

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20509 N

## Thema

Glätten und Nivellieren in der Kommissionierung (NivKom)

## Berichtszeitraum

01.02.2019 bis 31.01.2021

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V.

## Forschungseinrichtung(en)

1: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL),  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Karlsruhe, 13.04.2021

Ort, Datum

Uta Mohring

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)



Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Gotthard-Fraas-Str. 8, Gebäude 50-38

Gefördert durch:



Schlussbericht des IGF-Vorhabens 20509 N  
**Glätten und Nivellieren in der Kommissionierung NivKom**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung . . . . .	6
1.2	Forschungsziel . . . . .	6
1.3	Vorgehensweise und Lösungsweg . . . . .	7
1.4	Aufbau des Schlussberichts . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b>	<b>9</b>
2.1	Kommissionierung . . . . .	9
2.2	Personalbedarfsplanung . . . . .	11
2.3	Arbeitszeitgestaltung . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Allgemeine Beschreibung der Kommissionierung</b>	<b>17</b>
3.1	Formale Beschreibung der Kommissionierung . . . . .	17
3.2	Methodenkatalog zur Ableitung der Parameter aus den Realdaten . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Strategie der nivellierten Auftragseinlastung</b>	<b>24</b>
4.1	Konzept der Heijunka-Nivellierung in der Produktion . . . . .	24
4.2	Abgrenzung der Nivellierung in der Kommissionierung von der Heijunka-Nivellierung .	25
4.3	Nivellierungskonzept für die Kommissionierung . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Analytisches Modell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung</b>	<b>29</b>
5.1	Modellwahl . . . . .	29
5.2	Spezifikation der Kommissionierung . . . . .	30
5.3	Modellierung als zeitdiskrete Markov-Kette . . . . .	32
5.4	Leistungskenngrößen der Kommissionierung . . . . .	35
5.5	Umsetzung im Software-Tool . . . . .	40
5.6	Fazit . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Simulationsmodell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung</b>	<b>44</b>
6.1	Aufbau des Simulationsmodells . . . . .	44
6.2	Aufbau einer Simulationsiteration . . . . .	45
6.3	Berechnung der Leistungskenngrößen der Kommissionierung . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Validierung des analytischen Modells</b>	<b>47</b>
7.1	Modellvergleich mit Simulationsmodell . . . . .	47
7.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	49
<b>8</b>	<b>Kapazitätsplanung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung</b>	<b>55</b>
8.1	Formalisierung des Planungsproblems der Kapazitätsplanung . . . . .	55
8.2	Verfahren zur Kapazitätsplanung . . . . .	56
8.3	Vergleich der Verfahren zur Kapazitätsplanung im Rahmen einer numerischen Studie .	59
8.4	Umsetzung der Kapazitätsplanung im Software-Tool . . . . .	61

<b>9</b>	<b>Bestimmung des Personalbedarfs in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung</b>	<b>62</b>
9.1	Schichtplanung . . . . .	62
9.2	Personalbedarfsplanung . . . . .	65
<b>10</b>	<b>Numerische Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung</b>	<b>66</b>
10.1	Relevante Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung im Kontext des Forschungsprojekts	66
10.2	Design of Experiments . . . . .	66
10.3	Untersuchung des Kapazitätsüberschusses . . . . .	67
10.4	Untersuchung der Zusammensetzung des Schichtplans . . . . .	68
10.5	Untersuchung des Einflusses der Anzahl unterschiedlicher Schichttypen . . . . .	69
10.6	Handlungsempfehlungen für die Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung . . . . .	70
<b>11</b>	<b>Numerische Studie zur Evaluation der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung</b>	<b>72</b>
11.1	Betrachtete Alternativstrategien . . . . .	72
11.2	Design of Experiments . . . . .	72
11.3	Vergleich der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mit FIFO . . . . .	72
11.4	Vergleich der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mit der Strategie der zufälligen Auswahl . . . . .	75
11.5	Fazit . . . . .	77
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung der Forschungsergebnisse</b>	<b>78</b>
12.1	Zusammenfassung . . . . .	78
12.2	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen . . . . .	79
12.3	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen sowie industrielle Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	82
12.4	Verwendung der zugewendeten Mittel . . . . .	83
12.5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	84
12.6	Ergebnistransfer in die Wirtschaft . . . . .	84
12.7	Veröffentlichungen . . . . .	87
12.8	Durchführende Forschungsstelle . . . . .	87
12.9	Förderhinweis . . . . .	87
<b>13</b>	<b>Literatur</b>	<b>88</b>
<b>A</b>	<b>Fragebogen der Unternehmensbefragung</b>	<b>92</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Problemstellung, Ansatz und Zielsetzung des Forschungsprojekts. . . . .	7
2	Teiprozesse eines Lager- und Distributionszentrums. . . . .	9
3	Formale Beschreibung der Kommissionierung. . . . .	17
4	Formale Beschreibung eines beispielhaften Kommissioniersystems mit Standard- und Expressaufträgen. . . . .	18
5	Vorgehensweise der Methode für Datengrundlage-Szenario 1. . . . .	20
6	Schematische Darstellung der Dichtefunktionen verschiedener parametrischer Verteilungsannahmen. . . . .	21
7	Anpassung der Dichtefunktion aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche der Zufallsvariablen $X$ und $Y$ . . . . .	22
8	Vorgehensweise der Methode für Datengrundlage-Szenario 2. . . . .	23
9	Planungsschritte der Heijunka-Nivellierung. . . . .	24
10	Modell eines Heijunka-nivellierten Kanban-Systems. . . . .	25
11	Klassifikation der Aufträge hinsichtlich deren Fälligkeitsfrist. . . . .	27
12	Modell eines Kommissioniersystems mit nivellierter Auftragseinlastung. . . . .	27
13	Software-Tool: Manuelle Eingabe der absoluten Häufigkeitsverteilung des Inputparameters „Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall“. . . . .	41
14	Software-Tool: Start der Berechnung der Markov-Kette nach vollständiger und korrekter Eingabe aller Inputparameter. . . . .	41
15	Software-Tool: Darstellung der stochastischen Leistungskenngröße „Durchsatz“. . . . .	42
16	Software-Tool: Darstellung der deterministischen Leistungskenngröße „ $\alpha$ -Servicegrad“. . . . .	42
17	Übersicht über die Input- und Outputparameter des analytischen Modells zur Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung. . . . .	43
18	Darstellung ausgewählter Leistungskenngrößen der Expressaufträge des Beispielsystems aus Abbildung 4. . . . .	43
19	Aufbau des Simulationsmodells. . . . .	44
20	Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf den $\beta$ -Servicegrad. . . . .	50
21	Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge. . . . .	51
22	Einfluss der Prozessstabilität auf den $\beta$ -Servicegrad. . . . .	52
23	Einfluss von Prozessverbesserungen auf den $\beta$ -Servicegrad und die Systemauslastung. . . . .	53
24	Einfluss der Kapazitätsplanung auf den $\beta$ -Servicegrad und die Systemauslastung. . . . .	54
25	Übersicht über die Input- und Outputparameter des Planungsproblems der Kapazitätsplanung. . . . .	56
26	Durchschnittliche Anzahl berechneter Blackbox-Instanzen je Datensatz für die verschiedenen Verfahren zur Kapazitätsplanung. . . . .	60
27	Software-Tool: Manuelle Eingabe der Leistungsanforderung für die Kapazitätsplanung. . . . .	61
28	Zusammenhang zwischen Kapazitäts- und Personalbedarfsplanung. . . . .	62
29	Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für ausgewählte Schichtmodelle mit (a) einem Schichttyp ( $n = 1$ ) und (b) zwei Schichttypen ( $n = 2$ ). . . . .	67
30	Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für Schichtmodelle mit einer beliebigen Anzahl von $n$ Schichttypen. . . . .	68
31	Zusammensetzung des Schichtplans in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für verschiedene Schichtmodelle mit (a) zwei- und siebenstündigen Schichten, (b) zwei-, vier- und siebenstündigen Schichten und (c) zwei-, fünf- und siebenstündigen Schichten. . . . .	69
32	Gesamtanzahl benötigter Schichten in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für verschiedene Schichtmodelle mit derselben durchschnittlichen Schichtlänge. . . . .	70

33	Relative Abweichung (a) des $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\alpha$ -Servicegrad bei FIFO bzw. (b) des $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\beta$ -Servicegrad bei FIFO. . . . .	74
34	Relative Abweichung (a) des $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\alpha$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl bzw. (b) des $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl. . . . .	76
35	Ergebnisse und Lösungsweg des Forschungsprojekts. . . . .	79
36	Zeitplan des Forschungsprojekts und Übersicht über Personalausgaben für wissenschaftlich-technisches Personal und Hilfskräfte. . . . .	83

## Tabellenverzeichnis

1	Arbeitspakete des Forschungsprojekts. . . . .	7
2	Aufbau des Schlussberichts und Zuordnung der Arbeitspakete. . . . .	8
3	Abgrenzung der Nivellierung in der Kommissionierung von der Heijunka-Nivellierung. . . . .	26
4	Inputparameter der Markov-Kette. . . . .	32
5	Leistungskenngößen der Kommissionierung. . . . .	35
6	Absolute und relative Abweichung ausgewählter Leistungskenngößen zwischen analytischem Modell und Simulationsmodell. . . . .	48
7	Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Schwankungen der Kundennachfrage. . . . .	49
8	Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Prozessstabilität. . . . .	51
9	Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses von Prozessverbesserungen. . . . .	52
10	Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Kapazitätsplanung. . . . .	53
11	Design of Experiments der numerischen Studie zum Vergleich verschiedener Verfahren der Kapazitätsplanung. . . . .	60
12	Parameter und Entscheidungsvariablen des Schichtplanungsproblems. . . . .	63
13	Design of Experiments der numerischen Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung. . . . .	67
14	Relative Abweichung des $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\alpha$ -Servicegrad bei FIFO. . . . .	73
15	Relative Abweichung des $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\beta$ -Servicegrad bei FIFO. . . . .	74
16	Relative Abweichung des $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\alpha$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl. . . . .	75
17	Relative Abweichung des $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl. . . . .	76
18	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit. . . . .	85
19	Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit. . . . .	86

# 1 Einleitung

## 1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die zunehmende Globalisierung und die steigende Bedeutung des Onlinehandels erhöhen den Wettbewerbs- und Effizienzdruck auf Distributionszentren [1]. Das Auftragsvolumen in Distributionszentren steigt kontinuierlich an, wobei ein Auftrag in der Regel nur wenige Auftragspositionen mit geringen Stückzahlen umfasst. Beispielsweise besteht ein durchschnittlicher Kundenauftrag in deutschen Amazon-Distributionszentren aus 1,6 Artikeln [2]. Darüber hinaus stellt die Gewährleistung kurzer, kundenindividueller und zuverlässiger Lieferfristen einen wichtigen Wettbewerbsvorteil in der Logistik dar. Lieferversprechen, wie „Lieferung am selben Tag“ oder „Lieferung am nächsten Tag“, sind im B2C-Bereich weitverbreitet. Außerdem schwankt das tägliche Auftragsvolumen in Distributionszentren sehr stark [2]. Die Ergebnisse der im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Unternehmensbefragungen bestätigen diese logistischen Herausforderungen: Die Teilnehmer der Befragung berichten, dass in ihren Distributionszentren die Aufträge in der Regel am selben Tag oder am Folgetag ausgeliefert werden müssen und dass die Servicegradanforderung ihrer Kunden nicht selten 100% beträgt. Außerdem benennen die Teilnehmer der Befragung die schwankende und schwer prognostizierbare Kundennachfrage einhellig als zentrale Herausforderung im Lagerbetrieb. Der Variationskoeffizient des täglichen Auftragsvolumens der befragten Unternehmen liegt zwischen 20% und 38%.

Zur Handhabung dieser Nachfrageschwankungen greifen die Teilnehmer der Befragung überwiegend auf Maßnahmen der Arbeitszeitflexibilisierung und der flexiblen Personalplanung zurück: Überstunden, Zusatzschichten, Wochenendarbeit, Einsatz von Leiharbeit. Außerdem wird berichtet, dass sich die Nachfrageschwankungen unterschiedlicher Kunden teilweise gegenseitig ausgleichen und dass das Personal an Tagen mit unterdurchschnittlichem Auftragseingang für so genannte „nicht Servicegrad relevante“-Tätigkeiten im Wareneingang, bei der Retourenabwicklung oder in der Lageradministration eingesetzt wird. Im Allgemeinen kann zwischen folgenden Ansätzen zur Handhabung von stochastischen Nachfrageschwankungen in Distributionszentren differenziert werden [3]:

- Flexible Personalbedarfs- und Schichtplanung und
- Geeignete Auftragseinlastung.

Bei der flexiblen Personalbedarfs- und Schichtplanung wird die bereitgestellte Kapazität durch Maßnahmen wie Überstunden, Zusatzschichten und den temporären Einsatz von Leiharbeitern bestmöglich an die schwankende Kundennachfrage angepasst. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass trotz der Nachfrageschwankungen der wesentliche Anteil der Kundenaufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet wird. Dagegen kann durch eine geeignete Auftragseinlastungsstrategie, welche die bestehenden, auftragsspezifischen Zeitpuffer zwischen dem Zeitpunkt des Auftragseingangs und dem Erreichen der Fälligkeitsfrist der Aufträge systematisch ausnutzt, eine fristgerechte Bearbeitung der Aufträge gewährleistet werden, ohne dass flexible, temporäre Kapazitätsanpassungen notwendig sind. Diese Nivellierung der Arbeitslast durch eine geeignete Auftragseinlastungsstrategie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Glätten und Nivellieren in der Kommissionierung“ systematisch untersucht (vgl. Abbildung 1).

## 1.2 Forschungsziel

Die Arbeitshypothese der Forschungsprojekts lautete:

Die schwankende Kundennachfrage kann durch eine nivellierte Auftragseinlastung geglättet und die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung kann dadurch gegenüber bisher eingesetzten Auftragseinlastungsstrategien gesteigert werden.

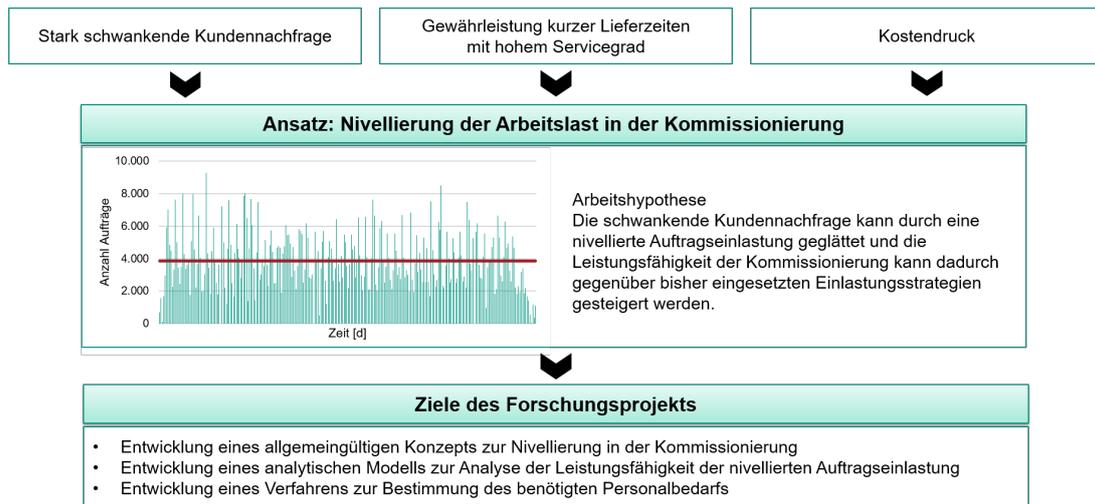


Abbildung 1: Problemstellung, Ansatz und Zielsetzung des Forschungsprojekts.

Die Ziele des Forschungsprojekts lauteten im Einzelnen:

- Entwicklung eines allgemeingültigen Konzepts zur Nivellierung in der Kommissionierung,
- Entwicklung eines analytischen Modells zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragsbelastung und
- Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung des Personalbedarfs, der in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragsbelastung benötigt wird, um eine bestimmte geforderte Leistungsfähigkeit gewährleisten zu können.

### 1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

Zur Erreichung des Forschungsziels wurde ein Lösungsweg bestehend aus sieben Arbeitspaketen definiert (vgl. Tabelle 1). Diese wurden inhaltlich wie vorgesehen abgearbeitet. Die Reihenfolge der Bearbeitung war dabei nicht durchgehend streng chronologisch entsprechend der Reihenfolge der Arbeitspakete.

Tabelle 1: Arbeitspakete des Forschungsprojekts.

AP 1	Ablaufmodellierung zur Nivellierung in der Kommissionierung
AP 2	Entwicklung eines Methodenkatalogs zur Generierung der benötigten Parameter aus den Realdaten
AP 3	Entwicklung eines analytischen Modells zur Nivellierung in der Kommissionierung
AP 4	Erweiterung des Modells zur Bestimmung der benötigten Personalkapazitäten
AP 5	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Validierung des analytischen Modells
AP 6	Numerische Studie, Erstellung eines Leitfadens zur Arbeitszeitgestaltung in der Kommissionierung
AP 7	Veröffentlichung und Dokumentation

### 1.4 Aufbau des Schlussberichts

Im vorliegenden Schlussbericht werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts in elf Kapiteln dargestellt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über den Aufbau des Schlussberichts und ordnet die Arbeitspa-

kete aus Tabelle 1 den einzelnen Kapiteln des Schlussberichts zu. Die Ergebnisse von Arbeitspaket 7 umfassen diesen Schlussbericht sowie die im Rahmen des Forschungsprojekts entstandenen Veröffentlichungen (vgl. Kapitel 12.7).

Tabelle 2: Aufbau des Schlussberichts und Zuordnung der Arbeitspakete.

<b>Kapitel des Schlussberichts</b>	<b>Arbeitspaket</b>
1 Einleitung	-
2 Stand der Forschung und Technik	AP 1
3 Allgemeine Beschreibung der Kommissionierung	AP 2
4 Strategie der nivellierten Auftragseinlastung	AP 1
5 Analytisches Modell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung	AP 3
6 Simulationsmodell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung	AP 5
7 Validierung des analytischen Modells	AP 5
8 Kapazitätsplanung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung	AP 4
9 Bestimmung des Personalbedarfs in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung	AP 4
10 Numerische Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung	AP 6
11 Numerische Studie zur Evaluation der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung	-
12 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	-

## 2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung und Technik zu den Themen Kommissionierung (vgl. Kapitel 2.1), Personalbedarfsplanung (vgl. Kapitel 2.2) und Arbeitszeitgestaltung (vgl. Kapitel 2.3).

### 2.1 Kommissionierung

Die Kommissionierung ist einer der Teilprozesse in Lager- und Distributionszentren (vgl. Abbildung 2). Die Kommissionierung umfasst alle notwendigen Vorgänge, um einzelne Artikel entsprechend der Art und Menge der vorliegenden Kundenanforderungen auszulagern und zusammenzustellen [4]. Unab-

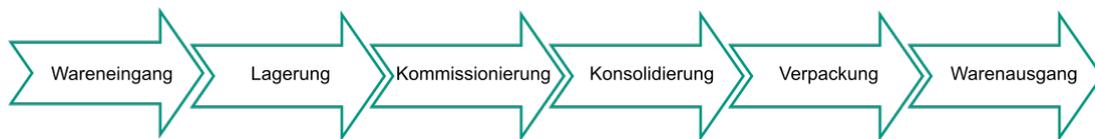


Abbildung 2: Teiprozesse eines Lager- und Distributionszentrums.

hängig von der technischen und organisatorischen Gestaltung besteht der Kommissionierprozess aus folgenden Teilschritten [5, S.707]:

1. Bereitstellung von Ware in Bereitstelleinheiten,
2. Fortbewegung des Kommissionierers zum Bereitstellplatz,
3. Entnahme der geforderten Warenmenge aus den Bereitstelleinheiten durch den Kommissionierer,
4. Abgabe in Sammelbehälter, auf ein Fördersystem oder ein Transportgerät,
5. Zusammenführen der Sammelbehälter oder Waren an einem Sammelplatz und
6. Beschickung der Bereitstellplätze mit Nachschub.

#### 2.1.1 Grundprinzipien der Kommissionierung

Für die Kommissionierung müssen Kommissionierer und Bereitstelleinheiten entweder durch eine Bewegung des Kommissionierers oder der Bereitstelleinheiten zusammengeführt werden. Daher wird zwischen folgenden beiden Grundprinzipien der Kommissionierung unterschieden [6, S.41]:

- **Person-zur-Ware**  
Der Kommissionierer bewegt sich zur Bereitstelleinheit, die statisch bereitgehalten wird. Typische Beispiele sind Lager mit Fachbodenregalen, Blocklager und Hochregallager mit Kommissionierstaplern.
- **Ware-zur-Person**  
Die Bereitstelleinheiten werden aus dem Lagerbereich zu einer definierten Stelle transportiert, an der der Kommissionierer die Ware entnimmt. Beispiele sind Hochregallager mit automatischen Regalförderzeugen und Umlaufregalanlagen mit automatischen Ein- und Auslagervorrichtungen.

### 2.1.2 Bearbeitungsstrategien in der Kommissionierung

Die Bearbeitungsstrategie in der Kommissionierung legt fest, wie die Kundenaufträge ausgeführt werden. Es wird zwischen ein- und zweistufiger Kommissionierung differenziert [5, S.756]:

- **Einstufige Kommissionierung / Auftragsorientierte Kommissionierung**  
Die Artikel werden für jeden Kundenauftrag separat entnommen. Jeder Kundenauftrag entspricht also genau einem Kommissionierauftrag.
- **Zweistufige Kommissionierung / Artikelorientierte Kommissionierung**  
Eine bestimmte Anzahl Kundenaufträge wird zu einem Kommissionierauftrag zusammengefasst. Anhand dieses Kommissionierauftrags werden die Artikel mehrerer Kundenaufträge gemeinsam entnommen und anschließend auf die verschiedenen Kundenaufträge sortiert.

Die verschiedenen Ausprägungen der einstufigen und zweistufigen Kommissionierung sind in [6, S.34-39] im Detail beschrieben.

### 2.1.3 Einlastungsstrategien in der Kommissionierung

Die Einlastungsstrategie spezifiziert die Prinzipien, nach denen die Aufträge zur Auftragsbearbeitung freigegeben werden. Einlastungsstrategien für die Kommissionierung werden in der Literatur bisher kaum betrachtet. Gallien und Weber (2010) [7] und Ceven und Gue (2017) [8] differenzieren zwischen folgenden Einlastungsstrategien:

- **Periodische Einlastung in Wellen**  
Im Fall der periodischen Einlastung werden die in der Kommissionierung eintreffenden Aufträge nach bestimmten Kriterien zu Batches, den so genannten Wellen zusammengefasst. Alle Aufträge eines Batches werden zu einem bestimmten Zeitpunkt zeitgleich eingelastet. Typische Kriterien für die Gruppierung der Aufträge sind hierbei gleiche Fälligkeitsfristen oder gleiche Prioritätsklassen.
- **Kontinuierliche Einlastung**  
Im Fall der kontinuierlichen Einlastung werden die in der Kommissionierung eintreffenden Aufträge unmittelbar nach deren Ankunft einzeln eingelastet.

Ceven und Gue (2017) [8] bestimmen die Einlastungszeitpunkte und die Anzahl der Wellen bei periodischer Einlastung, wohingegen Gallien und Weber (2010) [7] die kontinuierliche Einlastung in Distributionszentren mit automatisierter Sortieranlage untersuchen.

### 2.1.4 Kommissionierzeit und -leistung

Zu den wesentlichen Leistungskennzahlen eines Lager- und Distributionszentrums zählen die Anzahl der bearbeiteten Aufträge pro Stunde und die Durchlaufzeit von der Auftragsannahme bis zum Versand. Einen entscheidenden Anteil an der Durchlaufzeit hat die Kommissionierzeit. Die Kommissionierzeit  $t_k$ , die für die Abwicklung eines Kommissionierauftrags mit  $n$  Positionen benötigt wird, setzt sich aus folgenden Zeitkomponenten zusammen [9, S.218]:

$$t_k = t_0 + \sum_{r=1}^n (t_{t,r} + t_{g,r} + t_{l,r}) \quad (1)$$

$t_0$	Basiszeit: Zeit, die sich der Kommissionierer vor und nach der Abarbeitung des Kommissionierauftrags an der Basisstation aufhält (z.B. Empfang der Auftragsdaten, Ausdrucken und Anbringen eines Etiketts),
$t_t$	Totzeit: Zeit, die zur Vor- und Nachbereitung des Greifvorgangs am Entnahmeort benötigt wird (z.B. Lesen, Suchen, Zählen, Quittieren, Korrigieren),
$t_g$	Greifzeit: Zeit, die für die physische Materialbewegung der Entnahmemenge benötigt wird (z.B. Aufnehmen, Befördern und Ablegen aller Artikel),
$t_l$	Wegzeit: Zeit für die Bewegung des Kommissionierers oder der Ladeeinheiten.

Die Kommissionierleistung gibt die Entnahmemenge pro Zeiteinheit bezogen auf die durchschnittliche Auftragsgröße an [10, S.285]. Sie kann beispielsweise in Positionen pro Stunde ausgedrückt werden und entspricht in diesem Fall dem Kehrwert der mittleren Kommissionierzeit pro Position [5, S.783]:

$$\mu_k = \frac{1}{\frac{t_k}{n}} = \frac{n}{t_k}. \quad (2)$$

Die Kommissionierleistung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst [9, S.233f.]:

- Größe, Artikelstruktur und räumliche Verteilung des Lagerbestands,
- Größe und Artikelstruktur des Kommissionierauftrags,
- Gewähltes Kommissionierverfahren,
- Technische Komponenten des Kommissioniersystems,
- Automatisierungsgrad der Kommissionierung,
- Informationsbereitstellung beim Kommissionieren,
- Gewählte Betriebsstrategien des Kommissioniersystems und
- Arbeitsumfeld und Motivation des Kommissionierers.

## 2.2 Personalbedarfsplanung

Die Personalbedarfsplanung ist ein Teilbereich der Personalplanung und bildet den Ausgangspunkt für alle Tätigkeiten der Teilbereiche Personalbeschaffung, -entwicklung und -freistellung. Die Hauptaufgabe der Personalbedarfsplanung ist es, die personellen Kapazitäten zu bestimmen, die zur Umsetzung der Unternehmensziele erforderlich sind [11, S.102]. Zu den Aufgabenbereichen der Personalbedarfsplanung zählen die qualitative und die quantitative Personalbedarfsplanung [12, S.171]:

- **Qualitative Personalbedarfsplanung**  
Festlegung der Anforderungen hinsichtlich Kenntnisse, Fähigkeiten und Verhaltensweisen, die die Arbeitskräfte zu einem bestimmten Planungszeitpunkt erfüllen müssen, um die geplanten Verantwortlichkeiten und Aufgaben einer Stelle vollständig zu erfüllen;
- **Quantitative Personalbedarfsplanung**  
Festlegung der Anzahl an Arbeitskräften je Stellenkategorie und Arbeitsbereich, die zu einem bestimmten Zeitpunkt und für eine bestimmte Dauer im Unternehmen benötigt werden, um dessen geplantes Leistungsprogramm zu erfüllen.

### 2.2.1 Personalbedarfsplanung in der Kommissionierung

Zur quantitativen Personalbedarfsplanung in der Kommissionierung existieren in der Literatur nur wenige spezielle Ansätze. Bei diesen handelt es sich vorwiegend um qualitative Handlungsempfehlungen und Vorgehensmodelle.

Scherf (2009) [13, S.197f.] schlägt eine Prognose des Personalbedarfs in der Kommissionierung auf Basis einer systematischen Analyse der vergangenen Bestelleingänge vor. Durch eine Analyse der historischen Bestelldaten können typische Zeitverläufe der Bestellungen je Werktag identifiziert werden. Ausgehend davon ist eine Prognose des zukünftigen Bestellvolumens und dessen werktagspezifischer Verteilung möglich. Mithilfe von Produktivitätsfaktoren, welche die Anzahl der Bestellpositionen pro Arbeitsstunde je Arbeitsbereich festlegen, kann vom prognostizierten Bestellvolumen auf die benötigten Arbeitsstunden und somit den benötigten Personalbedarf geschlossen werden.

In der VDI-Richtlinie 4481 [14] wird folgende Vorgehensweise zur Personalbedarfsermittlung in der Kommissionierung vorgeschlagen:

1. Ermittlung der Soll-Anforderungen  
Die Soll-Anforderungen beschreiben die Leistungsanforderungen der Kunden bezüglich der Kommissionierung. Dazu zählen unter anderem der Auftragstyp, das Auftragsvolumen, die Anzahl Positionen pro Auftrag und die Auftragsdurchlaufzeiten.
2. Erfassung und zeitliche Bewertung der zu erledigenden Kommissioniertätigkeiten  
Die Art und die Dauer der zu erledigenden Kommissioniertätigkeiten wird von den gewählten Kommissionierverfahren und -techniken, den Betriebsstrategien sowie den Lager- und Einrichtungslayouts in der Kommissionierung beeinflusst. Zur zeitlichen Bewertung der Tätigkeiten werden analytisch-experimentelle Methoden (z.B. Multimomentaufnahmen) und analytisch-rechnerische Methoden (z.B. Vergleich mit ähnlichen Tätigkeiten, Schätzen basierend auf Erfahrungswerten) eingesetzt. In manchen Fällen ist auch eine zeitliche Bewertung anhand der Datenblätter der eingesetzten technischen Hilfsmittel möglich.
3. Berechnung der Kommissionierzeiten und der erreichbaren Kommissionierleistungen  
Aus der zeitlichen Bewertung der verschiedenen Tätigkeiten werden die Zeitanteile der Kommissionierzeit und letztlich die gesamte Kommissionierzeit abgeleitet (vgl. Gleichung (1)). Unter Berücksichtigung der persönlichen und sachlichen Verteilzeiten ergibt sich aus der Kommissionierzeit die erreichbare Kommissionierleistung.
4. Erstellung von funktions- und leistungsbezogenen Arbeitsplatzkenndatenblättern  
Arbeitsplatzkenndatenblätter fassen arbeitsplatzspezifische Informationen zu den Arbeitsinhalten sowie zur Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter zusammen.
5. Erstellung einer Soll-Leistung-bezogenen Personalübersicht  
Auf Basis der Leistungskennwerte der verschiedenen Arbeitsplätze in der Kommissionierung wird der Personalbedarf ermittelt, der zur Erfüllung der Leistungsanforderungen benötigt wird. Bisher unberücksichtigte Einflussgrößen wie Urlaub und Krankheit werden über einen branchenspezifischen Personalerhöhungsfaktor von circa 15% berücksichtigt.

Gudehus (2012) [5, S.799] ermittelt den Personalbedarf an Vollzeitkräften gemäß

$$N_{VZK} = T_{BZ} \cdot \frac{N_K}{T_{AZ}} \quad (3)$$

$N_{VZK}$	Anzahl der Vollzeitkräfte, die im Verlauf eines Jahres zum Kommissionieren benötigt werden,
$T_{BZ}$	Jahresbetriebszeit $\left[\frac{h}{\text{Jahr}}\right]$ ,
$N_K$	Personalbesetzung, die für den mittleren Durchsatz benötigt wird,
$T_{AZ}$	Effektive Jahresarbeitszeit einer Vollzeitkraft $\left[\frac{h}{\text{Jahr}}\right]$ .

Nach Gleichung (3) kann der Personalbedarf allerdings nur bei maximal flexiblen Arbeitszeitregelungen mit Teilzeitarbeit, Überstunden und Zeitausgleichskonten berechnet werden. Für die Berechnung des Bedarfs an Vollzeitkräften bei unflexiblen Arbeitszeitregelungen schlägt Gudehus (2012) folgende Modifikation der Gleichung (3) vor:

$$N_{VZK} = T_{BZ} \cdot \frac{N_{K,max}}{T_{AZ}} \quad (4)$$

$N_{K,max}$  Personalbesetzung, die für den maximalen Durchsatz benötigt wird.

## 2.3 Arbeitszeitgestaltung

Im Folgenden werden die arbeitsrechtlichen Grundlagen, gängige Arbeitszeitmodelle und Konzepte zur Arbeitszeitflexibilisierung vorgestellt. Abschließend werden Vor- und Nachteile der Arbeitszeitflexibilisierung diskutiert.

### 2.3.1 Arbeitszeitrechtliche Grundlagen

Die arbeitszeitrechtlichen Grundlagen sind für Arbeitnehmer in Deutschland im Arbeitszeitgesetz festgelegt [15]. Dort ist eine tägliche Höchstarbeitszeit von acht Stunden für die Werktage inklusive Samstag vorgeschrieben. In Sonderfällen darf die tägliche Arbeitszeit auf zehn Stunden ausgeweitet werden, sofern innerhalb von 24 Wochen die tägliche Höchstarbeitszeit im Durchschnitt maximal acht Stunden beträgt [15, §3].

Nach sechs Stunden Arbeit ist eine 30-minütige Pause vorgeschrieben, bei über neun Stunden Arbeit ist eine 45-minütige Pause Pflicht. Art und Ort der Pause sind dem Arbeitnehmer überlassen, wobei die Pause weder am Anfang noch am Ende der Arbeitszeit liegen darf und in Blöcken von mindestens 15 Minuten erfolgen muss [15, §4]. Die Zeit zwischen Arbeitstagen wird als Ruhezeit definiert und liegt bei mindestens elf ununterbrochenen Stunden. Ausnahmen bilden Schichtarbeit und eine Verkürzung auf neun Stunden durch tarifliche Regelungen [15, §5].

Die Arbeit an Sonntagen und gesetzlichen Feiertagen ist grundsätzlich verboten. Allerdings sind Berufsgruppen wie beispielsweise die Notfallmedizin oder Gastronomie von diesem Beschäftigungsverbot entbunden. Die betreffenden Arbeitnehmer haben dennoch Anspruch auf 15 freie Sonntage pro Jahr sowie Ersatzruhetage unter der Woche [15, §§9-11].

### 2.3.2 Gängige Arbeitszeitmodelle

**Arbeit in Vollzeit** Vollzeit-Beschäftigung ist bekannt als das Normalarbeitsverhältnis. Beschäftigte arbeiten zwischen sieben und acht Stunden pro Tag, beziehungsweise 35 bis 40 Stunden pro Woche zwischen Montag und Freitag innerhalb einer gleichbleibenden Zeit von 07:00 bis 18:00 Uhr [16, S.51ff.]. Vorteile sind der geringe Koordinationsaufwand und die gute Planbarkeit der Arbeitsstunden, wohingegen die Freizeit des Arbeitnehmers wenig eigenmächtig geplant werden kann [17, S.4].

**Arbeit in Teilzeit** Ein weiteres gängiges Schichtmodell ist die Arbeit in Teilzeit. Hierbei ist die Arbeitszeit geringer als für Vollzeitbeschäftigte, wobei die Arbeitszeit individuell vereinbart wird. Es wird unterschieden zwischen starren Halbtagsstellen und Stellen für wenige Wochentage oder unregelmäßige Arbeitsstunden. Vorteile der Teilzeitarbeit sind beispielsweise die Vermeidung von Kosten für Neuanstellungen und die Bindung und Wertschätzung von Mitarbeitern mit außerberuflichen Verpflichtungen. Zu den Nachteilen zählen höhere Lohnnebenkosten und ein erhöhter Koordinationsaufwand [17, S.7].

**Schichtarbeit** Schichtarbeit bezeichnet die Ausführung einer Arbeitsaufgabe an einem Arbeitsplatz im Laufe eines Tages von verschiedenen Beschäftigten nacheinander. Die Schichtmodelle unterscheiden sich hinsichtlich der Zyklen, der Schichtdauer und -wechsel. Schichtarbeit ermöglicht Arbeitsprozesse, die nicht unterbrochen werden können, kann allerdings zu erheblichen sozialen und gesundheitlichen Belastungen der Mitarbeiter führen sowie hohe Kosten für Nacht- und Sonntagsarbeit verursachen [18, S.45ff.].

**Bereitschaftsdienst** Beim Bereitschaftsdienst muss sich der Arbeitnehmer im Unternehmen oder in dessen unmittelbarer Nähe aufhalten, um die Arbeit zeitnah aufnehmen zu können. Während des Bereitschaftsdienstes können Beschäftigte schlafen, der Arbeitgeber muss hierzu entsprechende Räume zur Verfügung stellen. Durch den Bereitschaftsdienst kann ein Wettbewerbsvorteil durch einen verbesserten Kundenservice erreicht werden, ein großer Nachteil ist der gesetzliche Gestaltungsspielraum für Arbeitgeber, der sich zum Nachteil für Arbeitnehmer auswirken kann [18, S.56f.].

**Versetzte Arbeitszeit** Das Modell der versetzten Arbeitszeit definiert Arbeitszeitblöcke, die sich an den Arbeitsstunden der Mitarbeiter orientieren. Die Blöcke können sich überlappen, was zu einer flexiblen Verteilung der Arbeitszeiten führt. Durch dieses Modell können temporäre Spitzen der Arbeitslast abgefangen und längere Betriebszeiten realisiert werden. Ein großer Nachteil der versetzten Arbeitszeit ist eine aufwändige Personalbedarfsanalyse [19].

**Minijob** Ein Minijob oder eine geringfügige Beschäftigung liegt laut Sozialgesetzbuch vor, wenn das Arbeitsentgelt aus der Beschäftigung regelmäßig im Monat 450€ nicht übersteigt. Alternativ kann die Anzahl an Arbeitstagen im Kalenderjahr auf maximal drei Monate oder 70 Arbeitstage begrenzt sein [20].

**Kapazitätsorientierte variable Arbeitszeit** Die kapazitätsorientierte variable Arbeitszeit (KAPO-VAZ) bietet dem Arbeitgeber eine große Gestaltungsfreiheit. Hierbei ist die zu erbringende Arbeitszeit und der Bezugszeitraum im Voraus festgelegt, der tatsächliche Arbeitseinsatz wird dem Arbeitnehmer mit einer Ankündigungsfrist mitgeteilt. Nachteile dieses flexiblen Systems sind die Planungsunsicherheit für die Arbeitnehmer sowie ein erhöhter Krankenstand durch Überbelastung [21, S.126f.], [22, §12].

### 2.3.3 Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung

Die Arbeitszeitflexibilisierung beschreibt die zeitliche Flexibilisierung der zur Verfügung stehenden Arbeitszeitkapazität innerhalb der gesetzlich und arbeitsvertraglich festgelegten Rahmenbedingungen. Der Übersichtsbeitrag von [23] zum Thema Mitarbeiterflexibilität gibt einen Überblick über verschiedene Ansätze zur Arbeitszeitflexibilisierung.

**Überstunden** Überstunden sind Arbeitszeitkapazitäten, die über die vertraglich vereinbarte Arbeitszeit der Mitarbeiter hinausgehen (z.B. tägliche Arbeitszeit von mehr als acht Stunden). In der Regel werden die Mitarbeiter für diese zusätzlichen Arbeitsstunden entlohnt. Überstunden stellen einen einfach umzusetzenden Ansatz der Arbeitszeitflexibilisierung dar, allerdings kann dieser Ansatz verhältnismäßig teuer sein, wenn die Überstunden mit einem höheren Stundensatz entlohnt werden als die reguläre Arbeitszeit. Überstunden werden häufig eingesetzt, um Schwankungen der Kundennachfrage auszugleichen und die Einhaltung vertraglich vereinbarter Lieferfristen zu gewährleisten.

**Flexible Arbeitstage** Im Konzept der flexiblen Arbeitstage ist die Wochenarbeitszeit nicht auf einen bestimmten Wert, z.B. 40 Stunden pro Woche, festgelegt, sondern die Wochenarbeitszeit kann je nach Bedarf innerhalb eines festgelegten Wertebereichs variiert werden. Auf diese Weise können Arbeitszeitkapazitäten flexibel von Tagen mit unterdurchschnittlicher Arbeitslast auf Tage mit überdurchschnittlicher Arbeitslast verschoben werden, um so Schwankungen der Kundennachfrage auszugleichen.

**Jahresarbeitszeit** Beim Konzept der Jahresarbeitszeit werden vertraglich lediglich die pro Jahr zu leistenden Arbeitsstunden eines Mitarbeiters festgelegt. Die zur Verfügung stehenden Arbeitszeitkapazitäten werden dann flexibel innerhalb des Jahres eingesetzt, um auf diese Weise stochastische als auch saisonale Schwankungen der Kundennachfrage bestmöglich ausgleichen zu können. Durch das Konzept der Jahresarbeitszeit können Kosten für Zeitarbeiter, Überstunden, Einstellung und Kündigung von Mitarbeitern eingespart werden. Jedoch wirken sich die unregelmäßigen Arbeitszeiten der Mitarbeiter negativ auf deren Arbeitsbedingungen und deren Zufriedenheit aus.

**Arbeitszeitkonten** Das Konzept der Arbeitszeitkonten sieht vor, dass jeder Mitarbeiter ein Konto hat, das dessen geleistete Arbeitsstunden im Vergleich zu der vertraglich vereinbarten Arbeitszeit erfasst. Ein positiver Kontostand bedeutet, dass der Mitarbeiter zum aktuellen Zeitpunkt mehr Arbeitsstunden geleistet hat als vertraglich vereinbart sind. Ein negativer Kontostand bedeutet hingegen, dass der Mitarbeiter zum aktuellen Zeitpunkt dem Unternehmen Arbeitsstunden schuldet. In der Regel gibt es unternehmensspezifische Regeln hinsichtlich Unter- und Obergrenze des Kontostands des Arbeitszeitkontos, beispielsweise werden Überstunden, die eine bestimmte Obergrenze überschreiten, an den Mitarbeiter ausbezahlt.

#### 2.3.4 Beurteilung der Arbeitszeitflexibilisierung

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung haben sowohl Vor- als auch Nachteile für Arbeitgeber und -nehmer. Aus ökonomischer Sicht kann durch eine flexiblere Arbeitszeitgestaltung die Reaktionszeit auf saisonale und konjunkturelle Auftragsschwankungen durch Überstundenauf- und -abbau verkürzt werden. Dadurch können Neueinstellungen vermieden werden, die immer mit Aufwand und Kosten durch Bürokratie und Einlernen verbunden sind [24, S.2], [18, S.21]. Zusätzlich können die Betriebs- und Öffnungszeiten ausgedehnt werden, was eine bessere Kommunikation zwischen Unternehmen in verschiedenen Zeitzonen ermöglicht. Ein weiterer ökonomischer Vorteil ist die schnellere Amortisation kostenintensiver Produktionsanlagen durch eine höhere Auslastung [24, S.2].

Aus sozialer Sicht wirkt sich eine erhöhte Flexibilität und Mitbestimmung bei der Arbeitszeit positiv auf die Mitarbeiter aus. Einerseits sind gesteigerte Motivation und Produktivität festzustellen [17, S.4], andererseits ein verminderter Krankenstand durch eine bessere Vereinbarkeit von Beruf und Privatleben und der dadurch gesteigerten Mitarbeiterzufriedenheit. Außerdem erhöht eine flexible Arbeitszeitgestaltung die Attraktivität der Arbeitgeber für das Anwerben von Fachkräften [17, S.4], [25, S.13]. Die sozialen Vorteile einer flexiblen Arbeitszeitgestaltung bieten darüber hinaus auch

für Arbeitnehmer einen Mehrwert: Durch flexible Arbeitszeiten ist eine verbesserte Anpassung der Arbeitstätigkeit an individuelle Lebensumstände und Bedürfnisse möglich, beispielsweise der Pflege von Angehörigen [26, S.17]. Das Ansparen des Zeitguthabens für ein Sabbatical ist möglich, aber auch der Wiedereinstieg nach Pausen der Beschäftigungstätigkeit können über ein flexibles Modell gestaltet werden [27, S.71f.]. Weiterhin wird durch die flexible Arbeitszeitgestaltung die Teilnahme an Fort- und Weiterbildungen ermöglicht, was wiederum die Qualifikation der Mitarbeiter erhöht und die leistungsgerechte Bezahlung ermöglicht [26, 27].

Trotz aller Vorteile sind die Nachteile flexibler Arbeitszeitgestaltung für den Arbeitnehmer nicht zu vernachlässigen: Zum einen bringt die Flexibilität einen erhöhten Koordinations- und Synchronisationsaufwand mit sich, wenn beispielsweise beide Partner in einem solchen Modell berufstätig sind. Zusätzlich besteht ein Langzeitrisko durch Planungs- und Verteilungsschwierigkeiten, die bei der Schwerpunktsetzung zwischen Arbeitstätigkeit und Privatleben zur Vernachlässigung des einen oder des anderen führen. Ein Gesundheitsrisiko durch eine zu hohe Arbeitsbelastung und damit eine Überschreitung der wöchentlichen Höchstarbeitszeit ist zu beachten, ebenso ein Einkommensrisiko durch einen möglichen Verfall der Mehrarbeitsstunden am Ende eines Betrachtungszeitraums. Schließlich sind Beschäftigungs- und Karriererisiken zu nennen, beispielsweise bezüglich der Absprache zwischen Arbeitgeber und Arbeitnehmer hinsichtlich des Zeitraums für Auf- und Abbau von Zeitguthaben oder dem Wiedereinstieg nach langer Abwesenheit des Arbeitnehmers. Ein Teil des Karriererisikos ist das Qualifikationsrisiko, das bei langen Abwesenheiten dazu führen kann, dass Arbeitnehmer bei Fort- und Weiterbildungsmöglichkeiten vom Arbeitgeber übergangen werden [28, S. 346ff.].

### 3 Allgemeine Beschreibung der Kommissionierung

In diesem Kapitel werden zunächst die Parameter spezifiziert anhand derer die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung formal beschrieben wird (vgl. Kapitel 3.1). Um eine möglichst realitätsgetreue Abbildung eines Kommissioniersystems und folglich eine möglichst präzise Leistungsanalyse des realen Kommissioniersystems anhand der entwickelten Modelle zu ermöglichen, müssen diese Parameter möglichst präzise aus den Realdaten abgeleitet werden. In Kapitel 3.2 werden verschiedene Methoden hierzu vorgestellt.

#### 3.1 Formale Beschreibung der Kommissionierung

Die Parameter zur formalen Beschreibung und Untersuchung der Auftragsbearbeitung mit nivellierter Auftragseinlastung in der Kommissionierung werden in Abbildung 3 dargestellt. Ausgangspunkt für

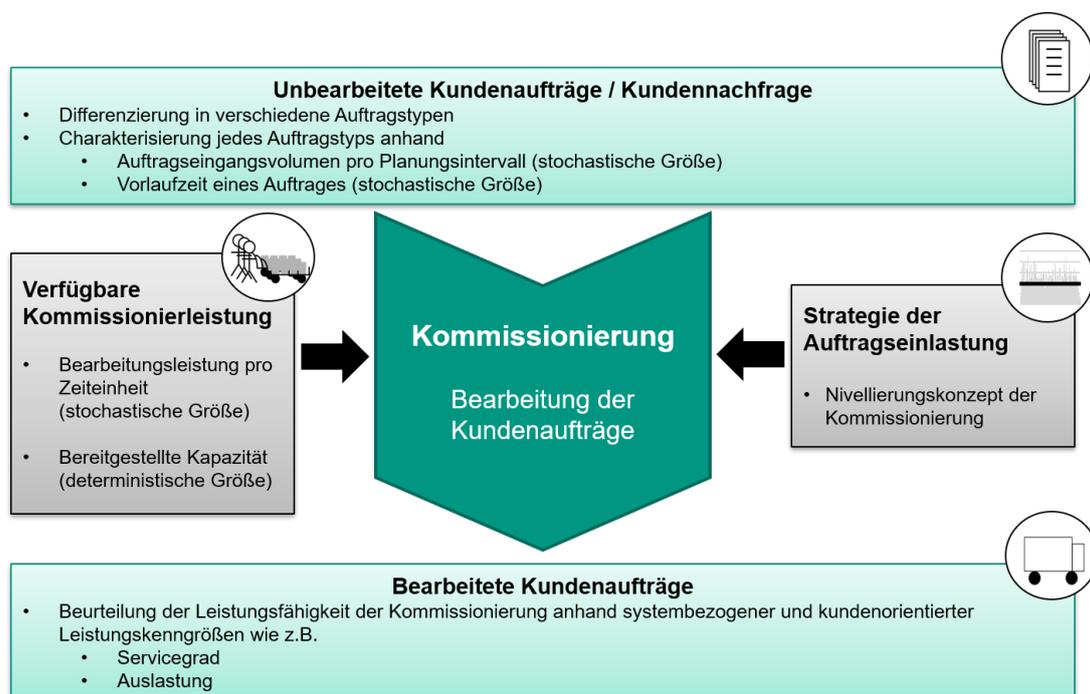


Abbildung 3: Formale Beschreibung der Kommissionierung.

die Untersuchung der Auftragsbearbeitung sind die eintreffenden Kundenaufträge und deren Eigenschaften. Aus diesen leiten sich in Abhängigkeit der gewählten Kommissionierstrategie die Kommissionieraufträge ab. Im einfachsten Fall einer auftragsorientierten Kommissionierung entspricht jeder Kundenauftrag genau einem Kommissionierauftrag (vgl. Kapitel 2.1.2). Diese Kommissionieraufträge stellen die Planungsgrundlage für alle im Folgenden durchgeführten Untersuchungen dar. Ein Kommissionierauftrag wird im Folgenden lediglich kurz als Auftrag bezeichnet.

In Abhängigkeit der konkreten technischen und organisatorischen Konfiguration der Kommissionierung sowie den Eigenschaften der Aufträge kann es sinnvoll sein, diese in verschiedene Auftragsstypen zu untergliedern, beispielsweise hinsichtlich deren Vorlaufzeit in Standard- und Expressaufträge oder hinsichtlich der eingesetzten Kommissioniertechnik in Ware-zur-Person- und Person-zur-Ware-Systeme.

Jeder Auftragsstyp  $i \in \mathcal{I}$  wird anhand folgender Parameter spezifiziert:

- Auftragseingangsvolumen  $A_i$  pro Planungsintervall und
- Vorlaufzeit  $E_i$  eines Auftrags.

Das Auftragseingangsvolumen  $A_i$  pro Planungsintervall spezifiziert die Anzahl der pro Planungsintervall in der Kommissionierung eintreffenden Aufträge des Auftragsstyps  $i$ . Die Vorlaufzeit  $E_i$  eines Auftrags des Auftragsstyps  $i$  misst die Zeitperiode, die zum Zeitpunkt des Auftragseingangs bis zum Erreichen dessen Fälligkeitsfrist besteht. Beide Parameter werden jeweils als diskrete Zufallsvariable mit endlichem Wertebereich  $\mathcal{A}_i$  bzw.  $\mathcal{E}_i$  modelliert.

Die Bearbeitungsleistung in der Kommissionierung wird auftragstyp-spezifisch anhand der Parameter

- Bearbeitungsleistung  $L_i$  pro Zeiteinheit und
- Bereitgestellte Kapazität  $c_i$

beschrieben. Die Bearbeitungsleistung  $L_i$  pro Zeiteinheit gibt an, wie viele Aufträge von Auftragsstyp  $i$  pro Zeiteinheit vollständig bearbeitet werden können und wird als diskrete Zufallsvariable mit endlichem Wertebereich  $\mathcal{L}_i$  modelliert. Die bereitgestellte Kapazität  $c_i$  ist eine deterministische Größe und spezifiziert, wie viel Kapazität, gemessen in Zeiteinheiten, pro Planungsintervall für die Kommissionierung von Aufträgen des Auftragsstyps  $i$  bereitgestellt wird.

Die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung wird zum einen anhand verschiedener systembezogener Leistungskenngrößen (z.B. Systemauslastung, Anzahl Lost Sales, Anzahl unbearbeiteter Aufträge) beurteilt. Zum anderen werden basierend auf den Eigenschaften der bearbeiteten Aufträge verschiedene kundenorientierte Leistungskenngrößen (z.B. Servicegrad, Durchsatz, Rückstandsdauer eines Auftrags) berechnet. Die jeweiligen mathematischen Definitionen dieser Leistungskenngrößen werden in Kapitel 5.4 eingeführt.

In Abbildung 4 wird beispielhaft ein Kommissioniersystem, dessen Aufträge sich in Standard- und Expressaufträge untergliedern, anhand der eingeführten Parameter zur formalen Beschreibung der Kommissionierung (vgl. Abbildung 3) spezifiziert.

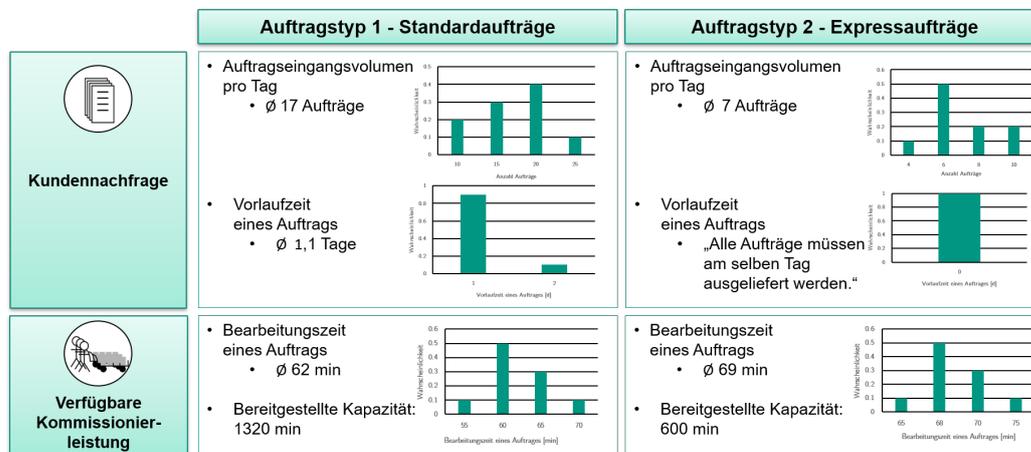


Abbildung 4: Formale Beschreibung eines beispielhaften Kommissioniersystems mit Standard- und Expressaufträgen.

### 3.2 Methodenkatlog zur Ableitung der Parameter aus den Realdaten

Um eine möglichst realitätsgetreue Abbildung eines Kommissioniersystems und folglich eine möglichst präzise Leistungsanalyse des realen Kommissioniersystems anhand der entwickelten Modelle zu ermöglichen, müssen die Parameter zur formalen Beschreibung der Kommissionierung möglichst präzise aus den Realdaten abgeleitet werden. Insbesondere bei den stochastischen Parametern Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall, Vorlaufzeit eines Auftrags und Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit

stellt sich die Frage, wie deren diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf angemessene Weise aus den Realdaten abgeleitet werden können.

Im Rahmen der durchgeführten Unternehmensbefragungen wurde ermittelt, dass der Auftragseingang bei allen Teilnehmern der Befragung kontinuierlich erfasst wird, also historische Daten vorliegen. Die Kommissionierleistung wird hingegen nur in einem Teil der befragten Unternehmen systematisch erfasst. Ausgehend von diesen Ergebnissen der Unternehmensbefragung werden im Folgenden zwei Datengrundlage-Szenarien definiert (vgl. Kapitel 3.2.1) und je Datengrundlage-Szenario eine Methode zur Ableitung einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung aus den vorliegenden Realdaten vorgestellt (vgl. Kapitel 3.2.2, 3.2.3).

### 3.2.1 Datengrundlage-Szenarien

Datengrundlage-Szenario 1 beschreibt den Fall kontinuierlich erfasster Daten in Form von historischen Zeitreihen. Folglich besteht die Aufgabe in diesem Fall darin, auf Basis einer Stichprobe eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung zu schätzen.

Datengrundlage-Szenario 2 beschreibt hingegen die Situation, dass Daten nur punktuell, also einmalig erfasst werden, z.B. im Rahmen von REFA-Zeitstudien oder Multimomenthäufigkeitsaufnahmen, oder dass lediglich grobe Erfahrungswerte vorliegen. In diesem Fall liegt also keine Stichprobe vor, sondern es sind nur einzelne Kenngrößen der Stichprobe bekannt, wie beispielsweise Mittelwert, Varianz, Modalwert und Wertebereich. Auf deren Basis muss die diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung der betrachteten Größe geschätzt werden.

### 3.2.2 Methode für Datengrundlage-Szenario 1

Im Fall von Datengrundlage-Szenario 1 wird die diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung auf Basis einer Stichprobe geschätzt. Hierzu wird zunächst geprüft, ob die Stichprobe klassiert werden muss: Eine Klassierung ist sinnvoll, wenn die Anzahl der unterschiedlichen Werte der Stichprobe in der Größenordnung der Stichprobengröße liegt. Zur Klassierung einer Stichprobe existieren hinsichtlich der Wahl der Klassenanzahl und der Wahl der Klassenbreite verschiedene Ansätze [29, S.325], [30]:

- **Wurzelfunktion**

Der einfachste und schnellste Ansatz zur Schätzung der Klassenanzahl  $n_h$  in Abhängigkeit der Stichprobengröße  $n$  ist der Folgende:

$$n_h = \sqrt{n}. \quad (5)$$

- **Ansatz von Rice**

Die Klassenanzahl  $n_h$  ist proportional zur Stichprobengröße  $n$  und wird wie folgt berechnet:

$$n_h = 2 \cdot n^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Mit diesem Schätzer wird die Klassenanzahl in der Regel überschätzt. Außerdem wird die Variabilität der Stichprobe nicht berücksichtigt.

- **Ansatz von Sturges**

Die Klassenanzahl  $n_h$  wird in Abhängigkeit der Stichprobengröße  $n$  wie folgt berechnet:

$$n_h = \log_2(n) + 1. \quad (7)$$

Der Schätzer unterstellt eine Normalverteilung der Datenpunkte der Stichprobe und ist im Fall großer, nicht normalverteilter Stichproben eine zu konservative Schätzung. Außerdem wird die Variabilität der Stichprobe nicht berücksichtigt.

- **Ansatz von Doane**

Der Ansatz von Doane ist eine Weiterentwicklung des Schätzers von Sturges und ermöglicht präzisere Schätzungen für nicht normalverteilte Stichproben. Die Klassenanzahl  $n_h$  wird in Abhängigkeit der Stichprobengröße  $n$ , des Mittelwerts  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  der Stichprobe wie folgt berechnet:

$$n_h = 1 + \log_2(n) + \log_2 \left( 1 + \frac{|g_1|}{\sigma_{g_1}} \right)$$

$$g_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (8)$$

$$\sigma_{g_1} = \sqrt{\frac{6 \cdot (n - 2)}{(n + 1) \cdot (n + 3)}}$$

- **Ansatz von Freedman-Diaconis**

Die Klassenbreite  $h$  ergibt sich aus dem Quartilsabstand  $QR$  der Stichprobe und der Stichprobengröße  $n$  wie folgt:

$$h = 2 \cdot \frac{QR}{n^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

Dieser Ansatz berücksichtigt sowohl die Größe als auch die Variabilität der Stichprobe und ist robust gegenüber Ausreißern der Stichprobe.

- **Ansatz von Scott**

Die Klassenbreite  $h$  wird in Abhängigkeit der Stichprobengröße  $n$  und der Standardabweichung  $\sigma$  der Stichprobe wie folgt berechnet:

$$h = \sigma \cdot \left( \frac{24 \cdot \sqrt{\pi}}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Es werden sowohl die Stichprobengröße als auch die Variabilität der Stichprobe berücksichtigt, allerdings wird die Variabilität der Stichprobe anhand der Standardabweichung gemessen, so dass der Schätzer wenig robust gegenüber Ausreißern der Stichprobe ist.

In Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalls wird aus diesen Ansätzen die am besten geeignete Methode zur Klassierung der Stichprobe ausgewählt. Für die klassierte Stichprobe wird dann ein Histogramm erstellt, aus dem sich die relative Häufigkeitsverteilung der klassierten Stichprobe ableitet. Diese dient als Schätzer für die gesuchte diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung. Als Klassenrepräsentant wird der Mittelwert aus unterer und oberer Klassengrenze gewählt [29, S.322f.].

Abbildung 5 fasst die Vorgehensweise bei Datengrundlage-Szenario 1 zusammen.



Abbildung 5: Vorgehensweise der Methode für Datengrundlage-Szenario 1.

### 3.2.3 Methode für Datengrundlage-Szenario 2

Im Fall von Datengrundlage-Szenario 2 wird die diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung auf Basis einzelner Kennwerte der Stichprobe (z.B. Wertebereich, Mittelwert, Varianz) geschätzt. Hierzu wird auf verschiedene parametrische Verteilungsannahmen zurückgegriffen, wie z.B. Normal-, Beta-, Exponential- oder Gamma-Verteilung (vgl. Abbildung 6). Einen Überblick über bekannte diskrete und kontinuierliche parametrische Verteilungsannahmen gibt Law (2015) [29, S.286-313]. Parametrische Wahr-

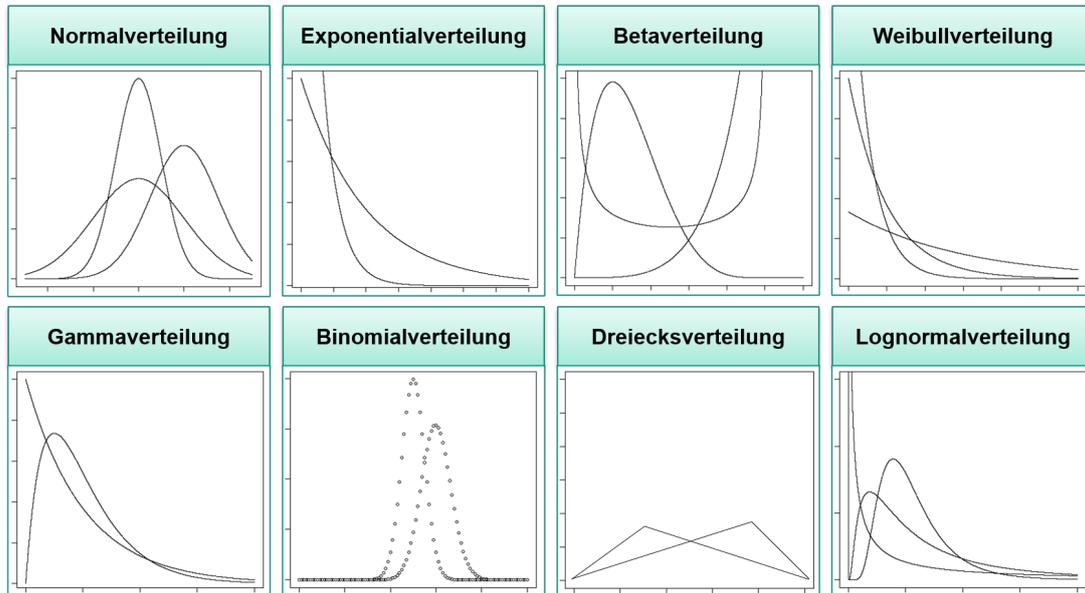


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Dichtefunktionen verschiedener parametrischer Verteilungsannahmen.

scheinlichkeitsverteilungen werden durch die Angabe einer endlichen Anzahl an Verteilungsparametern vollständig beschrieben. Diese können aus den bekannten Kenngrößen der Stichprobe berechnet werden. Im Folgenden ist dies exemplarisch für die Binomial- sowie Gamma- und Poisson-Verteilung dargestellt:

- **Binomialverteilung**  $B(n, p)$

Die Binomialverteilung  $B(n, p)$  wird durch die Parameter  $n \in \mathbb{N}$  und  $p \in [0, 1]$  vollständig beschrieben. Für Erwartungswert  $E(X)$  und Varianz  $Var(X)$  einer Binomialverteilung gilt:

$$\begin{aligned} E(X) &= n \cdot p \\ Var(X) &= n \cdot p \cdot (1 - p). \end{aligned} \quad (11)$$

Folglich können die Verteilungsparameter  $n$  und  $p$  der Binomialverteilung unter der Bedingung  $E(X) > Var(X)$  wie folgt aus  $E(X)$  und  $Var(X)$  berechnet werden:

$$\begin{aligned} n &= \frac{E(X)^2}{E(X) - Var(X)} \\ p &= \frac{E(X) - Var(X)}{E(X)}. \end{aligned} \quad (12)$$

- **Gamma-Verteilung**  $\Gamma(\alpha, \beta)$

Die Gamma-Verteilung  $\Gamma(\alpha, \beta)$  wird durch die Parameter  $\alpha > 0$  und  $\beta > 0$  vollständig beschrieben. Für Erwartungswert  $E(X)$  und Varianz  $Var(X)$  einer Gammaverteilung gilt:

$$\begin{aligned} E(X) &= \alpha \cdot \beta \\ Var(X) &= \alpha \cdot \beta^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Folglich können die Verteilungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Gammaverteilung wie folgt aus  $E(X)$  und  $Var(X)$  berechnet werden:

$$\alpha = \frac{E(X)^2}{Var(X)} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{Var(X)}{E(X)}.$$

- **Poisson-Verteilung**  $Poi(\lambda)$

Die Poisson-Verteilung  $Poi(\lambda)$  wird durch den Parameter  $\lambda > 0$  vollständig beschrieben. Für den Erwartungswert  $E(X)$  einer Poisson-Verteilung gilt:

$$E(X) = \lambda. \quad (15)$$

Folglich ergibt sich der Verteilungsparameter  $\lambda$  der Poissonverteilung wie folgt:

$$\lambda = E(X). \quad (16)$$

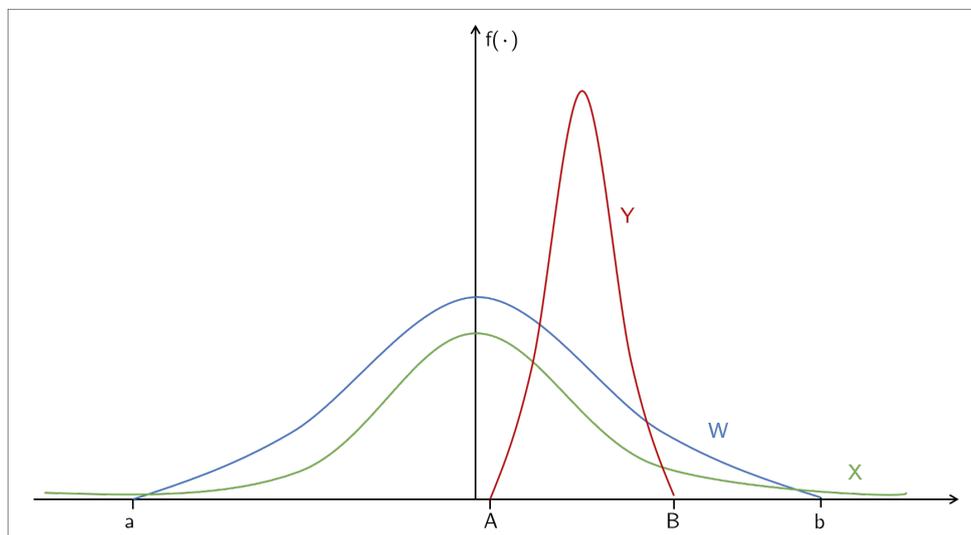


Abbildung 7: Anpassung der Dichtefunktion aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche der Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$ .

In Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalls und der gewählten parametrischen Wahrscheinlichkeitsverteilung kann sich zusätzlicher Anpassungsbedarf aufgrund abweichender Wertebereiche der Verteilungen ergeben (vgl. Abbildung 7): Zufallsvariable  $Y$  mit Dichtefunktion  $f_Y(y)$  bezeichnet die gesuchte stochastische Größe. Der Wertebereich von  $Y$  ist begrenzt durch die untere Grenze  $A$  und die obere Grenze  $B$ . Außerdem sind die Kennwerte  $E(Y)$  und  $Var(Y)$  bekannt. Die Zufallsvariable  $X$  mit Dichtefunktion  $f_X(x)$  spezifiziert die parametrische Verteilungsannahme, die zur Schätzung der Dichtefunktion  $f_Y(y)$  der Zufallsvariable  $Y$  herangezogen wird. Der Wertebereich von  $X$  ist im Worst Case unbegrenzt  $(-\infty, \infty)$ . Zunächst wird die Zufallsvariable  $Y$  als lineare Transformation mit Lageparameter  $l$  und Skalenparameter  $s$  der Hilfsgröße  $W$  mit Dichtefunktion  $f_W(w)$  und Wertebereich  $[a, b]$  ausgedrückt:

$$Y = l + s \cdot W$$

$$l = A - a$$

$$s = \frac{B - A}{b - a}. \quad (17)$$

Für die Kennwerte  $E(W)$  und  $Var(W)$  der Hilfsgröße  $W$  gilt folglich:

$$\begin{aligned} E(W) &= \frac{E(Y) - l}{s} \\ Var(W) &= \frac{Var(Y)}{s^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Ausgehend von den Kennwerten  $E(W)$  und  $Var(W)$  (vgl. Gleichung (18)) der Hilfsgröße  $W$  werden dann in Abhängigkeit der betrachteten parametrischen Verteilungsannahme die Verteilungsparameter der Zufallsvariablen  $X$  berechnet. Hierfür wird beispielsweise im Fall einer Gamma-Verteilung auf Gleichung (14) zurückgegriffen. Die Dichtefunktion  $f_W(w)$  der Hilfsgröße  $W$  wird anschließend durch entsprechende Normierung der Dichtefunktion  $f_X(x)$  der Zufallsvariable  $X$  wie folgt berechnet:

$$f_W(w) = \begin{cases} \frac{f_X(w)}{F_X(b) - F_X(a)} & w \in [a, b] \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (19)$$

Die gesuchte Dichtefunktion  $f_Y(y)$  der Zufallsvariable  $Y$  ergibt sich anschließend durch lineare Transformation (vgl. Gleichung (17)) der Realisationen  $w \in [a, b]$  der Hilfsgröße  $W$  aus deren Dichtefunktion  $f_W(w)$ .

Handelt es sich bei der parametrischen Verteilungsannahme um eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung, dann wird diese wie folgt diskretisiert:

$$P(Y^{diskret} = y) = P(Y^{kont} \leq (y + 0.5)) - P(Y^{kont} \leq (y - 0.5)) \quad (20)$$

Abbildung 8 fasst die Vorgehensweise bei Datengrundlage-Szenario 2 zusammen. Es wird empfohlen, die gesuchte diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung anhand mehrerer parametrischer Verteilungsannahmen zu approximieren und abschließend anhand einer graphischen Gegenüberstellung der resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen basierend auf Erfahrungswissen die am besten geeignete Wahrscheinlichkeitsverteilung auszuwählen.

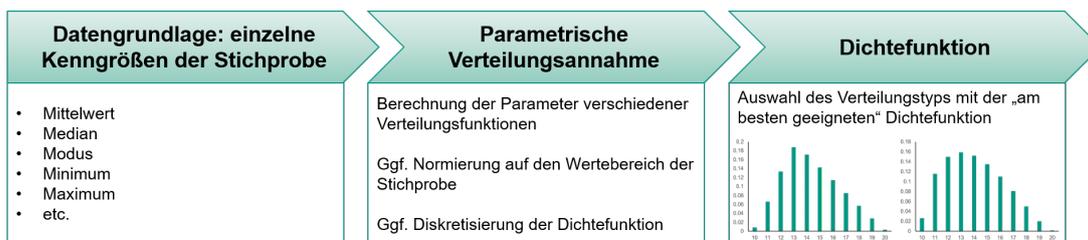


Abbildung 8: Vorgehensweise der Methode für Datengrundlage-Szenario 2.

## 4 Strategie der nivellierten Auftragseinlastung

In diesem Kapitel wird ein Nivellierungskonzept für die Kommissionierung, die so genannte Strategie der nivellierten Auftragseinlastung, basierend auf den Kernideen der Heijunka-Nivellierung in der Produktion entwickelt. Hierzu wird zunächst die Vorgehensweise der Heijunka-Nivellierung in der Produktion beschrieben, dann werden die Unterschiede zwischen Produktionssystemen und der Kommissionierung hinsichtlich der allgemeinen Rahmenbedingungen und der Fragestellung der Nivellierung herausgearbeitet. Basierend darauf wird die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung als Nivellierungskonzept für die Kommissionierung entwickelt.

### 4.1 Konzept der Heijunka-Nivellierung in der Produktion

Heijunka-Nivellierung ist eine einfache und weit verbreitete Strategie zur Auftragseinlastung in Produktionssystemen, in denen auf einer Produktionslinie verschiedene Produkte hergestellt werden. Die Grundidee der Nivellierung ist es, die schwankende Kundennachfrage in einen standardisierten Produktionsplan zu überführen, der eine gleichmäßige Auslastung der vorhandenen Produktionskapazitäten gewährleistet. Die Heijunka-Nivellierung glättet hierbei sowohl das Produktionsvolumen als auch den Produktmix des Produktionssystems [31].

Der Planungshorizont der Heijunka-Nivellierung entspricht in der Regel einem Monat bzw. einem Quartal und ist untergliedert in kürzere Planungsintervalle (z.B. eine Woche, ein Tag, eine Schicht). Das Planungsvorgehen der Heijunka-Nivellierung setzt sich aus den Schritten Systemauslegung und operative Planung zusammen (vgl. Abbildung 9).



Abbildung 9: Planungsschritte der Heijunka-Nivellierung.

#### 4.1.1 Systemauslegung

Die Systemauslegung erfolgt einmalig zu Beginn des Planungshorizonts und umfasst die Schritte der Glättung des Produktionsvolumens und der Glättung des Produktmix. Bei der Glättung des Produktionsvolumens wird die Produktionskapazität bestimmt, die je Produkt je Planungsintervall für die Herstellung dieses Produkts reserviert ist. Hierzu wird die für den gesamten Planungshorizont erwartete Kundennachfrage gleichmäßig auf die Planungsintervalle des Planungshorizonts verteilt. Die pro Planungsintervall für ein bestimmtes Produkt reservierte Produktionskapazität entspricht also der durchschnittlichen Kundennachfrage dieses Produkts pro Planungsintervall. Bei der Glättung des Produktmix wird die Produktionsreihenfolge der verschiedenen Produkte innerhalb eines Planungsintervalls festgelegt. Typische Zielsetzungen sind hierbei die Minimierung der Rüstzeiten zwischen den einzelnen Produkten oder die Maximierung der Gleichmäßigkeit des Produktmix. Diese Entscheidungsprobleme der Reihenfolgeplanung werden im Forschungsbereich des Level Scheduling im Detail untersucht [32, 33]. Die reservierten produktspezifischen Produktionskapazitäten sowie deren Produktionsreihenfolge innerhalb eines Planungsintervalls werden als so genanntes Nivellierungsmuster am Heijunka-Board für die Mitarbeiter visualisiert (vgl. Abbildung 10).

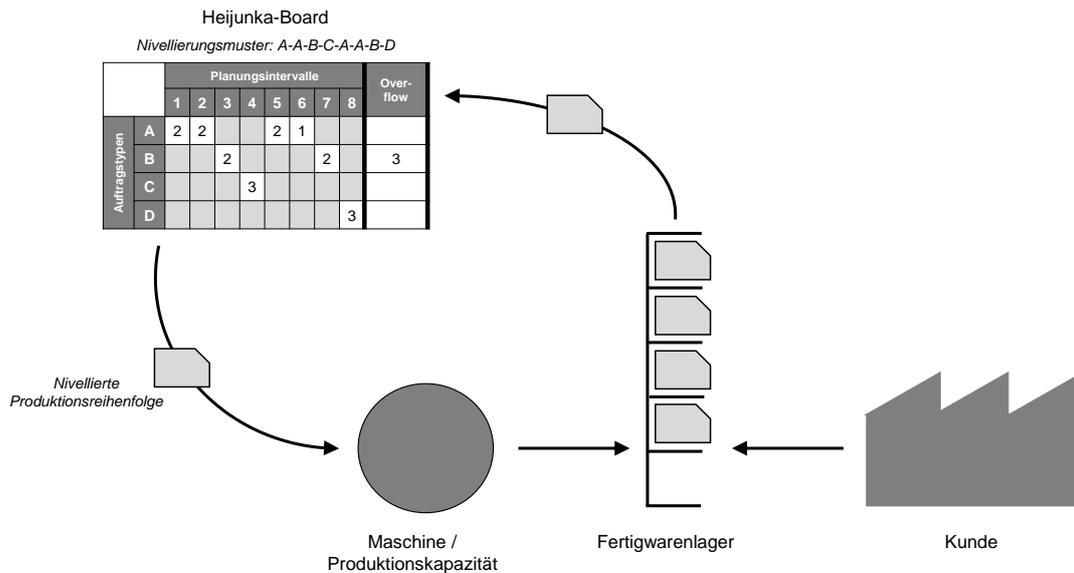


Abbildung 10: Modell eines Heijunka-nivellierten Kanban-Systems.

#### 4.1.2 Operative Planung

Basierend auf dem Nivellierungsmuster findet zu Beginn jedes Planungsintervalls die so genannte operative Planung statt: Die Kundennachfrage des aktuellen Planungsintervalls wird aus dem Fertigwarenlager bedient und die frei werdenden Kanbans der entnommenen Produkte werden am Heijunka-Board gemäß FCFS den reservierten Produktionskapazitäten der jeweiligen Produkte zugeordnet. Wenn die Kundennachfrage eines Produkts die für dieses Produkt reservierte Produktionskapazität überschreitet, werden die entsprechenden Kanbans in der sogenannten Overflow-Box gespeichert. Sie werden in einem der nächsten Planungsintervalle berücksichtigt, sobald die Kundennachfrage dieses Produkts die für dieses Produkt reservierte Produktionskapazität unterschreitet [34, 35] (vgl. Abbildung 10).

#### 4.2 Abgrenzung der Nivellierung in der Kommissionierung von der Heijunka-Nivellierung

Die Heijunka-Nivellierung glättet die Kundennachfrage des Produktionssystems zeitlich innerhalb des betrachteten Planungshorizonts. Dies entspricht der übergeordneten Zielsetzung des zu entwickelnden Nivellierungskonzepts für die Kommissionierung. Allerdings unterscheiden sich die Rahmenbedingungen und die konkrete Problemstellung der Nivellierung in der Kommissionierung von denen in Produktionssystemen in wesentlichen Punkten. Diese Unterschiede sind in Tabelle 3 überblicksartig dargestellt und werden im Folgenden im Detail erläutert.

Zunächst unterscheiden sich Kommissionierung und Produktionssysteme hinsichtlich der zu bearbeitenden Losgröße. Die Aufträge in der Kommissionierung sind kundenindividuell hinsichtlich Art und Anzahl der Produkte, so dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen zweier identischer Kundenaufträge pro Planungsintervall sehr gering ist. Daher ist die Lösgröße in der Kommissionierung in der Regel eins. In Produktionssystemen werden Aufträge hingegen vorwiegend zu Losgrößen größerer Losgrößen zusammengefasst, um dadurch die Anzahl der benötigten, in der Regel zeitaufwändigen Rüstvorgänge zu reduzieren [36].

Darüber hinaus spielt die Kundennachfrage in der Kommissionierung eine andere Rolle als in Produktionssystemen. In der Kommissionierung sind die Aufträge kundenindividuell und es ist daher nicht möglich, Aufträge vor deren Auftragseingang zu bearbeiten. Die Arbeitslast in der Kommissionierung

Tabelle 3: Abgrenzung der Nivellierung in der Kommissionierung von der Heijunka-Nivellierung.

	Kriterium	Nivellierung in der Kommissionierung	Heijunka-Nivellierung in Produktionssystemen
<b>Rahmenbedingungen</b>	Losgröße	Eins	Mindestens eins
	Einfluss der Kundennachfrage	Arbeitslast ist direkt abhängig von der Kundennachfrage	Arbeitslast und Kundennachfrage sind durch das Fertigwarenlager entkoppelt
	Kapazität	Bestimmt durch die Anzahl zugeordneter Mitarbeiter, Kurzfristig flexibel	Bestimmt durch die Anzahl verfügbarer Maschinen, Kurzfristig fest vorgegeben
<b>Problemstellung</b>	Entscheidungsvariable	Menge der bereitgestellten Mitarbeiter	Höhe des Lagerbestands im Fertigwarenlager

ist folglich unmittelbar von der Kundennachfrage abhängig. Im Gegensatz dazu liegt der Fokus der Heijunka-Nivellierung auf der Analyse von Make-To-Stock Produktionssystemen, in denen die Kundennachfrage aus dem Fertigwarenlager bedient wird, so dass die Arbeitslast des Produktionssystems von der Kundennachfrage entkoppelt ist (vgl. Abbildung 10).

Des Weiteren unterscheiden sich Kommissionierung und Produktionssysteme hinsichtlich der Eigenschaften der verfügbaren Kapazität. Ein hoher Anteil der Tätigkeiten in der Kommissionierung wird heutzutage weiterhin manuell erledigt, aufgrund der hohen Flexibilität eines Mitarbeiters und den hohen Investitionskosten automatisierter Kommissioniersysteme [37, 38]. Daher wird die in der Kommissionierung verfügbare Kapazität im Wesentlichen durch die Anzahl verfügbarer Mitarbeiter bestimmt. Diese ist kurzfristig flexibel, da in Phasen hoher Kundennachfrage zusätzliche Zeitarbeitskräfte eingesetzt werden können [39]. Im Gegensatz dazu wird die in Produktionssystemen verfügbare Kapazität durch die Anzahl verfügbarer Maschinen bestimmt, die kurzfristig fest vorgegeben ist [40].

Schließlich unterscheidet sich die Problemstellung der Nivellierung in der Kommissionierung von der Heijunka-Nivellierung in Produktionssystemen. In beiden Fällen soll eine bestimmte Leistungsfähigkeit des Systems, beispielsweise ein Servicegrad von 99%, zu minimalen Kosten gewährleistet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist der Ansatzpunkt zur Erreichung dieser Zielsetzung allerdings jeweils ein anderer: Während in der Heijunka-Nivellierung das Fertigwarenlager so dimensioniert wird, dass die geforderte Leistungsfähigkeit gewährleistet werden kann [41, 42, 34, 35], wird in der Kommissionierung die Anzahl bereitgestellter Mitarbeiter derart angepasst, um die geforderte Leistungsfähigkeit gewährleisten zu können.

### 4.3 Nivellierungskonzept für die Kommissionierung

Die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung spezifiziert das Nivellierungskonzept für die Kommissionierung. Es bestimmt die Prinzipien, gemäß derer die Aufträge in der Kommissionierung eingelastet werden.

Da die Arbeitslast in der Kommissionierung nicht von der Kundennachfrage entkoppelt ist (vgl. Tabelle 3), muss das Nivellierungskonzept für die Kommissionierung die individuellen Fälligkeitsfristen der Aufträge berücksichtigen. Die Aufträge lassen sich hinsichtlich ihrer Fälligkeitsfrist unterteilen in Aufträge mit Fristüberschreitung und Aufträge ohne Fristüberschreitung. Die Aufträge mit Fristüberschreitung untergliedern sich weiterhin in Rückstandsaufträge und Lost Sales. Rückstandsaufträge werden trotz Überschreitung ihrer Fälligkeitsfrist noch bearbeitet, wohingegen Lost Sales unbearbeitet

aus dem System gelöscht werden, da ihre Rückstandsdauer die maximal akzeptierte Rückstandsdauer überschreitet (vgl. Abbildung 11).

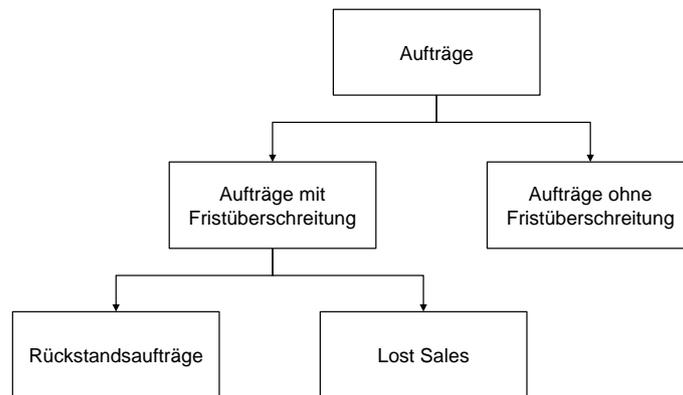


Abbildung 11: Klassifikation der Aufträge hinsichtlich deren Fälligkeitsfrist.

Entsprechend der Planungsschritte der Heijunka-Nivellierung (vgl. Abbildung 9) besteht auch die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung in der Kommissionierung aus den Schritten Systemauslegung und operative Planung.

#### 4.3.1 Systemauslastung

Bei der Systemauslegung wird einmalig zu Beginn des Planungshorizonts die reservierte Kommissionierkapazität je Planungsintervall je Auftragstyp (Glättung des Produktionsvolumens) sowie die Bearbeitungsreihenfolge der Auftragstypen innerhalb eines Planungsintervalls (Glättung des Produktmix) bestimmt. Die Vorgehensweise ist hierbei jeweils dieselbe wie die der Heijunka-Nivellierung (vgl. Kapitel 4.1). Das resultierende Nivellierungsmuster wird für die Mitarbeiter am Heijunka-Board visualisiert und dient als Ausgangspunkt für die operative Planung (vgl. Abbildung 12).

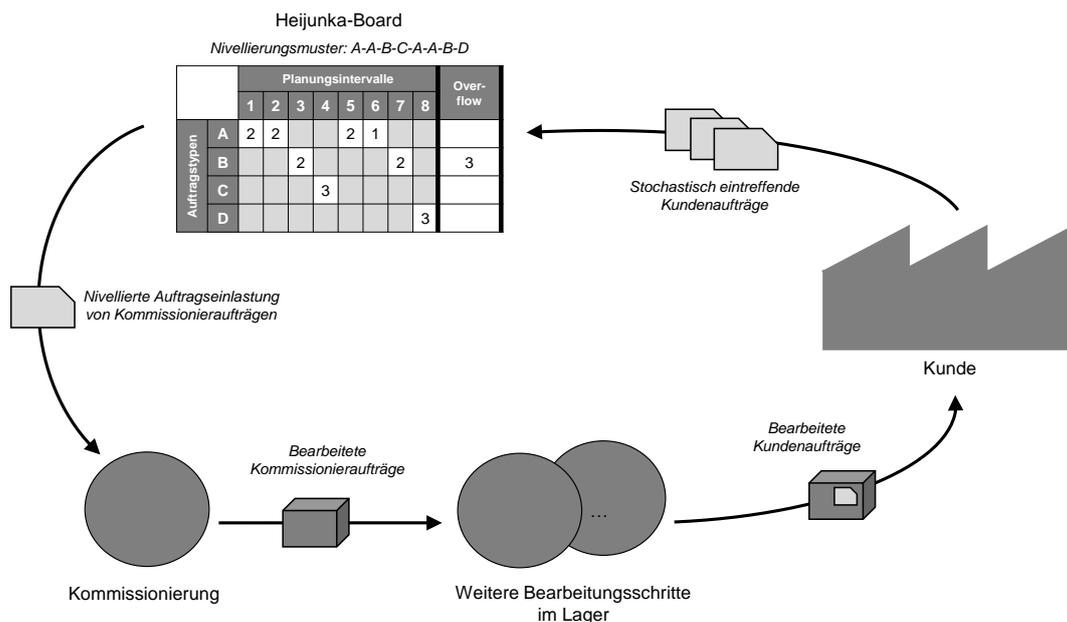


Abbildung 12: Modell eines Kommissioniersystems mit nivellierter Auftragseinlastung.

### 4.3.2 Operative Planung

Bei der operativen Planung werden zu Beginn jedes Planungsintervalls die aktuell vorliegenden Aufträge der verschiedenen Auftragsstypen den im Nivellierungsmuster je Auftragsstyp reservierten Kommissionierkapazitäten zugeordnet. Die Menge der aktuell vorliegenden Aufträge umfasst hierbei sowohl die Aufträge des aktuellen Auftragseingangs sowie die Aufträge, die in vorherigen Planungsintervallen nicht bearbeitet werden konnten und in der Overflow-Box des Heijunka-Board gespeichert sind. Die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge eines Auftragsstyps hängt von deren Fälligkeitsfristen wie folgt ab:

- Aufträge mit unterschiedlichen Fälligkeitsfristen werden in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen bearbeitet.
- Aufträge mit gleicher Fälligkeitsfrist werden gemäß FCFS bearbeitet.
- Aufträge werden zu Lost Sales, sobald ihre Rückstandsdauer die maximal akzeptierte Rückstandsdauer überschreitet.

Überschreitet die Anzahl aktuell vorliegender Aufträge eines Auftragsstyps die für diesen Auftragsstyp im aktuellen Planungsintervall reservierte Kommissionierkapazität, dann wird der Bestand an unbearbeiteten Aufträgen dieses Auftragsstyps in der Overflow-Box um die entsprechenden Aufträge erhöht. Anderenfalls, wenn die Anzahl aktuell vorliegender Aufträge eines Auftragsstyps die für diesen Auftragsstyp im aktuellen Planungsintervall reservierte Kommissionierkapazität unterschreitet, wird die verbleibende Kapazität für Fortbildungsmaßnahmen, Wartungstätigkeiten und Maßnahmen zur kontinuierlichen Verbesserung der Kommissionierung eingesetzt.

### 4.3.3 Zusammenfassung

Die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung, die die Arbeitslast in der Kommissionierung zeitlich glättet, zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Je Planungsintervall ist je Auftragsstyp eine feste Kapazität für die Bearbeitung von Aufträgen dieses Auftragsstyps reserviert.
- Der Umfang und die Reihenfolge der reservierten Kommissionierkapazitäten je Auftragsstyp pro Planungsintervall werden als Nivellierungsmuster am Heijunka-Board visualisiert.
- Je Planungsintervall werden die auftragsstyp-spezifischen reservierten Kommissionierkapazitäten eingesetzt, um die aktuell vorliegenden Aufträge in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen zu bearbeiten.

## 5 Analytisches Modell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung

In diesem Kapitel wird die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung als analytisches Modell abgebildet (vgl. Kapitel 5.3), auf dessen Basis verschiedene systembezogene und kundenorientierte Leistungskenngrößen zur Leistungsanalyse der Kommissionierung berechnet werden (vgl. Kapitel 5.4). Hierzu wird zunächst ein geeignetes analytisches Modell ausgewählt (vgl. Kapitel 5.1) und der Betrachtungsgegenstand des analytischen Modells spezifiziert (vgl. Kapitel 5.2). Abschließend wird die Umsetzung des analytischen Modells im Software-Tool beschrieben (vgl. Kapitel 5.5).

### 5.1 Modellwahl

Analytische Modelle und Simulationsmodelle sind weitverbreitete Modellierungsansätze zur Abbildung und Analyse des Systemverhaltens und der Leistungsfähigkeit stochastischer logistischer Systeme. Simulationsmodelle ermöglichen eine beliebig detaillierte Abbildung des betrachteten Systems. Allerdings sind Modellierung, Validierung und Durchführung von Experimenten anhand eines Simulationsmodells sehr zeitaufwändig und die Allgemeingültigkeit von Simulationsmodellen ist eher gering. Darüber hinaus kann das reale Systemverhalten durch Kenngrößen, die basierend auf Simulationsergebnissen berechnet werden, lediglich approximiert werden [43, S.17f.]. Daher wird im Folgenden ein analytisches Modell zur Abbildung der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung verwendet.

Analytische Modelle untergliedern sich in zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Modelle: Zeitkontinuierliche Modelle beschreiben das Systemverhalten zu jedem beliebigen Zeitpunkt  $t \in \mathbb{R}_0$ , wohingegen das Systemverhalten in zeitdiskreten Modellen nur zu bestimmten Zeitpunkten  $t \in \mathbb{N}_0$  beobachtet wird. Diese Beobachtungszeitpunkte  $t$  sind ganzzahlige Vielfache eines konstanten Zeitinkrements  $t_{inc}$  [44, S.4f.]:

$$t = k \cdot t_{inc} \quad k \in \mathbb{N}_0. \quad (21)$$

Zeitdiskrete Modelle haben hinsichtlich Modellierungsgenauigkeit, Detaillierungsgrad sowie der Abbildung realer Prozesse folgende Vorteile gegenüber zeitkontinuierlichen Modellen [43, S.13-17]: Erstens ermöglichen zeitdiskrete Modelle eine höhere Modellierungsgenauigkeit der stochastischen Inputparameter. So werden zur Beschreibung generell-verteilter stochastischer Parameter jeweils deren vollständige Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben, wohingegen generell-verteilte Zufallsvariablen in zeitkontinuierlichen Modellen nur durch Angabe der ersten beiden Momente spezifiziert werden. Untersuchungen von Schleyer (2007) [43] zeigen, dass diese jedoch nicht ausreichend Informationen beinhalten, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariable vollständig zu spezifizieren. Zweitens können anhand zeitkontinuierlicher Modelle häufig nur Erwartungswert und Varianz relevanter Systemkenngrößen berechnet werden. Allerdings ist es für Praxisanwender teilweise wichtiger, bestimmte Quantile einer Kenngröße zu kennen als dessen Erwartungswert, z.B. für die Ermittlung des Servicegrads. Zeitdiskrete Modelle ermöglichen die exakte Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung relevanter Systemkenngrößen und somit die Bestimmung beliebiger Quantile dieser Systemkenngrößen. Drittens handelt es sich bei vielen realen Prozessen, wie z.B. dem Auftragseingang pro Zeiteinheit oder der Kommissionierleistung pro Zeiteinheit, um zeitdiskrete stochastische Prozesse. Die beispielsweise in Ist-Aufnahmen ermittelten Realdaten sind also bereits diskreter Natur und können in zeitdiskreten Modellen ohne zusätzlichen Berechnungsaufwand und ohne Genauigkeitsverlust zur Beschreibung der zeitdiskreten, stochastischen Prozesse verwendet werden. Dagegen müssen deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen in zeitkontinuierlichen Modellen aufwändig durch geeignete parametrische, kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen approximiert werden.

Zeitdiskrete Modelle zur Abbildung von logistischen Systemen basieren vielfach auf einer eingebetteten Markov-Kette [42, 45, 34, 35]. Die Markov-Kette ist ein zeitdiskreter, stochastischer Prozess mit abzählbarem Zustandsraum, der die so genannte Markov-Eigenschaft erfüllt. Diese besagt, dass zu jedem Zeitpunkt, unabhängig vom Zustand, die zukünftige Entwicklung des Prozesses ausschließlich vom aktuell beobachteten Zustand abhängt und von allen vorherigen Zuständen unabhängig ist. Die zeitliche Entwicklung einer Markov-Kette wird durch ihren Anfangszustand und die Übergangswahrscheinlichkeiten vollständig beschrieben. Die Übergangswahrscheinlichkeit  $P(X^{t+1} = j | X^t = i)$  von Zustand  $i$  in den Zustand  $j$  gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Markov-Kette ausgehend von Zustand  $X^t = i$  zum Zeitpunkt  $t$  in den Zustand  $X^{t+1} = j$  zum Zeitpunkt  $(t + 1)$  übergeht. Für die Analyse von logistischen Systemen ist insbesondere das asymptotische Verhalten der Markov-Kette relevant, das unter bestimmten Voraussetzungen durch die so genannte stationäre Verteilung der Markov-Kette beschrieben werden kann. Diese gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich die Markov-Kette nach hinreichend langer Zeit, unabhängig vom Anfangszustand, in einem bestimmten Zustand befindet [46, S.12-42].

Vor diesem Hintergrund wird die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung im Folgenden als zeitdiskrete Markov-Kette modelliert.

## 5.2 Spezifikation der Kommissionierung

Zur Abbildung der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung wird auf die in Kapitel 3.1 eingeführte formale Beschreibung der Kommissionierung zurückgegriffen. Darüber hinaus sind folgende Spezifikationen des Betrachtungsgegenstands notwendig:

Erstens können die verschiedenen Auftragsstypen  $i \in \mathcal{I}$  der Kommissionierung unabhängig voneinander in separaten Modellen untersucht werden, da die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung für jeden Auftragsstyp separate Kapazitäten pro Planungsintervall reserviert, so dass die Kommissionierung verschiedener Auftragsstypen vollständig unabhängig voneinander ist. Zur Untersuchung einer Kommissionierung mit mehreren Auftragsstypen  $i \in \mathcal{I}$  wird je Auftragsstyp  $i$  eine separate Markov-Kette verwendet.

Zweitens werden Aufträge mit Fristüberschreitung bei der Modellierung berücksichtigt. Allerdings wird die mögliche Rückstandsdauer eines Auftrags nach oben durch eine maximal akzeptable Rückstandsdauer von  $R$  Planungsintervallen begrenzt. Folglich ist die Menge der möglichen Fälligkeitsfristen  $\mathcal{K}$  eines Auftrags nach unten durch die maximal akzeptable Rückstandsdauer und nach oben durch die maximale Vorlaufzeit eines Auftrags begrenzt:

$$\mathcal{K} = \{-R, -R + 1, \dots, e_{max}\}. \quad (22)$$

Drittens bildet die Markov-Kette ausschließlich die operative Planung der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung (vgl. Kapitel 4.3) ab. Das Nivellierungsmuster wird als gegeben betrachtet. Die Beobachtungszeitpunkte  $t \in \mathbb{N}_0$ , zu denen die Markov-Kette den Zustand der Kommissionierung erfasst, entsprechen dabei den Startzeitpunkten der Planungsintervalle des Nivellierungskonzepts.

Viertens wird angenommen, dass der Auftragseingang eines Planungsintervalls jeweils zu Beginn des Planungsintervalls vollständig bekannt ist. Der Auftragseingang pro Planungsintervall wird anhand des Zufallsvektors

$$\mathbf{G} = (G_{-R} \ \dots \ G_{e_{max}}) \quad (23)$$

beschrieben, wobei Zufallsvariable  $G_k$  die Anzahl eintreffender Aufträge pro Planungsintervall spezifiziert, die zum Zeitpunkt ihres Auftragseingangs eine Vorlaufzeit von  $k \in \mathcal{K}$  Planungsintervallen haben. Der Wertebereich  $\mathcal{G}$  wird anhand der folgenden Bedingungen spezifiziert:

- Alle eintreffenden Aufträge haben eine nicht-negative Vorlaufzeit (erste Bedingung in Gleichung (24)).
- Der Wertebereich jeder Vektorkomponente  $g_k$ ,  $k \in \{0, \dots, e_{max}\}$ , ist nach unten begrenzt durch Null und nach oben begrenzt durch das maximal mögliche Auftragseingangsvolumen  $a_{max}$  pro Planungsintervall (zweite Bedingung in Gleichung (24)).
- Die Gesamtanzahl eintreffender Aufträge ( $\sum_{k \in \mathcal{K}} g_k$ ) pro Planungsintervall entspricht einer Realisation des Auftragseingangsvolumens  $A$  pro Planungsintervall (dritte Bedingung in Gleichung (24)).

$$\mathcal{G} = \left\{ (g_{-R} \ \dots \ g_{e_{max}}) \in \mathbb{N}_0^{(R+e_{max}+1)} \mid g_k = 0 \ \forall k \in \{-R, \dots, -1\} \right. \\ \left. \wedge g_k \in \{0, \dots, a_{max}\} \ \forall k \in \{0, \dots, e_{max}\} \right. \\ \left. \wedge \sum_{k \in \mathcal{K}} g_k \in \mathcal{A} \right\}. \quad (24)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P(\mathbf{G} = \mathbf{g})$  der Realisation  $\mathbf{g}$  ist abhängig von

- der Wahrscheinlichkeit, dass das Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall ( $\sum_{k \in \mathcal{K}} g_k$ ) Aufträge beträgt (erste Bedingung in Gleichung (25)),
- der Anzahl an Möglichkeiten, dass  $g_k$  Aufträge eine Vorlaufzeit von  $k \in \mathcal{K}$  Planungsintervallen haben (zweite Bedingung in Gleichung (25)) und
- der Wahrscheinlichkeit, dass  $g_k$  Aufträge eine Vorlaufzeit von  $k \in \mathcal{K}$  Planungsintervallen haben (dritte Bedingung in Gleichung (25)):

$$P(\mathbf{G} = \mathbf{g}) = P \left( A = \sum_{k=-N}^{e_{max}} g_k \right) \cdot \left[ \prod_{k=0}^{e_{max}} \frac{(\sum_{m=k}^{e_{max}} g_m)!}{g_k! \cdot ((\sum_{m=k}^{e_{max}} g_m) - g_k)!} \right] \\ \cdot \left[ \prod_{k=0}^{e_{max}} P(E = k)^{g_k} \right] \quad \forall \mathbf{g} \in \mathcal{G}. \quad (25)$$

Fünftens wird die verfügbare Kommissionierleistung pro Planungsintervall anhand der Zufallsvariable  $B$  beschrieben. Diese spezifiziert die Anzahl der Aufträge, die innerhalb eines Planungsintervalls vollständig bearbeitet werden können und ist abhängig von der pro Planungsintervall reservierten Kapazität  $c$  und der Kommissionierleistung pro Zeiteinheit  $L$ . Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der verfügbaren Kommissionierleistung pro Planungsintervall wird daher als  $c$ -fache Faltung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $L$  berechnet.

Sechstens wird angenommen, dass das betrachtete Kommissioniersystem stabil ist. Ein System wird als stabil bezeichnet, wenn dessen Auslastung  $U$  kleiner als eins ist:

$$U = \frac{E(A)}{E(B)} < 1. \quad (26)$$

In Tabelle 4 sind die Inputparameter der Markov-Kette zusammengefasst.

Tabelle 4: Inputparameter der Markov-Kette.

Parameter	Variable	Wertebereich
<b>Kundennachfrage des betrachteten Auftragsstyps</b>		
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$A$	$\mathcal{A} = \{a_{min}, \dots, a_{max}\}$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E$	$\mathcal{E} = \{e_{min}, \dots, e_{max}\}$
Auftragseingang pro Planungsintervall	$G$	$\mathcal{G}$
<b>Auftragsbearbeitung</b>		
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$L$	$\mathcal{L} = \{l_{min}, \dots, l_{max}\}$
Bereitgestellte Kapazität	$c$	$\mathbb{N}$
Kommissionierleistung pro Planungsintervall	$B$	$\mathcal{B} = \{(c \cdot l_{min}), \dots, (c \cdot l_{max})\}$
<b>Nivellierungskonzept</b>		
Maximal akzeptable Rückstandsdauer	$R$	$\mathbb{N}$

### 5.3 Modellierung als zeitdiskrete Markov-Kette

Die zeitdiskrete Markov-Kette bildet die zeitliche Entwicklung des Auftragsbestands in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung ab. Hierzu wird die Anzahl unbearbeiteter Aufträge in der Kommissionierung zu den Beobachtungszeitpunkten  $t \in \mathbb{N}_0$  erfasst, die jeweils den Startzeitpunkten der Planungsintervalle des Nivellierungskonzepts entsprechen.

#### 5.3.1 Systemzustand

Der Systemzustand  $\mathbf{X}$  der Markov-Kette spezifiziert die Anzahl unbearbeiteter Aufträge in der Kommissionierung zu Beginn eines Planungsintervalls:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (X_{-R} \ \dots \ X_{e_{max}}), \\ X_k &\in \mathbb{N}_0 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \end{aligned} \quad (27)$$

wobei  $X_k$  die Anzahl unbearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen zu Beginn des Planungsintervalls beschreibt.

#### 5.3.2 Zustandsübergang

Der Zustandsübergang von einem beliebigen Zustand  $\mathbf{X}^t = \mathbf{x}$  zu Beginn von Planungsintervall  $t$  in Zustand  $\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{z}$  zu Beginn von Planungsintervall  $(t+1)$  untergliedert sich in folgende Teilschritte:

1. Auftragsbearbeitung in Planungsintervall  $t$ ,
2. Aktualisierung der Fälligkeitsfristen am Ende von Planungsintervall  $t$  und
3. Auftragseingang zu Beginn von Planungsintervall  $(t+1)$ .

Im Folgenden erläutern wir den Zustandsübergang anhand dieser Teilschritte, wobei die „Zwischenzustände“ des Zustandsübergangs anhand der Variablen  $\mathbf{y}^{(m)}$ ,  $m \in \{0, 1, 2, 3\}$ , beschrieben werden. Der Anfangswert ist gegeben durch  $\mathbf{y}^{(0)} = \mathbf{x}$ .

Die Auftragsbearbeitung in Planungsintervall  $t$  hängt von der verfügbaren Kommissionierleistung  $B = b$  in Planungsintervall  $t$  ab. Die Anzahl bearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen in Planungsintervall  $t$

$$\min \left\{ y_k^{(0)}; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} y_l^{(0)} \right\} \right\}$$

entspricht entweder der Anzahl unbearbeiteter Aufträge  $y_k^{(0)}$  zu Beginn von Planungsintervall  $t$  mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen oder der verbleibenden Kommissionierleistung, die nach der Bearbeitung aller Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $l < k$  Planungsintervallen noch zur Verfügung steht. Folglich beträgt die Anzahl unbearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen nach Abschluss der Auftragsbearbeitung in Planungsintervall  $t$

$$\begin{aligned} y_k^{(1)} &= y_k^{(0)} - \min \left\{ y_k^{(0)}; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} y_l^{(0)} \right\} \right\} \\ &= \max \left\{ 0; y_k^{(0)} - \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} y_l^{(0)} \right\} \right\} \quad \forall k \in \mathcal{K}. \end{aligned} \quad (28)$$

Am Ende von Planungsintervall  $t$  müssen die Fälligkeitsfristen aller zu diesem Zeitpunkt unbearbeiteten Aufträge um ein Planungsintervall reduziert werden:

$$\begin{aligned} y_k^{(2)} &= y_{k+1}^{(1)} \quad \forall k \in \mathcal{K} \setminus \{e_{max}\}, \\ y_{e_{max}}^{(2)} &= 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Folglich werden alle Aufträge zu Lost Sales, die am Ende von Planungsintervall  $t$  eine Fälligkeitsfrist von  $-R$  Planungsintervallen haben.

Der Auftragseingang zu Beginn von Planungsintervall  $(t + 1)$  wird durch die Realisation  $\mathbf{G} = \mathbf{g}$  des Auftragseingangs pro Planungsintervall spezifiziert. Diese Aufträge werden entsprechend ihrer Vorlaufzeiten zum Auftragsbestand der Kommissionierung hinzuaddiert:

$$y_k^{(3)} = y_k^{(2)} + g_k \quad \forall k \in \mathcal{K}. \quad (30)$$

### 5.3.3 Übergangswahrscheinlichkeit

Die Übergangswahrscheinlichkeit resultiert aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Teilschritte des Zustandsübergangs, da wir annehmen, dass diese unabhängig voneinander sind. Der Teilschritt der Auftragsbearbeitung hängt von der Realisation der verfügbaren Kommissionierleistung  $B = b$  in Planungsintervall  $t$  ab, so dass die zugehörige Wahrscheinlichkeit

$$P^{(1)} = P(B = b)$$

beträgt. Der Teilschritt der Aktualisierung der Fälligkeitsfristen ist deterministisch,

$$P^{(2)} = 1,$$

wohingegen der Teilschritt des Auftragseingangs von der Realisation des Auftragseingangs  $\mathbf{G} = \mathbf{g}$  zu Beginn von Planungsintervall  $(t + 1)$  abhängt:

$$P^{(3)} = P(\mathbf{G} = \mathbf{g}).$$

Die Übergangswahrscheinlichkeit für einen Zustandsübergang von einem beliebigen Zustand  $\mathbf{X}^t = \mathbf{x}$  zu Beginn von Planungsintervall  $t$  in einen beliebigen Zustand  $\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{z}$  zu Beginn von Planungsintervall  $(t + 1)$  beträgt daher

$$P(\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{z} \mid \mathbf{X}^t = \mathbf{x}) = \sum_{(\mathbf{g}, b) \in \mathcal{I}(\mathbf{x}, \mathbf{z})} P(\mathbf{G} = \mathbf{g}) \cdot P(B = b)$$

$$\mathcal{I}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \left\{ (\mathbf{g}, b) \in \mathcal{G} \times \mathcal{B} \mid g_k + \max \left\{ 0; x_{k+1} - \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^k x_l \right\} \right\} = z_k \right. \quad (31)$$

$$\left. \begin{array}{l} \forall k \in \{-R, \dots, (e_{max} - 1)\} \\ \wedge g_{e_{max}} = z_{e_{max}} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{x}, \mathbf{z} \in \mathcal{X}.$$

### 5.3.4 Zustandsraum

Der Zustandsraum  $\mathcal{X}$  der Markov-Kette ist nach unten durch Null begrenzt, da die Anzahl unbearbeiteter Aufträge nicht-negativ ist. Basierend auf der Struktur des Zustandsübergangs kann eine obere Schranke des Zustandsraums hergeleitet werden.

Die Anzahl unbearbeiteter Aufträge einer bestimmten Fälligkeitsfrist ist maximal,

- wenn die Anzahl eintreffender Aufträge dieser Fälligkeitsfrist pro Planungsintervall maximal ist,
- wenn die verbleibende Kommissionierleistung zur Bearbeitung der Aufträge dieser Fälligkeitsfrist pro Planungsintervall minimal ist und
- wenn die Anzahl unbearbeiteter Aufträge dieser Fälligkeitsfrist, die in früheren Planungsintervallen nicht bearbeitet wurden, maximal ist.

Die maximal mögliche Anzahl eintreffender Aufträge pro Planungsintervall beträgt  $a_{max}$  Aufträge für nicht-negative Fälligkeitsfristen und Null für negative Fälligkeitsfristen. Die minimal mögliche verbleibende Kommissionierleistung pro Planungsintervall entspricht der minimal möglichen Kommissionierleistung  $b_{min}$  pro Planungsintervall für eine Fälligkeitsfrist von  $-R$  Planungsintervallen und Null für alle Fälligkeitsfristen  $k > -R$ , da die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mit der Bearbeitung der Aufträge der kürzesten Fälligkeitsfrist beginnt. Die maximal mögliche Anzahl unbearbeiteter Aufträge, die in früheren Planungsintervallen nicht bearbeitet wurden, beträgt Null für eine Fälligkeitsfrist von  $e_{max}$  Planungsintervallen und entspricht bei allen anderen Fälligkeitsfristen  $k < e_{max}$  der maximal möglichen Anzahl unbearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $(k + 1)$  Planungsintervallen.

Die obere Grenze des Systemzustands  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{O} = (O_{-R} \quad \dots \quad O_{e_{max}}) \quad (32)$$

ist daher wie folgt definiert:

$$\begin{array}{l} O_k = (e_{max} + 1) \cdot a_{max} \quad \forall k \in \{-R, \dots, 0\}, \\ O_k = (e_{max} - k + 1) \cdot a_{max} \quad \forall k \in \{1, \dots, e_{max}\}. \end{array} \quad (33)$$

Der Zustandsraum  $\mathcal{X}$  der Markov-Kette ist daher endlich und definiert als

$$\mathcal{X} = \{0, 1, \dots, O_{-R}\} \times \dots \times \{0, 1, \dots, O_{e_{max}}\}. \quad (34)$$

### 5.3.5 Asymptotisches Verhalten

Ausgehend vom asymptotischen Verhalten der Markov-Kette können verschiedene Leistungskenngrößen der Kommissionierung berechnet werden. Für aperiodische und irreduzible Markov-Ketten mit endlichem Zustandsraum wird deren asymptotisches Verhalten durch die stationäre Verteilung der Markov-Kette beschrieben.

Die Markov-Kette zur Abbildung der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung ist in allen praxisrelevanten Anwendungsfällen aperiodisch. Gemäß Gleichung (34) ist ihr Zustandsraum endlich. Darüber hinaus kann jeder beliebige Zustand der Markov-Kette von jedem beliebigen anderen Zustand der Markov-Kette direkt oder indirekt über eine endliche Folge von Zustandsübergängen erreicht werden. Unerreichbare Zustände werden von der Betrachtung ausgeschlossen. Das asymptotische Verhalten der Markov-Kette wird daher durch deren stationäre Verteilung beschrieben, die sich durch Lösung des folgenden linearen Gleichungssystems ergibt

$$\begin{aligned} \pi_{\mathbf{z}} &= \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} P(\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{z} \mid \mathbf{X}^t = \mathbf{x}) \cdot \pi_{\mathbf{x}} & \forall \mathbf{z} \in \mathcal{X} \\ \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \pi_{\mathbf{x}} &= 1. \end{aligned} \tag{35}$$

Zur exakten Berechnung der stationären Verteilung wird dieses lineare Gleichungssystem mittels des Gauss-Algorithmus gelöst [47].

### 5.4 Leistungskenngrößen der Kommissionierung

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Leistungskenngrößen der Kommissionierung, die basierend auf der stationären Verteilung  $\pi_{\mathbf{x}} = P(\mathbf{X} = \mathbf{x})$  der Markov-Kette berechnet werden können und im Folgenden im Detail vorgestellt werden.

Tabelle 5: Leistungskenngrößen der Kommissionierung.

Kenngroße	Variable	Wertebereich
<b>Systembezogene Leistungskenngrößen</b>		
Anzahl unbearbeiteter Aufträge	$Q$	$\mathcal{Q} = \{0, \dots, (\sum_{k \in \mathcal{K}} O_k)\}$
Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge	$M$	$\mathcal{M} = \{0, \dots, (\sum_{k=-R}^{-1} O_k)\}$
Anzahl Lost Sales	$S$	$\mathcal{S} = \{0, \dots, O_{-R}\}$
Systemauslastung	$\tilde{U}$	$[0, 1]$
<b>Kundenorientierte Leistungskenngrößen</b>		
Anzahl bearbeiteter Aufträge pro Planungsintervall	$\mathbf{H}$	$\mathcal{H}$
Durchsatz	$F$	$\mathcal{F} = \{(c \cdot l_{min}), \dots, (c \cdot l_{max})\}$
Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist eines bearbeiteten Auftrags	$D$	$\mathcal{D} = \{-R, \dots, e_{max}\}$
Rückstandsdauer eines bearbeiteten Auftrags	$D^{backlog}$	$\mathcal{D}^{backlog} = \{1, \dots, R\}$
Zeitpuffer eines bearbeiteten Auftrags	$D^{buffer}$	$\mathcal{D}^{buffer} = \{0, \dots, e_{max}\}$
$\alpha$ -Servicegrad	$SL_{\alpha}$	$[0, 1]$
$\beta$ -Servicegrad	$SL_{\beta}$	$[0, 1]$
$\gamma$ -Servicegrad	$SL_{\gamma}$	$[0, 1]$

### 5.4.1 Anzahl unbearbeiteter Aufträge

Die Zufallsvariable  $Q$  spezifiziert die Gesamtanzahl unbearbeiteter Aufträge in der Kommissionierung zu Beginn eines Planungsintervalls. Die Gesamtanzahl unbearbeiteter Aufträge  $q$  zu Beginn eines beliebigen Planungsintervalls  $t$  entspricht der Summe der Anzahl unbearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen für alle möglichen Fälligkeitsfristen  $k \in \mathcal{K}$ . Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $Q$  leitet sich wie folgt aus der stationären Verteilung der Markov-Kette ab:

$$P(Q = q) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{I}_Q(q)} P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad \forall q \in \mathcal{Q}$$

$$\mathcal{I}_Q(q) = \left\{ \mathbf{x} \in \mathcal{X} \mid \sum_{k \in \mathcal{K}} x_k = q \right\}. \quad (36)$$

Der Erwartungswert der Gesamtanzahl unbearbeiteter Aufträge beträgt

$$E(Q) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \left( \sum_{k \in \mathcal{K}} x_k \right) \cdot P(\mathbf{X} = \mathbf{x}). \quad (37)$$

### 5.4.2 Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge

Die Zufallsvariable  $M$  beschreibt die Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge in der Kommissionierung zu Beginn eines Planungsintervalls. Die Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge  $m$  zu Beginn eines beliebigen Planungsintervalls  $t$  ist die Summe der Anzahl unbearbeiteter Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen für alle negativen Fälligkeitsfristen  $k \in \{-R, \dots, -1\}$ . Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $M$  leitet sich wie folgt aus der stationären Verteilung der Markov-Kette ab

$$P(M = m) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{I}_M(m)} P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad \forall m \in \mathcal{M}$$

$$\mathcal{I}_M(m) = \left\{ \mathbf{x} \in \mathcal{X} \mid \sum_{k=-R}^{-1} x_k = m \right\}. \quad (38)$$

Die erwartete Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge beträgt

$$E(M) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \left( \sum_{k=-R}^{-1} x_k \right) \cdot P(\mathbf{X} = \mathbf{x}). \quad (39)$$

### 5.4.3 Anzahl Lost Sales

Die Zufallsvariable  $S$  beschreibt die Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge, die je Planungsintervall zu Lost Sales werden, da ihre Rückstandsdauer die maximal akzeptierte Rückstandsdauer eines Auftrags von  $R$  Planungsintervallen überschreitet. In einem beliebigen Planungsintervall  $t$  treten  $s$  Lost Sales auf, wenn die Anzahl unbearbeiteter Aufträge  $x_{-R}$  mit einer Fälligkeitsfrist von  $-R$  Planungsintervallen die verfügbare Kommissionierleistung  $b$  des Planungsintervalls  $t$  um  $s$  Aufträge übersteigt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $S$  wird wie folgt berechnet

$$P(S = s) = \sum_{(\mathbf{x}, b) \in \mathcal{I}_S(s)} P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \cdot P(B = b) \quad \forall s \in \mathcal{S}$$

$$\mathcal{I}_S(s) = \{(\mathbf{x}, b) \in \mathcal{X} \times B \mid \max\{0; x_{-R} - b\} = s\}. \quad (40)$$

#### 5.4.4 Systemauslastung

Die Systemauslastung  $\tilde{U}$  spezifiziert den Anteil der verfügbaren Kommissionierleistung, der je Planungsintervall für die Auftragsbearbeitung eingesetzt wird. Die Auslastung der Kommissionierung in einem beliebigen Planungsintervall  $t$  entspricht dem Verhältnis aus Gesamtanzahl unbearbeiteter Aufträge ( $\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k$ ) zu Beginn des Planungsintervalls  $t$  und verfügbarer Kommissionierleistung  $b$  des Planungsintervalls  $t$ . Zur Berechnung der Systemauslastung  $\tilde{U}$  wird dieses Verhältnis für alle Tupel  $(\mathbf{x}, b) \in \mathcal{X} \times \mathcal{B}$  berechnet, mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten gewichtet und aufsummiert:

$$\tilde{U} = \sum_{(\mathbf{x}, b) \in \mathcal{X} \times \mathcal{B}} \min \left\{ 1; \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k}{b} \right\} \cdot P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \cdot P(B = b). \quad (41)$$

#### 5.4.5 Durchsatz

Die Gesamtanzahl bearbeiteter Aufträge pro Planungsintervall spezifiziert den Durchsatz der Kommissionierung. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Durchsatzes wird zunächst die Anzahl bearbeiteter Aufträge je Fälligkeitsfrist

$$\mathbf{H} = (H_{-R} \ \dots \ H_{e_{max}}) \quad (42)$$

betrachtet, wobei  $H_k$  die Anzahl bearbeiteter Aufträge pro Planungsintervall spezifiziert, deren Fälligkeitsfrist zum Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung  $k$  Planungsintervalle beträgt. Der Wertebereich  $\mathcal{H}$  wird anhand folgender Bedingungen spezifiziert:

- Der Wertebereich jeder Vektorkomponente  $h_k$ ,  $k \in \mathcal{K}$ , ist nach unten begrenzt durch Null und nach oben begrenzt durch die maximal mögliche Kommissionierleistung  $b_{max}$  pro Planungsintervall (erste Bedingung in Gleichung (43)).
- Die Gesamtanzahl bearbeiteter Aufträge ( $\sum_{k \in \mathcal{K}} h_k$ ) pro Planungsintervall entspricht einer Realisation der verfügbaren Kommissionierleistung  $B$  pro Planungsintervall (zweite Bedingung in Gleichung (43)).

$$\mathcal{H} = \left\{ (h_{-R} \ \dots \ h_{e_{max}}) \in \mathbb{N}_0^{(R+e_{max}+1)} \mid h_k \in \{0, \dots, b_{max}\} \ \forall k \in \{-R, \dots, e_{max}\} \right. \\ \left. \wedge \sum_{k \in \mathcal{K}} h_k \in \mathcal{B} \right\}. \quad (43)$$

Die Anzahl bearbeiteter Aufträge  $h_k$  in einem beliebigen Planungsintervall  $t$ , die zum Zeitpunkt ihrer Bearbeitung eine Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen haben, entspricht entweder der Anzahl unbearbeiteter Aufträge  $x_k$  mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen zu Beginn von Planungsintervall  $t$  oder der verbleibenden Kommissionierleistung, die nach Bearbeitung der Aufträge mit Fälligkeitsfristen von  $l < k$  Planungsintervallen noch zur Verfügung steht. Die Wahrscheinlichkeit  $P(\mathbf{H} = \mathbf{h})$  der Realisation  $\mathbf{h}$  ist wie folgt definiert

$$P(\mathbf{H} = \mathbf{h}) = \sum_{(\mathbf{x}, b) \in \mathcal{I}_{\mathcal{H}}(\mathbf{h})} P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \cdot P(B = b) \quad \forall \mathbf{h} \in \mathcal{H} \\ \mathcal{I}_{\mathcal{H}}(\mathbf{h}) = \left\{ (\mathbf{x}, b) \in \mathcal{X} \times \mathcal{B} \mid \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{j=-R}^{k-1} x_j \right\} \right\} = h_k \ \forall k \in \mathcal{K} \right\}. \quad (44)$$

Die Zufallsvariable  $F$  spezifiziert den Durchsatz der Kommissionierung. Die Gesamtanzahl bearbeiteter Aufträge  $f$  eines beliebigen Planungsintervalls  $t$  ist die Summe der Anzahl bearbeiteter Aufträge

$h_k$  mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen zum Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung für alle Fälligkeitsfristen  $k \in \mathcal{K}$ . Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $F$  ergibt sich wie folgt aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $\mathbf{H}$

$$P(F = f) = \sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{I}_{\mathcal{F}}(f)} P(\mathbf{H} = \mathbf{h}) \quad \forall f \in \mathcal{F} \quad (45)$$

$$\mathcal{I}_{\mathcal{F}}(f) = \left\{ \mathbf{h} \in \mathcal{H} \mid \sum_{k \in \mathcal{K}} h_k = f \right\}.$$

Der erwartete Durchsatz der Kommissionierung beträgt

$$E(F) = \sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} \left( \sum_{k \in \mathcal{K}} h_k \right) \cdot P(\mathbf{H} = \mathbf{h}). \quad (46)$$

#### 5.4.6 Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist

Die Zufallsvariable  $D$  beschreibt die Zeitdifferenz eines bearbeiteten Auftrags zu dessen Fälligkeitsfrist zum Zeitpunkt dessen Auftragsbearbeitung. Eine negative Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist bedeutet, dass der Auftrag nicht fristgerecht bearbeitet wurde, wohingegen ein Auftrag mit einer positiven Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist bedeutet, dass dieser fristgerecht bearbeitet wurde. Die Wahrscheinlichkeit  $P(D = d)$ , dass ein bearbeiteter Auftrag eine Zeitdifferenz von  $d$  Planungsintervallen zu seiner Fälligkeitsfrist hat, ist proportional zur Summe der bearbeiteten Aufträge  $h_d$ , die zum Zeitpunkt ihrer Bearbeitung eine Fälligkeitsfrist von  $d$  Planungsintervallen haben, für alle Realisationen  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$ . Dabei wird jeder Summand mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit  $P(\mathbf{H} = \mathbf{h})$  gewichtet. Durch Normalisierung dieser gewichteten Summe erhält man die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $D$  wie folgt

$$P(D = d) = \frac{\sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} h_d \cdot P(\mathbf{H} = \mathbf{h})}{\sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} h_k \cdot P(\mathbf{H} = \mathbf{h})} \quad \forall d \in \mathcal{D}. \quad (47)$$

Die erwartete Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist eines bearbeiteten Auftrags beträgt

$$E(D) = \frac{\sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} k \cdot h_k \cdot P(\mathbf{H} = \mathbf{h})}{E(F)}. \quad (48)$$

#### 5.4.7 Rückstandsdauer

Die Rückstandsdauer eines bearbeiteten Auftrags quantifiziert die Zeitperiode zwischen dem Erreichen der Fälligkeitsfrist des Auftrags und dessen Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung. Die Wahrscheinlichkeit  $P(D^{backlog} = d)$ , dass ein bearbeiteter Auftrag zum Zeitpunkt seiner Auftragsbearbeitung eine Rückstandsdauer von  $d$  Planungsintervallen hat, ist proportional zur Wahrscheinlichkeit  $P(D = -d)$ , dass ein Auftrag eine Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist von  $(-d)$  Planungsintervallen hat. Durch Normalisierung der Wahrscheinlichkeiten  $P(D = d)$ ,  $d \in \{-R, \dots, -1\}$ , ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $D^{backlog}$  wie folgt

$$P(D^{backlog} = d) = \frac{P(D = -d)}{\sum_{k=-R}^{-1} P(D = k)} \quad \forall d \in \mathcal{D}^{backlog}. \quad (49)$$

### 5.4.8 Zeitpuffer

Der Zeitpuffer eines bearbeiteten Auftrags quantifiziert die Zeitperiode zwischen dem Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung und der Fälligkeitsfrist eines bearbeiteten Auftrags. Die Wahrscheinlichkeit  $P(D^{buffer} = d)$ , dass ein bearbeiteter Auftrag zum Zeitpunkt seiner Auftragsbearbeitung einen Zeitpuffer von  $d$  Planungsintervallen hat, ist proportional zur Wahrscheinlichkeit  $P(D = d)$ , dass ein bearbeiteter Auftrag eine Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist von  $d$  Planungsintervallen hat. Durch Normalisierung der Wahrscheinlichkeiten  $P(D = d)$ ,  $d \in \{0, \dots, e_{max}\}$ , ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $D^{buffer}$  wie folgt

$$P(D^{buffer} = d) = \frac{P(D = d)}{\sum_{k=0}^{e_{max}} P(D = k)} \quad \forall d \in \mathcal{D}^{buffer}. \quad (50)$$

### 5.4.9 Servicegrad

Der Servicegrad spezifiziert den Anteil fristgerecht bearbeiteter Aufträge an der Gesamtanzahl der Aufträge. Hinsichtlich des Detaillierungsgrads wird zwischen folgenden Servicegrad-Definitionen differenziert:

- Der  $\alpha$ -Servicegrad betrachtet die Wahrscheinlichkeit für eine fristgerechte Bearbeitung aller Aufträge.
- Der  $\beta$ -Servicegrad berücksichtigt die Anzahl fristgerecht bearbeiteter Aufträge.
- Der  $\gamma$ -Servicegrad berücksichtigt Anzahl und Dauer der bearbeiteten Rückstandsufträge.

Im Kontext der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung definieren wir den  $\alpha$ -Servicegrad als die Wahrscheinlichkeit, dass keiner der bearbeiteten Aufträge pro Planungsintervall eine Rückstandsdauer hat. Wir betrachten also die Wahrscheinlichkeit, dass die Summe der bearbeiteten Aufträge  $h_k$  mit einer negativen Fälligkeitsfrist  $k$  zum Zeitpunkt ihrer Bearbeitung für alle negativen Fälligkeitsfristen  $k \in \{-R, \dots, -1\}$  Null ist:

$$SL_{\alpha} = \sum_{\mathbf{h} \in \mathcal{I}_{\alpha}} P(\mathbf{H} = \mathbf{h}) \quad (51)$$

$$\mathcal{I}_{\alpha} = \left\{ \mathbf{h} \in \mathcal{H} \mid \sum_{k=-R}^{-1} h_k = 0 \right\}.$$

Der  $\beta$ -Servicegrad ist definiert als das Verhältnis aus fristgerecht bearbeiteten Aufträgen und Gesamtanzahl abgehender Aufträge. Die Anzahl fristgerecht bearbeiteter Aufträge pro Planungsintervall entspricht der Summe der bearbeiteten Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist  $k$  zum Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung für alle nicht-negativen Fälligkeitsfristen  $k \in \{0, \dots, e_{max}\}$ . Die Gesamtanzahl abgehender Aufträge pro Planungsintervall setzt sich zusammen aus der Summe der bearbeiteten Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen für alle Fälligkeitsfristen  $k \in \mathcal{K}$  und der Anzahl Lost Sales pro Planungsintervall. Der  $\beta$ -Servicegrad wie folgt berechnet

$$SL_{\beta} = \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \sum_{b \in B} \frac{\Phi(\mathbf{x}, b)}{\Psi(\mathbf{x}, b)} \cdot P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \cdot P(B = b) \quad (52)$$

$$\Phi(\mathbf{x}, b) = \sum_{k=0}^{e_{max}} \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} x_l \right\} \right\}$$

$$\Psi(\mathbf{x}, b) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} x_l \right\} \right\} + \max\{0; x_{-R} - b\}.$$

Der  $\gamma$ -Servicegrad ist definiert als das Komplement des Quotienten aus der Summe der Anzahl bearbeiteter Rückstandsufträge pro Planungsintervall und der Anzahl Lost Sales pro Planungsintervall und der Gesamtanzahl abgehender Aufträge pro Planungsintervall. Dabei sind die einzelnen Komponenten des Quotienten jeweils mit ihrer Rückstandsdauer gewichtet. Die Anzahl bearbeiteter Rückstandsufträge pro Planungsintervall entspricht der Summe der bearbeiteten Aufträge mit einer Fälligkeitsfrist von  $k$  Planungsintervallen zum Zeitpunkt der Auftragsbearbeitung für alle negativen Fälligkeitsfristen  $k \in \{-R, \dots, -1\}$  und wird gewichtet mit der entsprechenden Rückstandsdauer von  $|k|$  Planungsintervallen. Die Anzahl Lost Sales pro Planungsintervall wird gewichtet mit einer Rückstandsdauer von  $(R + 1)$  Planungsintervallen. Die Gesamtanzahl abgehender Aufträge pro Planungsintervall setzt sich zusammen aus der Summe der bearbeiteten Aufträge pro Planungsintervall, gewichtet mit einer Rückstandsdauer von  $R$  Planungsintervallen, und der Anzahl Lost Sales pro Planungsintervall, gewichtet mit einer Rückstandsdauer von  $(R + 1)$  Planungsintervallen. Der  $\gamma$ -Servicegrad wird also wie folgt berechnet

$$SL_\gamma = 1 - \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \frac{\Phi(\mathbf{x}, b)}{\Psi(\mathbf{x}, b)} \cdot P(\mathbf{X} = \mathbf{x}) \cdot P(B = b)$$

$$\Phi(\mathbf{x}, b) = \sum_{k=0}^{e_{max}} |k| \cdot \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} x_l \right\} \right\} + (R + 1) \cdot \max\{0; x_{-R} - b\} \quad (53)$$

$$\Psi(\mathbf{x}, b) = R \cdot \sum_{k \in \mathcal{K}} \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} x_l \right\} \right\} + (R + 1) \cdot \max\{0; x_{-R} - b\}.$$

## 5.5 Umsetzung im Software-Tool

Die Implementierung der Markov-Kette steht als Software-Tool zur Verfügung. Zur Durchführung der Leistungsanalyse der nivellierten Auftragseinlastung für ein beliebiges Kommissioniersystem anhand des Software-Tools müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

### 1. Spezifikation der Inputparameter

Die Inputparameter der Markov-Kette (vgl. Tabelle 4) können auf unterschiedliche Weise spezifiziert werden:

- Manuelle Eingabe der Werte in den entsprechenden Eingabemasken der jeweiligen Inputparameter,
- Import der jeweiligen Inputparameter als csv- oder xlsx-Datei.

Die stochastischen Parameter können sowohl durch ihre relative als auch durch ihre absolute Häufigkeitsverteilung beschrieben werden (vgl. Abbildung 13).

### 2. Berechnung der Markov-Kette

Sobald die Inputparameter vollständig und korrekt eingetragen sind, kann über den „Calculate“-Button die Berechnung der Markov-Kette gestartet werden (vgl. Abbildung 14).

### 3. Betrachtung der Outputparameter

Die Outputparameter der Markov-Kette, die die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung spezifizieren, können zum einen direkt im Software-Tool betrachtet werden. Hierzu wird für jede stochastische Leistungskenngröße die Dichtefunktion graphisch und tabellarisch dargestellt sowie Erwartungswert und Variabilität berechnet (vgl. Abbildung 15). Für die deterministischen Leistungskenngrößen wird jeweils deren Wert angezeigt (vgl. Abbildung 16). Zum anderen können alle oder ausgewählte Leistungskenngrößen als csv-Datei exportiert werden.

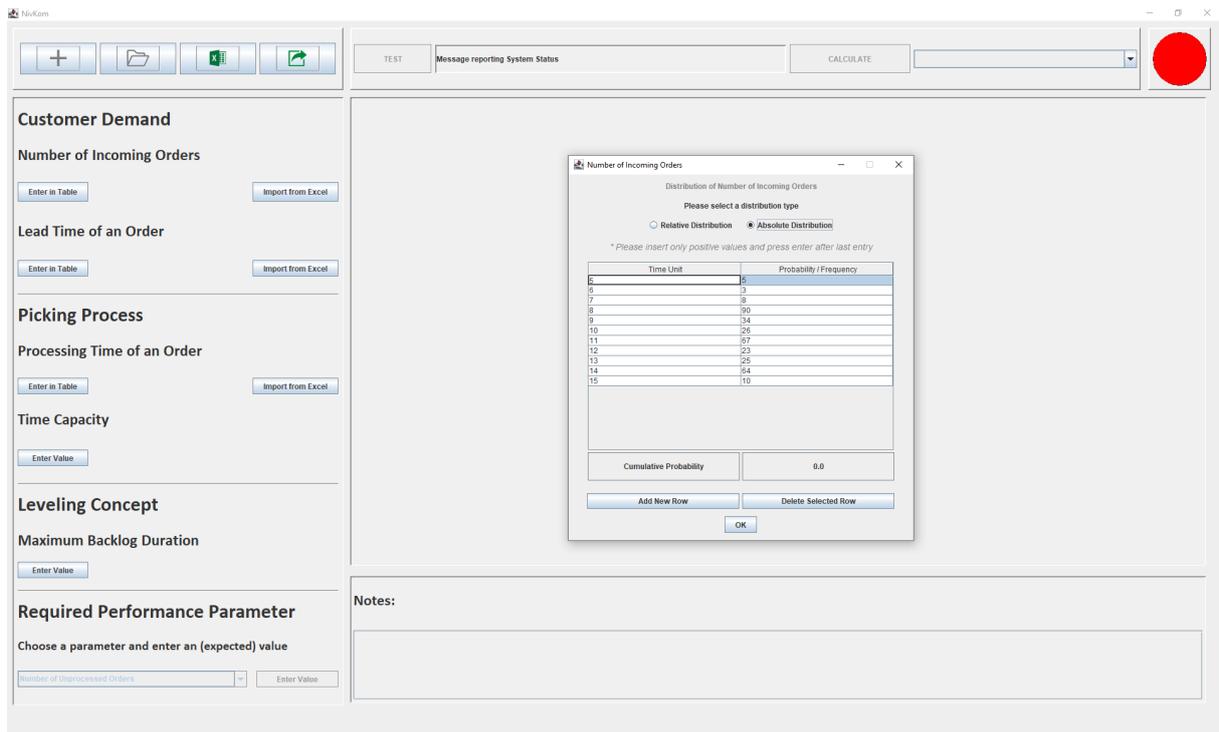


Abbildung 13: Software-Tool: Manuelle Eingabe der absoluten Häufigkeitsverteilung des Inputparameters „Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall“.

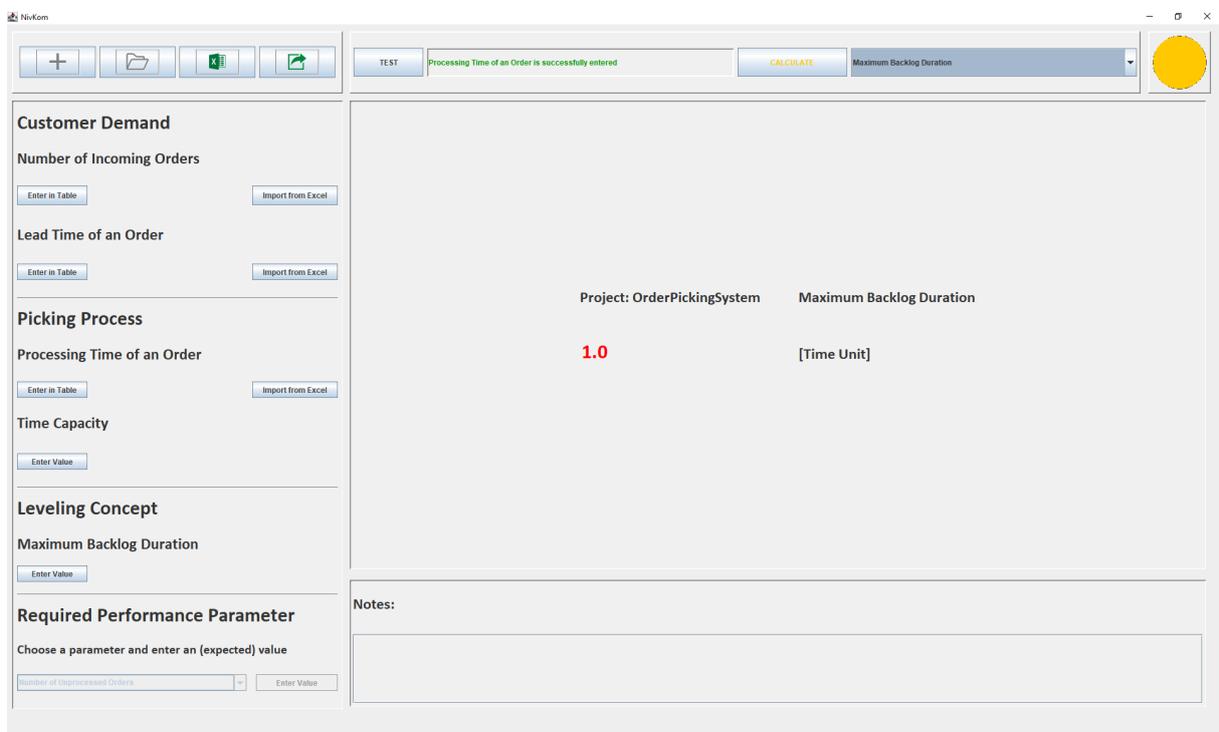


Abbildung 14: Software-Tool: Start der Berechnung der Markov-Kette nach vollständiger und korrekter Eingabe aller Inputparameter.

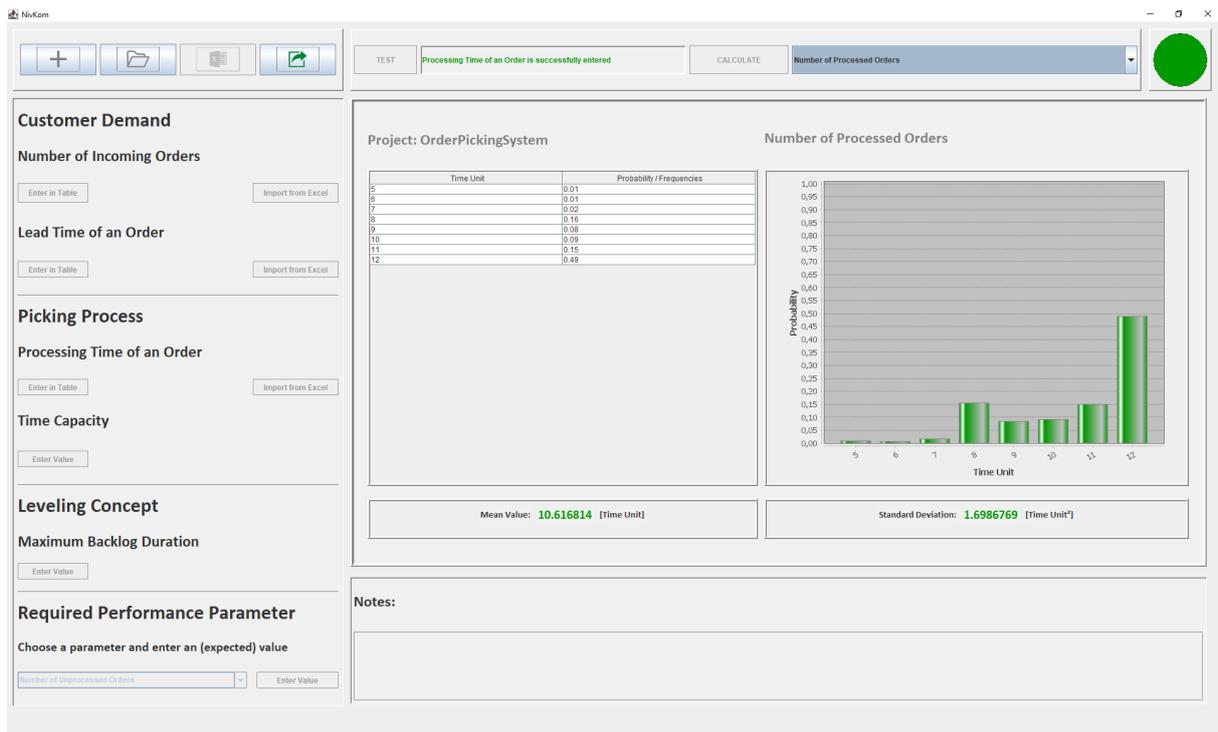


Abbildung 15: Software-Tool: Darstellung der stochastischen Leistungskenngröße „Durchsatz“.

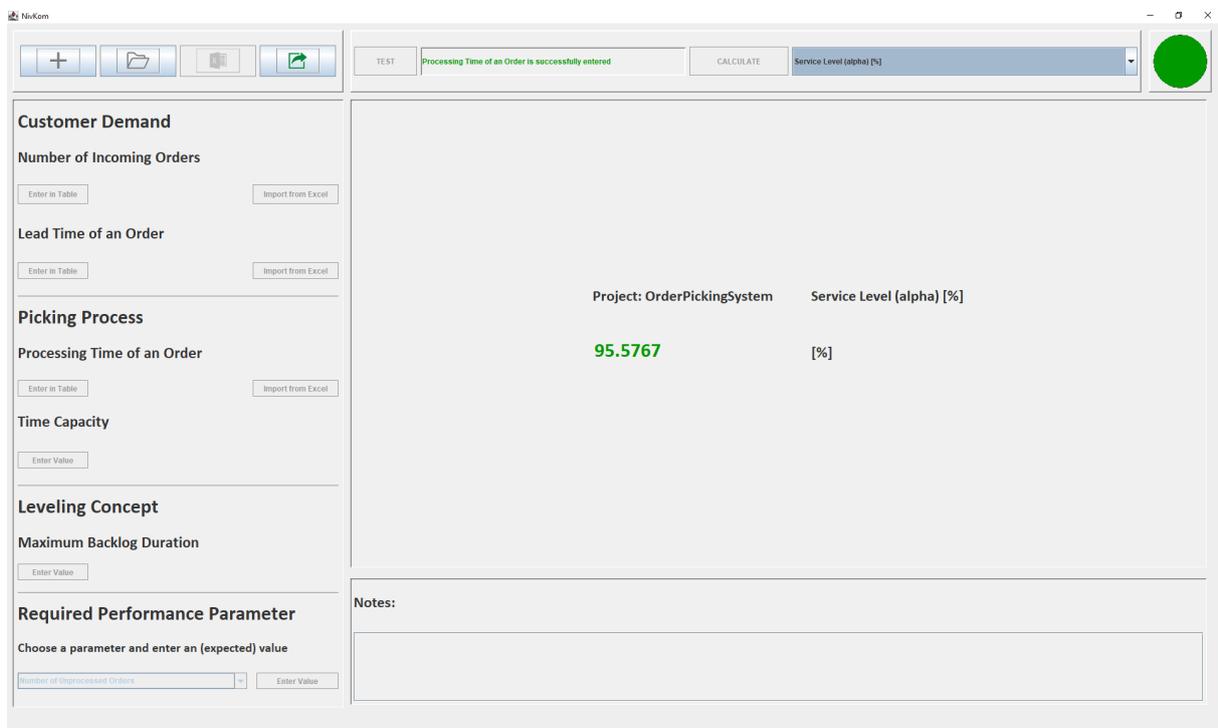


Abbildung 16: Software-Tool: Darstellung der deterministischen Leistungskenngröße „ $\alpha$ -Servicegrad“.

## 5.6 Fazit

Das in diesem Kapitel entwickelte analytische Modell bildet die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung ab und ermöglicht eine exakte Leistungsanalyse beliebiger Kommissioniersysteme anhand verschiedener systembezogener und kundenorientierter Leistungskenngrößen (vgl. Abbildung 17).

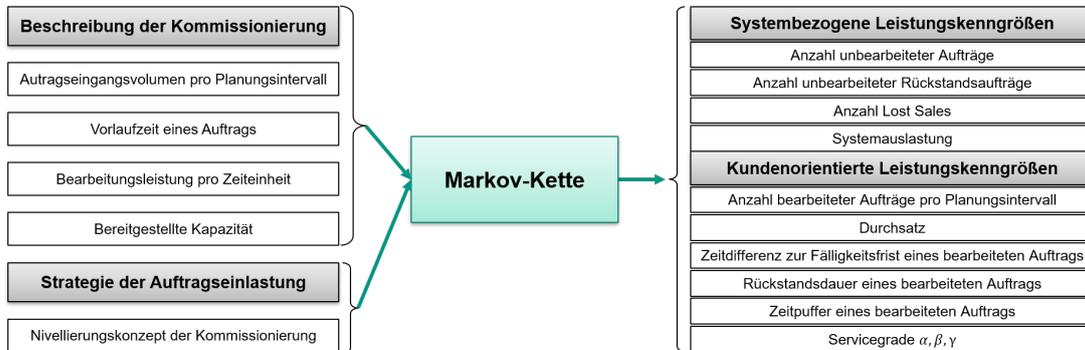


Abbildung 17: Übersicht über die Input- und Outputparameter des analytischen Modells zur Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung.

Für stochastische Leistungskenngrößen, wie beispielsweise die Anzahl unbearbeiteter Aufträge, den Durchsatz und die Zeitdifferenz zur Fälligkeitsfrist, kann hierbei jeweils deren vollständige Wahrscheinlichkeitsverteilung exakt bestimmt werden (vgl. Abbildung 18). Des Weiteren stellt das analytische Modell einen direkten Zusammenhang zwischen der in der Kommissionierung eingesetzten Kapazität und der damit erreichbaren Leistungsfähigkeit der Kommissionierung her.

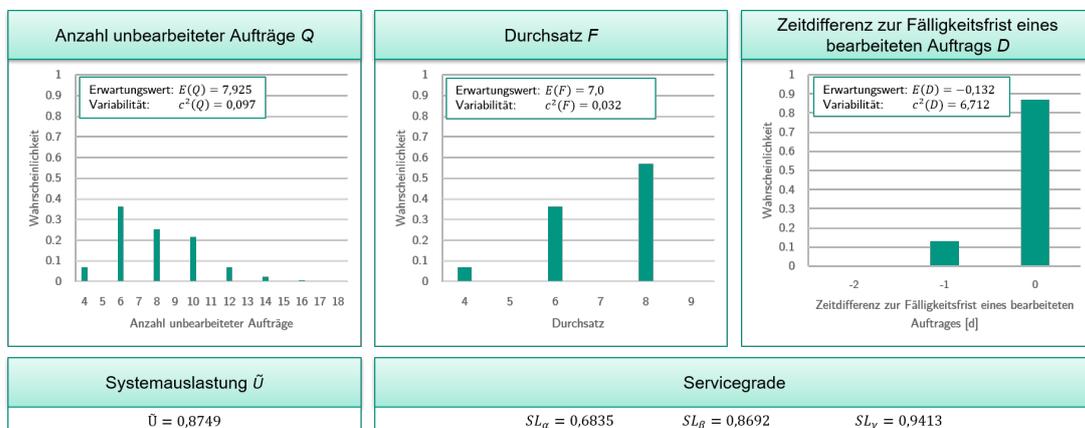


Abbildung 18: Darstellung ausgewählter Leistungskenngrößen der Expressaufträge des Beispielsystems aus Abbildung 4.

## 6 Simulationsmodell zur Abbildung und Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung

Das Simulationsmodell bildet analog zum analytischen Modell in Kapitel 5 die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung ab. Die Kommissionierung wird hierzu anhand derselben Parameter spezifiziert wie im analytischen Modell (vgl. Kapitel 3.1) und basierend auf den Simulationsergebnissen werden dieselben Leistungskenngrößen der Kommissionierung berechnet wie im analytischen Modell (vgl. Tabelle 5). Der Hauptzweck des entwickelten Simulationsmodells besteht daher in der Bereitstellung eines Modells, das zur Validierung des analytischen Modells anhand eines Modellvergleichs eingesetzt werden kann.

### 6.1 Aufbau des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell setzt sich aus  $n$  unabhängigen Wiederholungen zusammen, wobei in jeder Wiederholung  $m_n$  Simulationsiterationen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 19). Die konkrete Anzahl an Wiederholungen sowie die Anzahl durchgeführter Simulationsiterationen pro Wiederholung ist problemspezifisch und hängt sowohl vom betrachteten Kommissioniersystem als auch von der Wahl der Abbruchkriterien der Simulation ab.

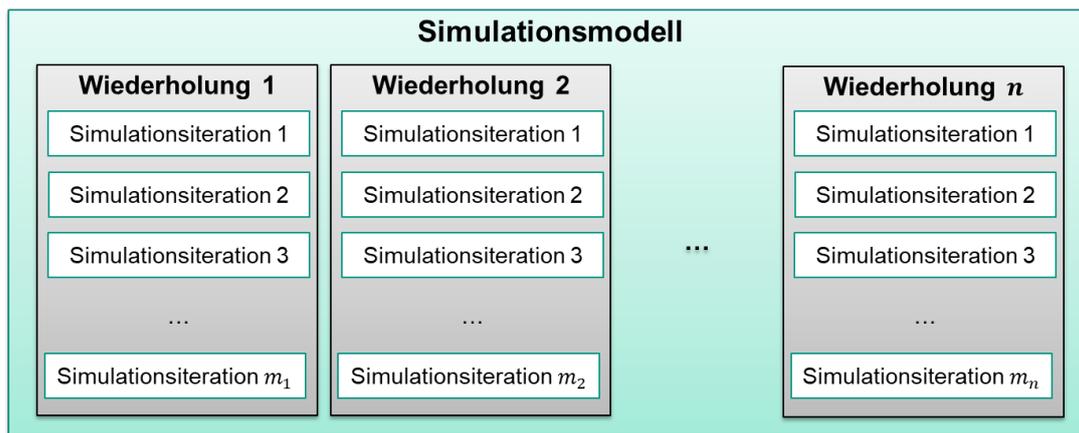


Abbildung 19: Aufbau des Simulationsmodells.

Als Abbruchkriterium einer Wiederholung wird die absolute Abweichung  $\Delta_{ij}$  des  $\beta$ -Servicegrads  $SL_{\beta}(i)$  nach der aktuell durchgeführten Simulationsiteration  $i$  vom  $\beta$ -Servicegrad  $SL_{\beta}(i-j)$  nach Simulationsiteration  $(i-j)$ ,  $j \in \mathbb{N}$ ,  $j < i$ , betrachtet:

$$\Delta_{ij} = |SL_{\beta}(i) - SL_{\beta}(i-j)|. \quad (54)$$

Sind die absoluten Abweichungen  $\Delta_{ij}$ ,  $j \in \{1, \dots, 10\}$ , kleiner als ein Schwellwert  $\epsilon$  von  $1.0E-05$ , dann wird die Wiederholung nach der aktuellen Simulationsiteration  $i$  abgebrochen.

Als Abbruchkriterium der Simulation wird das 95%-Konfidenzintervall des  $\beta$ -Servicegrads betrachtet. Auf Basis der bereits durchgeführten Wiederholungen und der zugehörigen Stichprobe der  $\beta$ -Servicegrade je Wiederholung werden Mittelwert  $\overline{SL}_{\beta}$  und korrigierte Varianz  $S^2(SL_{\beta})$  der Stichprobe berechnet. Das 95%-Konfidenzintervall des  $\beta$ -Servicegrads lautet

$$\left[ \overline{SL}_{\beta} - \sqrt{\frac{S^2(SL_{\beta})}{n}} \cdot t_{(n-1),0.975}; \overline{SL}_{\beta} + \sqrt{\frac{S^2(SL_{\beta})}{n}} \cdot t_{(n-1),0.975} \right], \quad (55)$$

wobei  $n$  die Stichprobengröße und  $t_{(n-1),0.975}$  das 97.5%-Quantil der  $t$ -Verteilung mit  $(n - 1)$  Freiheitsgraden ist. Die Simulation wird beendet, sobald die Breite des Konfidenzintervalls kleiner ist als der Schwellwert  $\epsilon$  von  $1.0E-04$ .

Darüber hinaus wird je Wiederholung eine bestimmte Anzahl an Simulationsiterationen, die so genannte Einschwingphase der Simulation, abgeschnitten. Die Länge der Einschwingphase ist abhängig vom betrachteten Kommissioniersystem und wird mittels des MSER-5-Verfahrens basierend auf 100 unabhängigen Wiederholungen mit je 5000 Simulationsiterationen ermittelt. Als relevante Kenngröße wird hierzu der  $\beta$ -Servicegrad herangezogen. Die Vorgehensweise von MSER-5 wird in Law (2015) [29, S.520-522] im Detail beschrieben.

## 6.2 Aufbau einer Simulationsiteration

Eine Simulationsiteration des Simulationsmodells bildet die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung in einem beliebigen Planungsintervall  $t$  ab.

In Anlehnung an die Notation der Markov-Kette bezeichnen wir den Auftragsbestand zu Beginn des Planungsintervalls  $t$  mit  $\mathbf{X}^t = \mathbf{x}$  und den Auftragsbestand zu Beginn des Planungsintervalls  $(t+1)$  mit  $\mathbf{X}^{t+1} = \mathbf{z}$ . Die „Zwischenzustände“ werden anhand der Variablen  $\mathbf{y}^{(m)}$ ,  $m \in \{0, 1, 2, 3\}$ , spezifiziert, wobei  $\mathbf{y}^{(0)} = \mathbf{x}$  und  $\mathbf{z} = \mathbf{y}^{(3)}$  gilt. Die Kommissionierleistung  $b$ , die in Planungsintervall  $t$  zur Verfügung steht, und der Auftragseingang  $g$  zu Beginn von Planungsintervall  $(t + 1)$  ergeben sich jeweils durch Ziehung einer Zufallszahl aus den zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Analog zu den Teilschritten des Zustandsübergangs der Markov-Kette (vgl. Kapitel 5.3.2) untergliedert sich die Simulationsiteration in die Teilschritte:

1. Auftragsbearbeitung in Planungsintervall  $t$ ,
2. Aktualisierung der Fälligkeitsfristen am Ende von Planungsintervall  $t$  und
3. Auftragseingang zu Beginn von Planungsintervall  $(t + 1)$ .

Jeder Teilschritt wird dabei anhand derselben Gleichungen spezifiziert wie beim Zustandsübergang der Markov-Kette (vgl. Gleichungen (28)-(30)).

## 6.3 Berechnung der Leistungskenngrößen der Kommissionierung

Die aktuellen Werte der Leistungskenngrößen der Kommissionierung werden in jeder Simulationsiteration wie folgt berechnet:

- Anzahl unbearbeiteter Aufträge

$$q = \sum_{k \in \mathcal{K}} x_k \quad (56)$$

- Anzahl unbearbeiteter Rückstandsufträge

$$m = \sum_{k=-R}^{-1} x_k \quad (57)$$

- Anzahl Lost Sales

$$s = \max \{0; x_{-R} - b\} \quad (58)$$

- Systemauslastung

$$\tilde{u} = \max \left\{ 1; \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k}{b} \right\} \quad (59)$$

- Anzahl bearbeiteter Aufträge

$$\mathbf{h} = (h_{-R} \quad \dots \quad h_{e_{max}})$$

$$h_k = \min \left\{ x_k; \max \left\{ 0; b - \sum_{l=-R}^{k-1} x_l \right\} \right\} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (60)$$

- Durchsatz

$$f = \sum_{k \in \mathcal{K}} h_k \quad (61)$$

- $\alpha$ -Servicegrad

$$SL_\alpha = \begin{cases} 1 & \sum_{k=-R}^{-1} h_k = 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (62)$$

- $\beta$ -Servicegrad

$$SL_\beta = \frac{\sum_{k=0}^{e_{max}} h_k}{f + s} \quad (63)$$

- $\gamma$ -Servicegrad

$$SL_\gamma = 1 - \left( \frac{\sum_{k=-R}^{-1} |k| \cdot h_k + (R+1) \cdot s}{R \cdot f + (R+1) \cdot s} \right) \quad (64)$$

Auf diese Weise ergibt sich nach vollständiger Durchführung der Simulation für jede Leistungskenngröße eine absolute Häufigkeitsverteilung. Darauf basierend wird für alle stochastischen Leistungskenngrößen deren Wahrscheinlichkeitsverteilung geschätzt. Der Wert der deterministischen Leistungskenngrößen wird jeweils durch den Mittelwert der zugehörigen absoluten Häufigkeitsverteilung approximiert.

## 7 Validierung des analytischen Modells

Modellvalidierung beschreibt die Überprüfung, ob ein Modell die Realität in hinreichender Genauigkeit abbildet. Die Fehlerfreiheit eines Modells kann nicht formal bewiesen werden. Es kann lediglich die Glaubwürdigkeit des Modells durch verschiedene Techniken der Validierung bestätigt werden [48, S.2, 14].

Im Folgenden wird das analytische Modell zunächst anhand eines Modellvergleichs mit dem Simulationsmodell (vgl. Kapitel 7.1) und anschließend durch eine Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 7.2) validiert.

### 7.1 Modellvergleich mit Simulationsmodell

Bei einem Modellvergleich werden die Ergebnisse des entwickelten Modells (hier: analytisches Modell) unter Voraussetzung gleicher Inputparameter mit den Ergebnissen eines anderen Modells (hier: Simulationsmodell) verglichen [48, S.110].

#### 7.1.1 Design of Experiments

Zur Erzeugung eines Datensatzes für den Modellvergleich von analytischem Modell und Simulationsmodell wird ein Latin-Hypercube-Design mit vier unabhängigen Variablen und einer Stichprobengröße von 200 Datenpunkten erzeugt. Das Latin-Hypercube-Design ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Erzeugung eines so genannten space-filling Designs, dessen Datenpunkte im Wertebereich der einzelnen unabhängigen Variablen jeweils gleichverteilt sind. Die Vorgehensweise zur Erzeugung eines Latin-Hypercube-Designs ist in Santner et al. (2018) [49, S.152f.] im Detail beschrieben. Im Kontext des Projekts ist jedem Parameter zur formalen Beschreibung der Kommissionierung eine unabhängige Variable zugeordnet:

- Das Auftragseingangsvolumen  $A$  pro Planungsintervall wird als Poisson-Verteilung  $Poi(\lambda)$  mit endlichem Wertebereich  $\mathcal{A} = \{5, 6, \dots, 40\}$  modelliert, wobei die erste Variable des Latin-Hypercube-Designs den Verteilungsparameter  $\lambda \in \{6, 7, \dots, 39\}$  der Poisson-Verteilung spezifiziert.
- Die Vorlaufzeit  $E$  eines Auftrags wird als Bernoulli-Verteilung  $B(\theta)$  mit dem Wertebereich  $\mathcal{E} = \{0, 1\}$  modelliert. Daher spezifiziert die zweite Variable des Latin-Hypercube-Designs den Verteilungsparameter  $\theta \in [0, 1]$ .
- Die Bearbeitungsleistung  $L$  pro Zeiteinheit wird als Bernoulli-Verteilung  $B(\eta)$  mit dem Wertebereich  $\mathcal{L} = \{4, 5\}$  modelliert, wobei die dritte Variable des Latin-Hypercube-Designs den Verteilungsparameter  $\eta \in [0, 1]$  spezifiziert.
- Die bereitgestellte Kapazität  $c$  wird durch die vierte Variable des Latin-Hypercube-Designs spezifiziert. Hierbei wird der Wertebereich  $\mathcal{C} = \{2, 3, \dots, 10\}$  betrachtet, um Kommissioniersysteme mit unterschiedlichen Auslastungen abbilden zu können.

Die maximal akzeptable Rückstandsdauer eines Auftrags ist konstant:  $R = 1$ . Bei 80 Datenpunkten handelt es sich um instabile Kommissioniersysteme. Daher werden diese Datenpunkte aus der Stichprobe entfernt.

## 7.1.2 Ergebnisse

Das analytische Modell und das Simulationsmodell werden anhand folgender Leistungskenngrößen miteinander verglichen:

- Erwartungswert der Anzahl unbearbeiteter Aufträge  $E(Q)$ ,
- Erwartungswert des Durchsatzes  $E(F)$ ,
- Systemauslastung  $\tilde{U}$ ,
- $\alpha$ -Servicegrad  $SL_\alpha$  und
- $\beta$ -Servicegrad  $SL_\beta$ .

Es wird hierzu jeweils die absolute und die relative Abweichung des Werts der Leistungskenngröße im analytischen Modell vom entsprechenden Wert im Simulationsmodell je Datenpunkt berechnet.

Charakteristische Werte – Minimum, Maximum, Mittelwert, 2.5%- und 97.5%-Quantil – der absoluten und der relativen Abweichung je Leistungskenngröße sind in Tabelle 6 dargestellt. Die mittlere absolute Abweichung des  $\alpha$ -Servicegrads beträgt  $1.74\text{E-}05$  und die mittlere relative Abweichung  $0.003\%$ . Für 95% der Datenpunkte liegt die relative Abweichung des  $\alpha$ -Servicegrads zwischen  $-0.02\%$  und  $0.07\%$ . Die mittlere absolute Abweichung des  $\beta$ -Servicegrads beträgt  $7.91\text{E-}06$  und die mittlere relative Abweichung  $0.001\%$ . Das 95%-Konfidenzintervall ist gegeben durch  $[-0.01\%,0.04\%]$ . Die mittlere absolute Abweichung des erwarteten Durchsatzes beträgt  $4.48\text{E-}03$  und die mittlere relative Abweichung  $0.04\%$ . Für 95% der Datenpunkte liegt die relative Abweichung des erwarteten Durchsatzes zwischen  $-0.44\%$  und  $0.48\%$ . Die mittlere absolute Abweichung der erwarteten Anzahl unbearbeiteter Aufträge beträgt  $4.05\text{E-}03$  und die mittlere relative Abweichung  $0.04\%$ . Das 95%-Konfidenzintervall beträgt  $[-0.45\%,0.48\%]$ . Hinsichtlich der Systemauslastung beträgt die mittlere absolute Abweichung  $1.98\text{E-}03$ , die mittlere relative Abweichung  $0.03\%$  und das 95%-Konfidenzintervall  $[-0.45\%,0.47\%]$ .

Tabelle 6: Absolute und relative Abweichung ausgewählter Leistungskenngrößen zwischen analytischem Modell und Simulationsmodell.

Leistungs- kenngröße	Kriterium	Minimum	Maximum	Mittelwert	2.5%- Quantil	97.5%- Quantil
$SL_\alpha$	absolute Abweichung	-2.19E-04	1.61E-03	1.74E-05	-1.55E-04	6.46E-04
	relative Abweichung	-0.025%	0.228%	0.003%	-0.015%	0.071%
$SL_\beta$	absolute Abweichung	-2.35E-04	1.24E-03	7.91E-06	-1.03E-04	3.52E-04
	relative Abweichung	-0.024%	0.142%	0.001%	-0.010%	0.036%
$E(F)$	absolute Abweichung	-7.75E-02	6.25E-02	4.48E-03	-4.79E-02	5.09E-02
	relative Abweichung	-0.497%	0.590%	0.044%	-0.444%	0.479%
$E(Q)$	absolute Abweichung	-7.75E-02	6.01E-02	4.05E-03	-5.09E-02	5.09E-02
	relative Abweichung	-0.496%	0.591%	0.043%	-0.449%	0.480%
$\tilde{U}$	absolute Abweichung	-2.45E-03	1.98E-03	5.47E-05	-1.89E-03	1.60E-03
	relative Abweichung	-0.539%	0.589%	0.027%	-0.445%	0.461%

### 7.1.3 Fazit

Die beobachteten absoluten und relativen Abweichungen der Leistungskenngrößen zwischen dem analytischen Modell und dem Simulationsmodell sind vernachlässigbar gering. Damit bestätigt der Modellvergleich die Validität des analytischen Modells.

## 7.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist eine Methode zur Untersuchung des Einflusses einzelner Inputparameter auf das Modellverhalten und dessen Outputparameter. Dabei werden die Auswirkungen, die Veränderungen einzelner Inputparameter auf das Modellverhalten haben, hinsichtlich Richtung und Stärke untersucht und mit den Beobachtungen in der Realität verglichen. Die Inputparameter werden hierbei *certeris paribus* variiert, um mögliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Inputparametern auszuschließen [48, S.102].

Im Folgenden wird nicht der Einfluss sämtlicher Inputparameter der Kommissionierung auf sämtliche Leistungskenngrößen der Kommissionierung untersucht. Stattdessen beschränkt sich die Sensitivitätsanalyse auf die Untersuchung ausgewählter Zusammenhänge mit praktischer Relevanz:

- Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage,
- Einfluss der Prozessstabilität,
- Einfluss von Prozessverbesserungen und
- Einfluss der Kapazitätsplanung.

### 7.2.1 Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage

Zur Untersuchung des Einflusses der Schwankungen der Kundennachfrage auf verschiedene Leistungskenngrößen der Kommissionierung wird die Variabilität des Auftragseingangsvolumens  $c^2(A)$  pro Planungsintervall im Intervall  $[0; 0.61]$  variiert. Außerdem werden vier verschiedene Werte der bereitgestellten Kapazität betrachtet, um Kommissioniersysteme mit vier unterschiedlichen Auslastungen - 0.60, 0.69, 0.80 und 0.96 - untersuchen zu können. Die Werte aller anderen Inputparameter sind konstant (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Schwankungen der Kundennachfrage.

Inputparameter	Erwartungswert	Variabilität
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$E(A) = 12$	$c^2(A) \in [0; 0.61]$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E(E) = 0.5$	$c^2(E) = 1$
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$E(L) = 2.5$	$c^2(L) = 0.04$
Bereitgestellte Kapazität pro Planungsintervall	$c \in \{5, 6, 7, 8\}$	
Maximal akzeptable Rückstandsdauer	$R = 1$	

Zunächst wird der Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf den  $\beta$ -Servicegrad untersucht (vgl. Abbildung 20): Für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung von 0.60 hat die Variabilität des Auftragseingangsvolumens keinen Einfluss auf den  $\beta$ -Servicegrad. In Systemen mit einer geringen Auslastung ist ein gewisser Anteil der bereitgestellten Kapazität ungenutzt, so dass mit dieser Kapazität die Schwankungen des Auftragseingangsvolumens ausgeglichen werden können und dadurch selbst bei hoher Variabilität des Auftragseingangsvolumens eine fristgerechte Bearbeitung aller Aufträge,

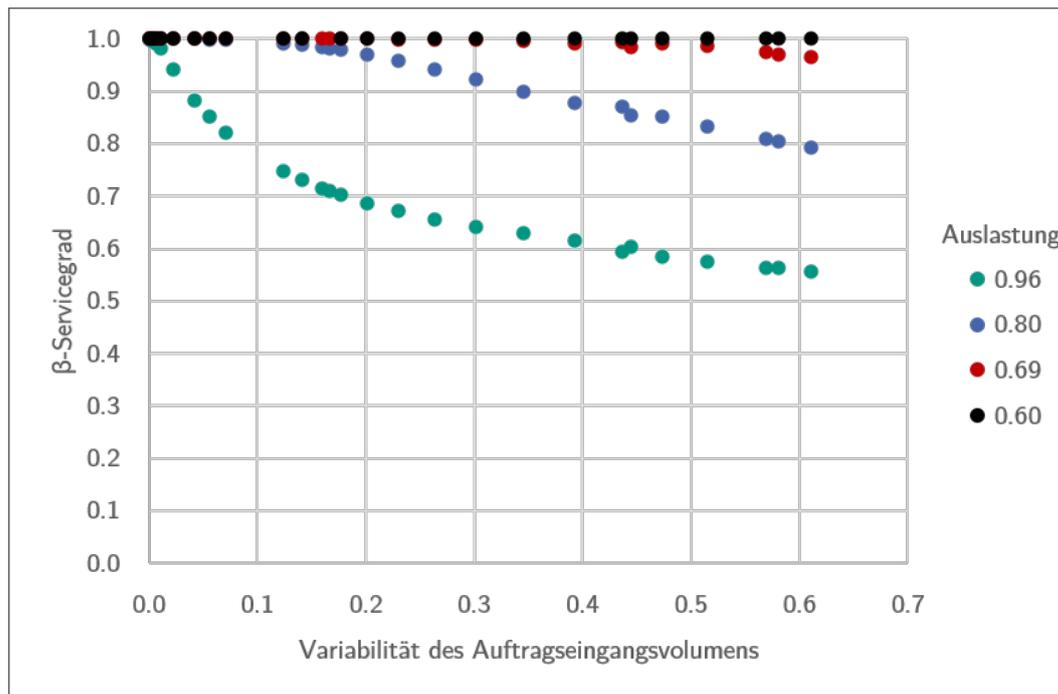


Abbildung 20: Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf den  $\beta$ -Servicegrad.

also ein  $\beta$ -Servicegrad von 100%, gewährleistet werden kann. Mit zunehmender Auslastung können die Schwankungen des Auftragseingangsvolumens jedoch nicht mehr vollständig durch die verfügbare Kommissionierleistung ausgeglichen werden, da mit steigender Auslastung der Anteil der zur Verfügung stehenden ungenutzten Kapazität sinkt. Folglich wirkt sich eine zunehmende Variabilität des Auftragseingangsvolumens negativ auf den  $\beta$ -Servicegrad aus. Insbesondere in stark ausgelasteten Systemen, z.B. Systemen mit einer Auslastung von 0.96, können zunehmende Schwankungen der Kundennachfrage nicht mehr kompensiert werden und führen daher zu einem deutlichen Rückgang des  $\beta$ -Servicegrads.

Bezugnehmend auf die Arbeitshypothese des Forschungsprojekts, dass durch eine nivellierte Auftragseinlastung die Schwankungen der Arbeitslast in der Kommissionierung geglättet werden können, wird im Folgenden der Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf die Schwankungen des Auftragsabgangs untersucht. Wenn die Schwankungen der Kundennachfrage durch die nivellierte Auftragseinlastung geglättet werden, dann muss die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge kleiner sein als die des Auftragseingangsvolumens. In Abbildung 21 ist die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge in Abhängigkeit der Variabilität des Auftragseingangsvolumens für Systemauslastungen von 0.60, 0.69, 0.80 und 0.96 dargestellt. Alle Datenpunkte liegen auf oder unterhalb der Winkelhalbierenden, das heißt die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge ist höchstens so groß wie die Variabilität des Auftragseingangsvolumens. Außerdem hat die Auslastung des Systems einen wesentlichen Einfluss auf den Glättungseffekt der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung: Je höher die Auslastung des Systems, desto deutlicher liegt die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge unter der des Auftragseingangsvolumens, desto größer ist also der Glättungseffekt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung in Systemen mit geringer Auslastung keinen Mehrwert bietet, da ausreichend Kommissionierleistung zur Verfügung steht, um alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang zu bearbeiten. Erst in stark ausgelasteten Systemen ist das Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall so groß, dass nicht alle Aufträge immer unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet werden können und daher festgelegt werden muss, in welcher Reihenfolge die Aufträge bearbeitet werden. Folglich lässt sich erst bei diesen Auslastungen der Mehrwert der nivellierten Auftragseinlastung erkennen. Für Systeme mit Auslastungen von

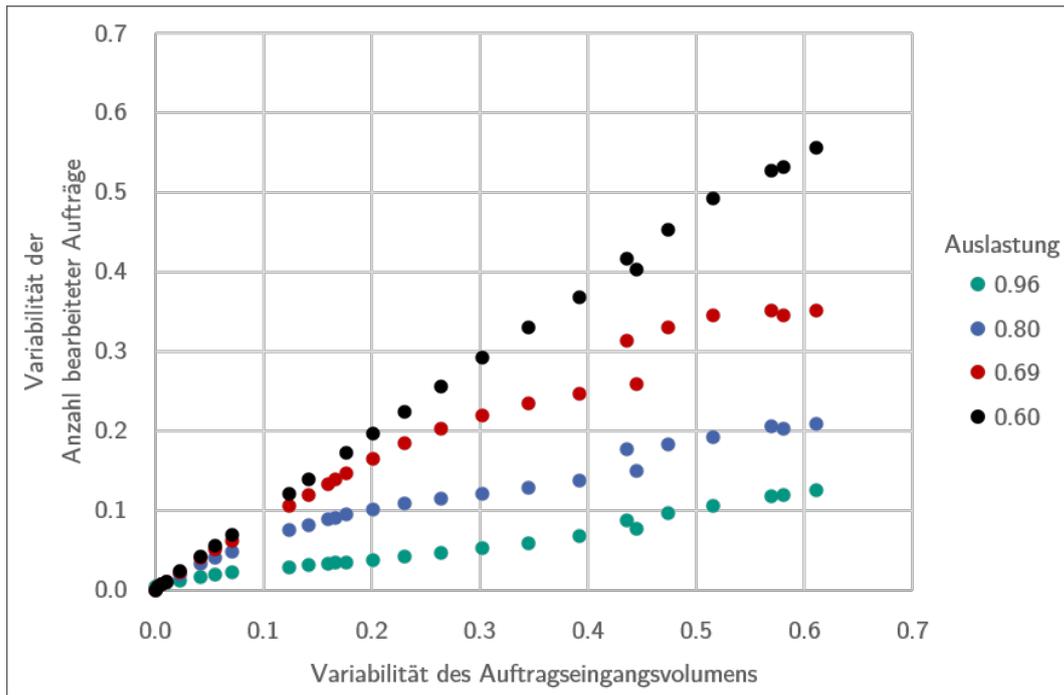


Abbildung 21: Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage auf die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge.

0.80 und 0.96 ist der Glättungseffekt der nivellierten Auftragseinlastung deutlich zu erkennen: Die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge nimmt mit steigender Variabilität des Auftragseingangsvolumens zu, jedoch ist die Variabilität der Anzahl bearbeiteter Aufträge jeweils deutlich kleiner als die Variabilität des Auftragseingangsvolumens.

### 7.2.2 Einfluss der Prozessstabilität

Zur Untersuchung des Einflusses der Prozessstabilität auf die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung wird die Variabilität der Bearbeitungsleistung  $c^2(L)$  pro Zeiteinheit im Intervall  $[0; 0.61]$  systematisch variiert. Außerdem werden zwei verschiedene Werte der bereitgestellten Kapazität betrachtet, um Kommissioniersysteme mit zwei unterschiedlichen Auslastungen - 0.64 und 0.96 - untersuchen zu können. Die Werte aller anderen Inputparameter sind konstant (vgl. Tabelle 8). Im Gegensatz zu den Schwankungen der Kundennachfrage, die für Lagerbetreiber exogen gegeben sind, ist die Prozessstabilität ein endogener Einflussfaktor. Die Prozessstabilität kann von Lagerbetreibern selbst beeinflusst werden, z.B. durch Methoden des Lean Managements wie Standardisierung und Arbeitsplatzgestaltung.

Tabelle 8: Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Prozessstabilität.

Inputparameter	Erwartungswert	Variabilität
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$E(A) = 23$	$c^2(A) = 0.01$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E(E) = 0.5$	$c^2(E) = 1$
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$E(L) = 12$	$c^2(L) \in [0; 0.61]$
Bereitgestellte Kapazität pro Planungsintervall	$c \in \{2, 3\}$	
Maximal akzeptable Rückstandsdauer	$R = 1$	

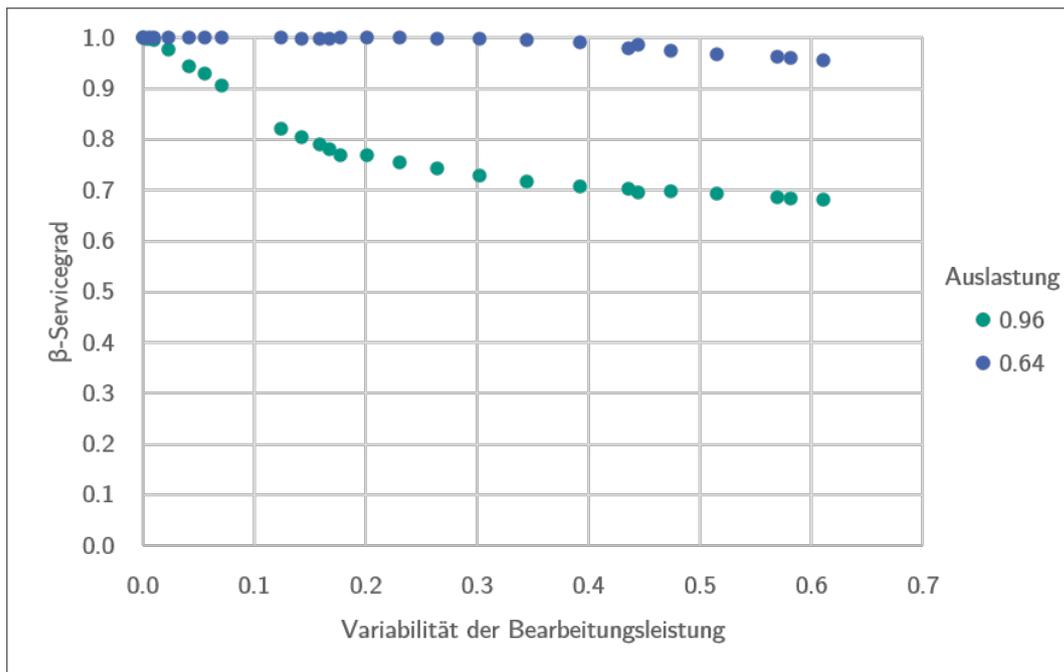


Abbildung 22: Einfluss der Prozessstabilität auf den  $\beta$ -Servicegrad.

In Abbildung 22 ist der Einfluss der Variabilität der Bearbeitungsleistung auf den  $\beta$ -Servicegrad für Systemauslastungen von 0.64 und 0.96 dargestellt. Mit steigender Variabilität der Bearbeitungsleistung nimmt der  $\beta$ -Servicegrad ab. Außerdem ist die Stärke dieses negativen Zusammenhangs von der Auslastung des Systems abhängig: In stark ausgelasteten Systemen wirkt sich eine Erhöhung der Variabilität der Bearbeitungsleistung stark negativ auf den  $\beta$ -Servicegrad aus, wohingegen der negative Einfluss der Variabilität der Bearbeitungsleistung in gering ausgelasteten Systemen lediglich schwach ausgeprägt ist.

### 7.2.3 Einfluss von Prozessverbesserungen

Prozessverbesserungen können durch eine Variation des Erwartungswerts der Bearbeitungsleistung  $E(L)$  pro Zeiteinheit untersucht werden. Die Werte der Inputparameter sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses von Prozessverbesserungen.

Inputparameter	Erwartungswert	Variabilität
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$E(A) = 12$	$c^2(A) = 0.302$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E(E) = 0.5$	$c^2(E) = 1$
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$E(L) \in [4; 6.25]$	$c^2(L) = 0.04$
Bereitgestellte Kapazität pro Planungsintervall		$c = 3$
Maximal akzeptable Rückstandsdauer		$R = 1$

In Abbildung 23 ist der Einfluss des Erwartungswerts der Bearbeitungsleistung auf den  $\beta$ -Servicegrad und die Auslastung des Systems dargestellt. Mit zunehmender mittlerer Bearbeitungsleistung steigt der  $\beta$ -Servicegrad, wohingegen die Auslastung des Systems mit zunehmender mittlerer Bearbeitungsleistung abnimmt.

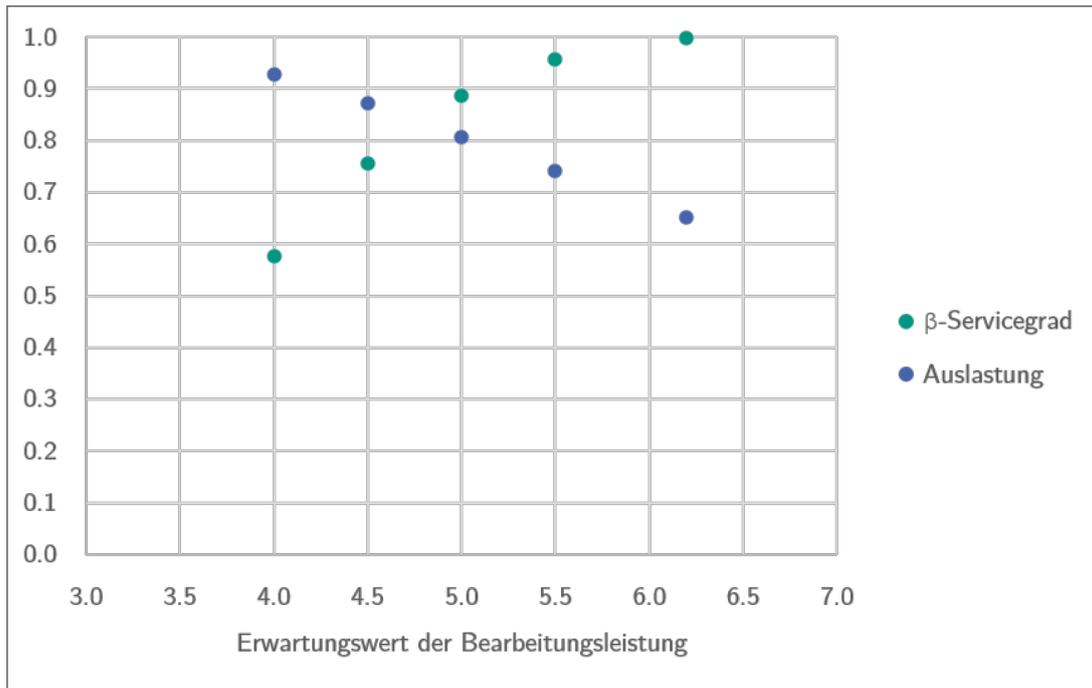


Abbildung 23: Einfluss von Prozessverbesserungen auf den  $\beta$ -Servicegrad und die Systemauslastung.

#### 7.2.4 Einfluss der Kapazitätsplanung

Zur Untersuchung des Einflusses der bereitgestellten Kapazität auf die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung wird die bereitgestellte Kapazität  $c$  im Wertebereich  $\{8, 9, \dots, 20\}$  systematisch variiert. Die Werte aller anderen Inputparameter sind konstant (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Design of Experiments der Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Kapazitätsplanung.

Inputparameter	Erwartungswert	Variabilität
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$E(A) = 12$	$c^2(A) = 0.302$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E(E) = 0.5$	$c^2(E) = 1$
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$E(L) = 1.5$	$c^2(L) = 0.111$
Bereitgestellte Kapazität pro Planungsintervall	$c \in \{8, 9, \dots, 20\}$	
Maximal akzeptable Rückstandsdauer	$R = 1$	

In Abbildung 24 sind der Einfluss der bereitgestellten Kapazität auf den  $\beta$ -Servicegrad und die Auslastung des Systems dargestellt. Mit zunehmender bereitgestellter Kapazität steigt der  $\beta$ -Servicegrad, wohingegen die Auslastung des Systems mit zunehmender bereitgestellter Kapazität sinkt.

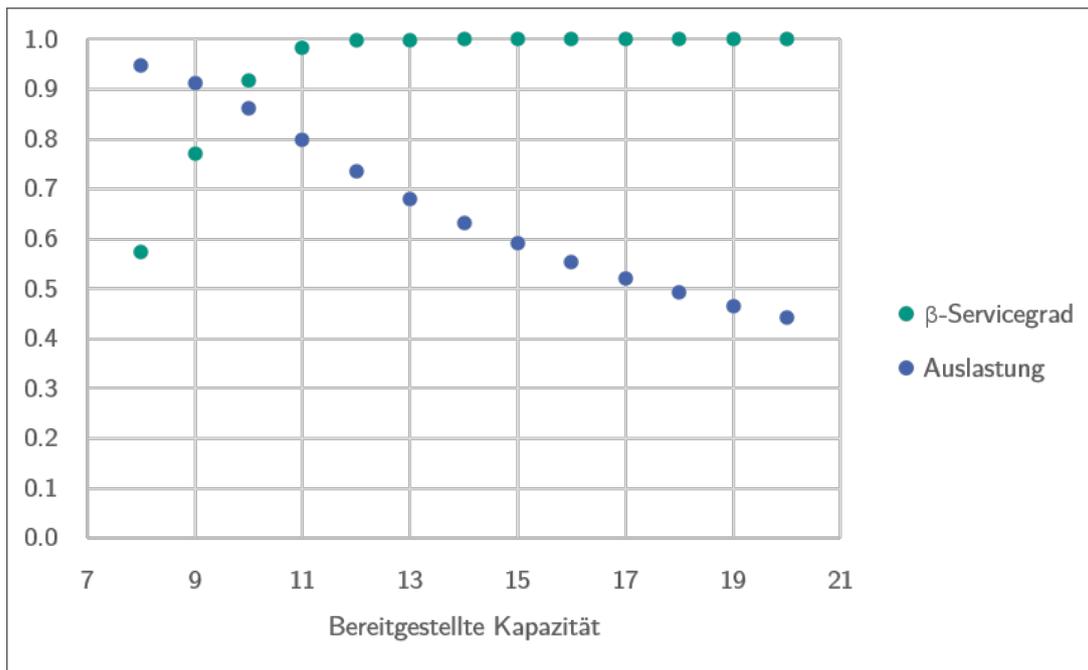


Abbildung 24: Einfluss der Kapazitätsplanung auf den  $\beta$ -Servicegrad und die Systemauslastung.

### 7.2.5 Fazit

In den durchgeführten Sensitivitätsanalysen konnten folgende Zusammenhänge beobachtet werden:

- Einfluss der Schwankungen der Kundennachfrage**  
 In gering ausgelasteten Systemen können die Schwankungen der Kundennachfrage durch die bereitgestellte Kapazität kompensiert werden, so dass sich zunehmende Schwankungen der Kundennachfrage nicht negativ auf den erreichbaren Servicegrad auswirken. In stark ausgelasteten Systemen ist dies hingegen nicht mehr möglich, so dass der erreichbare Servicegrad mit zunehmenden Schwankungen der Kundennachfrage deutlich sinkt. In stark ausgelasteten Systemen wird ein Glättungseffekt der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung auf die Schwankungen der Kundennachfrage beobachtet.
- Einfluss der Prozessstabilität**  
 Insbesondere in stark ausgelasteten Systemen stellt die Verbesserung der Prozessstabilität einen wesentlichen Stellhebel zur Steigerung des erreichbaren Servicegrads dar.
- Einfluss von Prozessverbesserungen**  
 Durch Prozessverbesserungen kann der erreichbare Servicegrad erhöht und gleichzeitig die Auslastung des Systems reduziert werden.
- Einfluss der Kapazitätsplanung**  
 Durch eine Erhöhung der bereitgestellten Kapazität kann der erreichbare Servicegrad erhöht und gleichzeitig die Auslastung des Systems reduziert werden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse spiegeln die in der Realität beobachteten Zusammenhänge wieder. Damit bestätigen sie die Validität des analytischen Modells.

## 8 Kapazitätsplanung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung

In diesem Kapitel wird zunächst das Planungsproblem der Kapazitätsplanung in der Kommissionierung formal beschrieben (vgl. Kapitel 8.1). Anschließend werden verschiedene Lösungsverfahren für das Kapazitätsplanungsproblem vorgestellt (vgl. Kapitel 8.2) und im Rahmen einer numerischen Studie hinsichtlich ihrer Laufzeiteffizienz verglichen (vgl. Kapitel 8.3). Abschließend wird die Umsetzung der Kapazitätsplanung im Software-Tool beschrieben (vgl. Kapitel 8.4).

### 8.1 Formalisierung des Planungsproblems der Kapazitätsplanung

Die Kapazitätsplanung im Kontext der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung bestimmt diejenige Kapazität, die in der Kommissionierung mindestens bereitgestellt werden muss, um bei nivellierter Auftragseinlastung eine bestimmte, geforderte Leistungsfähigkeit, z.B. einen Servicegrad von 99%, gewährleisten zu können.

#### 8.1.1 Formulierung als mathematisches Optimierungsproblem

Die Problemstellung der Kapazitätsplanung kann auf folgende Weise als mathematisches Optimierungsproblem formuliert werden:

$$\min c \tag{65}$$

$$\text{s.t. } SL(c) \geq SL^* \tag{66}$$

$$c \in \mathbb{N} \tag{67}$$

Die Entscheidungsvariable  $c \in \mathbb{N}$  spezifiziert die in der Kommissionierung bereitgestellte Kapazität. Die Zielfunktion (65) minimiert die bereitgestellte Kapazität und die Restriktion (66) stellt sicher, dass der Servicegrad  $SL(c)$ , der mit der bereitgestellten Kapazität  $c$  bei nivellierter Auftragseinlastung in der Kommissionierung erreicht wird, mindestens dem geforderten Servicegrad  $SL^*$  entspricht.

#### 8.1.2 Eigenschaften des Planungsproblems der Kapazitätsplanung

Im Gegensatz zum analytischen Modell, das für eine gegebene Kapazität  $c$  den damit erreichbaren Servicegrad  $SL(c)$  ermittelt, soll in der Kapazitätsplanung die Kapazität  $c$  bestimmt werden, die zur Gewährleistung eines bestimmten Servicegrads  $SL^*$  benötigt wird. Bei der Kapazitätsplanung handelt es sich damit um eine Art „Umkehrfunktion“ des analytischen Modells (vgl. Abbildung 25).

Das in Kapitel 8.1.1 formulierte mathematische Optimierungsproblem der Kapazitätsplanung ist ein restringiertes, ganzzahliges Optimierungsproblem. Allerdings handelt es sich nicht ein klassisches mathematisches Optimierungsproblem, sondern um ein Blackbox Optimierungsproblem. Blackbox Optimierungsprobleme zeichnen sich dadurch aus, dass deren Zielfunktionen und/oder Restriktionen nicht explizit in Form mathematischer Gleichungen gegeben sind, sondern stattdessen als Blackbox vorliegen [50, S.5]. Im Fall der Kapazitätsplanung ist der Zusammenhang zwischen der bereitgestellten Kapazität  $c$  und dem damit erreichbaren Servicegrad  $SL(c)$  in Restriktion (66) nicht explizit durch eine mathematische Gleichung gegeben, die den Servicegrad in Abhängigkeit der bereitgestellten Kapazität beschreibt, sondern dieser wird durch das analytische Modell abgebildet. Das analytische Modell ist in diesem Kontext die Blackbox und berechnet für ein beliebiges Kommissioniersystem mit gegebener Kapazität den damit erreichbaren Servicegrad. Folglich eignen sich klassische Optimierungsverfahren, die die Gradienten der Zielfunktion und der Restriktionen zur Bestimmung des Optimums nutzen,

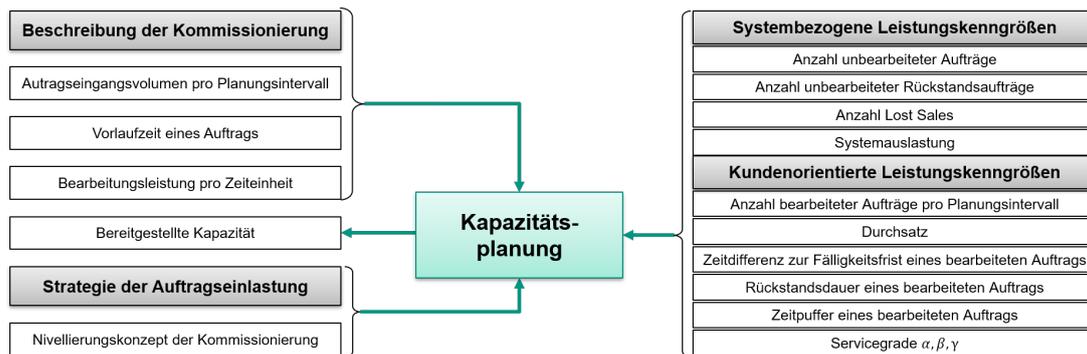


Abbildung 25: Übersicht über die Input- und Outputparameter des Planungsproblems der Kapazitätsplanung.

nicht zur Lösung des Kapazitätsplanungsproblems, da der Gradient der Blackbox-Restriktion (66) nicht bekannt ist.

Obwohl kein funktionaler Zusammenhang zwischen der bereitgestellten Kapazität  $c$  und dem damit erreichbaren Servicegrad  $SL(c)$  besteht, wurde in Mohring et al. (2020) [3] gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen  $c$  und  $SL(c)$  monoton wachsend ist.

## 8.2 Verfahren zur Kapazitätsplanung

Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften des Kapazitätsplanungsproblems werden im Folgenden mehrere mögliche Lösungsverfahren für das Kapazitätsplanungsproblem vorgestellt.

### 8.2.1 Vollständige Enumeration

Die vollständige Enumeration ist ein Lösungsverfahren, das für Optimierungsprobleme mit endlichem Lösungsraum eingesetzt werden kann, wenn keine analytischen Lösungsverfahren für dieses Problem existieren. Zunächst ermittelt die vollständige Enumeration alle zulässigen Lösungen des Lösungsraums inklusive deren Zielfunktionswert. Anschließend wird durch einen Vergleich der Zielfunktionswerte die optimale Lösung des Optimierungsproblems bestimmt. Auf diese Weise wird immer der optimale Punkt gefunden, allerdings ist der Rechenaufwand der vollständigen Enumeration sehr hoch: Bei  $n$  Variablen mit  $k$  möglichen Werten beträgt die Anzahl zulässiger Lösungen  $n^k$  [51].

### 8.2.2 Binärer Suchalgorithmus

Suchalgorithmen werden in der Informatik eingesetzt, um in einer Datenbank das Datenelement zu identifizieren, das ein bestimmtes vorgegebenes Merkmal aufweist. Zu den grundlegenden Suchalgorithmen in der Informatik zählen die lineare Suche, die binäre Suche und die Hashing-basierte Suche. Die Hashing-basierte Suche setzt voraus, dass alle Datenelemente der Datenbank zu Beginn der Suche bekannt sind [52, S.191f.]. Dies ist im Kontext der Kapazitätsplanung in der Kommissionierung nicht gewährleistet, da bei der Suche lediglich die Datenelemente mithilfe des analytischen Modells berechnet werden, auf die während der Suche zugegriffen wird. Folglich ist die Hashing-basierte Suche nicht zur Kapazitätsplanung in der Kommissionierung geeignet. Die Laufzeitkomplexität der linearen Suche ist linear, wohingegen die binäre Suche eine logarithmische Laufzeitkomplexität aufweist [52, S.173f.]. Daher wird im Folgenden ausschließlich der binäre Suchalgorithmus als Lösungsverfahren der Kapazitätsplanung betrachtet.

Der binäre Suchalgorithmus ist ein iteratives Verfahren, das den Suchbereich in jeder Iteration halbiert. Je nachdem, in welchem Verhältnis der Wert des in der aktuellen Iteration untersuchten Datenelements zum gesuchten Wert steht, wird die Suche in der unteren oder der oberen Hälfte des Suchbereichs fortgesetzt. Die Suche bricht ab, sobald der gesuchte Werte gefunden wurde oder der Suchbereich leer ist [52, S.174-176].

Der binäre Suchalgorithmus zur Kapazitätsplanung identifiziert diejenige Kapazität  $c$  im Wertebereich der Kapazität  $\mathcal{C}$ , bei welcher der zugehörige Servicegrad  $SL(c)$  dem geforderten Servicegrad  $SL^*$  entspricht. Der Wertebereich der Kapazität  $\mathcal{C}$  resultiert aus den Wertebereichen des Auftragseingangsvolumens  $\mathcal{A}$  pro Planungsintervall und der Bearbeitungsleistung  $\mathcal{L}$  pro Zeiteinheit wie folgt

$$\mathcal{C} = \left\{ c \in \mathbb{N} \mid \left\lfloor \frac{a_{min}}{l_{max}} \right\rfloor \leq c \leq \left\lceil \frac{a_{max}}{l_{min}} \right\rceil \right\}. \quad (68)$$

In Iteration  $i \in \mathbb{N}$  wird die Kapazität  $c_i$  in der Mitte des aktuellen Wertebereichs  $\mathcal{C}_i$  bestimmt und das analytische Modell für eine gegebene Kapazität der Höhe  $c_i$  berechnet. Auf Basis des resultierenden Servicegrads  $SL(c_i)$  wird über das weitere Vorgehen des Algorithmus entschieden:

- Fall A:  $SL(c_i) < SL^*$

Mit der Kapazität  $c_i$  wird der geforderte Servicegrad  $SL^*$  unterschritten. Aufgrund des positiven monotonen Zusammenhangs zwischen  $c$  und  $SL(c)$  (vgl. Kapitel 8.1.2), wird die Suche in der oberen Hälfte des Suchbereichs fortgesetzt:

$$\mathcal{C}_{i+1} = \{(c_i + 1), \dots, \max\{c \in \mathcal{C}_i\}\} \quad (69)$$

- Fall B:  $SL(c_i) \geq SL^*$

Mit der Kapazität  $c_i$  wird der geforderte Servicegrad  $SL^*$  überschritten. Aufgrund des positiven monotonen Zusammenhangs zwischen  $c$  und  $SL(c)$  (vgl. Kapitel 8.1.2), wird die Suche in der unteren Hälfte des Suchbereichs fortgesetzt:

$$\mathcal{C}_{i+1} = \{\min\{c \in \mathcal{C}_i\}, \dots, (c_i - 1)\} \quad (70)$$

Um sicherzustellen, dass der binäre Suchalgorithmus die minimale Kapazität identifiziert, die zur Gewährleistung des geforderten Servicegrads  $SL^*$  benötigt wird, setzt der binäre Suchalgorithmus zur Kapazitätsplanung auch im Fall  $SL(c_i) = SL^*$  die Suche solange fort, bis diese aufgrund eines leeren Suchraums  $\mathcal{C}_i = \emptyset$  abgebrochen wird.

### 8.2.3 Blackbox Optimierungsverfahren

Blackbox Optimierungsverfahren sind spezielle Verfahren zur Lösung von Blackbox Optimierungsproblemen, die ohne die Kenntnis der Gradienten von Zielfunktion und Restriktionen das Optimum des Optimierungsproblems ermitteln [50, S.5]. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Art der berücksichtigten Restriktionen (unrestringiert, linear, nicht linear) und Entscheidungsvariablen (kontinuierlich, ganzzahlig, kategorial). Außerdem lassen sie sich hinsichtlich ihres Lösungsansatzes in folgende Bereiche untergliedern:

- **Direkte Suchverfahren**

Direkte Suchverfahren bestimmen nach einer verfahrensspezifischen Systematik iterativ Punkte, an denen Zielfunktion und Restriktionen des Blackbox Optimierungsproblems evaluiert werden. Auf Basis der Zielfunktions- und der Restriktionswerte der untersuchten Punkte werden die als nächstes zu untersuchenden Punkte identifiziert [53]. Die Beiträge Kolda et al. (2003) [53] und Audet (2014) [54] geben einen Überblick über direkte Suchverfahren. Zu den bekanntesten Vertretern der direkten Suchverfahren zählen Compass Search, General Pattern Search und Mesh Adaptive Direct Search.

- **Modellbasierte Verfahren**

Modellbasierte Verfahren approximieren das Blackbox Optimierungsproblem anhand eines Hilfsmodells und bestimmen mittels einer verfahrensspezifischen Systematik basierend auf dem Hilfsmodell Punkte, an denen das Blackbox Optimierungsproblem evaluiert wird. Die Approximationsgüte des Hilfsmodells nimmt dabei mit jedem zusätzlichen Punkt zu, an dem das Blackbox Optimierungsproblem untersucht wurde. Forrester und Keane (2009) [55] und Vu et al. (2017) [56] geben einen Überblick über modellbasierte Blackbox Optimierungsverfahren.

Der Fokus der Blackbox Optimierungsverfahren liegt zum einen auf unrestringierten Optimierungsmodellen und zum anderen auf Optimierungsmodellen mit kontinuierlichen Entscheidungsvariablen [50, S.7]. Zur Lösung des Blackbox Optimierungsproblems der Kapazitätsplanung wird jedoch ein Verfahren benötigt, das sowohl Restriktionen als auch ganzzahlige Entscheidungsvariablen berücksichtigt (vgl. Kapitel 8.1.2). Außerdem soll der Code des Algorithmus open source zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Anforderungen wurden folgende Blackbox Optimierungsverfahren für die Kapazitätsplanung in der Kommissionierung ausgewählt:

- Mesh Adaptive Direct Search (MADS)
- Surrogate Optimisation Integer (SOI).

**Mesh Adaptive Direct Search (MADS)** Das direkte Suchverfahren MADS ist ein iteratives Verfahren, das durch die Berechnung des Blackbox Optimierungsproblems an ausgewählten Punkten, ausgehend von einem gegebenen Anfangspunkt, eines lokales Minimum identifiziert. In jeder Iteration werden neue Punkte auf der Grundlage verschiedener Kriterien ausgewählt (search- und poll-Schritt). Das Hauptmerkmal von MADS ist, dass jeder untersuchte Punkt auf dem so genannten Mesh liegen muss. Der Mesh ist die Diskretisierung des Suchraums und seine Feinheit wird durch den Mesh-Parameter gesteuert. Jede Iteration von MADS setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

1. Search-Schritt,
2. Poll-Schritt,
3. Parameterupdate, und
4. Überprüfung des Abbruchkriteriums.

Im Search-Schritt kann eine beliebige Methode verwendet werden, um eine endliche Menge zu untersuchender Punkte auszuwählen. Beispielsweise können Line Search, heuristische Methoden wie Tabu Search, Variable Neighbourhood Search, Simulated Annealing oder in Anlehnung an modellbasierte Suchverfahren Hilfsmodelle verwendet werden. Für all diese Punkte wird das Blackbox Optimierungsproblem berechnet. Falls es sich bei einem dieser Punkte um einen besseren Punkt als den bisher besten Punkt handelt, wird dieser durch den neuen besten Punkt ersetzt. Im Poll-Schritt wird eine endliche Menge zu untersuchender Punkte in der Nähe des bisher besten Punktes ausgewählt. Analog zum Search-Schritt wird das Blackbox-Optimierungsproblem auch an diesen Punkten berechnet und ggf. der bisher beste Punkt aktualisiert. Der Poll-Schritt stellt die globale Konvergenz von MADS gegen ein lokales Optimum sicher. Beim Parameterupdate wird der Mesh-Parameter aktualisiert, abhängig davon, ob in der aktuellen Iteration ein neuer bester Punkt identifiziert werden konnte oder nicht. Am Ende jeder Iteration wird das Abbruchkriterium überprüft. Dieses kann beispielsweise anhand der Gesamtzahl der berechneten Blackbox-Instanzen, anhand der Rechenzeit des Algorithmus oder anhand eines Schwellwerts für den Mesh-Parameter definiert werden. Sobald das Abbruchkriterium erfüllt ist, bricht der Algorithmus ab. Andernfalls wird eine weitere Iteration durchgeführt [50, S.136-140]. Die Implementierung von MADS steht in der Software-Anwendung NOMAD open source zur Verfügung. NOMAD umfasst zahlreiche Erweiterungen und Variationen von MADS, unter anderem

Verfahren zur Lösung von restringierten Blackbox Optimierungsproblemen mit ganzzahligen Entscheidungsvariablen. Das NOMAD-Handbuch [57] bietet einen Überblick über die zahlreichen Variationen und Erweiterungen von MADS, die in der Software-Anwendung NOMAD implementiert sind.

**Surrogate Optimisation-Integer (SOI)** SOI ist ein modellbasiertes Suchverfahren zur Lösung von restringierten Blackbox Optimierungsproblemen mit ganzzahligen Entscheidungsvariablen, das aus zwei separaten Optimierungsphasen besteht. Während in der ersten Optimierungsphase ein erster zulässiger Punkt des Blackbox Optimierungsproblems erzeugt wird, hat die zweite Optimierungsphase die Identifikation des lokalen Minimums des Blackbox Optimierungsproblems zum Ziel. In beiden Optimierungsphasen wird ein modellbasiertes Suchverfahren eingesetzt. Dieses nutzt ein Latin-Hypercube-Design zur Erzeugung der initialen Menge zu untersuchender Punkte sowie eine kubische radiale Basisfunktion mit  $l_2$ -Metrik als Hilfsmodell. In jeder Iteration des modellbasierten Suchverfahrens wird zunächst eine endliche Menge zu untersuchender Punkte bestimmt: Zum einen durch zufällige Auswahl gleichmäßig im Suchbereich verteilter Punkte und zum anderen durch Permutation des bisher besten Punkts. Jeder dieser Punkte wird anhand eines Scores beurteilt, dessen Wert sich aus dem Wert des Hilfsmodells und dem Abstand zu den bisher untersuchten Punkten berechnet. Das Blackbox Optimierungsproblem wird ausschließlich für den Punkt mit dem höchsten Score berechnet. Das Hilfsmodell wird in jeder Iteration basierend auf der Menge der bereits untersuchten Punkte aktualisiert. Als Abbruchkriterium dient die Gesamtzahl der berechneten Blackbox-Instanzen [58]. Die Implementierung von SOI steht in der MATLAB Surrogate Model Toolbox (MatSuMoTo) open source zur Verfügung [59].

### 8.3 Vergleich der Verfahren zur Kapazitätsplanung im Rahmen einer numerischen Studie

Im Rahmen einer numerischen Studie werden die in Kapitel 8.2 vorgestellten Verfahren zur Lösung des Kapazitätsplanungsproblems in der Kommissionierung - vollständige Enumeration, binärer Suchalgorithmus, direktes Suchverfahren MADS, modellbasiertes Verfahren SOI - hinsichtlich ihrer Laufzeiteffizienz verglichen.

#### 8.3.1 Design of Experiments

Es werden drei Datensätze mit jeweils unterschiedlichen Wertebereichen des Auftragseingangsvolumens  $A$  pro Planungsintervall betrachtet: Im ersten Datensatz beträgt das maximale Auftragseingangsvolumen fünf Aufträge, im zweiten Datensatz 10 Aufträge und im dritten Datensatz 15 Aufträge. Die Wertebereiche der Vorlaufzeit eines Auftrags und der Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit sind in allen Datensätzen gleich. Die konkreten Werte sind in Tabelle 11 gegeben. Basierend auf den je Datensatz gegebenen Wertebereichen werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Größen  $A$ ,  $E$  und  $L$  zufällig erzeugt. Für jeden Datensatz werden jeweils 42 verschiedene Kommissioniersysteme erzeugt. Die an das Kommissioniersystem gestellte Leistungsanforderung wird in allen betrachteten Fällen als  $\beta$ -Servicegrad von mindestens 98% spezifiziert.

Als Messgröße für die Laufzeiteffizienz der Verfahren wird die Anzahl der berechneten Blackbox-Instanzen (= Anzahl der berechneten Instanzen des analytischen Modells) herangezogen, die je Datenpunkt zur Bestimmung des Optimums des Kapazitätsplanungsproblems berechnet werden müssen.

Tabelle 11: Design of Experiments der numerischen Studie zum Vergleich verschiedener Verfahren der Kapazitätsplanung.

Parameter	Variable	Datensatz	Wertebereich
Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall	$A$	1	$\mathcal{A}_1 = \{1, 2, \dots, 5\}$
		2	$\mathcal{A}_2 = \{5, 6, \dots, 10\}$
		3	$\mathcal{A}_3 = \{5, 6, \dots, 15\}$
Vorlaufzeit eines Auftrags	$E$	1-3	$\mathcal{E} = \{0, 1\}$
Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit	$L$	1-3	$\mathcal{L} = \{2, 3\}$
Maximal akzeptierte Rückstandsdauer	$R$	1-3	$R = 1$
Servicegradanforderung	$SL_\beta^*$	1-3	$SL_\beta^* = 0.98$

### 8.3.2 Ergebnisse

Abbildung 26 zeigt die durchschnittliche Anzahl der berechneten Blackbox-Instanzen je Datensatz für die verschiedenen Verfahren zur Kapazitätsplanung. Für alle betrachteten Datensätze ist die durchschnittliche Anzahl der berechneten Blackbox-Instanzen im Fall der vollständigen Enumeration am größten. Dies liegt daran, dass dabei für alle Kapazitäts-Werte  $c$  des Wertebereichs  $\mathcal{C}$  das analytische Modell berechnet wird. Somit entspricht die Anzahl berechneter Blackbox-Instanzen der vollständigen Enumeration jeweils der maximal möglichen Anzahl berechenbarer Blackbox-Instanzen. Des Weiteren ist die durchschnittliche Anzahl berechneter Blackbox-Instanzen bei Verwendung des binären Suchalgorithmus in allen betrachteten Datensätzen am kleinsten und deutlich geringer als die jeweils entsprechenden Werte des direkten Suchverfahrens MADS und des modellbasierten Verfahrens SOI. Die Blackbox Optimierungsverfahren MADS und SOI unterscheiden sich hinsichtlich der durchschnittlichen Anzahl berechneter Blackbox-Instanzen nur gering voneinander: Während das modellbasierte Verfahren SOI für den ersten Datensatz besser ist als das direkte Suchverfahren MADS, ist für die Datensätze 2 und 3 das direkte Suchverfahren MADS gegenüber dem modellbasierten Verfahren SOI zu bevorzugen.

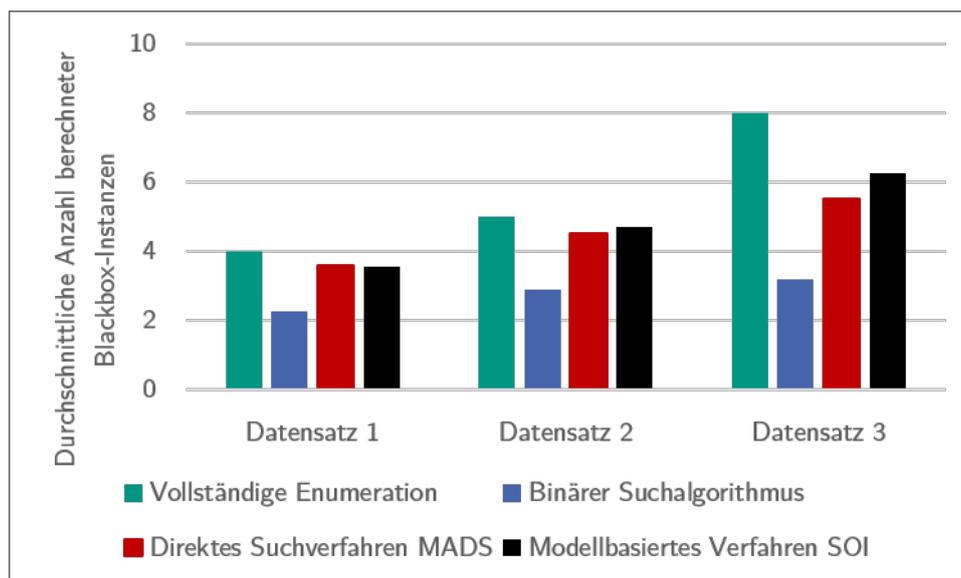


Abbildung 26: Durchschnittliche Anzahl berechneter Blackbox-Instanzen je Datensatz für die verschiedenen Verfahren zur Kapazitätsplanung.

Das Ergebnis der numerischen Studie zum Vergleich der verschiedenen Verfahren der Kapazitätsplanung hinsichtlich deren Laufzeiteffizienz ist eindeutig: Zur Kapazitätsplanung in der Kommissionierung sollte stets der binäre Suchalgorithmus gegenüber den anderen Verfahrensalternativen bevorzugt werden.

## 8.4 Umsetzung der Kapazitätsplanung im Software-Tool

Die Implementierung der Kapazitätsplanung für ein beliebiges Kommissioniersystem mit einer beliebigen Leistungsanforderung mittels des binären Suchalgorithmus ist in das Software-Tool integriert. Zur Durchführung der Kapazitätsplanung anhand des Software-Tools müssen dieselben Schritte wie für eine Leistungsanalyse (vgl. Kapitel 5.5) durchgeführt werden. Der einzige Unterschied besteht darin, dass in Schritt 1 bei der Spezifikation der Inputparameter anstatt des Parameters „bereitgestellte Kapazität“ die an die Kommissionierung gestellte Leistungsanforderung spezifiziert werden muss (vgl. Abbildung 27).

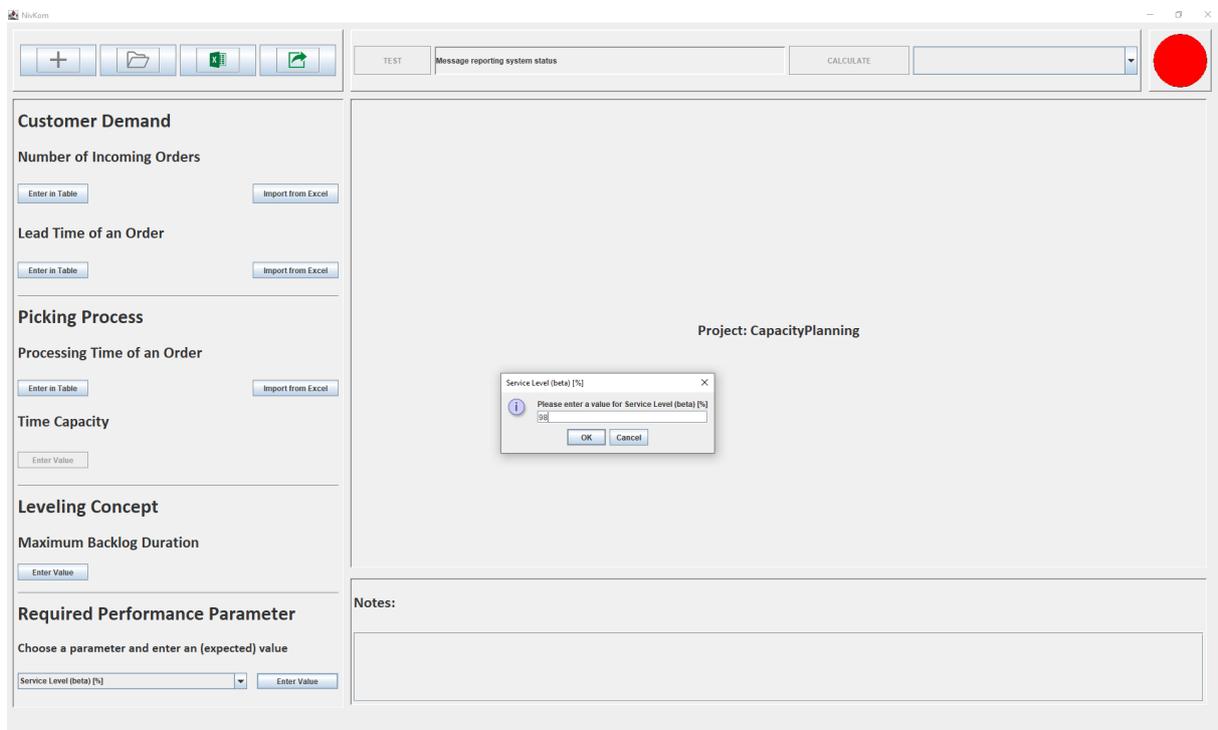


Abbildung 27: Software-Tool: Manuelle Eingabe der Leistungsanforderung für die Kapazitätsplanung.

## 9 Bestimmung des Personalbedarfs in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung

In Kapitel 8 wurde der Kapazitätsbedarf bestimmt, der pro Planungsintervall in der Kommissionierung benötigt wird, um eine bestimmte geforderte Leistungsfähigkeit gewährleisten zu können. In diesem Kapitel wird nun die Umrechnung des Kapazitätsbedarfs in die Anzahl benötigter Mitarbeiter betrachtet. Der wesentliche Einflussfaktor hierbei ist das Arbeitszeitmodell in der Kommissionierung, da der Personalbedarf maßgeblich von den Schichtlängen der einzelnen Mitarbeiter abhängt. Daher wird ausgehend vom ermittelten Kapazitätsbedarf zunächst die Anzahl benötigter Schichten (Schritt der Schichtplanung, vgl. Kapitel 9.1) und anschließend die Anzahl benötigter Mitarbeiter (Schritt der Personalbedarfsplanung, vgl. Kapitel 9.2) ermittelt (vgl. Abbildung 28).

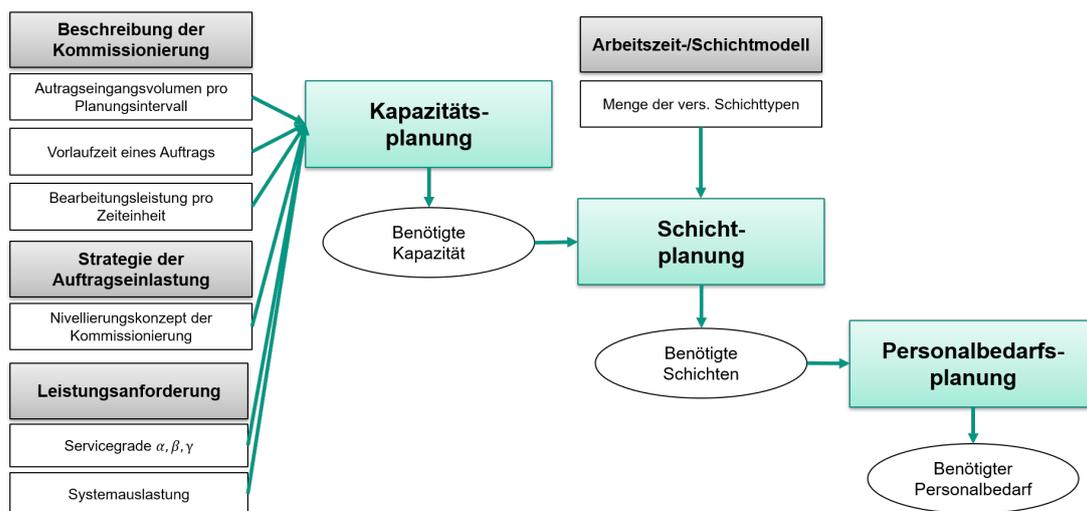


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Kapazitäts- und Personalbedarfsplanung.

### 9.1 Schichtplanung

In der Schichtplanung wird ausgehend vom Kapazitätsbedarf pro Planungsintervall und dem Arbeitszeitmodell der Kommissionierung die Anzahl der benötigten Schichten zur Abdeckung des Kapazitätsbedarfs ermittelt.

Diese Fragestellung der Schichtplanung kann entweder

1. durch Lösung einer linearen diophantischen Gleichung oder
2. durch Lösung eines linearen mathematischen Optimierungsproblems

gelöst werden. Durch Lösung einer linearen diophantischen Gleichung wird der gesamte Lösungsraum des Schichtplanungsproblems bestimmt. Aufgrund zu vieler Freiheitsgrade kann mit diesem Ansatz keine eindeutige Lösung bestimmt werden. Daher wird das Schichtplanungsproblem im Folgenden als mathematisches Optimierungsproblem formuliert.

#### 9.1.1 Grundmodell

Das mathematische Optimierungsproblem der Schichtplanung betrachtet den allgemeinen Fall der Schichtplanung in der Kommissionierung mit einem Arbeitszeitmodell aus  $n$  verschiedenen Schichttypen, wobei jeder Schichttyp  $i$  durch seine Schichtlänge  $S_i$  spezifiziert wird. Gesucht ist diejenige

Anzahl bereitgestellter Schichten  $x_i$  je Schichttyp, die eine Abdeckung des Kapazitätsbedarfs  $c^*$  sicherstellt und den Wert der Zielfunktion (vgl. Gleichung (71)) optimiert. Die Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems sind folglich die Anzahl bereitgestellter Schichten  $x_i$  je Schichttyp  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Parameter und Entscheidungsvariablen des Schichtplanungsproblems.

Tabelle 12: Parameter und Entscheidungsvariablen des Schichtplanungsproblems.

<b>Parameter</b>	$n$	Anzahl der betrachteten Schichttypen
	$S_i$	Schichtlänge des Schichttyps $i$ , gemessen in Zeiteinheiten, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$
	$K_i$	Maximale Anzahl verfügbarer Schichten des Schichttyps $i$ , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$
	$I_i$	Leistungsbereitschafts-Index des Schichttyps $i$ , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$
	$c^*$	Kapazitätsbedarf, gemessen in Zeiteinheiten
	$SPV$	Anteil der sachlichen und persönlichen Verteilzeit an der Bruttoarbeitszeit in Prozent
<b>Entscheidungsvariablen</b>	$x_i$	Anzahl bereitgestellter Schichten des Schichttyps $i$ , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$

Die Zielfunktion des Schichtplanungsproblems wird als multikriterielle Zielfunktion

$$\min ZF = w_A \cdot ZF_A + w_B \cdot ZF_B \quad (71)$$

der folgenden beiden Zielsetzungen modelliert:

- Minimierung der Anzahl bereitgestellter Schichten

$$\min ZF_A = \sum_{i=1}^n x_i \quad (72)$$

- Minimierung der bereitgestellten Kapazität

$$\min ZF_B = \sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i. \quad (73)$$

Die Gewichte  $w_A$  und  $w_B$  werden derart gewählt, dass die Zielfunktionen  $ZF_A$  und  $ZF_B$  gleichberechtigt in der multikriteriellen Zielfunktion berücksichtigt werden. Hierzu werden die Wertebereiche  $\{A_{min}, \dots, A_{max}\}$  und  $\{B_{min}, \dots, B_{max}\}$  der beiden Zielfunktionen  $ZF_A$  und  $ZF_B$  jeweils auf den Wertebereich  $[0, 1]$  normiert. Aus der unteren Grenze  $A_{min}$  und der oberen Grenze  $A_{max}$  der Zielfunktion  $ZF_A$

$$A_{min} = \left\lceil \frac{c^*}{\max\{S_1, \dots, S_n\}} \right\rceil \quad A_{max} = \left\lfloor \frac{c^*}{\min\{S_1, \dots, S_n\}} \right\rfloor \quad (74)$$

resultiert die normierte Zielfunktion  $ZF_{A,norm}$

$$ZF_{A,norm} = \left( \frac{1}{A_{max} - A_{min}} \sum_{i=1}^n x_i \right) - \frac{A_{min}}{A_{max} - A_{min}}. \quad (75)$$

Aus der unteren Grenze  $B_{min}$  und der oberen Grenze  $B_{max}$  der Zielfunktion  $ZF_B$

$$B_{min} = c^* \quad B_{max} = c^* + ggT(S_1, \dots, S_n) - 1 \quad (76)$$

resultiert die normierte Zielfunktion  $ZF_{B,norm}$

$$ZF_{B,norm} = \left( \frac{1}{B_{max} - B_{min}} \sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i \right) - \frac{B_{min}}{B_{max} - B_{min}}. \quad (77)$$

Da Konstanten in der Zielfunktion vernachlässigt werden können, vereinfacht sich die Zielfunktion des Schichtplanungsproblems wie folgt

$$\min \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{A_{max} - A_{min}} + \frac{S_i}{B_{max} - B_{min}} \right) \cdot x_i. \quad (78)$$

Anhand folgender Restriktion wird die Bereitstellung des Kapazitätsbedarfs von  $c^*$  Zeiteinheiten sichergestellt

$$\sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i \geq c^*. \quad (79)$$

Die Kombination dieser Restriktion mit Zielfunktion  $ZF_B$  zur Minimierung der bereitgestellten Kapazität bewirkt eine Minimierung des Kapazitätsüberschusses.

Des Weiteren wird der Wertebereich der Entscheidungsvariablen  $x_i$  wie folgt definiert

$$x_i \in \mathbb{N}_0 \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (80)$$

Das Optimierungsproblem der Schichtplanung wird mithilfe des Gurobi-Standardsolvers exakt gelöst.

### 9.1.2 Praxisrelevante Erweiterungen des Grundmodells

Über das Grundmodell der Schichtplanung hinaus können weitere praxisrelevante Aspekte der Schichtplanung im mathematischen Optimierungsproblem berücksichtigt werden.

**Begrenzte Anzahl verfügbarer Mitarbeiter** Durch Berücksichtigung einer maximalen Anzahl verfügbarer Schichten  $K_i$  je Schichttyp  $i$  kann die begrenzte Anzahl verfügbarer Mitarbeiter durch folgende Restriktion modelliert werden

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq K_i \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (81)$$

**Sachliche und persönliche Verteilzeit** Bisher werden im Schichtplanungsproblem ausschließlich die Produktiv- bzw. Nettoarbeitszeiten der Mitarbeiter abgebildet. Allerdings fallen in der Realität auch nicht-produktive Tätigkeiten an, wie beispielsweise die Teilnahme an Fortbildungen, Betriebsversammlungen und Mitarbeitergesprächen sowie die Einarbeitung neuer Mitarbeiter. Der Zeitbedarf dieser Tätigkeiten wird als sachliche Verteilzeit bezeichnet. Darüber hinaus fallen persönliche Verteilzeiten an, beispielsweise Erholungs- und Entspannungszeiten sowie Zeiten für persönliche Verrichtungen. Zur Berücksichtigung der sachlichen und persönlichen Verteilzeit in der Planung wird diese als Prozentsatz der Bruttoarbeitszeit eines Mitarbeiters angegeben [60, S. 148ff.]. Zur Abbildung der sachlichen und persönlichen Verteilzeit  $SPV$  im Schichtplanungsproblem wird in Restriktion (79) der

Netto-Kapazitätsbedarf  $c^*$  durch Erhöhung um den Faktor  $SPV$  als Brutto-Kapazitätsbedarf modelliert:

$$\sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i \geq (1 + SPV) \cdot c^*. \quad (82)$$

**Leistungsbereitschaft der Mitarbeiter** Auf Basis des Schichtplanungsproblems können lediglich Unterschiede zwischen der Leistungsbereitschaft verschiedener Schichttypen modelliert werden, also beispielsweise Unterschiede zwischen Voll- und Teilzeitkräften. Hierzu wird der Leistungsbereitschafts-Index  $I_i$  eingeführt, wobei mit  $I_i = 1$  eine durchschnittliche Leistungsbereitschaft, mit  $I_i > 1$  eine überdurchschnittliche Leistungsbereitschaft und mit  $I_i < 1$  eine unterdurchschnittliche Leistungsbereitschaft von Schichttyp  $i$  modelliert wird. Der Leistungsbereitschafts-Index  $I_i$  wird im Schichtplanungsproblem in Restriktion (79) bei der Berechnung der bereitgestellten Kapazität wie folgt berücksichtigt:

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot S_i \cdot x_i \geq c^*. \quad (83)$$

## 9.2 Personalbedarfsplanung

Unter der Annahme, dass jede im Rahmen der Schichtplanung bereitgestellte Schicht einem Mitarbeiter entspricht (kein Mitarbeiter hat zwei Schichten pro Arbeitstag), ist der benötigte Personalbedarf  $\#MA$  die Summe der bereitgestellten Schichten  $x_i$  für alle Schichttypen  $i \in \{1, \dots, n\}$ :

$$\#MA = \sum_{i=1}^n x_i. \quad (84)$$

An dieser Stelle kann die Krankenquote  $KQ$ , also der Anteil der kranken Mitarbeiter an der Anzahl verfügbarer Mitarbeiter, wie folgt berücksichtigt werden

$$\#MA = (1 + KQ) \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (85)$$

## 10 Numerische Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung

In diesem Kapitel werden verschiedene Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung untersucht. Hierzu werden zunächst die relevanten Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung identifiziert (vgl. Kapitel 10.1) und das Design of Experiments der numerischen Studie beschrieben (vgl. Kapitel 10.2). Anschließend werden der Kapazitätsüberschuss, die Zusammensetzung der Schichtpläne sowie der Einfluss der Anzahl unterschiedlicher Schichttypen anhand des Schichtplanungsproblems im Rahmen der numerischen Studie untersucht (vgl. Kapitel 10.3-10.5). Abschließend werden aus den Ergebnissen der numerischen Studie Handlungsempfehlungen für die Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung abgeleitet (vgl. Kapitel 10.6).

### 10.1 Relevante Konzepte der Arbeitszeitflexibilisierung im Kontext des Forschungsprojekts

Die in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Konzepte zur Arbeitszeitflexibilisierung werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Eignung zur Umsetzung im Rahmen der Modelle des Forschungsprojekts beurteilt.

Die betrachtete Zeiteinheit des analytischen Modells ist ein Planungsintervall. Ein Planungsintervall entspricht in der Regel einem Arbeitstag oder einer Schicht. Daher können basierend auf dem analytischen Modell ausschließlich Arbeitszeitflexibilisierungsmaßnahmen innerhalb eines Tages, jedoch nicht solche zwischen mehreren Tagen abgebildet und untersucht werden. Die Konzepte der flexiblen Arbeitstage und der Jahresarbeitszeit (vgl. Kapitel 2.3.3) eignen sich folglich nicht zur Untersuchung im Rahmen des Forschungsprojekts.

Darüber hinaus beschreibt das analytische Modell die Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung im stationären Zustand, d.h. der Kapazitätsbedarf, der basierend auf dem analytischen Modell in der Kapazitätsplanung ermittelt wird, spezifiziert den Kapazitätsbedarf im stationären Zustand. Daher kann basierend auf dem analytischen Modell ausschließlich der permanente Einsatz von Überstunden zur Bearbeitung eines bestimmten Anteils der Aufträge in der Kommissionierung modelliert werden. Dies widerspricht jedoch der Grundidee der Arbeitszeitflexibilisierung durch Überstunden zum Zweck des Ausgleichs temporärer Spitzen der Kundennachfrage (vgl. Kapitel 2.3.3). Folglich können die Konzepte der Überstunden und der Arbeitszeitkonten im Kontext des Forschungsprojekts nicht auf sinnvolle Weise modelliert werden.

Verschiedene Arbeitszeitmodelle (vgl. Kapitel 2.3.2) können anhand des mathematischen Optimierungsproblems zur Schichtplanung (vgl. Kapitel 9.1) abgebildet und systematisch untersucht werden.

### 10.2 Design of Experiments

Im Rahmen der numerischen Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung werden Schichtmodelle aus einem Schichttyp, zwei Schichttypen, drei Schichttypen und vier Schichttypen betrachtet, wobei die Schichtlängen der Schichttypen jeweils verschieden sein müssen. Jede Schicht ist mindestens eine Stunde und höchstens neun Stunden lang. Zusätzlich wird der Kapazitätsbedarf zwischen 50 und 100 Stunden variiert. Die praxisrelevanten Erweiterungen des Schichtplanungsproblems (vgl. Kapitel 9.1.2) werden im Rahmen der numerischen Studie nicht berücksichtigt. Tabelle 13 fasst die Wertebereiche der numerischen Studie zusammen.

Tabelle 13: Design of Experiments der numerischen Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung.

Parameter	Variable	Wertebereich
Anzahl der betrachteten Schichttypen	$n$	$\{1, 2, 3, 4\}$
Schichtlänge des Schichttyps $i$ in Stunden, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$	$S_i$	$\{1, 2, \dots, 9\}$
Kapazitätsbedarf in Stunden	$c^*$	$\{50, 51, \dots, 100\}$

### 10.3 Untersuchung des Kapazitätsüberschusses

Der Kapazitätsüberschuss misst die Differenz zwischen der bereitgestellten Kapazität und dem Kapazitätsbedarf. Der Fokus der Untersuchung des Kapazitätsüberschusses liegt auf den folgenden Fragestellungen:

- Wann tritt ein Kapazitätsüberschuss auf?
- Wie groß ist der auftretende Kapazitätsüberschuss?

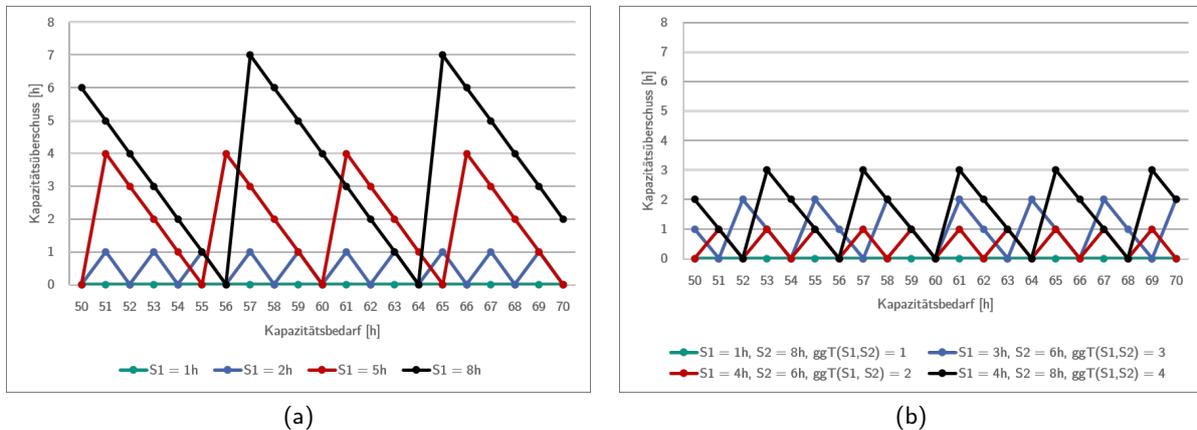


Abbildung 29: Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für ausgewählte Schichtmodelle mit (a) einem Schichttyp ( $n = 1$ ) und (b) zwei Schichttypen ( $n = 2$ ).

Abbildung 29 (a) stellt den Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für ausgewählte Schichtmodelle mit einem Schichttyp dar: Schichtmodell mit einstündigen Schichten ( $S_1 = 1$ ) in grün, Schichtmodell mit zweistündigen Schichten ( $S_1 = 2$ ) in blau, Schichtmodell mit fünfstündigen Schichten ( $S_1 = 5$ ) in rot und Schichtmodell mit achtstündigen Schichten ( $S_1 = 8$ ) in schwarz. In allen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf  $c^*$  durch die Schichtlänge  $S_1$  teilbar ist, tritt kein Kapazitätsüberschuss auf. So wird im Fall eines Schichtmodells mit einstündigen Schichten unabhängig vom Kapazitätsbedarf nie ein Kapazitätsüberschuss beobachtet, da jede Zahl durch Eins teilbar ist. In allen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf nicht durch die Schichtlänge  $S_1$  teilbar ist, tritt hingegen ein Kapazitätsüberschuss auf. Die Höhe des Kapazitätsüberschusses  $\Delta c$  ist abhängig vom Rest, der bei ganzzahliger Division des Kapazitätsbedarfs  $c^*$  durch die Schichtlänge  $S_1$  verbleibt und kann wie folgt berechnet werden

$$\Delta c = S_1 - (c^* \bmod S_1). \quad (86)$$

So beträgt der Kapazitätsüberschuss bei einem Kapazitätsbedarf von 51 Stunden und einem Schichtmodell mit fünfstündigen Schichten beispielsweise  $\Delta c = 5 - (51 \bmod 5) = 4$  Stunden.

Abbildung 29 (b) stellt den Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für ausgewählte Schichtmodelle mit zwei Schichttypen dar: Schichtmodell mit ein- und achtstündigen Schichten

( $S_1 = 1, S_2 = 8$ ) in grün, Schichtmodell mit vier- und sechsständigen Schichten ( $S_1 = 4, S_2 = 6$ ) in rot, Schichtmodell mit drei- und sechsständigen Schichten ( $S_1 = 3, S_2 = 6$ ) in blau und Schichtmodell mit vier- und achtständigen Schichten ( $S_1 = 4, S_2 = 8$ ) in schwarz. In allen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf  $c^*$  durch den größten gemeinsamen Teiler  $ggT(S_1, S_2)$  der Schichtlängen  $S_1$  und  $S_2$  teilbar ist, tritt kein Kapazitätsüberschuss auf. So wird im Fall eines Schichtmodells mit ein- und achtständigen Schichten unabhängig vom Kapazitätsbedarf nie ein Kapazitätsüberschuss beobachtet, da der größte gemeinsame Teiler dieses Schichtmodells Eins beträgt. In allen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf nicht durch den größten gemeinsamen Teiler  $ggT(S_1, S_2)$  der Schichtlängen  $S_1$  und  $S_2$  teilbar ist, tritt hingegen ein Kapazitätsüberschuss auf. Die Höhe des Kapazitätsüberschusses  $\Delta c$  ist abhängig vom Rest, der bei ganzzahliger Division des Kapazitätsbedarfs  $c^*$  durch den größten gemeinsamen Teiler  $ggT(S_1, S_2)$  des Schichtmodells verbleibt und kann wie folgt berechnet werden

$$\Delta c = ggT(S_1, S_2) - (c^* \bmod ggT(S_1, S_2)). \quad (87)$$

Folglich beträgt der Kapazitätsüberschuss bei einem Kapazitätsbedarf von 64 Stunden und einem Schichtmodell mit drei- und sechsständigen Schichten  $\Delta c = ggT(3, 6) - (64 \bmod ggT(3, 6)) = 2$  Stunden.

Der in den Gleichungen (86) und (87) beschriebene Zusammenhang für Schichtmodelle mit einem bzw. zwei Schichttypen lässt sich auf Schichtmodelle mit  $n$  verschiedenen Schichttypen verallgemeinern (vgl. Abbildung 30). Für den Kapazitätsüberschuss  $\Delta c$  gilt stets:

$$\Delta c = ggT(S_1, \dots, S_n) - (c^* \bmod ggT(S_1, \dots, S_n)). \quad (88)$$

Bei Schichtmodellen aus mindestens zwei Schichttypen mit teilerfremden Schichtlängen tritt also unabhängig vom Kapazitätsbedarf kein Kapazitätsüberschuss auf.

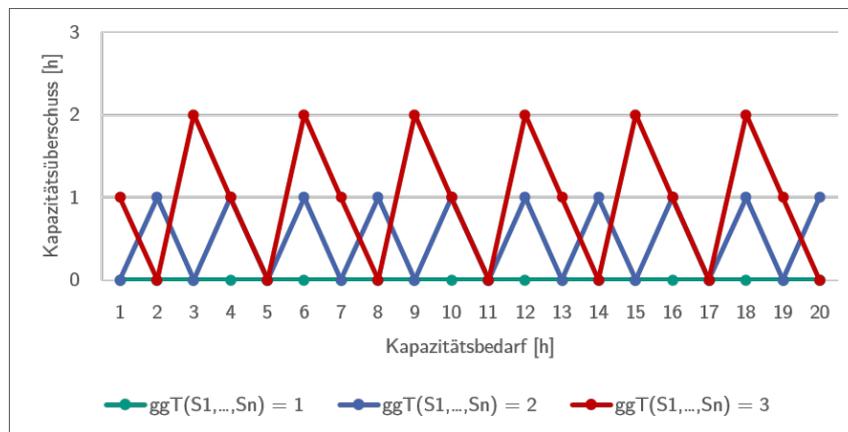


Abbildung 30: Kapazitätsüberschuss in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für Schichtmodelle mit einer beliebigen Anzahl von  $n$  Schichttypen.

## 10.4 Untersuchung der Zusammensetzung des Schichtplans

Im Rahmen dieser Auswertung soll untersucht werden, ob es Schichttypen gibt, deren Schichten bei der Schichtplanung bevorzugt eingesetzt werden und wenn ja, welche Eigenschaften diese bevorzugten Schichttypen haben.

Wir betrachten hierzu exemplarisch die Zusammensetzung des Schichtplans in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für drei verschiedene Schichtmodelle: In Abbildung 31 (a) ist ein Schichtmodell mit zwei-

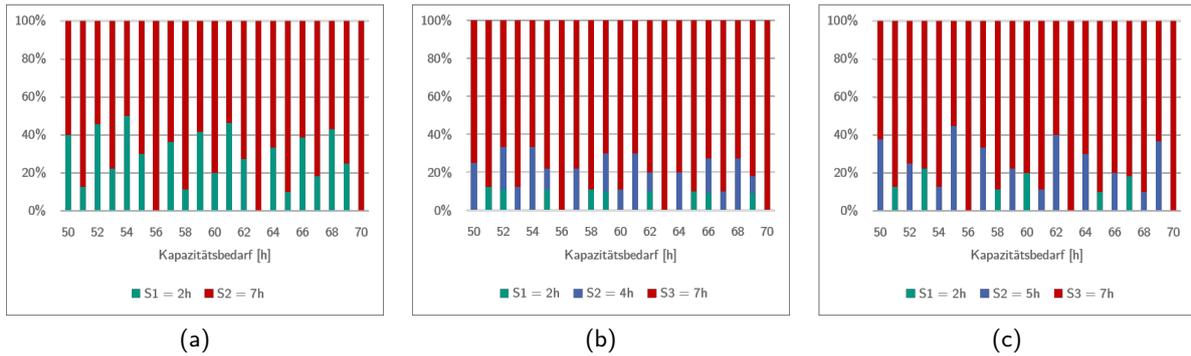


Abbildung 31: Zusammensetzung des Schichtplans in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für verschiedene Schichtmodelle mit (a) zwei- und siebenstündigen Schichten, (b) zwei-, vier- und siebenstündigen Schichten und (c) zwei-, fünf- und siebenstündigen Schichten.

und siebenstündigen Schichten, in Abbildung 31 (b) ein Schichtmodell mit zwei-, vier- und siebenstündigen Schichten und in Abbildung 31 (c) ein Schichtmodell mit zwei-, fünf- und siebenstündigen Schichten dargestellt.

In allen dargestellten Schichtmodellen werden mehrheitlich Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge, in diesem Fall siebenstündige Schichten, eingesetzt. In allen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf  $c^*$  durch die Schichtlänge der längsten Schicht teilbar ist, werden ausschließlich Schichten dieses Schichttyps eingesetzt. In den betrachteten Schichtmodellen ist dies für Kapazitätsbedarfe von 56 Stunden, 63 Stunden und 70 Stunden der Fall. In allen anderen Szenarien, in denen der Kapazitätsbedarf  $c^*$  nicht durch die Schichtlänge der längsten Schicht teilbar ist, werden neben Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge auch Schichten von Schichttypen mit kürzeren Schichtlängen eingesetzt. Allerdings werden immer so viele Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge wie möglich und so wenige Schichten von Schichttypen mit kürzeren Schichtlängen wie nötig eingesetzt.

Diese Struktur der Schichtpläne spiegelt die beiden Zielsetzungen des Optimierungsproblems wieder: Zur Minimierung der Anzahl bereitgestellter Schichten (vgl. Gleichung (72)) werden so viele Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge eingesetzt, wohingegen zur Minimierung des Kapazitätsüberschusses (vgl. Gleichung (73)) eine gewisse Anzahl von Schichten der Schichttypen kürzerer Schichtlängen benötigt wird.

## 10.5 Untersuchung des Einflusses der Anzahl unterschiedlicher Schichttypen

Zur Untersuchung des Einflusses der Anzahl unterschiedlicher Schichttypen  $n$  des Schichtmodells wird die Gesamtanzahl benötigter Schichten, also der Personalbedarf, in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für verschiedene Schichtmodelle mit gleicher durchschnittlicher Schichtlänge des Schichtmodells, aber mit einer unterschiedlichen Anzahl an Schichttypen betrachtet. In Abbildung 32 sind hierzu fünf verschiedene Schichtmodelle mit einer durchschnittlichen Schichtlänge von vier Stunden dargestellt:

1. Schichtmodell aus vier Schichttypen:  $S_1 = 2, S_2 = 3, S_3 = 5, S_4 = 6,$
2. Schichtmodell aus drei Schichttypen:  $S_1 = 2, S_2 = 3, S_3 = 6,$
3. Schichtmodell aus drei Schichttypen:  $S_1 = 3, S_2 = 4, S_3 = 5,$
4. Schichtmodell aus zwei Schichttypen:  $S_1 = 2, S_2 = 6$  und
5. Schichtmodell aus zwei Schichttypen:  $S_1 = 3, S_2 = 5.$

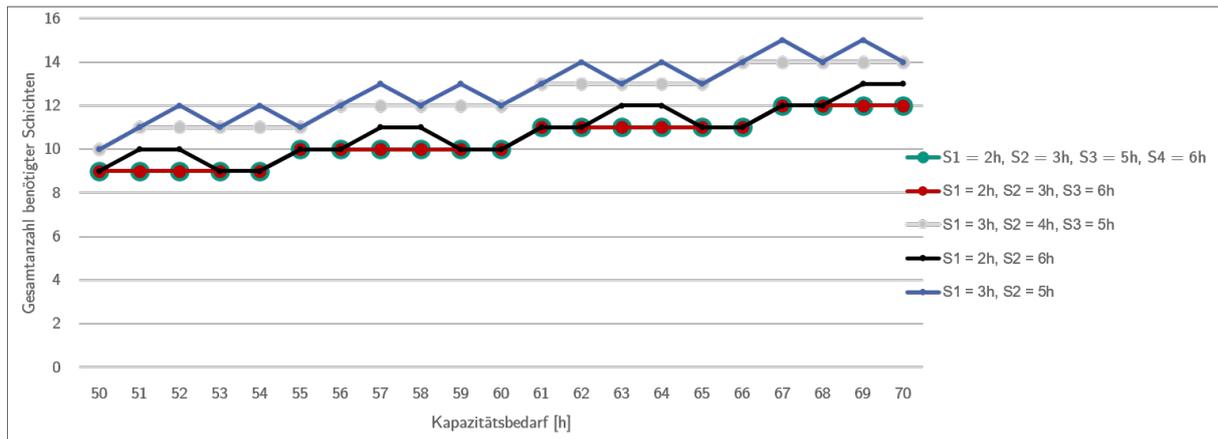


Abbildung 32: Gesamtanzahl benötigter Schichten in Abhängigkeit des Kapazitätsbedarfs für verschiedene Schichtmodelle mit derselben durchschnittlichen Schichtlänge.

Hinsichtlich der Gesamtanzahl benötigter Schichten lassen sich die betrachteten Schichtmodelle in zwei Cluster unterteilen (vgl. Abbildung 31): Cluster A umfasst die Schichtmodelle 3 und 5, Cluster B umfasst die Schichtmodelle 1, 2 und 4. Die Schichtlänge des Schichttyps der längsten Schichtlänge beträgt in Cluster A fünf Stunden und in Cluster B sechs Stunden. Damit wird die Aussage aus Kapitel 10.4 bestätigt, wonach vor allem Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge eingesetzt werden und folglich die Gesamtanzahl benötigter Schichten maßgeblich von der Schichtlänge des Schichttyps der längsten Schichtlänge abhängt.

Darüber hinaus zeigt sich in Abbildung 32, dass die Anzahl unterschiedlicher Schichttypen des Schichtmodells keinen Einfluss auf die Gesamtanzahl der benötigten Schichten, wohl aber auf die Monotonie des Kurvenverlaufs hat: Für die Schichtmodelle 4 und 5, die jeweils aus zwei Schichttypen bestehen, ist der Zusammenhang zwischen Gesamtanzahl benötigter Schichten und Kapazitätsbedarf nicht monoton, wohingegen für die Schichtmodelle 1, 2 und 3 ein monotoner Zusammenhang zwischen Gesamtanzahl benötigter Schichten und Kapazitätsbedarf beobachtet wird. Mit zunehmender Anzahl verschiedener Schichttypen nimmt also der Einfluss geringer Schwankungen des Kapazitätsbedarfs auf den benötigten Personalbedarf ab.

## 10.6 Handlungsempfehlungen für die Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung

Aus den Ergebnissen der numerischen Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung (vgl. Kapitel 10.3-10.5) lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für die Gestaltung des Arbeitszeitmodells in der Kommissionierung ableiten:

- Zur Minimierung des Kapazitätsüberschusses sollte ein Schichtmodell mit mindestens zwei Schichttypen, deren Schichtlängen teilerfremd sind, gewählt werden, da bei diesen Schichtmodellen unabhängig vom Kapazitätsbedarf kein Kapazitätsüberschuss auftritt.
- Es sollten stets so viele Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge wie möglich eingesetzt werden, um dadurch die Gesamtanzahl der benötigten Schichten, also den Personalbedarf, zu minimieren.
- Schichten von Schichttypen mit kürzerer Schichtlänge sollten nur zum Zweck der Minimierung des Kapazitätsüberschusses eingesetzt werden.

- Es sollten stets Schichtmodelle mit mehreren Schichttypen gegenüber Schichtmodellen mit wenigen Schichttypen bevorzugt werden, da bei Schichtmodellen mit mehreren Schichttypen der Personalbedarf invariant gegenüber geringen Schwankungen des Kapazitätsbedarfs ist.

## 11 Numerische Studie zur Evaluation der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung

Die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung zeichnet sich durch eine konstante Kapazität pro Planungsintervall und eine Bearbeitung der Aufträge gemäß aufsteigender Fälligkeitsfristen aus (vgl. Kapitel 4.3). In diesem Kapitel soll die Leistungsfähigkeit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung untersucht werden. Hierzu wird diese mit zwei Alternativstrategien im Rahmen einer numerischen Studie verglichen.

### 11.1 Betrachtete Alternativstrategien

Die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung wird mit folgenden Alternativstrategien verglichen:

- **FIFO**  
Pro Planungsintervall ist eine konstante Kapazität für die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung reserviert. Die Aufträge werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens in der Kommissionierung, also nach aufsteigendem Ankunftszeitpunkt bearbeitet. Die Fälligkeitsfristen der einzelnen Aufträge spielen folglich keine Rolle bei der Festlegung der Bearbeitungsreihenfolge.
- **Strategie der zufälligen Auswahl**  
Pro Planungsintervall ist eine konstante Kapazität für die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung reserviert. Die Aufträge werden in zufälliger Reihenfolge bearbeitet. Die Fälligkeitsfristen der einzelnen Aufträge bleiben folglich unberücksichtigt.

Die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung gemäß der beiden Alternativstrategien wird jeweils anhand eines Simulationsmodells abgebildet. Hierzu wird auf die Struktur des Simulationsmodells zur Abbildung der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung aus Kapitel 6 zurückgegriffen. Es wird lediglich die Logik der Simulationsiteration entsprechend der Prinzipien der jeweiligen Alternativstrategie angepasst.

### 11.2 Design of Experiments

Zur Durchführung der numerischen Studie wird das Design of Experiments genutzt, das für den Modellvergleich von analytischem Modell und Simulationsmodell erzeugt wurde (vgl. Kapitel 7.1.1).

### 11.3 Vergleich der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mit FIFO

Die Strategien der nivellierten Auftragseinlastung und FIFO werden im Folgenden hinsichtlich des  $\alpha$ - und des  $\beta$ -Servicegrads miteinander verglichen. Hierzu wird je Datenpunkt die relative Abweichung des  $\alpha$ -/ $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -/ $\beta$ -Servicegrad bei FIFO berechnet.

#### 11.3.1 Relative Abweichung des $\alpha$ -Servicegrads

Für Kommissioniersysteme mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) werden vernachlässigbar geringe Abweichungen des  $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei FIFO beobachtet (vgl. Abbildung 33 (a), Tabelle 14), da in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung ausreichend Kommissionierleistung zur Verfügung steht, um alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang zu bearbeiten und somit die konkrete Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge keine Rolle spielt.

Tabelle 14: Relative Abweichung des  $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei FIFO.

Auslastung	Mittelwert	Minimum	Maximum	Anzahl
[0.1, 0.2)	0.00%	0.00%	0.00%	4
[0.2, 0.3)	0.00%	0.00%	0.00%	14
[0.3, 0.4)	0.01%	-0.01%	0.18%	18
[0.4, 0.5)	0.03%	0.00%	0.19%	17
[0.5, 0.6)	0.09%	0.00%	0.72%	9
[0.6, 0.7)	1.49%	0.00%	8.74%	14
[0.7, 0.8)	3.02%	0.00%	12.75%	17
[0.8, 0.9)	6.95%	0.00%	40.91%	15
[0.9, 1.0)	53.52%	1.22%	141.07%	12
Gesamt	6.83%	-0.01%	141.07%	120

In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) wird hingegen mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung ein deutlich höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht als mit FIFO, wobei der Vorteil der nivellierten Auftragseinlastung gegenüber FIFO mit steigender Auslastung zunimmt (vgl. Abbildung 33 (a)). Für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.7 und 0.8 wird durch nivellierte Auftragseinlastung im Durchschnitt ein 3% höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht, für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.8 und 0.9 ein durchschnittlich 7% höherer  $\alpha$ -Servicegrad und für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.9 und 1.0 ein durchschnittlich 54% höherer  $\alpha$ -Servicegrad (vgl. Tabelle 14). In Systemen mit hoher Auslastung können nicht alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet werden, so dass deren Bearbeitungsreihenfolge eine entscheidende Bedeutung zukommt. Während FIFO die Aufträge entsprechend ihrer Ankunftszeitpunkte bearbeitet und die Fälligkeitsfristen der Aufträge unberücksichtigt bleiben, werden die Aufträge bei nivellierter Auftragseinlastung in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen bearbeitet. Auf diese Weise vermeidet die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung systematisch das Auftreten von Rückstandsufträgen. Der  $\alpha$ -Servicegrad quantifiziert die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rückstandsufträgen (vgl. Gleichung (51)). Folglich ist der bei nivellierter Auftragseinlastung erreichbare  $\alpha$ -Servicegrad größer als der bei FIFO.

### 11.3.2 Relative Abweichung des $\beta$ -Servicegrads

Für Kommissioniersysteme mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) werden vernachlässigbar geringe Abweichungen des  $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei FIFO beobachtet (vgl. Abbildung 33 (b), Tabelle 15), da in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung ausreichend Kommissionierleistung zur Verfügung steht, um alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang zu bearbeiten und somit die konkrete Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge keine Rolle spielt.

In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) wird hingegen mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung ein höherer  $\beta$ -Servicegrad erreicht als mit FIFO, wobei der Vorteil der nivellierten Auftragseinlastung gegenüber FIFO mit steigender Auslastung zunimmt (vgl. Abbildung 33 (b)). Für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.7 und 0.8 wird durch nivellierte Auftragseinlastung im Durchschnitt ein 0.3% höherer  $\beta$ -Servicegrad erreicht, für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.8 und 0.9 ein durchschnittlich 0.8% höherer  $\beta$ -Servicegrad und für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.9 und 1.0 ein durchschnittlich 2.5% höherer  $\beta$ -Servicegrad (vgl. Tabelle 15). In Systemen mit hoher Auslastung können

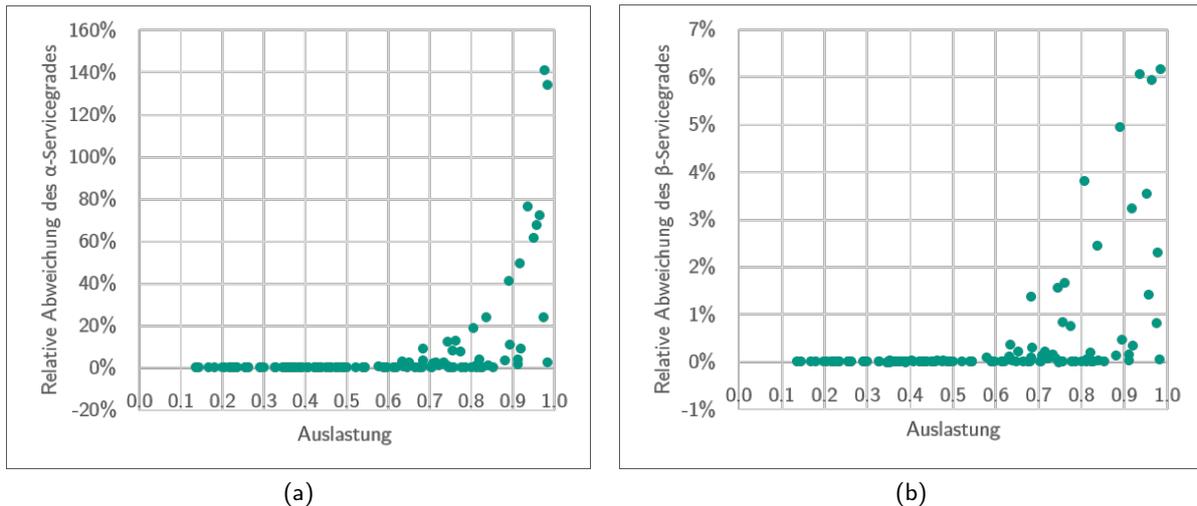


Abbildung 33: Relative Abweichung (a) des  $\alpha$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei FIFO bzw. (b) des  $\beta$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei FIFO.

Tabelle 15: Relative Abweichung des  $\beta$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei FIFO.

Auslastung	Mittelwert	Minimum	Maximum	Anzahl
[0.1, 0.2)	0.00%	0.00%	0.00%	4
[0.2, 0.3)	0.00%	0.00%	0.00%	14
[0.3, 0.4)	0.00%	-0.01%	0.04%	18
[0.4, 0.5)	0.00%	0.00%	0.02%	17
[0.5, 0.6)	0.01%	0.00%	0.10%	9
[0.6, 0.7)	0.18%	0.00%	1.37%	14
[0.7, 0.8)	0.33%	-0.01%	1.65%	17
[0.8, 0.9)	0.81%	0.00%	4.94%	15
[0.9, 1.0)	2.50%	0.04%	6.17%	12
Gesamt	0.42%	-0.01%	6.17%	120

nicht alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet werden, so dass deren Bearbeitungsreihenfolge eine entscheidende Bedeutung zukommt. Während FIFO die Aufträge entsprechend ihrer Ankunftszeitpunkte bearbeitet und die Fälligkeitsfristen der Aufträge unberücksichtigt bleiben, werden die Aufträge bei nivellierter Auftragseinlastung in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen bearbeitet. Auf diese Weise werden bei der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mehr Aufträge fristgerecht bearbeitet als bei FIFO. Der  $\beta$ -Servicegrad quantifiziert den Anteil fristgerecht bearbeiteter Aufträge an der Gesamtanzahl abgehender Aufträge (vgl. Gleichung (52)). Folglich ist der bei nivellierter Auftragseinlastung erreichbare  $\beta$ -Servicegrad höher als der bei FIFO.

## 11.4 Vergleich der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung mit der Strategie der zufälligen Auswahl

Die Strategien der nivellierten Auftragseinlastung und der zufälligen Auswahl werden im Folgenden hinsichtlich des  $\alpha$ - und des  $\beta$ -Servicegrads miteinander verglichen. Hierzu wird je Datenpunkt die relative Abweichung des  $\alpha$ -/ $\beta$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -/ $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl berechnet.

### 11.4.1 Relative Abweichung des $\alpha$ -Servicegrads

Für Kommissioniersysteme mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) werden vernachlässigbar geringe Abweichungen des  $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl beobachtet (vgl. Abbildung 34 (a), Tabelle 16), da in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung ausreichend Kommissionierleistung zur Verfügung steht, um alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang zu bearbeiten und somit die konkrete Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge keine Rolle spielt.

Tabelle 16: Relative Abweichung des  $\alpha$ -Servicegrads bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl.

Auslastung	Mittelwert	Minimum	Maximum	Anzahl
[0.1, 0.2)	0.00%	0.00%	0.00%	4
[0.2, 0.3)	0.00%	0.00%	0.00%	14
[0.3, 0.4)	0.01%	-0.01%	0.16%	18
[0.4, 0.5)	0.01%	0.00%	0.14%	17
[0.5, 0.6)	0.10%	0.00%	0.80%	9
[0.6, 0.7)	1.18%	0.00%	9.47%	14
[0.7, 0.8)	2.88%	0.00%	13.94%	17
[0.8, 0.9)	5.36%	0.00%	36.49%	15
[0.9, 1.0)	23.57%	0.00%	96.29%	12
Gesamt	3.58%	-0.01%	96.29%	120

In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) wird hingegen mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung ein deutlich höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht als mit der Strategie der zufälligen Auswahl, wobei der Vorteil der nivellierten Auftragseinlastung gegenüber der zufälligen Auswahl mit steigender Auslastung zunimmt (vgl. Abbildung 34 (a)). Für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.7 und 0.8 wird durch nivellierte Auftragseinlastung im Durchschnitt ein 3% höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht, für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.8 und 0.9 ein durchschnittlich 5% höherer  $\alpha$ -Servicegrad und für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.9 und 1.0 ein durchschnittlich 24% höherer  $\alpha$ -Servicegrad (vgl. Tabelle 16). In Systemen mit hoher Auslastung können nicht alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet werden, so dass deren Bearbeitungsreihenfolge eine entscheidende Bedeutung zukommt. Während bei der Strategie der zufälligen Auswahl die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge zufällig ist und die Fälligkeitsfristen der Aufträge unberücksichtigt bleiben, werden die Aufträge bei nivellierter Auftragseinlastung in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen bearbeitet. Auf diese Weise vermeidet die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung systematisch das Auftreten von Rückstandsaufträgen. Der  $\alpha$ -Servicegrad quantifiziert die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rückstandsaufträgen (vgl. Gleichung (51)). Folglich ist der bei nivellierter Auftragseinlastung erreichbare  $\alpha$ -Servicegrad höher als der bei zufälliger Auswahl.

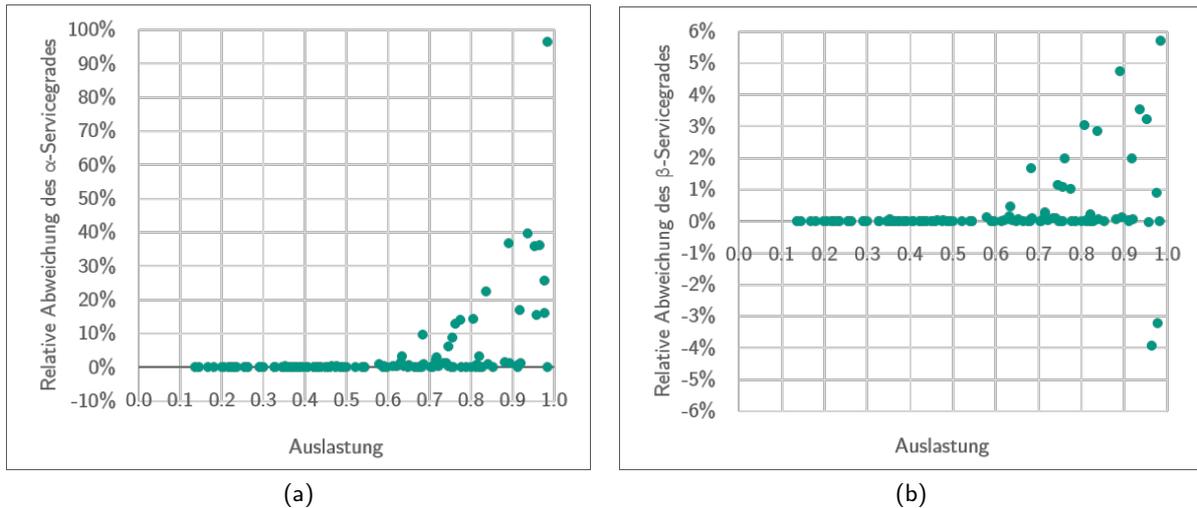


Abbildung 34: Relative Abweichung (a) des  $\alpha$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\alpha$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl bzw. (b) des  $\beta$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl.

#### 11.4.2 Relative Abweichung des $\beta$ -Servicegrades

Für Kommissioniersysteme mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) werden vernachlässigbar geringe Abweichungen des  $\beta$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl beobachtet (vgl. Abbildung 34 (b), Tabelle 17), da in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung ausreichend Kommissionierleistung zur Verfügung steht, um alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragsingang zu bearbeiten und somit die konkrete Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge keine Rolle spielt.

Tabelle 17: Relative Abweichung des  $\beta$ -Servicegrades bei nivellierter Auftragseinlastung vom  $\beta$ -Servicegrad bei zufälliger Auswahl.

Auslastung	Mittelwert	Minimum	Maximum	Anzahl
[0.1, 0.2)	0.00%	0.00%	0.00%	4
[0.2, 0.3)	0.00%	0.00%	0.00%	14
[0.3, 0.4)	0.00%	-0.01%	0.04%	18
[0.4, 0.5)	0.00%	0.00%	0.02%	17
[0.5, 0.6)	0.01%	0.00%	0.12%	9
[0.6, 0.7)	0.19%	0.00%	1.67%	14
[0.7, 0.8)	0.35%	0.00%	1.98%	17
[0.8, 0.9)	0.74%	0.00%	4.73%	15
[0.9, 1.0)	0.68%	-3.94%	5.71%	12
Gesamt	0.23%	-3.94%	5.71%	120

In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) wird hingegen mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung ein höherer  $\beta$ -Servicegrad erreicht als mit der Strategie der zufälligen Auswahl, wobei der Vorteil der nivellierten Auftragseinlastung gegenüber der zufälligen Auswahl mit steigender Auslastung zunimmt (vgl. Abbildung 34 (b)). Für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.7 und 0.8 wird durch nivellierte Auftragseinlastung im Durchschnitt ein 0.4% höherer  $\beta$ -Servicegrad erreicht und für Kommissioniersysteme mit einer Auslastung zwischen 0.8

und 1.0 ein durchschnittlich 0.7% höherer  $\beta$ -Servicegrad (vgl. Tabelle 15). In Systemen mit hoher Auslastung können nicht alle Aufträge unmittelbar nach deren Auftragseingang bearbeitet werden, so dass deren Bearbeitungsreihenfolge eine entscheidende Bedeutung zukommt. Während bei der Strategie der zufälligen Auswahl die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge zufällig ist und die Fälligkeitsfristen der Aufträge unberücksichtigt bleiben, werden die Aufträge bei nivellierter Auftragseinlastung in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen bearbeitet.

Für zwei Datenpunkte des Datensatzes wird mit der Strategie der zufälligen Auswahl ein höherer  $\beta$ -Servicegrad erreicht als mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung (vgl. Abbildung 34 (b)). Es handelt sich hierbei jeweils um Kommissioniersysteme mit hoher Auslastung und einem hohen Anteil unbearbeiteter Rückstandsufträge an der Gesamtanzahl unbearbeiteter Aufträge. In diesen Systemen hat die systematische Abarbeitung der unbearbeiteten Aufträge gemäß aufsteigender Fälligkeitsfristen der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung den negativen Nebeneffekt, dass auf diese Weise nur noch ein geringer Anteil der verfügbaren Kommissionierleistung für die Bearbeitung von Aufträgen ohne Fristüberschreitung zur Verfügung steht. Folglich ist der Anteil fristgerecht bearbeiteter Aufträge an der Gesamtanzahl abgehender Aufträge, also der  $\beta$ -Servicegrad, in derartigen Systemen bei nivellierter Auftragseinlastung gering und mit zufälliger Auswahl kann ein höherer  $\beta$ -Servicegrad erzielt werden.

## 11.5 Fazit

Die numerische Studie zur Evaluation der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung zeigt, dass in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) die Wahl der Einlastungsstrategie einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung hat. In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) kann durch die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung jedoch der erreichbare Servicegrad in der Kommissionierung gesteigert werden:

- Durch nivellierte Auftragseinlastung wird ein im Durchschnitt 18% höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht als bei FIFO.
- Durch nivellierte Auftragseinlastung wird ein im Durchschnitt 9% höherer  $\alpha$ -Servicegrad erreicht als mit der Strategie der zufälligen Auswahl.

Die Ergebnisse der numerischen Studie bestätigen damit die Arbeitshypothese des Forschungsprojekts, dass die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung durch nivellierte Auftragseinlastung gegenüber bisher eingesetzten Auftragseinlastungsstrategien gesteigert werden kann. Im Bezug auf die Kapazitätsplanung folgt daraus, dass bei nivellierter Auftragseinlastung der Kapazitätsbedarf zur Gewährleistung eines bestimmten geforderten Servicegrades geringer ist als der bei FIFO oder bei zufälliger Auswahl benötigte Kapazitätsbedarf.

## 12 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

### 12.1 Zusammenfassung

Die Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung wird anhand der Parameter Auftragseingangsvolumen pro Planungsintervall, Vorlaufzeit eines Auftrags, Bearbeitungsleistung pro Zeiteinheit und bereitgestellte Kapazität formal beschrieben. Zur Ableitung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der stochastischen Parameter Auftragseingangsvolumen, Vorlaufzeit und Bearbeitungsleistung aus den vorliegenden Realdaten werden in Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlage die Ansätze des Histogramms und der parametrischen Verteilungsannahme genutzt.

Die entwickelte Strategie der nivellierten Auftragseinlastung zur zeitlichen Glättung der Arbeitslast in der Kommissionierung basiert auf den Grundideen der Heijunka-Nivellierung in der Produktion und den spezifischen Anforderungen der Kommissionierung und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: Je Planungsintervall ist eine feste Kapazität für die Auftragsbearbeitung reserviert. Diese wird je Planungsintervall eingesetzt, um die aktuell vorliegenden Aufträge in der Reihenfolge aufsteigender Fälligkeitsfristen zu bearbeiten.

Zur Leistungsanalyse eines gegebenen Kommissioniersystems mit nivellierter Auftragseinlastung werden basierend auf einer zeitdiskreten Markov-Kette verschiedene Leistungskenngrößen, wie beispielsweise Durchsatz, Auslastung, Servicegrad, exakt berechnet.

Zur Bestimmung des benötigten Personalbedarfs in der Kommissionierung wird zunächst im Rahmen der Kapazitätsplanung mithilfe eines modifizierten binären Suchalgorithmus die Kapazität bestimmt, die zur Gewährleistung einer bestimmten geforderten Leistungsfähigkeit in der Kommissionierung benötigt wird. Der ermittelte Kapazitätsbedarf wird dann über den Zwischenschritt der Schichtplanung zunächst in die Anzahl benötigter Schichten und abschließend in die Anzahl benötigter Mitarbeiter umgerechnet.

Aus den Ergebnissen einer numerischen Studie zur Arbeitszeitflexibilisierung in der Kommissionierung lassen sich verschiedene Handlungsempfehlungen für die Gestaltung des Arbeitszeitmodells in der Kommissionierung ableiten: So sollte beispielsweise zur Minimierung des Kapazitätsüberschusses ein Schichtmodell mit mindestens zwei Schichttypen eingesetzt werden, dessen Schichtlängen teilerfremd sind und es sollten stets so viele Schichten des Schichttyps der längsten Schichtlänge wie möglich eingesetzt werden, um dadurch den Personalbedarf zu minimieren.

Die Ergebnisse einer numerischen Studie zur Evaluation der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung zeigen, dass in Systemen mit geringer und mittlerer Auslastung (Auslastung kleiner als 0.7) die Wahl der Einlastungsstrategie keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung hat. In Kommissioniersystemen mit hoher Auslastung (Auslastung von mindestens 0.7) kann durch die Strategie der nivellierten Auftragseinlastung jedoch der erreichbare Servicegrad in der Kommissionierung gesteigert werden: Durch nivellierte Auftragseinlastung wird ein im Durchschnitt 18% höherer  $\alpha$ -Servicegrad im Vergleich zu FIFO und ein im Durchschnitt 9% höherer  $\alpha$ -Servicegrad im Vergleich zur Strategie der zufälligen Auswahl erreicht.

Abbildung 35 gibt einen Überblick über die im Rahmen des Forschungsprojekts thematisierten Fragestellungen und die hierzu entwickelten Methoden und Verfahren sowie die wesentlichen durchgeführten numerischen Studien.

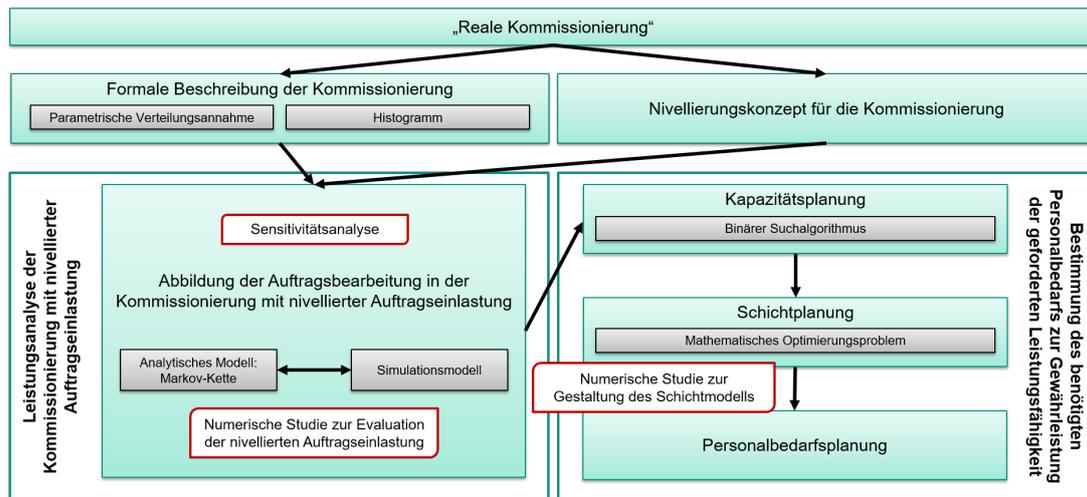


Abbildung 35: Ergebnisse und Lösungsweg des Forschungsprojekts.

## 12.2 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen deren Zielen gegenübergestellt:

### 12.2.1 Arbeitspaket 1: Ablaufmodellierung zur Nivellierung in der Kommissionierung

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines allgemeingültigen Nivellierungskonzepts der Kommissionierung.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Literaturrecherche zu folgenden Themen: Auftragsbelastungsstrategien in der Kommissionierung und in der Produktion, Heijunka-Nivellierung in der Produktion, Methoden zur Arbeitszeitgestaltung und -flexibilisierung;
- Konzeption eines Fragebogens für die Durchführung einer Unternehmensbefragung zur Erfassung der gängigen Ansätze der Auftragsbelastung, der Personalbedarfsplanung, der Arbeitszeitflexibilisierung und der Umsetzung der Nivellierung in der Kommissionierung;
- Durchführung der Unternehmensbefragung in Form von Einzelinterviews mit zehn Mitarbeitern (mit/ohne Leitungsfunktion) der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses;
- Auswertung der Ergebnisse der Unternehmensbefragung;
- Entwicklung eines Nivellierungskonzepts für die Kommissionierung unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Unternehmensbefragung und der Literaturrecherche.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind in den Kapiteln 2 und 4.1 dargestellt. Der entwickelte Fragebogen für die Unternehmensbefragung findet sich in Anhang A. Die entwickelte Strategie der nivellierten Auftragsbelastung ist in Kapitel 4.3 dargestellt.

### **12.2.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung eines Methodenkatalogs zur Generierung der benötigten Parameter aus den Realdaten**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines Methodenkatalogs, der Methoden zur Ableitung diskreter Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus den verfügbaren Realdaten bereitstellt.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Erfassung der verfügbaren Datengrundlage für die Planung der Auftragseinlastung in der Kommissionierung im Rahmen der Unternehmensbefragung;
- Definition verschiedener Datengrundlage-Szenarien auf Basis der Ergebnisse der Unternehmensbefragung;
- Entwicklung einer spezifischen Vorgehensweise je Datengrundlage-Szenario zur Ableitung einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung aus den vorliegenden Realdaten je Datengrundlage-Szenario.

Die identifizierten Datengrundlage-Szenarien und der entwickelte Methodenkatalog sind in Kapitel 3.2 dargestellt.

### **12.2.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung eines analytischen Modells zur Nivellierung in der Kommissionierung**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines Modells zur Abbildung der Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung und zu deren exakter Leistungsanalyse anhand verschiedener Leistungskenngrößen. Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Mathematische Modellierung der Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung als zeitdiskrete Markov-Kette;
- Definition verschiedener systembezogener und kundenorientierter Leistungskenngrößen der Kommissionierung auf Basis der stationären Verteilung der Markov-Kette;
- Implementierung der Markov-Kette inkl. Leistungskenngrößen in der Programmiersprache Java;
- Entwicklung der graphischen Benutzeroberfläche des Software-Tools.

Die zeitdiskrete Markov-Kette zur Abbildung und Leistungsanalyse der Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung ist in Kapitel 5 dargestellt. Die Implementierung der Markov-Kette inkl. Leistungskenngrößen steht als Software-Tool mit graphischer Benutzeroberfläche zur Verfügung.

### **12.2.4 Arbeitspaket 4: Erweiterung des Modells zur Bestimmung der benötigten Personalkapazitäten**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erweiterung der Markov-Kette um ein geeignetes Modell zur Bestimmung des benötigten Personalbedarfs in der Kommissionierung.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Literaturrecherche zu folgenden Themen: Suchalgorithmen und Blackbox Optimierungsverfahren;
- Identifikation von Kriterien für die Auswahl geeigneter Verfahren zur Kapazitätsplanung in der Kommissionierung;

- Kriteriengestützte Auswahl geeigneter Verfahren zur Kapazitätsplanung in der Kommissionierung;
- Problemspezifische Modifikation und Implementierung der geeigneten Verfahren in der Programmiersprache Java und Integration in das Software-Tool;
- Durchführung und Auswertung einer numerischen Studie zum Vergleich der verschiedenen Verfahren hinsichtlich ihrer Laufzeiteffizienz;
- Modellierung der Schichtplanung in der Kommissionierung als mathematisches Optimierungsproblem;
- Berechnung des benötigten Personalbedarfs auf Basis des aus der Schichtplanung resultierenden Schichtplans.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und die kriteriengestützte Auswahl geeigneter Verfahren zur Kapazitätsplanung sind in Kapitel 8.2 dargestellt. Die numerische Studie zum Vergleich der verschiedenen Verfahren (vgl. Kapitel 8.3) kommt zu dem Ergebnis, dass der binäre Suchalgorithmus am besten für die Kapazitätsplanung in der Kommissionierung geeignet ist. Das mathematische Optimierungsproblem zur Schichtplanung wird in Kapitel 9.1 vorgestellt und die Berechnung des benötigten Personalbedarfs wird in Kapitel 9.2 thematisiert.

#### **12.2.5 Arbeitspaket 5: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Validierung des analytischen Modells**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines Simulationsmodells und die Validierung der Markov-Kette anhand eines Modellvergleichs mit der Simulation sowie anhand einer Sensitivitätsanalyse.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung der Auftragsbearbeitung in der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung, Berechnung verschiedener systembezogener und kundenorientierter Leistungskenngrößen der Kommissionierung auf Basis der Simulationsergebnisse;
- Implementierung des Simulationsmodells in der Programmiersprache Java;
- Validierung der Markov-Kette anhand eines Modellvergleichs mit dem Simulationsmodell;
- Validierung der Markov-Kette anhand einer Sensitivitätsanalyse.

Das entwickelte Simulationsmodell wird in Kapitel 6 vorgestellt. Die Ergebnisse des Modellvergleichs von Markov-Kette und Simulationsmodell (vgl. Kapitel 7.1) und der Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 7.2) bestätigen die Validität der Markov-Kette.

#### **12.2.6 Arbeitspaket 6: Numerische Studie, Erstellung eines Leitfadens zur Arbeitszeitgestaltung in der Kommissionierung**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Erstellung eines Leitfadens zur geeigneten Gestaltung und Flexibilisierung der Arbeitszeit in der Kommissionierung.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Erstellung eines Versuchsplans zur Untersuchung des Einflusses der Gestaltung des Arbeitszeitmodells;

- Durchführung und Auswertung einer numerischen Studie zur Untersuchung des Einflusses der Gestaltung des Arbeitszeitmodells;
- Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Gestaltung des Arbeitszeitmodells in der Kommissionierung aus den Ergebnissen der numerischen Studie.

Die Konzeption und die Ergebnisse der numerischen Studie sowie die aus deren Ergebnissen abgeleiteten Handlungsempfehlungen sind in Kapitel 10 dargestellt.

### **12.2.7 Arbeitspaket 7: Veröffentlichung und Dokumentation**

Ziel dieses Arbeitspakets war die fortlaufende Dokumentation und die Veröffentlichung von Projektergebnissen.

Die zur Erreichung dieses Ziels durchgeführten Arbeiten werden in Kapitel 12.6 im Detail dargestellt.

## **12.3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen sowie industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Mit den Ergebnissen des Forschungsprojekts werden bisher in der Forschung unbeantwortete Fragestellungen thematisiert: Das Konzept der Nivellierung, das im Produktionskontext in Theorie und Praxis ein bereits weit verbreiteter Ansatz zur Glättung der schwankenden Kundennachfrage ist, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts erstmalig als Strategie zur Glättung der Arbeitslast in Distributionszentren eingesetzt. Außerdem wurden ein allgemeingültiges, exaktes analytisches Modell zur Leistungsanalyse der Auftragsbearbeitung bei nivellierter Auftragseinlastung und Verfahren zur Kapazitäts- und Personalbedarfsplanung in der Kommissionierung entwickelt.

Der innovative Beitrag des Forschungsvorhabens umfasst das entwickelte allgemeingültige Nivellierungskonzept für die Kommissionierung, das exakte analytische Modell zur Leistungsanalyse der Auftragsbearbeitung bei nivellierter Auftragseinlastung und das Verfahren zur Personalbedarfsplanung in der Kommissionierung. Letzteres ermöglicht durch die Berücksichtigung der stochastischen Einflussfaktoren der Kommissionierung und der an die Kommissionierung gestellte Leistungsanforderung eine realistische und zielorientierte Ermittlung der benötigten Personalkapazitäten.

Der wirtschaftliche Nutzen resultiert unmittelbar aus der wirtschaftlichen und praktischen Relevanz der Forschungsergebnisse. Das entwickelte Nivellierungskonzept für die Kommissionierung ist ein allgemeingültiger, frei zugänglicher Standard, der es Unternehmen unabhängig von deren Erfahrungswissen ermöglicht, die Auftragseinlastung in den eigenen Kommissioniersystemen zu nivellieren und damit von der Vorteilhaftigkeit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung zu profitieren: Bei nivellierter Auftragseinlastung wird im Vergleich zu alternativen Einlastungsstrategien mit gegebener Kapazität ein höherer Servicegrad erreicht bzw. kann ein geforderter Servicegrad mit geringerem Kapazitätsbedarf gewährleistet werden (vgl. Kapitel 11). Die entwickelten Modelle zur Leistungsanalyse der Kommissionierung mit nivellierter Auftragseinlastung und zur Kapazitätsplanung stehen den Unternehmen als Software-Tool zur Verfügung und können von diesen zum einen zum Benchmarking der eigenen Kommissioniersysteme und zur Identifikation und Quantifizierung von Verbesserungspotentialen durch die Einführung einer nivellierten Auftragseinlastung in der eigenen Kommissionierung genutzt werden. Zum anderen stellen die Modelle einen direkten Zusammenhang zwischen der in der Kommissionierung eingesetzten Kapazität und der damit erreichbaren Leistungsfähigkeit her und ermöglicht auf diese Weise mittels des binären Suchalgorithmus eine zielgerichtete Kapazitätsplanung in der Kommissionierung. Für eine beliebige Leistungsanforderung der Kommissionierung, z.B. einen Servicegrad von 99%, kann der hierfür benötigte Kapazitätsbedarf bestimmt werden. Schließlich stellt der Leitfaden zur Arbeitszeitgestaltung allgemeingültige und frei zugängliche Handlungsempfehlungen

zur Gestaltung des Arbeitszeitmodells in der Kommissionierung zur Verfügung, die den Unternehmen unabhängig von deren Erfahrungswissen eine effiziente Personalbedarfsplanung ermöglicht.

Die Forschungsergebnisse bieten insbesondere für KMU Logistikdienstleister und Logistikabteilungen produzierender KMUs einen Mehrwert, da diese in der Regel begrenzte Möglichkeiten für den Zugang und die Nutzung spezifischer Logistik-Planungssoftware sowie für den Einkauf externer Beratungsleistungen zur Optimierung des Lagerbetriebs haben. Dies trifft insbesondere für Logistikabteilungen produzierender KMUs zu, wo die Logistik nicht zur Kernkompetenz des Unternehmens zählt.

## 12.4 Verwendung der zugewendeten Mittel

### 12.4.1 Personalausgaben für wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1. des Finanzierungsplans)

Um die geforderten Forschungsinhalte zu erarbeiten, bedurfte es in den sieben Arbeitspaketen des Forschungsprojekts eines wissenschaftlichen Mitarbeiters mit qualifizierter akademischer Ausbildung. Es wurde ein Mitarbeiter der Einstufung TV-L13 mit der Bearbeitung des Forschungsprojekts beauftragt. Der benötigte Gesamtbedarf betrug 24 PM und entsprach damit dem geplanten Gesamtbedarf. Die Verteilung des Gesamtbedarfs auf die Projektlaufzeit weicht in zwei Punkten von der im Antrag vorgesehenen Aufteilung ab: Für Arbeitspaket 1 wurden lediglich 3,5 PM der geplanten 4 PM benötigt, da bei der Literaturrecherche in Arbeitspaket 1 teilweise auf Ergebnisse von vorliegenden Abschlussarbeiten zurückgegriffen werden konnte. Zur Bearbeitung von Arbeitspaket 3 wurden hingegen statt der geplanten 6 PM 6,5 PM benötigt, da die Implementierung der Markov-Kette komplizierter und zeitintensiver war als geplant und weniger Teilaufgaben der Implementierung durch Hilfskräfte übernommen werden konnten als geplant. Die Aufschlüsselung der Personalausgaben für wissenschaftlich-technisches Personal ist im Detail in Abbildung 36 dargestellt.

AP	2019												2020												2021	WiMa	HiWi
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1			
1																									3.5	0	
2																									3	0.58	
3																									6.5	0.58	
4																									3	1.1	
5																									4	2.2	
6																									3	1.65	
7																									1	0.55	
																									<b>24</b>	<b>6.66</b>	

Abbildung 36: Zeitplan des Forschungsprojekts und Übersicht über Personalausgaben für wissenschaftlich-technisches Personal und Hilfskräfte.

### 12.4.2 Personalausgaben für Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)

Zur Unterstützung bei sich wiederholenden Tätigkeiten und Routinearbeiten sowie bei der Implementierung der grafischen Oberfläche des Software-Tools und des Simulationsmodells wurden während der Projektlaufzeit studentische Hilfskräfte eingesetzt. Die Hilfskräfte wurden hierbei, abweichend vom Antrag, nicht in allen Phasen des Forschungsprojekts in gleichem Umfang benötigt. Gründe hierfür waren, dass insbesondere zu Beginn des Forschungsprojekts bei der Entwicklung der Methoden und Konzepte in den Arbeitspaketen 1-3 weniger Tätigkeiten für Hilfskräfte anfielen als geplant. In der zweiten Projekthälfte wurden dann verstärkt Hilfskräfte für unterstützende Tätigkeiten bei der Implementierung des Simulationsmodells und vor allem bei der Entwicklung und Implementierung der grafischen Oberfläche des Software-Tools eingesetzt. Außerdem unterstützten die Hilfskräfte bei der

Durchführung und Auswertung der numerischen Studien. Der bewilligte Budgetrahmen wurde nicht überschritten. Die Aufschlüsselung der Personalausgaben für Hilfskräfte ist im Detail in Abbildung 36 dargestellt.

#### **12.4.3 Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Geräte wurden für das Vorhaben nicht beantragt und nicht angeschafft.

#### **12.4.4 Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Leistungen Dritter wurden für das Vorhaben nicht beantragt und nicht in Anspruch genommen.

### **12.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit resultiert aus der Praxisrelevanz der im Forschungsprojekt thematisierten Problemstellung und der Forschungslücke in der Literatur. Die Ergebnisse der Unternehmensbefragungen bestätigten, dass der Umgang mit der stark schwankenden Kundennachfrage die zentrale Herausforderung in der Kommissionierung ist und dass es bisher keinen allgemeingültigen Nivellierungsstandard zur Glättung der Kundennachfrage in der Kommissionierung gibt. Auch in der Forschung wurde die Fragestellung der Nivellierung in der Kommissionierung bisher nicht thematisiert (vgl. Antrag des Forschungsprojekts).

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit resultiert aus der gewissenhaften und vollständigen Bearbeitung der Arbeitspakete zur Erreichung des Forschungsziels anhand jeweils geeigneter wissenschaftlicher Methoden. Die geleisteten Arbeiten entsprachen dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag und waren daher für die Bearbeitung des Forschungsprojekts notwendig und angemessen.

### **12.6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts stehen allen beteiligten Projektpartnern sowie der Öffentlichkeit zur Verfügung. Hierbei handelt es sich im Einzelnen um

- Allgemeingültiges Nivellierungskonzept für die Kommissionierung in Form der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung;
- Software-Tool mit grafischer Benutzeroberfläche zur
  - Exakten Berechnung der erreichbaren Leistungsfähigkeit bei Einsatz der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung in einem gegebenen Kommissionersystem und dadurch Beurteilung der Leistungsfähigkeit der aktuell eingesetzten Einlastungsstrategie durch Benchmarking mit der Strategie der nivellierten Auftragseinlastung;
  - Zielorientierten Bestimmung des benötigten Personalbedarfs in der Kommissionierung zur Gewährleistung einer bestimmten geforderten Leistungsfähigkeit, z.B. eines Servicegrads von 99%;
- Leitfaden mit Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Arbeitszeitmodells in der Kommissionierung.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden über vielfältige Informationskanäle publiziert. Die konkret durchgeführten sowie die noch geplanten Transfermaßnahmen inklusive der Einschätzung deren Realisierbarkeit sind in den Tabellen 18 und 19 im Detail dargestellt.

Tabelle 18: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Verbreitung der Ergebnisse auf Fachveranstaltungen	Publik machen des Ziels sowie des aktuellen Standes für ein breites Fachpublikum	Conference on Stochastic Models of Manufacturing and Service Operations (SMMSO)	09.06.-14.06.2019, Goslar
Verbreitung der Ergebnisse durch Veröffentlichungen	Publik machen des Vorgehens und der Ergebnisse für ein breites Fachpublikum	Veröffentlichung in Logistics Research	2020
KIT-Homepage	Zeitnahe Information des Interessentenkreises über Ergebnisse	Publikation des aktuellen Stands auf der Homepage des KIT	kontinuierlich
		Publikation der Ergebnisse auf der Homepage des KIT	02/2021
Ergebnistransfer durch die Unterstützung der BVL	Erreichen eines breiten Publikums mit Logistikbezug	Bereitstellung von Zwischenergebnissen für die Projektseiten der BVL	kontinuierlich
Präsentation in Lehrveranstaltungen	Vermittlung aktueller Forschungserkenntnisse an Studierende	Modellvorstellung im Rahmen der Vorlesung „Lager- und Distributionssysteme“	SS 2020
Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit dem projektbegleitenden Ausschuss	Einholen des Feedbacks und der Hinweise zum bisherigen und aktuellen Vorgehen von Vertretern aus der Praxis	Vorstellung der Ergebnisse aus den jeweiligen Arbeitspaketen und Diskussion des geplanten Vorgehens	29.05.2019 14.11.2019 13.05.2020 12.11.2020
		Abschlusspräsentation und Diskussion der Ergebnisse	10.02.2021
Verwendung der aktuellen Ergebnisse aus der Forschung	Transfer der Ergebnisse in die Praxis durch Nutzung und damit Weitergabe der Ergebnisse bei der Beratung von Unternehmen	Nutzung im Rahmen der Beratung von Unternehmen	laufend

Tabelle 19: Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Zeitraum	Einschätzung der Realisierbarkeit
Präsentation in Lehrveranstaltungen	Vermittlung aktueller Forschungserkenntnisse an Studierende	Übernahme der Formeln und deren Herleitung in die Veranstaltung „Mathematische Modelle und Methoden für Produktionssysteme“	WS 2021/22	Projektleiterin ist im WS 2021/22 Übungsleiterin dieser Veranstaltung, Übungsleiterin hat die Möglichkeit die Formeln an geeigneter Stelle im Vorlesungsplan vorzustellen.
Verbreitung der Ergebnisse durch Veröffentlichungen	Publik machen des Vorgehens und der Ergebnisse für ein breites Fachpublikum	Veröffentlichung in Logistics Research	2021	Erstfassung der Veröffentlichung ist erstellt
Ergebnistransfer in die Wirtschaft mit Hilfe der BVL	Erreichen eines breiten Publikums mit Logistikbezug	Schlussbericht wird der BVL zur Veröffentlichung zur Verfügung gestellt	2021	Schlussbericht des Forschungsprojekts ist über Homepage der BVL und des Instituts IFL öffentlich zugänglich
Newsletter	Schnelle Verbreitung über elektronische Newsletter	Zusammenfassung der Ergebnisse wird an die BVL und Logistik-Heute gesendet	2021	Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist auf Basis des Schlussberichts zugänglich möglich.
Verwendung der aktuellen Ergebnisse aus der Forschung	Transfer der Ergebnisse in die Praxis durch Nutzung und damit Weitergabe der Ergebnisse bei der Beratung von Unternehmen	Nutzung im Rahmen der Beratung von Unternehmen	laufend	Das IFL führt jedes Jahr zahlreiche Industrieprojekte u.a. zum Thema der Materialflussoptimierung in Logistik- und Produktionssystemen durch.

## 12.7 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden folgende Veröffentlichungen bzw. Working Paper, deren Veröffentlichung bevorsteht:

- U. Mohring, M. Baumann und K. Furmans. „Discrete-time Analysis of Levelled Order Release and Staffing in Order Picking Systems.“ In: *Logistics Research*, 13.9 (2020), S. 1.
- U. Mohring, K. Furmans. „Evaluation of Strategy of Levelled Order Release in Order Picking Systems.“ Working Paper.

## 12.8 Durchführende Forschungsstelle

### Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Das Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme hat seinen Schwerpunkt in der Entwicklung und Verbesserung von Analyse- und Planungsmethoden für logistische Prozesse und Systeme. Es kommen dabei analytische Methoden der Bedientheorie und der linearen Optimierung zum Einsatz, aber auch simulative Methoden werden insbesondere bei der Analyse umfangreicher und komplexer Systeme angewendet. Es wurden bereits mathematische Modelle zur Abbildung der nivellierten Auftragseinlastung in der Produktion, zur Durchsatzanalyse manueller Kommissioniersysteme und Methoden zur systematischen Bewertung von Lager- und Distributionssystemen (DCRM) entwickelt.

<b>Anschrift</b>	Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme Karlsruher Institut für Technologie Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe
<b>Leiter der Forschungsstelle</b>	Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
<b>Projektleitung</b>	M.Sc. Uta Mohring

## 12.9 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20509 N („NivKom“) der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V., Schlachte 31, 28195 Bremen, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

## 13 Literatur

- [1] T. Van Gils, K. Ramaekers, A. Caris und R. B. de Koster. „Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review“. In: *European Journal of Operational Research* 267.1 (2018), S. 1–15.
- [2] N. Boysen, R. de Koster und F. Weidinger. „Warehousing in the e-commerce era: A survey“. In: *European Journal of Operational Research* 277.2 (2019), S. 396–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.08.023.
- [3] U. Mohring, M. Baumann und K. Furmans. „Discrete-Time Analysis of Levelled Order Release and Staffing in Order Picking Systems“. In: *Logistics Research* 13.9 (2020), S. 1.
- [4] VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1. *Kommissioniersysteme Grundlagen, Definitionen*. Verband Deutscher Ingenieure e.V. Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [5] T. Gudehus. *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. Studienausgabe der 4., aktualisierten. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2012.
- [6] M. ten Hompel, V. Sadowsky und M. Beck. *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2011.
- [7] J. Gallien und T. Weber. „To Wave or Not to Wave? Order Release Policies for Warehouses with an Automated Sorter“. In: *Manufacturing & Service Operations Management* 12.4 (2010), S. 642–662. DOI: 10.1287/msom.1100.0291.
- [8] E. Çeven und K. R. Gue. „Optimal Wave Release Times for Order Fulfillment Systems with Deadlines“. In: *Transportation Science* 51.1 (2017), S. 52–66. DOI: 10.1287/trsc.2015.0642.
- [9] D. Arnold und K. Furmans. *Materialfluss in Logistiksystemen*. 7. Auflage. Springer eBooks. Berlin: Springer Vieweg, [2019].
- [10] C. Schulte. *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Franz Vahlen, 2017. DOI: 10.15358/9783800651191.
- [11] D. Holtbrügge. *Personalmanagement*. 7. Aufl. 2018. SpringerLink. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2018.
- [12] J. Hentze, A. Kammel und A. Graf. *Personalwirtschaftslehre 1: Grundlagen, Personalbedarfsermittlung, -beschaffung, -entwicklung und -einsatz*. 7., überarbeitete. Bern: Haupt, 2001.
- [13] B. Scherf. „Bedarfsorientierte Personaleinsatzplanung in der Logistik“. In: *Personalführung in der Logistik*. Hrsg. von H.-C. Pfohl. Wirtschaft & Logistik. Hamburg: DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verlag, 2009, S. 189–215.
- [14] VDI-Richtlinie 4481. *Personalbedarfsermittlung in der Kommissionierung*. Verband Deutscher Ingenieure e.V. Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [15] BMVJ. *Arbeitszeitgesetz: ArbZG*. 6. Juni 1994.
- [16] G. Zuelch, P. Stock und T. Bogus, Hrsg. *Arbeitszeitflexibilisierung im Dienstleistungsbereich. Beiträge zu einem Workshop im Rahmen des BMBF-Projektes FAZEM am 19. März 2002 in Karlsruhe*. Aachen 2002. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe. 28.) 2002.
- [17] S. Stippler, A. Schopen, S. Pierenkemper und D. Werner. *Flexible Arbeitszeitmodelle: Handlungsempfehlung*. Hrsg. von Institut der deutschen Wirtschaft Köln, e.V. 2015.
- [18] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Hrsg. *Flexible Arbeitszeitmodelle - Überblick und Umsetzung*. Dortmund, 2017. DOI: 10.21934/baua:praxis20170719.

- [19] Dr. Mortsiefer Management Consulting GmbH, Hrsg. *Intelligentes Personalmanagement für die Logistikbranche NRW, Personalmanagement-Tools: Arbeitszeitmodelle*. zuletzt aufgerufen am 10.03.2021. URL: [http://www.ip1-nrw.de/de/Instrumenten-Box/Personalmanagement-Tools\\_2/Arbeitsgestaltung/Arbeitszeitmodelle\\_3.htm](http://www.ip1-nrw.de/de/Instrumenten-Box/Personalmanagement-Tools_2/Arbeitsgestaltung/Arbeitszeitmodelle_3.htm).
- [20] BMVJ. *Gemeinsame Vorschriften für die Sozialversicherung - § 8 Geringfügige Beschäftigung und geringfügige selbständige Tätigkeit*. 23. Dezember 1976.
- [21] K. Lange und C. Bässler. *Flexible Arbeitszeit - von der Idee zur Wirklichkeit: Arbeitspapier No. 31*. Hrsg. von Hans-Böckler-Stiftung. Düsseldorf, 2000.
- [22] BMVJ. *Gesetz über Teilzeitarbeit und befristete Arbeitsverträge: TzBfG*. 21. Dezember 2000.
- [23] R. Qin, D. A. Nembhard und W. L. Barnes II. „Workforce flexibility in operations management“. In: *Surveys in Operations Research and Management Science* 20.1 (2015), S. 19–33.
- [24] S. Wanger. *Flexible Arbeitszeitmodelle*. Arbeitsrecht und Personal Laufendes Arbeitsverhältnis. Hamburg: Dashöfer, 2006.
- [25] A. Trost, Hrsg. *Employer Branding: Arbeitgeber positionieren und präsentieren*. Personalwirtschaft. Köln: Luchterhand, 2009.
- [26] P. A. Reilly. „Balancing Flexibility—Meeting the Interests of Employer and Employee“. In: *European Journal of Work and Organizational Psychology* 7.1 (1998), S. 7–22. DOI: 10.1080/135943298398934.
- [27] R. Marr und W. J. Baur, Hrsg. *Arbeitszeitmanagement: Grundlagen und Perspektiven der Gestaltung flexibler Arbeitszeitsysteme*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Schmidt, 2001.
- [28] E. Hildebrandt. „Balance von Arbeit und Leben – Neue Zumutungen oder Chance für mehr Lebensqualität?“ In: *Arbeit* 13.4 (2004). DOI: 10.1515/arbeit-2004-0403.
- [29] A. M. Law. *Simulation modeling and analysis*. 5. ed., international ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [30] The SciPy Community. *numpy.histogram-bin-edges*. zuletzt aufgerufen am 17.02.2021. URL: [https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.histogram\\_bin\\_edges.html#numpy.histogram\\_bin\\_edges](https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.histogram_bin_edges.html#numpy.histogram_bin_edges).
- [31] J. K. Liker. *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [32] T. N. Dhamala und W. Kubiak. „A brief survey of just-in-time sequencing for mixed-model systems“. In: *International Journal of Operations Research* 2.2 (2005), S. 38–47.
- [33] N. Boysen, M. Fliedner und A. Scholl. „Level Scheduling for batched JIT supply“. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 21.1-2 (2009), S. 31–50. DOI: 10.1007/s10696-009-9058-z.
- [34] J. Matzka, M. Di Mascolo und K. Furmans. „Buffer sizing of a Heijunka Kanban system“. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 23.1 (2012), S. 49–60. DOI: 10.1007/s10845-009-0317-3.
- [35] K. Furmans und M. Veit. „Models of Leveling for Lean Manufacturing Systems“. In: *Handbook of stochastic models and analysis of manufacturing system operations*. Hrsg. von J. M. Smith und B. Tan. New York, NY: Springer, 2013, S. 115–138.
- [36] P. Dehdari. „Measuring the Impact of Lean Techniques on Performance Indicators in Logistics Operations“. PhD thesis. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2014.
- [37] R. de Koster, T. Le-Duc und K. J. Roodbergen. „Design and control of warehouse order picking: A literature review“. In: *European Journal of Operational Research* 182.2 (2007), S. 481–501. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.07.009.

- [38] G. Marchet, M. Melacini und S. Perotti. „Investigating order picking system adoption: a case-study-based approach“. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 18.1 (2015), S. 82–98.
- [39] T. van Gils, K. Ramaekers, A. Caris und M. Cools. „The use of time series forecasting in zone order picking systems to predict order pickers' workload“. In: *International Journal of Production Research* 55.21 (2017), S. 6380–6393. DOI: 10.1080/00207543.2016.1216659.
- [40] C. Becker und A. Scholl. „A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing“. In: *European journal of operational research* 168.3 (2006), S. 694–715.
- [41] K. Furmans. „Models of heijunka-levelled kanban-systems“. In: *5th International Conference on Analysis of Manufacturing Systems-Production and Management*. 2005, S. 243–248.
- [42] C. R. Lippolt und K. Furmans. „Sizing of Heijunka-controlled Production Systems with Unreliable Production Processes“. In: *Lean Business Systems and Beyond*. Hrsg. von T. Koch. Boston, MA: International Federation for Information Processing, 2008, S. 11–20.
- [43] M. Schleyer. „Discrete time analysis of batch processes in material flow systems“. PhD thesis. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2007.
- [44] W. J. Stewart. *Introduction to the numerical solution of Markov chains*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1994.
- [45] M. Schleyer und K. Furmans. „An analytical method for the calculation of the waiting time distribution of a discrete time G/G/1-queueing system with batch arrivals“. In: *OR Spectrum* 29.4 (2007), S. 745–763.
- [46] K.-H. Waldmann und U. M. Stocker. *Stochastische Modelle: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2., überarb. und erw. Aufl. EMIL@A-stat Medienreihe zur angewandten Statistik. Berlin: Springer, 2013.
- [47] G. Bolch. *Queueing networks and Markov chains: Modeling and performance evaluation with computer science applications*. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.
- [48] M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik : Vorgehensmodelle und Techniken*. 1. Aufl. VDI-BuchSpringerLink. Berlin: Springer, 2008.
- [49] T. J. Santner. *The Design and Analysis of Computer Experiments*. Hrsg. von B. J. [ Williams und W. I. [ Notz. 2nd ed. 2018. Springer Series in StatisticsSpringerLink. New York, NY: Springer New York, 2018.
- [50] C. Audet. *Derivative-Free and Blackbox Optimization*. Hrsg. von W. Hare. Springer Series in Operations Research and Financial EngineeringSpringerLink. Cham: Springer, 2017.
- [51] M. Lübbecke. *Vollständige Enumeration*. Hrsg. von Gabler Wirtschaftslexikon. 2018. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/vollstaendige-enumeration-48102/version-271360>.
- [52] T. Ottmann. *Algorithmen und Datenstrukturen*. Hrsg. von P. Widmayer. 6. Aufl. 2017. SpringerLink. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [53] T. G. Kolda, R. M. Lewis und V. Torczon. „Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods“. In: *SIAM review* 45.3 (2003), S. 385–482.
- [54] C. Audet. „A survey on direct search methods for blackbox optimization and their applications“. In: *Mathematics without boundaries* (2014), S. 31–56.
- [55] A. I. Forrester und A. J. Keane. „Recent advances in surrogate-based optimization“. In: *Progress in aerospace sciences* 45.1-3 (2009), S. 50–79.
- [56] K. K. Vu, C. d'Ambrosio, Y. Hamadi und L. Liberti. „Surrogate-based methods for black-box optimization“. In: *International Transactions in Operational Research* 24.3 (2017), S. 393–424.

- [57] S. Le Digabel, C. Tribes, V. R. Montplaisir und C. Audet. *NOMAD user guide version 3.9. 1.* 2019.
- [58] J. Müller, C. A. Shoemaker und R. Piché. „SO-I: a surrogate model algorithm for expensive nonlinear integer programming problems including global optimization applications“. In: *Journal of Global Optimization* 59.4 (2014), S. 865–889.
- [59] J. Mueller. „MATSumoto: the MATLAB surrogate model toolbox for computationally expensive black-box global optimization problems“. In: *arXiv preprint arXiv:1404.4261* (2014).
- [60] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Hrsg. *Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung.* Berlin und Köln, 2018.

# A Fragebogen der Unternehmensbefragung

## Aktuelle Situation in der Kommissionierung

1. Was sind aktuell die Hauptherausforderungen in der Kommissionierung?
2. Wie gehen Sie aktuell mit diesen Herausforderungen um? Welche Lösungsansätze verfolgen Sie, um diese Herausforderungen in den Griff zu bekommen?
3. Welche Methoden/ Tools würden Ihnen im Umgang mit diesen Herausforderungen am meisten helfen?

## Rahmenbedingungen der Kommissionierung

### Struktur der Kundennachfrage

1. Auftragstypen
  - 1.1 In welche Auftragstypen differenzieren Sie die Kundennachfrage?
  - 1.2 Nach welchen Kriterien differenzieren Sie die vers. Auftragstypen?
2. Je Auftragstyp
  - 2.1 Anteil am gesamten Auftragsvolumen?
  - 2.2 Mittleres Auftragsvolumen?
  - 2.3 Schwankungen des Auftragsvolumens?
  - 2.4 Vorlaufzeit der Aufträge?
  - 2.5 Schwankungen der Vorlaufzeit?
    - 2.5.1 Ist die Vorlaufzeit der Aufträge konstant?
    - 2.5.2 Wie groß ist die mittlere Vorlaufzeit?
    - 2.5.3 Wie stark sind die Schwankungen der Vorlaufzeit?
  - 2.6 Welche Ziele sind mit dem Kunden bezüglich Lieferzeit und Servicegrad vereinbart?
  - 2.7 Wie wird der Servicegrad berechnet?
3. Schwankungen des Auftragsvolumens
  - 3.1 Zeitbezug der Schwankungen des Auftragsvolumens?
    - 3.1.1 Tageszeitliche Schwankungen?
    - 3.1.2 Wochentagsbezogene Schwankungen?
    - 3.1.3 Jahreszeitliche Schwankungen?
    - 3.1.4 Andere, weitere Schwankungen?
  - 3.2 Prognostizierbarkeit der Schwankungen des Auftragsvolumens?
    - 3.2.1 Sind die konkreten Ursachen der Auftragsschwankungen bekannt?  
Falls ja, was sind die Ursachen der Auftragsschwankungen?
    - 3.2.2 Sind die Schwankungen des Auftragsvolumens prognostizierbar?

4. Rückstandsaufträge (= Aufträge, deren zugesagte Liefertermine nicht eingehalten wurden)
  - 4.1 Werden Rückstandsaufträge trotz ihrer Rückstandsdauer bearbeitet?
  - 4.2 Besteht die Möglichkeit, dass Kunden Rückstandsaufträge stornieren?  
Falls ja, in welchem Ausmaß wird diese Möglichkeit von den Kunden genutzt?
  - 4.3 Durchschnittliche und maximale Rückstandsdauer eines Rückstandsauftrags?

### Kommissionierung

1. Bezugsgröße der Kommissionierung? (Auftrag, Auftragsposition, Lieferposition, Pickposition etc.)
  - 1.1 Wie groß ist der Umrechnungsfaktor von der Bezugsgröße der Kommissionierung auf die Bezugsgröße Aufträge?
2. Kommissionierprozess
  - 2.1 Was sind die wesentlichen Schritte Ihres Kommissionierprozesses?
  - 2.2 Welche dieser Tätigkeiten werden manuell/ halbautomatisch/ automatisiert ausgeführt?
  - 2.3 Wie groß ist der Anteil manueller/ halbautomatischer/ automatisierter Tätigkeiten?
  - 2.4 Welche technischen Hilfsmittel werden im Kommissionierprozess eingesetzt?
  - 2.5 Welche Parameter/ Faktoren begrenzen die erreichbare Kommissionierleistung? (Anzahl technischer Hilfsmittel, räumliche Restriktionen etc.)
  - 2.6 Welche Weiterentwicklungen der Kommissionierung sind in naher Zukunft geplant?
3. Bearbeitungsstrategie in der Kommissionierung
  - 3.1 Auftrags- oder artikelorientierte Kommissionierung?
    - 3.1.1 Bei artikelorientierter Kommissionierung: Nach welchen Kriterien werden aus den Kundenaufträgen Kommissionieraufträge gebildet?
  - 3.2 Ist die Kommissionierung in mehrere Zonen eingeteilt?  
Falls ja, nach welchen Kriterien werden die Zonen definiert?  
Falls ja, wird ein Kommissionierauftrag nacheinander oder gleichzeitig bearbeitet?
4. Kommissionierleistung
  - 4.1 Anhand welcher Parameter messen Sie die Leistungsfähigkeit der Kommissionierung?
  - 4.2 Durchschnittliche Leistungsfähigkeit der Kommissionierung?
  - 4.3 Schwankungen der Leistungsfähigkeit der Kommissionierung?
  - 4.4 Skizze der Verteilung der Bearbeitungsleistung/ Bearbeitungszeit.
  - 4.5 Was sind die Hauptursachen der Schwankungen der Leistungsfähigkeit?

## 5. Kommissionierfehler

- 5.1 Wann und wo werden Kommissionierfehler identifiziert?
- 5.2 Wie und wo werden die Kommissionierfehler behoben?
- 5.3 Wie hoch ist der Anteil der Kommissionierfehler?
- 5.4 Sind Kommissionierfehler bereits in der Leistungsfähigkeit der Kommissionierung berücksichtigt?

### Personaleinsatz in der Kommissionierung

1. Sind die Mitarbeiter innerhalb der Kommissionierung flexibel einsetzbar? (Beherrschen alle Mitarbeiter, die in der Kommissionierung tätig sind, alle Tätigkeiten innerhalb der Kommissionierung?)  
Falls nein, welche unterschiedlichen Mitarbeitertypen /-qualifikationsniveaus werden differenziert?
2. Handelt es sich um „binäre oder kontinuierliche Qualifikationsniveaus“?
  - 2.1 Binär: Mitarbeiter hat eine bestimmte Qualifikation oder nicht und kann daher eine bestimmte Tätigkeit ausführen oder nicht.
  - 2.2 Kontinuierlich: Mitarbeiter mit geringer Qualifikation benötigen für die Ausführung einer bestimmten Tätigkeit mehr Zeit als Mitarbeiter mit hoher Qualifikation.
3. Sind die Mitarbeiter innerhalb einer Schicht immer genau einer Tätigkeit zugeordnet oder führen sie innerhalb einer Schicht mehrere unterschiedliche Tätigkeiten aus?
4. Falls unterschiedliche Tätigkeiten innerhalb einer Schicht ausgeführt werden: Sind diese unterschiedlichen Tätigkeiten alle Teil des Kommissionierprozesses oder werden auch Tätigkeiten außerhalb der Kommissionierung (z.B. Verpacken, WA) übernommen?

### **Auftragseinlastung in der Kommissionierung**

1. Bezugsgröße der Auftragseinlastung? (Auftrag, Auftragsposition, Lieferposition, Pickposition etc.)
2. Zeitpunkt der Auftragseinlastung? (kontinuierlich, periodisch etc.)
3. Prinzip der Auftragseinlastung? (ohne Strategie, Orientierung an aktueller Arbeitslast des Systems, Orientierung an bestimmten Auftragseigenschaften etc.)
4. Nach welchen Kriterien wird die Anzahl der jeweils eingelasteten Aufträge bestimmt?
5. Welche Tools werden zur Visualisierung der Auftragssteuerung/ des aktuellen „Produktionsplans“ eingesetzt?
6. Nach welchem Prinzip werden die eingelasteten Aufträge den Mitarbeitern zugeordnet?
7. Wie werden die Aufträge an die Mitarbeiter übermittelt? (z.B. Liste, Handgerät, Ware, Display)

### **Arbeitszeitgestaltung in der Kommissionierung**

#### Arbeitszeit der Mitarbeiter

1. Wie hoch ist die vertraglich vereinbarte Wochenarbeitszeit?
2. Wie hoch sind die sachliche und persönliche Verteilzeit eines Mitarbeiters?

### Gestaltung des Schichtmodells

1. Anzahl Schichten pro Tag?
2. Start- und Endzeitpunkte der einzelnen Schichten?
3. Dauer und Lage der Pausen je Schicht?

### Maßnahmen der Arbeitszeitflexibilisierung

1. Setzen Sie Teilzeitarbeit zur Arbeitszeitflexibilisierung ein?  
Falls ja, wie ist die Teilzeitarbeit gestaltet?
2. Setzen Sie Überstunden zur Arbeitszeitflexibilisierung ein?  
Falls ja:
  - 2.1 In welchen konkreten Situationen werden Überstunden eingesetzt?
  - 2.2 Wie werden Überstunden dokumentiert?
  - 2.3 Wie werden Überstunden ausgeglichen?
3. Setzen Sie Wochenendarbeit zur Arbeitszeitflexibilisierung ein?  
Falls ja, in welchen konkreten Situationen wird Wochenendarbeit eingesetzt?

Flexibilität des Arbeitszeitmodells (z.B. Änderung der Schichtanzahl, Änderung der Startzeitpunkte der einzelnen Schichten, temporäre Einführung von Wochenendarbeit)

1. Wie häufig passen Sie Ihr Arbeitszeitmodell an?
2. Mit welchem zeitlichen Vorlauf passen Sie Ihr Arbeitszeitmodell an?

### Einsatz von kurzfristig Beschäftigten

1. Werden kurzfristig Beschäftigte eingesetzt?  
Falls ja:
  - 1.1 Anteil der kurzfristig Beschäftigten an der Gesamtbelegschaft?
  - 1.2 In welchen Situationen werden kurzfristig Beschäftigte eingesetzt?
  - 1.3 Welche Tätigkeiten übernehmen die kurzfristig Beschäftigten?

## **Personalbedarfsplanung in der Kommissionierung**

1. Wann wird der aktuell benötigte Personalbedarf in der Kommissionierung ermittelt bzw. der benötigte Personalbedarf mit dem verfügbaren Personalbestand abgeglichen? (in regelmäßigen Zeitabständen, bei Eintritt bestimmter Ereignisse etc.)
2. Wie wird der aktuell benötigte Personalbedarf in der Kommissionierung ermittelt?
3. Welche Daten werden/ dürfen/ können zur Ermittlung des benötigten Personalbedarfs genutzt (werden)?
4. Falls Orientierung an Nachfrage, Berücksichtigung von Nachfragespitzen oder Orientierung an der durchschnittlichen Nachfrage?