

Logistik für den Versand von Studienmaterialien der FernUniversität in Hagen

-Optimierte Bereitstellung bei der Kommissionierung-

**Dominic Brenner¹, Andre Gädeke²,
Friedhelm Kulmann³ und Andreas Kleine³**

Diskussionsbeitrag Nr. 516

Dezember 2018

**Diskussionsbeiträge der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
der FernUniversität in Hagen
Herausgegeben von der Dekanin der Fakultät**

Alle Rechte liegen bei den Verfassern

¹ Projekt Campusmanagement

² Dez. 6.1 -Anwendungsbetreuung Standardsoftware

³ Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Quantitative Methoden und Wirtschaftsmathematik

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ii
Symbolverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Funktion und Aufgabe des Logistikzentrums	3
2.1 Das Logistikzentrum der FernUniversität	3
2.2 Aspekte der Intralogistik im Literaturüberblick	5
2.3 Der Studienmaterialversand als Prozessschleife	5
2.4 Zielanalyse im Kontext logistischer Aufgaben	8
2.5 Der zentrale Prozess der Materialbereitstellungsplanung	12
3 Datenaufbereitung, Daten- und Strukturanalyse	13
4 Heuristiken für die Materialbereitstellungsplanung	15
4.1 Rahmenbedingungen für die Kommissionierung	15
4.2 Heuristiken für die Zuordnung zu Kommissionierbereichen	15
4.3 Auswertung der Heuristiken für verschiedene Szenarien	18
5 Mathematische Modellierung und Optimierung	21
5.1 Mathematische Modelle der MBP bei unterschiedlicher Zielsetzung .	21
5.2 Resümee der Modellentwicklung	31
6 Analyse und Auswertung	33
6.1 Parameterwahl und Modellgenerierung	33
6.2 Optimierung und Auswertung der Ergebnisse	34
7 Zusammenfassung und Ausblick	37
Literaturverzeichnis	40

Abkürzungsverzeichnis

AC	Nebenbedingung zur Bereitstellung von Palettenstellplätzen (allocation constraint)
AE	Artikeleffizienz
AKL	automatisches Kleinteilelager
BK	Behälterkommissionierung
FK	Kommissionierung in der Fläche
KSW	Fakultät für Kultur- und Sozialwissenschaften
LB	untere Schranke (lower bound)
LGZ	Logistikzentrum der FernUniversität in Hagen
MBP	Materialbereitstellungsplanung
MI	Fakultät für Mathematik und Informatik
MO	VAG mit mehreren Aufträgen (multi order)
PC	Nebenbedingung zu Pickzahlen (pick constraint)
PV	gewünschter Wert (preferable value)
REWI	Rechtswissenschaftliche Fakultät
RL	Höchstanteil Einzelaufträge (rejection level)
s.t.	subject to
SO	VAG mit Einzelauftrag (single order)
TG	Trenngrenze
UB	obere Schranke (upper bound)
VAG	Versandauftragsgruppe
VU	Virtuelle Universität
VT	Versandtermin
WIWI	Fakultät für Wirtschaftswissenschaft

Symbolverzeichnis

Mengen und Parameter

$\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ Aufträge / Belegungen pro Semester pro Versandtermin
 AC_{PV} Allocation Constraint Preferable Value
 AC_{UB} Allocation Constraint Upper Bound
 $c \in \mathbb{N}$ Kapazitätsschranke Palettenstellplätze

$$d_{ij} \text{ bzw. } d_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } P_j \text{ in Auftrag } A_i \text{ bzw. VAG } G_k \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

g_k Anzahl der Aufträge in VAG G_k
 $\mathcal{G} = \{G_1, \dots, G_\ell\}$ VAGs
 \mathcal{G}_{BK} VAGs Behälterkommissionierung
 \mathcal{G}_{EG} VAGs mit Kommissionierung im Erdgeschoss des LGZ
 \mathcal{G}_{FK} VAGs Palettenkommissionierung
 \mathcal{G}_{OG} VAGs mit Kommissionierung im Obergeschoss des LGZ
 $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_m\}$ Produkte / Artikel / Studienmaterial
 \mathcal{P}_{BK} Produkte für Behälterkommissionierung
 \mathcal{P}_{EG} Produkte für Kommissionierung im Erdgeschoss des LGZ
 \mathcal{P}_{FK} Produkte für Palettenkommissionierung
 \mathcal{P}_{OG} Produkte für Kommissionierung im Obergeschoss des LGZ
 PC_{LB} Pick Constraint Lower Bound
 RL_{UB} Rejection Level Upper Bound

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{falls VAG } G_k \text{ Einzelauftrag (SO)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Variable

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } P_j \text{ bereitgestellt} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$
$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{falls Auftrag } A_i \text{ bedient} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$
$$z_k = \begin{cases} 1 & \text{falls Versandauftragsgruppe } G_k \text{ vollständig kommissioniert} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

$\lambda \in [0, 1]$ Variable im Fuzzy-Modell

1 Einleitung

Die FernUniversität in Hagen als einzige staatliche Fernuniversität im deutschen Sprachraum ermöglicht seit mehr als 40 Jahren ihren derzeit 74.000 Studierenden auch neben Beruf und Familie mit dem Studium einen akademischen Abschluss zu erlangen. Insgesamt fünf Fakultäten, die Universitätsbibliothek, das Zentrum für Medien und IT sowie das Logistikzentrum (LGZ) sind die wichtigen Bestandteile der Organisationsstruktur. Das LGZ sorgt dabei für den individualisierten termingerechten Studienmaterialversand und ist somit für die Studierenden von zentraler Bedeutung.

Die vielschichtigen Prozesse im LGZ unterliegen in ihren Abläufen einer ständigen Überprüfung und Kontrolle. Nicht zuletzt wegen sich verändernder Sortimentstrukturen, individuellen Beleg-/Bestellverhaltens sowie steigender Studierendenzahlen ist es immer wieder erforderlich, Anpassungen vorzunehmen, um den Anforderungen der Universität gerecht zu werden.



Abbildung 1: Logistikzentrum der FernUniversität in Hagen

In dem vorliegenden Diskussionsbeitrag werden die für den Studienmaterialversand relevanten Abläufe betrachtet und mögliche Optimierungspotenziale identifiziert. Im Fokus steht die Bereitstellungsplanung für die nachfolgende Kommissionierung. Die Planung soll dabei unter Aspekten der Ergonomie, Effizienz und Effektivität erfolgen. Das kann bedeuten

1. Arbeitsplätze und -bedingungen aus ergonomischen Gesichtspunkten zu verbessern,
2. durch eine intelligente Steuerung des Kommissionierprozesses Effizienzsteigerungen zu erreichen,
3. durch eine optimierte Bereitstellung vorbestimmter Artikelkombinationen die Kommissionierleistung zu erhöhen.

Unter Punkt 1 wird ein Themenfeld angesprochen, das im Rahmen der Betriebswirtschaftslehre dem Fachgebiet »Personal und Organisation« zuzuordnen ist und trotz seiner Relevanz in diesem Papier (nur) als Randbedingung auftritt. Die in

Punkt 3 genannten Möglichkeiten der Optimierung eröffnen ein eigenes Themenfeld und erfordern eine separate Betrachtung. Zentraler Untersuchungsgegenstand in dem vorliegenden Beitrag ist der Einsatz quantitativer Methoden für die in Punkt 2 genannten Aspekte.

Kapitel 2 gibt einen Überblick zu Funktionen und Aufgaben des Logistikzentrums, wobei zu Beginn in 2.1 das LGZ zunächst in seiner Funktion als Dienstleister der FernUniversität vorgestellt wird. Wie der Studienmaterialversand organisiert ist und in welche Prozessschritte er zerlegt werden kann, ist in 2.3 beschrieben. Darin werden bereits Ansatzpunkte für eine mögliche Verbesserung derzeitiger Abläufe aufgezeigt. Eine für die Optimierung notwendige Zielanalyse sowie die Darstellung geeigneter Kennzahlen sind Gegenstand von 2.4, bevor in 2.5 mögliche Optimierungspotenziale bei der Materialbereitstellungsplanung (MBP) konkretisiert werden.

Kapitel 3 wendet sich dem ausgewählten Prozess der Kommissionierung zu und stellt konkrete Daten eines Hauptversands vor, die hinsichtlich ihrer Struktur analysiert und zu denen die Kennzahlen berechnet werden.

Bereits einfache Heuristiken bieten die Möglichkeit, die Abläufe bei der Bereitstellung der Materialien zu verbessern. In Kapitel 4 wird zunächst erläutert, wie in der Vergangenheit vorgegangen wurde, um dann weiterführende Methoden mit dem Ziel vorzustellen diese nachfolgend bei Anwendung auf den Hauptversand hinsichtlich erzielbarer Verbesserungen zu untersuchen.

Mit dem Einsatz des Instrumentariums der mathematischen Optimierung können gezielt und praxisgeleitet spezielle Anforderungen berücksichtigt werden. Die vielfältigen Möglichkeiten stehen im Fokus des Kapitels 5, in dem die MBP in verschiedenen Varianten als Optimierungsproblem behandelt wird. Dabei steht in diesem Beitrag die Bereitstellung der Materialien auf Paletten im Vordergrund, die natürlich nicht isoliert sondern mit möglichen Interdependenzen betrachtet wird.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und wagt einen Blick auf zukünftige Arbeiten zu den in diesem Beitrag aufgeworfenen Fragen.

2 Funktion und Aufgabe des Logistikzentrums

2.1 Das Logistikzentrum der FernUniversität

Das LGZ versorgt mehrfach im Jahr auf dem Postweg Studierende in ganz Deutschland und darüber hinaus mit Lehr- und Informationsmaterialien. Die Unterlagen für das Studium umfassen neben Lehrtexten, Einsendearbeiten und Lösungshinweisen der Lehrstühle bzw. Lehrgebiete auch DVDs, CDs und Broschüren.

Seitdem im Jahr 1993 das heutige Logistikzentrum bezogen wurde, stieg die Studierendenzahl von damals 52.000 deutlich an und erreichte zwischenzeitlich fast die damals geschätzte Kapazitätsgrenze von 80.000.

Studierende haben vor Beginn eines Semesters die Möglichkeit, ihren persönlichen Studienplan mit Rücksicht auf Studienfortschritt, Lerntempo und Interessen individuell zu gestalten und die Belegung in ihrem virtuellen Studienplatz online vorzunehmen. Alle zum Studienplan gehörenden Materialien werden nicht einmalig komplett, sondern in didaktisch sinnvollen Teilsendungen verschickt. Diese werden dazu als Versandaufträge an das LGZ übermittelt und von dort zu festgelegten Terminen, den sogenannten Versandterminen, innerhalb eines Semesters auf den Weg gebracht.

	MÄRZ			APRIL					
KW	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Vorabv.								
			Hauptvers.						
						2. Vers.			
								3. Vers.	

Versand	ab Datum	für Bearbeitungsbeginn
Vorabversand	27. Februar	Semesterbeginn
Hauptversand	13. März	03. April
2. Versand	03. April	16. April
3. Versand	17. April	30. April

Abbildung 2: Versandtermine für Studienmaterialien im Sommersemester

Die Versandtermine umfassen in der Regel einen Zeitraum von zwei Wochen. Eine zeitliche Ausnahme ist der Hauptversand, der aufgrund des erhöhten Aufwands drei Wochen andauert und jeweils vor Semesterbeginn im März bzw. September startet (siehe Abbildung 2).

Die Kommissionierung wird in der Lager- und Distributionslogistik als arbeitsintensivster und zeitkritischer Prozess angesehen (vgl. ZELLERHOFF und TENHOMPEL 2010, S.285). Die räumliche Trennung der Kommissionierbereiche des LGZ

(vgl. Abbildung 3) bedeutet eine zentrale Herausforderung der MBP. Diese Herausforderung besteht im Wesentlichen darin, Artikel und Aufträge für einen Versandtermin einem Kommissionierbereich so zuzuordnen, dass in allen Bereichen eine reibungslose Kommissionierung erfolgen kann.

Anfangs wurde dabei nach einem einfachen Verfahren getrennt: Belegungen bzw. Versandaufträge, die den Fakultäten KSW und MI zugeordnet waren, wurden im Obergeschoss kommissioniert, die der Fakultäten WIWI und REWI im Erdgeschoss. Mischaufträge wurden im Obergeschoss begonnen und im Erdgeschoss abgeschlossen. Entsprechend wurden die Bereiche im Vorfeld des Versands mit den zugehörigen Artikeln versorgt. Durch das sich im Laufe der Zeit erweiterte Artikelspektrum und durch Zunahme der Studierendenzahlen stießen die Räumlichkeiten immer wieder an ihre Kapazitätsgrenzen.

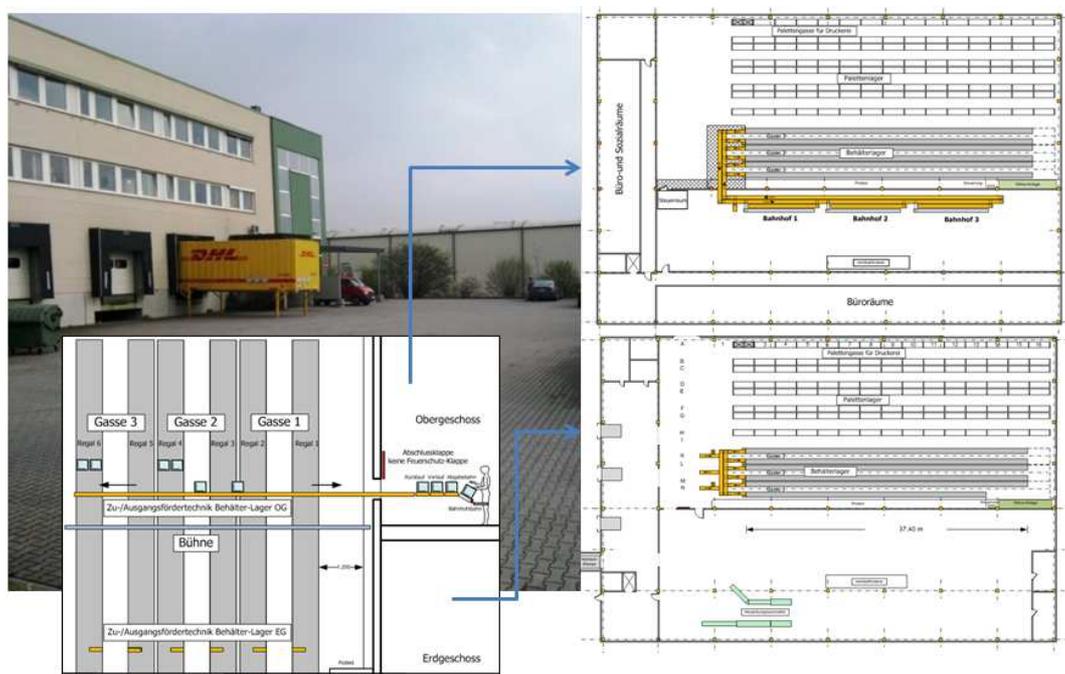


Abbildung 3: Kommissionierbereiche des Logistikzentrums

Somit wurde als bauliche und strukturelle Veränderung im März 2015 ein automatisches Kleinteilelager (AKL) mit angeschlossenen Kommissionierarbeitsplätzen, den sogenannten Kommissionierbahnhöfen in Betrieb genommen. Im Gegensatz zu dem bis dahin ausschließlich verfolgten Person-zu-Ware-Prinzip wurde nun auch ein Ware-zu-Person-Konzept implementiert (siehe Abbildung 3). Beide Prinzipien sind den manuellen Kommissioniersystemen zuzuordnen (vgl. DEKOSTER, LEDUC und ROODBERGEN 2007, S.483f.), bei denen die Kommissionierung durch Personal erfolgt. Die Materialien werden in Behältern im AKL gelagert und können über die Anlage in kurzer Zeit an den Kommissionierbahnhöfen bereitgestellt

werden. So ist gewährleistet, dass auch bei heterogener Auftragsstruktur flexibel agiert werden kann.

2.2 Aspekte der Intralogistik im Literaturüberblick

Neben Auftragsabwicklung, Verpackung, Versand und Tourenplanung ist die Kommissionierung eine der zentralen operativen Aufgaben der Distributionslogistik. Dabei werden die Teilprobleme Artikelanordnung (Storage Location), Tourenplanung (Picker Routing) und Auftragsbildung (Order Batching) häufig gesondert betrachtet und entsprechend separat hinsichtlich möglicher Optimierungspotenziale analysiert, obwohl offensichtliche Abhängigkeiten bestehen (vgl. GILS u. a. 2018, S.2). DEKOSTER, LE-DUC und ROODBERGEN (2007) geben einen Überblick zu den genannten Teilproblemen, und GILS u. a. (2018) greifen die Systematik auf, um ausführlich unter verschiedenen Klassifikationsmerkmalen Veröffentlichungen der letzten Jahre einzuordnen und auf geeignete Lösungsverfahren hinzuweisen. Zum Order Batching stellt bspw. ZUNIGA u. a. (2015) die Vorteile verschiedener Optimierungstechniken dar. Interessant sind zudem Beiträge, die sich mit der Bewertung der Kommissionierleistung beschäftigen und Einflussfaktoren identifizieren (vgl. STINSON und WEHKING 2012). Unter dem Aspekt der Dynamik und der damit verbundenen Aufgabe der Reorganisation des Kommissionierbereichs beziehen KORTE und WEHKING (2016) auch die Veränderungsplanung in die Analysen mit ein. Darüber hinaus gibt es Fallstudien, in denen spezielle Szenarien vorgestellt und bspw. mit Fokus auf Laufwege analysiert werden (GILS u. a. 2016, S.430ff.).

Unter Voraussetzung einer disjunkten Zerlegung der Auftragsmenge und der damit verbundenen Zuordnung zu Kommissionierbereichen sind bei der im vorliegenden Diskussionsbeitrag behandelten Problemstellung Aspekte aus den Bereichen Storage Location und Order Batching zu berücksichtigen. Im Folgenden werden zum besseren Verständnis der Kommissionierung an der FernUniversität in Hagen die Abläufe zunächst im Einzelnen beschrieben.

2.3 Der Studienmaterialversand als Prozessschleife

Der Studienmaterialversand kann als sich wiederholende Prozessschleife mit wechselnden Verantwortlichkeiten dargestellt werden. Zu jedem Versandtermin gehört eine vollständige Schleife, wobei der erste Durchlauf immer zwei Monate vor Start des neuen Semesters im Juli bzw. im Januar beginnt. In Abbildung 4 ist der Prozess visualisiert; hierbei wird von der Materialbereitstellungsplanung (MBP) ausgehend zuerst der linke Zyklus (Z1) und anschließend der rechte (Z2) durchlaufen.

Für Z1 stellt die **MBP** auf Basis von Vergangenheitsdaten Prognosen für die erwartete Nachfrage von Studienmaterialien etc. zur Verfügung, die für die nachfolgenden Prozessschritte erforderlich sind. Im nächsten Schritt erfolgt auf dieser

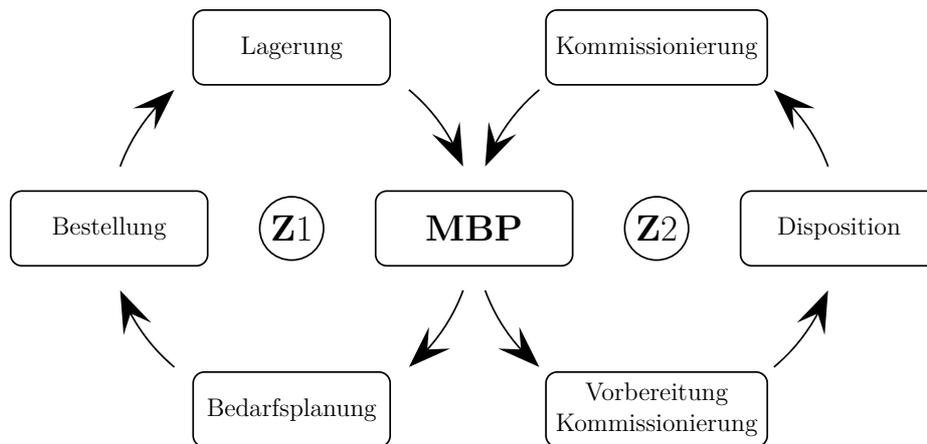


Abbildung 4: Prozesszyklus »Versand«

Datenbasis und dem aktuellen Lagerbestand in der Einkaufsabteilung eine **Bedarfsplanung**, und es werden erforderliche Bestellmengen ermittelt. Nun wird eine Make-or-Buy-Entscheidung getroffen und eine interne oder externe **Bestellung** angestoßen. Jede Anlieferung (intern bzw. extern) wird so terminiert, dass die Materialien in einem Zeitfenster von drei Wochen vor Beginn des jeweiligen Versandtermins zur Verfügung stehen. Jede Lieferung wird qualitätskontrolliert und für die spätere Verwendung **zwischengelagert**.

Noch bevor die letzten Artikel eintreffen, beginnt Z2 für den aktuellen Versandtermin, und parallel wird bereits Z1 für den nachfolgenden Versandtermin durchlaufen. Auch der zweite Zyklus beginnt mit einer **MBP**, allerdings erfolgt diesmal die Planung unter Sicherheit auf Basis der Auftragsdaten, also der tatsächlich am Stichtag vorliegenden Belegungen. Im Ergebnis liefert die MBP eine Zuordnung der Kommissionierware zu unterschiedlichen Bereichen des LGZ. Damit ist es dort bereits möglich, mit der Materialbereitstellung zu beginnen und die **Kommissionierung** abschließend **vorzubereiten**. In der sich anschließenden **Dispositionsphase** wird die Kommissionierreihenfolge ermittelt, und es werden entsprechende Arbeitshilfen für das Personal bereitgestellt.

Pünktlich zum Start des Versandtermins kann mit der **Kommissionierung** begonnen werden. »Kommissionieren« bezeichnet allgemein „das Zusammenstellen von Einzelpositionen zu einem Auftrag“ (TEN HOMPEL und HEIDENBLUT 2011, S.152) und »Order Batching« die Bildung von Kommissionieraufträgen. Im LGZ sind Versandauftragsgruppen (VAGs) eine besondere Form der Kommissionieraufträge, bei der die Anzahl zusammenzufassender Aufträge nicht durch einen festen Wert oder durch einen speziellen Algorithmus, sondern mittels Positionsidentität der Aufträge eines Versandtermins bestimmt wird; d.h. alle Aufträge einer VAG sind abgesehen von den Empfängerinformationen gleich (GUDEHUS 2010, S.773).

Die Entnahme eines Artikels für die Kommissionierung eines Auftrags wird als ein Pick bezeichnet (vgl. GUDEHUS 2010, S.662). Das Kommissioniervolumen eines Versandtermins entspricht demzufolge der Summe der Picks aller Aufträge.

Die Kommissionierung an der FernUniversität in Hagen erfolgt zweistufig. Zunächst werden alle Artikel einer VAG in der benötigten Anzahl gepickt und dann auf die Aufträge vereinzelt. Dadurch werden Kommissionierwege eingespart und der Zeitaufwand wird insgesamt reduziert. Vereinzeln ist ein einfacher Prozess und bedeutet lediglich, dass die Artikel gleichmäßig auf die Aufträge verteilt werden. Im LGZ werden bei der Zusammenstellung der Aufträge zwei grundlegende Strategien verfolgt: die Palettenkommissionierung und die Behälterkommissionierung.

Bei der **Palettenkommissionierung** werden Produkte in hohen Stückzahlen auf getrennt stehenden Paletten bereitgestellt, wodurch entsprechend hohe Nachfragen bedient werden können. Allgemein ist sie dem Massengeschäft zuzuordnen.

Bei der **Behälterkommissionierung** werden zwar geringere Nachfragemengen bereitgestellt, es wird jedoch ein größeres Produktspektrum berücksichtigt. Dies ist möglich, weil nicht alle Artikel gleichzeitig sondern bedarfsgerecht für drei Kommissionierbahnhöfe automatisiert selektiert werden. Im Gegensatz zum Massengeschäft handelt es sich hierbei um das sogenannte Individualgeschäft.

Schnittstelle zwischen den vorbereitenden Aktivitäten und der operativen Durchführung des Versandtermins bildet die komplexe Materialbereitstellungsplanung, die großen Einfluss auf beide Zyklen nimmt und so eine bestmögliche Abstimmung sicherstellen soll. Eine frühzeitige Entscheidung, welche Materialien wo bereitgestellt werden, wirkt sich nicht zuletzt deshalb positiv auf den Materialfluss aus, weil Zwischenlagerungen vermieden werden. Durch eine insgesamt gleichmäßige Verteilung der durchzuführenden Tätigkeiten werden Belastungsspitzen vermieden. Aktuell wird die Entscheidung über die Zuordnung der Materialien systemtechnisch nicht unterstützt.

Mit einer Ist-Analyse wurde der Studienmaterialversand in seinen einzelnen Prozessschritten beschrieben und dabei an verschiedenen Stellen bereits auf Schwachpunkte hingewiesen. Bevor daraus Ansätze zur Optimierung abgeleitet werden, muss zunächst geklärt werden, welche Ziele bei einer eventuellen Restrukturierung verfolgt werden.

2.4 Zielanalyse im Kontext logistischer Aufgaben

Die Festlegung von Zielen ist von besonderer Bedeutung für die Organisation der Abläufe, und deren Erreichung hat unmittelbare Auswirkungen auf den Erfolg eines Unternehmens (vgl. BADKE-SCHAUB und FRANKENBERGER 2004, S.77f.). Kennzahlen sind ein probates Mittel zur Analyse und Erfolgskontrolle. Beide Themenbereiche werden mit Bezug zum fernuniversitären Umfeld konkretisiert.

2.4.1 Zielsystem

Vor einer Optimierung muss eine sorgfältige Zielanalyse stehen, die Hinweise liefert, welche Größen und welche Bedingungen Gegenstand einer realitätsnahen Modellbildung sein sollten. Es werden im Folgenden vor dem Hintergrund der auftragsorientierten Kommissionierung die Themenfelder Effektivität, Effizienz, Personaleinsatz und Technik betrachtet, denen unterschiedliche Ziele zugeordnet werden können.

Effektivität

Ziel ist die reibungslose (fehlerfreie) Kommissionierung aller Aufträge in vorgegebener Zeit. Die Abläufe müssen so effektiv geplant werden, dass mit der Kommissionierung in der Fläche (FK) und aus dem AKL an den Bahnhöfen (BK) alle für die Versandtermine vorgegebenen Aufträge planmäßig das LGZ verlassen und an die Studierenden geschickt werden können.

Auftragsrealisierung: Um dieses Ziel zu erreichen, besteht eine Aufgabe in der intelligenten Aufteilung der Aufträge zu FK und BK, also in der Zuordnung zu diesen beiden Bereichen.

Effizienz

Sowohl die Paletten- als auch die Behälterkommissionierung sollen möglichst effizient sein, also wirtschaftlich erfolgen. Effizienz kann mit unterschiedlichen Maßnahmen erhöht werden, die aber mit teilweise konkurrierenden Zielen verknüpft sind.

Pickzahl: Die sogenannte Pickzahl gibt bei der FK Auskunft, wieviele Artikel in einem gewissen Zeitraum kommissioniert werden können. Zielsetzung ist somit die Maximierung der Pickzahl (siehe S.24).

Bestellhäufigkeit: Naheliegend ist, dass für das Massengeschäft bei der Kommissionierung in der Fläche möglichst nur Produkte mit Mindestnachfrage berücksichtigt werden sollten. Die Bestellhäufigkeit eines Produkts ermöglicht eine Aussage über die sogenannte »Artikeleffizienz«, also wie effizient es ist, diesen Artikel der FK zuzuordnen.

Wiederholraten: Ebenfalls ist bei der Auswahl der Aufträge für die FK zu beachten, dass dort möglichst keine Einzelaufträge oder VAGs mit geringer Wiederholrate eingeplant werden (siehe S.28f.).

Personaleinsatz

Ergonomie/Platzbedarf: Die Anordnung von Paletten in der Kommissionierfläche ist nicht zuletzt für das eingesetzte Personal von Bedeutung. Durch eine günstige Platzierung ist es möglich, Laufwege zu reduzieren und Bewegungsfreiheit zu erhöhen. Dieses Ziel ist nicht unmittelbar mit der Maximierung der Pickzahl vereinbar (siehe S.26f.).

Personal: Eine ausgeglichene Zuordnung des Personals zu den verschiedenen Kommissionierbereichen und die entsprechende Verteilung der Aufgaben führen auch zu einer gleichmäßigen Arbeitsbelastung und hohen Arbeitszufriedenheit. Letztgenannte hängt mit der Arbeitsmotivation zusammen (vgl. MYERS 2014, S.792; MIEBACH 2017, S.57), und somit hat die Personalplanung Auswirkungen auf das Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im LGZ.

Sicherheit: Nicht außer Acht gelassen werden darf der Aspekt der Vermeidung von Arbeitsunfällen und Beseitigung von Gefahrenstellen. Dieser Punkt spielt jedoch in dem hier behandelten Kontext eine untergeordnete Rolle und wird nicht weiter thematisiert.

Weitere Ziele sind teilweise als technische Restriktionen formulierbar.

Technik

Materialhandhabung: Grundsätzlich können alle Artikel im AKL eingelagert werden, wobei als Lagerbehälter Boxen mit einheitlichem Volumen existieren. Damit ist die Aufnahmekapazität beschränkt, und Artikel, die etwa ein bestimmtes Volumen überschreiten, sollten deshalb in der Fläche kommissioniert werden.

Kleinmengen: Bisher wurden Paletten sortenrein geplant, d.h. auf einem Stellplatz wurden jeweils nur Exemplare eines Produktes abgelegt. Bei geringer Nachfrage können die jeweils geringen Bereitstellungsmengen bei einer verbesserten Flächennutzung gemeinsam auf einer Palette angeordnet werden.

Mit Blick auf die beschriebenen Ziele ist es einerseits zur Beschreibung vorliegender Probleme andererseits zur Kontrolle der Wirkung angewandeter Maßnahmen sinnvoll, geeignete Kennzahlen zu definieren.

2.4.2 Kennzahlen

WEBER und SCHÄFFER definieren Kennzahlen als »[...] quantitative Daten, die als bewusste Verdichtung der Realität über zahlenmäßig erfassbare betriebswirtschaftliche Sachverhalte informieren sollen« (vgl. WEBER und SCHÄFFER 2014, S.173). Nach SCHULTE erfüllen Kennzahlen die Funktion der Quantifizierung von Zielen, sie dienen hierbei der Zielvorgabe und definieren den Raum und die Zeit sowie die Qualität und die Quantität des Ziels (vgl. SCHULTE 2001, S.462). Es ist somit möglich und sinnvoll, Kennzahlen zu nutzen, um Strukturdaten und damit Planungsprobleme vergleichbar zu machen.

Die Materialien und Artikel, die bestellt werden können, stellen die Produktpalette dar; die **Anzahl** dieser **Produkte** ist eine wichtige Kennzahl auf der Inputseite, die bereits vor Beginn der Belegphase eines Semesters feststeht. Nach Ende der Einschreib- bzw. Rückmeldefrist liegen die **Aufträge** vor, und damit sind deren **Gesamtzahl** ebenso wie die Anzahl der **bestellten Artikel insgesamt** bekannt. Eine einfache Sortierung der Aufträge liefert den Wert für die **Anzahl** der **VAGs** und daraus abgeleitet die durchschnittliche **Anzahl Aufträge pro VAG**, was die **Anzahl** der **Einzelaufträge** einschließt. Ebenfalls berechnen lassen sich die durchschnittliche **Anzahl** von **Positionen pro Auftrag** sowie die durchschnittliche **Bestellhäufigkeit** der **Produkte**. Auf Basis dieser Strukturdaten kann eine Optimierung der MBP erfolgen und die Kommissionierung vorbereitet werden.

Die Ergebnisse sind Grundlage für die Entscheidung über **Aufteilung** zwischen FK und BK, also welche Aufträge in welchem Bereich kommissioniert werden sollen. Die Lastverteilung auf die beiden Kommissionierbereiche ist in Bezug auf die Gesamtzahl der Aufträge eines Versandtermins sowie nachrangig auf die VAGs und Pickzahlen eine wichtige Größe, die dem Entscheider Hinweise auf die Qualität der Lösung liefert. Dabei spielen sowohl technische Möglichkeiten als auch strategische Entscheidungen eine wichtige Rolle, die in Verbindung mit einer mathematischen Modellierung unscharfer Restriktionen in Abschnitt 5.1.5 genauer erläutert werden.

Sobald die Zuordnungsentscheidung getroffen wurde, müssen sowohl für die FK als auch für die BK eine Produktbereitstellungs- und eine Auftragsreihenfolge festgelegt werden. Output dieser Optimierungsprozesse sind neben operativen Handlungsanweisungen weitere Kennzahlen, die Auskunft über die Qualität der Planungsergebnisse liefern. Für die Flächenkommissionierung ist von Bedeutung, welche **Produktauswahl** getroffen wurde und wieviele **Stellplätze** somit eingerichtet werden müssen. Für beide Bereiche (FK und BK) sind separat die absolute Anzahl **realisierbarer Picks** und die Zahl vollständig **kommissionierbarer Aufträge** bzw. VAGs bestimmbar. Aus ergonomischer Sicht ist besonders für die FK auch die **Anzahl Einzelaufträge** von Bedeutung, da dies unmittelbaren Einfluss auf die Laufwege hat. Ebenfalls für die Fläche interessiert: Wieviele Picks werden durchschnittlich pro Stellplatz gemacht, wie ist die Auftragsstruktur in

den beiden Bereichen, d.h. wie viele Picks müssen im Schnitt pro VAG gemacht werden, und wieviele Aufträge gehören durchschnittlich zu einer VAG?

Tabelle 1: Logistische Parameter und Kennzahlen der Kommissionierung

Input	
1.	# Produkte (Produktpalette)
2.	# bestellte Artikel insgesamt
3.	# Aufträge insgesamt
4.	# Versandauftragsgruppen (VAG)
5.	# Einzelaufträge (SO) insgesamt
6.	∅ Positionen pro Auftrag
7.	∅ Aufträge pro VAG
8.	∅ Produktbestellhäufigkeit
9.	produktbezogene Bestellhäufigkeit (Artikeleffizienz)
Output	
1.	# Stellplätze (ausgewählte Produkte)
2.	# realisierbare Picks
3.	# kommissionierbare VAGs (davon SO)
4.	#A FK/#A BK (Verteilung der Aufträge)
5.	Bereitstellungseffizienz (∅ Picks pro Produkt)
6.	∅ Picks pro VAG
7.	∅ Aufträge pro VAG

Das letzte Argument führt direkt zum Begriff der **Bereitstellungseffizienz**. Sie ist das Verhältnis der Anzahl insgesamt realisierter Picks (Output) zur Anzahl bereitgestellter Produkte (Input) und entspricht gerade der ∅ Anzahl Picks pro Stellplatz. Ist diese Kennzahl größer, wird das entsprechende Planungsergebnis als effizienter bezeichnet. Werden einzelne Palettenplätze fokussiert, wird ungeachtet der Vollständigkeit von Aufträgen der Begriff »produktbezogene Bereitstellungseffizienz« oder kurz **Artikeleffizienz** verwendet. Die zuletzt genannte Kennzahl kann ebenfalls bereits unmittelbar nach Ende der Belegphase bestimmt werden und ist in Kombination mit historischem Datenmaterial eine Entscheidungshilfe für die Platzierung von Produkten auf der Kommissionierfläche. Alle Kennzahlen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Rolle der MBP mit den geltenden Rahmenbedingungen wird im nachfolgenden Unterkapitel ausführlich beschrieben.

2.5 Die Materialbereitstellungsplanung als zentraler Prozess für einen optimierten Versand

Die im Zusammenhang mit der Versandabwicklung stehenden Prozessschritte im LGZ benötigen zu verschiedenen Zeitpunkten qualitative oder quantitative Plan- und Steuerungsdaten, um reibungsarm und möglichst effizient durchgeführt werden zu können. Eine wesentliche Aufgabe der MBP ist es, diese Daten zur Planung, Steuerung und Durchführung der Versandtermine sowie für weitere periphere Aufgaben im Rahmen der Versandplanung bereitzustellen. Zyklusabhängig können zwei Aufgaben unterschieden werden (vgl. Abbildung 4, S.6).

In **Zyklus Z1** besteht die Aufgabe, auf Basis vergangenheitsbezogener Daten sogenannte Kernprodukte zu identifizieren, die im Bereich der Palettenkommissionierung fest eingeplant und im Vorfeld eines Versandtermins bereits aufgebaut werden können. Für die Ermittlung der Kernprodukte werden Datensätze mehrerer vergleichbarer Versandtermine der Vergangenheit analysiert und jeweils die Produkte mit sehr hohen Belegerzahlen ermittelt. Diejenigen, die in allen Datensätzen zur Gruppe der am stärksten nachgefragten gehören, sind Kandidaten für die Auswahl als Kernprodukte eines Versandtermins. Nach Identifikation der Kernprodukte ist es möglich, mit der Einrichtung der Versandfläche zu beginnen und die Palettenkommissionierung vorzubereiten. Die frühe Produktauswahl für die Kommissionierung und die damit verbundene Festlegung engt natürlich den Spielraum für eine eventuell nachfolgende Optimierung ein, hilft aber bei der Glättung von Belastungsspitzen der Intralogistik.

Zu Beginn des **Zyklus Z2** wird noch vor Versandtermin auf Basis der dann vorliegenden finalen Belegungen zunächst geprüft, welche Aufträge mit den ermittelten Kernprodukten bereits vollständig abgedeckt sind und somit kommissioniert werden könnten. Ein Auftrag gilt als »vollständig abgedeckt«, wenn seine Positionen eine Teilmenge der aktuell bereitgestellten (Kern-)Produkte bilden. Eine wichtige Aufgabe der MBP im Zyklus 2 ist es, weitere Produkte zu bestimmen, die vor dem Hintergrund der in 2.4 durchgeführten Zielanalyse optimal hinzugefügt werden sollten. Kern- plus hinzugefügte Produkte bilden eine Konfiguration. Deren endgültige Festlegung stellt somit ein komplexes Optimierungsproblem dar, bei dem verschiedenartige Bedingungen bei teils konkurrierenden Zielen einzuhalten sind. Eine Lösung des Problems wird sich daher immer in einem Spannungsfeld bspw. zwischen Anzahl realisierbarer Picks und Anzahl dafür benötigter Plätze bewegen.

3 Datenaufbereitung, Daten- und Strukturanalyse

Vor einer modelltheoretischen Betrachtung und dem nachfolgenden mathematischen Analysen wird zunächst ein Einblick in die innere Struktur vorliegender Daten und das Anforderungsspektrum eines Versandtermins gegeben; Grundlage ist dabei ein ausgewähltes Sommersemester. Zum Ende des Belegzeitraums lagen für den Hauptversand 73.852 Aufträge vor, die zu 7.965 VAGs mit entsprechenden Wiederholzahlen zusammengefasst wurden. Daraus resultierte eine in 15 Tagen zu erbringende Pickgesamtleistung von insgesamt 334.001 Picks bei einer Menge von 993 Artikeln. Die Lastgrenze für die Behälterkommissionierung wird mit $5.000 \text{ [Picks/Tag]} \times 15 \text{ [Tage]} = 75.000 \text{ [Picks]}$ kalkuliert. Von den 7.965 VAGs enthalten 5.755 jeweils nur einen individuellen Auftrag (Singleorder-VAG (SO)); die übrigen 2.210 VAGs sind entsprechend Multiorder-VAGs (MO).

Tabelle 2: Realdaten für den Hauptversand eines Sommersemesters

Input	
1. # Produkte (Artikel)	993
2. # bestellte Artikel insgesamt	334.001
3. # Aufträge gesamt (Belegungen)	73.852
4. # Versandauftragsgruppen (VAG)	7.965
5. davon # Einzelaufträge (SO)	5.755
Rahmendaten	
1. Leistungsfähigkeit der Behälteranlage [Picks/Tag]	[2.500 ... 5.000]
2. Dauer Hauptversand [Tage]	15
3. Behälteranlage Hauptversand [<i>min</i> ... <i>max</i>] [Picks]	[37.500 ... 75.000]
4. Volumen Kommissionierung in der Fläche [Picks]	[259.000 ... 296.500]

In Abbildung 5 sind statistische Kennwerte bezogen auf VAGs als Boxplot dargestellt. Im Durchschnitt besteht eine VAG aus 9,16 Positionen bei einer Bandbreite von 1 bis maximal 43.

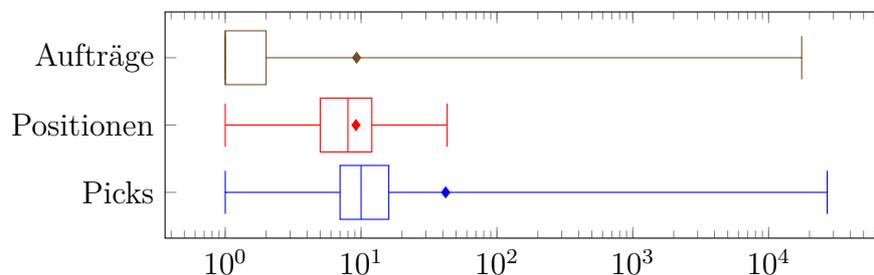


Abbildung 5: Statistische Kennzahlen bezogen auf VAGs als Boxplot

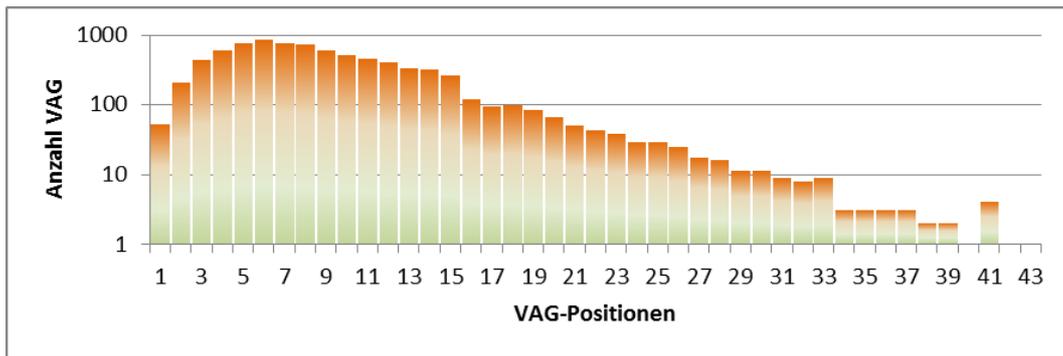


Abbildung 6: Anzahl Auftragspositionen in VAGs

Pro VAG sind im Mittel 9,27 Aufträge zu kommissionieren. In dem entsprechenden Boxplot fallen Minimum, 1. Quartil und Median mit Wert 1 zusammen. Das Maximum liegt bei 17.516 Aufträgen. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Anzahl Positionen zwischen 1 und 43 in den VAGs. Die VAG-Umfänge sind in Abbildung 7 graphisch dargestellt. Die Extrempunkte der Verteilung sind darin besonders hervorgehoben: 5.755 VAGs mit je nur einem Auftrag sowie 1 VAG mit 17.516 identischen(!) Aufträgen.

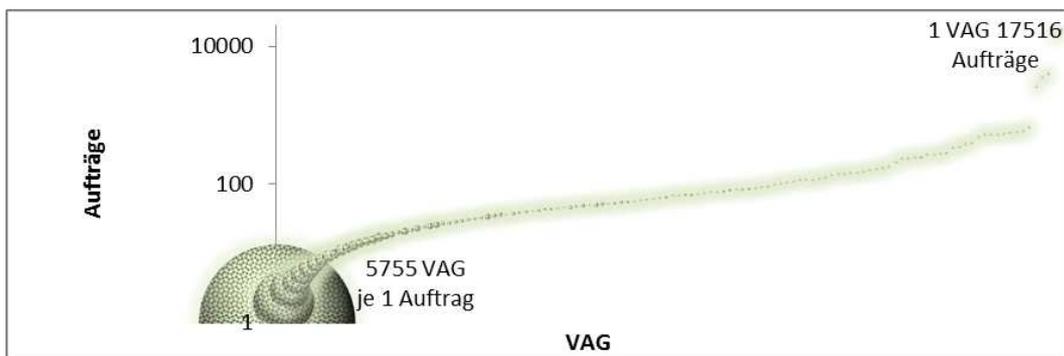


Abbildung 7: Verteilung VAGs nach Klassen

Für die Disposition und damit auch für die Ausführungen hier von besonderer Bedeutung ist die Anzahl Picks, die mit einer VAG erreicht werden kann. Im Schnitt sind dies 41,94 [Picks/VAG], dabei liefert die *produktivste* VAG allein 26.992 Picks. 75% aller VAGs tragen nicht mehr als 16 Picks bei, weniger als 4% schaffen die 100er-Hürde. Die zuletzt genannten 302 VAGs entsprechen allerdings ca. 68% (226.882) des Pickgesamt volumens. Die Zahlen machen deutlich, dass große Spannweiten zwischen Minimal- und Maximalwerten bestehen, obwohl die Quartile recht *kompakt* wirken.

4 Heuristiken für die Materialbereitstellungsplanung

4.1 Rahmenbedingungen für die Kommissionierung

Der termingerechte vollständige Versand aller bestellten Materialien ist eine zwingende Forderung an das LGZ und gibt somit den Rahmen aller Optimierungsüberlegungen vor. Gemäß Datengrundlage für den ausgewählten Hauptversand im Sommersemester müssen somit insgesamt 334.001 Artikel innerhalb von 15 Tagen gepickt werden. Eine ebenfalls nicht zu vernachlässigende zusätzliche Anforderung besteht im Ausschluss von Teillieferungen, was die stets vollständige Kommissionierung eines Auftrags impliziert. Durch die maximale Kapazität der Behälteranlage ist bereits eine Untergrenze der mindestens auf der Fläche zu kommissionierenden Aufträge festgelegt. Wie in Tabelle 2 angegeben resultiert aus einer maximalen Auslastung der Behälteranlage, dass mindestens 259.000 Picks durch die FK zu leisten sind (LB). Da eine Unterschreitung von 2.500 [Picks/Tag] auf der Behälteranlage vermieden werden sollte, ergibt sich im Hauptversand für die BK eine untere Schranke von 37.500 Picks und entsprechend höchstens 296.500 Picks bei der FK. Unter dieser Bedingung werden nun Szenarien untersucht, die unterschiedliche Ziele verfolgen und/oder zusätzliche Forderungen berücksichtigen. Aus ergonomischer Sicht ist bspw. nur eine begrenzte Zahl an Palettenstellplätzen im Kommissionierbereich nutzbar. In Folge dessen ist auch die Zahl der Produkte begrenzt, die bei der Kommissionierung zur Verfügung stehen. Alle Aufträge, die sich mit der Konfiguration nicht vollständig abdecken lassen, müssen über die Behälterkommissionierung abgewickelt und an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

4.2 Heuristiken für die Zuordnung zu Kommissionierbereichen

Die planvolle Zuordnung von Versandaufträgen zu Kommissionierbereichen ist ein wesentliches Element der MBP. Durch die Festlegung der zu kommissionierenden Einheiten wird mittelbar auch der Materialbedarf der einzelnen Bereiche bestimmt.

Zuordnung nach Lehrinhalten

Eine langjährig eingesetzte Zuordnungsheuristik besteht – wie in Unterkapitel 2.1 bereits kurz dargestellt – in der Verteilung der Aufträge nach Lehrinhalten. Bei diesem Ansatz wurden alle Aufträge, die nur Inhalte der Fakultäten KSW und MI enthalten, der Kommissionierung im Obergeschoss und die der Fakultäten WIWI und REWI dem Kommissionierbereich im Erdgeschoss zugeordnet. Aufträge mit gemischten Inhalten mussten in einem Bereich begonnen und dann im anderen abgeschlossen werden.

Bezeichnet G_k eine einzelne VAG, so stellt $\mathcal{G} = \{G_1, \dots, G_\ell\}$ die Menge aller Aufträge dar. Bei der Belegung können Studierende aus einer Menge $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_m\}$

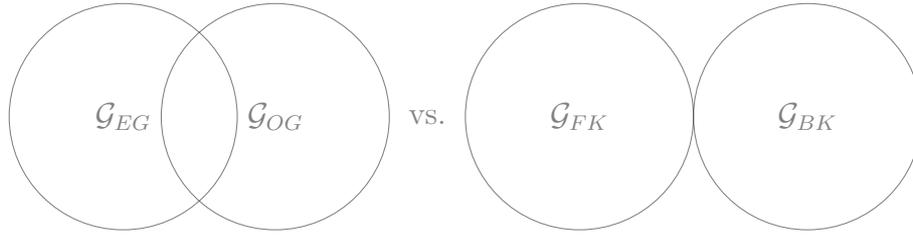


Abbildung 8: Klassische Kommissionierbereichszuordnung vs. disjunkte Aufteilung

von Produkten (Artikeln) auswählen. Somit lassen sich die den Kommissionierbereichen zugeordneten VAGs mit (1) in der Mengenschreibweise auch formal erfassen.

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{OG} &= \{G_k \mid \exists P_j \in G_k \text{ mit } P_j \in (\text{KSW} \cup \text{MI})\} \\ \mathcal{G}_{EG} &= \{G_k \mid \exists P_j \in G_k \text{ mit } P_j \in (\text{REWI} \cup \text{WIWI})\} \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei enthält \mathcal{G}_{OG} die Aufträge für das Ober- und \mathcal{G}_{EG} die für das Erdgeschoss. KSW, MI, REWI, WIWI sind hier die durch das Curriculum vorgegebenen Referenzmengen. Eine VAG wird einem Bereich genau dann zugeordnet, wenn ihre (Auftrags-)Positionen Elemente der jeweiligen Referenzmengen sind. Die Schnittmenge $\mathcal{G}_{EG} \cap \mathcal{G}_{OG}$ kann, muss aber nicht leer sein (vgl. Abbildung 8).

Die Kommissionierbereiche werden so eingerichtet, dass alle Materialien (Produkte) $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_m\}$ nach Fakultäten getrennt bereitzustellen sind. \mathcal{P}_{EG} bzw. \mathcal{P}_{OG} bezeichnen in (2) die den Bereichen zugeordneten Materialien, wobei $\mathcal{P}_{EG} \cap \mathcal{P}_{OG} = \emptyset$.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{OG} &= \{P_j \mid P_j \in (\text{KSW} \cup \text{MI})\} \\ \mathcal{P}_{EG} &= \{P_j \mid P_j \in (\text{WIWI} \cup \text{REWI})\} \end{aligned} \quad (2)$$

Das Verfahren garantiert eine einfache und jederzeit nachvollziehbare Zuordnung von Materialien, Aufträgen und Verantwortlichkeiten bei minimaler Information über die Versandstruktur. Lediglich eine Auflistung der zu versendenden Artikel je Versandtermin und ggf. eine grobe Schätzung der Versandmengen sollten vorliegen; erfahrene Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter benötigen letztere jedoch kaum.

Der Vorteil der einfachen Durchführung zehrte sich mit Ausweitung des Produktportfolios und gestiegener Nachfrage bei gleichbleibendem Platzangebot in den Kommissionierbereichen im Laufe der Zeit soweit auf, dass Technologie und Verfahren angepasst werden mussten. Mit Einführung der Behälteranlage wurden erste Überlegungen hinsichtlich einer Trennung des Massen- und Individualgeschäfts angestellt. Das bedeutete aber gleichzeitig, sich von dem bisherigen deterministischen

Dispositionsverfahren zu verabschieden und situationsgerechte, auftragsbezogene Zuordnungsstrategien zu entwickeln.

Heuristik »Trenngrenze« (TG)

Pionier unter den neueren Konzepten ist der sogenannte Trenngrenzenansatz, bei dem die Auftragswiederholzahl, also die Anzahl der Aufträge in einer VAG, über die Zuordnung zur Behälter- oder zur Palettenkommissionierung entscheidet. Damit wird ein erster Versuch unternommen, die bereits angesprochene Aufteilung in Individual- und Massengeschäft zu realisieren. Die Entscheidung, bei welcher Wiederholrate die Trennung vorzunehmen ist, wird extern getroffen; der Wert wird entsprechend als **Trenngrenze** (TG) bezeichnet.

$$\begin{aligned}\mathcal{G}_{BK} &= \{G_k \mid g_k > TG\} \\ \mathcal{G}_{FK} &= \{G_k \mid g_k \leq TG\}\end{aligned}\tag{3}$$

\mathcal{G}_{BK} bzw. \mathcal{G}_{FK} sind die dem jeweiligen Bereich zugeordneten VAGs, und g_k ist die Wiederholrate einer VAG G_k . Es gilt $\mathcal{G}_{FK} \cap \mathcal{G}_{BK} = \emptyset$ (siehe Abbildung 8)!

Die Materialbereitstellung folgt der VAG-Zuordnung und wird mit (4) formal erfasst.

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{BK} &= \{P_j \mid P_j \in G_k \text{ mit } G_k \in \mathcal{G}_{BK}\} \\ \mathcal{P}_{FK} &= \{P_j \mid P_j \in G_k \text{ mit } G_k \in \mathcal{G}_{FK}\}\end{aligned}\tag{4}$$

\mathcal{P}_{BK} und \mathcal{P}_{FK} sind die der Behälter- bzw.- der Flächenkommissionierung zugeordneten Materialien, wobei $\mathcal{P}_{BK} \cap \mathcal{P}_{FK}$ leer sein kann, es in der Regel aber nicht ist. Es gibt also Produkte, die in beiden Kommissionierbereichen bereitgestellt werden müssen. Die Anwendung der Heuristik »Trenngrenze« ist leicht implementierbar, flexibel und gut nachvollziehbar. Durch Simulation können Disponentin oder Disponent für verschiedene Trenngrenzen die Auswirkungen für die Kommissionierung ermitteln, um eine geeignete Parameterkonstellation auszuwählen und umzusetzen. Die Anwendung der Heuristik scheitert allerdings in der Praxis, weil dabei die Lastgrenze der Behälteranlage außer Acht gelassen wird. Diese wird, wie später noch ausgeführt wird, bei dieser Vorgehensweise in jedem Fall überschritten.

Heuristik »Artikeleffizienz« (AE)

Während die bisherigen Verfahren Eigenschaften der Aufträge bzw. der VAGs als Kriterium für die Bereichszuordnung herangezogen haben, fokussiert die Heuristik »Artikeleffizienz« die zu kommissionierenden Produkte und nutzt die Bestellhäufigkeiten als Auswahlkriterium. Dem Palettenbereich werden die am häufigsten nachgefragten Materialien zugeordnet. Die hierzu notwendige Festlegung des Rangs m ($\text{rang}(P_j) = m$) des letzten für die FK bestimmten Artikels P_j muss unter Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen simulativ ermittelt werden. Somit ist die Produktpalette gemäß (5) festgelegt.

$$\mathcal{P}_{FK} = \{P_j \mid \text{rang}(P_j) \geq m\} \quad (5)$$

$\text{rang}()$ gibt also die Position der nach Bestellhäufigkeit absteigend sortierten Artikel an. Mit dem aufgespannten Artikelspektrum werden alle so kommissionierbaren VAGs der Palettenkommissionierung zugewiesen. Die Kommissionierung der verbleibenden VAGs erfolgt über die Behälteranlage, wodurch ebenfalls eine disjunkte Aufteilung der Aufträge gewährleistet ist. Die für die Behälterkommissionierung erforderlichen Produkte sind mit (6) formal erfasst.

$$\mathcal{P}_{BK} = \{P_j \mid \exists k \text{ mit } P_j \in G_k, G_k \in \mathcal{G}_{BK}\} \quad (6)$$

Ein Vorteil der beschriebenen Heuristik ist die Möglichkeit, eine Begrenzung der Kommissionierfläche a priori zu berücksichtigen. Außerdem werden mit der so vorgenommenen Artikelzuordnung mit hoher Wahrscheinlichkeit auch viele »Massen-VAGs« in der Fläche kommissioniert.

4.3 Auswertung der Heuristiken für verschiedene Szenarien

Bei Anwendung der in 4.2 vorgestellten Heuristiken mit geeigneten Parametern auf Realdaten werden die genannten Stärken und Schwächen nochmals besonders deutlich. Die Untersuchung der zu erbringenden Pickzahlen in Relation zu den jeweils in den Kommissionierbereichen benötigten Artikeln zeigt bspw. bei Anwendung der Heuristik »TG« die Unvereinbarkeit von erforderlicher Pickleistung und beschränktem Platzangebot. Ordnet man alle VAGs mit einer Wiederholrate von maximal drei Aufträgen der Behälteranlage zu - kurz mit TG-3 bezeichnet -, so müssen dort knapp 79.000 Picks erfolgen (vgl. Tabelle 3). Dieser Wert liegt etwa 4.000 Picks über der Leistungsgrenze und würde einen zusätzlichen Tag für die dortige Kommissionierung bedeuten. Die insgesamt für die BK benötigten 975 verschiedenen Produkte stellen kein Problem dar, da gemäß Einlagerstrategie des LGZ der Zugriff auf die gesamte Produktpalette im Behälterlager vorgesehen ist.

Begrenzt ist jedoch der Platz bei der FK, und die benötigten 770 Produkte übersteigen die vorhandenen Stellplätze um mehr als das Doppelte. Passt man den Parameter der TG-Heuristik soweit an, dass sich ein wünschenswerter Platzbedarf (bspw. ≤ 200) einstellt, muss die Trenngrenze auf 50 erhöht werden. Mit TG-50 wird die vorgegebene Platzanzahl zwar eingehalten, es werden aber unerreichbare 200% Pickleistung für die Behälterkommissionierung eingelastet.

Tabelle 3: Ergebnisse der Zuordnungsheuristik für die BK und FK

Heuristik		Behälter	Palette
TG-3	# Produkte	975	770
TG-3	# real. Picks	79.124	254.877
TG-3	# komm. VAGs (SO)	6.996 (5.755)	969 (0)
TG-3	# komm. Aufträge	8.612	65.240
TG-50	# Produkte	993	199
TG-50	# real. Picks	151.041	182.960
TG-50	# komm. VAGs (SO)	7.872 (5.755)	93 (0)
TG-50	# komm. Aufträge	18.321	55.531
AE-233	# Produkte	993	233
AE-233	# real. Picks	75.314	258.687
AE-233	# komm. VAGs (SO)	5.261 (4.125)	2.704 (1.630)
AE-233	# komm. Aufträge	10.095	63.757

Wie bereits erwähnt eignet sich die Heuristik »TG« weniger für den praktischen Einsatz, sondern wird hier eher zu Vergleichszwecken verwendet. Aus den Erkenntnissen können die folgenden wünschenswerten Eigenschaften einer Zuordnungsmethode abgeleitet werden:

1. Mit einer ergebnisorientierten Parametrisierung sollte das Erreichen einer gewünschten Pickleistung möglich sein.
2. Sowohl Pick- als auch Platzrestriktionen sollten eingehalten werden.

Mit der TG-Heuristik ist die 1. Forderung zwar erfüllbar, die gleichzeitige Einhaltung von Forderung 2 allerdings nicht möglich. Hier zeigt die Heuristik »AE« bessere Ergebnisse, denn eine Zielwertsuche ergibt, dass mit 233 Artikeln in der Palettenkommissionierung Pick- und Platzrestriktionen erfüllt werden (s. AE-233 in Tabelle 3).

Lohnenswert ist auch ein Blick auf die VAGs. Während bei TG-3 der Palettenkommissionierung 969 VAGs zugeordnet werden, ist dieser Wert bei der AE-Heuristik fast dreimal so hoch, wobei die Anzahl zu kommissionierender Aufträge nicht proportional zur Anzahl VAGs ist!

Tabelle 3 eröffnet noch einen detaillierteren Blick auf die Zuordnungsergebnisse, indem zusätzlich die Einzelaufträge in der Zeile der VAGs ausgewiesen sind. Die

TG-Ansätze *pressen* anforderungsgemäß alle SO in die Behälterkommissionierung. AE-233 dagegen ordnet der BK anteilig immer noch deutlich mehr SO zu als der FK, wodurch die Anzahl Picks mit langen Laufwegen in der FK in Grenzen gehalten werden.

In Tabelle 4 ist die Kennzahl Picks/Artikel zu beachten, die in Tabelle 1 bereits als Bereitstellungseffizienz bezeichnet wurde. Ein hoher Wert ist insbesondere in der Palettenkommissionierung positiv zu sehen. Für AE-233 übersteigt die Kennzahl trotz Einhaltung von Pick- und Platzrestriktionen die Ergebnisse der TG-Heuristik. Eine trotzdem noch hohe Anzahl SO in der Palettenkommissionierung reduziert allerdings die relative Pickleistung pro VAG. In der Praxis bedeutet dies, dass die Kommissionierer mehr Strecke und Zeit investieren müssen, um das Pickergebnis zu erreichen. Die Synergieeffekte, die sich zwangsläufig bei der Kommissionierung von MO einstellen, fallen weg. Bei SO fallen alle Kommissionierzeiten absolut je Auftrag an und können nicht auf die Aufträge eines MO verteilt werden. Die Forderung eines möglichst geringen SO-Anteils in der Palettenkommissionierung (vgl. Abschnitt 2.4.1) wird damit nochmals unterstrichen und ist auch aus organisatorischen Gründen wünschenswert.

Tabelle 4: Kennzahlen zu den Ergebnisse der Zuordnungsheuristik (vgl. Tab. 3)

Heuristik		Behälter	Palette
TG-3	∅ Picks pro Artikel	81,15	331,01
TG-3	∅ Picks pro VAG	11,31	263,03
TG-3	∅ Aufträge pro VAG	1,23	67,33
TG-50	∅ Picks pro Artikel	152,11	919,40
TG-50	∅ Picks pro VAG	19,19	1967,31
TG-50	∅ Aufträge pro VAG	2,33	597,11
AE-233	∅ Picks pro Artikel	75,84	1110,24
AE-233	∅ Picks pro VAG	14,32	95,67
AE-233	∅ Aufträge pro VAG	1,92	23,58

Die Bereitstellungsplanung für Studienmaterialien für die nachfolgende Kommissionierung, die bisher in ihren Prozessen beschrieben und zu der ausgewählte Teilprobleme mittels Heuristiken gelöst wurden, wird im Hinblick auf eine spätere Optimierung im nachfolgenden Kapitel unter verschiedenen Zielen und Restriktionen mathematisch modelliert.

5 Mathematische Modellierung und Optimierung

5.1 Mathematische Modelle der MBP bei unterschiedlicher Zielsetzung

5.1.1 Beschreibung der Inputdaten und Entscheidungsgrößen

Zu Beginn ist es erforderlich, die notwendigen Variablen zu definieren und mögliche Parameter zu benennen. Dabei wird gleichzeitig die allgemeine Begrifflichkeit aus der Logistik auf die spezielle Anwendung an der FernUniversität übertragen und mit Inhalt gefüllt.⁴

Vor Beginn eines Semesters tragen die Studierenden über die Plattform der Virtuellen Universität (VU) die Belegung der Kurse ein, die sie im nächsten halben Jahr bearbeiten wollen. Die didaktische Reihenfolge wurde dazu bereits im Vorfeld in den Fakultäten festgelegt, d.h. welche Materialien zu welchem Zeitpunkt verschickt werden, so dass mit $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ die Menge der Belegungen einer/eines Studentin/Studenten pro Semester pro Versandtermin bezeichnet werden kann. Im Folgenden spricht man bei A_i ($i \in \{1, \dots, n\}$) synonym auch von Aufträgen. Da es in der Menge \mathcal{A} identische Aufträge, das heißt übereinstimmende Belegungen verschiedener Studierender gibt, lassen sich derartige Aufträge zu Versandauftragsgruppen (VAGs) $\mathcal{G} = \{G_1, \dots, G_\ell\}$ zusammenfassen. Jeder VAG G_k ($k \in \{1, \dots, \ell\}$) muss damit zusätzlich ein Gewicht g_k zugeordnet werden, das angibt, wie oft die Kombination in der Menge aller Aufträge vertreten ist. Man spricht dabei auch von Wiederholrate.

Bei der Belegung kann aus einer Menge $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_m\}$ von Produkten (Artikeln) ausgewählt werden. Ob ein Produkt P_j in Auftrag A_i bzw. VAG G_k enthalten ist, wird in einer Matrix D gespeichert, wobei

$$d_{ij} \text{ bzw. } d_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } P_j \text{ in Auftrag } A_i \text{ bzw. VAG } G_k \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Wie schon beschrieben erfolgt der Großteil der Kommissionierung in der Fläche, auf der entsprechende Paletten sortenrein platziert werden. Die Fläche und damit die Anzahl der möglichen Palettenstellplätze ist nicht zuletzt aus ergonomischen Gründen beschränkt; diese Kapazitätsschranke wird mit $c \in \mathbb{N}$ bezeichnet. Nun fehlen für das mathematische Optimierungsmodell noch die Variablen, die steuern welche Produkte für die Kommissionierung bereitgestellt werden sollen (x), und jene die anzeigen, welche Aufträge damit erfüllt werden können (y) bzw. welche Auftragsgruppen vollständig zu kommissionieren sind (z).

⁴ Alle Symbole und Bezeichner sind mit ihrer jeweiligen Bedeutung auch im Symbolverzeichnis auf S.iii nachzulesen.

$$\begin{aligned}
x_j &= \begin{cases} 1 & \text{falls Produkt } P_j \text{ bereitgestellt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\
y_i &= \begin{cases} 1 & \text{falls Auftrag } A_i \text{ bedient} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\
z_k &= \begin{cases} 1 & \text{falls VAG } G_k \text{ vollständig kommissioniert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}
\end{aligned}$$

Tabelle 5: Simplifiziertes Praxisbeispiel

Auftr.	Produkt A-Gr.	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	g
A_1	G_1	1	1	1								1
A_2	G_2	1	1			1	1					1
A_3	G_3					1	1	1	1			1
A_4	G_4							1	1	1	1	2
A_5								1	1	1	1	
A_6	G_5							1		1	1	1
A_7	G_6	1	1					1	1			1
A_8	G_7			1	1							1
A_9	G_8							1		1		1
A_{10}	G_9								1	1		1
A_{11}	G_{10}	1	1									1
A_{12}	G_{11}					1	1					2
A_{13}						1	1					
A_{14}	G_{12}										1	2
A_{15}											1	
A_{16}	G_{13}			1	1	1	1	1				1
A_{17}	G_{14}				1							1
A_{18}	G_{15}	1										1
A_{19}	G_{16}	1						1				1
A_{20}	G_{17}					1	1	1				1
A_{21}	G_{18}		1	1								1
Bestellhäufigkeit		6	5	4	3	6	6	9	5	5	5	54

Die Modellierung wird an einem simplifizierten Praxisbeispiel verdeutlicht, und es wird damit bereits klar, welche Komplexität hinter der kompakten Notation der Modelle steht. Betrachtet werden 21 Aufträge A_1, \dots, A_{21} , also die Belegungen von einundzwanzig Studierenden, die zu einem Versandtermin bearbeitet werden sollen. Zur Verfügung stehen 10 Produkte P_1, \dots, P_{10} , die von $c = 5$ Palettenstellplätzen zu kommissionieren sind. Die Zuordnung von Produkten zu Aufträgen ist in der Matrix in Tabelle 5 notiert, wobei (d_{ij}) gleich 1, falls Produkt P_j in Auftrag A_i enthalten ist. Ebenfalls in der Tabelle ist abzulesen, dass die Aufträge A_4 und A_5 ,

A_{12} und A_{13} sowie A_{14} und A_{15} identisch sind und deshalb Auftragsgruppen G_4 bzw. G_{11} bzw. G_{12} bilden. Die letzte Spalte gibt die Wiederholrate an, also die Häufigkeit, mit der die jeweilige Kombination auftritt.

Neben der Produktbestellhäufigkeit, die der Artikeleffizienz entspricht und bereits zu jeder Spalte in Tabelle 5 notiert ist, kann das Planungsproblem durch die bekannten Kennzahlen mit den in Tabelle 6 angegebenen Werten charakterisiert werden.

Tabelle 6: Kennzahlen zum simplifizierten Praxisbeispiel

Input		
1.	# Produkte (Produktpalette)	10
2.	# bestellte Artikel insgesamt	54
3.	# Aufträge insgesamt	21
4.	# Versandauftragsgruppen (VAGs)	18
5.	# Einzelaufträge (SO) insgesamt	15
6.	∅ Positionen pro Auftrag	2,57
7.	∅ Aufträge pro VAG	1,16
8.	∅ Produktbestellhäufigkeit	5,4
9.	Artikeleffizienz	Tab. 5

5.1.2 Greedy-Ansatz

Bei der Bereitstellung für die nachfolgende Kommissionierung handelt es sich um ein Auswahlproblem, bei dem der Nutzen eines Produktes umso größer ist, je häufiger dieses in Aufträgen vorkommt, d.h. je höher die erreichte Gesamtpickzahl ist. Die bereits mit der Heuristik »AE« verfolgte Selektionsstrategie auf Basis der Artikeleffizienz führt unmittelbar zum ersten mathematischen Modell, das auf dem bekannten Rucksackproblem basiert (vgl. DEMPE und SCHREIER 2006, S.174).

$$\max \sum_k g_k \sum_j d_{kj} x_j \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j x_j \leq c \quad (8)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (9)$$

Die Zielfunktion (7) maximiert die Summe der potenziellen Picks aller ausgewählten Produkte unter Berücksichtigung der Wiederholraten in den Auftragsgruppen, d.h. die maximal mögliche Gesamtpickzahl (Upper-Bound). Mit der Kapazitätsrestriktion (8) wird die Anzahl der auszuwählenden Produkte auf Basis der verfügbaren Palettenstellplätze beschränkt. Die Auswahl der Produkte erfolgt über Binärvariable (s.o.), die entsprechend in (9) deklariert sind.

Für das vorgestellte Beispiel ergibt sich das nachfolgende Modell.

$$\begin{aligned}
 \max \quad & 6x_1 + 5x_2 + 4x_3 + 3x_4 + 6x_5 + 6x_6 + 9x_7 + 5x_8 + 5x_9 + 5x_{10} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{10} x_j \leq 5 \\
 & x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \{1, \dots, 10\}
 \end{aligned}$$

Der Zielfunktionswert der Lösung dieses Optimierungsproblems ist 32 bei Auswahl der Produkte $P_1, P_5, P_6, P_7, P_{10}$, d.h. es könnten maximal 32 Artikel kommissioniert werden, wenn die zugehörigen Aufträge komplett wären. Prüft man nach, welche Bestellungen wirklich vollständig sind, ergibt sich, dass nur 5 VAGs mit insgesamt 12 Artikeln kommissioniert werden können. Das Verhältnis von kommissionierbaren zu nicht kommissionierbaren VAGs ist somit mit 0,38 relativ schlecht. Die (realisierbare) Bereitstellungseffizienz der ermittelten Auswahl ist 2,4 bei einer durchschnittlichen Anzahl (realisierbarer) Picks pro VAG von 2,4. In Tabelle 7 sind die Zahlen übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 7: Kennzahlen zum Greedy-Ansatz

Output	
1. # Stellplätze	5
ausgewählte Produkte	$P_1, P_5, P_6, P_7, P_{10}$
2. # realisierbare Picks	12
3. # kommissionierbare VAGs (davon SO)	5 (3)
4. #VAGs FK/#VAGs BK	0,38
5. Bereitstellungseffizienz	2,4
6. \emptyset Picks pro VAG	2,4
7. \emptyset Aufträge pro VAG	1,4

5.1.3 Ansatz mit Berücksichtigung der Zahl realisierter Picks

Bestimmt wird die Kommissionierung durch die Versandauftragsgruppen, die mit den auf der Fläche aktuell bereitgestellten Produkten vollständig bedient werden können. Es werden somit nur solche VAGs gelistet, die komplett zu kommissionieren sind. Daraus resultiert schließlich die Anzahl der tatsächlich realisierten Picks eines Durchgangs. In dem obigen Modell wird die Zielfunktion (7) nun modifiziert, und die Restriktionen werden erweitert.

$$\max \quad \sum_k g_k \sum_j d_{kj} z_k \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j x_j \leq c$$

$$d_{kj} z_k \leq x_j \quad \forall k, j \quad (11)$$

$$z_k, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall k, j \quad (12)$$

Mit Betrachtung der VAGs \mathcal{G} wird die Binärvariable z_k eingeführt, die besagt, ob eine VAG G_k ausgewählt wurde oder nicht. Die Zielfunktion (10) maximiert die Summe der Picks, die aufgrund der ausgewählten vollständigen VAGs zustande kommen. Die Überprüfung auf Vollständigkeit erfolgt mit den Kopplungsungleichungen (11) – Es können nur VAGs G_k ausgewählt werden ($z_k = 1$), zu denen die zugehörigen Produkte P_j ebenfalls ausgewählt wurden ($x_j = 1$). Wenn ein Produkt P_j nicht in VAG G_k enthalten ist ($d_{kj} = 0$), kann der Auftrag (wg. der \leq -Restriktion) dennoch ausgewählt werden. Wenn ein Produkt nicht ausgewählt wurde ($x_j = 0$), darf es in einer ausgewählten VAG ($z_k = 1$) nicht enthalten sein ($d_{kj} = 0$).

Die Restriktionen in (11) können zusammengefasst werden zu:

$$\sum_j d_{kj} z_k \leq \sum_j d_{kj} x_j \quad \forall k \quad (13)$$

Diese Nebenbedingung garantiert, dass eine VAG vollständig kommissioniert werden kann, d.h. alle Produkte zu den betreffenden Aufträgen ausgewählt wurden.

Zum gegebenen Beispiel soll ebenfalls die mathematische Modellierung konkret formuliert werden. Das Modell enthält 28 Variable und neben Zielfunktion und Kapazitätsrestriktion noch 18 weitere Nebenbedingungen, jeweils eine pro VAG. Die Ungleichungen zu (13) sind zweispaltig notiert.

$$\max \quad 3z_1 + 4z_2 + 4z_3 + 8z_4 + 3z_5 + 4z_6 + 2z_7 + 2z_8 + 2z_9 + 2z_{10} + 4z_{11}$$

$$+ 2z_{12} + 5z_{13} + z_{14} + z_{15} + z_{16} + 3z_{17} + 2z_{18}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{10} x_j \leq 5$$

$$\begin{array}{ll}
3z_1 \leq x_1 + x_2 + x_3 & 4z_2 \leq x_1 + x_2 + x_5 + x_6 \\
4z_3 \leq x_5 + x_6 + x_7 + x_8 & 4z_4 \leq x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} \\
3z_5 \leq x_7 + x_9 + x_{10} & 4z_6 \leq x_1 + x_2 + x_7 + x_8 \\
2z_7 \leq x_3 + x_4 & 2z_8 \leq x_7 + x_9 \\
2z_9 \leq x_8 + x_9 & 2z_{10} \leq x_1 + x_2 \\
2z_{11} \leq x_5 + x_6 & z_{12} \leq x_{10} \\
5z_{13} \leq x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 & z_{14} \leq x_4 \\
z_{15} \leq x_1 & 2z_{16} \leq x_1 + x_7 \\
3z_{17} \leq x_5 + x_6 + x_7 & 2z_{18} \leq x_2 + x_3 \\
z_k, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall k, j &
\end{array}$$

Die Anzahl realisierbarer Picks ist nun das Ergebnis der Optimierung und wird als Zielfunktionswert ausgewiesen; hier ist der Wert 20 bei Auswahl der Produkte $P_1, P_7, P_8, P_9, P_{10}$. Damit können 7 VAGs vollständig kommissioniert werden. Die durchschnittliche Anzahl Picks pro Stellplatz (Bereitstellungseffizienz) ist mit 4,0 deutlich höher als beim Greedy-Ansatz; die durchschnittliche Anzahl Picks pro VAG liegt bei 2,86. Alle Kennzahlen liefern also bessere Werte als beim Greedy-Modell. In Tabelle 8 sind sie übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 8: Kennzahlen zum RealPick-Ansatz

Output	
1. # Stellplätze	5
ausgewählte Produkte	$P_1, P_7, P_8, P_9, P_{10}$
2. # realisierbare Picks	20
3. # kommissionierbare VAGs (davon SO)	7 (5)
4. #VAGs FK/#VAGs BK	0,64
5. Bereitstellungseffizienz	4,0
6. \emptyset Picks pro VAG	2,86
7. \emptyset Aufträge pro VAG	1,29

5.1.4 Optimierung der Stellfläche bei Vorgabe einer Mindestpickzahl

Die Stellfläche und damit die Anzahl der in der Fläche platzierbarer Paletten war bei den bisherigen Modellen fest vorgegeben und wurde bei der Optimierung in der Regel voll ausgenutzt. Neben einer Maximierung der auftragsbezogenen Pickzahlen kann aus Sicht der Praktiker auch die Minimierung der Stellfläche bei gegebener Mindestpickzahl, die bspw. durch Auftragslage und technische Gegebenheiten be-

stimmt wird, ein geeignetes Optimierungsziel sein.

$$\min \sum_j x_j \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \sum_k g_k \sum_j d_{kj} z_k \geq \text{PC}_{LB} \quad (15) \\ & \sum_j d_{kj} z_k \leq \sum_j d_{kj} x_j \quad \forall k \\ & z_k, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall k, j \end{aligned}$$

Die Zielfunktion (14) minimiert nun die Anzahl benötigter Plätze, um eine durch (15) vorgegebene Mindestanzahl an Picks PC_{LB} zu erreichen oder zu überschreiten. Das mathematische Modell zum gegebenen Beispiel muss im Vergleich zur Variante der Maximierung realisierter Picks nur wenig verändert werden.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j=1}^{10} x_j \\ \text{s.t.} \quad & 3z_1 + 4z_2 + 4z_3 + 8z_4 + 3z_5 + 4z_6 + 2z_7 + 2z_8 + 2z_9 + 2z_{10} + 4z_{11} \\ & + 2z_{12} + 5z_{13} + z_{14} + z_{15} + 2z_{16} + 3z_{17} + 2z_{18} \geq 31 \end{aligned}$$

Die Ungleichungen zu (13) und die Variablenvereinbarung (12) entsprechen denen des vorigen Modells.

Tabelle 9: Kennzahlen zum PickLB-Ansatz

Output	
1. # Stellplätze	7
ausgewählte Produkte	$P_1, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$
2. # realisierbare Picks	31
3. # kommissionierbare VAGs (davon SO)	10 (7)
4. #VAGs FK/#VAGs BK	1,25
5. Bereitstellungseffizienz	4,43
6. \emptyset Picks pro VAG	3,1
7. \emptyset Aufträge pro VAG	1,3

Aufgrund externer Vorgaben sei es erforderlich, dass mindestens 31 Picks gemacht werden. Das bedeutet gleichzeitig aber auch, dass die bisher vorgegebene Zahl von 5 Stellplätzen nicht ausreicht und man wissen möchte, wieviele Plätze mindestens eingerichtet werden müssen. Ergebnis der Berechnung liefert die Zahl 7 und weist die Produkte $P_1, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$ für die Kommissionierung von 10 VAGs aus. Die Bereitstellungseffizienz beträgt 4,43; die durchschnittliche Anzahl Picks

pro VAG ist 3,1. Die Tabelle 9 enthält die Übersicht zu den Ergebnissen in diesem Modellansatz.

Im nächsten Abschnitt werden die vorgestellten Ansätze teilweise zusammengeführt, und es wird gleichzeitig dem Praktiker Gelegenheit gegeben, wünschenswerte Vorgaben zu ergänzen.

5.1.5 Zielkonsolidierung mittels Fuzzy Linearer Optimierung

Bei den bisher vorgestellten mathematischen Optimierungsmodellen wurde jeweils ein Optimierungsziel fokussiert und in der Zielfunktion formal abgebildet. So wurde aus Effizienzgründen gefordert, die Zahl der Picks bei der FK zu maximieren, um möglichst möglichst viele Aufträge, d.h. Belegungen der Studierenden im Massengeschäft abzudecken. Der Platzbedarf für die Kommissionierung war dabei gegeben und ging entsprechend als Restriktion in das Modell ein. Jedoch ist - wie zuletzt beschrieben - hinsichtlich Personaleinsatz auch die Aufstellung einer möglichst geringen Anzahl von Paletten etwa aus ergonomischen Gründen eine sinnvolle Zielsetzung. Von der Belegschaft unterstützt wird zusätzlich die Forderung, möglichst wenig Einzelaufträge in der Fläche zu kommissionieren. Nicht unerheblich ist zudem, dass die Entscheidung, welche VAGs welchem Bereich zugeordnet werden, derzeit auch noch von den Präferenzen der Disponentin bzw. des Disponenten abhängig ist. Gelingt es, die Präferenzen für den Entscheidungskalkül zu explizieren, kann dies im Modell berücksichtigt werden.

Im Operations Research sind bereits Ende der 1970er Jahre Methoden entwickelt worden, die es ermöglichen, Lineare Optimierungsprobleme um unscharfe, sogenannte fuzzy Restriktionen zu erweitern (vgl. ZIMMERMANN 1978). Eine einfach zu erfüllende Voraussetzung ist dabei, dass bereits bei der Modellierung mit der Praxis zusammengearbeitet wird. Auf Basis der realen Anwendung sollten für jede Nebenbedingung Werte angegeben werden, die auf keinen Fall über- bzw. unterschritten werden dürfen, und Werte, die wünschenswert sind. Gibt man diese Wertebereiche für die verfolgten Ziele an, so sind hierzu entsprechende Restriktionen formulierbar. Einziges Ziel ist es dann, einen Zufriedenheitsgrad λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) zu maximieren (vgl. ZIMMERMANN 1987, S.72ff.; FRANK 2002, S.106ff.).

Hinsichtlich der Nebenbedingungen werden im Folgenden im mathematischen Modell Fuzzy- \leq -Restriktionen betrachtet, bei denen obere Schranke (UB) und präferierter Wert (PV) gegeben sind; letzterer sollte nach Möglichkeit erreicht werden, die Schranke darf nicht überschritten werden. War bisher für die rechte Seite der Restriktion ein fester Wert gegeben, wird dieser nun durch die Kombination von UB und PV ersetzt. Formal wird dies in Abhängigkeit von λ in (16) formuliert.

$$(1 - \lambda) \cdot UB + \lambda \cdot PV \quad \text{mit } PV \leq UB \quad (16)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

Mittels dieser Modellierungstechnik steht nun in (17) das Ziel im Vordergrund, den Zufriedenheitsgrad λ zu maximieren und dabei Zielwerte bestmöglich zu erreichen.

Mit Blick auf die spätere praktische Anwendung wird die Stellplatzminimierung gemäß Formulierung (16) in der Restriktion zur Platzzuordnung (allocation constraint) (18) fixiert. Die Anzahl der Stellplätze sollte demnach in jedem Fall nicht größer als AC_{UB} sein, nach Möglichkeit aber eher niedriger sein und bei AC_{PV} liegen. Zusätzlich wird mit der Restriktion (19) gefordert, dass nur ein bestimmter Anteil RL_{UB} der SO in der Fläche kommissioniert wird. Wünschenswert ist hierbei natürlich, dass alle SO der BK zugeordnet werden, d.h. RL_{PV} ist gleich 0. Mit s_k wird die Information bereitgestellt, ob es sich bei VAG G_k um einen Einzelauftrag handelt ($s_k = 1$) oder nicht ($s_k = 0$).

$$max \quad \lambda \quad (17)$$

$$s.t. \quad \sum_j x_j \leq (1 - \lambda) \cdot AC_{UB} + \lambda \cdot AC_{PV} \quad (18)$$

$$\sum_k s_k z_k \leq (1 - \lambda) \cdot RL_{UB} \cdot \sum_k s_k \quad (19)$$

$$\sum_k g_k \sum_j d_{kj} z_k \geq PC_{LB} \quad (20)$$

$$\sum_j d_{kj} z_k \leq \sum_j d_{kj} x_j \quad \forall k$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$z_k, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall k, j$$

Harte Grenzen ergeben sich meist aus technischen Gegebenheiten oder Leistungsbeschränkungen. Diese sowie die »gewünschten« Zielwerte müssen mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den betroffenen Unternehmensbereichen besprochen und ggf. auf Basis historischen Datenmaterials plausibilisiert werden.

Im aktuellen Beispiel werden die Ergebnisse aus den bisher vorgestellten Modellen verwendet, um die jeweiligen Intervallgrenzen zu bestimmen. Für die Anzahl der Plätze (18) sind Werte zwischen 5 und 7 im Referenzbereich. In (19) soll die Anzahl der SO nicht über 60% der Gesamtzahl SO liegen, und es sollen gemäß (20) mindestens 50% der Picks bei der FK realisiert werden. Setzt man diese konkreten Zahlenwerte für die jeweiligen Grenzen ein, können die Ungleichungen vereinfacht werden, und es ergibt sich für das aktuelle Beispiel das Modell (21ff.).

$$\max \quad \lambda \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \quad 2\lambda + \sum_j x_j \leq 7 \quad (22)$$

$$9\lambda + \sum_k s_k z_k \leq 9 \quad (23)$$

$$\sum_k g_k \sum_j d_{kj} z_k \geq 27 \quad (24)$$

$$\sum_j d_{kj} z_k \leq \sum_j d_{kj} x_j \quad \forall k$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$z_k, x_j \in \{0, 1\} \quad \forall k, j$$

Auf den Anwendungsfall bezogen, bedeutet »weiche Planung« also:

(21): Die Zielfunktion maximiert den Zufriedenheitsgrad λ .

(22): Bei der Anzahl der auszuwählenden Produkte wäre 5 ein idealer Wert, 7 Stellplätze wären jedoch noch möglich. (Allocation Constraint - AC)

(23): Der Anteil der zugeordneten SO sollte nicht über 60% der Gesamtzahl SO liegen. (Rejection Level - RL)

(24): Die Anzahl realisierter Picks darf 27 nicht unterschreiten; in diesem Beispiel sollen also mindestens 50% der Picks auf der Fläche gemacht werden. (Pick Constraint - PC)

Tabelle 10: Kennzahlen zum Fuzzy-Ansatz

Output		
1.	# Stellplätze	6
	ausgewählte Produkte	$P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$
2.	# realisierbare Picks	28
3.	# kommissionierbare VAGs (davon SO)	8 (5)
4.	#VAGs FK/#VAGs BK	0,8
5.	Bereitstellungseffizienz	4,67
6.	∅ Picks pro VAG	3,5
7.	∅ Aufträge pro VAG	1,375

Bereits bei dem betrachteten Beispiel führt die Konsolidierung zu einer Kompromisslösung, die beide Ziele bestmöglich erfüllt (siehe Tabelle 10). Es werden 28 Picks für 8 VAGs von 6 Stellplätzen mit den Produkten $P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$ durchgeführt. Die Bereitstellungseffizienz beträgt 4,67 bei einer durchschnittlichen Anzahl Picks pro VAG von 3,5.

5.2 Resümee der Modellentwicklung

Bevor größere Testdatensätze und Realdaten analysiert werden, sollen an dieser Stelle zunächst die Konzeption der unterschiedlichen Varianten mathematischer Modelle zusammengefasst und die Ergebnisse in Tabelle 11 gegenübergestellt werden. Eingabedaten für alle Ansätze bestehen aus der Zuordnungsmatrix mit Informationen über das Vorkommen von Produkten in Aufträgen bzw. VAGs. Außerdem werden für alle Versandauftragsgruppen die Wiederholraten der einzelnen Aufträge sowie modellspezifische Parameter wie etwa Kapazitätsuntergrenzen und Mindestpickzahlen angegeben.

Greedy

In einem ersten Schritt wurde lediglich die Nachfrage jedes Produktes ermittelt und gemäß Häufigkeiten, die gleichzeitig den potenziellen Pickzahlen entsprechen, sortiert. Die zur Verfügung stehenden Plätze werden mit am stärksten nachgefragten Produkten belegt. Das »Rucksackproblem« ist ohne Solver-Unterstützung optimal lösbar (vgl. 5.1.2).

RealPick

Von maßgeblicher Bedeutung ist die Vollständigkeit der Artikelmenge für die zu kommissionierenden VAGs und die damit zu realisierende Pickzahl. In dem zweiten vorgestellten mathematischen Modell wird deshalb die Zahl realisierter Picks bei gegebener Platzkapazität maximiert; das binäre Optimierungsproblem ist mit geeigneter Software optimal lösbar (vgl. 5.1.3).

PickLB

Kann für die potenzielle Pickzahl eine untere Schranke angegeben werden, ist aus ergonomischen Gründen die Minimierung der Anzahl Bereitstellungsplätze ein geeignetes Optimierungsziel. Das mathematische Modell minimiert also die Zahl auszuwählender Produkte bei mindestens geforderter Pickzahl; auch hier kann die Lösung mittels Solver ermittelt werden (vgl. 5.1.4).

Fuzzy

Eine Möglichkeit, auch mehrere Ziele gleichzeitig zu betrachten, ist die Modellierung als »Fuzzy-Optimierungsproblem«. Sowohl Anforderungen der Praktiker als auch technische Vorgaben können dabei berücksichtigt werden. Das mathematische Modell maximiert den »Zielerreichungsgrad« und ermöglicht sowohl die Angabe wünschenswerter Zahlen als auch harter Grenzen. Das zugehörige lineare Optimierungsproblem ist mittels geeigneter Software berechenbar (vgl. 5.1.5).

In Tabelle 11 sind die Kennzahlen zu den vorgestellten mathematischen Modellen für das kleine Demonstrationsbeispiel nochmals nebeneinander gestellt. Trotz des kleinen Sortiments bei nur geringen Auftragszahlen werden Stärken und Schwächen deutlich. Die »greedy« Vorgehensweise knüpft unmittelbar an die TG-Heuristik an

und liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse im Hinblick auf die Anzahl kommissionierbarer VAGs bei gegebener Anzahl an Palettenstellplätzen. Auch bei allen anderen Kennzahlen schneidet die auf dem Rucksackmodell basierende Variante am schlechtesten ab. Bei selber Platzzahl gelingt unter expliziter Berücksichtigung der Vollständigkeit der VAGs mit »RealPick« fast ein Verdopplung der Pickleistung und damit der Bereitstellungseffizienz. Mit Blick auf technische Restriktionen, die im Realproblem etwa durch die Leistungsfähigkeit der Behälteranlage begründet sind, wurde im Modell »PickLB« eine Mindestpickzahl vorgegeben. Es kommt bei ca. 50% mehr Picks erwartungsgemäß zu einer signifikanten Steigerung der Anzahl komplettierbarer VAGs. Allerdings müssen dafür auch mehr Artikel bereitgestellt werden. Eine Forderung, die aus der praktischen Erfahrung bei der Kommissionierung resultiert, besteht darin, möglichst wenig Einzelaufträge der FK zuzuordnen. Mit dem Fuzzy-Modell ist es möglich, mehr als 50% der Picks auf der Fläche zu garantieren, also mehr als das RealPick-Modell ermittelt, und gleichzeitig nur 5 SO zuzuordnen. Dabei werden 6 Stellplätze benötigt, ein Kompromiss zwischen PV und UB.

Tabelle 11: Ergebnisse der Beispielrechnung

Parameter + Kennzahlen	Modelle			
	Greedy	RealPick	PickLB	Fuzzy
1. # Stellplätze	5	5	7	6
2. # realisierbare Picks	12	20	31	28
3. # kom. VAGs (davon SO)	5 (3)	7 (5)	10 (7)	8 (5)
4. #VAGs FK/#VAGs BK	0,38	0,64	1,25	0,8
5. Bereitstellungseffizienz	2,4	4,0	4,43	4,67
6. \emptyset Picks pro VAG	2,4	2,86	3,1	3,5
7. \emptyset Aufträge pro VAG	1,4	1,29	1,3	1,375

6 Analyse und Auswertung

6.1 Parameterwahl und Modellgenerierung

Bereits in Kapitel 3 wurden die Rahmendaten für die Kommissionierung an der FernUniversität und die Realdaten für den Hauptversand eines Sommersemesters vorgestellt. Mit speziellen Heuristiken konnten erste Ergebnisse erzielt und verschiedene Szenarien ausgewertet werden. Im Folgenden wird nun geprüft, ob der Einsatz mathematischer Modelle praxismgerechte Lösungen liefern kann. Von den in Kapitel 5 angegebenen Modellvarianten werden hier drei mit konkreten Parametern und Ergebnissen vorgestellt. Die Modelle wurden so gewählt, dass speziell dem Problem der Reduktion von SO-Anteilen in der Palettenkommissionierung bei möglichst wenig erforderlichen Stellplätzen Rechnung getragen wird. Die Rahmendaten, insbesondere die Kapazitätsrestriktionen müssen dabei natürlich berücksichtigt und Lastgrenzen eingehalten werden.

Für alle folgenden Berechnungen wird $PC_{LB} = 259.000$ gesetzt, also gefordert, dass mindestens 259.000 Picks in der Palettenkommissionierung zu realisieren sind. Mittels des Modells »PickLB« können auf dieser Grundlage mit dem Ziel der Stellplatzminimierung Berechnungen durchgeführt werden (siehe 6.2.1), deren Ergebnisse später zum Vergleich herangezogen werden. Da die SO nach Möglichkeit der Behälterkommissionierung zugeordnet werden sollen, wird in einer Variante die Restriktion hinzugefügt, dass keine SO bei der FK einzuplanen sind. Dieses Modell sei mit »PickLB-reject« bezeichnet (siehe 6.2.2). Wie schon im Anschauungsbeispiel wird in 6.2.3 das Fuzzy-Modell dazu benutzt, möglichst alle formulierten Ziele bestmöglich zu erreichen. Hinsichtlich der SO wird konkret angegeben, dass es wünschenswert ist, keine derartigen Aufträge der FK zuzuordnen, bis maximal 30% der insgesamt gegebenen SO aber noch vertretbar wäre. Bei den Palettenstellplätzen ist die Zahl von 204 vollkommen zufriedenstellend - ein Wert, der aus dem PickLB-Modell abgeleitet ist - 330 Plätze wären aber noch möglich. Harte Forderung ist, dass gemäß Datengrundlage für den Hauptversand insgesamt 334.001 Artikel innerhalb von 15 Tagen gepickt werden müssen, alle Studierenden also rechtzeitig vor Semesterbeginn ihr Studienmaterial bekommen.

Für die formulierten Bedingungen und Parametern wurden ausgewählte mathematische Modelle konkretisiert und in der Modellsprache GAMS (General Algebraic Modelling System) implementiert (GAMS 2018). Die zugehörigen Optimierungsprobleme konnten für die Realdaten mit CPLEX optimal gelöst werden; die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt und erläutert.

6.2 Optimierung und Auswertung der Ergebnisse

6.2.1 Modell PickLB

Tabelle 12: »PickLB« mit 259.000 als LB (PickLB259K)

PickLB259K		Behälter	Palette
Werte	# Produkte	993	204
	# real. Picks (SO)	75.001 (35.402)	259.000 (19.816)
	# komm. VAGs (SO)	5.251 (4.094)	2.714 (1.661)
	# komm. Aufträge	10.633	63.219
Aufteilung (Anteile)	Aufträge	14,40%	85,60%
	Picks	22,46%	77,54%
	VAGs	65,93%	34,07%
Kennzahlen	∅ Picks pro Artikel	75,53	1.269,61
	∅ Picks pro VAG	14,28	95,43
	∅ Aufträge pro VAG	2,02	23,29

Die Referenzwerte der Optimierung mittels »PickLB« sind in Tabelle 12 eingetragen. Die geforderten 259.000 Picks können mit einer beeindruckend schmalen Produktpalette (204 Artikel!) kommissioniert werden. Noch beachtlicher präsentiert sich die Bereitstellungseffizienz mit fast 1.270 Picks pro Artikel. Der SO-Anteil an Picks in der Palettenkommissionierung beträgt ca. 8,3% (1.661 SO). Damit wären ca. 29% der Einzelaufträge für die Palettenkommissionierung vorgesehen. Betrachtet man die absolute Zahl der VAGs, die der FK zugeordnet sind, übertrifft PickLB259K sogar die VAG-Zuordnung von AE-233 um 10 VAGs.

In der Praxis kann diese Aufgabe von einer Disponentin bzw. einem Disponenten ab einer gewissen Größenordnung nicht mehr ohne maschinelle Unterstützung (in angemessener Zeit) gelöst werden. Während es schon schwierig ist, das Beispiel aus Tabelle 5 (S.22) durch *Hinsehen* zu lösen und die Anzahl minimal benötigter Artikel zu bestimmen, ist dies bei einer Dimension von (8.000 x 1.000) auf keinen Fall mehr möglich.

Festzuhalten bleibt, das PickLB259K das MBP-Problem zwar äußerst bereitstellungseffizient löst, dafür aber 1.661 SO-Kommissionierungen erforderlich sind. Welche Auswirkungen ein vollständiger Verzicht aus SO in der Palettenkommissionierung hätte, zeigt der nachfolgende Abschnitt 6.2.2.

6.2.2 Modell PickLB-reject

Tabelle 13: »PickLB-reject« ohne SO bei der FK

PickLB-reject		Behälter	Palette
Werte	# Produkte	993	311
	# real. Picks (SO)	74.964 (55.218)	259.037 (0)
	# komm. VAGs (SO)	6.499 (5.755)	1.466 (0)
	# komm. Aufträge	9.240	64.612
Aufteilung (Anteile)	Aufträge	12,51%	87,49%
	Picks	22,44%	77,56%
	VAGs	81,59%	18,41%
Kennzahlen	∅ Picks pro Artikel	75,49	832,92
	∅ Picks pro VAG	11,53	176,70
	∅ Aufträge pro VAG	1,42	44,07

Wie bereits angekündigt soll durch die Hinzunahme der Forderung nach vollständiger Kommissionierung der SO über die Behälteranlage ein weiteres Referenzmodell generiert werden, dessen Ergebnisse als Vergleichsmaßstab dienen. In Tabelle 13 sind diese für PickLB-reject übersichtlich zusammengestellt. Erwartungsgemäß werden zwar 100% SO der BK zugeordnet, was aber nicht über die recht hohen Opportunitätskosten hinwegtäuschen darf. Zunächst fällt auf, dass ca. 50% Artikel mehr in der Palettenkommissionierung geplant werden müssten. Damit könnten die Platzrestriktionen des LGZ vermutlich gesprengt oder kreative Bereitstellungsformen erforderlich werden. Zum anderen sinkt die Bereitstellungseffizienz auf unter 850 Picks/Artikel. Kritisch betrachtet wirkt die VAG-Zuordnung weniger intelligent, da sie lediglich wie eine Verschiebung der SO in die Behälterkommissionierung wirkt. Von den MO werden dort nur noch ca. 5% kommissioniert; fast alle Ressourcen konzentrieren sich auf die Bearbeitung der SO. Ein »smarteres« Modell sollte von der Strategie »ganz oder gar nicht« abstrahieren und eine Balance der Nutzen von *weniger SO* und *weniger Artikel* in der Palettenkommissionierung herstellen. Dazu mehr im nächsten Abschnitt.

6.2.3 Modell Fuzzy-reject

Ein dafür geeignetes Verfahren ist in Abschnitt 5.1.5 mit der weichen Optimierung vorgestellt und als Modellvariante »Fuzzy« konkretisiert worden. In Tabelle 14 stehen die Ergebnisse des Optimierungsmodells »Fuzzy-reject«. Aufgabe für die Palettenkommissionierung besteht dabei in der Maximierung der Balance zwischen möglichst wenig benötigten Stellplätzen und möglichst wenig SO bei einem mindestens zu realisierenden Volumen von 259.000 Picks. Tatsächlich gelingt es Fuzzy-reject, die konkurrierenden Ziele zu 70,98% in Einklang zu bringen. 501 SO und damit nur 8,7% der Gesamtzahl an Einzelaufträgen verbleiben in der Palettenkommissionierung und 36 Artikel müssten zusätzlich zum Ergebnis von PickLB259K

Tabelle 14: »Fuzzy-reject« unter Berücksichtigung von SO und Artikelzahl bei der FK

Fuzzy-reject		Behälter	Palette
Werte	# Produkte	993	240
	# real. Picks (SO)	74.989 (44.901)	259.012 (10.317)
	# komm. VAGs (SO)	6.288 (5.254)	1.677 (501)
	# komm. Aufträge	10.337	63.515
Aufteilung (Anteile)	Aufträge	14,00%	86,00%
	Picks	22,45%	77,55%
	VAGs	78,95%	21,05%
Kennzahlen	∅ Picks pro Artikel	75,52	1.079,22
	∅ Picks pro VAG	11,93	154,45
	∅ Aufträge pro VAG	1,64	37,87

bereitgestellt werden. Interessant ist hierbei, dass allein 220 Artikel zur Kommissionierung der SO erforderlich wären und damit lediglich 10.317 Picks gemacht würden. Nur 20 weitere Artikel reichen aus, um die Realisierung der erforderlichen Kommissionierleistung zu sichern.

Jetzt bleibt noch die Frage, welcher SO sich Fuzzy-reject bedient, um dieses Ergebnis zu erzielen. Erfreulicherweise werden bei der Optimierung SO mit Anzahl Positionen zwischen 14 und 42 Artikeln (427 davon mit mehr als 15 Positionen) ausgewählt, wodurch die die Behälterkommissionierung praktisch zweifach entlastet wird. Aufgrund einer technischen Restriktion können dort nur VAGs mit bis zu 15 Positionen kommissioniert werden. In der Arbeitsvorbereitung werden die Aufträge größerer VAGs zunächst in Teil-Aufträge zerlegt und anschließend der Kommissionierung zugeführt. Für die Behälterkommissionierung verbleiben noch 216 VAGs, für die 234 Splitoperationen durchgeführt werden müssten. Im Vergleich zu PickLB-reject und PickLB259K spart man sich 408 bzw. 20 Splits bei 587 bzw. 236 Aufträgen.

Der Vorteil von Fuzzy-reject liegt in der Form der praxisgerechten Modellierung. Zum einen müssen nur *LB* bzw. *UB* festgelegt werden, zum anderen sind die Anforderungen an die Disponentin oder der Disponent hinsichtlich der Parametrisierung geringer, da Referenzprobleme als Orientierung zur Festlegung wünschenswerter Grenzen herangezogen werden können. Bei der Parameterschätzung sind - wie oben gezeigt - die Ergebnisse aus PickLB und PickLB-reject nutzbar, auf deren Basis dann individuelle Kommissionierpräferenzen einfließen können.

Abschließend wird mit einem Blick auf praktische Anwendbarkeit die in diesem Beitrag dargestellte Vorgehensweise nochmals zusammengefasst, und mögliche Erweiterungen des Optimierungsmodells zur Realisierung zusätzlicher Anforderungen zeigen exemplarisch auf, dass auch auf Veränderungen stets flexibel reagiert werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Materialbereitstellungsplanung des Logistikzentrums der FernUniversität in Hagen vorgestellt und aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert. Die MBP an der FernUniversität erfolgt semesterweise zyklisch für vorgegebene Versandtermine und zeichnet sich durch einige Besonderheiten aus.

Alle Auftragsdaten werden offline, d.h. nach Vorliegen sämtlicher Informationen zu Versandauftragsgruppen zusammengefasst. Die VAGs enthalten jeweils nur identische Aufträge; eine Konsolidierung ähnlicher Aufträge nach ausgewählten Kriterien erfolgt derzeit nicht. So hat weder die Kommissionierroute bei der FK noch die Bestimmung ähnlicher VAGs zur Reduktion der Behälterwechsel an den Kommissionierbahnhöfen bei der BK Einfluss auf die Kommissionierreihenfolge.

Das Platzangebot des LGZ ist durch die Gebäudearchitektur vorgegeben und auch aus ergonomischen Gründen begrenzt. Zudem haben Beobachtungen der letzten Jahre gezeigt, dass die Berücksichtigung von Bewegungsspielräumen sich positiv auf Kommissioniererergebnis und -geschwindigkeit auswirkt, da sich Laufwege verkürzen und die Orientierung erleichtert wird. Diese Aspekte waren entsprechend zu berücksichtigen.

Aufgabe der MBP ist es, alle für einen Versandtermin benötigten Artikel zu bestimmen und für die Intralogistik zusammenzustellen. Zur auftragsbezogenen Auswahl der Artikel wurden in diesem Diskussionsbeitrag verschiedene Heuristiken und Optimierungsverfahren erläutert und verglichen. Es wurde gezeigt, dass bei Forderung hoher Pickzahlen, die bei der Heuristik »Artikeleffizienz« und der Optimierungsmodellvariante »PickLB« explizit berücksichtigt wird, deutlich bessere Werte für die Bereitstellungseffizienz (\emptyset Picks pro Produkt) erzielt werden, als bei anderen Modellen. Deutlich wurde aber auch, dass die strikte Fokussierung auf die Pickleistung zu unerwünschten Auftragszuordnungen in der FK führen kann, wie das am Beispiel zur Vermeidung von SO in der FK demonstriert wurde. Dies führte zur Einführung des Kompromissmodells »Fuzzy-reject«, das beim MBP-Problem bei der FK einen Ausgleich zwischen Platzbedarf und zugeordneten SO ermöglicht.

Der Entwurf und die Entwicklung der vorgestellten Optimierungsmodelle wurde von Fachleuten aus der Praxis begleitet. Eine Ablösung des derzeit eingesetzten zweistufigen Verfahrens, das auf dem Greedy-Ansatz mit nachgeschalteter Nachbarschaftssuche basiert, ist mit geringem Aufwand möglich, und durch die Fuzzy-Modellierung können auch (konkurrierende) Optimierungsziele berücksichtigt werden.

Einige Erweiterungen, die nachfolgend skizziert werden, wurden durch die Praxis angeregt und stellen sowohl Modellerweiterungen wie auch strukturelle Veränderungen dar.

Zur Umgehung der Platzrestriktionen bzw. zur Erweiterung der Kapazitäten in der FK sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar. Die bisher getroffene Annahme, dass nur ein Produkt in entsprechender Anzahl auf einem Palettenplatz bereitgestellt werden kann, wird aufgegeben. Die Bereitstellung unterschiedlicher Artikel auf einem Lagerplatz ist nun zulässig. Dies ist insbesondere für kleinformatige Artikel sinnvoll und in der Praxis durchaus üblich. Echter Mehrwert wird allerdings generiert, wenn Artikel, die immer oder besonders häufig zusammen kommissioniert und versendet werden, zu sogenannten Sets gebündelt und auf einem Lagerplatz konsolidiert werden. Die Setbildung ist somit ein probates Mittel, um Lagerfläche einzusparen, zumal sie bereits vor dem eigentlichen Versandtermin erfolgen kann. Bei der Optimierung ist darauf zu achten, dass Redundanzen bei der Bereitstellung vermieden werden. Das bedeutet, zu einem Set sollten nicht zusätzlich noch die darin enthaltenen Elemente gesondert aufgebaut werden. Eine andere Möglichkeit, mehr Artikel je Versandtermin (VT) in der FK aufzubauen wäre, den Zeitraum in Teil-VT zu zerlegen und aufeinander abgestimmte Konfigurationen aufzubauen. Die Konfigurationen können einzeln betrachtet vergleichsweise klein sein und weniger Fläche beanspruchen. In der Summe sollte aber die Kommissionierung einer größeren Zahl von Aufträgen möglich sein. Es besteht dadurch allerdings ein höherer Organisations- und Planungsaufwand und die gesamte Intralogistik müsste stärker nach dem JIT-Prinzip ausgelegt werden.

Es gibt unterschiedliche Kriterien, die neben der reinen Primärzielorientierung auf Basis der in Abschnitt 2.4.1 genannten technischen Restriktionen zu einer Zuordnung eines Artikel zur FK führen. Beispielsweise kann aufgrund von Gewicht oder Volumen eines Produkts die Kommissionierung aus Behältern nicht praktikabel und damit die Platzierung auf Paletten erforderlich sein.

Weitere Aspekte, die Berücksichtigung finden könnten, werden hier nur angedeutet.

- Bereits in Unterkapitel 2.5 wurde darauf hingewiesen, dass die Analyse historischen Datenmaterials eine Identifizierung von sogenannten Kernartikeln ermöglicht. Damit kann ein Teil der FK bereits frühzeitig eingerichtet werden.
- Für die BK bietet sich eine Optimierung des Auftragsplittings an, um die Kommissionierung größerer Aufträge trotz Platzrestriktionen der Kommissionierbahnhöfe effizient und komfortabel durchführen zu können.
- Auch die Batchingstrategie der BK, die intern einem Dominanzprinzip folgt, bietet weiteres Optimierungspotenzial. Ziel muss es sein, die Anzahl der Behälterwechsel an den Kommissionierbahnhöfen möglichst gering zu halten. Bisher werden heuristische Verfahren zur Anordnung von Kommissionieraufträgen eingesetzt.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass bereits durch Einführung der Behälterkommissionieranlage eine bemerkenswerte Entlastung und Sicherung der Zukunfts-

fähigkeit des Versandbetriebs erreicht werden konnte. Vor allem durch die technische Unterstützung der ansonsten zeitaufwändigen und platzraubenden Bereitstellungsmaßnahmen ergeben sich Spielräume für weiterführende, hier in Grundsätzen vorgestellte Optimierungsansätze.

Die Autoren dieses Beitrags haben die Entwicklungen des Versands seit Einführung der neuen Technologie aufmerksam verfolgt und die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen stets in diese Schrift einfließen lassen. Das Optimierungsbündel, bestehend aus Datenextraktoren, Analyse- und Simulationsinstrumenten sowie den Optimierungsmodellen, liegt in einer anwendungsnahen Grundform vor. Erweiterungen, wie die oben skizzierten, können nach Bedarf oder nach wissenschaftlichem Interesse ergänzt werden.

Literatur

- BADKE-SCHAUB, P. und E. FRANKENBERGER (2004): *Management Kritischer Situationen*. Berlin / Heidelberg: Springer.
- DEKOSTER, R., T. LE-DUC und K.J. ROODBERGEN (2007): „Design and control of warehouse order picking: a literature review“. In: *European Journal of Operational Research* 182.2, S. 481–501.
- DEMPE, D. und H. SCHREIER (2006): *Operations Research – Deterministische Modelle und Methoden*. 1. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
- FRANK, H. (2002): *Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik*. Braunschweig/Wiesbaden: vieweg.
- GAMS (2018): *Documentation 25.1*. GAMS Development Corporation. URL: <https://www.gams.com/latest/docs/index.html>.
- GILS, T. van u. a. (2016): „Improving Order Picking Efficiency by Analyzing Combinations of Storage, Batching, Zoning, and Routing Policies“. In: *Proc. International Conference on Computational Logistics*. LNCS 9855. Springer, S. 427–442.
- GILS, T. van u. a. (2018): „Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review“. In: *European Journal of Operational Research* 267, S. 1–15.
- GUDEHUS, T. (2010): *Logistik*. 4. Aufl. Bd. 2. Heidelberg: Springer.
- KORTE, D. und K.-H. WEHKING (2016): „Effiziente Reorganisationsmaßnahmen in manuellen Kommissioniersystemen“. In: *Logistics Journal: Proceedings* 2016.10, S. 1–8.
- MIEBACH, B. (2017): *Handbuch Human Resource Management: Das Individuum und seine Potentiale für die Organisation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- MYERS, D.G. (2014): *Psychologie*. 3. Aufl. USA: Springer.
- SCHULTE, G. (2001): *Material- und Logistikmanagement*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- STINSON, M. und K.-H. WEHKING (2012): „Leistungsbewertung und -optimierung in der manuellen Kommissionierung“. In: *Logistics Journal: Proceedings* 2012.01, S. 1–7.
- TEN HOMPEL, M. und V. HEIDENBLUT (2011): *Taschenlexikon Logistik - Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3. Aufl. München: Springer.
- WEBER, J. und U. SCHÄFFER (2014): *Einführung in das Controlling*. 14. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- ZELLERHOFF, J. und M. TENHOMPEL (2010): „Simulation zur Bestimmung des Leistungsgewinns bei kombiniertem Einsatz mehrerer Kommissionierstrategien“. In: *Tagungsband zur 14. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*, S. 285–295.

- ZIMMERMANN, H.J. (1978): „Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions“. In: *Fuzzy Sets and Systems* 1, S. 45–55.
- ZIMMERMANN, H.J. (1987): *Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- ZUNIGA, C.A. u. a. (2015): „A methodology to solve the Order Batching Problem“. In: *IFAC-PapersOnLine* 48.3, S. 1380–1386.

Die Diskussionspapiere ab Nr. 403 (2007) bis heute, können Sie im Internet unter <http://www.fernuni-hagen.de/wirtschaftswissenschaft/forschung/beitraege.shtml> einsehen und zum Teil downloaden.

Ältere Diskussionspapiere selber erhalten Sie nur in den Bibliotheken.

Nr	Jahr	Titel	Autor/en
420	2008	Stockkeeping and controlling under game theoretic aspects	Fandel, Günter Trockel, Jan
421	2008	On Overdissipation of Rents in Contests with Endogenous Intrinsic Motivation	Schlepütz, Volker
422	2008	Maximum Entropy Inference for Mixed Continuous-Discrete Variables	Singer, Hermann
423	2008	Eine Heuristik für das mehrdimensionale Bin Packing Problem	Mack, Daniel Bortfeldt, Andreas
424	2008	Expected A Posteriori Estimation in Financial Applications	Mazzoni, Thomas
425	2008	A Genetic Algorithm for the Two-Dimensional Knapsack Problem with Rectangular Pieces	Bortfeldt, Andreas Winter, Tobias
426	2008	A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem	Fanslau, Tobias Bortfeldt, Andreas
427	2008	Dynamic Effects of Offshoring	Stijepic, Denis Wagner, Helmut
428	2008	Der Einfluss von Kostenabweichungen auf das Nash-Gleichgewicht in einem nicht-kooperativen Disponenten-Controller-Spiel	Fandel, Günter Trockel, Jan
429	2008	Fast Analytic Option Valuation with GARCH	Mazzoni, Thomas
430	2008	Conditional Gauss-Hermite Filtering with Application to Volatility Estimation	Singer, Hermann
431	2008	Web 2.0 auf dem Prüfstand: Zur Bewertung von Internet-Unternehmen	Christian Maaß Gotthard Pietsch
432	2008	Zentralbank-Kommunikation und Finanzstabilität – Eine Bestandsaufnahme	Knütter, Rolf Mohr, Benjamin
433	2008	Globalization and Asset Prices: Which Trade-Offs Do Central Banks Face in Small Open Economies?	Knütter, Rolf Wagner, Helmut
434	2008	International Policy Coordination and Simple Monetary Policy Rules	Berger, Wolfram Wagner, Helmut
435	2009	Matchingprozesse auf beruflichen Teilarbeitsmärkten	Stops, Michael Mazzoni, Thomas
436	2009	Wayfindingprozesse in Parksituationen - eine empirische Analyse	Fließ, Sabine Tetzner, Stefan
437	2009	ENTROPY-DRIVEN PORTFOLIO SELECTION a downside and upside risk framework	Rödter, Wilhelm Gartner, Ivan Ricardo Rudolph, Sandra
438	2009	Consulting Incentives in Contests	Schlepütz, Volker

439	2009	A Genetic Algorithm for a Bi-Objective Winner-Determination Problem in a Transportation-Procurement Auction"	Buer, Tobias Pankratz, Giselher
440	2009	Parallel greedy algorithms for packing unequal spheres into a cuboidal strip or a cuboid	Kubach, Timo Bortfeldt, Andreas Tilli, Thomas Gehring, Hermann
441	2009	SEM modeling with singular moment matrices Part I: ML-Estimation of time series	Singer, Hermann
442	2009	SEM modeling with singular moment matrices Part II: ML-Estimation of sampled stochastic differential equations	Singer, Hermann
443	2009	Konsensuale Effizienzbewertung und -verbesserung – Untersuchungen mittels der Data Envelopment Analysis (DEA)	Rödder, Wilhelm Reucher, Elmar
444	2009	Legal Uncertainty – Is Harmonization of Law the Right Answer? A Short Overview	Wagner, Helmut
445	2009	Fast Continuous-Discrete DAF-Filters	Mazzoni, Thomas
446	2010	Quantitative Evaluierung von Multi-Level Marketingsystemen	Lorenz, Marina Mazzoni, Thomas
447	2010	Quasi-Continuous Maximum Entropy Distribution Approximation with Kernel Density	Mazzoni, Thomas Reucher, Elmar
448	2010	Solving a Bi-Objective Winner Determination Problem in a Transportation Procurement Auction	Buer, Tobias Pankratz, Giselher
449	2010	Are Short Term Stock Asset Returns Predictable? An Extended Empirical Analysis	Mazzoni, Thomas
450	2010	Europäische Gesundheitssysteme im Vergleich – Effizienzmessungen von Akutkrankenhäusern mit DEA –	Reucher, Elmar Sartorius, Frank
451	2010	Patterns in Object-Oriented Analysis	Blaimer, Nicolas Bortfeldt, Andreas Pankratz, Giselher
452	2010	The Kuznets-Kaldor-Puzzle and Neutral Cross-Capital-Intensity Structural Change	Stijepic, Denis Wagner, Helmut
453	2010	Monetary Policy and Boom-Bust Cycles: The Role of Communication	Knütter, Rolf Wagner, Helmut
454	2010	Konsensuale Effizienzbewertung und –verbesserung mittels DEA – Output- vs. Inputorientierung –	Reucher, Elmar Rödder, Wilhelm
455	2010	Consistent Modeling of Risk Averse Behavior with Spectral Risk Measures	Wächter, Hans Peter Mazzoni, Thomas

456	2010	Der virtuelle Peer – Eine Anwendung der DEA zur konsensualen Effizienz- bewertung –	Reucher, Elmar
457	2010	A two-stage packing procedure for a Portuguese trading company	Moura, Ana Bortfeldt, Andreas
458	2010	A tree search algorithm for solving the multi-dimensional strip packing problem with guillotine cutting constraint	Bortfeldt, Andreas Jungmann, Sabine
459	2010	Equity and Efficiency in Regional Public Good Supply with Imperfect Labour Mobility – Horizontal versus Vertical Equalization	Arnold, Volker
460	2010	A hybrid algorithm for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints	Bortfeldt, Andreas
461	2010	A tree search procedure for the container relocation problem	Forster, Florian Bortfeldt, Andreas
462	2011	Advanced X-Efficiencies for CCR- and BCC-Modell – Towards Peer-based DEA Controlling	Rödder, Wilhelm Reucher, Elmar
463	2011	The Effects of Central Bank Communication on Financial Stability: A Systematization of the Empirical Evidence	Knütter, Rolf Mohr, Benjamin Wagner, Helmut
464	2011	Lösungskonzepte zur Allokation von Kooperationsvorteilen in der kooperativen Transportdisposition	Strangmeier, Reinhard Fiedler, Matthias
465	2011	Grenzen einer Legitimation staatlicher Maßnahmen gegenüber Kreditinstituten zur Verhinderung von Banken- und Wirtschaftskrisen	Merbecks, Ute
466	2011	Controlling im Stadtmarketing – Eine Analyse des Hagener Schaufensterwettbewerbs 2010	Fließ, Sabine Bauer, Katharina
467	2011	A Structural Approach to Financial Stability: On the Beneficial Role of Regulatory Governance	Mohr, Benjamin Wagner, Helmut
468	2011	Data Envelopment Analysis - Skalenerträge und Kreuzskalenerträge	Wilhelm Rödder Andreas Dellnitz
469	2011	Controlling organisatorischer Entscheidungen: Konzeptionelle Überlegungen	Lindner, Florian Scherer, Ewald
470	2011	Orientierung in Dienstleistungsumgebungen – eine explorative Studie am Beispiel des Flughafens Frankfurt am Main	Fließ, Sabine Colaci, Antje Nesper, Jens

471	2011	Inequality aversion, income skewness and the theory of the welfare state	Weinreich, Daniel
472	2011	A tree search procedure for the container retrieval problem	Forster, Florian Bortfeldt, Andreas
473	2011	A Functional Approach to Pricing Complex Barrier Options	Mazzoni, Thomas
474	2011	Bologna-Prozess und neues Steuerungsmodell – auf Konfrontationskurs mit universitären Identitäten	Jost, Tobias Scher, Ewald
475	2011	A reduction approach for solving the rectangle packing area minimization problem	Bortfeldt, Andreas
476	2011	Trade and Unemployment with Heterogeneous Firms: How Good Jobs Are Lost	Altenburg, Lutz
477	2012	Structural Change Patterns and Development: China in Comparison	Wagner, Helmut
478	2012	Demografische Risiken – Herausforderungen für das finanzwirtschaftliche Risikomanagement im Rahmen der betrieblichen Altersversorgung	Merbecks, Ute
479	2012	“It’s all in the Mix!” – Internalizing Externalities with R&D Subsidies and Environmental Liability	Endres, Alfred Friehe, Tim Rundshagen, Bianca
480	2012	Ökonomische Interpretationen der Skalenvariablen u in der DEA	Dellnitz, Andreas Kleine, Andreas Rödler, Wilhelm
481	2012	Entropiebasierte Analyse von Interaktionen in Sozialen Netzwerken	Rödler, Wilhelm Brenner, Dominic Kulmann, Friedhelm
482	2013	Central Bank Independence and Financial Stability: A Tale of Perfect Harmony?	Berger, Wolfram Kißner, Friedrich
483	2013	Energy generation with Directed Technical Change	Kollenbach, Gilbert
484	2013	Monetary Policy and Asset Prices: When Cleaning Up Hits the Zero Lower Bound	Berger, Wolfram Kißner, Friedrich
485	2013	Superknoten in Sozialen Netzwerken – eine entropieoptimale Analyse	Brenner, Dominic, Rödler, Wilhelm, Kulmann, Friedhelm
486	2013	Stimmigkeit von Situation, Organisation und Person: Gestaltungsüberlegungen auf Basis des Informationsverarbeitungsansatzes	Julmi, Christian Lindner, Florian Scher, Ewald
487	2014	Incentives for Advanced Abatement Technology Under National and International Permit Trading	Endres, Alfred Rundshagen, Bianca
488	2014	Dynamische Effizienzbewertung öffentlicher Dreispartentheater mit der Data Envelopment Analysis	Kleine, Andreas Hoffmann, Steffen

489	2015	Konsensuale Peer-Wahl in der DEA -- Effizienz vs. Skalenertrag	Dellnitz, Andreas Reucher, Elmar
490	2015	Makroprudenzielle Regulierung – eine kurze Einführung und ein Überblick	Velauthapillai, Jeyakrishna
491	2015	SEM modeling with singular moment matrices Part III: GLS estimation	Singer, Hermann
492	2015	Die steuerliche Berücksichtigung von Aufwendungen für ein Studium – Eine Darstellung unter besonderer Berücksichtigung des Hörerstatus	Meyering, Stephan Portheine, Kea
493	2016	Ungewissheit versus Unsicherheit in Sozialen Netzwerken	Röder, Wilhelm Dellnitz, Andreas Gartner, Ivan
494	2016	Investments in supplier-specific economies of scope with two different services and different supplier characters: two specialists	Fandel, Günter Trockel, Jan
495	2016	An application of the put-call-parity to variance reduced Monte-Carlo option pricing	Müller, Armin
496	2016	A joint application of the put-call-parity and importance sampling to variance reduced option pricing	Müller, Armin
497	2016	Simulated Maximum Likelihood for Continuous-Discrete State Space Models using Langevin Importance Sampling	Singer, Hermann
498	2016	A Theory of Affective Communication	Julmi, Christian
499	2016	Approximations of option price elasticities for importance sampling	Müller, Armin
500	2016	Variance reduced Value at Risk Monte-Carlo simulations	Müller, Armin
501	2016	Maximum Likelihood Estimation of Continuous-Discrete State-Space Models: Langevin Path Sampling vs. Numerical Integration	Singer, Hermann
502	2016	Measuring the domain-specificity of creativity	Julmi, Christian Scherer, Ewald
503	2017	Bipartite Strukturen in Sozialen Netzen – klassische versus MaxEnt-Analysen	Röder, Wilhelm Dellnitz, Andreas Kulmann, Friedhelm Litzinger, Sebastian Reucher, Elmar
504	2017	Langevin and Kalman Importance Sampling for Nonlinear Continuous-Discrete State Space Models	Singer, Hermann
505	2017	Horizontal versus vertical fiscal Equalization	Anetsberger, Georg Arnold, Volker
506	2017	Formative and Reflective Measurement Models	Singer, Hermann
507	2017	Identifizierung von führenden Köpfen in terroristischen Netzwerken – ein entropiebasiertes Verfahren –	Dellnitz, Andreas Litzinger, Sebastian Röder, Wilhelm
508	2017	Die Bedeutung der steuerlichen Norm § 5 Abs. 2 EStG für die handelsrechtliche Rechnungslegung	Meyering, Stephan
509	2018	Ein erweitertes Effizienzmaß für DMUs im BCC-Modell – eine ökonomiegerechte DEA-Anpassung –	Röder, Wilhelm Dellnitz, Andreas Litzinger, Sebastian

510	2018	A concise proof of Gaussian smoothing	Singer, Hermann
511	2018	Empirical evidence on the topological properties of structural paths and some notes on its theoretical explanation	Stijepic, Denis
512	2018	On the predictability of economic structural change by the Poincaré-Bendixson theory	Stijepic, Denis
513	2018	On development paths minimizing the aggregate labor-reallocation costs in the three-sector framework and an application to structural policy	Stijepic, Denis
514	2018	Models of Continuous Dynamics on the 2-Simplex and Applications in Economics	Stijepic, Denis
515	2018	A Note on the Ideological Content of Modern Economic Dynamics Models and Ideology-Reducing Meta-Modeling	Stijepic, Denis
516	2018	Logistik für Versand von Studienmaterialien der FernUniversität in Hagen – Optimierte Bereitstellung bei der Kommissionierung	Brenner, Dominic Gädeke, Andre Kulmann, Friedhelm Kleine, Andreas