dann entsprechend die akt_HU einschließlich einer Palette hinzuzufügen. Gibt es bereits angebrochene Gebinde, werden von diesen alle Lagen, die in dasselbe Höhenraster fallen wie die akt_HU und zudem über freie Restflächen verfügen, in der Menge M_{Lage} gespeichert. Liegen entsprechende Lagen vor, wird die akt_HU jener Lage mit geringster verbleibender Fläche zugeordnet (siehe Markierung ii1 in der Abbildung). Dass die akt_HU in jedem Fall in dieser Lage Platz findet, kann aufgrund der Modularität von ISO- bzw. Europaletten sowie VDA-KLTs garantiert werden. Ist keine ausreichende Fläche vorhanden, wird geprüft, ob Gebinde mit ausreichender Resthöhe zur maximalen Gebindehöhe vorliegen, um auf diesen einen neue Lage zu beginnen. Falls entsprechende Gebinde vorhanden sind, wird die akt_HU auf jenem Gebinde mit geringster Resthöhe platziert (siehe Markierung ii2 in der Abbildung). Ansonsten muss ebenfalls ein neues Gebinde angefangen werden. Anschließend wird überprüft, ob die maximale Gebindehöhe erreicht ist und keine Restflächen mehr vorhanden sind. Ersteres ist dann der Fall, wenn das Gebinde zuzüglich einer weiteren Lage mit dem kleinsten Höhenraster die maximal mögliche Gebindehöhe überschreiten würde. Ggf. wird der Status des Gebindes auf „voll“ gesetzt und die akt_HU der Teilladung hinzugefügt.

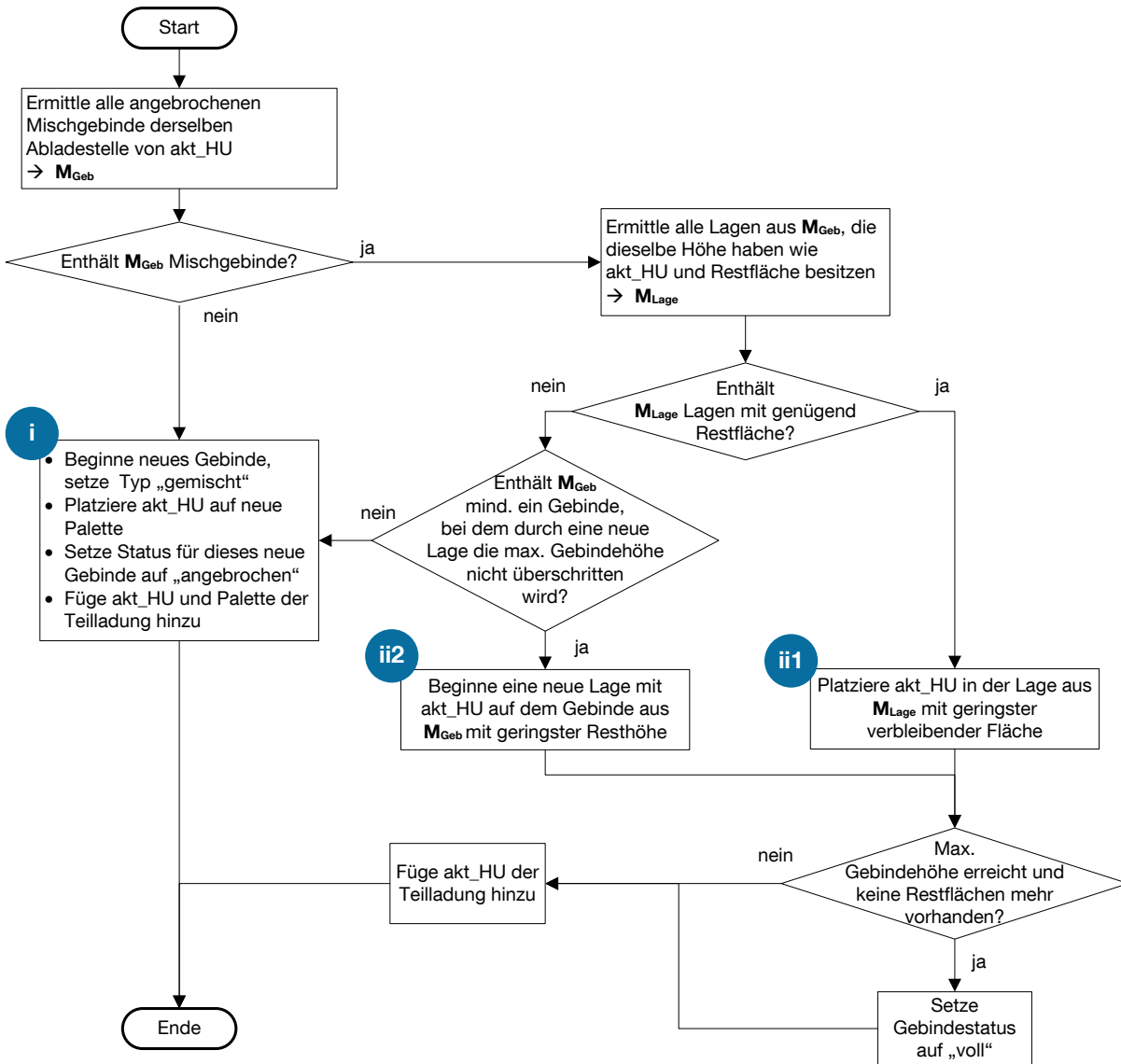


Abbildung 5-11: Subalgorithmus für Mischgebände bei Teilladungen

Ist das Prozedere für einen KLT oder GLT durchlaufen, werden das neue Gesamtgewicht/-volumen oder die neuen Gesamtlademeter der Teilladung bestimmt. Ist der Mindestwert erreicht oder überschritten, ist die Ermittlung der Teilladung abgeschlossen und es wird die nächste Teilladung bestimmt. Sind keine weiteren HUs mehr vorhanden oder liegt der Bedarfszeitpunkt der akt_HU bzw. der ersten HU der Teilladung außerhalb des Planungshorizonts, werden ggf. alle noch ungeplanten HUs zu Tagesmengen zusammengefasst und der Algorithmus endet. Auf den Planungshorizont wird in Abschnitt 5.3.5 näher eingegangen.

5.3.4 Packalgorithmus für Komplettladungen

Mit der Berechnungsmethode „Geometrie inklusive Gewicht“ der trailerbasierten Abrufsteuerung liegt ein effizientes Packverfahren vor, das JIT/JIS-Komplettladungen mit hoher Trailerauslastung generiert. Wesentliches Element der Methode ist die Bildung von Hügen, in denen HUs derselben Seitenlängen untergebracht werden. Dies sorgt infolge meist modularer Grundmaße der HUs für eine hohe Flächennutzung innerhalb der Hübe. Zudem wird ein hinsichtlich der Ladungssicherung aufwandsarmer Formschluss erreicht. Des Weiteren können systemisch generierte Beladeschemen vom Lieferanten einfach reproduziert werden. Die genannten Eigenschaften werden auch für Beladeschemen für Lagerteile gefordert. Daher wird vom entwickelten Packalgorithmus für lagerhaltige Teileumfänge das Grundprinzip der Hubbildung aufgegriffen und in einen Stackbuilding-Ansatz integriert. Nicht zuletzt aufgrund automobilspezifischer Stapelsysteme und -vorschriften wird dieser auch von bestehenden Algorithmen für die Automobilindustrie verfolgt.

Aus dem Hubprinzip ergeben sich jedoch nicht nur Vorteile, sondern auch zahlreiche Nachteile. Von jeder Stapelfamilie werden stets ein oder mehrere vollständige Hübe abgerufen. Dies kann zu hohen Bestandsreichweiten führen. Der Effekt ist besonders groß bei Stapelfamilien mit geringen HU-Bedarfsraten, da dann weit in die Zukunft gegriffen werden muss, um einen kompletten Hub auszufüllen. Reichweiten können zwar durch eine maximale Vorgriffszeit begrenzt werden, jedoch reduziert sich dadurch auch die Volumenauslastung.

Das Problem verschärft sich noch mehr bei lagerhaltigen Prozessen und Milkruns. Bei Lagerbelieferung werden die HUs häufig dezentral an mehreren Lagerorten abgeladen. Hübe müssen dann separat nach Abladestelle gebildet werden, um bei der Entladung wahlfreien Zugriff auf die HUs zu haben. Daneben müssen bei Milkruns mehrere Lieferanten berücksichtigt werden. In der Folge müsste für jede Stapelfamilie-Abladestelle-Lieferant-Kombination ein eigener Hub auf dem Trailer erzeugt werden. Bei einer hohen Zahl an Kombinationen kann dies dazu führen, dass die maximale Länge der Trailerladefläche durch für bestimmte Kombinationen eröffnete Hübe bereits ausgereizt ist und für andere Kombinationen keine Hübe mehr begonnen werden können. HUs dieser Stapelfamilien müssen also übersprungen werden und können erst auf dem nächsten Trailer platziert werden. Deren Bedarfszeitpunkte bestimmen die entsprechend frühzeitige Ankunft des Trailers im Werk. Dies wirkt sich

negativ auf Bestandsreichweiten insbesondere jener HUs aus, die ebenfalls dem nächsten Trailer zugeordnet werden, jedoch deutlich später benötigt werden.

Packstrategien

Um die Vorteile der Hubbildung auszunutzen und gleichzeitig deren negative Effekte infolge des Transportloses eines vollständigen Hubs und übersprungener HUs abzuschwächen, sind im Packalgorithmus unterschiedliche Strategien integriert (vgl. hierzu auch [fml-12f]). Zum einen wird neben der Stapelfamilie die Hubfamilie eingeführt, sodass in einem Hub HUs derselben Hubfamilie, jedoch unterschiedlicher Stapelfamilien in separaten Stapeln eingebracht werden können. Weitere Strategien sind das Mischen von Abladestellen, gemischte Hubfamilien im letzten Hub der letzten Abladestelle und die Drehung von Stapeln. Bei der Mischung von Abladestellen werden Stapel derselben Hubfamilie, jedoch unterschiedlicher Abladestelle in einem Hub kombiniert. Bei gemischten Hubfamilien im letzten Hub sind alle Hübe bis auf den letzten hubfamilienrein. Im letzten Hub können Stapelfamilien unterschiedlicher Grundfläche platziert werden. Der Formschluss bleibt erhalten, gleichzeitig kann im Mischhub das Transportlos auf einen Stapel reduziert werden. Eine feinere Abstufung von Abrufmengen kann erreicht werden, indem die Drehung von Stapeln erlaubt wird. Hierbei wird ausgenutzt, dass sich die maximale Anzahl der Stapel pro Hub in der Regel abhängig von der Orientierung unterscheidet. Durch Drehung der mit der langen Seite quer zur Ladefläche liegenden Stapel kann dann ein weiterer Stapel einem Hub zugeordnet werden, ohne einen neuen Hub beginnen zu müssen. Gleichwohl muss auch bei erlaubter Drehung mindestens ein vollständiger Hub definiert werden. Bei der Mischung von Abladestellen kann zudem nur im Mischhub selbst das Transportlos reduziert werden. Zudem ist die Möglichkeit zur Anwendung dieser Strategie begrenzt, da für aufeinander folgende Abladestellen dieselben Hubfamilien vorliegen müssen, um Stapel mischen zu können. Daher wurde neben einem Schnelldreheralgorithmus, der obige Strategien beinhaltet, ein Langsamdreheralgorithmus entwickelt, der als Transportlos einen Stapel ermöglicht und die Stapel nach einem Skyline-Algorithmus auf dem Trailer anordnet.

Als weitere Strategie wird bei der Bildung von Stapeln und der Verteilung der Stapel das Best-Fit-Prinzip angewandt. HUs bzw. Stapel werden derart platziert, dass für nachfolgende HUs bzw. Stapel möglichst viel Spielraum bleibt. Dadurch wird das Risiko gemindert, HUs nicht verstauen zu können und folglich überspringen zu müs-

sen. Des Weiteren erfolgt in bestimmten Situationen eine Neuplatzierung von HUs im Offline-Modus. Dies verspricht eine verbesserte Laderaumausnutzung.

Die im Schnelldreheralgorithmus integrierten Strategien lassen sich in einfache Regeln übersetzen, sodass der Lieferant weiterhin in der Lage ist, ein vom OEM dynamisch erzeugtes Beladeschema zu reproduzieren. Der Langsamdreheralgorithmus ist zwar auch einfach gestaltet, Abweichungen der physischen von der systemischen Beladung sind aufgrund der vergleichsweise höheren Komplexität jedoch wahrscheinlicher. Daher wird ein Sicherheitsfaktor festgelegt, der die belegbare Fläche auf dem Trailer reduziert, sodass der Lieferant bei Beladungsfehlern noch Spielraum hat.

Nachfolgend wird ein Überblick über den Gesamtalgorithmus gegeben. Grafiken zu diesem finden sich zum Teil in ähnlicher Form auch in den Arbeiten von Sailer und Zhang, in denen unter der Regie des Autors entstandene, frühere Stände des Konzepts dokumentiert sind (vgl. [fml-12f], [fml-13d]). Nach der Vorstellung der Subalgorithmen im Detail wird ein exemplarisches Packergebnis dargestellt. Zudem werden die Packregeln für den Lieferanten präsentiert.

Überblick über Gesamtalgorithmus

Einen Überblick über den Gesamtalgorithmus gibt Abbildung 5-12. Zu Beginn des Algorithmus werden alle HUs aufsteigend nach Bedarfszeitpunkt sowie bei identischem Bedarfszeitpunkt weiter nach HU-Bedarfstyp und Priorität sortiert. Schnelldreher-HUs sollen aufgrund der geringeren HU-Reichweite vor Langsamdreher-HUs aufgeladen werden. Zur Priorisierung kann bspw. der Quotient aus Lieferloswert und Lieferlosvolumen herangezogen. Hiermit kann eine Art „Wertdichte“ ausgedrückt werden. Im Hinblick auf die Kapitalbindungskosten sollten daher HUs geringer Wertdichte HUs höherer Wertdichte vorgezogen werden.

Die HUs sind anschließend systemisch im Trailer zu verstauen. Jede aktuell betrachtete HU wird als akt_HU bezeichnet. Zunächst wird überprüft, ob die Vorgriffszeit oder das Gewicht überschritten sind. Falls dem nicht so ist, wird abhängig von den HU-Eigenschaften entweder direkt der Schnelldreher- bzw. Langsamdreheralgorithmus (Markierung A bzw. B in der Abbildung) ausgeführt oder es wird ein Algorithmus für KLTs (Markierung C in der Abbildung) durchlaufen. Ist die akt_HU verladbar, wird sie entsprechend auf dem Trailer platziert. Ansonsten werden in der HU-Perlenkette alle HUs derselben Teilefamilie wie die der akt_HU als nicht verlad-

bar markiert. Die Beladung eines Trailers endet, sobald keine ungeplanten und noch nicht markierten HUs mehr vorhanden sind. Anschließend wird mit dem nächsten Trailer fortgefahren, sofern noch ungeplante HUs vorliegen. Wenn jedoch die erste HU der Komplettladung bereits außerhalb des Planungshorizonts liegt, endet der Algorithmus. Alle noch ungeplanten HUs werden dann zu Tagesmengen aggregiert. Nachfolgend werden die einzelnen Subalgorithmen im Detail beschrieben.

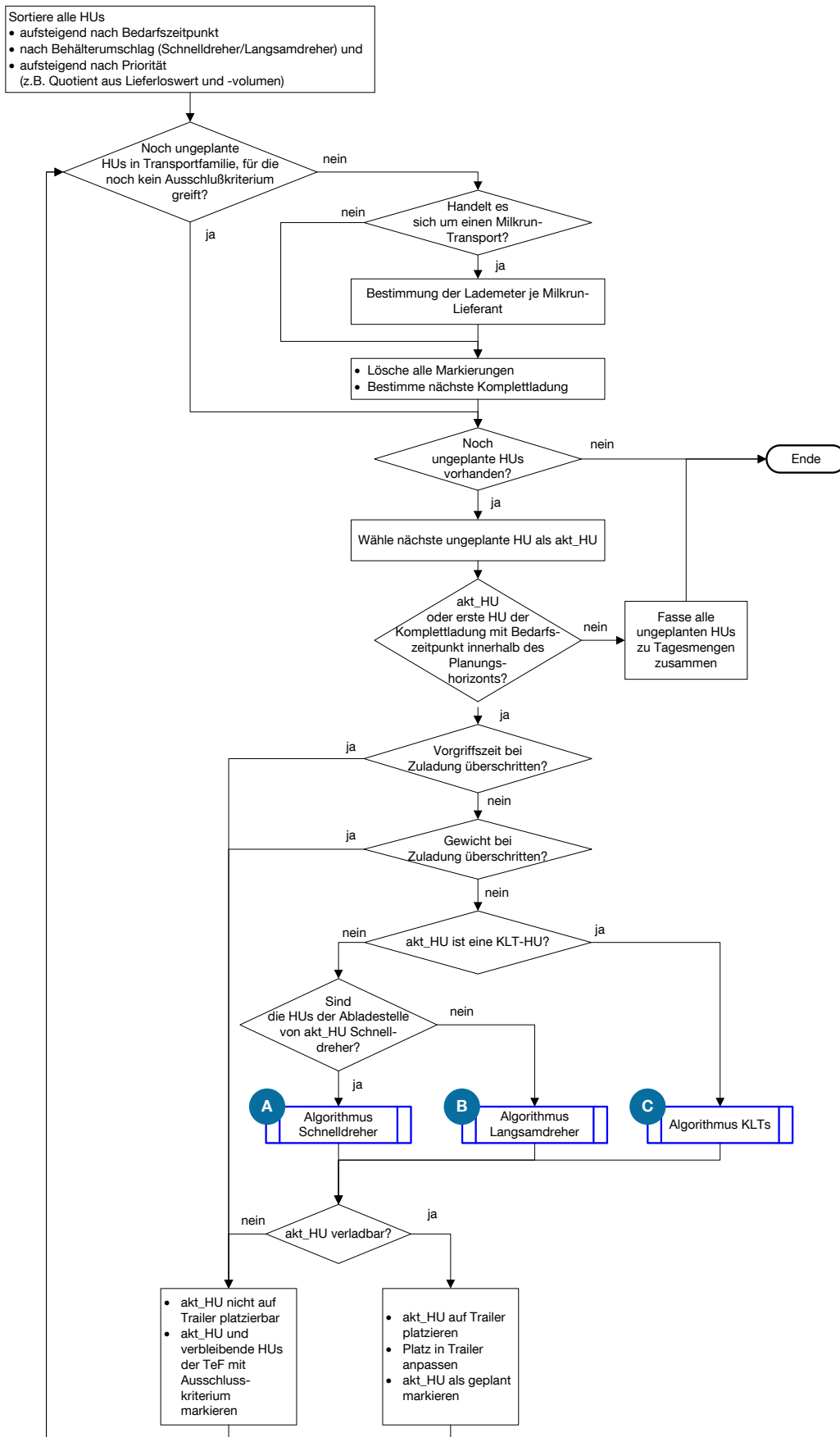


Abbildung 5-12: Überblick über den Gesamtalgorithmus für Komplettladungen

Algorithmus Schnelldreher

Der Schnelldreheralgorithmus (Abbildung 5-13) versucht zunächst, die akt_HU auf einen bereits existenten Stapel zu platzieren (Abbildung 5-14). Dieser muss mind. eine HU desselben Lieferanten, derselben Stapelfamilie und Abladestelle enthalten. Falls möglich, wird die akt_HU auf einem Stapel mit zur akt_HU identischen HUs platziert. Dies ist zum einen intuitiv und lässt zum anderen aufgrund häufig modularer Höhenmaße einen positiven Effekt auf die Ausnutzung der maximalen Stapelhöhe bzw. Trailerinnenhöhe erwarten. Andernfalls wird die HU einem Stapel unterschiedlicher HU-Höhen zugeordnet. Als zusätzliche Option stehen Stapel einer anderen Abladestelle zur Verfügung, die mit Stapeln der Abladestelle und Hubfamilie der akt_HU in einem Mischhub kombiniert sind. Beim Verstauen der akt_HU wird dabei stets nach dem Best-Fit-Prinzip jener Stapel gewählt, der die geringste, noch ausreichende Resthöhe aufweist. Dadurch bleiben auf anderen Stapeln größere Restkapazitäten erhalten, um weitere HUs platzieren zu können und folglich das Überspringen von HUs möglichst zu vermeiden.

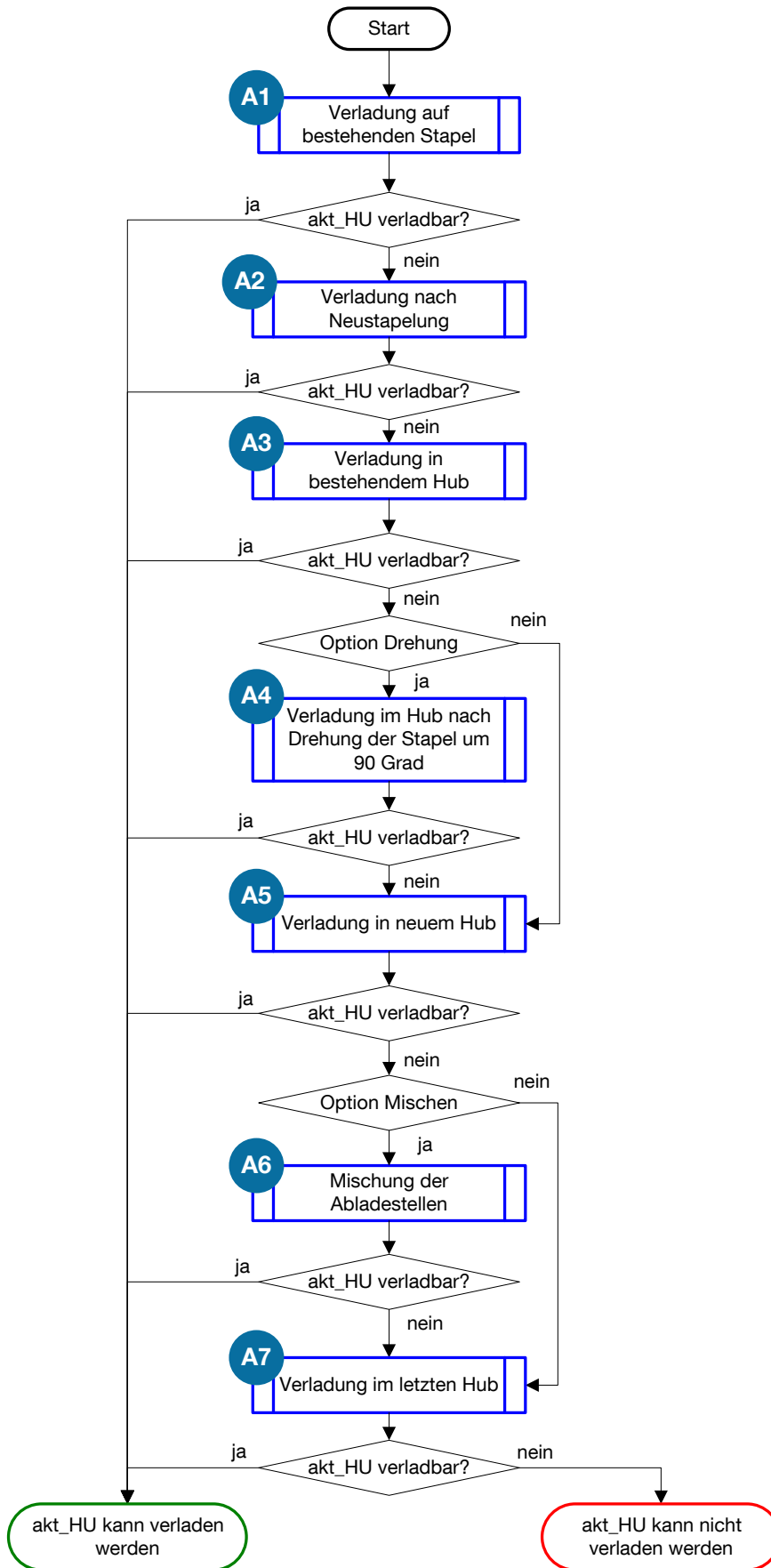


Abbildung 5-13: Algorithmus A - Schnelldreher

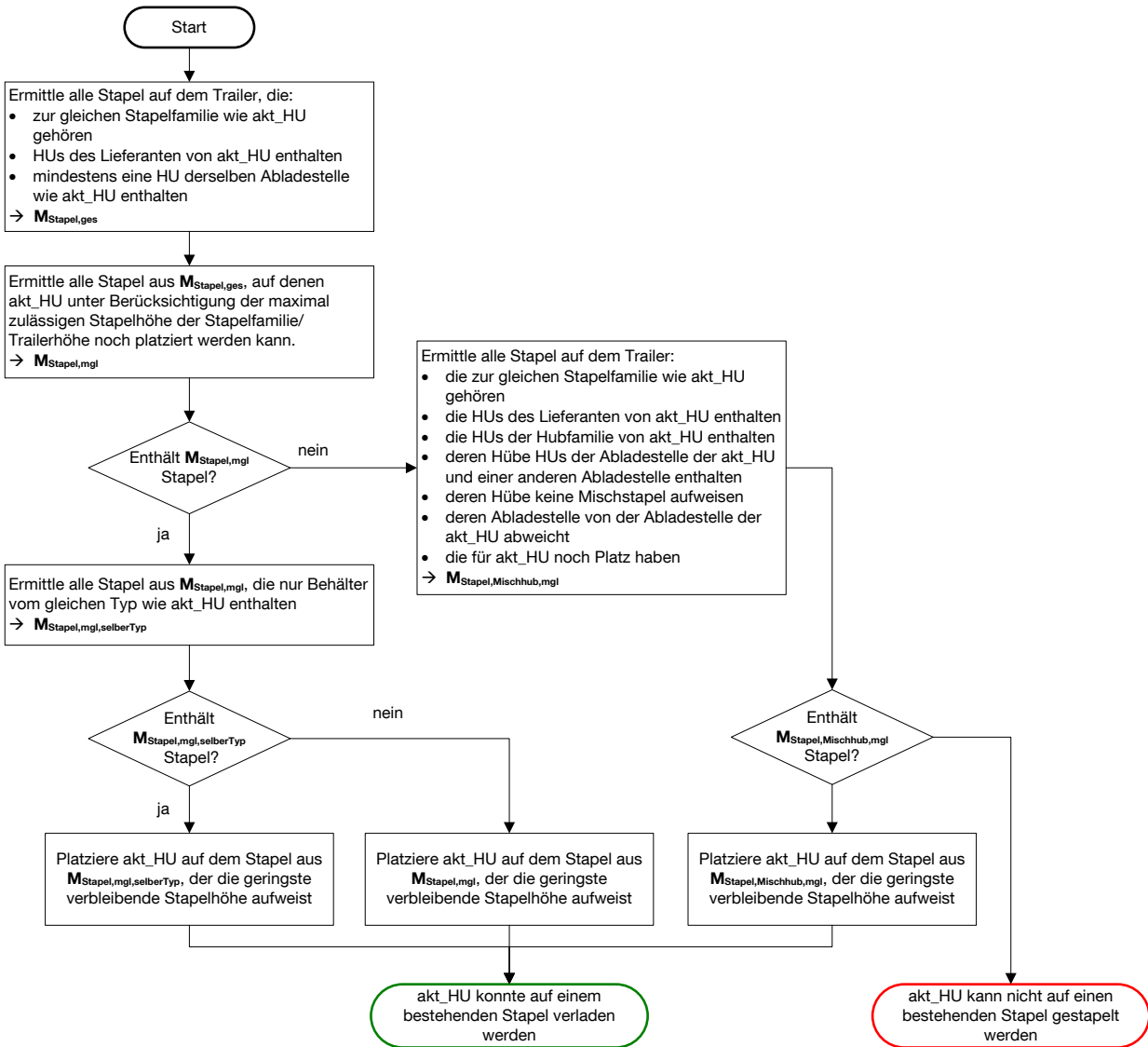


Abbildung 5-14: Algorithmus A1 - Verladung auf bestehenden Stapel

Kann die akt_HU nicht auf einem bestehenden Stapel verstaut werden, wird versucht, durch Neustapelung ausreichend Platz zu schaffen (siehe Abbildung 5-15). Diese erfolgt nur dann, wenn zum einen Stapel mit HUs unterschiedlicher Höhe vorliegen. Zum anderen muss die Summe aller Resthöhen größer oder gleich der Höhe der akt_HU sein (Markierung a in Abbildung). Falls es Stapel mit HUs unterschiedlicher Abladestellen gibt, werden die HUs mit einer anderen Abladestelle als die der akt_HU zu Pseudo-HUs zusammengefasst. Alle HUs inkl. Pseudo-HUs werden entsprechend der BFD-Heuristik nach absteigender Höhe sortiert und neu gestapelt (Markierung b und c in Abbildung). Dabei darf maximal eine Pseudo-HU im Stapel enthalten sein. Stimmt die Anzahl der geschaffenen Stapel mit der ursprünglichen

Anzahl überein, kann die akt_HU platziert werden. Alle Mischstapel werden wieder an den früheren Koordinaten angeordnet, die Pseudo-HUs werden aufgelöst.

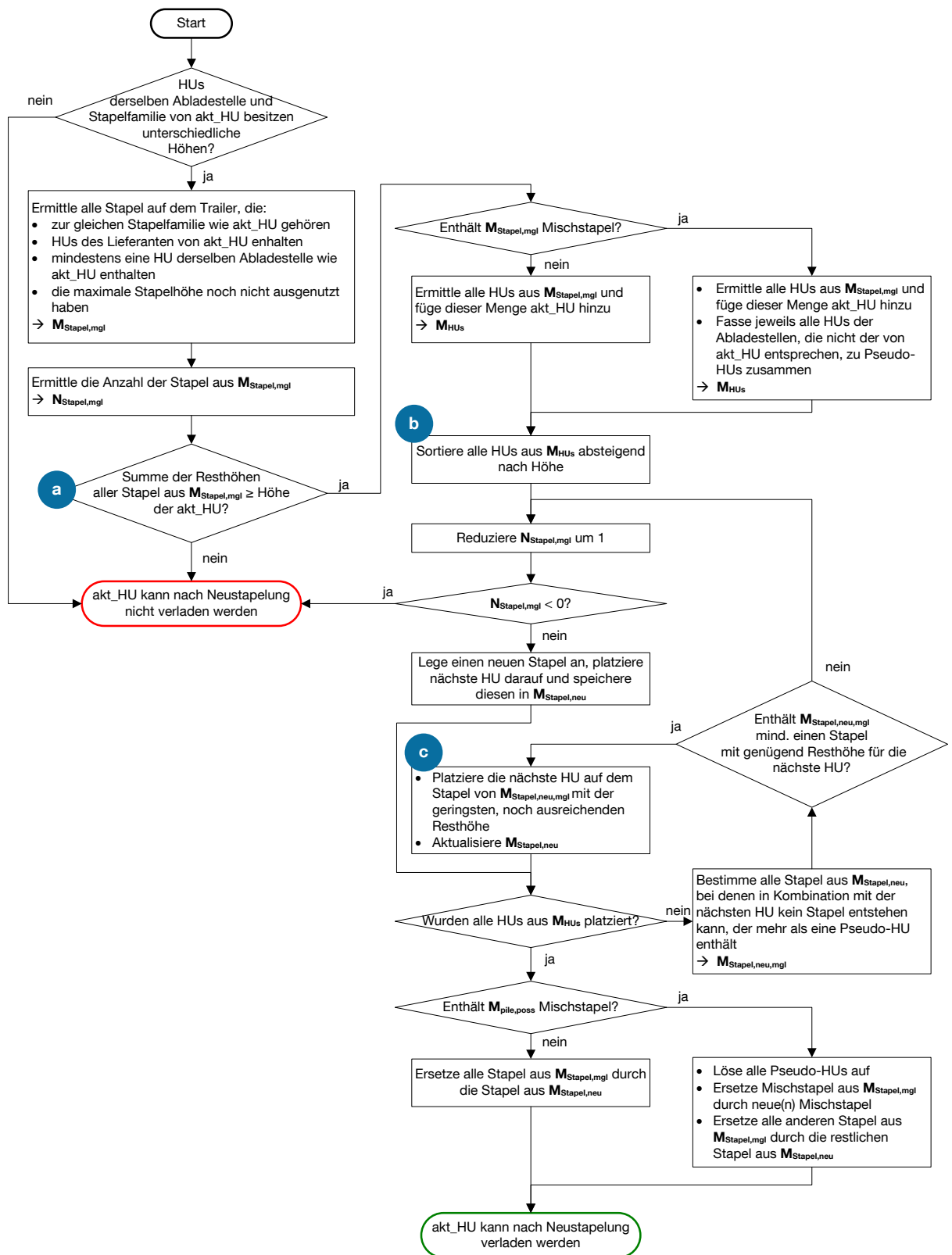


Abbildung 5-15: Algorithmus A2 - Verladung nach Neustapelung

Wenn die akt_HU auch durch eine Neustapelung nicht verladen werden kann, wird mit der akt_HU in einem bestehenden Hub ein neuer Stapel begonnen, sofern ein Hub mit ausreichender Restfläche vorhanden ist (siehe Abbildung 5-16).

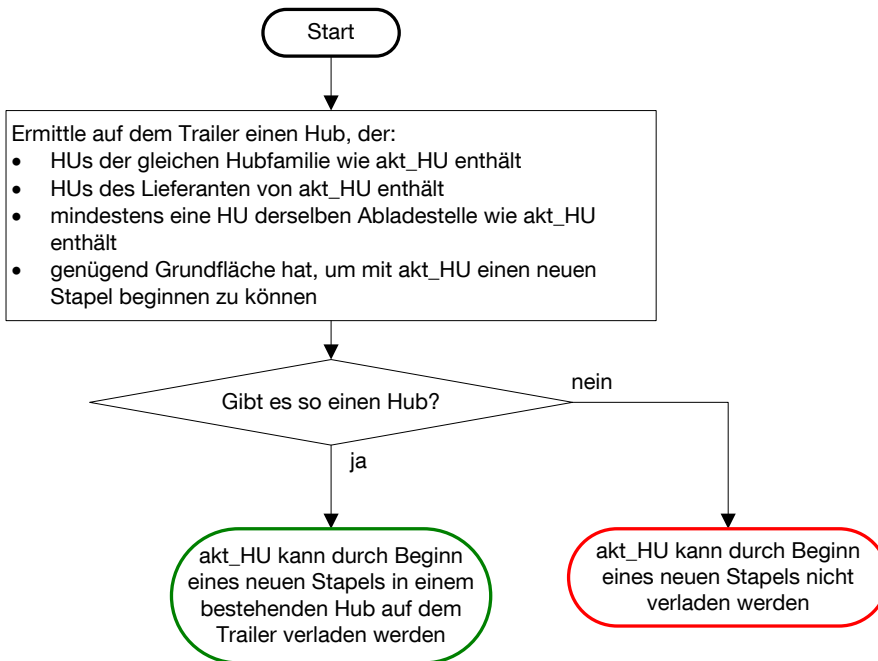


Abbildung 5-16: Algorithmus A3 - Verladung in bestehendem Hub

Kann kein neuer Stapel begonnen, wird versucht, durch Drehung von Stapeln Platz in einem Hub zu schaffen (siehe Abbildung 5-18). Dieser Subalgorithmus wird nur dann ausgeführt, wenn in der Datenbasis die entsprechende Option gesetzt wurde. Dann können aber keine HUs unterschiedlicher Abladestellen mehr zu Mischhüben kombiniert werden. Das liegt darin begründet, dass mit der Durchführung beider Packstrategien das Packschema für den Lieferanten nicht mehr intuitiv reproduzierbar ist. Dies wird am Ende des Abschnitts näher erläutert.

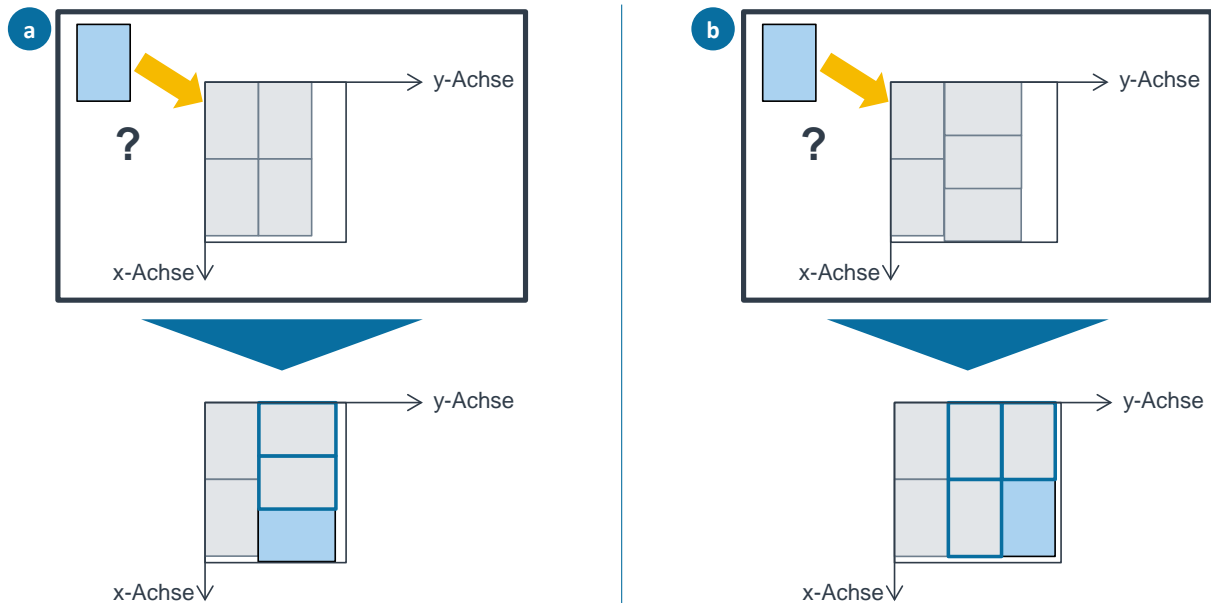


Abbildung 5-17: Veranschaulichung des Algorithmus zur Drehung von Stapeln

Das Drehen von Stapeln kann nur dann ausgeführt werden, wenn drehbare Hübe derselben Hubfamilie, Abladestelle und desselben Lieferanten wie der akt_HU auf dem Trailer vorliegen. Bei der Drehung von Stapeln werden zwei Fälle unterschieden, die in Abbildung 5-17 veranschaulicht sind und Bezug nehmen auf die Markierungen in Abbildung 5-18. Im Fall a liegen alle Stapel in Standardorientierung vor. Dies bedeutet, dass die längere Stapelseite quer zur Fahrtrichtung positioniert ist. Ohne erlaubte Drehung ist das die bevorzugte Orientierung, da zum einen die Stapelzahl je Hub minimal ist und zum anderen die Gesamtanzahl an Hügen im Trailer maximiert wird. Folglich reduziert sich das Risiko, dass HUs übersprungen werden müssen, da kein neuer Hub mehr begonnen werden kann.

Zusätzlich zur Standardorientierung sind alle Hübe vollständig belegt, sodass mit dem Beginn eines neuen Stapels durch die akt_HU ein neuer Hub eröffnet werden müsste. Dies kann vermieden werden, indem Stapel so vieler Hübe um 90 Grad gedreht werden, dass im neu entstandenen Hub gerade noch ausreichend Platz für einen neuen Stapel ist.

Im Fall b liegt bereits ein vollständiger Hub in gedrehter Richtung vor. Dessen Stapel werden gedreht und neu in Hüben angeordnet. Mit der akt_HU wird dann in einem der Hübe ein neuer Stapel begonnen.

In beiden Fällen bewirkt die Drehung, dass die Flächenauslastung in den Hügen höher ist als bei Beibehaltung der bestehenden Anordnung und Start eines neuen

5 Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge

Hubs. Es wird die Beanspruchung der Trailerfläche in Längsrichtung minimiert, so dass für etwaige neue Hübe im Trailer mehr Spielraum bleibt. Zwar muss mit diesem Vorgehen stets mindestens ein Hub in Standardorientierung vollständig ausgefüllt werden. Bei mehr als einem Hub werden die Bestellstufen jedoch feiner, es müssen also nicht mehr Vielfache der Hubmenge abgerufen werden. Bei Hubfamilien mit zwei Stapeln in Standardorientierung und drei Stapeln bei um 90 Grad gedrehter Orientierung z.B. reduziert sich das Transportlos nach dem ersten Hub auf einen Stapel.

Ist auch eine Drehung von Stapeln nicht erfolgreich, um die akt_HU verstauen zu können, bietet sich ein neuer Hub an, sofern die Restlänge des Trailers dies erlaubt (Abbildung 5-19).

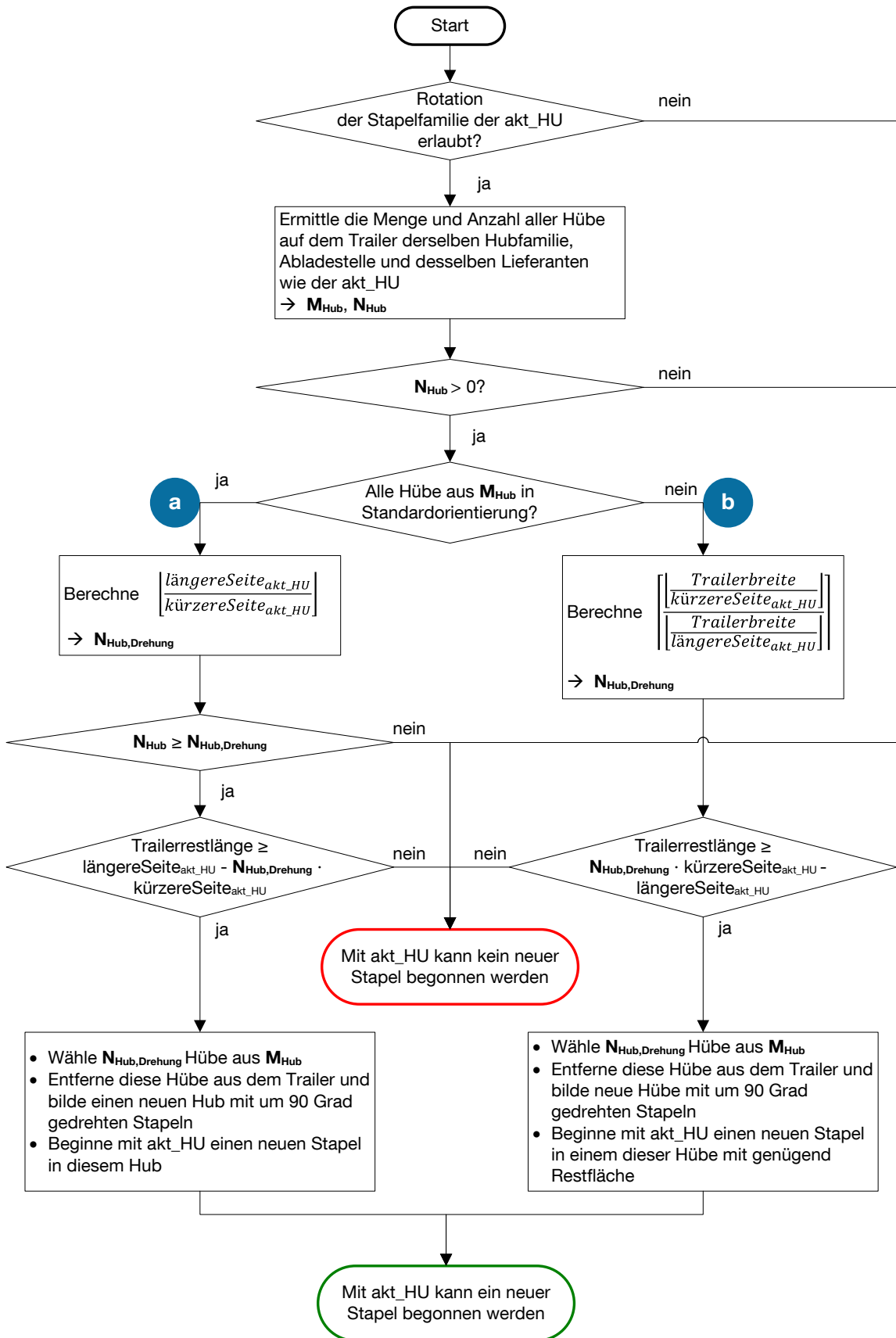


Abbildung 5-18: Algorithmus A4 - Verladung in einem Hub nach Drehung von Stapeln um 90 Grad

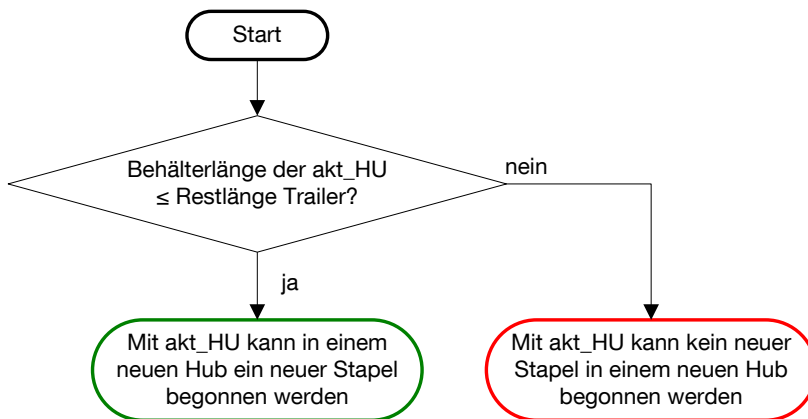


Abbildung 5-19: Algorithmus A5 - Verladung in neuem Hub

Ist die Trailerrestlänge nicht ausreichend, wird versucht, Hübe derselben Hubfamilie und desselben Lieferanten, jedoch unterschiedlicher Abladestelle miteinander zu kombinieren. Hierzu wird zunächst probiert, die akt_HU direkt im Hub einer anderen Abladestelle zu platzieren und damit einen neuen Mischhub zu begründen (siehe Abbildung 5-20). Gibt es Stapel mit ausreichender Kapazität, wird jener mit der geringsten Resthöhe gewählt, um einen Mischstapel zu bilden (Markierung a in Abbildung). Andernfalls wird im abladestellenfremden Hub mit geringster freier Restfläche ein neuer Stapel begonnen (Markierung b in Abbildung). Eine Abladestelle kann nur einmal mit einer vorausgehenden oder nachfolgenden Abladestelle im Mischhub kombiniert werden. Um später eine weitere Mischung zu vermeiden, werden gebildete Kombinationen daher abgespeichert.

Kann die akt_HU nicht direkt eingefügt werden, wird versucht, durch Zusammenlegen von Hübten anderer Abladestellen genug Platz zu schaffen, um mit der akt_HU einen neuen Hub beginnen zu können (siehe Abbildung 5-21). Hierzu werden für alle Lieferanten und Abladestellen alle möglichen Hubkombinationen identifiziert. Eine Hubkombination wird nur dann in Betracht gezogen, wenn die entsprechende Kombination von Abladestellen nicht bereits vorhanden ist.

Im Schritt a (vgl. Abbildung) wird die tatsächliche Mischbarkeit möglicher Hubkombinationen überprüft. Hübe können nur dann miteinander kombiniert werden, wenn ihre aufaddierte Stapelzahl beider Hübe nicht die maximale Hubstapelanzahl übersteigt oder wenn durch Zusammenlegen von zwei Stapeln zu einem Mischstapel die maximale Stapelanzahl erzielt werden kann. Können mehrere Stapel zusammengefasst werden, ist nach dem Best-Fit-Prinzip jene Kombination mit kleinster Resthöhe zu wählen.

Im Schritt b (vgl. Abbildung) werden die möglichen Kombinationen absteigend nach Restvolumen im Mischhub sortiert. Anschließend wird nacheinander das Mischen von Abladestellen hergestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass nach der Kombination alle anderen möglichen Kombinationen gelöscht werden, die dieselbe Mischung von Abladestellen herbeigeführt oder eines der beiden zusammengeführten Hübe ebenfalls zur Hubkombination herangezogen hätten. Die Mischung von Abladestellen wird so lange durchgeführt, bis für einen neuen Hub mit der akt_HU die Restlänge des Trailers ausreicht. Alle Kombinationen werden anschließend wieder gespeichert, um später weitere Kombinationen zu vermeiden.

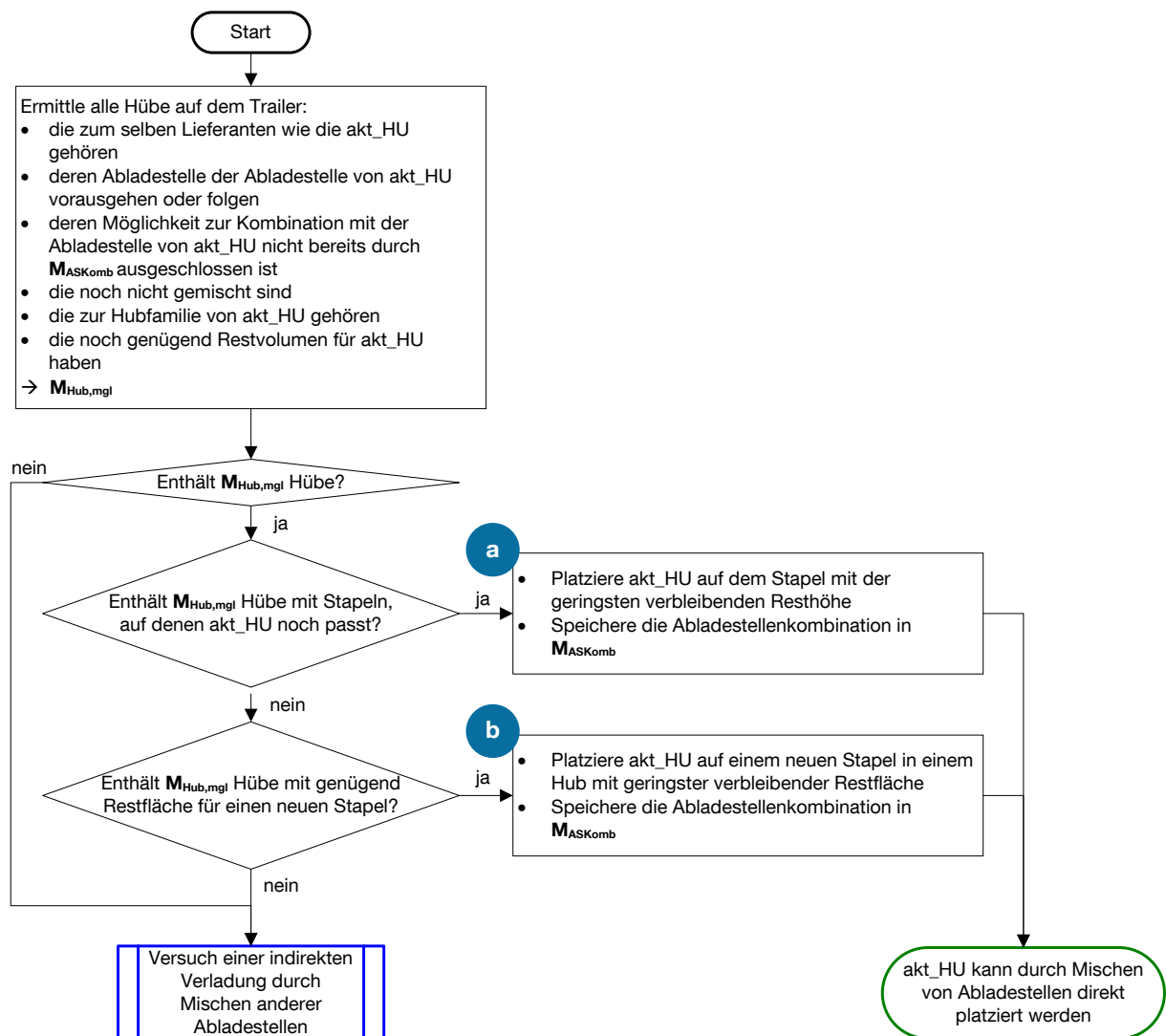


Abbildung 5-20: Algorithmus 6.1 - Direkte Verladung in einem Mischhub

5 Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge

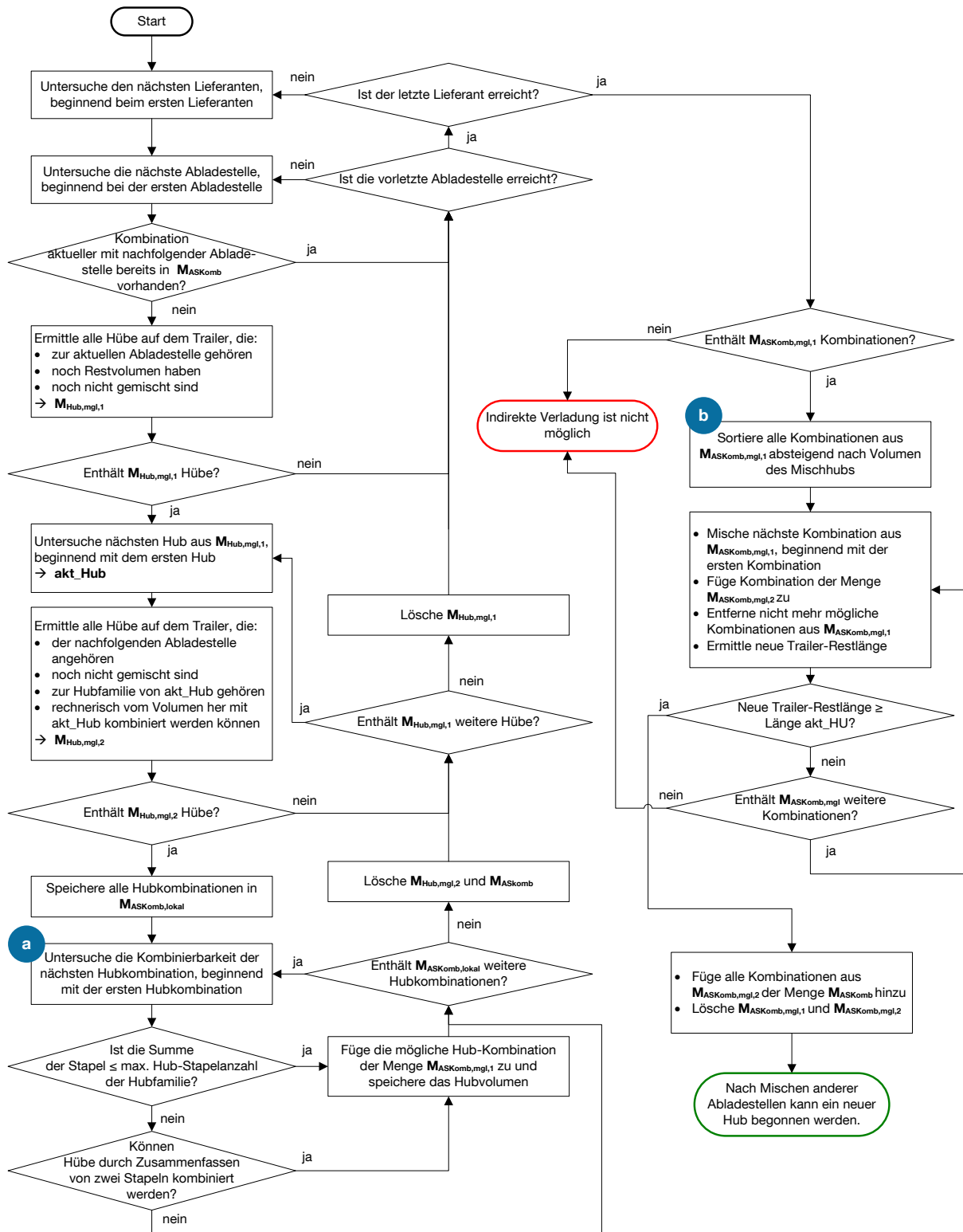


Abbildung 5-21: Algorithmus A6.2 - Indirekte Verladung nach Mischung anderer Abladestellen

Bisher konnten in einem Hub nur HUs derselben Grundfläche und desselben Seitenverhältnisses untergebracht werden, da dies intuitiv ist sowie der Ladungssicherung

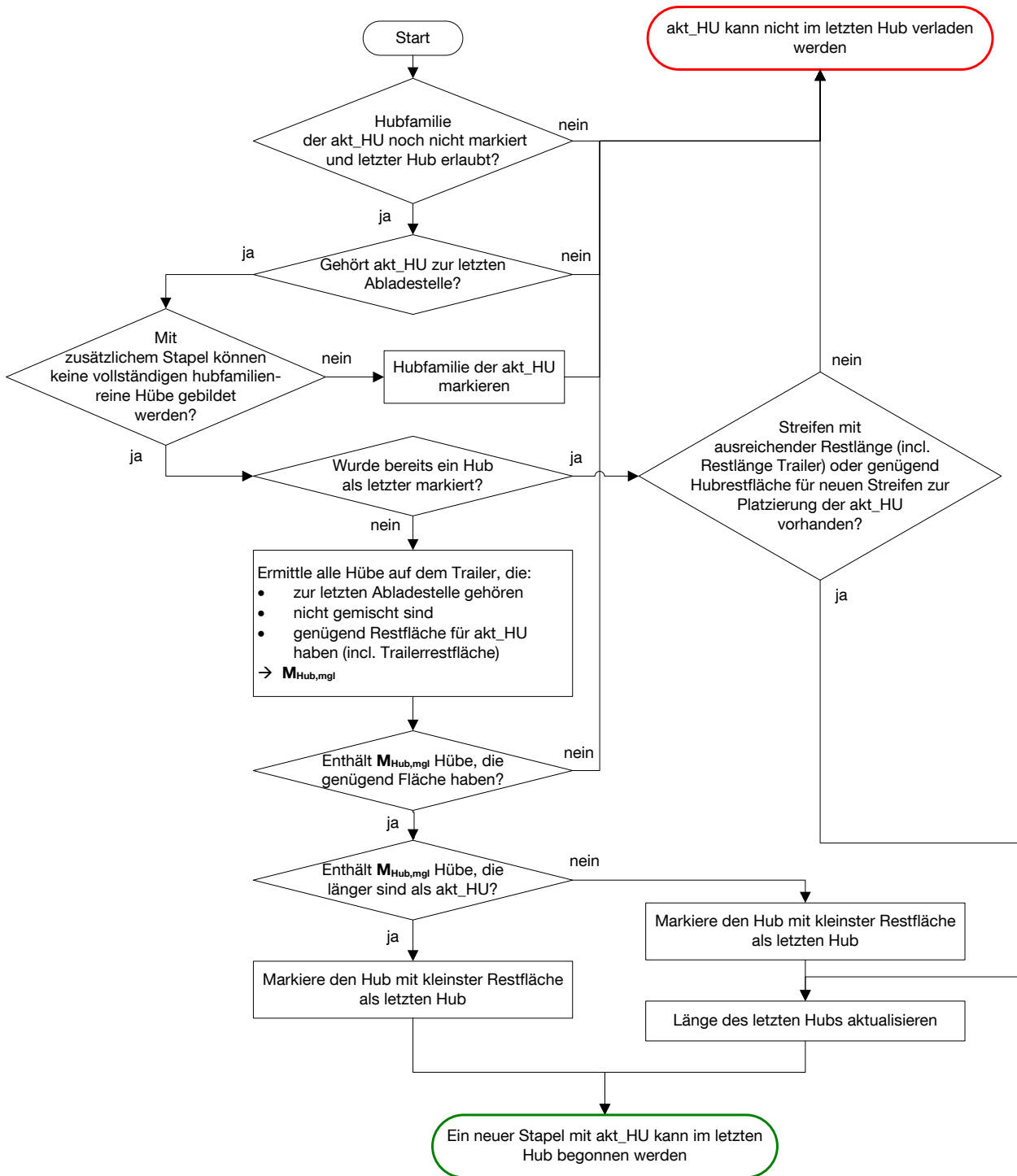


Abbildung 5-23: Algorithmus A7 - Gemischte Hubfamilien im letzten Hub

Algorithmus Langsamdreher

Hauptbestandteil des gesamten Packverfahrens ist der Schnelldreheralgorithmus. Er sollte wenn möglich für alle Bauteile der Transportfamilie durchgeführt werden. Die Strategien zur Reduktion des Transportloses können jedoch nicht immer oder nur beschränkt angewandt werden. Daher wird optional auch ein Langsamdreheralgorithmus bereitgestellt. Er fasst HUs unterschiedlicher Abladestellen und Hubfamilien in einem gemeinsamen Block auf dem Trailer zusammen. Die Abladung kann dann an zentraler Stelle, die Feinverteilung an die Lagerorte z.B. per Routenverkehre erfolgen.

Der Langsamdreheralgorithmus ist zwar einfach gehalten, erreicht jedoch nicht dieselbe Intuitivität wie der Schnelldreheralgorithmus. Infolgedessen braucht der Belader u.U. zur Verstauung aller HUs mehr Ladefläche als systemisch berechnet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird ein Sicherheitsfaktor eingeführt. Um diesen wird die von Langsamdrehern eingenommene Fläche erweitert und steht folglich nicht mehr zur systemischen Verladung von HUs zur Verfügung. Bei der physischen Anordnung der HUs kann der Belader aber auf diese überschüssige Fläche zurückgreifen. Abbildung 5-24 zeigt ein Beispiel mit Sicherheitsfaktor von 10%.

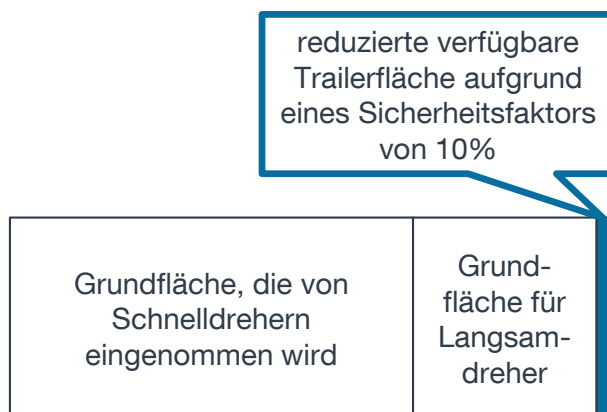


Abbildung 5-24: Reduktion der verfügbaren Trailerfläche durch den Sicherheitsfaktor

Mit dem Langsamläuferalgorithmus wird ein eigener Abschnitt auf dem Trailer begründet. Für einen lückenlosen Anschluss an den Schnelldreherblock kann dabei auf die Mischung von Hubfamilien im letzten Hub verzichtet werden.

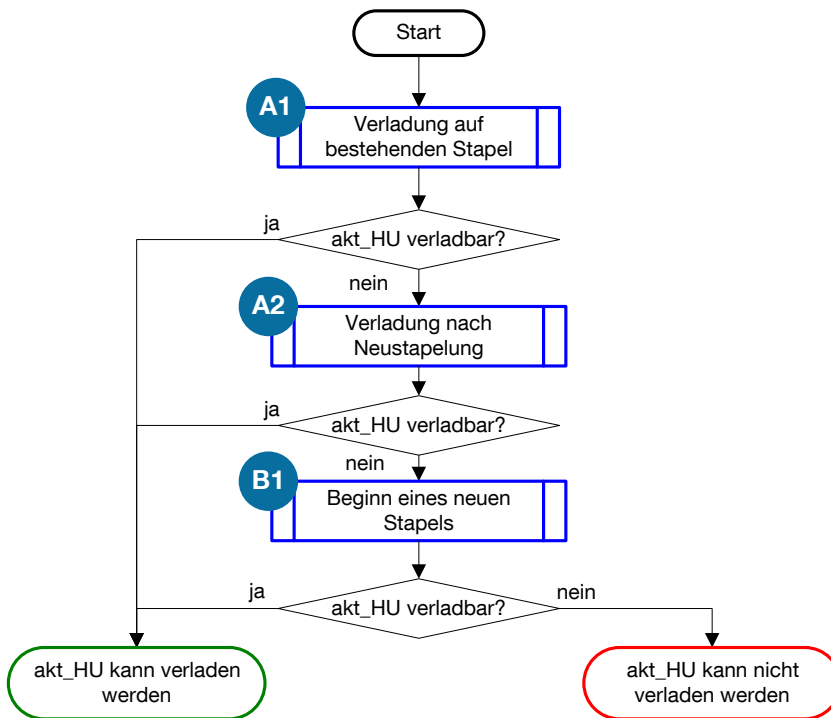


Abbildung 5-25: Algorithmus B - Langsamdreher

Der Gesamtablauf des Algorithmus ist in Abbildung 5-25 dargestellt. Zunächst wird versucht, die akt_HU auf einem bestehenden Stapel anzuordnen. Gelingt dies nicht, werden die Stapel neu gebildet, um evtl. ausreichend Platz zu schaffen. Beide Subalgorithmen gleichen jenen des Schnelldreheralgorithmus. Wenn beides nicht gelingt, muss ein neuer Stapel angelegt werden. Hierfür wurde ein eigenes Verfahren entwickelt, siehe Abbildung 5-26. Abbildung 5-27 zeigt an einem Beispiel die ersten drei Schritte.

Sind bereits Stapel platziert, wird die akt_HU auf diejenige Normalposition in der zweidimensionalen Ladefläche gesetzt, die den geringsten Abstand zur Trailerfront hat. Ändert sich dadurch nichts an der durch Langsamdreher eingenommenen Trailerlänge, kann an dieser Stelle durch die akt_HU ein neuer Stapel begonnen werden (Markierung a in den Abbildungen). Andernfalls ist nicht auszuschließen, dass durch die Neuordnung aller Stapel einschließlich des durch die akt_HU begründeten neuen Stapels eine effizientere Flächenbelegung erreicht werden kann. Hierzu wird ein modifizierter BL-Algorithmus (BL_{MOD}) durchgeführt.

Beim ursprünglichen BL-Algorithmus können Lücken auftreten, die im BLF-Algorithmus gefüllt werden. Für den Belader ist das kaum intuitiv nachvollziehbar. Daher wird der Original-Algorithmus derart angepasst, dass Lücken gar nicht erst

entstehen können. Im ersten Schritte des Algorithmus werden alle Langsamdreher-Stapel zuerst nach Grundfläche und dann nach Differenz zwischen längerer zu kürzerer Seite sortiert (Markierung b in den Abbildungen). Anschließend werden die ersten drei Stapel jeweils auf die vorderste Normalposition gesetzt. Für den dritten Stapel wird untersucht, ob eine Seite die linke Trailerwand berührt. Falls ein Abstand vorhanden ist, muss überprüft werden, ob dieser groß genug ist, um weitere Stapel anzuordnen, ohne dass dabei eine Lücke entsteht. Hierzu wird die maximale Breite aller noch nicht platzierten Stapel ermittelt und der Abstand des Stapels ggf. auf den Wert der maximalen Breite vergrößert. Für alle weiteren Stapel wird analog vorgegangen, bis alle Stapel angeordnet sind (Markierung c in den Abbildungen). Ist die Trailerfläche für den Langsamdreherblock unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors ausreichend, kann mit der akt_HU ein neuer Stapel begonnen werden (Markierung d in Abbildung 5-26). Im Beispiel kann die akt_HU sogar so angeordnet werden, dass die ursprüngliche Länge des Langsamdreherblocks unverändert bleibt. Reicht die Trailerfläche jedoch nicht aus, kann die akt_HU nicht platziert werden.

Prinzipiell ist aufgrund des Formschlusses und der Intuitivität stets der Schnelldreheralgorithmus zu bevorzugen. Liegen jedoch viele Abladestellen und Hubfamilien vor, ist infolge des reduzierten Transportloses eines Stapels die Nutzung des Langsamdreheralgorithmus naheliegend. Hierzu hat aber auch in regelmäßigen zeitlichen Abständen eine Zuordnung der Bauteile zu Schnell- oder Langsamdrehern zu erfolgen. Um den manuellen Aufwand zu reduzieren, sollte das System selbständig Vorschläge für eine Zuordnung generieren. Maßgeblich hierfür ist die durchschnittliche Anzahl an Hüben pro Transport je Abladestelle-Hubfamilie-Kombination. Wird im Schnitt deutlich weniger als ein Hub benötigt, erscheint die Zuordnung zum Langsamdreheralgorithmus ratsam.

5 Integrierte Abruf- und Transportsteuerung für lagerhaltige Teileumfänge

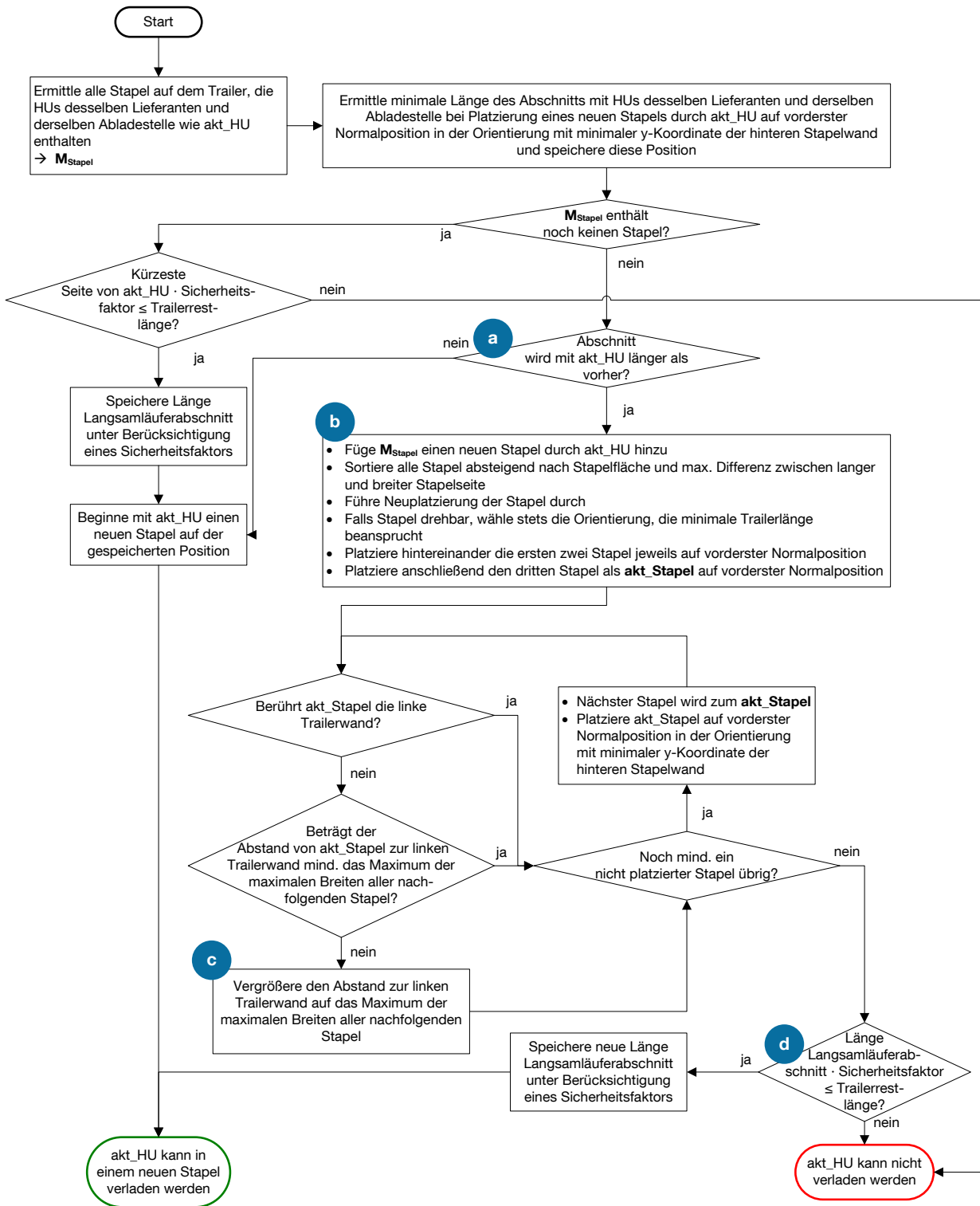


Abbildung 5-26: Algorithmus B1 - Beginn eines neuen Stapels

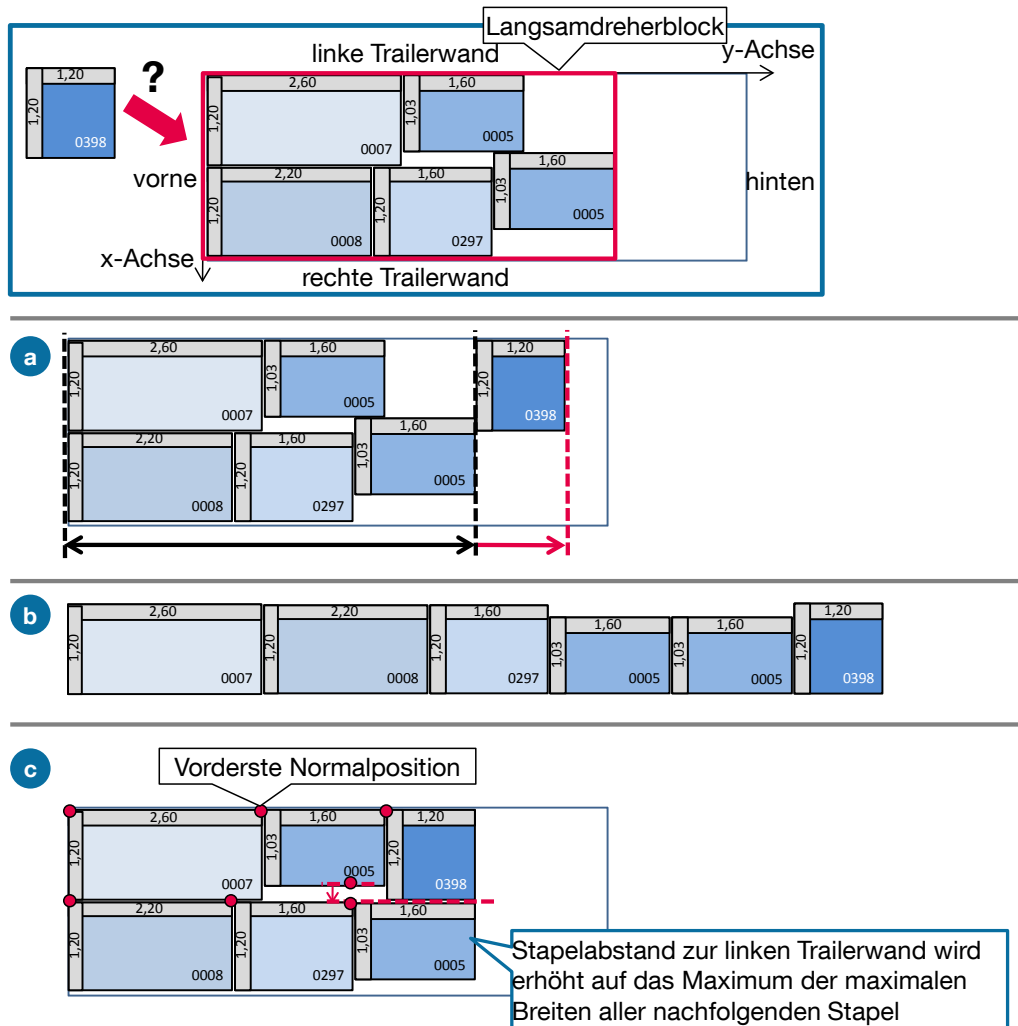


Abbildung 5-27: Verfahren zum Beginn eines neuen Stapels im Langsamdreherblock anhand eines Beispiels

Algorithmus KLTs

Bisher haben sich die vorgestellten Algorithmen auf GLTs bezogen. Handelt es sich um einen KLT, wird ein spezieller KLT-Algorithmus durchlaufen. Hierbei wird zwischen KLTs vom Typ „sortenrein“ und „gemischt“ unterschieden (siehe Abbildung 5-28). Die Subalgorithmen sind nahezu identisch mit denen der KLT-Algorithmen für Teilladungen. Im Gegensatz zu diesen werden KLTs, ggf. einschließlich einer Palette, aber nicht direkt dem Trailer zugeordnet, sondern eine mögliche Platzierung erst über den Schnell- bzw. Langsamdreheralgorithmus überprüft.

Den Ablauf des Algorithmus für KLTs vom Typ „sortenrein“ zeigt Abbildung 5-29. Ist kein angebrochenes Gebinde vorhanden, wird mit der akt_HU zusammen mit einer Palette ein neues Gebinde erzeugt (Markierung i in Abbildung). Anschließend wird

entweder der Schnell- oder Langsamdreheralgorithmus ausgeführt. Gibt es ein angebrochenes Gebinde und ist die Stapelresthöhe groß genug, kann die akt_HU direkt platziert werden (Markierung ii1 in der Abbildung). Andernfalls wird das angebrochene Gebinde mit der akt_HU vereint und versucht, dieses über den Schnell- oder Langsamdreheralgorithmus im Trailer unterzubringen (Markierung ii2 in der Abbildung).

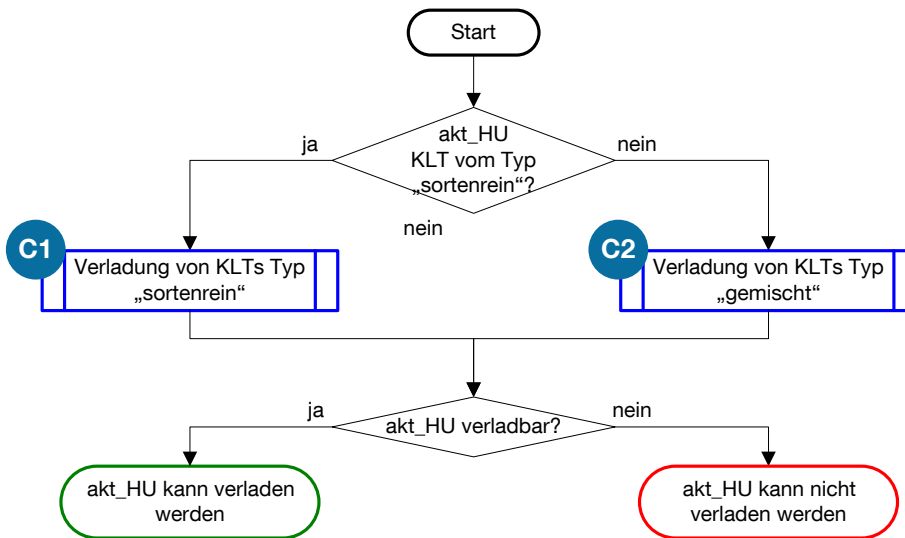


Abbildung 5-28: Algorithmus C - KLTs

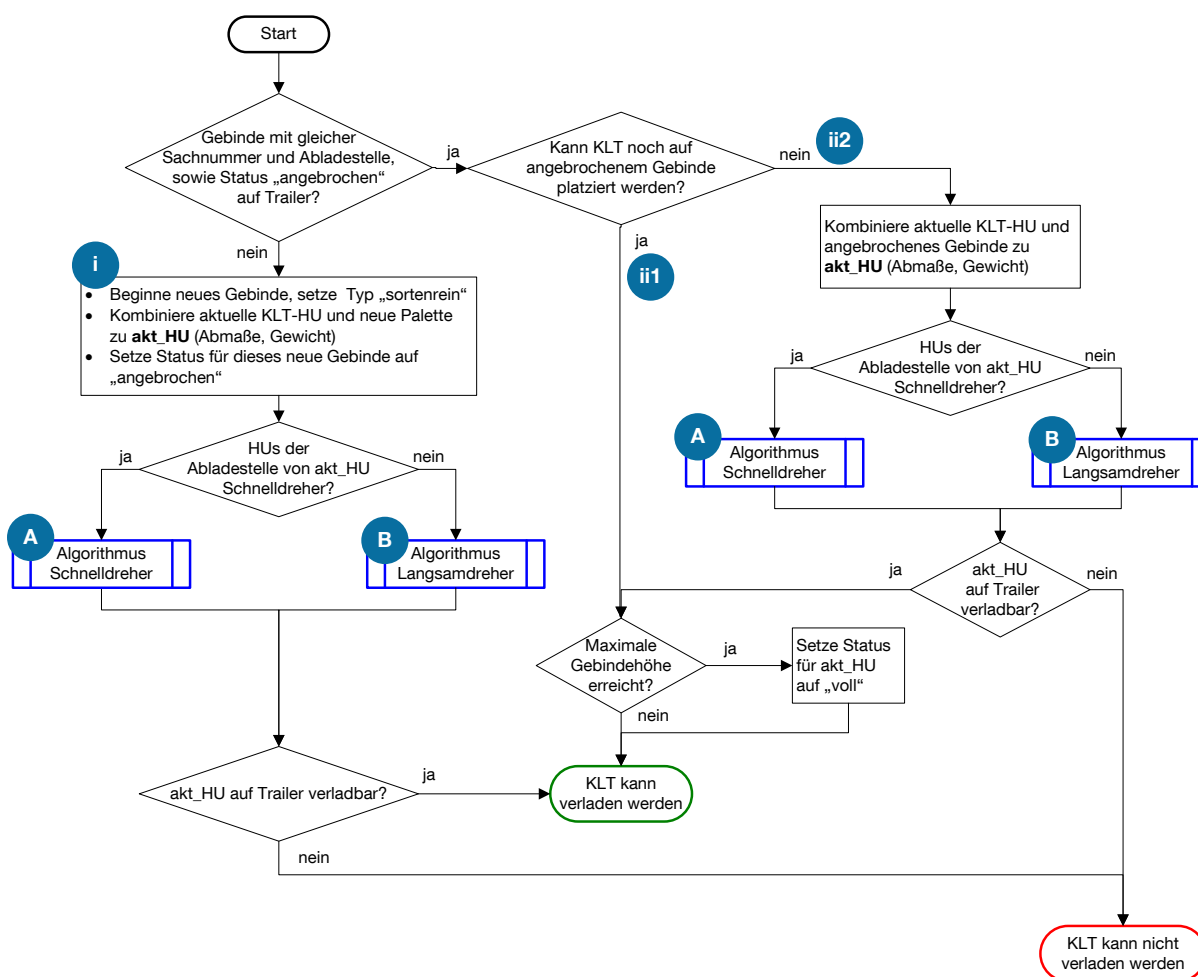


Abbildung 5-29: Algorithmus C1 - KLTs vom Typ „sortenrein“

Den Ablauf für KLTs vom Typ „gemischt“ zeigt Abbildung 5-30. Wenn es noch kein Mischgebände gibt, wird zusammen mit einer Palette ein neues erzeugt (Markierung i in der Abbildung) und anschließend der Schnell- oder Langsamdreheralgorithmus durchlaufen. Andernfalls wird überprüft, ob angebrochene Mischgebände mit Lagen desselben Höhenrasters wie das der akt_HU verfügbar sind, die noch Restfläche haben. Schließlich wird die akt_HU jener Lage mit geringster verbleibender Kapazität zugeordnet (Markierung ii1 in der Abbildung).

Sind keine Lagen mit Restfläche vorhanden, wird entweder direkt eine neue Lage eröffnet (Markierung ii2 in der Abbildung) oder die akt_HU mit bestehenden angebrochenen Mischgebänden kombiniert sowie deren mögliche Verladung über den Schnell- bzw. Langsamdreheralgorithmus überprüft (Markierung ii3 in Abbildung). Sollten die maximale Gebindehöhe erreicht und alle Lagen vollständig ausgefüllt sein, wird der Status des entsprechenden Gebindes auf „voll“ gesetzt.

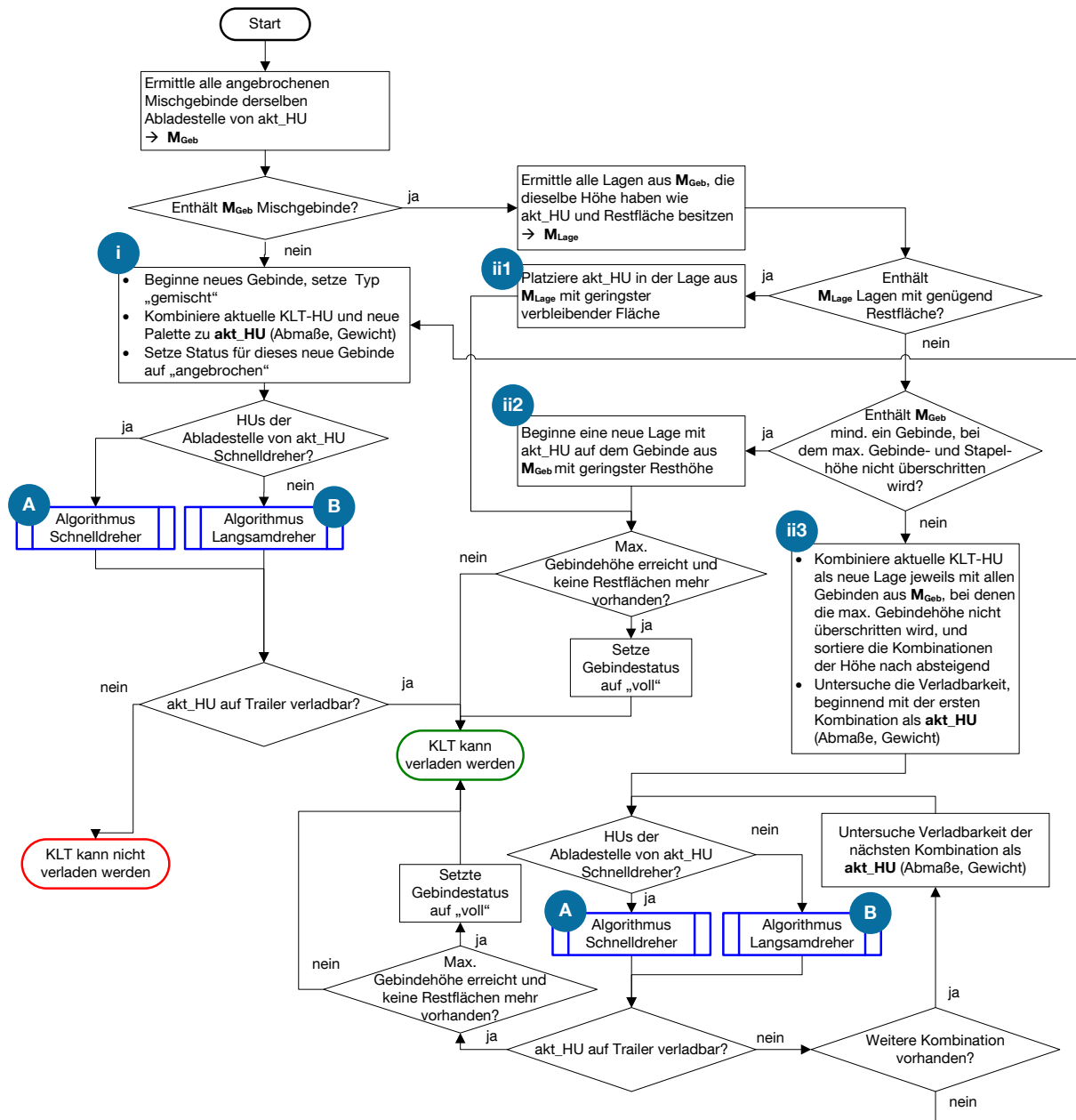


Abbildung 5-30: Algorithmus C2 - KLTs vom Typ „gemischt“

Intuitive Beladeregeln

Abbildung 5-31 zeigt beispielhaft das Ergebnis des Packalgorithmus für einen Trailer mit der Option „Mischen von Abladestellen erlaubt“ für den präferierten Fall, dass alle Teileumfänge als Schnelldreher deklariert sind. Die Reihenfolge der systemisch auf dem Trailer gebildeten Hübe hängt von der HU-Sequenz der HU-Perlenkette ab. In der Regel sind die Hübe noch nicht nach Lieferant, Abladestelle und Hubfamilie sortiert (siehe obere Grafik in der Abbildung). Das Hubprinzip erlaubt jedoch eine beliebige Änderung der Hubreihenfolge, sodass aus dem Rohergebnis das ge-

wünschte Packschema hergestellt werden kann (siehe untere Grafik in der Abbildung).

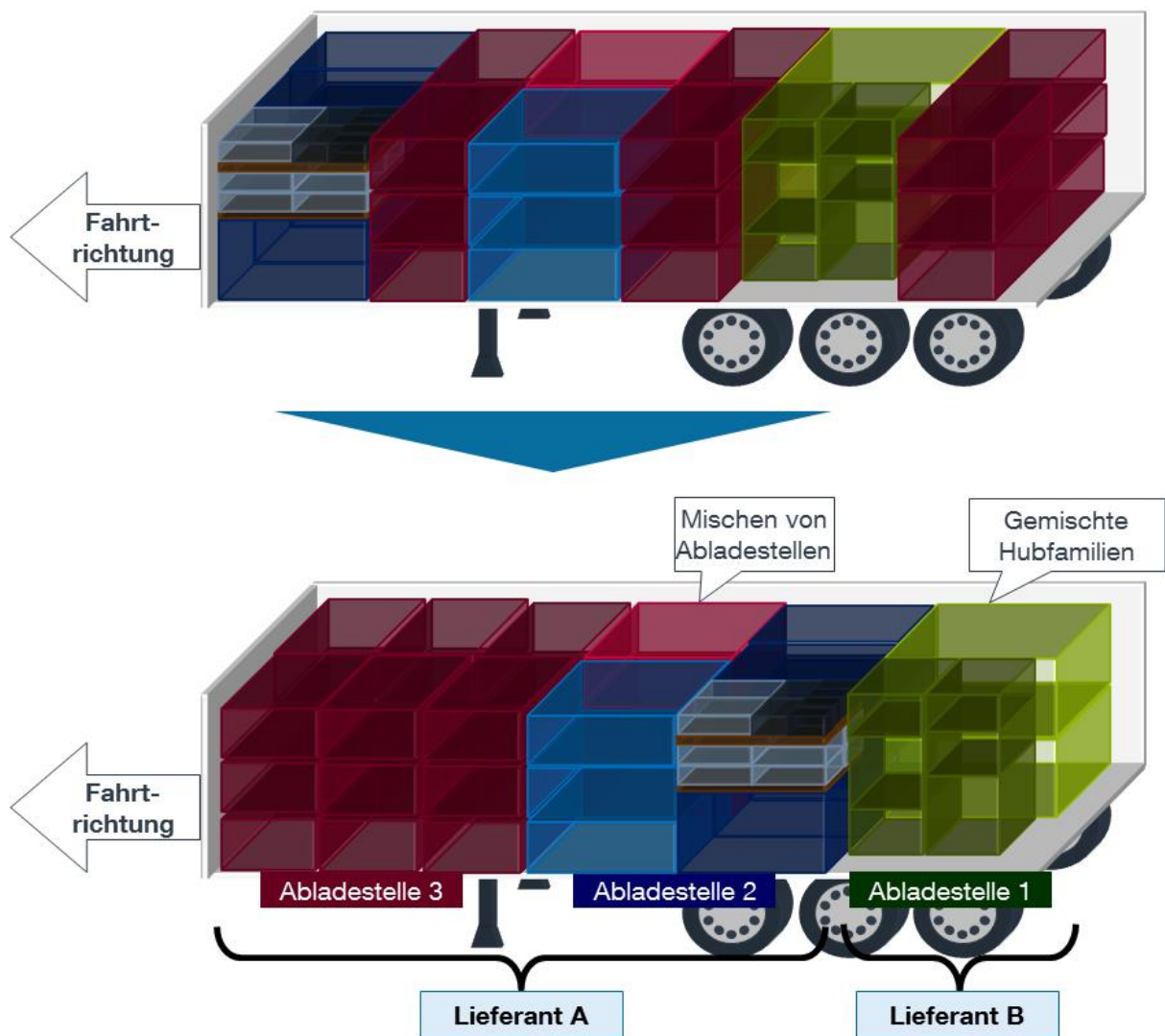


Abbildung 5-31: Vom systemisch generierten Beladeschema zum physisch gewünschten Beladeschema

In dieser Form soll auch der Lieferant den Trailer beladen. Grundsätzlich sind mit diesem zu verwendende HUs, Packlose, die Abladereihenfolge, Stapel- und Hubfamilien sowie maximale Stapelhöhen zu vereinbaren. Mit der Option „Mischen von Abladestellen erlaubt“ können ferner folgende Beladeregeln für alle Lieferanten aufgestellt werden:

1. Für die erste Abladestelle sind Stapel zu erzeugen, welche die maximale Stapelhöhe bzw. maximale Trailerhöhe möglichst optimal ausnutzen. Hierbei sollten idealerweise große identische Behälter als erstes gestapelt werden und die Stapel mit niedrigeren Behältern aufgefüllt werden.

2. Anschließend sind alle vollständigen Hübe der ersten Abladestelle auf dem Trailer zu platzieren. Hierbei ist auf möglichst niedrige Stapelschwerpunkte und eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stapelgewichte auf der Lade-
fläche zu achten. Ggf. sind zum Schluss Stapel eines unvollständigen Hubes beginnend an der linken Trailerwand aufzuladen.
3. Der unvollständige Hub ist ggf. mit HUs der nächsten Abladestelle aufzufüllen.
4. Die Schritte 1 bis 3 wiederholen sich für alle weiteren Abladestellen.
5. Gilt nur für den letzten Lieferanten: Sind für die letzte Abladestelle alle vollständigen Hübe aufgeladen, wird mit allen restlichen Stapeln ein Hub gemischter Hubfamilien gebildet.

Es bleibt anzumerken, dass beim Mischen von Abladestellen Mischhübe stets an den Nahtstellen zwischen Abladestellen zu platzieren sind und folglich die Flexibilität hinsichtlich der Reihenfolge der Hübe auf dem Trailer eingeschränkt ist. Dies erschwert u.U. eine gleichmäßige Gewichtsverteilung auf der Ladefläche.

Mit der Option „Drehen von Stapeln erlaubt“ lauten die Regeln wie folgt:

1. Für jede Abladestelle sind Stapel zu erzeugen, welche die maximale Stapelhöhe bzw. maximale Trailerhöhe möglichst optimal ausnutzen.
2. Anschließend sind für jede Abladestelle-Hubfamilie-Kombination vollständige Hübe in Standardorientierung zu verstauen. Können nicht alle Stapel einer Abladestelle-Hubfamilie-Kombination in Standardorientierung verladen werden, ist ein Hub in gedrehter Orientierung zu bilden. Prinzipiell ist hierbei auf möglichst niedrige Stapelschwerpunkte und eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stapelgewichte auf der Ladefläche zu achten.
3. Gilt nur für den letzten Lieferanten: Sind für die letzte Abladestelle alle vollständigen Hübe aufgeladen, wird mit allen restlichen Stapeln ein Hub gemischter Hubfamilien gebildet.

Die Optionen „Drehen von Stapeln erlaubt“ und „Mischen von Abladestellen erlaubt“ können nicht miteinander kombiniert werden. Liegen bspw. für eine Abladestelle-Hubfamilie-Kombination so viele Stapel vor, dass bei der Bildung von Hüben in Standardorientierung Stapel übrig bleiben, ist nicht mehr eindeutig festgelegt, ob ein gedrehter Hub gebildet oder die übrigen Stapel mit Stapeln einer anderen Abladestelle zu einem Mischhub kombiniert werden sollen. Entscheidet sich der Belader für

die falsche Alternative, wird nicht das gewünschte Beladeschema hergestellt. Es besteht folglich die Gefahr, dass nicht alle Stapel auf dem Trailer Platz finden.

Welche Strategie zu wählen ist, ist abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen zu entscheiden. Das Mischen von Abladestellen ist besonders dann wirksam, wenn viele Abladestellen vorliegen und es zwischen den Abladestellen infolge übereinstimmender Hubfamilien viele Kombinationsmöglichkeiten gibt. Andernfalls ist tendenziell auf das Drehen von Stapeln zurückzugreifen. Exakte Empfehlungen können aber nur auf Basis quantitativer Analysen wie bspw. numerischer Simulationen ausgesprochen werden, siehe hierzu auch Abschnitt 6.2.

Gibt es neben Schnelldreher- auch noch Langsamdreher-HUs, sind für beide HU-Sorten separate Blöcke auf dem Trailer zu belegen. Für Langsamdreher-HUs gelten folgende Beladeregeln:

1. Aus allen Langsamdreher-HUs sind Stapel zu erzeugen, welche die maximale Stapelhöhe bzw. maximale Trailerhöhe möglichst optimal ausnutzen.
2. Die Stapel sind geordnet nach Grundfläche und Seitenverhältnis nacheinander von der linken zur rechten Trailerseite und von vorne bis hinten auf dem Trailer zu verstauen. Bei Stapeln, die nicht direkt an der linken Trailerwand angrenzen, ist darauf zu achten, dass der Abstand zur linken Trailerwand groß genug ist, sodass mit der Platzierung weiterer Stapel möglichst keine Lücken entstehen. Gleichzeitig ist auf möglichst niedrige Stapelschwerpunkte und eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stapelgewichte auf der Ladefläche zu achten. Hierbei muss ggf. von der systemisch vorgesehenen Sortierung der Stapel abgewichen werden.

Das vorausschauende Verladen zur Vermeidung von Lücken sowie die Beachtung einer gleichmäßigen Gewichtsverteilung lassen erwarten, dass das systemisch erzeugte Packschema für Langsamdreher in der Realität häufig nicht reproduziert werden kann und in der Folge u.U. mehr Ladefläche benötigt wird. Durch den Sicherheitsfaktor kann diesem Umstand Rechnung getragen werden.

5.3.5 Fixierungslogik

Die bestehende Fixierungslogik der trailerbasierten Abrufsteuerung sieht eine feste Zahl fixierter und geplanter Trailer vor. Folglich hängt die Reichweite fixierter Trailer von dem gegenwärtigen Bedarfsniveau ab. Niedrige bzw. hohe Bedarfsniveaus wir-

ken sich entsprechend negativ auf die Abrufflexibilität bzw. -stabilität aus. Daher wird von diesem Prinzip abgewichen und stattdessen ein Fixier- sowie Planungshorizont festgelegt. Alle Komplett- bzw. Teilladungen, deren Ankunftszeitpunkte innerhalb des Fixierungshorizonts liegen, werden automatisch fixiert. Alle anderen Abrufmengen sind geplant. Die Anzahl der fixierten und geplanten Bestellmengen passt sich dabei automatisch an das Bedarfsniveau an.

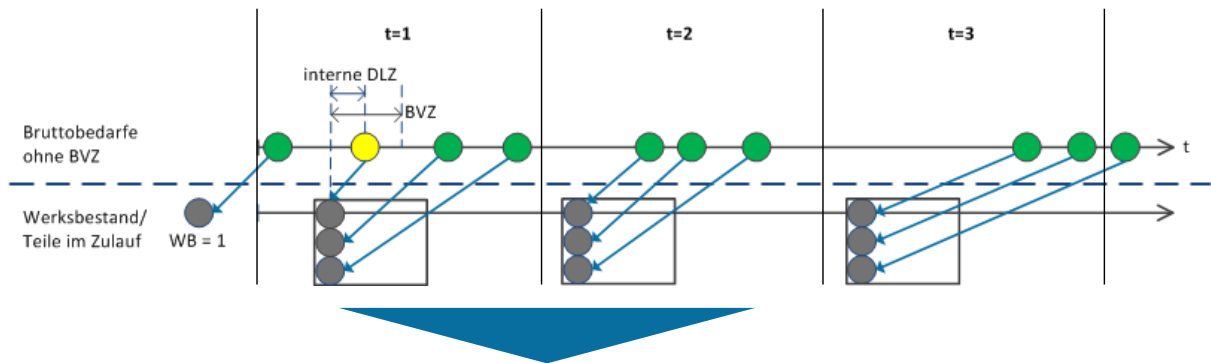
5.4 Lieferüberwachung und manuelle Überplanung

Ergebnis der Nettobedarfs- und Bestellrechnung sind fixierte und geplante Bestellmengen für jedes Bauteil einer Transportfamilie. Als Zeitstempel erhalten alle HUs einer Teil- bzw. Komplettladung den Bedarfszeitpunkt der als erstes benötigten HU. Für den verfügbaren Zeitpunkt der HUs bzw. der darin enthaltenen Bauteile wird noch die interne Durchlaufzeit aufaddiert. Zur Bestimmung der Versorgungssituation werden für alle Bauteile einer Transportfamilie alle Bruttobedarfe ohne Bedarfsvorlaufzeit nacheinander zunächst dem Werksbestand, anschließend fixierten bzw. geplanten Bauteilen sowie ggf. Bauteilen im SB zugeordnet. Hierbei wird jeweils der Bedarfszeitpunkt mit dem Zeitstempel des nächsten, noch nicht zugewiesenen Bauteils abgeglichen. Auf den SB wird, sofern verfügbar, dann zurückgegriffen, wenn das nächste im Zulauf befindliche Bauteil erst nach dem Bedarfszeitpunkt verfügbar ist.

Ist die Differenz aus Zeitstempel und Bedarfszeitpunkt größer gleich der Bedarfsvorlaufzeit, ist die Versorgungssituation völlig unkritisch. Kann die Bedarfsvorlaufzeit nicht eingehalten, die Versorgung aber noch gesichert werden, besteht ein gewisses Risiko. Treffen Bauteile zu spät ein, droht ein Materialabriss.

Grafisch können gedeckte Bedarfe unter Einhaltung der BVZ bspw. grün, gedeckte Bedarfe mit Risiko gelb und nicht gedeckte Bedarfe rot markiert werden. Der Übersichtlichkeit halber bietet es sich an, Versorgungsinformationen anhand zu Tagesmengen zusammengefasster Bedarfe zur Verfügung zu stellen. Abbildung 5-32 zeigt dies anhand eines Beispiels. Eine weitere Aggregation erfolgt auf Transportfamilienebene, auf welcher versorgungskritische Tage farblich hervorgehoben werden. Dadurch ist der Disponent in der Lage, die Versorgungssituation einer Transportfamilie auf einen Blick zu erfassen. Mit einer Detailsicht auf einzelne Tage können

dann alle Bauteile angezeigt werden, die u.U. zu Versorgungsengpässen führen (vgl. Abbildung 5-33).



Bauteilnr.: 4711			
Tag	1	2	3
Bedarf	4	3	2
gedeckt unter Einhaltung der BVZ	3	3	2
gedeckt mit Risiko	1	0	0
nicht gedeckt	0	0	0
angegriffener Sicherheitsbestand	0	0	0
noch frei verfügbarer Sicherheitsbestand	0	0	0

Abbildung 5-32: Tabellarische Darstellung der Versorgungssituation auf Bauteilebene

Transportfamiliennr.: 111				
Tag	1	2	3	...
Versorgungssituation	gedeckt mit Risiko	gedeckt unter Einhaltung der BVZ	gedeckt unter Einhaltung der BVZ	...

Tag 1						
Bauteil	Bedarf	gedeckt unter Einhaltung der BVZ	gedeckt mit Risiko	nicht gedeckt	angegriffener Sich.bestand	noch frei verfügbarer Sicherheitsbestand
4711	4	3	1	0	0	0
4712	4	2	2	0	2	4
...

Abbildung 5-33: Tabellarische Darstellung der Versorgungssituation auf Transportfamilienebene

Die Überprüfung und Visualisierung der Versorgungssituation beruht auf einer Net- tobedarfsrechnung, bei der einzelne Bauteile u.U. bis weit in den Fixierhorizont hin- ein noch vor fixierten Teil- oder Komplettladelungen eingeplant werden, um Versor-

gungslücken zu schließen. Es kann dabei vorkommen, dass zu den Lückenfüllern vorwiegend nach dem Fixierungsraum eingeplante Bauteile hinzugefügt werden müssen, um eine vollständige Bestellmenge zu bilden. Folglich werden nur aufgrund einzelner Bauteile ganze Bestellungen vorgezogen. Dies wirkt sich zum einen negativ auf die Bestandsreichweiten aus. Zum anderen verliert dadurch der Fixierhorizont seinen Zweck der Stabilisierung von Abrufen. U.U. kann der Lieferant dann nicht mehr rechtzeitig die komplette Bestellmenge liefern.

Das Vorziehen von Bestellungen in den fixierten Bereich sollte daher wenn möglich vermieden werden. Hierzu stehen dem Disponenten verschiedene Alternativen zur Verfügung. Anzahl und Bedarfszeitpunkte der Lückenfüller sind ihm aus der Nettobedarfsrechnung bekannt. Er kann sich diese, aufgerundet auf ganze Packlose oder Lieferlose, per Sonderprozess anliefern lassen oder einer früher ankommenden fixierten Bestellung hinzufügen. Bei Komplettladungen muss hierzu jedoch ausreichend Restkapazität im Laderaum vorliegen. Dies kann durch eine künstliche Verkürzung der Trailerladefläche im Packalgorithmus erreicht werden, was sich jedoch negativ auf die Auslastung auswirkt. Anschließend muss die Nettobedarfs- und Bestellrechnung erneut ausgeführt werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, verbindliche Bestellungen zu entfixieren und ebenfalls einen neuen Rechenlauf anzustoßen.

5.5 Abruf- und Lieferkommunikation

Die Kommunikation mit dem Lieferanten besteht typischerweise aus Abrufen hin zum Lieferanten und elektronischen Lieferscheinen an den OEM. Ggf. werden Informationen auch über Webplattformen ausgetauscht. Bei der trailerbasierten Abrufsteuerung beruhen Abrufe auf dem EDIfact-Standard, Lieferscheine auf dem VDA-Standard 4913. Mit dem EDIfact-Abruf können minutengenaue Bedarfsinformationen mit Zuordnung zur Auftragsperle sowie eindeutige Trailernummern übertragen werden. Durch die fein aufgelösten Bedarfe wird eine untertägige Belieferung ermöglicht. Der Fahrzeugauftragsbezug ist zur Sequenzbildung bei JIS-Belieferung notwendig. Mittels Trailernummer kann ein eindeutiger Bezug zwischen Abruf und Lieferung hergestellt werden. Im Lieferschein wird ebenfalls die Trailernummer übertragen. Der Lieferschein wird dann dazu genutzt, den Status des entsprechenden fixierten Trailers von „fixiert“ auf „Transit“ zu setzen und den Trailerinhalt auf Basis der Lieferscheindaten zu aktualisieren. Diese aktualisierten Informationen gehen dann auch direkt in die Nettobedarfsrechnung ein, sodass bereits in der Supply-

Chain Mehr- oder Minderlieferungen registriert werden und darauf reagiert werden kann.

Soll eine Mischbelieferung aus Lager- und JIT/JIS-Teileumfängen realisiert werden, müssen die Abruf- und Lieferprotokolle eine untertägige Belieferung sowie die Übertragung von Sequenzinformationen unterstützen. Es bietet sich daher an, die bestehenden Protokolle der trailerbasierten Abrufsteuerung zu übernehmen. Dann kann auch ein direkter Bezug zwischen Abruf und Lieferung auf Basis einer Trailernummer erfolgen.

Bei einer rein lagerhaltigen Belieferung wird in der Regel tagesgenau z.B. per VDA 4905 abgerufen. Eine Umstellung auf JIT/JIS-Protokolle und die Verarbeitung von einer Teil- oder Komplettlading zugehöriger Nummer können jedoch nicht unerheblichen monetären und zeitlichen Aufwand für die IT-technische Anbindung der Lieferanten nach sich ziehen. Wenn auf eine untertägige Belieferung verzichtet werden kann, kann auch mit tagesgenauen Abrufen ohne Nummer indirekt ein Bezug zwischen Bestellung und Lieferung hergestellt werden, indem ein Abgleich anhand des Liefertermins erfolgt. Stimmt der Liefertermin mit keinem Abruftermin überein, wird die Lieferung der ersten, noch nicht mit Status „Transit“ versehenen Bestellung zugeordnet. Dies kann nur dann automatisch erfolgen, wenn die Reihenfolge der Lieferungen eingehalten wird und keine zwei Lieferungen für denselben Tag bestimmt sind. Andernfalls muss der Lieferant den Statuswechsel und Inhaltsabgleich manuell vornehmen. Hierzu können ihm bspw. entsprechende Funktionen auf einer Webplattform zur Verfügung gestellt werden (vgl. [fml-12f]). Bei einer zu hohen Frequenz, bei der häufig eine mehrfache Anlieferung pro Tag erwartet wird, ist jedoch die Nutzung von JIT/JIS-Protokollen anzuraten.

5.6 Erweiterungen zur Steuerung von Milkruns

Bei Milkruns sollen Abholzeitpunkte und Lademetergrenzen kommuniziert werden können. Zudem soll der Milkrunprozess vollständig abgebildet werden können, was auch die Rückführung von Leergut beinhaltet. Hierzu wird die Nutzung einer Webplattform vorgeschlagen.

5.6.1 Kommunikation von Abholzeiten

Zur Kommunikation von Abholzeiten und Lademetergrenzen je Lieferant bietet sich eine Übersicht über alle Trailernummern einer Transportfamilie an, siehe Tabelle 5-1. Sie zeigt den exakten Ankunftszeitpunkt an, der manuell oder automatisiert korrigiert werden kann. Je Lieferant sind die geplanten Abholzeiten sowie Lademetergrenzen einzutragen. Die Festlegung der Abholzeiten kann ebenfalls manuell oder automatisiert erfolgen.

Tabelle 5-1: Beispielhafte Übersicht über alle Ankunfts- und Abholzeiten einer Transportfamilie (in Anlehnung an [fml-12f])

Transportfamilie: 111										
Trailer-Nummer	Ankunftszeit		Lieferant N				Lieferant 1			
	korrigiert	exakt	Abholzeit geplant	Status	Lademeteter	...	Abholzeit geplant	Status	...	
...
4711	16.03.2013 – 10:00	16.03.2013 – 13:27	15.03.2013 – 17:00	fixiert	4,5	...	15.03.2013 – 13:00	Transit	...	...
...

Zur manuellen Milkrunterminierung kommen der OEM, einer der Lieferanten oder der Spediteur infrage. Zur Bestimmung von Abholzeiten erscheint insbesondere der Spediteur geeignet, da dieser den Transport plant und durchführt. Eine Änderung der Ankunftszeit sollte dagegen der OEM vornehmen. Wer welche Einträge vornehmen kann und für wen welche Informationen sichtbar sind, kann über Rollenprofile festgelegt werden. Hierfür ist systemseitig eine entsprechende Maske bereitzustellen. Ggf. kann auch mehr als eine Partei dazu befugt werden, Termine manuell zu ändern.

Trailer-Nummer 4711

Kommentar	Ankunftszeit	Abholzeit Lieferant N	...	Abholzeit Lieferant 1
Eingabe	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*

Terminierung
annehmen

Historie

Änderungsdatum	Verantwortliche Partei	Kommentar	Ankunftszeit	Abholzeit Lieferant N	...	Abholzeit Lieferant 1
11.3.2013 – 14:37	Spediteur	...	16.03.2013 – 08:00	15.03.2013 – 11:00	...	15.03.2013 – 09:00
10.03.2013 – 07:33	OEM	...	16.03.2013 – 08:00	15.03.2013 – 13:00	...	15.03.2013 – 11:00
...

Abbildung 5-34: Manuelle Milkrunterminierung je Trailer-Nummer (in Anlehnung an [fml-12f])

Für die Festlegung von Ankunfts- und Abholzeiten eines bestimmten Milkruns ist eine weitere Maske vorgesehen, siehe Abbildung 5-34. Hierin können Ankunftszeit und Abholzeiten überschrieben werden und die neue Terminierung mit einem Kommentar versehen werden. Zur Erhöhung der Transparenz wird jede Änderung in einer Historie abgespeichert, wobei die letzte Änderung ganz oben erscheint. Alle Parteien sind über die neuen Zeiten zu informieren. Hierzu kann eine Informationsmail dienen, die bspw. mit Klick auf den Button „Terminierung annehmen“ versandt wird.

Tabelle 5-2: Angabe des zeitlichen Offsets von Abholzeiten zu Ankunftszeiten (in Anlehnung an [fmi-12f])

Transportfamilie: 111						
Ankunftstag	Ankunftszeit	Lieferant N		...	Lieferant 1	
		Offset Kalendertage	Abholzeit	...	Offset Kalendertage	Abholzeit
Mo	9:00	-2	12:00	...	...	...
Mi	9:00	-1	16:00	...	...	...
...

Eine automatische Terminierung von Milkruns kann auf Basis einer Tabelle erfolgen, in der zeitliche Abstände zwischen möglichen Ankunftstagen/-zeiten und Abholtagen/-zeiten angegeben sind, siehe das Beispiel in Tabelle 5-2.

5.6.2 Leergutintegration

Prinzipiell birgt die Einbindung von Leergut in die Milkrunbelieferung Einsparpotenzial, da die Lieferanten zum Ab- und Beladen von Leer- bzw. Vollgut im Gegensatz zu einem separaten Prozess nur einmal angefahren werden müssen. Nachfolgend werden zunächst allgemeine Ausprägungen der Leergutrückführung und dann grundsätzliche Alternativen zur Integration in Milkruns aufgezeigt (siehe [Con-2012a]). Anschließend wird beschrieben, wie der präferierte Prozess systemseitig unterstützt werden kann.

In der Automobilindustrie haben sich insbesondere zwei Arten der Leergutrückführung etabliert. Beim JIT/JIS-Prozess mit einem oder mehreren nah beieinander gelegenen Verbauorten wird Leergut im OEM-Werk meist dezentral gesammelt und im geschlossenen Behälterkreislauf gegen Vollgut im Verhältnis 1 zu 1 (Behälter nicht klappbar) oder 1 zu n (Behälter klappbar) getauscht. Beim lagerhaltigen Prozess mit einer oder mehreren Abladestellen liegt dagegen in der Regel ein zentraler Behälterpuffer vor, aus dem der Lieferant in einem zur Vollgutbelieferung separaten Prozess

mit Leergut versorgt wird. Während im JIT/JIS-Prozess die Zusammensetzung des Leerguttrailers aus historischen Verbräuchen resultiert, können im lagerhaltigen Prozess Leerguttrailer nach dem zukünftigen Behälterbedarf zusammengestellt werden.

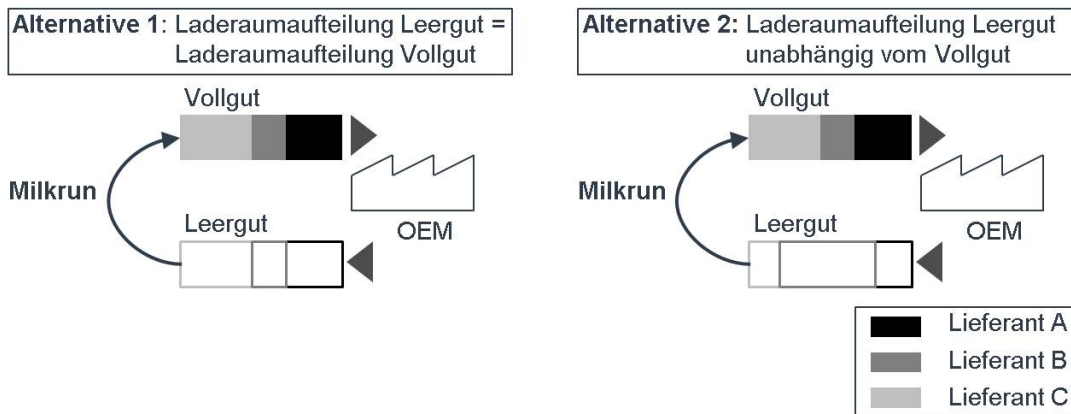


Abbildung 5-35: Alternative Möglichkeiten zur Leergutrückführung bei Milkruns [Con-2012a]

Bei Milkruns mit integrierter Leergutrückführung beginnt der Gesamtprozess im OEM-Werk. Nicht beim OEM, sondern bei den Lieferanten werden leere HUs gegen volle HUs ausgetauscht. Hierbei muss beachtet werden, dass die Vollgut-Laderaumaufteilung nach Lieferanten bei durch eine Mengensteuerung generierten Milkruns in der Regel aufgrund schwankender Abrufmengen variiert. Wenn also die gewünschte Abholreihenfolge eingehalten werden soll, muss für den Leerguttrailer stets dieselbe Laderaumaufteilung wie für den Vollguttrailer hergestellt werden. Für diese Variante der Leergutrückführung ist ein entsprechender Behältervorrat notwendig. Als Alternative wird eine Leergut-Laderaumaufteilung unabhängig vom Vollgut erzeugt, die sich am zukünftigen Behälterbedarf der Lieferanten richtet. Die Folgen verdeutlicht Abbildung 5-35 an einem Beispiel. Die hinsichtlich der gesamten Transportstrecke optimale Reihenfolge sei Lieferant A vor B vor C. Lieferant A kann jedoch nicht als erstes angefahren werden, da durch Abladen des für Lieferant A bestimmten Leerguts nicht ausreichend Platz zur Beladung seines Vollguts geschaffen wird. Stattdessen muss eine bezüglich der Gesamtstrecke ungünstige alternative Route gewählt werden. Da die Transportkosten einerseits Hauptkostentreiber der Logistik sind und andererseits maßgeblich von der Fahrtstrecke abhängen, wird bei Alternative 2 u.U. der monetäre Vorteil eines Milkruns aufgezehrt. Zudem ist ein erhöhter Aufwand zur Milkrunterminierung zu erwarten.

Alternative 1 erweist sich insbesondere dann als kritisch, wenn an einer dezentralen, produktionsnahen Leergutpufferung festgehalten werden soll, da hier häufig be-

grenzte Platzverhältnisse vorherrschen. Zudem ist der Prozess risikoanfällig, da bei kleinen Abweichungen von der erforderlichen Laderaumaufteilung u.U. die gewünschte Abholreihenfolge nicht mehr gewährleistet werden kann.

Vor diesem Hintergrund lässt sich konstatieren, dass die Einbindung des Leergutprozesses in einen per Mengensteuerung generierten Milkrun mit nicht unerheblichen prozessualen wie auch monetären Unwägbarkeiten verbunden ist. Soll Leergut dennoch integriert werden, ist Alternative 1 zu präferieren, da an der gewünschten Abholreihenfolge festgehalten werden kann. In diesem Fall ist der Zeitpunkt für den Start der Milkrontour beim OEM ebenfalls manuell oder automatisiert zu terminieren. Systemisch zur Verfügung stehende Masken sind entsprechend um die Spalte „OEM“ zu erweitern. Zudem ist eine weitere Maske bereitzustellen, in welcher Lieferanten ihr Leergut selber zusammenstellen können, bis die mit dem Vollgut übereinstimmende Lademetergrenze erreicht ist. Das Packschema kann bspw. nach dem Schnelldreher-Algorithmus erzeugt werden, wobei Vollgutabladestellen nicht berücksichtigt werden und alle Leer-HUs nach Hubfamilie und Höhe sortiert werden.

Trailer-Nummer: 111, Lieferant A							
HU	Länge/ Breite/ Höhe	Anzahl HUs je Stapel	Anzahl HUs je Hub	Hub- familie	max. Höhe Hubfamilie	Anzahl Stapel je Hub	Anzahl HUs
4711	0,80/ 1,20/ 1,00	3	6	100	3,00	3	*Eingabe*
4712	...	...	...	...	...	...	...
...
Andere	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*	*Eingabe*

Hinzugefügte HUs	
HU	Anzahl
4711	12
4712	...
...	...

Infos Hubfamilien		
Hubfamilie	Summe Resthöhen	freie Stapel
100	0	0
...
...

freie Lademeter	4,5
--------------------	------------

HUs
hinzufügen

HUs
löschen

Packschema
erzeugen

verbindlich
buchen

Abbildung 5-36: Eingabemaske zur Buchung von Leergut

Eine beispielhafte Maske zur Buchung von Leergut zeigt Abbildung 5-36. Alle in der Datenbank hinterlegten HUs des Lieferanten sowie relevante Informationen zur HU und der zugehörigen Hubfamilie werden automatisch gezogen und angezeigt. Der Lieferant kann eine bestimmte Anzahl an HUs eintragen, die zum Leergut hinzugefügt oder entfernt werden sollen. Hierbei muss das System mit den Leergutbeständen des OEM synchronisiert sein, da nicht mehr HUs als vorhanden gebucht werden

dürfen. Alle hinzugefügten HUs werden in einer separaten Tabelle aufgeführt. Mit der Erzeugung eines Packschemas wird dem Lieferanten die Information bereitgestellt, wie viele freie Lademetre, wie viel Restkapazität auf allen Stapeln einer Hubfamilie und wie viele freie Stapel in begonnenen Hubs noch zur Verfügung stehen. Mit dem Button „verbindlich buchen“ wird der Buchungsvorgang abgeschlossen.

5.7 Werksinterne Prozesse

Mit dem entwickelten Konzept können erstmalig JIT/JIS-Teileumfänge mit lagerhaltigen Teileumfängen gemeinsam abgerufen und angeliefert werden. Da sich deren Abladekonzepte unterscheiden, müssen praktikable Kombinationsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Des Weiteren ist ein Prozess zu entwerfen, der den Aufwand zur Bestandsführung und -kontrolle als wesentlichen Makel einer bedarfsgesteuerten Disposition begrenzt hält.

5.7.1 Abladekonzept

Bei der lagerhaltigen Belieferung werden die Zulieferteile im Werk entweder zentral abgeladen und dann an die entsprechenden Lagerorte z.B. per Routenzug feinverteilt, oder sie werden direkt dezentral den korrespondierenden Lagerorten zugeführt. Bei JIT/JIS erfolgt die Versorgung der Verbrauchsorte über einen Warehouse-on-Wheels- (Traileryard-Trailerdock oder nur Trailerdock) oder Footprint-Prozess.

Besteht eine Transportfamilie, die über die neu entwickelte Steuerung disponiert wird, ausschließlich aus Lagerteilen, kann an bestehenden Abladeprozessen festgehalten werden. Sollen aber unterschiedliche JIT/JIS-Abladekonzepte oder JIT/JIS-mit lagerhaltigen Abladekonzepten kombiniert werden, muss eine praktikable Reihenfolge gefunden werden. Hierzu wird zwischen allen möglichen Abladekonzepten eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung hergestellt und bewertet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-37 dargestellt. Grüne Felder stellen erlaubte, rote nicht erlaubte Beziehungen dar.

Nachfolger Vorgänger	Lager zentral/dezentral	Footprint	Warehouse-on- Wheels
Lager zentral/dezentral			
Footprint			
Warehouse-on- Wheels			

Abbildung 5-37: Bewertung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen von Abladekonzepten (in Anlehnung an [fml-12f])

Wie bereits erwähnt, kann das zentrale oder dezentrale Abladen in beliebiger Reihenfolge erfolgen. Der Abladeprozess bei einem Footprint verhält sich nicht anders als bei einem Lager. Daher können Footprints einer zentralen oder dezentralen Entnahme von Lagerteilen folgen und umgekehrt. Da Footprints aber Bestandteil meist eng getakteter, zeitlich kritischer JIT/JIS-Belieferungsprozesse sind, sollten diese idealerweise zentralen oder dezentralen Lagerabladestellen vorausgehen, um etwaige Verzögerungen zu vermeiden.

Ein Warehouse-on-Wheels-Prozess kann sowohl Footprints als auch zentralen/dezentralen Lagerabladestellen folgen. Er sollte jedoch stets das letzte Glied des gesamten Abladeprozesses darstellen. Beim Warehouse-on-Wheels-Prinzip fungiert der Trailer als rollendes Lager. Die Teile werden peu à peu nach Bedarf und nicht in einem Schritt vom Trailer entnommen. Die interne Durchlaufzeit des Warehouse-on-Wheels-Prozesses kann aufgrund schwankender Bedarfsraten stark variieren, in jedem Fall aber übertrifft sie den Zeitaufwand für das Abladen auf zentralen/dezentralen Lagerpuffern bzw. Footprints. Sie stellt damit eine unkalkulierbare Größe dar, um welche die Vorlaufzeit nachfolgender Footprint- oder Lagerteile erhöht werden müsste. Gleiches gilt für den Fall, dass ein Warehouse-on-Wheels-Prozess auf einen anderen Warehouse-on-Wheels-Prozess folgt (vgl. hierzu auch [fml-12f]). Aus demselben Grund sollte aber auch nur eine begrenzte Zahl an Lagerabladestellen einem Warehouse-on-Wheels-Prozess vorausgehen.

5.7.2 Bestandsführung und -kontrolle

Das entwickelte Konzept fußt auf einer Bedarfssteuerung, die wiederum auf systemisch geführten Beständen beruht. Materialzugänge werden auf Basis von Lieferscheinen und ggf. Wareneingangskontrollen erfasst. Auf der Grundlage von Fahr-

zeugaufträgen, Montagetakten und Stücklisten oder per Scan von Leerbehältern werden Bauteile wieder aus dem Bestand entfernt. U.a. durch Stücklistenfehler, Abweichungen vom Packlos oder Fremdentnahmen kann es dabei vorkommen, dass der systemische Bestand vom tatsächlichen physischen Bestand abweicht. Im Gegensatz zur Verbrauchssteuerung kann bei einer Bedarfssteuerung jedoch nur bei korrektem Systembestand eine planmäßige Materialversorgung gewährleistet werden. Daher ist in gewissen zeitlichen Abständen eine möglichst aufwandsarme physische Bestandsaufnahme und -kontrolle notwendig. Aufgrund des Fokus der Arbeit beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf Lagerteile. Auf Kontrollmechanismen bei JIT/JIS-Teilen wird daher nicht näher eingegangen.

Als eine Möglichkeit kommt eine periodische Inventur infrage, bei der die physischen Werksbestände z.B. täglich gezählt und mit den systemischen Beständen abgeglichen werden. Aufgrund des manuellen Zählvorgangs ist dieser Prozess jedoch aufwändig und fehleranfällig. Zudem müssen selbst Bauteile mit geringen Materialbewegungen überprüft werden. Es wird daher eine Bestandskontrolle vorgeschlagen, die auf einer Inventur bei Nulldurchgang basiert (vgl. z.B. [Arn-2002]). Diese erfolgt am Ort der Teileentnahme aus einem sortenreinen Behälter in einem Supermarkt oder am Montageband. Der Systembestand wird immer dann mit dem physischen Bestand abgeglichen, wenn laut Systembestand der Behälter im Zugriff leer werden müsste oder der Behälter im Zugriff physisch leer wird. Folglich kann der Aufwand für langsam drehende HUs reduziert werden, da die Kontrollfrequenz vom Verbrauchsverhalten der jeweiligen Bauteile abhängt. Gleiches gilt für den Zählvorgang, da nur noch der Entnahmebehälter betrachtet wird. Um aber einen Abgleich vollziehen zu können, muss die Restmenge des Behälters im Zugriff systemisch geführt und angezeigt werden. Auch muss der Kommissionierer oder Monteur auf einen systemischen Nulldurchgang aufmerksam gemacht werden. Nicht zuletzt muss eine Übereinstimmung von physischem und systemischem Bestand bei planmäßigem Prozess gewährleistet sein. Dies bedeutet, dass Materialabgänge in Echtzeit aus dem Bestand gebucht werden müssen. Bei stücklistengeführten Bauteilen kann dies automatisch erfolgen. Andernfalls muss der Mitarbeiter z.B. durch Drücken eines Schalters die Ware manuell ausbuchen. Soll dieser Aufwand vermieden werden, muss auf eine periodische Inventur zurückgegriffen werden. Zur Anzeige des Systembestands und eines Nulldurchgangs eignen sich bspw. Displays oder Markierungen in Kommissionierlisten. Anhand Abbildung 5-38 wird nachfolgend eine beispielhafte Umsetzung der Bestandskontrolle per Nulldurchgang in einem einstufigen Supermarktprozess beschrieben (vgl. hierzu auch [fml-12k]).

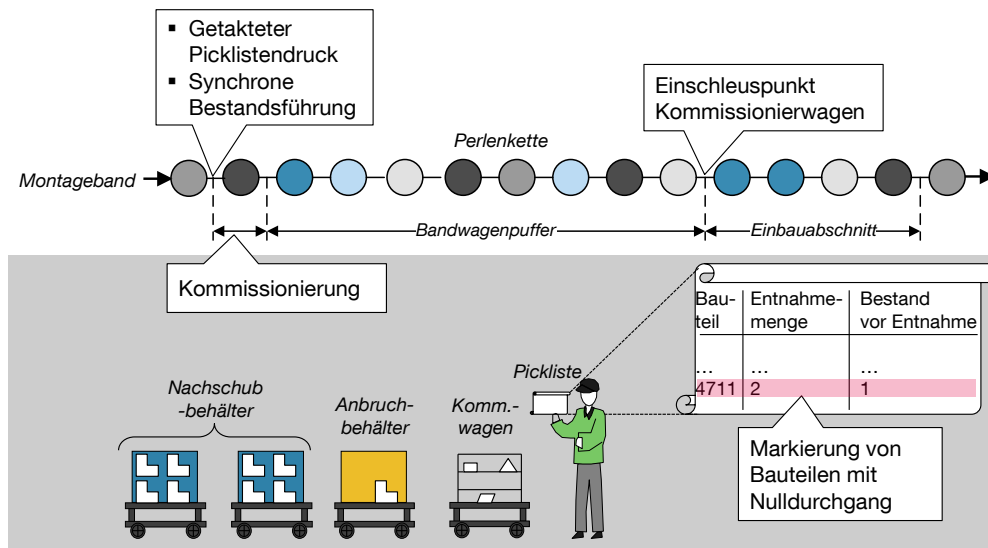


Abbildung 5-38: Bestandsführung und -kontrolle am Beispiel einer Kommissionierung von Montagesets mit Picklisten [Con-2013b]

Sobald eine Auftragsperle einen bestimmten Verbautakt, der sich eine zu definierende Anzahl an Takten vor dem Einschleuspunkt eines mit dem Montageband mitfahrenden Kommissionierwagens befindet, erreicht, werden die Teile, die später im Einbauabschnitt montiert werden, aus dem Bestand gebucht. Anschließend wird eine Pickliste mit eben jenen Bauteilen erzeugt. Diese werden zusammen mit der Entnahmemenge und dem Bestand vor Entnahme angezeigt. Erfolgt systemisch ein Nulldurchgang, werden die Zeilen entsprechender Bauteile markiert. Der Kommissionierer kann dann überprüfen, ob der systemische Bestand vor der Entnahme tatsächlich mit dem physischen Bestand übereinstimmt und der Behälter leer wird. Bei Abweichungen sind entsprechende Bestandskorrekturen vorzunehmen. Mit der beschriebenen Systematik erfolgt ein getakteter Ausdruck von Picklisten, der für einen begrenzten maximalen Puffer an Kommissionierwägen sorgt. Mit einem einfachen Bestandsabgleich zum Zeitpunkt des systemischen oder physischen Leerwerdens des Anbruchbehälters kann zudem der Aufwand zur Bestandskontrolle gering gehalten werden.

5.8 Konzeptbewertung

In diesem Abschnitt wird der Erfüllungsgrad derjenigen Anforderungen bestimmt, bei denen hierzu keine weiteren quantitativen Analysen z.B. im Rahmen von Simulationsstudien notwendig sind (siehe Kapitel 6). Anschließend wird das monetäre Potenzial am Beispiel der MTB abgeschätzt.

5.8.1 Abgleich mit den Anforderungen

Der Abgleich mit den identifizierten Anforderungen orientiert sich an der Struktur in Kapitel 4. Hinsichtlich allgemeiner und spezifischer Anforderungen an das Steuerungssystem ergibt sich das in Tabelle 5-3 dargestellte Bild. Anforderungen A1.3 und A2.1 werden nicht weiter betrachtet, da sie implizit in den Anforderungen A2.2 bzw. A2.3 Berücksichtigung finden. Teilweise wird der Erfüllungsgrad unterschieden nach Steuerung für Teilladungen und Komplettladungen (Einschätzung links bzw. rechts in entsprechenden Feldern).

Tabelle 5-3: Abgleich mit allgemeinen und spezifischen Anforderungen an das Steuerungssystem

Anforderung	Nr.	A1.1	A1.2	A1.4	A1.5	A1.6	A1.7	A1.8	A1.9	A1.10
	Kurzbeschreibung		Standardlogik	geringe Bestände	Alle Transportmodi	optimale Bestellmenge	maximale Auslastung	Kombination lagerlos/lagerhaltig	eingängige Logik	Dispoverfahren automatisiert	geringer Einrichtungsaufwand
Neues Konzept		●	k.A.	●	●	k.A.	●	●/○	●	●/○
Anforderung	Nr.	A1.11	A1.12	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5	A2.6	A2.7	
	Kurzbeschreibung		geringer Steuerungsaufwand	transparent	robust und flexibel	bedarfs-synchron	Kommunikation Abholzeiten	Kommunikation Lademeter	Abladekonzept	einfache Bestandskontrolle
Neues Konzept		○/●	●	●	●	●	●	●	●	

Insgesamt können fast alle Anforderungen vollständig erfüllt werden. Alle Belieferungsformen und Transportmodi können über dieselbe Logik einer Mengensteuerung abgebildet werden. Analog zu anderen bestehenden Ansätzen zeigt sich aber auch, dass eine optimierte Belieferung mit komplexeren Steuerungsalgorithmen, höherem Einrichtungs- und operativen Steuerungsaufwand einhergeht. Dies gilt insbesondere für den Abruf von Komplettladungen. Der Einführung eines solchen Systems müssen folglich Schulungen für Logistikplaner und Disponenten vorausgehen. Ebenso müssen Lieferanten auf die neuen Prozesse vorbereitet werden, um stabile Prozesse gewährleisten zu können und den operativen Steuerungsaufwand gering zu halten. Bezüglich der Bestände kann noch keine belastbare Aussage getroffen werden, da lediglich vermutet wird, dass das Konzept des Sicherheitsbedarfs positive Effekte auf dem Werksbestand hat. Eine Untersuchung hinsichtlich der Bestandsauswirkungen folgt im Rahmen einer Simulationsstudie im nächsten Kapitel. Gleiches gilt für die Trailerauslastung bei Komplettladungen.

Tabelle 5-4: Abgleich mit den Anforderungen an den Packalgorithmus

Anforderung	Nr.	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4	A3.5	A3.6	A3.7
	Kurzbeschreibung		generell hohe Lösungsgüte	begrenzte Trailerreichweite	Restriktionen Ladungssicherung	Restriktionen HUs	Restriktionen Prozess	intuitiv	schnell
Neues Konzept	Packalg. Teilladungen							●
	Packalg. Komplettlsg. Schnelldreher	k.A.	●	●	●	●	●	◐
	Packalg. Komplettlsg. Langsamdreher	k.A.	●	◐	●	●	◑	◐

Tabelle 5-4 zeigt den Abgleich mit den Anforderungen an den Packalgorithmus. Das Konzept wird dabei in die Verfahren für Teilladungen, Komplettlösungen mit Schnelldreher-HUs und Komplettlösungen mit Langsamdreher-HUs unterteilt. Generell kann ebenfalls ein hoher Erfüllungsgrad erreicht werden. Abstriche sind bei der Schnelligkeit der Algorithmen für Komplettlösungen zu machen, da während des Rechenlaufs bereits platzierte HUs oder Stapel mehrmals mittels Offline-Packverfahren von neuem angeordnet werden. Von den einzelnen ein- und zweidimensionalen Online- sowie Offline-Algorithmen des Gesamtverfahrens ist aber eine positives Laufzeitverhalten zu erwarten, da sie entweder mit bestehenden, nachweislich schnellen Algorithmen übereinstimmen oder von diesen mit geringfügigen Modifikationen abgeleitet wurden. Leichte Einschränkungen sind zudem bei der Berücksichtigung von Ladungssicherungsvorschriften beim Langsamdreher-Algorithmus zu verzeichnen, da durch diesen generierte Packschemen u.U. nicht einer gleichmäßigen Lastverteilung auf der Ladefläche gerecht werden. Auch zeigen sich die Beladeregeln etwas weniger intuitiv als beim Schnelldreher-Algorithmus. Hinsichtlich der Lösungsgüte in Abhängigkeit eines breiten Spektrums von Probleminstanzen (Anforderung A3.1) kann keine valide Aussage getroffen werden. Hierüber kann erst eine weiterführende quantitative Analyse z.B. mittels numerischer Simulation Aufschluss geben, siehe nächstes Kapitel.

5.8.2 Abschätzung des monetären Potenzials am Beispiel der MAN Truck & Bus AG

Das monetäre Potenzial des entwickelten Konzepts wird am Beispiel des Nutzfahrzeugherstellers MTB aufgezeigt (vgl. [Con-2013a]). Betrachtet wird die Belieferung

der Produktionsstandorte München, Salzgitter und Krakau, an denen LKW der schweren Baureihe bis 41 Tonnen maximalem Gesamtgewicht entstehen. JIT/JIS-Umfänge machen gewichtsmäßig knapp ein Drittel der Zulieferströme aus, werden trailerbasiert abgerufen und über einen Warehouse-on-Wheels-Prozess der Endmontage zugeführt. Zudem werden Leerguttrailer gegen die im Werk ankommenden Vollguttrailer im Verhältnis eins zu eins (HUs nicht klappbar), teilweise auch im Verhältnis eins zu n (HUs klappbar) getauscht. Der Rest wird über einen Lagerprozess abgewickelt. Mit Ausnahme einzelner Pilot-Milkruns erfolgt die Belieferung bisher über Direkt- und Sammelgutverkehre, abgerufen wird vornehmlich bedarfsbezogen in Zeitscheiben. Im Sammelgutverkehr werden bis zu einem länderspezifischen Schwellenwert Vorlauf- und Hauptlaufkosten abgerechnet, danach fallen nur noch lineare Hauptlaufkosten an. Bei lagerhaltigen Direktverkehren ist stets ein Mindestpreis zu entrichten, der ab einem bestimmten Schwellenwert linear ansteigt. Bei JIT/JIS mit Vollgut-Leerguttausch im Verhältnis eins zu eins ist in der Regel ein sogenannter Rundläufertarif vereinbart, der auch die Leergutrückführung beinhaltet.

Im Zuge der Potenzialanalyse werden mögliche Einsparungen der Beschaffungskosten bei der Umstellung von Zeitscheiben- auf Mengensteuerung ermittelt. Betrachtet werden lagerhaltige Sammelgutverkehre, Direktverkehre und Milkruns sowie gemischte Direktbelieferungen von JIT/JIS- und Lagerteilen desselben Lieferanten. An der bestehenden Zuordnung von Bauteilen zu Belieferungskonzepten wird festgehalten. Sofern lohnenswert wird bei Transportmodi ein Wechsel auf Milkruns zugelassen, ansonsten wird die bestehende Zuordnung ebenfalls beibehalten. Prinzipiell sollen sich mit der Mengensteuerung die Werksbestände möglichst nicht erhöhen. Daher wird sie nur auf jene Teilladungen im Sammelgutverkehr sowie Milkruns angewandt, bei denen die Lieferfrequenzen im Vergleich zum Status Quo kaum oder gar nicht sinken. Hinzu kommt, dass mit den mengengesteuerten Teilladungen und den identifizierten Milkruns nur in wenigen Fällen die Frequenzen erhöht werden können. Deshalb werden bei Teilladungen im Sammelgutverkehr und bei Milkruns die Bestandskosten vernachlässigt und nur die Transportkosten betrachtet. Bei Komplettladungen kann eine Verringerung der Frequenz jedoch nicht verhindert werden, wenn die Auslastung maximiert wird. Entsprechend kann auf eine Berücksichtigung der Bestandskosten nicht verzichtet werden. Im Falle von Mischbelieferungen gehen in die Kalkulation zusätzlich werksinterne Handhabungskosten ein, da durch die gemeinsame Anlieferung von JIT/JIS- und Lagerteilen die Lieferfrequenz steigt und folglich Trailer den Warehouse-on-Wheels-Prozess öfter durchlaufen müssen.

Bei Teilladungen werden Einsparungen bei den Transportkosten jener Transportrelationen ermittelt, bei denen die durchschnittliche Liefermenge höchstens eine halbe Tonne unterhalb des jeweiligen Schwellenwertes liegt und derzeit Vorlaufkosten bezahlt werden müssen. Im Mittel kann die Sendungsgröße also auch über dem Schwellenwert liegen. Werden nun im Zuge der Umstellung auf Mengensteuerung die Liefermengen auf einen Wert knapp über dem Schwellenwert gesetzt, ändert sich die Lieferfrequenz hiervon betroffener Lieferanten kaum, sodass vornehmlich Auswirkungen auf die Transportkosten zu verzeichnen sind.

Milkruns werden innerhalb von Speditionsgebieten gebildet und können sich aus Teilladungen zusammensetzen, die vorher direkt oder im Sammelgutverkehr angeliefert wurden. Wie oben erwähnt ist die Voraussetzung hierfür, dass die gegenwärtigen durchschnittlichen Anlieferfrequenzen nicht sinken. Die Transportkosten werden über die Soll-Transportanzahl, die Milkrungesamtstrecke, übliche Kilometersätze und typische Stoppkosten berechnet. Bei schweren Bauteilen beruht die Ermittlung der Soll-Transportanzahl auf der Annahme vollausgelasteter Trailer mit je 24 Tonnen Last. Ist dagegen das Volumen der begrenzende Faktor für die Trailerbeladung, wird die Soll-Transportzahl auf Basis maximaler Tonnagen oder, sofern verfügbar, volumenbasierter Lademeter vergangener Belieferungen konservativ abgeschätzt. Hinsichtlich der Auslastung lagerhaltiger Komplettladungen sowie von Mischtransporten wird analog zu Milkruns vorgegangen.

Bei der Berechnung von Soll-Transportkosten werden bei Mischtransporten zwei Prozessalternativen in Betracht gezogen. In beiden Fällen wird Vollgut angeliefert, das lagerhaltige Material abgeladen und der nur zum Teil ausgelastete Trailer mit den übrigen JIT/JIS-Teilen dem Warehouse-on-Wheels-Prozess zugeführt. JIT/JIS- und lagerhaltiges Leergut werden in separaten Prozessen zum Lieferanten zurückgeführt. In Variante eins tauscht der Fahrer stets den Vollguttrailer gegen einen reinen JIT/JIS-Leerguttrailer. Zwar wird damit eine reduzierte Auslastung des Leerguttrailers in Kauf genommen, jedoch kann weiterhin auf einen meist günstigen Rundläufertarif zurückgegriffen werden. In Variante zwei nimmt der Fahrer immer nur dann einen JIT/JIS-Leerguttrailer mit, wenn dieser voll ist. Dies reduziert zwar die Anzahl an Leergutfahrten. Jedoch müssen dann separate, meist teurere Tarife für Voll- und Leergut vereinbart werden. In der Potenzialabschätzung wird von einem durchschnittlichen, auf Erfahrungswerten beruhenden Aufschlag von 15% zum Rundläufertarif ausgegangen. Eine gemeinsame Rückführung von JIT/JIS- und la-

gerhaltigem Leergut wird aufgrund einer zu erwartenden hohen Prozesskomplexität bei der Zusammenführung der Leergutströme nicht in Erwägung gezogen.

Im Ergebnis können die Transportkosten der adressierten Lieferrelationen, die 22% der gesamten Inbound-Transportkosten ausmachen, um 22% gesenkt werden. Bestands- und Handhabungsmehrkosten reduzieren das gesamte absolute Einsparpotenzial lediglich im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Hauptanteil an den Einsparungen haben lagerhaltige Komplettladungen mit 40%, gefolgt von Milkruns mit 34%, Mischbelieferungen mit 15% und Teilladungen mit 11%. Die Zuordnung von Lieferanten zu mengengesteuerten Transportmodi erfolgt dabei so, dass das Gesamtpotenzial maximiert wird und Potenziale nicht doppelt ausgewiesen werden.

Zusammenfassend kann ein hohes Einsparpotenzial festgestellt werden. Aufgrund unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen ist das Ergebnis jedoch nicht direkt auf andere OEM übertragbar. Gleichwohl kann es für andere OEM, insbesondere mit ähnlichem Produktspektrum, Lieferantennetzwerk und vergleichbaren Stückzahlen, als grober Anhaltspunkt dienen. Weitere Verbesserungen sind zu erwarten, wenn neben den beschriebenen Optimierungsmaßnahmen auch noch die JIT/JIS-Belieferung durch gemischte Milkrun-Belieferungen von JIT/JIS- und Lagerteilen ausgeweitet werden kann.

6 Simulative Validierung und Analyse des Konzepts der integrierten Abruf- und Transportsteuerung

Der Erfüllungsgrad eines Teils der an das Steuerungssystem für lagerhaltige Teileumfänge gestellten Anforderungen kann nicht direkt bestimmt werden, sondern muss anhand weitergehender quantitativer Analysen beurteilt werden. Insbesondere sind die Effekte der konzipierten Nettobedarfsrechnung auf den Werksbestand wie auch die Auswirkungen des Packalgorithmus auf die Transportauslastung sowie die Lösungsgüte in Abhängigkeit eines Spektrums an Probleminstanzen zu untersuchen. Darüber hinaus gilt es aber auch, die generelle Funktionsfähigkeit des entwickelten Abruf- und Steuerungssystems zu überprüfen. Hierzu werden Studien zum Konzept der Nettobedarfsrechnung und zum Packalgorithmus für Komplettladungen durchgeführt, die auf der ereignisorientierten Ablaufsimulation beruhen. Diese erlaubt eine nahezu beliebig genaue Abbildung realer dynamischer Prozesse unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse in einem experimentierfähigen Modell, „um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI 3633, Blatt 1].

6.1 Simulationsstudie zum Konzept der Nettobedarfsrechnung

Der für Lagerteile entwickelte Algorithmus zur Nettobedarfsrechnung grenzt sich von bestehenden Verfahren insbesondere durch das Konzept des relativen Sicherheitsbedarfs ab, das proaktiv Sicherheiten in die Supply-Chain einsteuert. Liegt nur ein SB (statisch oder dynamisch per BVZ) ohne Sicherheitsbedarf vor, muss dieser so bemessen sein, dass das Versorgungsrisiko innerhalb der gesamten Wiederbeschaffungszeit abgesichert ist. Wird der SB angegriffen, müssen Bauteile zur Wiederauffüllung wieder in die Supply-Chain eingesteuert werden. Dies lässt eine gewisse Unruhe hinsichtlich der Materialabrufe hin zum Lieferanten erwarten.

Werden Sicherheitsbedarfe disponiert, sollen diese den durchschnittlichen Mehrverbrauch im Zeitraum des mittleren Lieferabstandes ausgleichen. Ein SB im Werk soll dann nur noch Schwankungen des Mehrverbrauchs abfangen. Hierdurch wird eine Reduktion des SB und somit auch des gesamten Werksbestands erwartet. Wird der SB angegriffen, müssen keine zusätzlichen Bauteile bestellt werden, da ohnehin au-

tomatisch Sicherheiten in der Supply-Chain eingeplant werden. Diese können zudem in bestimmten Situationen zur Bedarfsdeckung herangezogen werden, um Versorgungslücken und das Vorziehen von Bestellungen zu vermeiden. Dadurch sollen Materialabrufe stabilisiert werden. Zudem besteht eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der Einstreuung von Sicherheiten, die zur Glättung von Bestellungen genutzt werden kann. Zusammenfassend soll also mit dem Konzept sowohl eine Reduktion von Beständen als auch eine Verbesserung der Planungsqualität erreicht werden.

Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Simulationsstudie sollen die Auswirkungen auf den Bestand und die Planungsgüte durch das Konzept des Sicherheitsbedarfs quantitativ erfasst und bewertet werden. Andere Einflüsse, die z.B. vom Packalgorithmus herrühren, sollen möglichst ausgeblendet werden. Anhand geeigneter Kennzahlen sollen etwaige Verbesserungen einer Abrufsteuerung mit Supply-Chain-Sicherheitsbedarf gegenüber einer Steuerung ohne Supply-Chain-Sicherheitsbedarf unter identischen Rahmenbedingungen ermittelt werden. Hierzu sind lagerhaltige Belieferungsprozesse einschließlich der dahinterliegenden Materialflusssteuerung mit und ohne Sicherheitsbedarf möglichst realitätsnah unter Berücksichtigung stochastischer Einflüsse abzubilden. In den Simulationsläufen sind die erforderlichen Sicherheiten zur Aufrechterhaltung der Materialversorgung sowie die Kennzahlen auf Bauteilebene zu bestimmen, da auch die Nettobedarfsrechnung für jedes einzelne Bauteil separat durchgeführt wird.

6.1.1 Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Modellierung der Steuerung und der physischen Prozesse eingegangen. Anschließend werden die Simulationsparameter sowie deren mögliche Ausprägungen präsentiert (vgl. [fml-13e]).

Steuerung und physische Prozesse

Im Simulationsmodell wird die entwickelte Nettobedarfsrechnung mit Sicherheitsbedarf und statischem SB abgebildet. Zu Vergleichszwecken wird ebenso eine Nettobedarfsrechnung nur mit statischem SB implementiert. Die Durchführung der Nettobedarfsrechnung erfolgt in regelmäßigen zeitlichen Abständen. Ein dynamischer Sicherheitspuffer per BVZ wird nicht in Betracht gezogen, da er sich bei bedarfsge-

steuerter Disposition im Vergleich zum statischen SB als nachteilig hinsichtlich der mittleren und maximalen Bestandshöhe im Werk erwiesen hat (vgl. Abschnitt 4.1.2).

In beiden Varianten beruht die Disposition von Bestellmengen auf einem systemisch geführten Werksbestand und zukünftigen minutengenauen Bruttobedarfen. Hierzu werden Tagesbedarfe generiert und diese äquidistant über die jeweiligen Tage verteilt. Es wird angenommen, dass innerhalb des eingefrorenen Produktionshorizonts eine stabile Perlenkette vorliegt und sich einmal generierte Bruttobedarfe nicht mehr ändern. Dies soll auch für den Planungszeitraum gelten, der deshalb mit dem eingefrorenen Produktionshorizont gleichgesetzt wird. Zudem wird ein Fixierhorizont festgelegt. Dessen eigentlicher Zweck ist es, für den Lieferanten eine verlässliche Liefergrundlage zu schaffen. Daher wird keine zeitliche Überholung von Bestellungen erlaubt. Zudem dürfen diese maximal bis zum Morgen des letzten Tages des Fixierhorizonts vorgezogen werden. Wird in der Variante ohne Sicherheitsbedarf der SB angegriffen, werden Bauteile zu dessen Wiederauffüllung ebenfalls am Morgen des letzten Tages des Fixierhorizonts eingeplant.

Nach der Nettobedarfsrechnung, die sich auf ein bestimmtes Bauteil bezieht, wird zusammen mit den restlichen Bauteilen einer Transportfamilie eine HU-Perlenkette gebildet und der Packalgorithmus ausgeführt. Die restlichen Bauteile sowie der Packalgorithmus sollen dabei das Simulationsergebnis nicht aktiv beeinflussen. Hierzu werden die Bedarfsraten der restlichen Bauteile konstant gehalten, nur der Bedarf des zu untersuchenden Bauteils kann variieren. Der Packalgorithmus fasst immer dieselbe, konstante Menge an HUs zu einer Bestellung zusammen. Bei der Zuordnung von HUs zu Bestellungen wird hierbei keine HU in der HU-Perlenkette übersprungen. Überdies wird eine Gesamt-HU-Bedarfsrate unabhängig von der HU-Bedarfsrate des betrachteten Bauteils festgesetzt, welche die Lieferfrequenz bestimmt, sofern zusätzlich zu Bedarfsdeckern keine Sicherheitsbedarfsdecker bzw. Bauteile zur Auffüllung des statischen SB eingeplant sind. Unterschiedliche Bedarfsraten des betrachteten Bauteils wirken sich folglich auf den Anteil an der gesamten HU-Bestellmenge aus. Des Weiteren können beim zu untersuchenden Bauteil im Werk schwankende Mehrverbräuche auftreten, nicht jedoch bei den restlichen Bauteilen.

Als physischer Prozess wird in der Simulation eine Lagerbelieferung abgebildet, da das Konzept des Sicherheitsbedarfs nur für Lagerteile bestimmt ist. Für die werksinterne Materialbereitstellung werden zwei Varianten in Betracht gezogen. In der ers-

ten Variante, dem Standardprozess, liegt ein Materialbereitstellprozess beliebiger Stufigkeit vor, bei dem der systemische Werksbestand exakt dem physischen Bestand entspricht. Das heißt, dass beim Wareneingang Zugänge eingebucht werden und beim Verbau einzelne Bauteile wieder ausgebucht werden. In der zweiten Variante, dem Sonderprozess, handelt es sich um eine zweistufige Materialbereitstellung, bei der Liefermengen in ein Lager eingehen, aus welchem ein Montagepuffer per Behälter-Kanban-Verfahren versorgt wird. Es werden nur die Lager-, nicht aber die Kanbanbestände geführt. Aus Prozesssicht ist dies auch nicht zwingend erforderlich, da beim Behälter-Kanban der Materialnachschub lediglich durch leer gewordene HUs angestoßen wird.

In der Folge geht in die Disposition lediglich der Lagerbestand ein, der durch packlosweise Ausbuchungen geprägt ist. Diese werden systemisch als Verbrauch interpretiert. Auf einen bestimmten Zeitraum bezogen (z.B. einen Tag) ist aufgrund der groben Granularität der Materialabgänge mit negativen, aber auch positiven Abweichungen vom berechneten Bedarf auf Basis einer stabilen Perlenkette zu rechnen. Diese systemischen Mehr- und Minderverbräuche lassen eine Erhöhung der Abrufnervosität erwarten. Hierbei gilt es zu untersuchen, inwieweit das Konzept des Sicherheitsbedarfs auch mit Minderverbräuchen umgehen und letztlich eine Stabilisierung der Abrufe herbeiführen kann.

Der physische Transportprozess wird im Simulationsmodell nicht abgebildet, da er für die Abrufsteuerung irrelevant ist. Modelliert wird jedoch der Eingang der Ware. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass das bestellte Material stets zur geforderten Zeit, in der geforderten Menge und Qualität ankommt. Die softwaretechnische Implementierung des Modells erfolgt in Plant Simulation.

Parameter und Parameterausprägungen

Die Modellparameter sowie deren mögliche Ausprägungen sind in Tabelle 6-1 dargestellt. Um möglichst praxisnahe Ergebnisse zu erzielen sind letztere vorwiegend von Realdaten am Beispiel der MTB abgeleitet, zum Teil handelt sich aber auch um Erfahrungswerte.

Tabelle 6-1: Parameter und Parameterausprägungen

Parameter	Ausprägung						
Materialausbuchung	Einzelteil			packlosweise			
Planungszeitraum	11 d						
Fixierhorizont	3 d						
Belieferungsfrequenz	0,655 1/d						
Anzahl HUs je Transport	100						
Frequenz Rechenläufe	täglich						
HU-Bedarf pro Tag	0,01	0,23	1,36	2,79	6,41	14,51	33,38
Verteilungstyp HU-Bedarf	Normalverteilung						
Variationskoeff. HU-Bedarf	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	
Packlos	1	11	55	94	176	308	
Mehrverbrauchsrate (MVR)	2,5%			5%			
Verteilungstyp MVR	Normalverteilung						
Variationskoeff. MVR	0		0,5		1,0		

Zunächst wird zwischen den beiden Buchungsvarianten „Einzelteil“ und „packlosweise“ unterschieden. Der gesamte Planungszeitraum und der Fixierhorizont werden von der MTB übernommen. Gleiches gilt für die Belieferungsfrequenz und die Anzahl HUs je Transport, die jeweils dem durchschnittlichen Wert der im Rahmen der Potenzialabschätzung aus Abschnitt 5.8.2 betrachteten Transportrelationen entsprechen. Die Frequenz zur Durchführung eines Rechenlaufs wird auf täglich festgelegt, wie dies bei Abrufsystemen üblich ist. Die Werte für die HU-Bedarfsrate des zu analysierenden Bauteils und das Packlos sind aus den Eigenschaften von Lagerteilen der MTB abgeleitet (siehe hierzu auch [fml-13e]). Als Mehrverbrauchsraten werden 2,5% und 5% gewählt. Als Verteilungstyp wird für die Bedarfsrate und die Mehrverbrauchsrate eine Normalverteilung angenommen, wie dies in einem Großteil von Supply-Chain-Modellen in der Literatur ebenfalls der Fall ist (vgl. z.B. [Tem-2006]). Da bei einer Normalverteilung jedoch auch negative Werte auftreten, werden diese bei der Erzeugung normalverteilter Zufallszahlen auf null gesetzt. Zudem werden die Werte nach oben durch den Mittelwert zuzüglich der dreifachen Standardabweichung begrenzt, um Ausreißer zu vermeiden. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine normalverteilte Zufallsvariable einen Wert darüber annimmt und somit auf den Schwellenwert herabgesetzt wird, liegt aber bei lediglich 0,3% (siehe z.B. [Sac-2004]). Die gewählten Variationskoeffizienten orientieren sich an klassischen Grenzen von XYZ-Analysen.

6.1.2 Kennzahlen

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Nettobedarfsrechnung mit relativem Supply-Chain-Sicherheitsbedarf wird diese einer Nettobedarfsrechnung ohne Sicherheitsbedarf gegenübergestellt. Hierzu werden als Kennzahlen die relative Verbesserung des Werksbestands und die der Planungsgüte gemessen.

Relative Verbesserung des Werksbestands

Zur Berechnung der relativen Verbesserung des Werksbestands werden die durchschnittlichen Werksbestände bei Disposition ohne und mit Sicherheitsbedarf bestimmt. Hierzu werden für beide Varianten der Nettobedarfsrechnung in den jeweiligen Simulationsläufen nach jedem Materialzu- oder -abfluss die Bestandshöhe und die Zeitdauer bis zur nächsten Bestandsänderung gespeichert. Die mit der zugehörigen Zeitdauer multiplizierten Bestandshöhen werden dann über den gesamten Simulationszeitraum aufsummiert und durch diesen dividiert. Anschließend wird die prozentuale Abweichung der mittleren Bestände berechnet.

Relative Verbesserung der Planungsgüte

Die relative Verbesserung der Planungsgüte wird durch die Summe der gleichgewichteten relativen Verbesserungen der absoluten Kennzahlen Planungstreue, Bestellgüte und Werksbestand nach Planung beim Wechsel von einer Disposition ohne Sicherheitsbedarf zu einer Disposition mit Sicherheitsbedarf wiedergegeben. In der Einheit Packlosminute drücken diese mengen- und zeitmäßige Planabweichungen in der gesamten Supply-Chain aus OEM- und Lieferantensicht aus. Bei den Kennzahlen Planungstreue und Bestellgüte werden täglich Planabweichungen bezüglich ganzer Bestellungen bestimmt. Bei der Kennzahl Werksbestand erfolgt dies für jedes einzelne Packlos. Treten Änderungen auf, werden diese nach unterschiedlicher Logik quantifiziert und auf die entsprechende Kennzahl aufaddiert. Sind über den gesamten Simulationszeitraum keine Planabweichungen aufgetreten, betragen die Kennzahlen null. Nachfolgend werden die einzelnen absoluten Kennzahlen und deren Bestimmung näher erläutert.

Planungstreue

Die Planungstreue drückt aus, wie stabil sich geplante Bestellmengen und -termine von einem zum nächsten Rechenlauf verhalten. Die Bestimmung von Planabweichungen beginnt stets bei der frühesten, gerade erst fixierten Bestellung und endet bei der spätesten geplanten Bestellung. Letztlich besteht die Möglichkeit reiner Terminverschiebungen, reiner Mengenänderungen oder gleichzeitiger Termin- und Mengenänderungen. In den Grafiken werden eine übereinstimmende Bestellmenge grün, eine Erhöhung der Bestellmenge rot und die ursprüngliche Bestellung grau gestrichelt angezeigt.

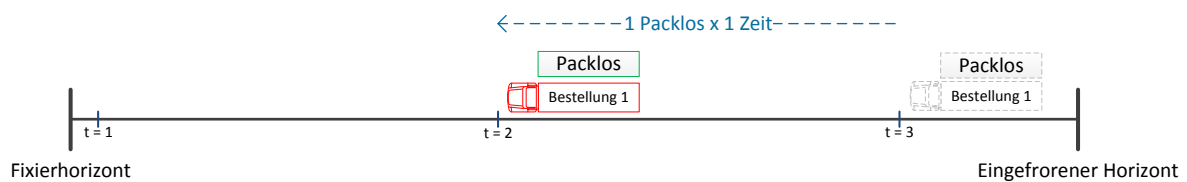


Abbildung 6-1: Berechnung der Planungstreue bei reiner Terminänderung (in Anlehnung an [fml-13e])

Abbildung 6-1 zeigt ein Beispiel, bei dem im Vergleich zum letzten Rechenlauf lediglich eine Terminvorverlegung zu verzeichnen ist. Zur Berechnung der Planabweichung wird die Schnittmenge aus alter und neuer Bestellung herangezogen und mit der Terminabweichung multipliziert. Dieser Wert geht dann entsprechend in die Kennzahl ein.

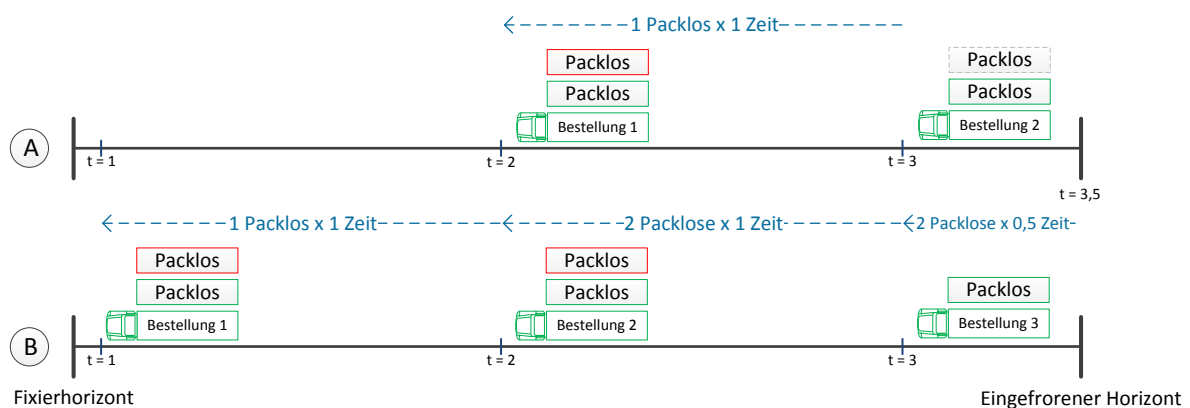


Abbildung 6-2: Berechnung der Planungstreue bei reiner Mengenänderung (in Anlehnung an [fml-13e])

Treten bei einer Bestellung Mengenänderungen auf, werden diese auf Mengenänderungen späterer Bestellungen oder Materialzu- bzw. -abgänge in den eingefrorenen

Horizont hinein bzw. aus ihm heraus zurückgeführt. Etwaige früher eintreffende Bestellungen innerhalb des Fixierhorizonts werden nicht betrachtet, da sie verbindlich und damit keinen Änderungen mehr unterworfen sind. Abbildung 6-2 veranschaulicht diese Logik. Im Fall A ist Bestellmenge 1 im Vergleich zum letzten Rechenlauf um ein Packlos erhöht, gleichzeitig ist die Bestellmenge der nächsten Bestellung um ein Packlos reduziert. Es wird davon ausgegangen, dass das Packlos von Bestellung 2 auf Bestellung 1 übergegangen ist. Diese Mengenänderung wird mit dem Produkt aus Packlos und zeitlichem Abstand zwischen der ersten und zweiten Bestellung in die Kennzahl eingerechnet. Fall B beschreibt das System des sogenannten Übertrags. Bestellung 1 ist um ein Packlos erhöht. Diese Mengenzunahme wird als Übertrag an die nächste Bestellung weitergereicht und mit dem Produkt aus Packlos und einer Zeiteinheit bewertet. Bei der nächsten Bestellung ist erneut ein Packlos mehr als beim letzten Rechenlauf zu verzeichnen. Die Mehrmenge wird auf den Übertrag aufgeschlagen und zu Bestellung 3 weitergereicht. Die „Kosten“ hierfür sind das Produkt aus zwei Packlosen und einer Zeiteinheit. Bestellung 3 ist unverändert. Es wird daher angenommen, dass die zwei zusätzlichen Packlose im System aus Zugängen in den eingefrorenen Horizont resultieren. Als „Strafe“ wird eine weitere halbe Zeiteinheit aufgeschlagen, multipliziert mit den zwei Packlosen.

Gäbe es Mindermengen, würden diese einen negativen Übertrag zur nächsten Bestellung erzeugen. In die Kennzahl gehen alle Abweichungen jedoch als positive Beiträge ein, sodass auch Mindermengen zu einer Erhöhung der Kennzahl beitragen.

Anders gehandhabt werden Mengenverringerungen aber hinsichtlich des zeitlichen Bezugspunkts zur Quantifizierung der Planänderung. Während bei einer Mengenzunahme stets der Ankunftszeitpunkt der Bestellung des aktuellen Rechenlaufs als Bezugspunkt zur Berechnung des Zeitabstands zur nächsten Bestellung herangezogen wird, ist es bei einer Mengenabnahme der alte Termin des letzten Rechenlaufs. Dieses Vorgehen sorgt dafür, dass große Planungsfehler stets stärker bestraft werden als kleinere. Als großer Planungsfehler wird bspw. der Fall betrachtet, bei dem eine Mengenerhöhung mit einer Terminvorverlegung zusammenfällt. Ein Beispiel für einen kleineren Planungsfehler ist eine Terminvorverlegung, bei der jedoch die Bestellmenge reduziert ist. Mit dem alten Bestelltermin wird dann der zeitliche Abstand zur nächsten Bestellung kleiner, die Abnahme der Bestellmenge wird folglich geringer bestraft (vgl. hierzu auch [fml-13e]).

Bestellgüte

Mit der Bestellgüte wird die Prognostizierbarkeit von Bestellungen gemessen. Dies bezieht sich sowohl auf die Bestellmenge als auch den Bestellabstand. Per exponentielle Glättung erster Ordnung werden beide Werte für die nächste Bestellung prognostiziert und mit der tatsächlichen, fixierten Bestellung abgeglichen. Hierbei wird ähnlich wie bei der Kennzahl Planungstreue vorgegangen. Bei Terminverschiebungen wird die Schnittmenge aus Prognose- und tatsächlicher Bestellung mit der Zeitdifferenz multipliziert. Mengenabweichungen werden auf die nächste prognostizierte Bestellung zurückgeführt. Zur Bestimmung des zeitlichen Abstands zur nächsten prognostizierten Bestellung wird bei einer Mengenerhöhung der fixierte Liefertermin, bei einer Mengenverringerng der prognostizierte Liefertermin herangezogen.

Werksbestand nach Planung

Die Kennzahl Werksbestand nach Planung weicht von klassischen Bestandskennzahlen ab. Sie fokussiert ebenfalls die Planungsgüte, indem der als letztes berechnete Nettobedarfszeitpunkt eines Packloses mit dem tatsächlichen Verbrauchszeitpunkt abgeglichen wird. Eine zeitliche Abweichung geht dann multipliziert mit dem Packlos als positiver Betrag in die Kennzahl ein.

6.1.3 Experimente und Ergebnisse

Experimente

Für jede Parameterkombination wird für den Fall ohne Sicherheitsbedarf genau ein Simulationslauf durchgeführt. Für den Fall mit Sicherheitsbedarf werden je Parameterkombination mehrere Simulationsläufe durchgeführt, bis die hinsichtlich des mittleren Bestands optimale relative Sicherheit bestimmt ist. In beiden Fällen wird der eingestellte SB derart hoch dimensioniert, dass dieser in keinem Fall vollständig angegriffen würde. Als mittlerer Bestand wird der minimale mittlere Bestand ermittelt, der zur Aufrechterhaltung der Materialversorgung notwendig ist. Hierzu muss der Werksbestand entlang des gesamten Simulationszeitraums um den minimalen Bestand reduziert werden. Jeder Simulationslauf besteht aus 15 Beobachtungen. Der Simulationszeitraum erstreckt sich auf 200 Arbeitstage. In jedem Simulationslauf werden die oben beschriebenen Kennzahlen ermittelt.

Zur Bestimmung der bestandsminimalen relativen Sicherheit wird wie folgt vorgegangen: Zunächst wird die relative Sicherheit auf die durchschnittliche Mehrverbrauchsrate gesetzt und ein Simulationslauf einschließlich der Berechnung des minimalen mittleren Bestands durchgeführt. Dann wird die relative Sicherheit um 0,5% erhöht und erneut simuliert. Dies wiederholt sich solange, bis der minimale mittlere Bestand nicht weiter gesenkt werden kann. Anschließend wird die anfängliche relative Sicherheit um 0,5% reduziert und dieser Schritt ebenfalls so oft iteriert, bis keine Verbesserungen hinsichtlich des minimalen mittleren Werksbestands mehr auftreten. Als relative Sicherheit wird jenes Niveau gewählt, dass über das gesamte getestete Spektrum mit dem geringsten mittleren Werksbestand einhergeht.

Ergebnisse

Im Rahmen eines Parameter-Screenings werden als Parameter mit dem größten Effekt auf die relative Verbesserung des Werksbestands und der Planungsgüte der HU-Bedarf, der Variationskoeffizient des HU-Bedarfs, die Mehrverbrauchsrate und die Art der Auslagerung identifiziert. Letzere beeinflusst insbesondere die relative Verbesserung der Unterkennzahl Planungstreue, welche die Abrufstabilität ausdrückt.

Tabelle 6-2 zeigt die Simulationsergebnisse. Es werden nur die oben genannten vier Parameter mit dem größten Effekt auf das Simulationsergebnis dargestellt. Die Ausprägungen der einzelnen Parameter werden zu Wertebereichen zusammengefasst, die miteinander kombiniert werden. Innerhalb der kombinierten Wertebereiche werden Durchschnittswerte der simulativ ermittelten relativen Kennzahlen gebildet. Hierdurch sollen Ausreißer nivelliert werden, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu steigern.

Bei niedriger Bedarfsrate tritt keine Verbesserung gegenüber dem bestehenden System auf. Erst bei mittlerer HU-Bedarfsrate kann ein spürbar positiver Effekt des neu entwickelten Konzepts festgestellt werden. Die Reduktion des Werksbestands fällt mit durchschnittlich 5% am höchsten im Bereich eines mittleren HU-Bedarfs, eines hohen Variationskoeffizienten des HU-Bedarfs, einer hohen Mehrverbrauchsrate und bei packlosweiser Auslagerung aus. Die Planungsgüte erhöht sich maximal um 13% im Bereich eines hohen Bedarfs, eines niedrigen Variationskoeffizienten und einer

hoher Mehrverbrauchsrate. Die Abrufstabilität kann sogar um bis zu 22% gesteigert werden.

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Simulationsstudie zum Konzept der Nettobedarfsrechnung

HU-Bedarf	Variationskoeff. HU-Bedarf	Mehrverbrauchsrate	Materialausbuchung	rel. Verb. Werksbestand	rel. Verb. Planungsgüte	rel. Verb. Planungstreue	rel. Verb. Bestellgüte	rel. Verb. Werksbestand nach Plg.
niedrig	niedrig	niedrig	einzeln	0%	-1%	-3%	0%	0%
			Packlos	0%	1%	1%	0%	0%
		hoch	einzeln	0%	0%	0%	-1%	0%
			Packlos	0%	1%	2%	0%	0%
	mittel	niedrig	einzeln	0%	-1%	-3%	0%	0%
			Packlos	0%	1%	2%	0%	0%
		hoch	einzeln	0%	-1%	-3%	0%	0%
			Packlos	0%	1%	2%	0%	0%
	hoch	niedrig	einzeln	0%	-1%	-2%	0%	0%
			Packlos	0%	1%	2%	0%	0%
		hoch	einzeln	0%	-1%	-2%	0%	0%
			Packlos	0%	1%	3%	0%	0%
mittel	niedrig	niedrig	einzeln	0%	0%	0%	0%	1%
			Packlos	1%	8%	13%	5%	5%
		hoch	einzeln	1%	1%	-1%	2%	2%
			Packlos	2%	9%	13%	7%	6%
	mittel	niedrig	einzeln	0%	2%	4%	0%	1%
			Packlos	2%	8%	16%	2%	5%
		hoch	einzeln	1%	3%	6%	1%	2%
			Packlos	4%	11%	20%	4%	9%
	hoch	niedrig	einzeln	0%	3%	6%	0%	2%
			Packlos	3%	9%	18%	2%	8%
		hoch	einzeln	1%	5%	11%	1%	5%
			Packlos	5%	12%	22%	3%	13%
hoch	niedrig	niedrig	einzeln	0%	5%	9%	3%	2%
			Packlos	0%	4%	7%	3%	2%
		hoch	einzeln	2%	13%	19%	16%	5%
			Packlos	2%	13%	19%	16%	6%
	mittel	niedrig	einzeln	0%	2%	2%	0%	3%
			Packlos	0%	3%	5%	0%	4%
		hoch	einzeln	1%	4%	7%	1%	5%
			Packlos	1%	4%	6%	1%	6%
	hoch	niedrig	einzeln	0%	3%	5%	0%	5%
			Packlos	1%	5%	7%	1%	7%
		hoch	einzeln	3%	8%	13%	1%	11%
			Packlos	3%	9%	13%	1%	11%
Gesamtergebnis				1%	4%	7%	2%	4%

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Wechselwirkungen zweier unterschiedlicher Parameter bezüglich der relativen Kennzahlen veranschaulicht. Wie oben erwähnt, hängt das Verbesserungspotenzial stark vom HU-Bedarf und dem Variationskoeffizienten des HU-Bedarfs ab, siehe Abbildung 6-3. Am meisten lässt sich der Bestand bei mittlerem Bedarf und hohem Variationskoeffizienten reduzie-

ren. Bei weniger als einem Packlos pro Tag kann sich das Konzept des Sicherheitsbedarfs aber auch negativ auf den Werksbestand auswirken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht mit jeder Bestellung ein Packlos des betrachteten Bauteils angeliefert wird und folglich Sicherheiten durchschnittlich mit größerem zeitlichen Abstand im Werk eintreffen. Es ist daher ein höherer statischer SB notwendig, um den Mehrverbrauch auszugleichen.

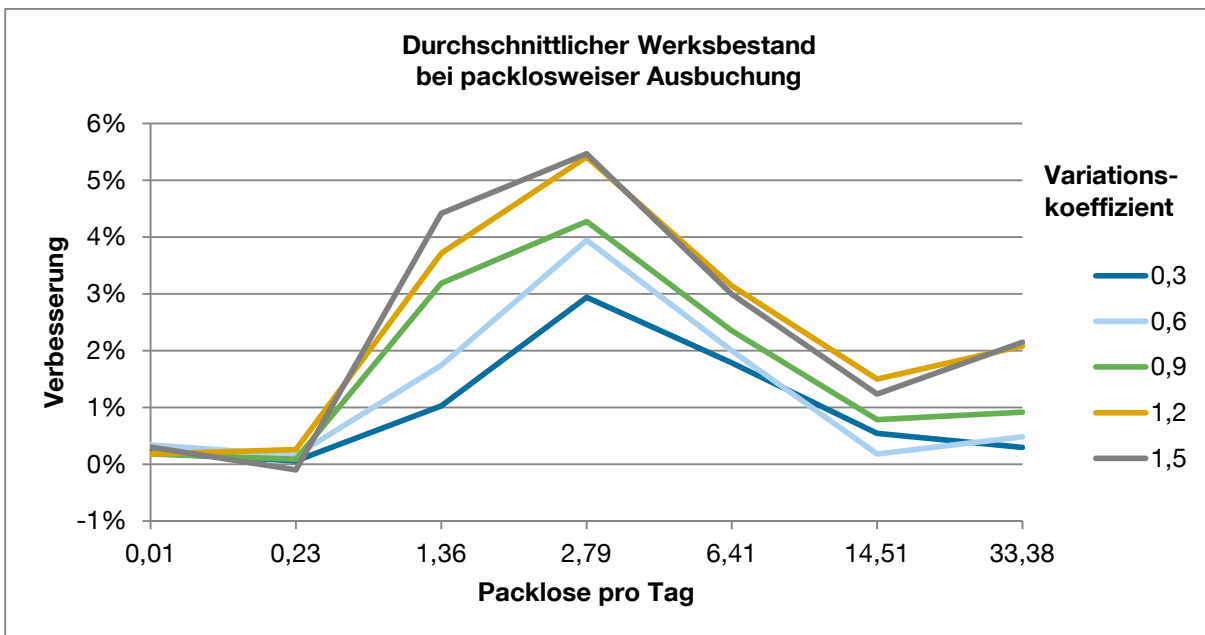


Abbildung 6-3: Durchschnittlicher Werksbestand bei packloswer Ausbuchung in Abhängigkeit von der Bedarfsrate und dem Variationskoeffizient der Bedarfsrate

Der Einfluss der Mehrverbrauchsrate und der Art der Ausbuchung auf die Planungsgüte ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Die größte Verbesserung kann bei der Unterkennzahl Planungstreue erreicht werden, vgl. Abbildung 6-5. Die Bestellgüte kann dagegen nur geringfügig erhöht werden. Dies ist auf die geringe Zahl an Sicherheiten in der Supply-Chain zurückzuführen, die zur Bestellglättung herangezogen werden können. Einen gegenüber der Planungstreue zwar schwächeren, aber dennoch spürbar positiven Effekt hat die Disposition mit Sicherheitsbedarf auf die Kennzahl Werksbestand nach Planung.

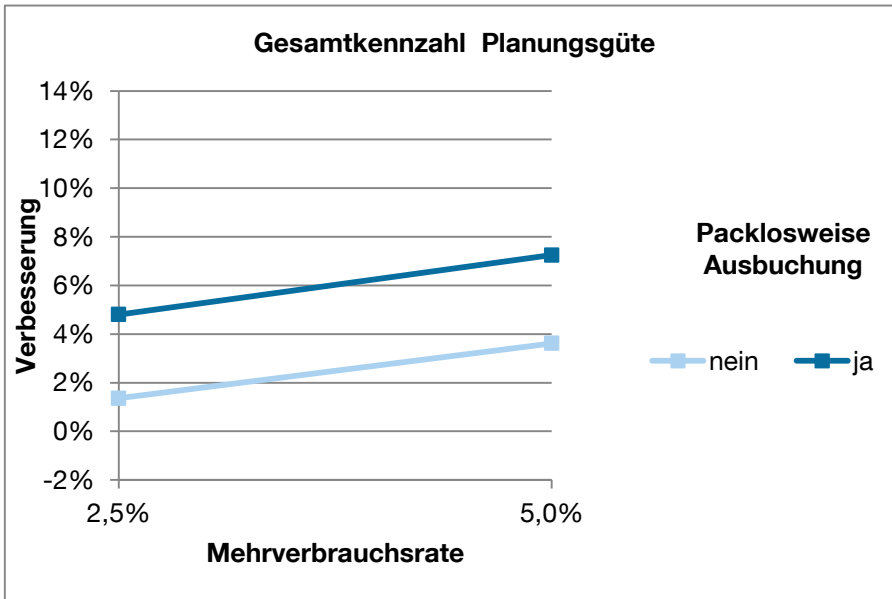


Abbildung 6-4: Gesamtkennzahl Planungsgüte in Abhängigkeit von der Mehrverbrauchsrate und der Art der Ausbuchung (in Anlehnung an [fml-13e])

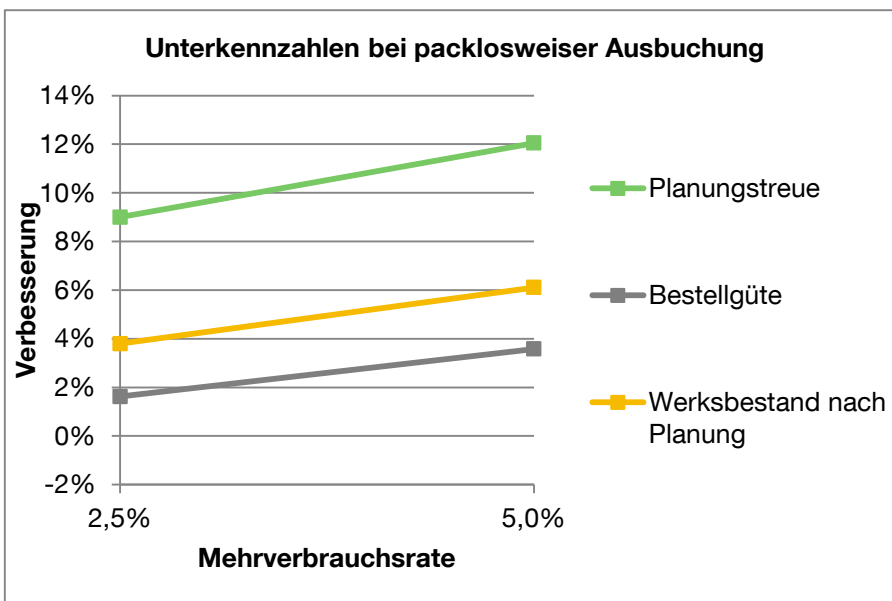


Abbildung 6-5: Unterkennzahlen bei packlosweiser Ausbuchung in Abhängigkeit der Mehrverbrauchsrate

6.1.4 Fazit

Bei mittleren bis hohen HU-Bedarfen bewirkt das Konzept des relativen Sicherheitsbedarfs im Schnitt eine leichte Senkung des Werksbestands und eine deutliche Stabilisierung der Abrufe. Ein Glättungseffekt auf die Bestellungen kann in geringem Maße ebenfalls nachgewiesen werden. Das Ergebnis zeigt aber auch die Grenzen des Systems mit Sicherheitsbedarf auf. Erfolgt die Belieferung eines Bauteils zu un-

regelmäßig, kann es einem System nur mit statischem SB und vergleichsweise kurzer Wiederbeschaffungszeit unterlegen sein.

6.2 Simulationsstudie zum Packalgorithmus für Komplettladungen

Hauptbestandteil des entwickelten Steuerungssystems ist der Packalgorithmus für lagerhaltige Komplettladungen. Per Online-Prinzip werden nach Bedarfszeitpunkt geordnete HUs auf Trailern platziert. Unabhängig von der Problem Instanz soll das Verfahren intuitiv reproduzierbare Beladeschemen mit hoher Laderaumausnutzung erzeugen. Aufgrund des negativen Effekts auf die Bestandsreichweite soll dies möglichst nicht durch Überspringen von HUs und Platzierung später benötigter HUs auf einem Trailer erreicht werden.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Studie ist es, den Beladealgorithmus simulativ an einem breiten Spektrum an Problem Instanzen anzuwenden und die Packergebnisse anhand geeigneter bestands- und auslastungsbezogener Kennzahlen zu beurteilen. Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit treffen zu können, muss für alle Problem Instanzen stets die Volumenrestriktion greifen. Aufgrund der beschränkten Intuitivität des Langsamdreheralgorithmus soll sich die Analyse zunächst auf den Schnelldreheralgorithmus konzentrieren. Hierbei gilt es, die beiden Algorithmus-Varianten „Drehen von Stapeln um 90 Grad“ und „Mischen von Abladestellen“ gegenüberzustellen sowie die Haupteinflussgrößen auf die Lösungsqualität zu identifizieren. Überdies ist aufzuzeigen, wie das Packergebnis durch Anwendung des Langsamdreheralgorithmus beeinflusst werden kann. Nicht zuletzt ist die Leistungsfähigkeit des Algorithmus anhand konkreter Problem Instanzen aus der Praxis zu überprüfen.

6.2.1 Simulationsmodell

Im Simulationsmodell werden sowohl der Schnelldreheralgorithmus als auch der Langsamdreheralgorithmus vollständig abgebildet (vgl. [fml-13d]). Um diese zu testen, bedarf es einer HU-Perlenkette. Sofern keine reale HU-Perlenkette vorliegt, wird diese durch Iteration einer zufälligen HU-Sequenz begrenzter Länge erzeugt. Hierbei wird vereinfachend von einer täglichen HU-Bedarfsrate von 100 mit äquidistanten

Bedarfszeitpunkten ausgegangen, denen die HUs entsprechend ihrer festgelegten Reihenfolge nacheinander zugeordnet werden. Die Bestimmung der HU-Sequenz erfolgt auf Basis von Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4.

Tabelle 6-3: Parameter und deren Ausprägungen in Abhängigkeit von der Versuchsreihe

Versuchsreihe	1			2			3		
Algorithmus	Mischen von Abladestellen/ Drehen von Stapeln			Mischen von Abladestellen			Mischen von Abladestellen/ Langsamdreher		
Parameter	Min	Max	# Stufen	Min	Max	# Stufen	Min	Max	# Stufen
Anzahl Bauteile	50	100	2	50	50	1	10	25	4
Anteil KLTs	0%	25%	2	0%	100%	6	0%	0%	1
Anzahl HUs	2	12	2	1	17	5	2	18	3
Hubfamilienfaktor	0%	100%	2	100%	100%	1	100%	100%	1
Anteil Stapelbarkeit	0%	100%	2	100%	100%	1	100%	100%	1
Anzahl Abladestellen	1	4	2	1	7	4	1	7	3
Anteil Schnelldreher	0%	25%	2	0%	0%	1			
max. Verbr.verhältnis							5	10	2
Verbrauchsstufen							2	6	3

Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über alle Parameter und deren mögliche Ausprägungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Versuchsreihe (siehe Abschnitt 6.2.3). Die Minimal- und Maximalwerte orientieren sich an Daten aus der Praxis am Beispiel der MTB. In den weiteren Versuchsreihen werden die Wertebereiche einzelner Parameter für eine differenziertere Analyse ausgeweitet und die Abstufung verfeinert.

Über „Anzahl Bauteile“ wird zu Beginn die Anzahl an Elementen festgelegt, aus denen sich die iterierende HU-Grundsequenz zusammensetzt. Anschließend werden die konkreten Eigenschaften eines jeden Elements zufällig bestimmt. Als erstes wird die HU-Größenkategorie festgelegt. Zur Wahl steht ein KLT oder GLT. Die Wahrscheinlichkeit für einen KLT entspricht dabei der entsprechenden Ausprägung des Parameters „KLT-Anteil“.

Tabelle 6-4: Mögliche HU-Dimensionen (in Anlehnung an [fml-13d] und [Li-2003])

HU-Größe	GLT	Länge [m]	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
		Breite [m]	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
		Höhe [m]	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
	KLT	Fläche [m ²]	0,2 x 0,3	0,3 x 0,4	0,4 x 0,6	0,6 x 0,8	
		Höhe [m]	0,15		0,28		

Danach wird eine HU-Nummer zufällig aus einer Zahlenreihe von 1 bis zur eingestellten HU-Anzahl gewählt. Hinter jeder GLT- bzw. KLT-HU-Nummer verbirgt sich ein Behälter mit konkreten Dimensionen und einer bestimmten Hubfamilie. Die Zuordnung einer HU-Nummer zu einem bestimmten Behältertyp erfolgt ebenfalls zufällig im Vorfeld der Erzeugung der Sequenz auf Basis von Tabelle 6-4. In dieser sind mögliche Abstufungen von Längen-, Breiten- und Höhenmaßen für GLTs und von Flächen- und Höhenmaßen für KLTs enthalten. Diese orientieren sich an typischen HUs der Automobilindustrie. Die Maße lassen sich nahezu beliebig zu unterschiedlichen Behältertypen kombinieren, lediglich gleichseitige Grundflächen sind nicht erlaubt.

Handelt es sich um einen GLT, ergibt sich aus der Multiplikation des Hubfamilienfaktors mit der HU-Anzahl die Anzahl unterschiedlicher GLT-Hubfamilien. Diesen werden zufällig unterschiedliche GLT-Grundflächen zugewiesen. Anschließend werden jeder HU-Nummer zufällig eine Hubfamilie mit zugehöriger Grundfläche und ein Höhenmaß zugeordnet. Bei KLTs dagegen wird davon ausgegangen, dass diese unabhängig vom konkreten Typ zu Gebinden mit einheitlicher Grundfläche der Maße einer Europalette zusammengestellt werden. Folglich ist die Hubfamilie bereits vorgegeben. Den KLT-HU-Nummern können dann direkt unterschiedliche KLT-Typen zugeordnet werden.

Anschließend wird bestimmt, ob die HU mit anderen HU-Typen innerhalb ihrer Hubfamilie stapelbar ist. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird durch die entsprechende Ausprägung des Parameters „Anteil Stapelbarkeit“ festgelegt. Es folgt die Zuordnung einer Abladestelle, wobei bei mehreren Möglichkeiten jede Abladestelle mit derselben Wahrscheinlichkeit gewählt wird. Darüber hinaus wird dem Sequenzelement eine Verbrauchsrate zugewiesen, die bei einer Standard-HU einfach und bei einem Schnelldreher mehrfach gewichtet wird. Konkret wird für Schnelldreher ein fünfmal so hoher Bedarf wie für Standard-HUs angenommen. Wird nun die Sequenz

gebildet, tauchen in dieser Schnelldreher mehrmals auf. Die Länge der Sequenz überschreitet folglich den Wert des Parameters „Anzahl Bauteile“.

Eine weitere Differenzierung hinsichtlich des Verbrauchs erfolgt in der dritten Versuchsreihe. Das maximale Verbrauchsverhältnis gibt das Verhältnis aus höchster und niedrigster Verbrauchsrate vor. Die Anzahl der Verbrauchsstufen bestimmt, wie fein die Verbrauchsraten zwischen Minimum und Maximum gestaffelt werden.

Bis auf die Simulation mit Daten realer Transportrelationen werden Gewichte von HUs und deren Inhalten nicht berücksichtigt. Begrenzender Faktor bei der Beladung ist stets das Volumen. Um die Komplexität des Simulationsmodells zu reduzieren, wird ebenso wenig die Anzahl der Lieferanten differenziert. Da die Lieferantenzahl aber die Anzahl der Abladestellen beeinflusst, wird sie letztlich durch diesen Parameter indirekt repräsentiert.

6.2.2 Kennzahlen

Nachfolgend werden sowohl auslastungsorientierte als auch bestandsbezogene Kennzahlen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Packalgorithmus für lagerhaltige Komplettladungen vorgestellt.

Auslastungsorientierte Kennzahlen

Während in den ersten drei Versuchsreihen nur Probleminstanzen betrachtet werden, bei denen bei der Beladung stets die Volumenrestriktion greift, kann bei den realen Fällen der begrenzende Faktor u.U. auch das Gewicht sein. Im ersten Fall wird nachfolgend von volumenausgelasteten, im zweiten von gewichtsausgelasteten Trailern gesprochen. Darüber hinaus besteht bei den Praxisbeispielen die Möglichkeit, dass mal das Volumen, mal das Gewicht die Zuladung limitiert. Alle drei Fälle müssen letztlich auch von den Kennzahlen abgedeckt werden. Hierzu werden die durchschnittliche Volumenauslastung \bar{v} , Gewichtsauslastung \bar{m} und Auslastung \bar{a} definiert. In den nachfolgenden Formeln entspricht n der Anzahl der Trailer, V_i dem Volumen aller HUs im Trailer i , M_i dem Gewicht aller HUs im Trailer i , V_{\max} dem maximalen Trailervolumen sowie M_{\max} der maximalen Trailernutzlast.

In der Formel zur durchschnittlichen Volumenauslastung wird über alle Trailer die Summe des Volumens aller verladenen HUs gebildet und zum maximal möglichen Gesamtvolumen ins Verhältnis gesetzt:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n \cdot V_{max}} \quad (6-1)$$

Analog berechnet sich die durchschnittliche Gewichtsauslastung:

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n \cdot M_{max}} \quad (6-2)$$

Zur Berechnung der durchschnittlichen Auslastung werden für jeden Trailer das Maximum aus Volumen- und Gewichtsauslastung ermittelt, die Werte über alle Trailer aufsummiert und durch die Anzahl der Trailer geteilt:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \max\left(\frac{V_i}{V_{max}}; \frac{M_i}{M_{max}}\right)}{n} \quad (6-3)$$

Zusätzlich wird die durchschnittliche Flächenauslastung \bar{f} definiert. Im direkten Vergleich mit der durchschnittlichen Volumenauslastung gibt sie Aufschluss darüber, wie effizient gestapelt bzw. die Höhe des Laderaums ausgenutzt wurde. Die Formel lautet:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n \cdot F_{max}} \quad (6-4)$$

F_i entspricht hierbei der durch die gebildeten Stapel im Trailer eingenommenen Fläche und F_{max} der gesamten Trailergrundfläche.

Bestandsbezogene Kennzahlen

Effekte auf die Bestandsreichweite ergeben sich aus dem Online-Packprinzip des entwickelten Algorithmus für Komplettladungen. Dies wird anhand Abbildung 6-6 erläutert. Anschließend werden die Kennzahlen definiert.

ersten Trailers zuzüglich eines Vielfachen des durchschnittlichen Lieferabstands. Dadurch soll eine Situation beschrieben werden, bei der die HU-Reihenfolge derart abgewandelt ist, dass im Mittel dieselbe Auslastung wie im realen Fall erreicht wird, die Abstände zwischen den Lieferungen äquidistant sind, jede HU ohne Überspringen direkt platziert werden kann und daher kein Trailer vorgezogen werden muss.

Das Überspringen von HUs bei noch freier Trailerkapazität führt nicht nur zu einer Trailervorverlegung, sondern auch zu einer Reichweitenverlängerung, indem auf später benötigte HUs zurückgegriffen wird, um den Trailer auszufüllen. Die Reichweite entspricht dabei der Differenz aus Nettobedarfszeitpunkt der ersten und letzten HU auf einem Trailer, siehe Abbildung. Zur Bestimmung der Reichweitenverlängerung wird von der Reichweite die minimale Reichweite abgezogen, die letztlich durch den mittleren Lieferabstand repräsentiert wird.

Der Unterschied zwischen der Verfrühung und der Reichweitenverlängerung liegt darin, dass von der Verfrühung alle HUs, von der Reichweitenverlängerung dagegen nur einzelne HUs einer Lieferung betroffen sind. Zudem ist bei der Reichweitenverlängerung tendenziell mit höheren Werten zu rechnen. Es ist bspw. der Fall denkbar, bei dem auf HUs bis weit in die Zukunft zurückgegriffen wird, um den Trailer voll auslasten zu können.

Mit $D_{i,i+1}$ als zeitlichem Abstand zwischen zwei Trailern und n als Anzahl aller betrachteten Trailer lässt sich der mittlere Lieferabstand \bar{D} formal wie folgt ausdrücken:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=2}^n D_{i,i+1}}{n-1} \quad (6-5)$$

Mit R_i als Reichweite des Trailers i erhält man für die mittlere absolute Reichweite \bar{R} :

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (6-6)$$

Die Formel zur relativen mittleren Reichweitenverlängerung \bar{r} lautet dann:

$$\bar{r} = \frac{\bar{R} - \bar{D}}{\bar{D}} \quad (6-7)$$

Mit VF_i als absolute Verfrühung des Trailers i ergibt sich für die mittlere absolute Verfrühung \overline{VF} :

$$\overline{VF} = \frac{\sum_{i=2}^n VF_i}{n-1} \quad (6-8)$$

Und für die mittlere relative Verfrüfung \overline{vf} :

$$\overline{vf} = \frac{\overline{VF}}{\overline{D}} \quad (6-9)$$

6.2.3 Experimente und Ergebnisse

Insgesamt werden drei Versuchsreihen mit zufällig generierten Probleminstanzen und eine Versuchsreihe mit Praxisbeispielen durchgeführt. In jedem Fall werden 8 Trailer berechnet, bis der Packalgorithmus endet. Bei den ersten drei Versuchsreihen werden jeweils alle Parameterkombinationen durchgespielt. Je Kombination werden das Beladeverfahren an 100 verschiedenen, zufällig erzeugten HU-Perlenketten getestet und jeweils die Kennzahlen ermittelt. Anschließend wird über alle Beobachtungen ein Mittelwert berechnet. Nachfolgend werden die einzelnen Versuchsreihen beschrieben und die entsprechenden Simulationsergebnisse präsentiert.

Parameter-Screening

Die erste Versuchsreihe dient dazu, die Streuung der Lösungsgüte der Simulationsergebnisse innerhalb einer Parameterkombination sowie kombinationsübergreifend aufzuzeigen. Zudem sollen die wesentlichen Einflussgrößen auf die Kennzahlen im Rahmen eines Parameter-Screenings identifiziert werden. Hierzu werden jedem Parameter jeweils ein Minimal- und Maximalwert zugewiesen, auf Zwischenstufen wird verzichtet. Jede auf einer bestimmten Parameterkombination beruhende HU-Perlenkette wird dem Packalgorithmus zweimal unterzogen. In beiden Fällen steht eine beliebig lange HU-Perlenkette zur Verfügung. Im ersten Fall wird angenommen, dass die Trailerreichweite nicht durch eine bestimmte maximale Vorgriffszeit beschränkt ist. Es werden alle Kennzahlen einschließlich der optimalen Reichweite simulativ bestimmt. Im zweiten Fall wird anschließend dieselbe HU-Perlenkette nochmal durchlaufen, jetzt aber mit der Einschränkung, dass die maximale Trailerreichweite auf die optimale Reichweite begrenzt ist.

Tabelle 6-5: Überblick über die Simulationsergebnisse der ersten Versuchsreihe

	Reichweite unbegrenzt				Reichweite begrenzt	
	Volumen- auslastung	Flächen- auslastung	Reichwei- tenverl. rel.	Verfrühung relativ	rel. Vol.- Auslastung	rel. Fläch.- Auslastung
Mittelwert	80%	91%	321%	26%	83%	90%
Minimum	76%	80%	0%	0%	33%	51%
Maximum	87%	96%	1222%	128%	100%	100%

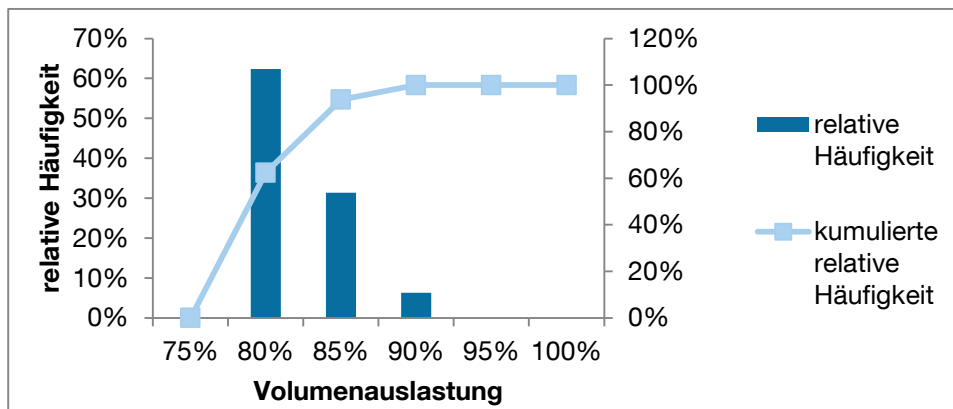


Abbildung 6-7: Relative Häufigkeiten von Auslastungsgraden bei unbegrenzter Reichweite

Einen Überblick über die Simulationsergebnisse gibt Tabelle 6-5. Bei unbegrenzter Reichweite kann im Mittel eine Auslastung von 80% erreicht werden. Die Spannweite reicht dabei von 76 bis 87%. Die Verteilung der Werte ist Abbildung 6-7 zu entnehmen. Knapp zwei Drittel der Werte bewegen sich zwischen 75 und 80%, etwa ein Drittel erreicht bis zu 85%, der Rest geht über diesen Wert noch hinaus. Bei den Zahlen handelt es sich jedoch um Durchschnittswerte. Bei einigen Probleminstanzen können daher deutlich höhere Werte bis nahezu Vollauslastung erreicht werden. Ebenso gibt es Fälle mit gegenüber dem Mittelwert wesentlich geringerer Auslastung. Die Spannweite im Verhältnis zur mittleren Auslastung beträgt dabei durchschnittlich 33%. Dies zeigt, dass die zufällig ausgewählten HU-Typen einer jeden Ausprägung der HU-Perlenkette einer bestimmten Parameterkombination großen Einfluss haben. Bei ungünstigen Seitenverhältnissen und Höhenmaßen bleibt nicht unerhebliche Restfläche bzw. -höhe übrig, während bei Perlenketten mit modularen HUs der Laderaum fast vollständig ausgefüllt wird. Da in der Praxis vorwiegend modulare HUs zum Einsatz kommen, lässt dies für reale Anwendungsfälle entsprechend gute Ergebnisse erwarten.

Die Einträge zeigen aber auch, dass hohe Auslastungen oft auf Kosten hoher Reichweiten erreicht werden. Die optimale Reichweite erhöht sich maximal um den Faktor 12, im Mittel beträgt die relative Reichweitenverlängerung 321%. Mit dem Blick auf die relative Verfrühung relativieren sich diese Zahlen jedoch. Im Schnitt kommen die Trailer lediglich knapp ein Viertel des Lieferabstandes früher an, maximal 128%.

Wenn die Reichweite auf den Wert der optimalen Reichweite begrenzt wird, werden im Mittel nur noch 83% der Auslastung ohne Reichweitenbegrenzung erreicht. Dieser relativ niedrige Wert geht jedoch primär auf Ausreißer nach unten infolge spezieller Probleminstanzen mit hoher Anzahl unterschiedlicher HUs und Abladestellen zurück. In vielen Fällen reduziert sich die ursprüngliche Auslastung nur geringfügig. Hinsichtlich der Flächenauslastung sind ähnliche Effekte zu verzeichnen.

Tabelle 6-6: Einfluss der Parameter auf die Kennzahlen

	Reichweite unbegrenzt			RW be- grenzt	Summe
	Volumen- auslastung	Reichwei- tenverl. rel.	Verfrühung relativ	Volumen- auslastung	
Routine	5	7	5	5	22
Anzahl Bauteile	5	8	7	7	27
Anteil KLTs	1	2	4	4	11
Anzahl HUs	2	3	1	1	7
Hubfamilienfaktor	2	4	3	3	12
Anteil Stapelbarkeit	4	6	5	5	20
Anzahl Abladestellen	5	1	2	2	10
Anteil Schnelldreher	5	5	8	7	25

Der Einfluss der Parameter auf die Kennzahlen ist Tabelle 6-6 zu entnehmen. Für jede Kennzahl wird eine Ranking über alle Parameter gebildet und zum Schluss die Gesamtsumme gebildet. Das Ranking basiert auf der Höhe der betragsmäßigen Differenz des jeweiligen durchschnittlichen Kennzahlenwerts mit erster Parameterausprägung vom Wert mit zweiter Ausprägung. Nach absteigendem Wert werden die Ränge vergeben. Je niedriger die Summe der Ränge ist, desto höher ist der Effekt insgesamt auf alle Zielgrößen.

Das Ergebnis zeigt, dass diese von der Anzahl HUs, der Anzahl Abladestellen, dem Anteil KLTs sowie dem Hubfamilienfaktor am meisten beeinflusst werden (siehe Tabelle). Eine hohe Anzahl von HUs nichtmodularer Abmessungen wirken sich beson-

ders negativ auf die Kennzahlen aus. Dies verstärkt sich insbesondere im Wechselspiel mit der Anzahl an Abladestellen. Ein hoher KLT-Anteil hat eine deutliche Erhöhung der Trailerreichweite zur Folge. Die beiden Routinen „Mischen von Abladestellen“ und „Drehen von Stapeln um 90 Grad“ verhalten sich im Mittel nahezu identisch bezüglich Auslastungsgrößen. Dennoch gibt es Unterschiede. Bei geringer Behältervielfalt und vielen Abladestellen liefert das Mischen von Abladestellen bessere Ergebnisse, bei hoher Heterogenität ist dagegen das Drehen von Stapeln zu bevorzugen. Bei gleicher Auslastung führt das Mischen von Abladestellen insgesamt zu leicht niedrigerer Reichweite und Verfrüfung. Daher wird in den weiteren Versuchsreihen nur noch diese Variante des Schnelldreher-Algorithmus betrachtet.

Effekte der Haupteinflussfaktoren

In der zweiten Versuchsreihe werden die Parameter mit dem größten Einfluss einer Feinuntersuchung unterzogen. Hierzu wird deren Wertebereich vergrößert und in mehrere Stufen aufgeteilt. Alle anderen Parameter werden nicht variiert. Diesen wird jeweils einer der beiden Ausprägungen der ersten Versuchsreihe zugewiesen. Die Wahl richtet sich nach dem Einfluss auf das Laufzeitverhalten des Simulationsmodells. Wie bei der ersten Versuchsreihe werden die Kennzahlen für begrenzte und unbegrenzte Reichweiten bestimmt. Als Reichweitenbegrenzung wird aber nicht nur die einfache, sondern auch die zwei- bis vierfache optimale Reichweite betrachtet. Die unterschiedlichen Vielfachen werden nachfolgend als Reichweitenbegrenzungsfaktoren (RBF) bezeichnet. Es werden ausgewählte Grafiken zur Ergebnisdarstellung präsentiert. Zusätzliche Analysen finden sich in [fml-13d].

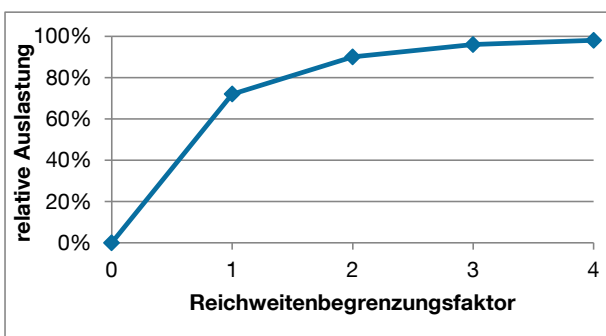


Abbildung 6-8: Abhängigkeit der Auslastung vom Reichweitenbegrenzungsfaktor

Die Auswirkungen des RBF auf die Auslastung zeigt Abbildung 6-8. Die Auslastung wird hierbei als relative Größe im Verhältnis zur maximal erreichbaren Auslastung

ohne Reichweitenbegrenzung angegeben. Die Ergebniskurve zeigt eine streng monoton abnehmende Steigung. Bereits bei einem RBF von 2 kann im Schnitt 90% der maximal möglichen Auslastung erreicht werden kann. Bei RBF 4 ist die maximal mögliche Auslastung nahezu erreicht.

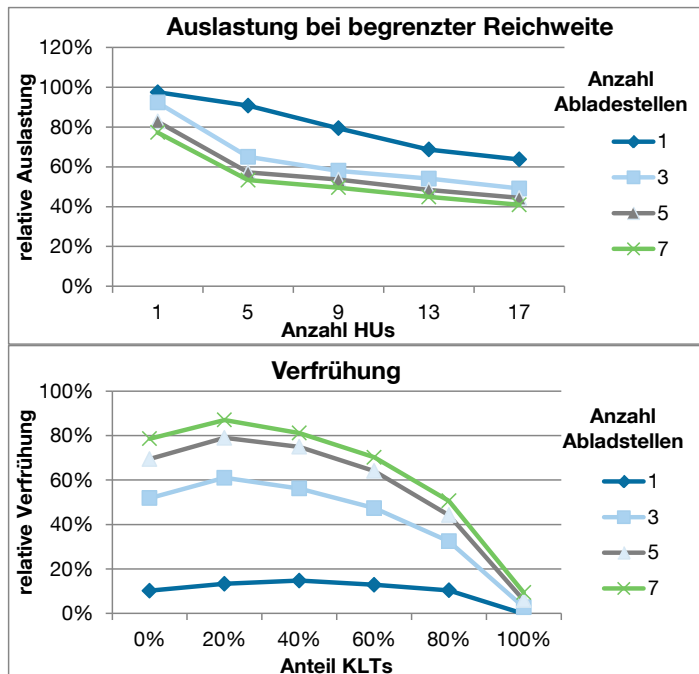


Abbildung 6-9: Auslastung und Verfrüfung in Abhängigkeit von den Anzahl HUs und der Anzahl Abladestellen bzw. von KLT-Anteil und der Anzahl Abladestellen (in Anlehnung an [fml-13d])

Abbildung 6-9 zeigt im oberen Graphen den Einfluss der Anzahl HUs und der Anzahl Abladestellen auf die relative Auslastung bei auf die optimale Reichweite begrenzter Reichweite und einem KLT-Anteil von 20%. Mit zunehmender HU-Anzahl verringert sich die relative Auslastung beträchtlich. Der Effekt verstärkt sich mit steigender Anzahl an Abladestellen, wobei die Höhe der Verschlechterung abnimmt. Im unteren Graphen wird der Effekt des KLT-Anteils und der Anzahl Abladestellen auf die relative Verfrüfung dargestellt. Analog zur oberen Grafik verschlechtert sich die Verfrüfung mit zunehmender Anzahl an Abladestellen, ebenso reduziert sich der Abstand der Kurven. Während jedoch im oberen Fall die Kurven streng monoton fallen, ist bei der unteren Grafik ein Peak bei 20% KLT-Anteil zu verzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass KLT-Paletten stets Euro-Maß haben und lediglich mit HUs derselben Abmessungen in gemischten Hügen kombiniert werden können. Es sinkt also die Wahrscheinlichkeit, KLT-Europaletten mit anderen GLT-HUs zu mischen. Zudem ist der KLT-Anteil relativ gering. Folglich müssen mehr GLT-HUs übersprungen werden, um letztlich mit weiteren KLTs den Europaletten-Hub auszufüllen. Mit höherem

KLT-Anteil wird dieser negative Effekt jedoch überkompensiert. Aufgrund ihrer geringen Größe und optimalen Kombinierbarkeit in Mischhüben dank Europaletten-Maß finden sie häufig noch Platz und müssen daher nicht übersprungen werden. In der Folge nimmt die Verfrühung ab.

Effekte des Langsamdreher-Algorithmus

Durch den Langsamdreher-Algorithmus ist es möglich, im Vergleich zum Schnelldreher-Algorithmus das Transportlos auf einen Stapel zu reduzieren. Hieraus wird ein positiver Effekt auf die Bestandskennzahlen erwartet. Um dies zu überprüfen, werden in der vierten Versuchsreihe unterschiedliche Langsamdreher-Anteile getestet. Der Langsamdreher-Anteil bezieht sich hierbei auf alle Hubfamilie-Abladestelle-Kombinationen. Von diesen werden anteilig jene Kombinationen mit der geringsten durchschnittlichen Hub-Anzahl je Transport zu einem gemeinsamen Langsamdreherblock zusammengefasst. Um Einflüsse des HU-Umschlags zu messen, werden die Parameter „maximales Verbrauchsverhältnis“ und „Verbrauchsstufen“ eingeführt, siehe hierzu auch die Beschreibung der Parameter in Abschnitt 6.2.1. Andere Einflüsse sollen möglichst abgestellt werden. Daher wird der KLT-Anteil auf 0% gesetzt. Die anderen Parameterwerte orientieren sich an Versuchsreihe zwei. Die minimale Anzahl an unterschiedlichen HUs wird jedoch auf zwei angehoben, da ansonsten eine partielle Anwendung des Langsamdreher-Algorithmus nicht möglich ist. Da sich die möglichen hohen Verbrauchsunterschiede in einer langen Sequenz, aus der die HU-Perlenkette gebildet wird, niederschlagen, wird zu deren Begrenzung die Anzahl der Bauteile reduziert. Auf diese Weise erreicht die Sequenz eine Länge in Größenordnung des mittleren Lieferabstands, sodass im Schnitt jeder HU-Typ im betrachteten Abschnitt der HU-Perlenkette zur Beladung eines bestimmten Trailers vorkommt.

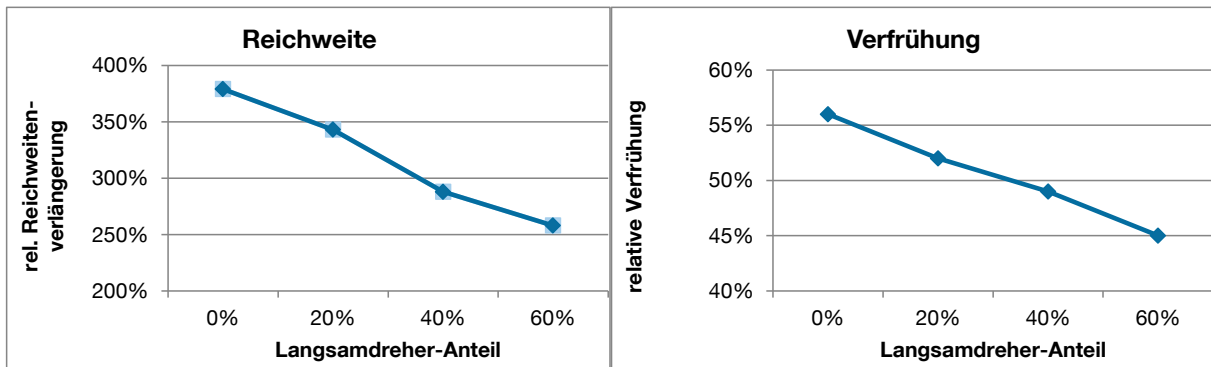


Abbildung 6-10: Einfluss auf Reichweite und Verfrüfung durch Anwendung des Langsamdreher-Algorithmus

Den Einfluss auf die bestandsbezogenen Kennzahlen zeigt Abbildung 6-10. Bei einem Langsamdreher-Anteil von 60% kann die relative Verfrüfung im Schnitt um 20%, die relative Reichweitenverlängerung sogar um 32% reduziert werden. Die relative Reichweitenverlängerung in Abhängigkeit vom Langsamdreher-Anteil und der Anzahl Verbrauchsstufen wird in Abbildung 6-11 dargestellt. Während bei 0% Langsamdreher-Anteil die Kurven noch deutlich auseinander liegen, nähern sie sich mit höherem Anteil immer mehr an. Je feiner die Verbräuche gestaffelt sind, desto geringer fällt insgesamt die Reichweitenerhöhung aus.

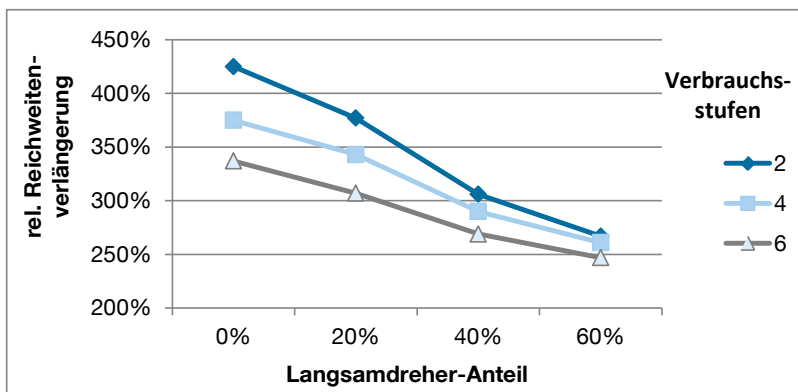


Abbildung 6-11: Relative Reichweitenverlängerung in Abhängigkeit vom Langsamdreher-Anteil und der Anzahl an Verbrauchsstufen

Praxisbeispiele

Neben den Parameterstudien wird der Packalgorithmus auch noch am Beispiel der MTB getestet. Aufgrund seiner Intuitivität wird ausschließlich der Schnelldreher-Algorithmus angewandt, als Variante wird das Mischen von Abladestellen gewählt. Es werden dieselben Transportrelationen betrachtet wie bei der Potenzialabschätzung aus Abschnitt 5.8.2. Die Anzahl unterschiedlicher HU-Typen der untersuchten

Lieferanten beträgt mindestens 1, maximal 10 und im Schnitt 4,5. Häufig werden HU-Typen mit modularen Abmessungen eingesetzt. Die Anzahl der Hubfamilien beträgt im Mittel 3,1, die der Abladestellen 3,9. Durchschnittlich sind 14% der eingesetzten HUs KLTs. Die HU-Perlenkette ist je Rechenlauf entsprechend einem eingefrorenen Horizont von elf Tagen und einer angenommenen Bedarfsvorlaufzeit von zwei Tagen auf neun Tage begrenzt. In den in Tabelle 6-7 dargestellten Ergebnissen wird zwischen gewichts-, volumen- und gemischtausgelasteten Lieferrelationen unterschieden (vgl. auch [Con-2013c]). Wie zu erwarten war, liegt die Auslastung bei gewichtsausgelasteten Trailern ohne Reichweitenbegrenzung bei nahezu 100%. Bei volumenausgelasteten Transporten beträgt die Auslastung im Mittel 89%, bei gemischtausgelasteten Transporten 90%. Bei einem RBF von 1,5 werden noch immer 95%, 88% bzw. 86% des maximal möglichen Ergebnisses erreicht. Eine Verfrühung kann nicht bestimmt werden, da bei den untersuchten Lieferanten das Bedarfsniveau schwankt und folglich die Ergebnisse verzerrt würden.

Insgesamt liegen die ermittelten Auslastungen im niedrigen bis mittleren zweistelligen Prozentbereich über den gegenwärtigen Auslastungen der MTB. Darüber hinaus bleibt zu erwähnen, dass die Annahmen der Potenzialabschätzung aus Abschnitt 5.8.2 hinsichtlich möglicher Auslastungen nach Einführung des entwickelten Konzepts größtenteils bestätigt werden.

Tabelle 6-7: Erreichte Auslastungen bei den Probleminstanzen aus der Praxis

begrenzender Faktor	ohne Reichweitenbegrenzung			Reichweite begrenzt (Faktor=1,5)
	durchschn. Auslastung	minimale Auslastung	maximale Auslastung	relative Auslastung
Gewicht	99%	96%	100%	95%
Volumen	89%	80%	95%	88%
gemischt	90%	76%	97%	86%

6.2.4 Fazit

Die Parameterstudien zeigen, dass hohe Auslastungen erreicht werden können, der Algorithmus jedoch bei hoher HU-Heterogenität und hoher Anzahl an Abladestellen an seine Grenzen stößt. Zudem werden die hohen Auslastungen zum Teil durch lange Trailerreichweiten erkauft. Diese können jedoch ohne große Einbußen bei der Auslastung begrenzt werden.

Der Langsamdreher-Algorithmus kann seinen Zweck erfüllen. Insbesondere die Trailerreichweite kann erheblich reduziert werden. Gleichzeitig zeigt der Algorithmus keine Nachteile hinsichtlich der Auslastung. Eine hohe Ergebnisgüte ist bei den Praxisbeispielen zu verzeichnen. Dies ist vor allem auf die meist modularen Abmessungen der eingesetzten HUs und eine gute Kombinierbarkeit zu Mischhüben zurückzuführen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Aufgrund der Produktivitätsgewinne in der Fertigung und Montage durch Lean Production und der zunehmenden Bedeutung der Beschaffungslogistik im gesamten Wertschöpfungsprozess ist die Fahrzeugindustrie bestrebt, schlanke Prinzipien und Methoden auch auf die Versorgungsprozesse anzuwenden. Doch während durch die Einführung von JIT/JIS eine effiziente Belieferung ausgewählter Teilefamilien erreicht werden konnte, ist der lagerhaltige Versorgungsprozess weiterhin durch vergleichsweise hohen Transportaufwand sowie hohe Bestände geprägt. Hieraus ergab sich die Zielsetzung der vorliegenden Abhandlung, ein Abrufsteuerungssystem zur schlanken Belieferung auch von Lagerteilen zu entwerfen.

Zu diesem Zwecke erfolgte zunächst eine Bestandsaufnahme grundlegender Beschaffungskonzepte der Automobilindustrie. Als erstes wurden die Prinzipien von Lean Logistics und das Konzept der stabilen Perlenkette als ein wichtiger Baustein eines schlanken Produktions- und Logistiksystems vorgestellt. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Ausprägungen der physischen und informationstechnischen Prozesse in der Beschaffung präsentiert. Hierbei wurden Argumente aufgeführt, die eine Lagerhaltung in vielen Fällen unumgänglich machen. Zudem konnten Teilladungen und Komplettladungen als Grundtypen der Lagerbelieferung identifiziert werden, auf die sich letztlich steuerungstechnische Optimierungsmaßnahmen zu konzentrieren haben. Als wesentliche Dispositionsverfahren wurden die Bedarfs- und Verbrauchssteuerung vorgestellt. Anschließend wurde auf bestehende Methoden zur Erhöhung der Transportauslastung eingegangen.

Im nächsten Abschnitt wurden aus den Lean-Prinzipien und Analysen existierender Grundkonzepte die Anforderungen an das zu entwickelnde System abgeleitet. U.a. soll dieses fixe Mengen bei Teilladungen und voll ausgelastete LKW bei Komplettladungen abrufen. Alle Belieferungsformen und Transportmodi sollen gleichermaßen unterstützt werden, zudem soll die Disposition auf einer Bedarfssteuerung beruhen. Letztere stellte sich in einer Simulationsstudie als vorteilhaft gegenüber einer Verbrauchssteuerung heraus. Es konnte gezeigt werden, dass zur Sicherstellung der Materialversorgung unter identischen Rahmenbedingungen geringere Bestände

notwendig sind. Hinsichtlich eines für Komplettladungen zu entwickelnden Packalgorithmus wurden u.a. Forderungen nach intuitiv reproduzierbaren Beladeschemen und einer Berücksichtigung aller relevanten Praxisrestriktionen aufgestellt.

Im Anschluss erfolgte ein Abgleich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen, um den Entwicklungsbedarf abzuleiten. Hierbei zeigte sich, dass auf einer Zeitscheibensteuerung basierende Konzepte nicht geeignet sind, um stets fixe Teilladungen bzw. hochausgelastete Trailer abzurufen. Bei gängigen Packverfahren konnten überdies eine geringe Intuitivität und eine zum Teil unzureichende Berücksichtigung der Praxisrestriktionen festgestellt werden. Lediglich eine trailerbasierte Abrufsteuerung kann einen größeren Teil der Anforderungen erfüllen, jedoch beschränkt sich deren Anwendung auf JIT/JIS-Belieferungen im Direktverkehr.

Diese diente als Ausgangspunkt für eine Neuentwicklung, die im anschließenden Kapitel vorgestellt wurde. Hierbei handelt es sich um ein umfassendes System auf Basis einer Bedarfssteuerung, das nicht nur Algorithmen zur Nettobedarfs- und Bestellrechnung beinhaltet, sondern u.a. auch Konzepte zur Milkrunterminierung und -kommunikation, zum Monitoring sowie zur integrierten Leergutdisposition bei Milkruns bereithält.

Mit der entwickelten Nettobedarfsrechnung können erstmalig aktiv Sicherheiten in die Supply-Chain eingesteuert werden, die der Reduktion von Beständen und Abrufnervosität dienen. Die Bestellrechnung enthält u.a. Packalgorithmen für Teil- und Komplettladungen, die analog zur trailerbasierten JIT/JIS-Abrufsteuerung auf einer stabilen HU-Perlenkette und dem Online-Packprinzip fußen. Dies ermöglicht es, lagerlose und lagerhaltige Teileumfänge gemeinsam zu disponieren und anliefern zu lassen. Mit dem Konzept wurde eine bedarfsorientierte Mengensteuerung realisiert, die bei Teilladungen Bestellungen zum gewünschten Gewicht, Volumen bzw. zu den gewünschten Lademetern zusammenfasst.

Der Algorithmus für Komplettladungen berücksichtigt sowohl die Gewichts- als auch Volumenrestriktion eines Trailerladerraumes. Die Bildung von Hüben sorgt für einen aus Ladungssicherungssicht aufwandsarmen Formschluss. Gleichzeitig reduzieren spezielle Strategien das Transportlos je HU und Abladestelle. Das Verfahren ist derart gestaltet, dass die im Rechner erzeugten Packmuster per einfache Beladeregeln intuitiv reproduzierbar sind. Die Übermittlung eines exakten Lageplans der HUs an die Lieferanten wird dadurch obsolet. Für den Fall einer hohen Heterogenität der abgerufenen HUs und einer hohen Anzahl an Abladestellen wurde ergänzend ein

Algorithmus entwickelt, mit dem das Transportlos weiter gesenkt und folglich die Trailerreichweite begrenzt werden kann.

Bei der nachfolgenden Konzeptbewertung konnte insgesamt ein hoher Erfüllungsgrad nahezu aller Anforderungen festgestellt werden. Am Beispiel des Nutzfahrzeugherstellers MTB konnte überdies ein hohes monetäres Einsparpotenzial durch die Einführung des neuen Systems ermittelt werden.

Zur Konzeptvalidierung und quantitativen Analyse wurde die ereignisorientierte Ablaufsimulation eingesetzt. Hierzu wurden sowohl die Nettobedarfsrechnung als auch der Packalgorithmus für Komplettladungen in Simulationsmodellen abgebildet. Aufgrund der einfachen Struktur wurde auf das Testen des Verfahrens für Teilladungen bewusst verzichtet. Die Bewertung der Algorithmen erfolgte anhand geeigneter Kennzahlen, die fast ausschließlich neu entwickelt wurden.

Bezüglich der Nettobedarfsrechnung konnte in den Simulationen der erwartete Effekt der Senkung von Beständen und Abrufnervosität durch das Konzept des Sicherheitsbedarfs weitgehend bestätigt werden. Auf der Betrachtungsebene von Wertebereichen der Eingangsparameter kann eine Erhöhung der Abrufstabilität um bis zu 22% und eine Reduktion des mittleren Bestands um bis zu 5% festgestellt werden. Gleichwohl stößt das System bei im Vergleich zur Wiederbeschaffungszeit langen Lieferabständen an seine Grenzen.

Der Packalgorithmus für Komplettladungen wurde anhand auslastungs- und bestandsbezogener Kennzahlen beurteilt. In den Parameterstudien konnte bei unbegrenzter Trailerreichweite und HUs mit modularen Abmessungen eine sehr hohe bis nahezu Vollauslastung festgestellt werden. Hohe Heterogenität der HUs und nicht-modulare Außenmaße reduzieren die Auslastung jedoch um bis zu 33 Prozentpunkte. Zudem sind dann meist hohe Trailerreichweiten zu verzeichnen. Diese können jedoch bei nur leichten Rückgängen der Auslastung begrenzt werden.

Die erwarteten Auswirkungen des zusätzlich entwickelten Algorithmus, der reduzierte Transportlose nach sich zieht, konnten simulativ bestätigt werden. Ohne Einbußen bei der Auslastung kann die Trailerreichweite um bis zu 32% reduziert werden.

Bei Probleminstanzen aus der Praxis konnten sowohl bei unbegrenzter als auch begrenzter Reichweite hinsichtlich der Auslastungs- und Bestandskennzahlen gute bis

sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Gründe hierfür sind vorwiegend modulare Abmessungen und eine gute Kombinierbarkeit der HUs zu Mischhüben.

7.2 Ausblick

In den Simulationsstudien konnten die entwickelten Algorithmen ihre Leistungsfähigkeit demonstrieren. Eine erste Implementierung und Anwendung in der Automobilindustrie erfolgt derzeit beim Nutzfahrzeughersteller MTB. Hierbei muss sich zeigen, inwieweit sich das Konzept in der Praxis bewähren kann. Anhand konkreter Lieferrelationen ist zu untersuchen, wie gut der Belader berechnete Beladeschemen reproduzieren kann, welche Auslastungen und Reichweiten erreicht werden und an welchen Stellen das Konzept an seine Grenzen stößt. Darauf gilt es für etwaige Weiterentwicklungen aufzubauen.

Aktuell sieht das Konzept statisch festgelegte Zuordnungen von Lieferanten zu Belieferungskonzepten und Transportmodi vor, die in regelmäßigen Abständen überplant werden müssen. Leistungsfähige sowie in der Praxis anwendbare Entscheidungsmodelle, die Neuzuordnungen automatisch vorschlagen, liegen jedoch nicht vor. Hieraus ergibt sich entsprechender Entwicklungsbedarf.

Darüber hinaus sind bei Milkruns nicht nur der Transportmodus, sondern auch feste Routen vorgegeben. Unter veränderten Rahmenbedingungen können die im Zuge einer Tourenplanung einmalig bestimmten Routen jedoch nicht mehr optimal sein. Es gilt daher zu untersuchen, ob bzw. wie eine Dynamisierung von Routen innerhalb des Modus Milkrun mit dem entwickelten Konzept vereinbar ist.

Weitere Eigenschaft des entwickelten Steuerungssystems ist die Möglichkeit zur statischen Festlegung von Anlieferzeitfenstern. Hierdurch kann Anhäufungen von Anlieferungen entgegengewirkt werden, die bei Vorliegen einer Auftragsperlenkette und exakter Bestimmung von Anlieferzeiten auf Basis minutengenaue Bedarfsinformationen auftreten können. Durch vorgegebene Zeitfenster werden Lieferungen jedoch um bis zu einen Tag vorgezogen, einhergehend mit einer entsprechenden Erhöhung der Bestandsreichweiten. Es sind daher Algorithmen zu entwickeln, mit denen auf Basis exakt berechneter Anlieferzeitpunkte eine Glättung des Wareneingangs mit zeitlich begrenzter Vorverlegung der Termine erzielt werden kann.

Weiterer Entwicklungsbedarf ergibt sich hinsichtlich des Konzepts des Supply-Chain-Sicherheitsbedarfs im Rahmen der Nettobedarfsrechnung. Über das bestehende Verfahren hinaus sind noch zahlreiche weitere Spielarten zur Einplanung von Sicherheiten und Verrechnung mit Bedarfen bei Mehrverbräuchen denkbar. Deren Wirksamkeit gilt es entsprechend in Simulationsstudien und Feldversuchen zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [Aar-2003] Aarts, E.; Lenstra, J.: Local Search in Combinatorial Optimization. In: Princeton University Press, 2003.
- [Ali-2005] Alicke, K.: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken - Unternehmensübergreifendes Supply-Chain-Management ; mit 27 Tabellen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.
- [Arn-2002] Arntz, A.: Übersicht über die Inventurverfahren - Kostenreduzierung durch den Einsatz geeigneter Inventurverfahren. Eschborn: AWW, 2002.
- [Arn-2008] Arnold, D.: Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer, 2008.
- [Arn-2013] Arnolds, H.; Heege, F.; Röh, C.; Tussing, W.: Materialwirtschaft und Einkauf - Grundlagen - Spezialthemen - Übungen. 12., akt. u. überarb. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
- [Bak-1980] Baker, B. S.; Coffman, Jr., E. G.; Rivest, R. L.: Orthogonal Packings in Two Dimensions. In: SIAM Journal on Computing, Jg. 9 (1980)4, S. 846–855.
- [Bak-1983] Baker, B. S.; Schwarz, J. S.: Shelf Algorithms for Two-Dimensional Packing Problems. In: SIAM Journal on Computing, Jg. 12 (1983)3, S. 508–525.
- [Ban-2006] Bankhofer, U.; Wilhelm, M.; Williner, G.: Modelle und Methoden der Tourenplanung. Ilmenau: Univ.-Bibliothek; Techn. Univ., Inst. für Wirtschaftsinformatik, 2006.
- [Bau-2004] Baudin, M.: Lean logistics - The nuts and bolts of delivering materials and goods. New York, NY: Productivity Press, 2004.
- [Bau-2007] Baumgartner, H.: Schulung Supply Cockpit - Logistikplanung. Herausgegeben von: MAN Truck & Bus AG, 2007.

- [Ber-2002] Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen (BGF): BGI 649 - Ladungssicherung auf Fahrzeugen - Ein Handbuch für Unternehmer, Einsatzplaner, Fahr- und Ladepersonal. Herausgegeben von: Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen (BGF), 2002.
- [Bis-1995a] Bischoff, E.; Ratcliff, M.: Issues in the development of approaches to container loading. In: Omega, Jg. 23 (1995)4, S. 377–390.
- [Bis-1995b] Bischoff, E.; Janetz, F.; Ratcliff, M.: Loading pallets with non-identical items. In: European Journal of Operational Research, Jg. 84 (1995)3, S. 681–692.
- [Bor-1995] Bortfeldt, A.: Informierte Graphensuchverfahren und genetische Algorithmen zur Lösung von Containerbeladeproblemen. In: Köster, 1995.
- [Bor-1998] Bortfeldt, A.; Gehring, H.: Applying Tabu Search to Container Loading Problems. In: Kischka, P.; Lorenz, H.-W.; Derigs, U.; Domschke, W.; Kleinschmidt, P.; Möhring, R. (Hrsg): Operations Research Proceedings 1997. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, S. 533–538.
- [Bor-2012] Bortfeldt, A.; Wäscher, G.: Container Loading Problems - A State-of-the-Art Review. FEMM Working Papers 120007, 2012.
- [Bul-1994] Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.: Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Stuttgart: Teubner, 1994.
- [Bun-1999] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: CTU-Packrichtlinien - Richtlinien für das Packen von Ladung außer Schüttgut in oder auf Beförderungseinheiten (CTUs) bei Beförderung mit allen Verkehrsträgern zu Wasser und zu Lande. Dortmund: Verkehrsblattverlag. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1999.
- [Cha-1983] Chazelle, B.: The Bottom-Left Bin-Packing Heuristic: An Efficient Implementation. In: IEEE Transactions on Computers, C-32 (1983)8, S. 697–707.

- [Chr-1977] Christofides, N.; Whitlock, C.: An Algorithm for Two-Dimensional Cutting Problems. In: Operations Research, Jg. 25 (1977) 1, S. 30–44.
- [Cla-1964] Clarke, G.; Wright, J. W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. In: Operations Research, Jg. 12 (1964)4, S. 568–581.
- [Cla-2007] Clautiaux, F.; Carlier, J.; Moukrim, A.: A new exact method for the two-dimensional orthogonal packing problem. In: European Journal of Operational Research, Jg. 183 (2007)3, S. 1196–1211.
- [Cof-1980] Coffman, Jr., E. G.; Garey, M. R.; Johnson, D. S.; Tarjan, R. E.: Performance Bounds for Level-Oriented Two-Dimensional Packing Algorithms. In: SIAM Journal on Computing, Jg. 9 (1980)4, S. 808–826.
- [Cof-1990] Coffman, E.; Shor, P.: Average-case analysis of cutting and packing in two dimensions. In: European Journal of Operational Research, Jg. 44 (1990)2, S. 134–144.
- [Con-2012a] Conze, M.; Meißner, S.; Günthner, W. A.: Effiziente Steuerung dynamischer Milkruns auf Basis einer stabilen Auftragsperlenkette. Dortmund: 29.11.2012
- [Con-2012b] Conze, M.; Sailer, T.; Günthner, W. A.: Order pearl chain controlled milk runs and pick-up-tours by vehicle producers. In: Dukic, G. (Hrsg): International Conference on Industrial Logistics, Zadar, 2012.
- [Con-2013a] Conze, M.: Dokumentation Potenzialanalyse SupplyCockpit lagerhaltig. München: MAN Truck & Bus AG, 2013.
- [Con-2013b] Conze, M.: MANTUM-Steuerkreis - Trailerkonzepte für B- und C-Teilfamilien zur schlanken Montageversorgung. München: MAN Truck & Bus AG, 30.01.2013
- [Con-2013c] Conze, M.: MANTUM-Steuerkreis - Trailerkonzepte für B- und C-Teilfamilien zur schlanken Montageversorgung. München: MAN Truck & Bus AG, 10.06.2013

- [Cop-2012] Copaciu, F.: Wirkzusammenhänge der Perlenkettenmethode in der Automobilindustrie. Dortmund: 29.11.2012
- [Coy-2011] Coyle, J. J.: Transportation - A supply chain perspective. 7. Auflage. Mason, OH: South-Western Cengage Learning, 2011.
- [Cro-1958] Croes, G. A.: A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. In: Operations Research, Jg. 6 (1958)6, S. 791–812.
- [Csi-1989] Csirik, J.: An on-line algorithm for variable-sized bin packing. In: Acta Informatica, Jg. 26 (1989)8, S. 697–709.
- [Csi-1997] Csirik, J.; Woeginger, G. J.: Shelf algorithms for on-line strip packing. In: Information Processing Letters, Jg. 63 (1997)4, S. 171–175.
- [Dai-2008] Daimler AG: Daimler Ladungssicherung 9.5 - Ladungssicherung beim Transport von Ladungsträgern auf Nutzfahrzeugen im Straßenverkehr. Herausgegeben von: Daimler AG, 2008.
- [Daw-2008] Dawid, A.: Entwicklung und Analyse eines Verfahrens zur effizienten Lösung des Tourenplanungs- und Laderaumoptimierungsproblems. Diplomarbeit; Algorithm Engineering, Technische Universität Dortmund. Dortmund, 2008.
- [Dic-2009] Dickmann, P.: Schlanker Materialfluss mit Lean-Production, Kanban und Innovationen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [DIN 15141] DIN 15141:1986: Paletten. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [DIN 15142] DIN 15142:1973: Boxpaletten und Rungenpaletten - Hauptmaße und Stapelvorrichtungen. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [DIN 15145] DIN 15145:1987: Systematik und Begriffe für Paletten mit Einfahröffnungen. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [DIN 15146] DIN 15146:1983: Vierwege-Flachpaletten aus Holz. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.

- [DIN 30781-1] DIN 30781-1:1989: Transportkette - Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [DIN 30820] DIN 30820:1991: Transportkette mit Behältern für Kleinteile - Klein-Ladungs-Träger-System (KLT-System) - Klein-Ladungs-Träger und Tablare; Anforderungen und Prüfungen. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [DIN 55510] DIN 55510:2005: Verpackung - Modulare Koordination im Verpackungswesen. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Köln: Beuth.
- [Dom-2010] Domschke, W.; Scholl, A.: Rundreisen und Touren. 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München: Oldenbourg, 2010.
- [Dyc-1990] Dyckhoff, H.: A typology of cutting and packing problems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 44 (1990)2, S. 145–159.
- [Erl-2010] Erlach, K.: Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik. In: Springer, 2010.
- [Esc-1990] Eschenbach, R.: Erfolgspotential Materialwirtschaft. Wien, München: Manz; Beck, 1990.
- [Eve-1996] Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management - Betriebs-hütte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1996.
- [Gar-1979] Garey, M. R.; Johnson, D. S.: Computers and intractability - A guide to the theory of NP-completeness. San Francisco: W.H. Freeman, 1979.
- [Geh-1997] Gehring, H.: A genetic algorithm for solving the container loading problem. In: International Transactions in Operational Research, Jg. 4 (1997), 5-6, S. 401–418.
- [Geh-2004] Gehr, F.; Hellingrath, B.: Logistik in der Automobilzulieferindustrie. 1. Auflage. Berlin: Springer, 2004.

- [Geo-1980] George, J.; Robinson, D.: A heuristic for packing boxes into a container. In: Computers & Operations Research, Jg. 7 (1980)3, S. 147–156.
- [Ghi-2004] Ghiani, G.; Laporte, G.; Musmanno, R.: Introduction to logistics systems planning and control. Chichester, West Sussex, Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, 2004.
- [Gil-1965] Gilmore, P. C.; Gomory, R. E.: Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions. In: Operations Research, Jg. 13 (1965) 1, S. 94–120.
- [Gil-1974] Gillett, B. E.; Miller, L. R.: A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. In: Operations Research, Jg. 22 (1974)2, S. 340–349.
- [Gon-2007] Gonzalez, T. F.: Handbook of approximation algorithms and metaheuristics. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2007.
- [Göp-2013] Göpfert, I.; Braun, D.; Schulz, M.: Automobillogistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [Gro-2007] Großmann, G.; Schmidt, W.: Praxishandbuch Laden und Sichern - Beladung und Ladungssicherung auf dem Nutzfahrzeug. Herausgegeben von: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.; Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen (BGF), 2007.
- [Grü-2004] Grünz, L.: Ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Materialbereitstellung. Aachen: Shaker, 2004.
- [Gud-2002] Gudehus, T.: Dynamische Disposition - Strategien und Algorithmen zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition ; mit 7 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- [Gud-2011] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen. In: Springer, 2011.
- [Gün-2010] Günthner, W. A.: Zwischenbericht LEAN:log. Herausgegeben von: Günthner, W. A., 2010.

- [Gün-2013] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum. Herausgegeben von: Technische Universität München, Lehrstuhl fml, 2013.
- [Han-2007] Han, X.; Iwama, K.; Ye, D.; Zhang, G.: Strip Packing vs. Bin Packing. In: Kao, M.-Y.; Li, X.-Y. (Hrsg): Algorithmic Aspects in Information and Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 358–367.
- [Har-2002] Hartmann, H.: Materialwirtschaft - Organisation, Planung, Durchführung, Kontrolle. 8. Auflage. Gernsbach: Dt. Betriebswirte-Verl., 2002.
- [Her-2005] Herold, L.: Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie - Die Rolle von Logistik und Logistikcontrolling im Prozess "vom Kunden bis zum Kunden". 1 Auflage. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2005.
- [Hey-2010] Heyden, C. v. d.: Die Einführung und das System der deutschen Lkw-Maut und dessen Auswirkungen auf Transportunternehmen. 1. Auflage. GRIN Verlag, 2010.
- [Hif-2002] Hifi, M.: Approximate algorithms for the container loading problem. In: International Transactions in Operational Research, Jg. 9 (2002)6, S. 747–774.
- [Hif-2004] Hifi, M.: Exact algorithms for unconstrained three-dimensional cutting problems: a comparative study. In: Computers & Operations Research, Jg. 31 (2004)5, S. 657–674.
- [Hoc-1997] Hochbaum, D. S.: Approximation algorithms for NP-hard problems. Boston: PWS, 1997.
- [Hoi-1985] Hoitsch, H.-J.: Produktionswirtschaft - Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre. München: Vahlen, 1985.
- [Hol-2004] Holweg, M.; Pil, F. K.: The Second century - Reconnecting customer and value chain through build-to-order: moving beyond mass and lean production in the auto industry. Cambridge, Mass: MIT Press, 2004.

- [Hom-2007] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik ; mit 36 Tabellen. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- [inc-2013] inconso AG: Transport Management mit SAP - Lösungen aus der Praxis. Herausgegeben von: inconso AG, 2013.
- [Joh-1974] Johnson, D. S.; Demers, A.; Ullman, J. D.; Garey, M. R.; Graham, R. L.: Worst-Case Performance Bounds for Simple One-Dimensional Packing Algorithms. In: SIAM Journal on Computing, Jg. 3 (1974)4, S. 299–325.
- [Joh-1985] Johnson, D. S.; Garey, M. R.: A theorem for bin packing. In: Journal of Complexity, Jg. 1 (1985) 1, S. 65–106.
- [Jon-1997] Jones, D. T.; Hines, P.; Rich, N.: Lean logistics. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Jg. 27 (1997), 3/4, S. 153–173.
- [Jun-2006] Jung, H.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 10. Auflage. München, Wien: Oldenbourg, 2006.
- [Jyl-2010] Jylänki, J.: A thousand ways to pack the bin-a practical approach to two-dimensional rectangle bin packing. 2010. URL: clb.demon.fi/files/RectangleBinPack.pdf (Aufruf am 25.11.2013).
- [Käb-2013] Käber, A.: leogistics PAXXS - Ladungsraumoptimierung. Herausgegeben von: leogistics GmbH, 2013.
- [Kaß-2011] Kaßmann, M.: Grundlagen der Verpackung - Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2011.
- [Kil-2012] Kille, C.: Die Top 100 der Logistik : Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logistikdienstleistungswirtschaft. Hamburg: DVV Media, 2012.
- [Kla-2012] Klaus, P.: Gabler-Lexikon Logistik - Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2012.

- [Kle-2010] Klenk, E.; Knössl, T.: Wertstromdesign für die Logistik. München: 06.10.2010
- [Kle-2012] Klems, M.: Vendor Managed Full Truck Load. München: MAN Truck & Bus AG, 2012.
- [Klu-2010] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [Kra-2007] Krause, K.: Organisation und Steuerung von Transportnetzwerken - Eine modellgestützte Analyse zur effizienten Koordination von Ladungsverkehren. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag, 2007.
- [Lam-2000] Lambert, D. M.; Burduroglu, R.: Measuring and Selling the Value of Logistics. In: The International Journal of Logistics Management, Jg. 11 (2000) 1, S. 1–18.
- [Lan-1997] Lange, V.; Brachetti, C.: Mehrweg-Transport-Systeme. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 1997.
- [Lem-2007] Lemmer, H.: Ladungssicherung - Richtig, wichtig ; Expert, Praxis. kompakt. 1 Auflage. Düsseldorf: Verkehrsverl. Fischer, 2007.
- [Li-2003] Li, H.: Verfahren zur Laderaumoptimierung von heterogenen quaderförmigen Ladeobjekten für den LKW-Transport. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2003.
- [Lik-2004] Liker, J. K.: The Toyota way - Fourteen management principles from the world's greatest manufacturer. Concordville, Norwood, Mass: Soundview Executive Book Summaries, 2004.
- [Lod-1999] Lodi, A.; Martello, S.; Vigo, D.: Heuristic and Metaheuristic Approaches for a Class of Two-Dimensional Bin Packing Problems. In: INFORMS Journal on Computing, Jg. 11 (1999)4, S. 345–357.
- [Lod-2002] Lodi, A.; Martello, S.; Monaci, M.: Two-dimensional packing problems: A survey. In: European Journal of Operational Research, Jg. 141 (2002)2, S. 241–252.

- [Log-2005] Logistik heute: Die Qual der Wahl - Marktübersicht Transport Management Systeme. In: Logistik heute (2005)5, S. 36–37.
- [Mar-1998] Martello, S.; Vigo, D.: Exact Solution of the Two-Dimensional Finite Bin Packing Problem. In: Management Science, Jg. 44 (1998)3, S. 388–399.
- [Mar-2000] Martello, S.; Pisinger, D.; Vigo, D.: The Three-Dimensional Bin Packing Problem. In: Operations Research, Jg. 48 (2000)2, S. 256–267.
- [Mar-2011] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 8. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [Mei-2009a] Meißner, S.; Günthner, W. A.: Lean Logistics - Ansatzpunkte der Gestaltung schlanker Logistiksysteme. In: ZWF, Jg. 104 (2009)4, S. 280–283.
- [Mei-2009b] Meißner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Garching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik der Techn. Univ. München, 2009.
- [Mei-2012] Meißner, S.; Conze, M.; Habenicht, S.; Günthner, W. A.: Lean Supply Chain Management - Einstufige Materialbereitstellkonzepte zur Versorgung der variantenreichen Automobilproduktion. In: Industrie Management (2012)6
- [Möl-2008] Möller, S.; Haibel, A.: Transportkostenexplosion zwingt zum Umdenken in der Logistik. In: Logistik Inside (2008)
- [Mor-1994] Morabito, R.; Arenalest, M.: An AND/OR-graph Approach to the Container Loading Problem. In: International Transactions in Operational Research, Jg. 1 (1994) 1, S. 59–73.
- [Ōno-2009] Ōno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt a.M., New York, NY: Campus-Verl., 2009.
- [Ort-2010] Ortmann, F.: Heuristics for offline rectangular packing problems. In: Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2010.

- [Ost-2008] Ostertag, R.: Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie - Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung. Wiesbaden: Gabler, 2008.
- [Ott-2002] Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: Gründe für und gegen Lagerhaltung, 2002. URL: http://www.uni-magdeburg.de/bwl6/logedugate/pw_einfuehrung/content/pw_einf04.htm (Aufruf am 18.05.2013).
- [Pal-2008] Palm, D.: Schlanke Logistikprozesse. Wien: 18.11.2008
- [Pea-2008] PearlChain.net: SupplyCockpit Documentation - Version 1.6. Herausgegeben von: PearlChain.net, 2008.
- [Pis-2002] Pisinger, D.: Heuristics for the container loading problem. In: European Journal of Operational Research, Jg. 141 (2002)2, S. 382–392.
- [Sac-2004] Sachs, L.: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden ; mit 317 Tabellen und 99 Übersichten. 11., überarb. und aktualisierte Auflage. Berlin [u.a.]: Springer, 2004.
- [Sch-1992] Scheithauer, G.: Algorithms for the Container Loading Problem. In: Gaul, W.; Bachem, A.; Habenicht, W.; Runge, W.; Stahl, W. W. (Hrsg): Operations Research Proceedings 1991. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992, S. 445–452.
- [Sch-2001] Schulte, G.: Material- und Logistikmanagement. 2. Auflage. München: Oldenbourg, 2001.
- [Sch-2007] Scheuchl, M.: Einflussfaktoren und Planungsmethodik für supra-adaptive Logistiksysteme. München: Utz, 2007.
- [Sch-2008] Schedlbauer, M. J.: Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2008.

- [Sch-2013] Schuh, G.; Stich, V.: Logistikmanagement. 2., vollständig neu bearbeitete und erw. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [Six-1996] Sixt, M.: Dreidimensionale Packprobleme - Lösungsverfahren basierend auf den Meta-Heuristiken Simulated Annealing und Tabu-Suche. Frankfurt am Main, New York: P. Lang, 1996.
- [Str-2008] Straube, F.: Trends und Strategien in der Logistik : globale Netzwerke im Wandel - Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen. Hamburg: DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl, 2008.
- [Tak-2013] Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem - Just-in-time für das ganze Unternehmen. 7. Auflage. München: Vahlen, 2013.
- [Tem-2006] Tempelmeier, H.: Bestandsmanagement in Supply Chains. 2. Aufl Auflage. Norderstedt: Books on Demand, 2006.
- [van-1992] van Vliet, A.: An improved lower bound for on-line bin packing algorithms. In: Information Processing Letters, Jg. 43 (1992)5, S. 277–284.
- [Vas-1998] Vastag, A.: Handbuch der Verkehrslogistik. Berlin: Springer, 1998.
- [VDA 4500] VDA 4500:2013: Kleinladungsträger (KLT)-System. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 4520] VDA 4520:2011: Großladungsträger (GLT)-System. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 4905] VDA 4905:1996: Daten-Fern-Übertragung von Lieferabrufen. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 4913] VDA 4913:1996: Daten-Fern-Übertragung von Lieferschein- und Transportdaten. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 4915] VDA 4915:1996: Daten-Fern-Übertragung von Feinabrufen. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 4916] VDA 4916:1991: Daten-Fern-Übertragung von Produktionssynchronen Abrufen (PAB). Verband der Automobilindustrie (VDA).

- [VDA 5002] VDA 5002:1997: Begriffsbestimmungen im Transport- und Lieferprozess der Automobilindustrie. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDA 5010] VDA 5010:2008: Standardbelieferungsformen der Logistik in der Automobilindustrie. Verband der Automobilindustrie (VDA).
- [VDI 2700] VDI 2700:1990: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Berlin: Beuth.
- [VDI 3633, Blatt 1] VDI 3633, Blatt 1:2010: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Berlin: Beuth.
- [VDI 3968, Blatt 2] VDI 3968, Blatt 2:1994: Sicherung von Ladeeinheiten - Organisatorisch-technische Verfahren. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Berlin: Beuth.
- [Wan-2007] Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik - Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 3. Auflage. Berlin: Springer, 2007.
- [Wäs-2007] Wäscher, G.; Haußner, H.; Schumann, H.: An improved typology of cutting and packing problems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 183 (2007)3, S. 1109–1130.
- [Web-2008] Weber, R.: Kanban-Einführung: Das effiziente, kundenorientierte Logistik- und Steuerungskonzept für Produktionsbetriebe. In: Expert-Verlag, 2008.
- [Wil-2002] Wildemann, H.; Niemeyer, A.: Das Milkrun-Konzept - Logistikkostensenkung durch auslastungsorientierte Konsolidierungsplanung. In: PPS Management (2002)2
- [Wom-2003] Womack, J. P.; Jones, D. T.: Lean thinking - Banish waste and create wealth in your corporation. 1. Auflage. New York: Free Press, 2003.
- [Wym-2012] Wyman, O.: FAST 2025 Future Automotive Industry Structure - eine Studie. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2012.

Durch den Autor betreute Studienarbeiten

Im Zuge dieser Dissertation wurden verschiedene Studienarbeiten unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung des Autors erarbeitet, aus denen zum Teil Inhalte als Beitrag zu dieser Forschungsarbeit entstanden sind. Diese sind im Folgenden aufgelistet. Bei direkter Bezugnahme auf die entstandenen Inhalte wird im laufenden Text auf die entsprechende Arbeit verwiesen.

Kurzform	Titel	Autor	Art	Abgabe
[fml-09a]	Modulare Abbildung, Simulation und Optimierung von Versorgungsprozessketten in der Automobilindustrie	Lantschner, Daniel	Diplomarbeit	2009
[fml-09b]	Analyse des Kundenauftragsprozesses eines mittelständischen Anlagebauunternehmens zur Optimierung des Working Capital	Luther, Helena	Diplomarbeit	2009
[fml-09c]	Lagerlose Beschaffungskonzepte in der Automobilindustrie	Greiss, Sebastian	Semesterarbeit	2009
[fml-09d]	Entwicklung einer Methodik zur systematischen Erfassung, Bewertung und Optimierung von Wertströmen in der automobilen Versorgungslogistik	Steinmetz, Peter	Diplomarbeit	2009
[fml-09e]	Entwicklung eines Werkzeugs zur logistikgerechten Analyse und Visualisierung der Versorgungsprozesse eines Nutzfahrzeugherstellers	Niederdrenk, Jan-Daniel	Diplomarbeit	2010
[fml-10a]	Simulative Optimierung logistischer Prozesse eines Versorgungszentrums nach schlanken Gesichtspunkten	Greisel, Richard	Semesterarbeit	2010
[fml-10b]	Bewertung eines neuen Just-In-Sequence-Belieferungskonzepts von Teilesets am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers und Potenzialbewertung des Konzepts im Werksverbund	Schmidt, Thomas Walter	Diplomarbeit	2010
[fml-10c]	Entwicklung eines Kriterienkataloges für die Bewertung von Software zur Gestaltung, Analyse und Optimierung logistischer Netzwerke	Nebel, Dominik	Semesterarbeit	2010
[fml-10d]	Entwicklung eines flexiblen und ergonomischen Setbehälters zur Unterstützung einer schlanken Versorgungsprozesskette	Okroy, Martin	Semesterarbeit	2010
[fml-11a]	Entwicklung eines gemeinsamen logistischen Versorgungskonzepts für die Serienproduktion und die Ersatzteilversorgung eines Nutzfahrzeugherstellers	Naumann, Felix	Diplomarbeit	2011
[fml-11b]	Entwicklung und Validierung einer universell einsetzbaren Software zur Modellierung und Bewertung von Logistikprozessen am Beispiel der In-boundprozesse eines Nutzfahrzeugherstellers	Benettaleb Ali, Chiheb	Diplomarbeit	2011
[fml-11c]	Kostenbewertung eines Just-in-Sequence-Setbelieferungskonzepts am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers	Albertshofer, Christian	Diplomarbeit	2011
[fml-11d]	Erweiterung einer Software zur Kostenanalyse von Logistikprozessen	Hitzler, Severin	Bachelorarbeit	2011
[fml-11e]	Potentialanalyse, Konzeptentwicklung und -bewertung von einstufigen Supermarktkonzepten am Beispiel eines Nutzfahrzeugherstellers	Habenicht, Sebastian	Diplomarbeit	2011
[fml-12a]	Planung und Umsetzungsvorbereitung einer Milkrunbelieferung bei einem Nutzfahrzeughersteller	Mattern, Christine	Diplomarbeit	2012

[fml-12b]	Simulative Analyse und Bewertung von Nachschubsteuerungsvarianten anhand eines einstufigen Supermarkts bei der MAN Bus & Truck AG	Wersching, Thomas	Bachelorarbeit	2012
[fml-12c]	Erarbeitung eines Planungskonzeptes für die Auswahl eines einstufigen Kommissionierlagersystems für Großteile am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Grüll, Christoph	Diplomarbeit	2012
[fml-12d]	Experimentelle Analyse und Weiterentwicklung eines innovativen Behälterkonzepts für Teilesets in der Fahrzeugmontage	Schadl, Markus	Semesterarbeit	2012
[fml-12e]	Entwicklung eines Materialwagen-Konzeptes am Beispiel des LKW-Montagebands der MAN Truck & Bus AG	Ernst, Thomas	Diplomarbeit	2012
[fml-12f]	Entwicklung eines innovativen Steuerungskonzeptes für Milkruns in der Belieferung der MAN Truck & Bus AG	Sailer, Thomas	Diplomarbeit	2012
[fml-12g]	Methodik zur Bestimmung des optimalen Modulumfangs und Vormontagestandorts für bestehende Baugruppen am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Greisel, Markus	Semesterarbeit	2012
[fml-12h]	Analyse von Vorgehensmodellen zur Zuordnung von Bauteilen zu Versorgungsprozessen und Entwicklung eines neuen kosten- und lean-basierten Ansatzes	Lex, Martina	Semesterarbeit	2012
[fml-12i]	Parameterstudie zur Bewertung alternativer physischer Milkrun-Prozesse am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Hohenester, Franz	Bachelorarbeit	2012
[fml-12j]	Entwicklung einer Vorgehenslogik zur kostenoptimalen Zuordnung von Bauteilen zu Versorgungsprozessen am Beispiel der MAN Truck & Bus AG	Lauritz, Andreas	Bachelorarbeit	2012
[fml-12k]	Konzeption und Pilotumsetzung eines einstufigen Supermarktprozesses bei einem Nutzfahrzeughersteller	Surek, Florian	Bachelorarbeit	2012
[fml-12l]	Development of a framework to determine ideal outsourcing levels for logistics services - Concept derivation and exemplary implementation based on MAN Truck & Bus AG	Schöllhammer, Sarah Leonie	Diplomarbeit	2012
[fml-13a]	Aufbau und Validierung eines innovativen Behälterkonzepts	Bauer, Thomas	Bachelorarbeit	2013
[fml-13b]	Erweiterung der Software Cost Eagle um eine Möglichkeit zur Modellierung und Bewertung von logistischen Gesamtnetzwerken	Lechner, Johannes	Diplomarbeit	2013
[fml-13c]	Entwicklung eines kennliniengestützten Modells zur Optimierung der Bedarfsvorlaufzeit in der Inbound-Logistik des Werks München der MAN Truck & Bus AG	Homan, Jessica Prisillia	Diplomarbeit	2013
[fml-13d]	Simulative Analyse intuitiv anwendbarer Packregeln einer integrierten perlenkettenbasierten Abrufsteuerung	Zhang, Menglu	Semesterarbeit	2013
[fml-13e]	Weiterentwicklung und Analyse eines bedarfsgesteuerten Bestellkonzepts für lagerhaltige Teileumfänge	Lieberoth-Leden, Christian	Semesterarbeit	2013

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1: Einordnung der Beschaffungslogistik (in Anlehnung an [Gün-2013])	7
Abbildung 2-2: Wirkungsweise des Konzepts der stabilen Auftragsfolge [Con-2012a]	10
Abbildung 2-3: Ziel- und Steuergrößen des Auftragsreihenfolgekonzepts [Mei-2009b]	11
Abbildung 2-4: Direktverkehr und Sammelgutverkehr	18
Abbildung 2-5: Milkrun mit und ohne integrierte Leergutrückführung	19
Abbildung 2-6: Differenzierung von Materialbedarfsarten nach Ursprung und Erzeugnisebene (in Anlehnung an [Har-2002])	22
Abbildung 3-1: Überblick LKW-Typen	31
Abbildung 3-2: Überblick über eine Auswahl an tragenden und umschließenden Ladungsträgern (in Anlehnung an [Hom-2007])	33
Abbildung 3-3: Belastungsarten bei der Stapelung: Flächenbelastung (links), Linienbelastung (Mitte) und Punktbelastung (rechts) [Li-2003]	34
Abbildung 3-4: Gestalt und Funktionen eines VDA-KLTs [VDA 4500]	35
Abbildung 3-5: Beispiel eines Lastverteilungsplanes [Lem-2007]	38
Abbildung 3-6: Verfahren zur Ladungssicherung. Rote Pfeile: Bewegungskraft, grüne Pfeile: Gegenkräfte in Form von Haltekraft, Reibungskraft und Zurrkraft. (in Anlehnung an [Gro-2007])	39
Abbildung 3-7: Definitionen zur Beschreibung des dreidimensionalen Laderaums	51
Abbildung 3-8: Perlenkettenbasierte Abrufsteuerung für JIT/JIS-Teileumfänge bei der MTB (in Anlehnung an [Bau-2007])	56
Abbildung 3-9: Beispielhafte virtuelle Verladung von HUs in Hülen	58
Abbildung 5-1: Anwendungsbereich der integrierten Abruf- und Transportsteuerung	86
Abbildung 5-2: Notwendige Entwicklungsbausteine	86
Abbildung 5-3: Algorithmus zur Nettobedarfsrechnung mit relativer Supply-Chain-Sicherheit	89
Abbildung 5-4: Beispielhafte Durchführung der Nettobedarfsrechnung (in Anlehnung an [fml-13e])	90
Abbildung 5-5: Einplanung von Sicherheitsbedarfsdeckern (in Anlehnung an [fml-13e])	93

Abbildung 5-6: Festlegungen und Begriffe zur Beschreibung der Packalgorithmen	96
Abbildung 5-7: Strukturierte Datenbasis zur Steuerung von Teil- und Komplettladungen	97
Abbildung 5-8: Beispielhafte Bildung einer HU-Perlenkette für einen Milkrun	100
Abbildung 5-9: Gesamtalgorithmus zur Bestimmung von Teilladungen	103
Abbildung 5-10: Subalgorithmus für sortenreine KLT-Gebinde bei Teilladungen	104
Abbildung 5-11: Subalgorithmus für Mischgebände bei Teilladungen	106
Abbildung 5-12: Überblick über den Gesamtalgorithmus für Komplettladungen	111
Abbildung 5-13: Algorithmus A - Schnelldreher	113
Abbildung 5-14: Algorithmus A1 - Verladung auf bestehenden Stapel	114
Abbildung 5-15: Algorithmus A2 - Verladung nach Neustapelung	115
Abbildung 5-16: Algorithmus A3 - Verladung in bestehendem Hub	116
Abbildung 5-17: Veranschaulichung des Algorithmus zur Drehung von Stapeln	117
Abbildung 5-18: Algorithmus A4 - Verladung in einem Hub nach Drehung von Stapeln um 90 Grad	119
Abbildung 5-19: Algorithmus A5 - Verladung in neuem Hub	120
Abbildung 5-20: Algorithmus 6.1 - Direkte Verladung in einem Mischhub	121
Abbildung 5-21: Algorithmus A6.2 - Indirekte Verladung nach Mischung anderer Abladestellen	122
Abbildung 5-22: Verstauung von HUs im letzten Hub	123
Abbildung 5-23: Algorithmus A7 - Gemischte Hubfamilien im letzten Hub	124
Abbildung 5-24: Reduktion der verfügbaren Trailerfläche durch den Sicherheitsfaktor	125
Abbildung 5-25: Algorithmus B - Langsamdreher	126
Abbildung 5-26: Algorithmus B1 - Beginn eines neuen Stapels	128
Abbildung 5-27: Verfahren zum Beginn eines neuen Stapels im Langsamdreherblock anhand eines Beispiels	129
Abbildung 5-28: Algorithmus C - KLTs	130
Abbildung 5-29: Algorithmus C1 - KLTs vom Typ „sortenrein“	131
Abbildung 5-30: Algorithmus C2 - KLTs vom Typ „gemischt“	132
Abbildung 5-31: Vom systemisch generierten Beladeschema zum physisch gewünschten Beladeschema	133
Abbildung 5-32: Tabellarische Darstellung der Versorgungssituation auf Bauteilebene	137
Abbildung 5-33: Tabellarische Darstellung der Versorgungssituation auf Transportfamilienebene	137

Abbildung 5-34: Manuelle Milkrunterminierung je Trailer-Nummer (in Anlehnung an [fml-12f])	140
Abbildung 5-35: Alternative Möglichkeiten zur Leergutrückführung bei Milkruns [Con-2012a]	142
Abbildung 5-36: Eingabemaske zur Buchung von Leergut	143
Abbildung 5-37: Bewertung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen von Abladekonzepten (in Anlehnung an [fml-12f])	145
Abbildung 5-38: Bestandsführung und -kontrolle am Beispiel einer Kommissionierung von Montagesets mit Picklisten [Con-2013b]	147
Abbildung 6-1: Berechnung der Planungstreue bei reiner Terminänderung (in Anlehnung an [fml-13e])	159
Abbildung 6-2: Berechnung der Planungstreue bei reiner Mengenänderung (in Anlehnung an [fml-13e])	159
Abbildung 6-3: Durchschnittlicher Werksbestand bei packlosweiser Ausbuchung in Abhängigkeit von der Bedarfsrate und dem Variationskoeffizient der Bedarfsrate	164
Abbildung 6-4: Gesamtkennzahl Planungsgüte in Abhängigkeit von der Mehrverbrauchsrate und der Art der Ausbuchung (in Anlehnung an [fml-13e])	165
Abbildung 6-5: Unterkennzahlen bei packlosweiser Ausbuchung in Abhängigkeit der Mehrverbrauchsrate	165
Abbildung 6-6: Effekte auf die Bestandsreichweite durch den Online-Packalgorithmus	171
Abbildung 6-7: Relative Häufigkeiten von Auslastungsgraden bei unbegrenzter Reichweite	174
Abbildung 6-8: Abhängigkeit der Auslastung vom Reichweitenbegrenzungsfaktor	176
Abbildung 6-9: Auslastung und Verfrühung in Abhängigkeit von den Anzahl HUs und der Anzahl Abladestellen bzw. von KLT-Anteil und der Anzahl Abladestellen (in Anlehnung an [fml-13d])	177
Abbildung 6-10: Einfluss auf Reichweite und Verfrühung durch Anwendung des Langsamdreher-Algorithmus	179
Abbildung 6-11: Relative Reichweitenverlängerung in Abhängigkeit vom Langsamdreher-Anteil und der Anzahl an Verbrauchsstufen	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ausprägungen der Teilprozessschritte und der Materialdisposition bei lagerloser Belieferung	12
Tabelle 2-2: Ausprägungen der Teilprozessschritte und der Materialdisposition bei lagerhaltiger Belieferung	12
Tabelle 2-3: Milkrun-Morphologie (in Anlehnung an [Bau-2004], [Con-2012b], [Geh-2004], [Klu-2010])	20
Tabelle 2-4: Beispielhafte Durchführung der drei Dispositionsphasen bei bedarfsgesteuerter Disposition	24
Tabelle 3-1: Klassifizierung von Ladungsträgern	32
Tabelle 4-1: Simulationsergebnisse	69
Tabelle 4-2: Nutzwertanalyse mehrerer Alternativen zur Kommunikation von Beladeinformationen (in Anlehnung an [fml-12f])	71
Tabelle 4-3: Beurteilung von Dispositionsansätzen für Teilladungen	77
Tabelle 4-4: Beurteilung von Dispositionsansätzen für Komplettladungen	79
Tabelle 4-5: Beurteilung praxisorientierter Packalgorithmen	81
Tabelle 4-6: Beurteilung allgemeiner Algorithmen zur Lösung des ein- und zweidimensionalen Packproblems	82
Tabelle 5-1: Beispielhafte Übersicht über alle Ankunfts- und Abholzeiten einer Transportfamilie (in Anlehnung an [fml-12f])	140
Tabelle 5-2: Angabe des zeitlichen Offsets von Abholzeiten zu Ankunftszeiten (in Anlehnung an [fml-12f])	141
Tabelle 5-3: Abgleich mit allgemeinen und spezifischen Anforderungen an das Steuerungssystem	148
Tabelle 5-4: Abgleich mit den Anforderungen an den Packalgorithmus	149
Tabelle 6-1: Parameter und Parameterausprägungen	157
Tabelle 6-2: Ergebnisse der Simulationsstudie zum Konzept der Nettobedarfsrechnung	163
Tabelle 6-3: Parameter und deren Ausprägungen in Abhängigkeit von der Versuchsreihe	167
Tabelle 6-4: Mögliche HU-Dimensionen (in Anlehnung an [fml-13d] und [Li-2003])	168
Tabelle 6-5: Überblick über die Simulationsergebnisse der ersten Versuchsreihe	174
Tabelle 6-6: Einfluss der Parameter auf die Kennzahlen	175
Tabelle 6-7: Erreichte Auslastungen bei den Probleminstanzen aus der Praxis	180