

HEIKO BREIER

**Tourenplanung mit alternativen
Lieferperioden und Teillieferungen**

BAND 83

**Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und
Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)**

Heiko Breier

**Tourenplanung mit alternativen
Lieferperioden und Teillieferungen**

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BAND 83

Tourenplanung mit alternativen Lieferperioden und Teillieferungen

von
Heiko Breier

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2014
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Prof. Dr. Stefan Nickel

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 0171-2772

ISBN 978-3-7315-0311-8

DOI: 10.5445/KSP/1000044750

Tourenplanung mit alternativen Lieferperioden und Teillieferungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Wi.-Ing. Heiko Breier

Tag der mündlichen Prüfung:
Hauptreferent:
Korreferent:

17. Dezember 2014
Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
Prof. Dr. Stefan Nickel

Vorwort

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entstanden.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Leiter des Instituts, für die Betreuung dieser Dissertation als Hauptreferent. Er versteht es exzellent Forschung und Praxis miteinander zu verknüpfen und hat die Arbeit stets durch Anregungen und kritische Fragen gefördert.

Mein Dank gilt Prof. Dr. Stefan Nickel für die Übernahme des Korreferates dieser Arbeit und Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für die Übernahme des Vorsitzes der mündlichen Prüfung.

Einen Teil der Arbeit habe ich während eines mehrmonatigen Forschungsaufenthaltes zu Gast in der Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) in Montréal/Kanada angefertigt. Meine Gastgeber dort waren Prof. Guy Desautniers und Prof. Jacques Desrosiers. Ich danke ihnen für das Fordern und Fördern in den Diskussionen zum Branch-Price-and-Cut-Verfahren.

Ohne das Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS), das mich als Stipendiat während dieses Aufenthaltes gefördert hat, wäre dieser intensive Austausch sicher nicht möglich gewesen.

Bei meinen Kollegen des IFL, FZI und IOR bedanke ich mich für die Diskussionen und die Unterstützung während dieser Zeit. Sie haben dadurch sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ich danke meinen Eltern. Sie haben mich auf meinem Weg immer gefördert und begleitet.

Karlsruhe, den 13. Januar 2015

Heiko Breier

Kurzfassung

Heiko Breier

Tourenplanung mit alternativen Lieferperioden und Teillieferungen

In dieser Arbeit wird das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden (SDVRPA) vorgestellt, gelöst und die Ergebnisse werden evaluiert.

Während in der Literatur zu Tourenplanungsproblemen entweder nur Teillieferungen oder alternative Perioden betrachtet werden, wird in dieser Arbeit die Kombination aus beiden Varianten untersucht. Zur Lösung des Problems wird ein Branch-and-Price-Ansatz gewählt, der das Problem in ein Master-Problem und Pricing-Probleme zerlegt. Neue gültige Touren werden mit Hilfe eines Column-Generation-Verfahrens erzeugt. Die Ganzzahligkeit der Lösung wird über Branchingregeln sichergestellt. Zur Lösung der Pricing-Probleme wird ein Labeling-Algorithmus verwendet.

Neben der Untersuchung des Einflusses dieses Planungsansatzes auf den Spediteur, wird der Einfluss auf die Empfänger und den Versender untersucht. Werden alternative Lieferperioden und Teillieferungen erlaubt, erhalten Spediteure einen größeren Planungsspielraum und können effizientere Touren planen. Die Fahrzeugauslastung steigt und die Anzahl zu fahrender Touren sinkt bei abnehmender Gesamtentfernung. Der Versender profitiert davon, dass weniger Touren das Depot verlassen.

Bereits bei wenigen alternativen Lieferperioden sind hohe Einsparungen möglich. Grund für die Einsparungen ist die bessere Fahrzeugauslastung, die durch die Freiheit des Lieferzeitpunktes erreicht wird.

Abstract

Heiko Breier

Vehicle Routing with alternative periods and split deliveries

This thesis examines the Vehicle-Routing-Problem with split-deliveries and alternative delivery periods (SDVRPA). The problem is partitioned into a Master-Problem and Pricing-Problems. It is solved with a Branch-and-Price-Algorithm. Subsequently, the results are evaluated.

While previous research considered Vehicle-Routing-Problems either focusing on split-deliveries or alternative periods, this thesis explores the combination of both. New feasible tours are generated using a Column-Generation method. To find a solution of integer values, we apply branching rules. The Pricing-Problem is solved with a Labeling-Algorithm.

In contrast to conventional approaches, this thesis investigates the impact not only on the shipper but also on the freight forwarder and the recipient. When alternative delivery periods and split-deliveries are employed, freight forwarders get a wider scope for planning and can therefore plan more efficient routes. The total distance and the number of trips decreases while the utilization of vehicles increases. Consequently, the number of trips leaving the depot can be reduced, benefitting the shipper.

Even with few alternative delivery periods, which allow vehicles to be used more efficiently, substantial savings can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhalt	v
Abkürzungsverzeichnis	ix
Bezeichnungen der verwendeten Mengen	xi
Verwendete Variablen und Parameter	xiii
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung der Arbeit	2
1.2 Darlegung des Problems	5
1.3 Forschungsleitende Fragen	8
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Stand der Forschung	11
2.1 Optimierung im Transport	11
2.2 Tourenplanungsprobleme als Forschungsgegenstand	12
2.3 Eigenschaften von Split-Delivery-Problemen	19
2.3.1 Struktureigenschaften einer optimalen Lösung	19
2.3.2 Einfluss von Teillieferungen auf die Tourlänge	22
2.4 Branch-and-Price als Lösungsverfahren	24
3 Problemformulierung	31
3.1 Kompakte Formulierung des SDVRPA	31
3.2 Zerlegung des SDVRPA	37
3.2.1 Master-Problem	37
3.2.2 Pricing-Probleme	39

4	Lösungsverfahren	43
4.1	Ablauf des Verfahrens	43
4.2	Lösung des Pricing-Problems	46
4.3	Verzweigungsregeln	53
4.3.1	Verzweigung auf die Anzahl der Fahrzeuge	55
4.3.2	Verzweigung auf die Anzahl der Kundenbesuche	56
4.3.3	Verzweigung auf die Nutzungshäufigkeit einer Kante	56
4.3.4	Verzweigung auf die Anzahl der Fahrzeuge je Periode	57
4.3.5	Verzweigung auf die Anzahl der Kundenbesuche je Periode	58
4.3.6	Verzweigung auf eine Kante je Periode	59
4.3.7	Verzweigung auf zwei aufeinanderfolgende Kanten je Periode	59
4.4	Untere Schranken für das SDVRPA	61
4.4.1	Berechnung der unteren Schranken für Kundenbesuche	62
4.4.2	Mindestanzahl an Fahrzeugen	62
4.5	Schnittebenen für das SDVRPA	63
4.5.1	Verwendung von SMV-Ungleichungen	63
4.5.2	Verwendung von Kapazitätsungleichungen	64
5	Testdatensätze	67
5.1	Räumliche Verteilung	67
5.2	Verteilung der Nachfrage	68
5.3	Alternative Lieferperioden	71
6	Ergebnisse	73
6.1	Einfluss auf die Gesamttourlänge	74
6.2	Einfluss auf die Fahrzeugauslastung	76
6.3	Einfluss auf die Anzahl zu fahrender Touren	81
6.4	Einfluss auf die Besuchshäufigkeit beim Empfänger	85
6.5	Häufigkeit von Teillieferungen	87
6.6	Veränderung der Anzahl an Stopps je Tour	90
6.7	Einfluss der Anzahl an Alternativen	92
6.8	Einfluss der räumlichen Anordnung der Kunden	93

7 Zusammenfassung und Ausblick	101
Literaturverzeichnis	105
A Einfluss auf die Gesamttourlänge	A 1
A.1 Datensatz OEM	A 1
A.2 Datensatz OEM, abhängig von räumlicher Anordnung .	A 2
A.3 Datensatz Zulieferer	A 4
A.4 Datensatz Zulieferer, abhängig von räumlicher Anordnung	A 5
B Fahrzeugauslastung	B 1
B.1 Auslastung beim Datensatz OEM	B 1
B.2 Auslastung beim Datensatz Zulieferer	B 4
C Änderung der Anzahl zu fahrender Touren	C 1
C.1 Änderung beim Datensatz OEM	C 1
C.2 Änderung beim Datensatz Zulieferer	C 2
D Einfluss auf die Besuchshäufigkeit beim Empfänger	D 1
D.1 Anzahl der Anfahrten bei den Empfängern am Beispiel des Datensatzes OEM	D 1
D.2 Anzahl der Anfahrten bei den Empfängern am Beispiel des Datensatzes Zulieferer	D 2
E Häufigkeit von Teillieferungen	E 1
E.1 Anzahl Splits am Beispiel des Datensatzes OEM	E 1
E.2 Anzahl Splits am Beispiel des Datensatzes Zulieferer . . .	E 3
F Anzahl Stopps je Tour	F 1
F.1 Stoppdichte beim Datensatz OEM	F 1
F.2 Stoppdichte beim Datensatz Zulieferer	F 2

Abkürzungsverzeichnis

SDVRP	Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries
SDVRPA	Vehicle-Routing-Problem mit alternativen Perioden und Split-Deliveries
SDVRPTW	Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries und Time-Windows
VRP	Vehicle-Routing-Problem

Bezeichnungen der verwendeten Mengen

\mathcal{A}	Menge aller Kanten des Problems $(i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ mit $i \neq j$
\mathbb{B}	Binäre Menge mit den Elementen $\{0; 1\}$
\mathcal{G}	Graph des Problems mit $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$
\mathcal{I}	Menge aller Kunden des Problems $= \mathcal{V} \setminus 0$
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen mit den Elementen $\{0; 1; 2; \dots\}$
\mathcal{P}	Menge aller zulässigen Perioden des Problems
\mathcal{P}_i	Menge aller zulässigen Perioden für Kunde i , $\mathcal{P}_i \subseteq \mathcal{P}$
\mathcal{R}	Menge aller Routen des Problems
\mathbb{R}_{ijk}	Menge aller aufeinanderfolgender Kanten $\{((i, j), (j, k))\}$
\mathcal{S}	Menge aller Teilmengen von \mathcal{V} , $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{V}$
\mathcal{F}	Menge aller Fahrzeuge des Problems
\mathcal{V}	Menge aller Knoten des Problems mit den Knoten $\{0; 1; 2; \dots\}$, Knoten $0 = \text{Depot}$
\mathcal{W}	Menge aller Liefermengenkombinationen des Problems

Verwendete Variablen und Parameter

α_{ij}^p	Dualwert zur Reduktion der Transportkosten auf der Kante (i, j) in Periode p
a_{ir}	Parameter ist 1, wenn Knoten i auf Route r angefahren wird, 0 sonst
$a_{irw}^{p,F}$	Parameter ist 1, wenn auf Route r mit Liefermuster w in Periode p eine Ganzladung erfolgt ist, 0 sonst
$a_{irw}^{p,PZ}$	Parameter ist 1, wenn auf Route r mit Liefermuster w in Periode p eine Null- bzw. Teillieferung erfolgt ist, 0 sonst
β_{ijr}^p	Parameter gibt an, ob eine Kante (i, j) in Periode p von Route r genutzt wurde
γ	Dualwert zur Nebenbedingung der verwendbaren Fahrzeuge im Master-Problem
c_{ij}	Transportkosten auf der Kante (i, j)
c_r	Transportkosten der Route r
C_i	maximal mögliche reduzierte Kosten am Knoten i
δ_i	Dualwert zur Bewertung der Liefermenge am Knoten i
Δ_i	Der Dualwert δ_i für eine Teillieferung am Knoten i
d_i	Nachfrage am Knoten i
d_i^p	Variable der Liefermenge am Knoten i in Periode p
d_{if}^p	Variable der Liefermenge am Knoten i in Periode p mit Fahrzeug f
E_i	Label am Knoten i
e_r	Länge der Route r
h_r	Länge der Hilfsroute r
H_i	Besuchshäufigkeit an einem Knoten i
H_i^p	Besuchshäufigkeit an einem Knoten i in Periode p
$H_{i^*}^{*,min}$	Mindestanzahl der notwendigen Besuche an Knoten i^* zur Erfüllung der Nachfrage

$H_{i^*,min}^{p^*}$	Mindestanzahl der notwendigen Besuche an Knoten i^* in Periode p^* zur Erfüllung der Nachfrage
$H_{i^*,max}$	Maximalanzahl der notwendigen Besuche an Knoten i^* zur Erfüllung der Nachfrage
$H_{i^*,max}^{p^*}$	Maximalanzahl der notwendigen Besuche an Knoten i^* in Periode p^* zur Erfüllung der Nachfrage
$H_{(i,j)}$	Nutzungshäufigkeit der Kante (i, j)
$H_{(i,j)}^p$	Nutzungshäufigkeit der Kante (i, j) in Periode p
$H_{(i,j)^*,min}$	Mindestnutzung der Kante $(i, j)^*$
$H_{(i,j)^*,min}^{p^*}$	Mindestnutzung der Kante $(i, j)^*$ in Periode p^*
$H_{(i,j)^*,max}$	Maximalnutzung der Kante $(i, j)^*$
$H_{(i,j)^*,max}^{p^*}$	Maximalnutzung der Kante $(i, j)^*$ in Periode p^*
H_f	Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge
H_f^p	Anzahl der je Periode eingesetzten Fahrzeuge
$H_{f,max}$	Maximalanzahl der über alle Perioden hinweg einsetzbaren Fahrzeuge
$H_{f,max}^{p^*}$	Maximalanzahl der in Periode p^* einsetzbaren Fahrzeuge
$H_{f,min}$	Mindestanzahl der über alle Perioden zu nutzenden Fahrzeuge
$H_{f,min}^{p^*}$	Mindestanzahl der in Periode p^* zu nutzenden Fahrzeuge
$H_{i,min}$	Mindestanzahl der über alle Perioden durchzuführenden Besuche an Knoten i
λ_{rw}	Variable zur Nutzung der Route r mit Lieferkombination w
λ_{rw}^p	Variable zur Nutzung der Route r mit Lieferkombination w in Periode p
λ_r^p	Variable zur Überprüfung zweier aufeinanderfolgender Kanten
L_i	Summe der Ganzladungen eines Pfades zum Knoten i
Π_i	Maximale Restkapazität, die nach einer Teillieferung am Knoten i noch möglich ist
Q	Kapazität eines Fahrzeuges
Q_f	Kapazität des Fahrzeuges f
ρ_{iw}^p	Liefermenge zum Knoten i mit Liefermengenkombination w in Periode p

σ_i	Dualwert, der sich aus dem Einfügen der Strong-Minimum-Number-of-Vehicles-Nebenbedingungen für Knoten i ergibt
σ_i^p	Dualwert, der sich aus dem Einfügen der Strong-Minimum-Number-of-Vehicles-Nebenbedingungen für Knoten i in Periode p ergibt
S_i	Indikator für eine Teillieferung am Knoten i
τ_{max}	Dualwert zur Nebenbedingung der oberen Grenze einsetzbarer Fahrzeuge
τ_{max}^*	Dualwert zur Nebenbedingung der oberen Grenze der in Periode p^* einsetzbaren Fahrzeuge
τ_{min}	Dualwert zur Nebenbedingung der unteren Grenze einsetzbarer Fahrzeuge
τ_{min}^*	Dualwert zur Nebenbedingung der unteren Grenze der in Periode p^* einsetzbaren Fahrzeuge
$V_i^{cust_k}$	Indikatorvektor für bereits besuchte Knoten $cust_k$ auf dem Pfad zum Knoten i
x_{ijf}	Variable zur Nutzung der Kante (i, j) mit Fahrzeug f
x_{ij}^p	Variable zur Nutzung der Kante (i, j) in Periode p
x_{ijf}^p	Variable zur Nutzung der Kante (i, j) in Periode p mit Fahrzeug f
x_r	Variable zur Entscheidung über die Aufnahme der Route r
y_{ij}^p	Variable zur Verwendung der Kante (i, j) in Periode p
y_{if}	Variable zur Entscheidung, ob ein Fahrzeug f Knoten i anfährt
y_f^p	Variable zur Entscheidung, ob ein Fahrzeug f in Periode p genutzt wird
Z_i^{PP}	Zielfunktionswert im Pricing-Problem am Knoten i

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung des inländischen Straßentransportes	4
1.2	Beispiel für die Auswirkung alternativer Lieferperioden . . .	7
1.3	Beispiel der Kombinationsmöglichkeiten durch Teillieferungen über Perioden	7
2.1	Beispiel zur Eigenschaft, dass höchstens eine Teillieferung je Route möglich ist	20
2.2	Beispiel zu einem k-split Zyklus	21
2.3	Verhältnis von eingesetzten Fahrzeugen beim VRP und SDVRP	24
4.1	Schematischer Ablauf des Lösungsverfahrens für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden	44
4.2	Linearkombination von Touren mit Nulllieferungen	49
4.3	Skizze zur Entwicklung der Label	49
4.4	Beispiel für aufeinanderfolgende Kanten	60
5.1	Räumliche Verteilung der Kunden: Random, Clustered und Random-Clustered	68
5.2	Verteilungen der Sendungsgröße	69
5.3	Dichten der Sendungsgröße	70
6.1	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel	75

6.2	Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung und nach räumlicher Anordnung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel	77
6.3	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz Handel	78
6.4	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad und räumlicher Anordnung der Kunden, Datensatz Handel	80
6.5	Beispiel für die Beeinflussung der Touranzahl durch alternative Lieferperioden	84
6.6	Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz Handel	86
6.7	Aufteilung der Splits auf die Kunden, Datensatz Handel . .	89
6.8	Einfluss alternativer Lieferperioden auf Versender, Transporteur und Empfänger	97
A.1	Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM	A 1
A.2	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (R) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM	A 2
A.3	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (RC) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM	A 2
A.4	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (C) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM	A 3
A.5	Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer	A 4
A.6	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (R) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer	A 5
A.7	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (RC) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer	A 5

A.8	Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (C) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer	A 6
B.1	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz OEM	B 1
B.2	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (R), Datensatz OEM	B 2
B.3	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (RC), Datensatz OEM	B 2
B.4	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (C), Datensatz OEM	B 3
B.5	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz Zulieferer	B 4
B.6	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (R), Datensatz Zulieferer	B 5
B.7	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (RC), Datensatz Zulieferer	B 5
B.8	Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (C), Datensatz Zulieferer	B 6
D.1	Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz OEM	D 1
D.2	Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz Zulieferer	D 2
E.1	Aufteilung der Splits auf die Kunden, eine Lieferperiode je Kunde (s), Datensatz OEM	E 1
E.2	Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu zwei Alternativen (d), Datensatz OEM	E 2
E.3	Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu drei Alternativen (t), Datensatz OEM	E 2

E.4	Aufteilung der Splits auf die Kunden, eine Lieferperiode je Kunde (s), Datensatz Zulieferer	E 3
E.5	Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu zwei Alternativen (d), Datensatz Zulieferer	E 3
E.6	Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu drei Alternativen (t), Datensatz Zulieferer	E 4

Tabellenverzeichnis

5.1	Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient der Verteilungen der Sendungsgrößen	69
5.2	Häufigkeitsverteilung der zugelassenen Alternativen s und d	71
5.3	Häufigkeitsverteilung der zugelassenen Alternativen s, d und t	72
6.1	Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der Anzahl an Alternativen im Vergleich zum Referenzszenario	75
6.2	Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel	76
6.3	Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz Handel	78
6.4	Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel	79
6.5	Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz Handel	82
6.6	Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel	82
6.7	Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz Handel	91
6.8	Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz Handel	92

A.1	Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM	A 3
A.2	Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer	A 6
B.1	Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz OEM . .	B 1
B.2	Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM	B 3
B.3	Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz Zulieferer . .	B 4
B.4	Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer	B 6
C.1	Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz OEM	C 1
C.2	Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM	C 1
C.3	Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz Zulieferer	C 2
C.4	Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer	C 2
F.1	Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz OEM	F 1
F.2	Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz OEM	F 1
F.3	Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz Zulieferer . .	F 2
F.4	Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz Zulieferer	F 2

1. Einleitung

Seitdem es den Handel gibt, gibt es den Transport von Waren. Historische Wege, die den Zusammenhang zwischen Handel und Transport beeindruckend verdeutlichen sind z. B. die Seidenstraßen (Landwege von Europa nach Ostasien, die ab ca. 500 v. Chr. genutzt wurden), die verschiedenen Bernsteinstraßen (Landverbindungen, die die Transporte von Nord- und Ostsee nach Italien ermöglicht haben) oder die Gewürzroute (Seeweg von Europa über Afrika nach Indien, der ab dem 15./16. Jahrhundert genutzt wurde).

Damals wie heute gilt es, die Transportressourcen effizient einzusetzen. Wer es schafft, schnellere Wege zu finden, spart Zeit und kann den Handel häufiger durchführen. Wer kürzere Wege findet, kann seine Transportmittel entlasten und Wegzoll sparen. Und wer es schafft seinen Stauraum besser auszunutzen, kann mit einem Transport mehr Waren transportieren.

Für heutige Transportunternehmen gelten die Zielkriterien der Minimierung von Zeit und Weg sowie einer möglichst guten Fahrzeugauslastung weiterhin. Gleichzeitig sind weitere Anforderungen durch Transportunternehmen zu erfüllen, die von ihren Kunden vorgegeben werden. Die Konkurrenz in der Transportbranche ist hoch und geprägt von niedrigen Margen, vgl. Bundesamt für Güterverkehr (2013). Eine effiziente Tourenplanung im Transportsektor ist unerlässlich, um im Markt zu bestehen.

In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss ein neuer Planungsansatz auf die Transportressourcen und die Logistik hat, der alternative Lieferperioden und Teillieferungen zulässt.

1.1. Einordnung der Arbeit

Der Deutsche Speditions- und Logistikverband e. V. (2010) hat ermittelt, dass die wichtigsten logistischen Teilmärkte in der Spedition die Handelslogistik und die Automobillogistik sind. In der Erhebung wurden 1.990 Betriebe nach ihren Leistungsbereichen¹ und Leistungsschwerpunkten² befragt. Bei den Antworten waren Mehrfachnennungen möglich, da eine Spedition in mehreren Leistungsbereichen tätig sein kann und mehrere Schwerpunkte haben kann. Die Handelslogistik als Leistungsbereich nimmt 42 Prozent ein, der Leistungsschwerpunkt liegt bei 21 Prozent. Die Automobillogistik ist mit 33 Prozent des Leistungsbereiches der zweitgrößte Teilmarkt für Spediteure. Der Leistungsschwerpunkt liegt hier bei 16 Prozent und rangiert damit ebenfalls auf Platz zwei hinter der Handelslogistik.

Der effiziente Ressourceneinsatz zählt im Transport zu einer Kernkompetenz und hat einen hohen Einfluss auf die Gesamtlogistikkosten, wie die folgenden Studien zeigen. Nach einer Statistik von Granzow (2009), lag der Anteil der Logistikkosten gemessen an den Gesamtkosten im Handel 2008 bei 15,9 Prozent. Zu den Logistikkosten zählen Verwaltungskosten, Kosten für die Auftragsabwicklung, Bestände, Lagerung und Transport. Für die Industrie lag der Logistikkostenanteil im selben Jahr bei 7 Prozent gemessen an den Gesamtkosten.

Laut einer Studie des Fraunhofer IIS, die in Bündler (2009) veröffentlicht wurde, liegt der europaweite Anteil der Transportkosten an den Logistikkosten im Jahr 2008 bei 45 Prozent. Zu einem ähnlichen Wert kommt auch eine Studie von Establish (2013). Seit 1974 wird jährlich eine Befragung von Unternehmen zu ihren Logistikkosten vorgenommen. In der Befragung von 2012 beträgt der Anteil der Transportkosten an den Logistikkosten 44 Prozent. Die Transportkosten, so titelte Reimann (2011), hätten im Jahr 2011 ein Allzeithoch erklommen. Es ist davon auszugehen, dass die Transportkosten auch zukünftig steigen werden und der Anteil an den Logistikkosten weiter wachsen wird.

¹ Der Leistungsbereich gibt an, in welchen Bereichen die befragte Spedition aktiv ist.

² Der Leistungsschwerpunkt gibt an, in welchen Leistungsbereichen der Schwerpunkt der Aktivitäten dieser Spedition liegt.

Ein Blick in die Gegenwart zeigt, an welchen logistischen Themen unter anderem Handelsunternehmen im Moment arbeiten, vgl. EHI und IML (2012). Die Optimierung der Zeitfenstersteuerung im Wareneingang wird von 96 Prozent der befragten Unternehmen genutzt. Die übrigen 4 Prozent waren im Jahr 2012 in der Planungs- bzw. Pilotierungsphase. Von den 42 befragten Unternehmen gaben darüber hinaus 69 Prozent an, dass neue Transportzeitmodelle wie z. B. Nacht- und Zweitanlieferung genutzt werden. 19 Prozent der befragten Unternehmen planten neue Transportzeitmodelle einzuführen oder waren bereits in der Pilotierungsphase. Die übrigen 12 Prozent der Unternehmen gaben an, neue Transportzeitmodelle nicht vorzusehen.

Für die Zukunft sehen sich die Unternehmen mit steigenden Transportkosten konfrontiert, EHI und IML (2012). 98 Prozent der Unternehmen stufen diese Herausforderung als wichtig bzw. sehr wichtig ein.

Die Studie von Wittenbrink (2010) gibt Aufschlüsse darüber, welche Faktoren die Unternehmen in einer Abschätzung bis 2015 für die steigenden Transportkosten verantwortlich machen. Bezogen auf den Verkehrsträger Straße werden nach Ansicht der Befragten die Regelungen zur Eindämmung des CO_2 -Ausstoßes, mangelnde Straßenqualität, steigende Umweltauflagen, steigende Ölpreise und Mauten einen großen Einfluss auf die Transportpreise haben.

Diese Einschätzungen teilen auch Selinger u. a. (2010). Spürbare Anstiege der Energiekosten und Gehälter sowie die Bemühungen der Politik, den Transport ökologisch verträglicher zu machen, werden dazu beitragen, dass der Transport in den nächsten Jahren deutlich teurer werden wird.

In der Logistik für Produktionsunternehmen zeigt sich weiterhin der Trend, dass Sendungen tendenziell kleiner werden. Während der Median für das Sendungsgewicht im Jahr 1988 noch bei 160 kg lag, ging er im Jahr 2004 auf 35 kg zurück, vgl. Guilbault und Gouveral (2010).

Unter der Annahme, dass die zu transportierende Menge gleich bleibt, wird dies zur Folge haben, dass Transporte häufiger, dafür aber mit kleineren Sendungsmengen durchgeführt werden. Die zu fahrende Strecke wird dadurch zunehmen.

Die Studie zur Verkehrsprognose bis 2025 geht von einer wachsenden Verkehrsleistung aus. Nachdem der Straßengüterverkehr in Deutschland

und weiteren europäischen Ländern in den letzten Dekaden kontinuierlich gewachsen ist (vgl. Abbildung 1.1), gehen die Prognosen von weiterem Wachstum der Transportleistung im Straßengüterverkehr aus. Bezogen auf das Basisjahr 2004 wird bis 2025 ein Anstieg der Transportleistung von 392,5 Mrd. Tonnenkilometern (tkm) auf 704,3 Mrd. Tonnenkilometer prognostiziert. Somit würde die Transportleistung um rund 79 Prozent zunehmen, vgl. Beratergruppe Verkehr und Umwelt GmbH (2007). Getragen

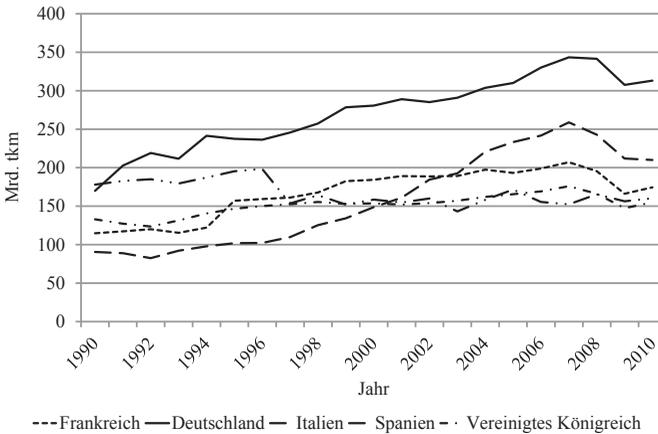


Abbildung 1.1.: Entwicklung des inländischen Straßentransportes, ausgewählte Länder Europas, Quelle: Eurostat (2013)

wird dieses Wachstum von einem Anwachsen der durchschnittlichen Transportmenge um 27,5 Prozent und einer Zunahme der durchschnittlichen Transportentfernung um 40 Prozent.

Der effiziente Ressourceneinsatz ist für Spediteure und Transportplaner eine Schlüsselkompetenz. Mit dem Ansatz, Alternativen für die Lieferperiode zuzulassen und Teillieferungen zu erlauben, richtet sich diese Arbeit an Transportplaner, die eine entsprechende Freiheit in der Tourenplanung berücksichtigen können.

Dazu zählen Tourenplaner,

- denen ein spätester Liefertermin für die Zustellung genannt wird, z. B. Spediteure,
- die selbst über den Zustellzeitpunkt und die Menge entscheiden können, weil sie ein eigenes Transportnetzwerk unterhalten oder Spediteure, die sich selbst Anfahrtperioden für die Lieferung buchen müssen,
- die auf der Suche nach innovativen Konzepten sind, um ihre Touren effizienter durchzuführen und ihre Kunden günstiger bedienen zu können.

Diese Arbeit richtet sich auch an Einkäufer von Transportleistungen, die nach einer Analyse suchen, wie sich Teillieferungen und alternative Lieferperioden auf die eigenen Prozesse auswirken können.

1.2. Darlegung des Problems

In Tourenplanungsproblemen in Theorie und Praxis findet man häufig die Bedingung, dass eine Lieferung möglichst mit einer Anfahrt vollständig und zu einem festen Termin geliefert werden muss. Ein Blick in die Literatur zeigt, dass der Großteil der Veröffentlichungen zu Tourenplanungsproblemen keine Teillieferungen eines Auftrages zulassen (vgl. Kapitel 2). Auch in der Praxis beobachtet man, dass Empfänger Teillieferungen grundsätzlich ausschließen. Es wird befürchtet, dass die Erlaubnis von Teillieferungen zu einem Anstieg der Anfahrten beim Empfänger und somit zu einer zusätzlichen Belastung der Entladerampe führt.

Aus Gründen einer einfacheren Formulierung wird in der Arbeit von einer Distributionsstruktur mit einem Depot und mehreren Empfängern ausgegangen. Die Ergebnisse dieser Arbeit gelten auch in einer Versorgungsstruktur mit einem Empfänger und vielen Versendern, wie sie beispielsweise zur Produktionsversorgung eines Werkes mit vielen Zulieferern auftritt.

Liefertermine werden mit zunehmender Tendenz über Zeitfenstermanagementsysteme vergeben. Ein Anbieter eines solchen Systems ist die Firma Transporeon. Das Unternehmen stellt eine webbasierte Logistikplattform zur Verfügung, die Industrie- und Handelsunternehmen mit ihren Logistikpartnern vernetzt. Im Zeitraum von 2000 bis 2013 hat Transporeon einen Anstieg der an das System angeschlossenen Verlader von 2 auf 850 verzeichnet. Im Jahr 2000 nutzten 200 Frachtführer das System zur Buchung. Im Jahr 2013 sind es 40.000 Frachtführer, die über das Zeitfenstermanagementsystem ihre Liefertermine buchen, vgl. Schlatter (2012).

Verlader bevorzugen eindeutige Termine mit möglichst wenig Anfahrten, um eine gleichmäßige Auslastung der Rampe zu erreichen und eine zuverlässige Personaleinsatzplanung vornehmen zu können. Eine Untersuchung darüber, wie sich alternative Lieferperioden und Teillieferungen auswirken, gibt es bisher noch nicht. Diese Lücke wird mit der vorliegenden Arbeit geschlossen.

Lässt man Teillieferungen und alternative Lieferperioden zu und erlaubt, dass eine Lieferung beliebig in Teillieferungen aufgeteilt werden und zu beliebigen Perioden oder durch beliebige Fahrzeuge geliefert werden darf, ergibt sich eine hohe Zahl an Kombinationsmöglichkeiten für die Auslieferung. Die erlaubten Perioden könnten z. B. vom Empfänger vorgegeben werden. Dem Spediteur würden so alternative Zustellperioden zur Verfügung gestellt werden zu denen eine Belieferung erfolgen kann. Dabei muss nicht exklusiv in einer Periode der alternativen Perioden geliefert werden. Eine Aufteilung der Lieferung ist auch über Perioden hinweg erlaubt.

In Abbildung 1.2 wird an einem Beispiel gezeigt, welche Kombinationsmöglichkeiten sich für die Tourenplanung ergeben könnten. Links ist eine Auftragslage ohne alternative Perioden dargestellt; fünf Kunden wünschen eine Belieferung zu unterschiedlichen Perioden. Die Perioden können z. B. die Wochentage von Montag bis Freitag sein. Alle Kunden lassen ausschließlich eine Periode für die Belieferung zu. Ziel des Planers wird es unter diesen Rahmenbedingungen sein, bestmögliche Touren zu planen.

Auf der rechten Seite ist dargestellt, wie sich die Kombinationsmöglichkeiten für die Planung ändern, wenn die Empfänger etwas Freiraum in der Auswahl des Anfahrzeitpunktes ließen. Im Beispiel lässt Kunde 4 zu, dass eine Anlieferung im Vergleich zum ursprünglichen Termin um

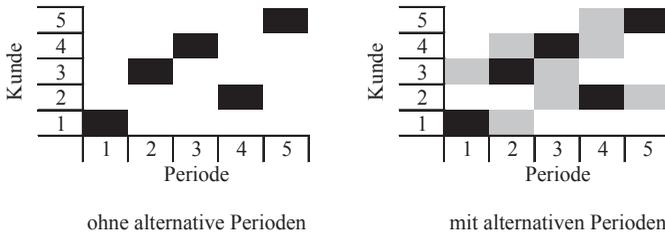


Abbildung 1.2.: Beispiel für die Auswirkung alternativer Lieferperioden

einen Tag vorgezogen oder einen Tag nach hinten verschoben werden kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte Planungsverfahren erlaubt, dass eine Anlieferung beim Kunden in einer beliebigen Kombination aus den zur Verfügung gestellten Alternativen erfolgen darf; Lieferungen dürfen in Teillieferungen unterteilt werden. Abbildung 1.3 zeigt drei Beispiele für

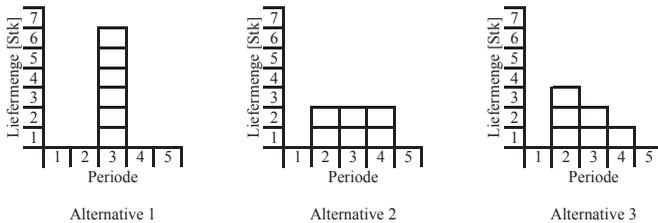


Abbildung 1.3.: Beispiel der Kombinationsmöglichkeiten durch Teillieferungen über Perioden

mögliche Aufteilungen eines Kundenauftrages in Teillieferungen. Kunde 4, der ursprünglich nur eine Lieferung in Periode 3 gewünscht hatte (vgl. 1.2), lässt nun auch Lieferungen in Periode 2 und 4 zu. Der Kundenauftrag umfasst sechs Einheiten. Sobald alternative Perioden zugelassen werden, kann es vorkommen, dass sich die Durchführung des Kundenauftrages über mehrere Perioden erstreckt und in mehreren Teillieferungen gestellt wird. Alternative 2 würde in den Perioden 2 bis 4 jeweils zwei Einheiten liefern. In Alternative 3 würde in Periode 2 eine Lieferung von drei Einheiten, in Periode 3 eine Lieferung von zwei Einheiten und in Periode 4 eine Lieferung von einer Einheit erfolgen.

Die ohnehin schwierige Aufgabe eines Tourenplaners, aus einer Fülle an Aufträgen bestmögliche Touren zu bestimmen, wird durch Hinzunahme von alternativen Perioden und Teillieferungen um viele Kombinationsmöglichkeiten erweitert und damit noch komplexer.

1.3. Forschungsleitende Fragen

Allgemein wird mit der Arbeit die Frage untersucht, ob effizientere Touren entstehen, wenn alternative Perioden mit Teillieferungen zugelassen werden. Eingegangen wird dabei im Speziellen auf die Veränderungen beim Versender, den Empfänger und dem Spediteur. Daraus lassen sich die forschungsleitenden Fragen ableiten, die in dieser Arbeit beantwortet werden und den Einfluss alternativer Lieferperioden mit Teillieferungen auf diese Akteure zeigen.

- Wie ändert sich die Tourlänge, wenn alternative Perioden mit Teillieferungen erlaubt sind? Die Bewertung von Touren mit Zeiten lässt Rückschlüsse auf den Fahrereinsatz zu, um die geplanten Touren zu fahren.
- Wie ändert sich die Auslastung der Fahrzeuge, bei Verwendung alternativer Perioden und Teillieferungen? Die Auslastung lässt Rückschlüsse auf den Einfluss des Handlings beim Verloader zu.
- Welchen Einfluss haben alternative Perioden auf die Anzahl der Touren? Dadurch werden Rückschlüsse auf den Fahrereinsatz und das Handling beim Verladen möglich.
- Wie ändert sich die Anzahl der Anfahrten beim Empfänger? Der Einfluss auf das Handling und die Rampenkontakte kann so untersucht werden.
- Wie häufig wird von Teillieferungen Gebrauch gemacht? Die Untersuchung lässt sich in Teillieferungen über die Zeit (Perioden) und Teillieferungen über Fahrzeuge aufteilen.
- Wie wird die Stoppdichte einer Tour beeinflusst? Die Stoppdichte ist für Spediteure ein Indikator für die Standzeit der Fahrzeuge.

- Wie ändern sich die Ergebnisse, wenn mehr Alternativen eingeräumt werden? Beeinflusst die Anzahl an Alternativen die Ergebnisse der vorgenannten Fragen?
- Welchen Einfluss hat die räumliche Anordnung der Kunden? Gibt es Anordnungen, die die Nutzung von Teillieferungen und alternativen Perioden begünstigen?

1.4. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit besteht aus sieben Kapiteln. Die Einleitung ordnet die Arbeit in das Forschungsfeld der Tourenplanung ein, definiert die Aufgabenstellung und beinhaltet die forschungsleitenden Fragen.

Kapitel 2 gibt einen Überblick der relevanten Literatur zu Tourenplanungsproblemen und zeigt auf, dass die Problemstellung dieser Arbeit noch nicht Gegenstand der Forschung war. Es wird auf die bisher bekannten Eigenschaften von Split-Delivery-Problemen und die Verwendung des Branch-and-Price-Verfahrens zur exakten Lösung von Tourenplanungsproblemen eingegangen.

Die formale Problembeschreibung des Vehicle-Routing-Problems mit alternativen Perioden und Split-Deliveries wird in Kapitel 3 sowohl in seiner kompakten Formulierung als auch in der dekomponierten Formulierung vorgestellt.

Im Kapitel 4 wird das Lösungsverfahren beschrieben und auf den Ablauf des Branch-and-Price-and-Cut-Verfahrens zur Lösung des in dieser Arbeit betrachteten Problems eingegangen. Der Labeling-Algorithmus zur Lösung des Pricing-Problems innerhalb des Column-Generation-Prozesses wird erklärt und vorgestellt. Die für ein Branch-and-Price-and-Cut-Verfahren relevanten Komponenten Verzweigungsregeln, Bestimmung problemspezifischer unterer Schranken und Schnittebenen werden für die Anwendung auf das hier vorliegende Vehicle-Routing-Problem mit alternativen Perioden und Split-Deliveries (SDVRPA) erklärt.

Basierend auf realen Sendungsdaten werden im Kapitel 5 Testszenarien generiert, die unterschiedliche räumliche Verteilungen der Kunden und

alternative Lieferperioden einschließen. Alle Eingangsgrößen für die Test-szenarien werden in verschiedenen Ausprägungen erzeugt. Insgesamt werden 2.700 Szenarien generiert, von denen mehr als 2.100 bei einer Beschränkung der Berechnungszeit auf 60 Minuten gelöst werden konnten.

Die Auswertung der Ergebnisse aus den gelösten Szenarien wird in Kapitel 6 vorgenommen. Klassischerweise wird auf die Zielfunktionswerte der Instanzen eingegangen. Aus logistischer Perspektive ist der Zielfunktionswert alleine aber nicht ausreichend für eine Bewertung der Ergebnisse. Denn am Transport sind mindestens drei Parteien beteiligt, die alle von Änderungen im Transportablauf betroffen sein können: der Spediteur/Frachtführer, das Depot als Versender und die Empfänger. Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen.

Die Beiträge, die diese Arbeit zur wissenschaftlichen Untersuchung von Vehicle-Routing-Problemen leistet, sind:

- die Modellierung des Vehicle-Routing-Problems mit alternativen Lieferperioden und Teillieferungen (SDVRPA),
- die Umsetzung eines exakten Verfahrens zur Lösung dieses Problems,
- Untersuchungen darüber, wie sich alternative Lieferperioden und Teillieferungen auf Versender, Empfänger und Transportunternehmen auswirken,
- die Bereitstellung von Testdatensätzen mit realistischen Sendungsgrößen sowie
- die Bestimmung einer unteren Schranke der notwendigen Touren für das Vehicle-Routing-Problem mit alternativen Lieferperioden und Teillieferungen.

2. Stand der Forschung

Das folgende Kapitel gibt zunächst einen kurzen allgemeinen Einblick in die Optimierung im Transport und die wichtigste Literatur dazu. Fokussiert wird dabei die Literatur betrachtet, die für die Lösung des Problems dieser Arbeit relevant ist. Daran schließt sich ein Abschnitt über die Genealogie der in der Literatur existierenden Transportprobleme an, die mit dem Transportproblem dieser Arbeit verwandt sind. Dadurch wird eine Abgrenzung dieser Arbeit von der bestehenden Forschung vorgenommen, und die Forschungslücke wird deutlich. Mit einem Abschnitt über die Eigenschaften von Split-Delivery-Problemen wird dargelegt, auf welche Erkenntnisse in der Optimierung zurückgegriffen werden kann. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels geht speziell auf das Branch-and-Price-Verfahren ein und begründet die Verwendung des Verfahrens in dieser Arbeit.

2.1. Optimierung im Transport

Die Literatur zu Vehicle-Routing-Problemen ist umfangreich. Das betrifft sowohl die Arten der Vehicle-Routing-Probleme als auch die Methoden zu deren Lösung. Übersichten zu Tourenplanungsproblemen, deren Lösungsverfahren, zum Column-Generation-Verfahren und Branch-and-Price-Ablauf finden sich unter anderem in:

- Toth (2002) als Standardwerk für die Arten von Vehicle-Routing-Problemen,
- Lübbecke und Desrosiers (2005) als Überblick über die wichtigsten Komponenten zum Lösen von Tourenplanungsproblemen mit Column-Generation und zur Erzeugung ganzzahliger Lösungen,

- Chvátal (1983) und Hillier (2010) sind Standardwerke für die lineare Optimierung im Allgemeinen. Sie enthalten Kapitel über die Theorie der Dantzig-Wolfe-Dekomposition, ganzzahliger und gemischt-ganzzahliger Optimierung und der Dualitätstheorie.
- Feillet (2010) hat ein Tutorial zum Lösen von Tourenplanungsproblemen mit Branch-and-Price verfasst.
- Desaulniers (2005) richtet sich an fortgeschrittene Anwender des Column-Generation im Allgemeinen und im Speziellen im Kontext von Tourenplanungsproblemen.
- Grünert (2005a) und Grünert (2005b) bieten einen Einblick in Methoden und Algorithmen zur Lösung von Tourenplanungsproblemen sowie knotenorientierte (Traveling-Salesman Problem) bzw. kantenorientierte Probleme (Briefträgerproblem). Das Kapitel zu Labeling-Algorithmen hilft, das Verfahren nachzuvollziehen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Labeling-Algorithmus eingesetzt, um das Pricing-Problem zu lösen.

Aus der Fülle an Papers und Büchern wird im Folgenden auf die Beiträge eingegangen, die in Bezug auf diese Arbeit von wesentlicher Bedeutung sind. Für die Grundlagen des Column-Generation und Branch-and-Price wird der Leser auf die relevante Literatur verwiesen.

2.2. Tourenplanungsprobleme als Forschungsgegenstand

Das erste Tourenplanungsproblem als lineares Programm wurde von Dantzig und Ramser (1959) als „The Truck Dispatching Problem“ formuliert. Die Autoren haben das Problem formalisiert, die Belieferung von Tankstellen auf dem kürzesten Weg mit mehreren Fahrzeugen vorzunehmen. Die Nebenbedingungen dieses Problems sind, die Nachfrage nach Treibstoff für alle Tankstellen zu erfüllen und gleichzeitig die Kapazitätsbeschränkung eines Fahrzeuges einzuhalten. Alle Fahrzeuge starten an einem gemeinsamen Depot. Die Autoren haben das Problem so formuliert, dass mehrere

Treibstoffarten an einer Tankstelle mit individueller Nachfrage abgebildet und Fahrzeuge unterschiedlicher Kapazität eingesetzt werden können. Zur Lösung wurde das Problem relaxiert und ein Verfahren vorgestellt, wie man maschinell zu einer ganzzahligen Lösung kommen kann, die zu einem Zielfunktionswert nahe des Optimalwertes führt. Seitdem sind Tourenplanungsprobleme ein fester Bestandteil wissenschaftlicher Untersuchungen.

Im Arbeitspapier von Solomon (1983) wurde das Vehicle-Routing-Problem um Time Windows erweitert. Diese Erweiterung lässt eine Anfahrt bei einem Kunden nur in einem bestimmten Zeitfenster zu. Desrosiers u. a. (1984) setzten bereits sehr früh das Column-Generation-Verfahren zur Lösung des Problems ein.

Erstmals veröffentlicht wurde das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen von Dror und Trudeau (1989). In ihrem Artikel *Savings by Split Delivery Routing* untersuchten die Autoren, welche Einsparungen möglich sind, wenn Teillieferungen zulässig sind. Die Kundenaufträge durften mit unterschiedlichen Fahrzeugen durchgeführt werden und die Nachfrage die Fahrzeugkapazität nicht überschreiten. Die Autoren wollten mit ihrem Artikel zeigen, dass durch Teillieferungen Einsparungen möglich sind.

Zur Lösung des Problems stellten sie eine Heuristik vor und wiesen nach, dass sowohl die zurückgelegte Strecke kürzer wird als auch weniger Fahrzeuge für die Belieferung benötigt werden. Im Vergleich zwischen Vehicle-Routing-Problemen und Vehicle-Routing-Problemen mit Teillieferungen haben die Autoren nachgewiesen, dass ihre Heuristik Einsparungen von bis zu 13,7 Prozent zulässt. Die Einsparung an einzusetzenden Fahrzeugen kann bis zu 25,8 Prozent betragen. Als wesentlicher Einflussfaktor wurde das Verhältnis von Kundennachfrage und Fahrzeugkapazität identifiziert. Je näher die absolute Nachfrage an der Fahrzeugkapazität liegt, desto höher ist die Einsparung. In den Testinstanzen wurde davon ausgegangen, dass jede Kundennachfrage die Kapazität eines Fahrzeuges nicht überschreitet.

Von Dror u. a. (1994) wurde das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen erstmals als ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert. Die Teillieferungen werden in diesem Modell durch Anteile der Nachfrage ausgedrückt und sind somit nicht ganzzahlig. Die Nachfrage eines Kunden kann in diesem Modell die Kapazität eines Fahrzeuges übersteigen.

Die Bedingungen zur Vermeidung von Kurzzyklen wurden in diesem Artikel in mehreren Alternativen für das Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries vorgestellt. Definiert ist das Problem auf einem Graphen $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ mit einer Menge $\mathcal{V} = \{0, \dots, n\}$ von Knoten und einer Menge $\mathcal{A} = \{(i, j) \mid i, j \in \mathcal{V}, i \neq j\}$ von Kanten. Mit Knoten 0 wird das Depot repräsentiert. Die übrigen Knoten stellen die Kunden dar. Im Fuhrpark stehen maximal $|\mathcal{F}|$ Fahrzeuge zur Verfügung, die je Fahrzeug f eine individuelle Kapazität Q_f haben können. Jeder Kunde $i \in \mathcal{I}$ hat eine nicht-negative Nachfrage d_i und jede Kante (i, j) hat eine nicht-negative Länge c_{ij} . Die Variablen des Problems sind x_{ijf} und y_{if} . x_{ijf} ist binär und nimmt den Wert 1 an, wenn Fahrzeug f von i nach j fährt, 0 sonst. y_{if} ist der Anteil der Nachfrage eines Kunden i , der von Fahrzeug f geliefert wird. Das Problem wurde wie folgt formuliert:

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}} c_{ij} x_{ijf} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{u. d. N. } \sum_{i \in \mathcal{V}} x_{ikf} - \sum_{j \in \mathcal{V}} x_{kjf} = 0 \quad \forall k \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F} \quad (2.2)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} y_{if} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_i y_{if} \leq Q_f \quad \forall f \in \mathcal{F} \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} x_{ijf} \geq y_{if} \quad \forall i \in \mathcal{I}, f \in \mathcal{F} \quad (2.5)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{(i,j) \in \mathcal{S}} x_{ijf} \leq |\mathcal{S}| - 1 \quad \mathcal{S} \subseteq \mathcal{V}, |\mathcal{S}| \geq 2 \quad (2.6)$$

$$x_{ijf} \in \{0; 1\} \quad \forall i, j \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F} \quad (2.7)$$

$$0 \leq y_{if} \leq 1 \quad i \in \mathcal{I}, f \in \mathcal{F} \quad (2.8)$$

Die Zielfunktion 2.1 minimiert die Gesamtentfernung. Mit den Nebenbedingungen 2.2 wird die Flusserhaltung im Netzwerk sichergestellt. Dass ein Kunde seine gesamte Nachfrage erhält, wird über die Gleichungen 2.3 erreicht. Die Kapazität eines Fahrzeuges f wird mit den Ungleichungen 2.4 begrenzt. Die Bedingungen 2.5 erzwingen, dass das den Kunden bedienende Fahrzeug dasselbe Fahrzeug ist, das den Kunden auch wieder

verlässt. Kurzzyklen werden durch die Ungleichungen 2.6 verboten. Der Definitionsbereich der Variablen wird durch die Bedingungen 2.7 und 2.8 festgelegt.

Frizzell und Giffin (1995) haben die Kombination aus Zeitfenstern und Teillieferungen im Vehicle-Routing-Problem untersucht. In ihrer Problemformulierung wurden Entladezeiten berücksichtigt, die in Abhängigkeit der Anzahl geladener Einheiten berechnet werden. Zur Lösung wurde ein Konstruktionsverfahren eingesetzt. Eine der Annahmen in diesem Modell ist, dass die Zeitfenster je Kunde 30 Minuten betragen. Das Verfahren berücksichtigt die Fahrzeit des dem Kunden am nächsten liegenden Fahrzeuges, die Entladezeit, die eventuell anfallende Wartezeit sowie die verbleibende Zeit vor Ablauf des Zeitfensters beim Kunden. Den Kunden wird basierend auf diesen Zeiten eine Dringlichkeitskennzahl („Dynamic Urgency Classification“) zugewiesen, die im Konstruktionsverfahren berücksichtigt wird. Durch die Begrenzung der Zeitfenster des Kunden auf 30 Minuten, kann es vorkommen, nicht genügend Zeit zu haben, ein Fahrzeug vollständig zu entladen. Grund hierfür ist, dass mehr Einheiten geladen sind als in dieser Zeitspanne entladen werden können. In diesem Fall wurde im Konstruktionsverfahren versucht, ein nächstmögliches Zeitfenster zu finden, das die gesamte Entladung erlaubt. In diesem Zusammenhang wurde in diesem Artikel auch von „multiple time windows“ gesprochen. Diese Art von Zeitfenstern ist deshalb nicht vergleichbar mit der Idee der vorliegenden Arbeit, alternative Perioden zur Anfahrt zur Verfügung zu stellen und in das Optimierungskalkül einzubeziehen. Frizzell und Giffin (1995) erweitern durch „multiple time windows“ lediglich den Zeitraum für die Entladung und bieten keine echten Alternativen zur Belieferung an.

Ein Vehicle-Routing-Problem über mehrere Perioden wurde auch von Cordeau u. a. (2001) betrachtet. Ein typischer Anwendungsfall periodischer Vehicle-Routing-Probleme ist die Planung regelmäßig wiederkehrender Rundtouren. Der von den Autoren verfolgte Ansatz erweiterte das Vehicle-Routing-Problem so, dass die Kunden zunächst eine für sie gültige Anfahrtfrequenz festlegen, die in einem Planungshorizont eingehalten werden soll. Zusätzlich müssen die Kunden sich zu einer für sie gültigen Menge von möglichen Besuchstagen entscheiden. In einem Beispiel heißt das: Bei einem Planungshorizont von fünf Tagen wählt Kunde A eine Frequenz von zwei Lieferungen in fünf Tagen und legt fest, in welcher Kombination

Lieferungen zulässig sein sollen, z. B. zu den Tagen (1;4), (2;4) oder (3;5). Im Lösungsverfahren wird dann eine der Alternativen fixiert. Cordeau u. a. (2001) haben dieses Problem durch eine Tabu-Suche gelöst. In ihrem Artikel wurde darüber hinaus auch die Verallgemeinerung mit mehreren Depots vorgestellt.

Periodische Vehicle-Routing-Probleme werden auch eingesetzt, um sogenannte Milkruns zu planen (vgl. Meyer (2012)) oder zur Planung der Touren für die Müllentsorgung. Pirkwieser und Raidl (2009) lösten ein Periodisches Vehicle-Routing-Problem mit einem Column-Generation-Ansatz. Sie führten für jede Periode ein separates Pricing-Problem ein. Jedes der Pricing-Probleme kann separat gelöst werden; damit kann das Problem für alle Perioden parallel gelöst werden. Der Ansatz der Parallelisierung des Pricing-Problems wird auch in dieser Arbeit aufgegriffen.

In der Dissertation von Cardeneo (2005) wurde das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern um alternative Lieferorte und -zeiten erweitert. Diese Arbeit ist im Kontext der Business-to-Customer-Logistik (B2C-Logistik) einzuordnen und beschäftigt sich mit dem Zustellproblem auf der letzten Meile, wie es für Kurier-Express-Paket-Dienstleister auftritt. Diese haben häufig das Problem, die Kunden bei Zustellung der Ware nicht zu Hause anzutreffen. Wird der Kunde nicht angetroffen, kann noch versucht werden, das Paket beim Nachbarn abzugeben, oder der Zusteller muss es wieder mitnehmen. Sind mehrere Zustellversuche erfolglos, wird der Kunde benachrichtigt und muss das Paket selbst bei einer nahegelegenen Station abholen. Mit Hilfe einer Weboberfläche, dem Personal Logistics Assistant, ist es den Kunden möglich, verschiedene Alternativen für die Zustellung auszuwählen. Entweder kann der Kunde sich für eine Lieferung zu unterschiedlichen Zeiten am selben Ort entscheiden oder für eine Zustellung zur selben Zeit an alternativen Orten. Die dritte Alternative ist eine Zustellung an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Zeiten, z. B. tagsüber bei der Arbeit und am frühen Abend zu Hause. Die Lieferung beim Kunden ist immer nur vollständig möglich; eine Aufteilung in Teillieferungen ist nicht vorgesehen. Damit schließen sich die Alternativen gegenseitig aus. Zur Lösung des Problems wird ein Branch-and-Price-Ansatz genutzt, der das Pricing-Problem durch Constraint Programming löst.

Tricoire u. a. (2010) haben sich mit einem Vehicle-Routing-Problem beschäftigt, das mehrere Perioden und mehrere Zeitfenster berücksichtigt. Ihr Verfahren kann von Handlungsreisenden eingesetzt werden, die z. B. auf wöchentlicher Basis ihre Kundenbesuche für die Folgewoche planen müssen. So können pro Wochentag zwei Zeitfenster je Kunde festgelegt werden, um auf heuristischem Weg eine gute Planung für die Reiseweche zu finden. Eine Betrachtung von Liefermengen war für diese Aufgabenstellung nicht notwendig.

Das Paper von Desaulniers (2010b) geht auf das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern und Teillieferungen ein. Während in früheren Beiträgen zur Lösung des Vehicle-Routing-Problems mit Zeitfenstern und Teillieferungen mit Branch-and-Price die Entscheidung über die Transportmengen im Master-Problem getroffen wurde, wird hier die Entscheidung über die Liefermenge im Pricing-Problem getroffen. Das Vorgehen ist deshalb erfolgreich, weil das Master-Problem nun verschlankt wird und die Anzahl an Nebenbedingungen abnimmt; denn die Ganzzahligkeit der Lieferung wird durch das Pricing-Problem sichergestellt. Die einzelnen Transformationsschritte von der kompakten Formulierung zur Dekomposition in ein Master-Problem und ein Pricing-Problem sind in Desaulniers (2010a) beschrieben. Für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden gilt ein ähnliches Vorgehen. In der vorliegenden Arbeit wird der Vorschlag von Desaulniers (2010b) aufgegriffen.

Auch Archetti u. a. (2011) haben das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen mit Branch-and-Price gelöst. In ihrem Beitrag wurde auf Zeitfenster verzichtet. Genau wie in Desaulniers (2010b) wird die Entscheidung über die Liefermenge im Pricing-Problem getroffen. Die Lösungsverfahren der beiden Autorengruppen unterscheiden sich in den erzeugten Labels im Pricing-Problem. Während Desaulniers (2010b) sogenannte Nulllieferungen zulässt (vgl.4.2), wird im Algorithmus von Archetti u. a. (2011) ein Knoten nur dann angefahren, wenn auch eine Lieferung erfolgt. Da sich beide Arbeiten im Einsatz von Zeitfenstern unterscheiden, ist ein direkter Vergleich der Verfahren nicht möglich.

An dieser Stelle sei festgehalten, dass Vehicle-Routing-Probleme mit Zeitfenstern weitere Möglichkeiten bieten, Cuts einzusetzen, die in Vehicle-Routing-Problemen ohne Zeitfenster nicht verwendet werden können. Die bekanntesten Cuts für Vehicle-Routing-Probleme mit Zeitfenstern sind die

2-path-cuts von Kohl (1995) bzw. Kohl u. a. (1999). Durch die paarweise Betrachtung der zeitlichen Abstände zwischen zwei Knoten und den erlaubten Zeitfenstern der Knoten ist es möglich, logische Ausschlüsse von Kanten bereits im Vorfeld zu treffen. Der Lösungsraum kann dadurch bezüglich der Erreichbarkeit von Zeitfenstern im Vorfeld beschränkt werden. Diese Möglichkeit hat man bei Problemen ohne Zeitfenster nicht.

Die Dissertation von Athanasopoulos (2011) behandelt das Multi-Periodische-Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern. Den Kundenaufträgen werden Perioden-Fenster über einen Planungshorizont zugeordnet. Ähnlich zu dem in der vorliegenden Arbeit behandelten Problem der SDVRPA werden Alternativen für die Anlieferung in Perioden ausgedrückt. Allerdings werden keine Teilladungen betrachtet, und somit ist es weder möglich, eine Lieferung über Zeit noch über Fahrzeuge zu splitten.

Mehrere Perioden für die Auslieferung von Waren wurden auch im Artikel von Pacheco u. a. (2012) erlaubt. An einem Fallbeispiel für die Belieferung eines Bäckereinetzes wurde ein Spielraum für den Zeitpunkt der Zustellung zugelassen. In der Problemformulierung sind keine Teillieferungen möglich. Die Autoren heben hervor, dass ihr Ansatz auch als ein periodisches Vehicle-Routing-Problem hätte gelöst werden können. Damit unterscheidet es sich wesentlich vom Modell, das in der vorliegenden Arbeit vorgestellt und gelöst wird. In ihrem Artikel modellieren die Autoren ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem und lösen es mit Unterstützung einer Heuristik.

In der Studie von Hagenlocher u. a. (2013) wird von einem Best-Practice-Fall mit alternativen Lieferzeitfenstern berichtet. BMW bietet Transportunternehmen mehrere alternative Zeitfenster zur Lieferung an, woraufhin das Unternehmen sich verbindlich für ein Zeitfenster entscheiden muss. Durch diese Regelung können die Wartezeiten der Transportfahrzeuge um die Hälfte reduziert werden, weil die Tourenplaner so Zeitfenster wählen können, die mit den realen Ankunftszeiten übereinstimmen. Eine Planung auf Basis beliebiger, fixer Zeitfenster, die der Disposition des Transportunternehmens keine Flexibilität in der Auswahl der Zeitfenster einräumt, entfällt. Teillieferungen und Mehrfachanfahrten werden in diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Es bleibt offen, ob die Tourenplanung des Transportunternehmens explizit alternative Zeitfenster berücksichtigt oder implizit, indem zunächst unabhängig von Alternativen eine Tour geplant und am

Ende das Zeitfenster ausgewählt wird, das am besten zu dieser Tour passt. Ein Lösungsverfahren zur Planung der Transporte wird in der Studie nicht vorgestellt.

2.3. Eigenschaften von Split-Delivery-Problemen

Die Ergebnisse der Literaturrecherche bezogen auf Tourenplanungsprobleme mit Teillieferungen geben Aufschlüsse über Struktureigenschaften einer optimalen Lösung. Diese Struktureigenschaften können im Lösungsverfahren berücksichtigt werden und helfen dabei, den Lösungsraum einzugrenzen. In der Literatur gibt es auch Arbeiten, die sich mit der Frage beschäftigen, um wie viel kürzer Routen werden können, wenn Teillieferungen erlaubt sind, im Vergleich zu Tourenplanungsproblemen ohne Teillieferungen. Die Ergebnisse dieser Recherche sind im Folgenden zusammengetragen.

2.3.1. Struktureigenschaften einer optimalen Lösung

Transportprobleme mit Teillieferungen sind seit Dror und Trudeau (1990)¹ bzw. Dror und Trudeau (1989) Gegenstand der Forschung. Mit Dror und Trudeau (1989) wurden grundlegende Struktureigenschaften und Aussagen zu Split-Delivery-Problemen festgehalten. Die Beweise der Sätze finden sich in Dror und Trudeau (1990).

Satz 2.1. *Wenn die Kostenmatrix $C = (c_{ij})$ die strikte Dreiecksungleichung erfüllt, dann gibt es keine Kombination aus zwei Routen, die in einer optimalen Lösung des Vehicle-Routing-Problems mit Split-Deliveries mehr als einen gemeinsamen Knoten mit einer Teillieferung hat, Dror und Trudeau (1989).*

¹ Die Arbeit wurde von den Autoren schon 1987 im Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, vorgestellt und wird in Dror und Trudeau (1989) referenziert. Als Artikel wurde sie dann im Jahr 1990 veröffentlicht.

Die Kostenmatrix erfüllt die Dreiecksungleichung, wenn für je zwei Kunden i und j gilt, dass $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj} \forall i, j, k \in \mathcal{V}$, vgl. z. B. Merziger und Wirth (2010) oder Grünert (2005b). Die strikte Dreiecksungleichung ist erfüllt, wenn gilt: $c_{ij} < c_{ik} + c_{kj} \forall i, j, k \in \mathcal{V}$. Die Abbildung 2.1 zeigt

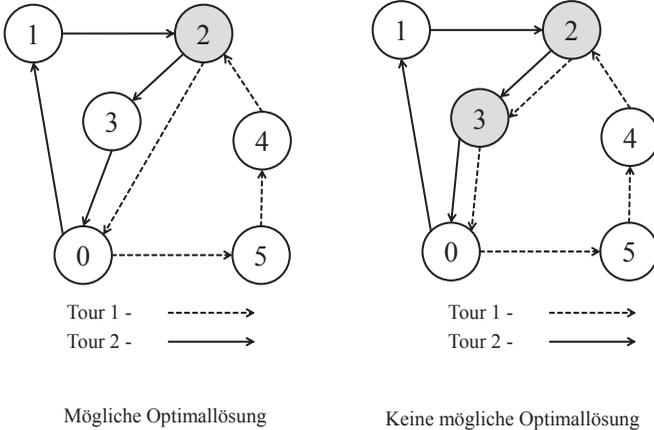


Abbildung 2.1.: Beispiel zur Eigenschaft, dass höchstens eine Teillieferung je Route möglich ist

auf der linken Seite eine mögliche optimale Lösung, die Satz 2.1 genügt. Der einzige gemeinsame Splitpunkt ist am Knoten 2. Die Routen auf der rechten Seite genügen Satz 2.1 nicht. Hier sind zwei Knoten mit einem Split eingezeichnet (Knoten 2 und 3). In einer optimalen Lösung sind solche Routen nicht möglich.

Definition 2.1 (k -split-Zyklus, Dror und Trudeau (1989)). Gegeben seien k Knoten p_1, p_2, \dots, p_k und k Routen. Route 1 beinhaltet die Knoten p_1, p_2 , Route 2 beinhaltet die Knoten p_2, p_3 , Route $k - 1$ beinhaltet die Knoten p_{k-1}, p_k und Route k die Knoten p_k, p_1 . Dies impliziert, dass die Knoten p_1, p_2, \dots, p_k Teillieferungen durch die k Routen und mögliche andere Routen erhalten. Eine Teilmenge von Knoten $\{p_i\}_{i=1}^k$, die Teillieferungen in dieser Form erhält, heißt k -split-Zyklus (vgl. Abbildung 2.2).

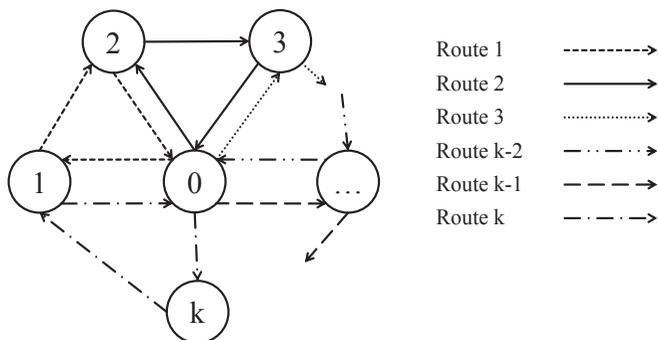


Abbildung 2.2.: Beispiel zu einem k-split Zyklus

Für einen k-split Zyklus gilt folgender Satz:

Satz 2.2. Wenn die Kostenmatrix C_{ij} die strikte Dreiecksungleichung erfüllt, dann gibt es keine k-split Zyklen in der optimalen Lösung des Vehicle-Routing-Problems mit Teillieferungen, Dror und Trudeau (1989).

Aus den beiden Sätzen 2.1 und 2.2 folgt, dass es eine optimale Lösung gibt, die maximal einen Knoten mit Teillieferung je Route vorsieht. Diese Eigenschaften von Vehicle-Routing-Problemen mit Split-Deliveries heben auch Archetti u. a. (2011) in ihrem Artikel hervor.

Der Satz 2.3 wurde von Gendreau u. a. (2006) für das Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries und Time-Windows (SDVRPTW) formuliert und bewiesen. Die Eigenschaft gilt ebenfalls für das Tourenplanungsproblem mit Teillieferungen. Es sei vorausgeschickt, dass ein Pfad *einfach* heißt, wenn für alle Kanten (i, j) gilt, dass keine Kante mehr als einmal durchlaufen wird. Ein Pfad heißt *elementar*, wenn er einfach ist und kein Knoten mehr als einmal durchlaufen wird, vgl. Krumke (2009) - außer Anfangs- und Endknoten stimmen überein.

Satz 2.3. Es existiert eine optimale Lösung, in der jede Kante (v_i, v_j) mit $v_i \in V^*$ und $v_j \in V^*$ des SDVRPTW höchstens einmal vorkommt.

Gendreau u. a. (2006) merken dazu an, dass diese Eigenschaft nicht gilt, wenn die Servicezeit bei einem Kunden von der Liefermenge abhängig ist. Aufgrund von Satz 2.3 leitet Desaulniers (2010b) ab, dass die Menge an elementaren Pfaden auf Pfade von 0 zu $n + 1$ beschränkt werden kann, die die Kapazitätsrestriktion und die Zeitfensterrestriktion nicht verletzen. Dies gilt auch für elementare Pfade des Tourenplanungsproblems mit Split-Deliveries.

2.3.2. Einfluss von Teillieferungen auf die Tourlänge

Werden Split-Deliveries erlaubt, wirkt sich das positiv auf die Tourlänge und die Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen aus.

In Archetti u. a. (2006) wurde gezeigt, dass die Kostenersparnis (Weglänge) zwischen einem Vehicle-Routing-Problem (VRP) und einem Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries (SDVRP) bis zu 50 Prozent betragen kann. Statistische Untersuchungen zum SDVRP wurden in Archetti u. a. (2008) vorgenommen. Hier wurde die räumliche Verteilung der Kunden und die Verteilung der Nachfrage variiert. Generell zeigt sich, dass sowohl bei unterschiedlicher räumlicher Anordnung der Kunden als auch bei unterschiedlichen Varianzen eine Einsparung gemessen in der Kennzahl

$$\frac{z(\text{VRP})}{z(\text{SDVRP})} \quad (2.9)$$

möglich ist. Dabei sind $z(\text{VRP})$ die Kosten der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems und $z(\text{SDVRP})$ die Kosten der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems mit Split-Deliveries. Im Artikel von Archetti u. a. (2008) wurde auch die Kennzahl

$$\frac{r(\text{VRP})}{r(\text{SDVRP})} \quad (2.10)$$

eingeführt, die sich auf die Anzahl der notwendigen Routen bezieht. $r(\text{VRP})$ ist die Anzahl an Routen in der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems und $r(\text{SDVRP})$ ist die Anzahl der Routen in der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems mit Split-Deliveries. Es konnte

gezeigt werden, dass im Vergleich zwischen Vehicle-Routing-Problem und Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries immer gilt:

$$\frac{r(\text{VRP})}{r(\text{SDVRP})} \leq 2 \quad (2.11)$$

In der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems können also höchstens doppelt so viele Routen vorkommen wie in der Optimallösung eines Vehicle-Routing-Problems mit Split-Deliveries. Der Beweis dieses Satzes findet sich in Archetti u. a. (2008).

Abbildung 2.3 zeigt diesen Zusammenhang graphisch. Die Testinstanzen umfassen jeweils 149 Kunden, und die Kapazität des Fahrzeuges liegt bei 149 Einheiten. Das Vehicle-Routing-Problem und das Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries wurden unter schrittweiser Erhöhung der identischen Kundennachfrage immer wieder gelöst. Es zeigt sich, dass das Verhältnis der eingesetzten Fahrzeuge bei der Nachfrage von 75 Einheiten am größten ist. Mit jeder zusätzlichen Erhöhung der Nachfrage bei den Kunden wird das Verhältnis kleiner. Grund hierfür ist, dass bei Vehicle-Routing-Problemen ohne Teillieferungen die Ausnutzung der Fahrzeugkapazität für diesen Wert am schlechtesten ist. Dürfen die Lieferungen nicht gesplittet werden, wird bei einer Fahrzeugkapazität von 149 Einheiten immer eine Pendeltour vom Depot zum Kunden mit einer Fahrzeugbelastung von 75 Einheiten entstehen. Darf hingegen ein Split vorgenommen werden, kann im Fahrzeug auch die restliche Kapazität ausgenutzt werden. Die Anzahl an Routen reduziert sich. Die Erkenntnisse für das Vehicle-Routing-Problem mit Split-Deliveries lassen sich nach Archetti u. a. (2008) wie folgt zusammenfassen:

- (i) Ist die Nachfrage bezogen auf die Fahrzeugkapazität groß, sind die Vorteile durch Teillieferungen gering,
- (ii) ist die Nachfrage bezogen auf die Fahrzeugkapazität klein, sind die Vorteile durch Teillieferungen gering,
- (iii) ist die Nachfrage leicht größer als die halbe Fahrzeugkapazität, dann sind nennenswerte Einsparungen durch Teillieferungen möglich.

Die Erkenntnisse von Archetti u. a. (2008) decken sich mit den Aussagen aus dem Beitrag von Dror und Trudeau (1989).

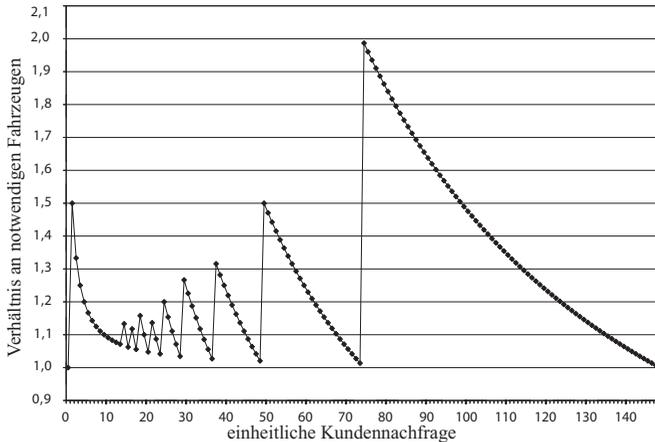


Abbildung 2.3.: Verhältnis von eingesetzten Fahrzeugen beim VRP und SDVRP, Quelle: Archetti u. a. (2008)

2.4. Branch-and-Price als Lösungsverfahren

Als Lösungsverfahren für die Fragestellung dieser Arbeit wurde mit dem Branch-and-Price-Ansatz ein exaktes Verfahren gewählt. Dieses Verfahren wird eingesetzt, um ganzzahlige Lösungen in einem (gemischt-)ganzzahligen Optimierungsproblem zu erzeugen. Der Algorithmus setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem Column-Generation und dem Branch-and-Bound-Verfahren. Das Branch-and-Bound-Verfahren wurde erstmals von Land und Doig (1960) vorgestellt und gehört seitdem zu einem Standardwerkzeug zur Lösung gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme. Desaulniers (2010b) hält fest, dass das Branch-and-Price-Verfahren seit dem Beginn der 1990-er Jahre die führende Methode zur Lösung von Vehicle-Routing-Problemen ist.

Das Column-Generation-Verfahren wurde von Dantzig und Wolfe (1960) vorgestellt. Das Verfahren basiert auf der Idee, ein lineares Programm mit Hilfe einer linearen Transformation in ein Master-Problem und ein Pricing-Problem zu zerlegen. Beide Probleme werden im Wechsel gelöst. Das Pricing-Problem arbeitet mit Informationen aus dem Master-Problem.

Der Vorteil beim Column-Generation liegt darin, dass stärkere Schranken erzeugt werden als in einem nicht-dekomponierten Problem. Die Schranken tragen dazu bei, dass der Lösungsraum eingeschränkt wird; in der Regel ergibt sich dadurch eine kürze Berechnungszeit.

Die Theorie des Column-Generation beruht auf der Dualitätseigenschaft von linearen Programmen. Das Master-Problem nimmt dabei eine koordinierende Rolle ein und arbeitet auf einer eingegrenzten Menge an Lösungen des Problems. Durch das Lösen des Master-Problems wird eine optimale Lösung bezüglich der eingegrenzten Lösungsmenge gefunden. Gleichzeitig werden durch diese Lösung Dualinformationen erzeugt, die in das Pricing-Problem eingehen. Findet das Pricing-Problem, das um die Dualinformationen ergänzt wird, eine Lösung mit negativen reduzierten Kosten, wird diese als neue Spalte bzw. Column in die Menge der eingegrenzten Lösungen des Master-Problems aufgenommen. Mit dieser neuen Column wird das Master-Problem erneut gelöst. Dieser iterative Prozess wiederholt sich solange, bis im Pricing-Problem keine Lösung mehr erzeugt wird, die zu einer Verringerung des Zielfunktionswertes des Masterproblems beitragen kann, also im Pricing-Problem nur noch Lösungen mit positiven reduzierten Kosten gefunden werden.

Im von Dantzig und Wolfe (1960) vorgestellten Column-Generation-Verfahren, werden nicht-ganzzahlige Lösungen erzeugt. Allerdings ist das Column-Generation-Verfahren alleine nicht geeignet, um Tourenplanungsprobleme zu lösen. Tourenplanungsprobleme sind ganzzahlige oder gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme. Daher muss das Column-Generation in ein Branch-and-Bound-Verfahren eingebunden werden, um eine ganzzahlige Lösung zu finden. Die Kombination aus Column-Generation und Branch-and-Bound-Verfahren ist das Branch-and-Price-Verfahren und wurde zum ersten Mal in dieser Form von Desrosiers u. a. (1984) verwendet.

Zur Erläuterung des Branch-and-Bound-Verfahrens wird angenommen, dass es sich um ein gemischt-ganzzahliges Minimierungsproblem handelt. Beim Branch-and-Bound-Verfahren wird ausgehend von einer Initiaallösung der relaxierten Variante des Problems eine Verzweigung (branch) in zwei neue Probleme vorgenommen - sofern es sich bei der Initiaallösung noch nicht um eine optimale Lösung handelt. Es handelt sich um eine optimale Lösung, wenn die Lösung der relaxierten Variante des initialen

Knotens ganzzahlig ist. Die beiden neuen Probleme stellen zwei Knoten im Branch-and-Bound-Baum dar. Zu Beginn des Verfahrens wird die untere Schranke auf den Wert 0 gesetzt und die obere Schranke auf ∞ . Während der Entwicklung des Branch-and-Bound-Baumes gilt als obere Schranke der Zielfunktionswert desjenigen Knotens, der ganzzahlig ist und unter allen Knoten mit einer ganzzahligen Lösung den niedrigsten Zielfunktionswert hat. Die untere Schranke ist der Zielfunktionswert desjenigen Knotens, der aus allen Knoten, über die noch keine Verzweigung vorgenommen wurde, den niedrigsten Zielfunktionswert hat. Die untere Schranke kann sowohl ein Knoten mit einer ganzzahligen Lösung darstellen als auch ein Knoten mit einer nicht-ganzzahligen Lösung. Sobald eine Verzweigung auf einen Knoten im Branch-and-Bound-Baum vorgenommen wurde, wird der Knoten aus der Menge der noch zu untersuchenden Knoten entfernt. Das Verfahren endet, sobald die obere Schranke den gleichen Wert wie die untere Schranke angenommen hat bzw. die Menge der noch zu untersuchenden Knoten leer ist. Wird eine neue ganzzahlige Lösung gefunden, die einen niedrigeren Zielfunktionswert hat als die bisherige obere Schranke, können alle Knoten aus der Menge der noch zu untersuchenden Knoten entfernt werden, die einen größeren Zielfunktionswert haben als die neue Lösung. Die neue Lösung stellt die neue obere Schranke (bound) dar. Auf diese Weise wird der Suchraum des Branch-and-Bound-Baumes reduziert und die Lösungssuche beschleunigt.

Beim Branch-and-Cut werden entweder dem Ursprungsproblem globale Schnittebenen oder den Knoten des Baumes lokale Schnittebenen hinzugefügt. Branch-and-Cut ist eine Kombination aus Branch-and-Bound und Schnittebenenverfahren.

Desrosiers u. a. (1984) lösten das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern ohne Kapazitätsbeschränkung durch den Ansatz der Dekomposition des Problems. Das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern und Kapazitätsbeschränkungen wurde erstmals von Desrochers u. a. (1992) mit Hilfe eines Dekompositionsverfahrens gelöst. Die Relaxation des Masterproblems wurde im vorgestellten Lösungsverfahren als ein relaxiertes Mengenzerlegungsproblem gelöst. Im Pricing-Problem wurden neue gültige Spalten durch ein Kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern und Kapazitätsbeschränkungen erzeugt. Zur Lösung des Pricing-Problems wurde ein Verfahren aus der dynamischen Programmierung verwendet. Das Column-Generation wurde solange durchgeführt bis dem Master-Problem

keine neuen Routen hinzugefügt werden konnten, die den Zielfunktionswert weiter reduzieren können. Im Anschluss daran wurde ein Branching vorgenommen. Das Verfahren wurde solange wiederholt, bis eine optimale ganzzahlige Lösung gefunden wurde. Mit dem bei Desrochers u. a. (1992) vorgestellten Lösungsansatz konnte das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern für bis zu 100 Kunden gelöst werden.

Eine ausführliche Betrachtung der Lösungsmöglichkeiten des Vehicle-Routing-Problems mit Zeitfenstern mit Column-Generation und Branch-and-Price findet sich in Kohl (1995). Er geht im Speziellen auf exakte Verfahren ein und nimmt Untersuchungen zu dem von Desrochers u. a. (1992) eingeführten Verfahren des Column-Generation mit Branch-and-Bound vor. Er erläutert, dass das Aufteilen in ein Master-Problem und ein Pricing-Problem dazu führt, schärfere Schranken im Programmablauf zu finden.

Kohl (1995) hat in seiner Dissertation 2-path-cuts eingeführt. Diese Schnitte werden auf das Mengenerlegungsproblem angewendet und führen beim Branch-and-Bound-Verfahren genau dann zusätzliche Schnittebenen ein, wenn die Anzahl der zu verwendenden Fahrzeuge zwischen 1 und 2 liegt. Die einzufügende Schnittebene wird eine Fahrzeuganzahl von mindestens 2 Fahrzeugen erzwingen. Ein weiterer wichtiger Beitrag seiner Arbeit liegt darin, für das Branch-and-Bound-Verfahren neue Strategien vorzustellen, um ganzzahlige Lösungen zu erhalten. Mit seinen Ansätzen konnte Kohl (1995) 70 der 87 Solomon-Instanzen Solomon (1983) lösen.

Ein einfaches Beispiel für das Column-Generation liefert Wolsey (1998) anhand eines symmetrischen Traveling-Salesman-Problems. Er erläutert, wie das Traveling-Salesman-Problem in ein Master-Problem und ein Pricing-Problem zerlegt wird und löst das Pricing-Problem durch Bestimmung eines 1-Baumes. Bei einem 1-Baum (allgemein s -Baum, vgl. z. B. Jungnickel (2007)) handelt es sich um einen Teilgraphen B von \mathcal{G} bei dem der Knoten 1 mit genau zwei Kanten $(1, i)$ und $(1, j)$ inzident ist. Der Graph B ist dabei ein Gerüst auf dem Graphen \mathcal{G} und B enthält nicht den Knoten 1. Eine Rundtour ist damit ein besonderer 1-Baum.

Bramel und Simchi-Levi (2002) geben eine umfassende Einführung in das Lösungsverfahren des Branch-and-Price. Der Schwerpunkt ihrer Arbeit liegt auf der Lösung des Pricing-Problems durch ein Mengenüberdeckungsproblem am Beispiel des klassischen kapazitierten Vehicle-Routing-Problems, wie es z. B. in Toth und Vigo (2002b) vorgestellt wird.

Jedes Tourenplanungsproblem enthält ein Zuordnungsproblem. Im Falle des Vehicle-Routing-Problems mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden ist die Zuordnung die Entscheidung, in welcher Periode welche Route mit welchen Auslieferungsmengen zu den einzelnen Kunden gefahren wird. Im Column-Generation wird dieses Zuordnungsproblem im Master-Problem gelöst. Die Zuordnung kann im allgemeinen Fall als Mengenerlegungsproblem (Set-Partitioning) dargestellt werden, in speziellen Fällen als Mengenüberdeckungsproblem (Set-Covering).

Die Formulierung als Mengenüberdeckungsproblem ist immer dann möglich, wenn die Entfernungsmatrix die Dreiecksungleichung erfüllt. Folgende Formulierungen zeigen das Mengenerlegungs bzw. -überdeckungsproblem (vgl. Toth und Vigo (2002b)):

Mengenerlegungsproblem/Set-Partitioning

$$\min \left(\sum_{r \in \mathcal{R}} c_r \cdot x_r \right) \quad (2.12)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} a_{ir} \cdot x_r = 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.13)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} x_r = |\mathcal{F}| \quad (2.14)$$

$$x_r \in \{0; 1\} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (2.15)$$

Mengenüberdeckungsproblem/Set-Covering

$$\min \left(\sum_{r \in \mathcal{R}} c_r \cdot x_r \right) \quad (2.16)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} a_{ir} \cdot x_r \geq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.17)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} x_r = |\mathcal{F}| \quad (2.18)$$

$$x_r \in \{0; 1\} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (2.19)$$

Der Unterschied zwischen Mengenerlegungs- und Mengenüberdeckungsproblem liegt darin, dass im Mengenerlegungsproblem jede Teilmenge genau einmal vorkommt (s. 2.13) und im Mengenüberdeckungsproblem

eine Teilmenge mehrmals vorkommen kann (s. 2.17). Diese beiden Formulierungen haben Einfluss auf die Lösung von Tourenplanungsproblemen. Würde man für eine Menge \mathcal{I} von Kunden alle möglichen Touren in einer Menge \mathcal{R} vereinigen, hätte man eine exponentiell hohe Anzahl an Touren in dieser Menge. Jeder dieser Touren r aus \mathcal{R} kann eine Länge c_r zugeordnet werden. Der binäre Koeffizient a_{ir} nimmt genau dann den Wert 1 an, wenn Knoten i auf Tour r besucht wird. x_r ist genau dann 1, wenn die Tour r ausgewählt wird. Die Nebenbedingungen 2.14 bzw. 2.18 stellen sicher, dass genau $|\mathcal{I}|$ Touren aus der Mengen aller Touren \mathcal{R} ausgewählt werden. Toth und Vigo (2002b) halten dazu fest, dass die Formulierung als Mengenüberdeckungsproblem zwei Vorteile hat:

- In die Menge \mathcal{R} der Touren müssen nur die Touren aufgenommen werden, die gültig sind und bei gleichen Kosten die maximale Überdeckung mit den Kunden aufweisen.
- Der Lösungsraum der Dualvariablen wird auf nicht-negative Werte beschränkt.

Daher wird auch in dieser Arbeit die Formulierung als Mengenüberdeckungsproblem gewählt.

Die Literaturrecherche in diesem Kapitel hat sich auf drei Bereiche ausgedehnt. Zunächst wurde anhand einer Genealogie der Tourenplanungsprobleme aufgezeigt, dass es noch keine Untersuchung gibt, wie sich Touren ändern und der Zielfunktionswert beeinflusst wird, wenn alternative Anfahrtsperioden in Verbindung mit Teillieferungen erlaubt werden. Gleichwohl gibt es Untersuchungen, die entweder nur Teillieferungen betrachten oder nur alternative Zustellperioden. Davon abzugrenzen sind Arbeiten, die sich mit einer periodischen Zustellung beschäftigen, die das Ziel verfolgen, regelmäßig wiederkehrende Touren zu finden (z. B. für die Abfallbeseitigung). Die Untersuchung von Vehicle-Routing-Problemen, die alternative Zustellperioden und Teillieferungen zulassen, stellt demnach eine Forschungslücke dar, die mit dieser Arbeit geschlossen wird.

Des Weiteren wurden bisherige Erkenntnisse zu Tourenplanungsproblemen mit Teillieferungen im Allgemeinen zusammengetragen. Die Eigenschaften optimaler Lösungen von Teillieferungsproblemen (S. 19 ff.) werden in dieser Arbeit verwendet, um den Lösungsprozess zu beschleunigen.

Genauso wurde aufgezeigt, dass Teillieferungen die Tourlänge reduzieren können. Mit der vorliegenden Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss alternative Perioden in einer gemeinsamen Betrachtung mit Teillieferungen haben.

Zuletzt wurde gezeigt, dass das Branch-and-Price-Verfahren aktuell das führende exakte Verfahren im Bereich der Tourenplanung ist. Die Formulierung als Set-Covering Modell ist dabei zu bevorzugen.

3. Problemformulierung

In diesem Kapitel wird das in 1.2 qualitativ erläuterte Problem formalisiert. Als erstes wird das Problem in seiner kompakten Formulierung aufgestellt. Die kompakte Formulierung wird danach in ein Master-Problem und seine Pricing-Probleme zerlegt. Die Anzahl der lösenden Pricing-Probleme entspricht der Größe des in Perioden ausgedrückten Planungshorizontes.

3.1. Kompakte Formulierung des SDVRPA

Die Menge \mathcal{V} beinhalte alle Knoten des Problems inklusive des Knoten 0, der das Depot darstellt. Alle Touren müssen am Knoten 0 starten und enden. Die Menge aller Kunden sei \mathcal{I} . Für \mathcal{I} gilt $\mathcal{I} = \mathcal{V} \setminus 0$. Die Menge \mathcal{A} enthalte die Kanten des Netzes (i, j) mit $i, j \in \mathcal{V}$ und $i \neq j$. Mit \mathcal{V} und \mathcal{A} lässt sich der Graph $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ vollständig beschreiben. Die Entfernung zwischen zwei Knoten i und j sei c_{ij} . Zur Durchführung der Transporte stehe eine Menge \mathcal{F} identischer Fahrzeuge f zur Verfügung. Die Kapazität eines Fahrzeuges sei auf Q beschränkt und gelte gleichermaßen für alle Fahrzeuge. Jeder Kunde $i \in \mathcal{I}$ habe eine individuelle Nachfrage $d_i > 0$. Eine Anfahrt des Kunden sei in einer beliebigen Kombination aus der Menge kundenspezifischer aufeinanderfolgender Perioden möglich. Die Menge kundenspezifischer alternativer Perioden sei mit \mathcal{P}_i definiert. Es gilt, dass $\mathcal{P}_i \subseteq \mathcal{P}$ ist. Nur in diesen Perioden ist für einen Kunden i eine Anfahrt möglich.

Für die Belieferung bedeutet das, dass sie entweder in ausschließlich einer Periode mit einem oder mehreren Fahrzeugen bei Kunde i vorgenommen werden kann oder aber eine Lieferung in beliebiger Kombination über die

Perioden \mathcal{P}_i erfolgt. Somit kann die Kundennachfrage d_i in Transportmengen entweder über die Zeit oder über Fahrzeuge aufgeteilt werden. Dadurch werden alternative Lieferperioden ermöglicht, die einem Spediteur mehrere Alternativen zur Planung geben, um eine kürzestmögliche Tour zu finden.

Angenommen die Menge aller Perioden umfasst $\mathcal{P} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Ein Kunde i kann nun festlegen, in welchen Perioden eine Anfahrt erfolgen kann, z.B: $\mathcal{P}_i = \{2, 3\}$. Eine gültige Lösung könnte nun so aussehen, dass entweder die vollständige Lieferung in Periode 2 erfolgt oder in Periode 3. Es wäre ebenfalls eine gültige Lösung, wenn eine Teillieferung in Periode 2 und die restliche Teillieferung in Periode 3 erfolgt - sofern die Kapazität Q des Fahrzeuges nicht überschritten wird. Damit ist diese Formulierung des Problems bezüglich der auswählbaren Perioden \mathcal{P}_i eine Relaxation von Cordeau u. a. (2001) und bietet die Möglichkeit, die Lieferung über Perioden hinweg aufzuteilen.

Mit den binären Variablen x_{ijf}^p wird entschieden, ob ein Fahrzeug f die Kante (i, j) in Periode p nutzt oder nicht. Die Variablen d_{if}^p entscheiden darüber, welche (Teil-)Lieferung der Gesamtnachfrage d_i eines Kunden i in Periode p und mit Fahrzeug f transportiert wird. d_{if}^p ist eine ganzzahlige Variable und drückt aus, dass es sich um nicht-teilbare Güter handelt.

Mit den definierten Variablen und Parametern kann das Problem als lineares Programm formuliert werden.

Die Zielfunktion 3.1 minimiert die Gesamttourlänge über alle Perioden.

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}} x_{ijf}^p \cdot c_{ij} \right) \quad (3.1)$$

Mit Nebenbedingung 3.2 ist sichergestellt, dass die Nachfrage eines Kunden i vollständig erfüllt wird. Die Summe der Teillieferungen d_{if}^p über alle Perioden p und Fahrzeuge f muss für jeden Kunden mindestens genauso hoch sein wie seine Nachfrage d_i . Die Formulierung entspricht der Set-Covering-Formulierung aus Abschnitt 2.4.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F}} d_{if}^p \geq d_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.2)$$

Die Variable H_f sei die Anzahl der in der Lösung verwendeten Fahrzeuge. H_f ist ganzzahlig und kann wie folgt eingeschränkt werden: es werden mindestens $\left\lceil \frac{\sum_{i \in \mathcal{V}} d_i}{Q} \right\rceil$ und höchstens $|\mathcal{F}|$ Fahrzeuge eingesetzt, \mathcal{F} ist bspw. der Fuhrpark des Spediteurs.

Mit x_{0jf}^p werden nur die Fahrzeuge gezählt, die das Depot 0 in Periode p verlassen. Bedingung 3.3 ist eine Hilfsbedingung, die zum Branching auf die Anzahl eingesetzter Fahrzeuge H_f genutzt wird. Dies spiegelt sich später auch in 4.25 wieder, wo auf diese Verzweigungsregel eingegangen wird.

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}} x_{0jf}^p = H_f \quad (3.3)$$

d_{if}^p bezeichne die Menge, die Fahrzeug f in Periode p an Kunden i liefert. Über die Bedingung 3.4 wird sichergestellt, dass ein Fahrzeug f in einer Periode p nicht mehr Einheiten transportiert als seine Kapazität Q zulässt.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_{if}^p \leq Q \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.4)$$

Bei der Formulierung über mehrere Perioden handelt es sich um ein Zuordnungsproblem von Touren und Liefermengen je Periode. Somit muss sichergestellt werden, dass in keiner Periode p Touren gebildet werden, in denen nichts transportiert wird. Umgekehrt muss sichergestellt werden, dass in keiner Periode p eine Lieferung d_{if}^p erfolgt, ohne dass diese Lieferung mit einer Tour verknüpft ist. Mit Bedingung 3.5 wird dieser Zusammenhang hergestellt. Sobald eine Variable x_{ijf}^p den Wert 1 annimmt, kann eine Lieferung mit einem Wert $d_{if}^p \geq 0$ erfolgen. Da es sich um ein Minimierungsproblem handelt und eine Anfahrt eines Knoten ohne Lieferung Kosten verursacht, wird d_{if}^p in der Lösung immer einen Wert > 0 annehmen. Sind alle Variablen $x_{ijf}^p = 0$, kann keine Lieferung erfolgen, die Kosten verursacht.

$$\min \{d_i; Q\} \sum_{j \in \mathcal{V}} x_{ijf}^p \geq d_{if}^p \quad \forall i \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.5)$$

Die Bedingungen 3.6, 3.7 und 3.8 stellen sicher, dass in jeden Knoten genauso viele Kanten hineinführen, wie Kanten herausführen. Diese Bedingungen müssen für jedes in der Lösung eingesetzte Fahrzeug und jede in der Lösung aktive Periode eines Fahrzeuges gelten. Im Allgemeinen ist im Vorfeld nicht bekannt, welche Fahrzeuge in welcher Periode eingesetzt werden. Diese Formulierung ist jedoch hinreichend, um eine Dekomposition des Problems in ein Master-Problem und die Pricing-Probleme vorzunehmen.

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} x_{0jf}^p \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{ijf}^p - \sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{jif}^p = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} x_{i0f}^p \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.8)$$

Mit 3.9 werden Kurzzyklen vermieden. Die Kurzzyklusbedingung wird dabei für jedes Fahrzeug f und jede Periode p dem Problem separat hinzugefügt. Alternative Formulierungen für die Kurzzyklusbedingung werden z. B. in Grünert (2005b) gegeben. Pataki (2003) geht darauf ein, welchen Einfluss Kurzzyklusbedingungen auf die Laufzeit und Komplexität haben.

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{S}} x_{ijf}^p \leq |\mathcal{S}| - 1 \quad \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{V}, |\mathcal{S}| \geq 2, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.9)$$

Die Wertebereiche der Variablen werden mit den Bedingungen 3.10 bzw. 3.11 eingeschränkt.

$$x_{ijf}^p \in \mathbb{B} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.10)$$

$$d_{if}^p \in \mathbb{N}_0 \quad \forall (i, j) \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.11)$$

Mit einer Variablenmenge, die entweder binäre oder ganzzahlige Variablen enthält, gehört das Problem zu den ganzzahligen Optimierungsproblemen. Das SDVRPA ist als eine Verallgemeinerung des Vehicle-Routing-Problems den NP-schweren Problemen zuzuordnen.

Die vollständige, kompakte Formulierung des Vehicle-Routing-Problems mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden ist in 3.12 - 3.22 festgehalten.

Es fällt auf, dass alle Nebenbedingungen, außer den Bedingungen 3.13 und 3.14, separat für Perioden p und Fahrzeuge f formuliert sind. Diese beiden Bedingungen stellen die Verknüpfung der Perioden bzw. der Fahrzeuge miteinander dar. Die Matrix des Problems hat somit eine blockdiagonale Struktur, die zur Dekomposition des Problems in ein Master-Problem und ein Pricing-Problem verwendet werden kann, Dantzig und Wolfe (1960). Da die Erfüllung der Kundennachfrage in mehreren Perioden getrennt voneinander stattfinden kann, ist es zusätzlich möglich, die Perioden getrennt voneinander zu betrachten. Dies erfolgt über die Bildung voneinander unabhängiger Pricing-Probleme. Die Probleme können parallel zueinander gelöst werden. Die Gesamtnachfrage eines Kunden ist erst dann erfüllt, wenn die Summe der Teillieferungen über die Perioden mindestens der Nachfrage jedes Kunden i entspricht. Im nächsten Abschnitt wird daher darauf eingegangen, wie das Problem in ein Master-Problem und mehrere, getrennt voneinander zu betrachtende Pricing-Probleme aufgeteilt werden kann.

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}} x_{ijf}^p \cdot c_{ij} \right) \quad (3.12)$$

$$\text{u. d. N.} \quad \sum_{p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F}} d_{if}^p \geq d_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.13)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}} x_{0jf}^p = H_f \quad (3.14)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_{if}^p \leq Q \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.15)$$

$$\min \{d_i; Q\} \sum_{j \in \mathcal{V}} x_{ijf}^p \geq d_{if}^p \quad \forall i \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P},$$

$$f \in \mathcal{F} \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}} x_{0jf}^p \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{ijf}^p - \sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{jif}^p = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P},$$

$$f \in \mathcal{F} \quad (3.18)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} x_{i0f}^p \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.19)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{S}} x_{ijf}^p \leq |\mathcal{S}| - 1 \quad \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{V}, |\mathcal{S}| \geq 2,$$

$$p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (3.20)$$

$$x_{ijf}^p \in \mathbb{B} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P},$$

$$f \in \mathcal{F} \quad (3.21)$$

$$d_{if}^p \in \mathbb{N}_0 \quad \forall (i,j) \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P},$$

$$f \in \mathcal{F} \quad (3.22)$$

3.2. Zerlegung des SDVRPA

Aus der kompakten Formulierung des Problems wurde gefolgert, dass eine blockdiagonale Struktur in der Matrix des Problems existiert. Da das Problem aus der Betrachtung mehrerer alternativer Perioden besteht, muss sichergestellt werden, dass die Summe der Teillieferung über die Perioden für einen Kunden mindestens der Nachfragemenge eines Kunden entspricht. Umfasst ein Auftrag d_i Einheiten für einen Kunden i und in einer Periode p' wird eine Teilmenge $\sum_{f \in \mathcal{F}} d_{if}^{p'}$ dieses Auftrages ausgeliefert, so bleibt noch die Menge $d_i - \sum_{f \in \mathcal{F}} d_{if}^{p'}$ übrig, die in den Perioden $\mathcal{P}_i \setminus \{p'\}$ auszuliefern ist.

Dadurch ergeben sich zwei Konsequenzen für die Problemzerlegung: Das Problem kann nach Fahrzeugen zerlegt werden, die zunächst unabhängig voneinander betrachtet werden können, sowie nach Perioden, die im Master-Problem gemeinsam betrachtet werden. Je Periode wird ein separates Pricing-Problem gelöst. Dadurch ist eine Parallelisierung der Lösung der Pricing-Probleme möglich.

3.2.1. Master-Problem

Die kompakte Formulierung in Abschnitt 3.1 lässt sich auf Grund der blockdiagonalen Struktur wie folgt in ein Master-Problem und mehrere Pricing-Probleme zerlegen: Die Zielfunktion 3.23 des Master-Problems minimiert die Transportkosten, die sich aus den Längen e_r einer Route r und der Nutzungshäufigkeit λ_{rw}^p der Route r in allen Perioden p ergeben. $r \subseteq \mathcal{R}$, wobei \mathcal{R} die Menge aller möglichen Routen ist. Die Variable λ_{rw}^p enthält die drei Informationen

- in welcher Periode p eine Tour genutzt wird,
- welche Route r gefahren wird und
- mit welcher Liefermengenkombination w die Route gefahren wird.

Eine Route startet immer am Depot und führt über einen oder mehrere Kunden zum Depot zurück, ohne Kunden doppelt zu besuchen, z. B. $r = [0 - 2 - 4 - 0]$. Für die Routen existieren eine oder mehrere Kombinationen aus Liefermengen $w \in \mathcal{W}$, mit \mathcal{W} als Menge aller Lieferkombinationen. Kunde 2 könnte z. B. 12 Einheiten erhalten und Kunde 4 könnte 18 Einheiten erhalten, so dass $w = [0 - 12 - 18 - 0]$. Die Länge e_r dieser Route r könnte z. B. 15 Weeinheiten betragen.

Im Master-Problem werden nicht alle möglichen Kombinationen von Touren, Lieferungen und Perioden auf einmal betrachtet, sondern nur eine Auswahl dieser Kombinationen. Daher handelt es sich beim Master-Problem um ein sogenanntes Restricted-Master-Problem. Das Master-Problem bestimmt aus der Menge der verfügbaren Variablen diejenigen, die die Transportkosten minimieren.

$$\min \left(\sum_{r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W}} e_r \cdot \lambda_{rw}^p \right) \quad (3.23)$$

Mit Nebenbedingung 3.24 wird erzwungen, dass jeder Auftrag d_i eines Kunden i vollständig erfüllt wird. Der Koeffizient ρ_{iw}^p drückt dabei aus, mit welcher Liefermenge ein Kunde i durch eine Lieferkombination w in Periode p beliefert wird. Die Dualvariablen, die sich aus dieser Nebenbedingung ergeben, seien δ_i . Da die Nebenbedingung eine \geq -Bedingung ist, kann der Dualwert nur Werte $\delta_i \geq 0$ annehmen. Diese Nebenbedingung ist somit das Pendant zu Nebenbedingung 3.2.

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W}} \rho_{iw}^p \cdot \lambda_{rw}^p \geq d_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad \rightarrow \delta_i \quad (3.24)$$

Analog zu Nebenbedingung 3.3 in der kompakten Variante des Vehicle-Routing-Problems mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden wird bei der Dekomposition des Problems im Master-Problem die Anzahl zulässiger Fahrzeuge H_f mit Nebenbedingung 3.25 berücksichtigt. Die Dualvariable, die sich aus dieser Nebenbedingung ergibt, sei γ . Die Nebenbedingung ist eine Gleichheits-Bedingung, der Dualwert γ kann daher Werte annehmen, die ≥ 0 oder ≤ 0 sind.

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}, p \in \mathcal{P}} \lambda_{rw}^p = H_f \quad \rightarrow \gamma \quad (3.25)$$

Die Variablen λ_{rw}^p dürfen nur nicht-negative Werte annehmen, Restriktion 3.26.

$$\lambda_{rw}^p \geq 0 \quad \forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W} \quad (3.26)$$

3.2.2. Pricing-Probleme

Im Vehicle-Routing-Problem mit alternativen Lieferperioden gibt es für jede Periode p ein separates Pricing-Problem. Mit der Lösung des Pricing-Problems wird eine neue Route r berechnet, die dem Master-Problem hinzugefügt wird. Durch Aufnahme dieser Route wird der Lösungsraum des Master-Problems um eine Routenalternative erweitert, die eine günstigere Lösung verspricht als der aktuelle Lösungsraum. Das Pricing-Problem ist als Elementare-Kürzeste-Wege-Problem mit Ressourcenbeschränkung formuliert. Die Informationen aus dem Master-Problem werden durch die Dualvariablen berücksichtigt. Die Zerlegung des Problems bringt zwei Eigenschaften mit sich:

- Da für jede Periode ein einzelnes Pricing-Problem aufgestellt werden kann, lässt sich die Lösung der Pricing-Probleme parallelisieren.
- In den Pricing-Problemen kann die Betrachtung mehrerer Fahrzeuge fallengelassen werden. Damit reduziert sich der Lösungsraum um die Dimension des Fahrzeuges.

Das zu lösende Pricing-Problem ist nachfolgend dargestellt. Mit der Zielfunktion 3.27 wird nach der Kombination aus Weg und Transportmengen gesucht, die die niedrigsten reduzierten Kosten hat. Die Informationen aus dem Master-Problem werden in Form der Dualvariablen δ_i und γ im Pricing-Problem berücksichtigt.

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, i \neq j} c_{ij} \cdot x_{ij}^p - \sum_{i \in \mathcal{I}} (\delta_i \cdot d_i^p) + \gamma \right) \quad (3.27)$$

Mit Bedingung 3.28 wird erreicht, dass über keinen Pfad mehr transportiert wird, als die Kapazität Q zulässt. An den Knoten eines Pfades wird

jeweils die Menge d_i^p abgeholt. Diese Bedingung ist das Äquivalent zu 3.4 aus der kompakten Formulierung.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_i^p \leq Q \quad (3.28)$$

Auch für das Elementare-Kürzeste-Wege-Problem mit begrenzten Ressourcen gilt, dass eine Lieferung nur dann erfolgen kann, wenn eine Kante auch genutzt wird (vgl. 3.5).

$$\min \{d_i; Q\} \sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{ij}^p \geq d_i^p \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.29)$$

Die Bedingungen 3.30 – 3.32 sind die Flussbedingungen. Sie erzwingen, dass in jeden Knoten eines Pfades genauso viele Kanten hineinführen, wie Kanten hinausführen. Für das Depot gilt, dass eine Kante aus dem Depot hinausführt und eine Kante in das Depot hineinführt. Die entsprechenden Nebenbedingungen aus der kompakten Formulierung sind 3.6 bis 3.8.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} x_{0j}^p = 1 \quad (3.30)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{ij}^p = \sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} x_{ji}^p \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3.31)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{I}} x_{i0}^p = 1 \quad (3.32)$$

Kurzzyklen dürfen auch im Pricing-Problem nicht auftreten (vgl. 3.9) und werden mit 3.33 verboten.

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{S}} x_{ij}^p \leq |\mathcal{S}| - 1 \quad \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{V}, |\mathcal{S}| \geq 2 \quad (3.33)$$

Die verwendeten Variablen sind wie folgt beschränkt:

$$x_{ij}^p \in \{0; 1\} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{V} \quad (3.34)$$

$$d_i^p \in \{0, 1, \dots\} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (3.35)$$

In diesem Kapitel wurde das Problem in kompakter Form aufgestellt und im Anschluss daran in ein Master-Problem und seine Pricing-Probleme

zerlegt. Die Zerlegung enthält nur die wichtigsten Nebenbedingungen. Die Aufnahme der Nebenbedingungen für Branches und Cuts im Master-Problem sowie daraus resultierender Dualwerte für die Pricing-Probleme werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

4. Lösungsverfahren

Die Lösung des Problems ist in ein Branch-Price-and-Cut-Verfahren eingebunden. Das folgende Kapitel beschreibt zunächst den Ablauf des Verfahrens. Es wird vorgestellt, wie das Pricing-Problem gelöst wird und welche Verzweigungsregeln im Branch-and-Price-Verfahren angewendet werden. Außerdem wird gezeigt, wie das Master-Problem mit Hilfe unterer Schranken weiter eingeschränkt werden kann. Zuletzt wird beschrieben, welche Cuts im Ablauf des Branch-and-Price eingesetzt werden und das Lösungsverfahren somit zu einem Branch-Price-and-Cut-Verfahren erweitert wird.

4.1. Ablauf des Verfahrens

Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Ablauf des Lösungsverfahrens. Zunächst wird eine Initialisierung des Programms über einen Wurzelknoten mit künstlichen Variablen vorgenommen. Die künstlichen Variablen müssen nicht notwendigerweise eine real durchführbare Tour sein; sie stellen lediglich sicher, dass das im Wurzelknoten initialisierte Master-Problem gelöst werden kann. Durch die Lösung des Wurzelknotens werden die Columns im Master-Problem um gültige Spalten ergänzt.

Wird im Wurzelknoten bereits eine optimale Lösung gefunden, kann das Verfahren an dieser Stelle beendet werden. Eine optimale Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass sie ganzzahlig ist und im Column-Generation-Prozess keine Touren mit negativen reduzierten Kosten gefunden werden. Das Auffinden einer optimalen Lösung im Wurzelknoten kommt nur sehr selten vor. In der Regel wird das Verfahren durch Hinzufügen des Wurzelknotens zur Menge der noch zu untersuchenden Knoten fortgesetzt. Die Pricing-Probleme müssen für jede Periode p gelöst werden; dies erfolgt

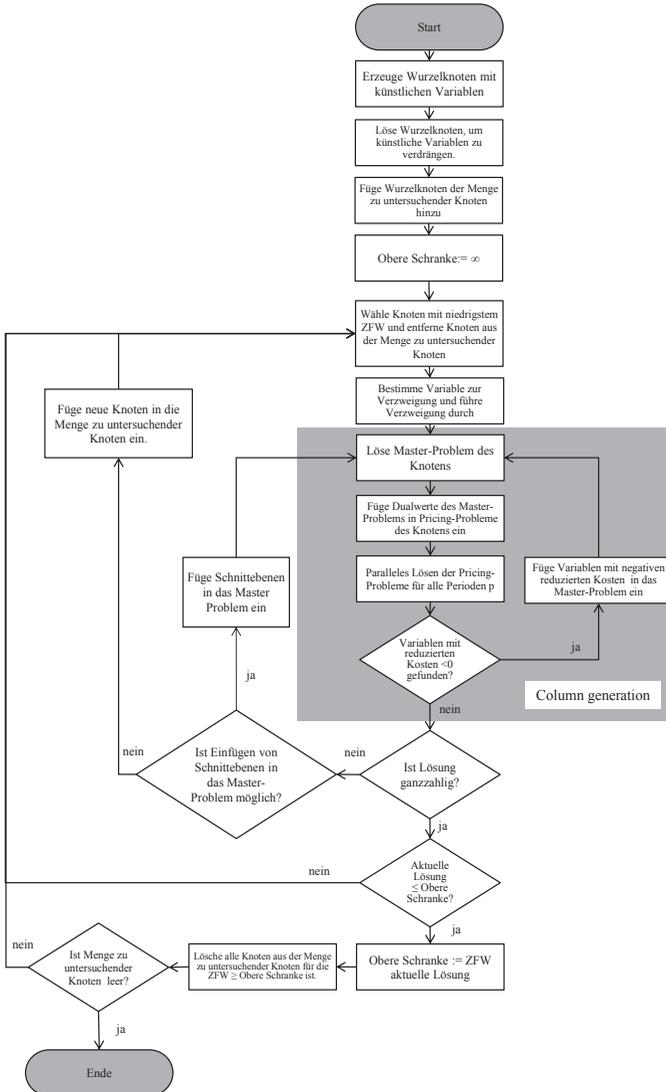


Abbildung 4.1.: Schematischer Ablauf des Branch-Price-and-Cut-Verfahrens für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden

parallel für alle Pricing-Probleme. Die Routen mit reduzierten Kosten < 0 werden gespeichert, um dem Master-Problem hinzugefügt zu werden. Die obere Schranke des Branch-and-Bound-Baumes wird zu Beginn auf ∞ gesetzt.

Als nächster zu lösender Knoten im Branch-and-Bound-Baum wird immer der Knoten gewählt, der den niedrigsten Zielfunktionswert hat. Über den ausgewählten Knoten wird eine Verzweigung auf eine der gemäß der Verzweigungsregeln (siehe Kapitel 4.3) ermittelten Variablen vorgenommen. Der ausgewählte Knoten wird aus der Menge noch zu untersuchender Knoten entfernt und zwei weitere Knoten durch die Verzweigung erzeugt. Für beide neuen Knoten wird nun das Column-Generation begonnen.

Durch die erfolgte Dekomposition des Problems in ein Master-Problem und mehrere Pricing-Probleme ist es ausreichend, das Master-Problem so zu gestalten, dass es gültige Lösungen erzeugen kann. Es ist nicht notwendig, das Master-Problem mit allen Extremstrahlen bzw. Extrempunkten auszustatten, die das vollständige Polyeder beschreiben. Neue Variablen, die eine Verbesserung des Zielfunktionswertes versprechen, werden durch das Lösen der Pricing-Probleme gefunden.

Alle Lösungen des Pricing-Problems, die negative reduzierte Kosten haben, gehen als neue Variablen in das Master-Problem des Knotens ein. Im Column-Generation-Prozess für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden wird zunächst das Master-Problem des untersuchten Knotens gelöst. Die Dualwerte des Master-Problems werden, abhängig von der untersuchten Periode, in die Zielfunktion der Pricing-Probleme aufgenommen. Sobald eine Lösung eines Pricing-Problems negative reduzierte Kosten hat, wird die gefundene Kombination aus Route und Transportmengen als neue Variable in das Master-Problem eingefügt. Dieses wird dann erneut gelöst.

Die Erzeugung neuer Spalten endet, sobald für keine Periode eine weitere Lösung mit negativen reduzierten Kosten gefunden wird. Die gefundene Lösung wird nun auf Ganzzahligkeit geprüft.

Ist die Lösung nicht ganzzahlig, werden die Flüsse in der Lösung des Master-Problems im aktuellen Knoten daraufhin untersucht, ob dem Master-Problem Schnittebenen hinzugefügt werden können. Finden sich Flüsse, die die Schnittbedingungen verletzen, werden Restriktionen in

das Master-Problem aufgenommen, die diese Flüsse bei Kindern dieses Knotens verbieten werden. Der Column-Generation-Prozess wird in diesem Knoten neu gestartet, um die Dualwerte zu aktualisieren. Werden keine Schnitte gefunden, wird der Knoten in die Menge zu untersuchender Knoten aufgenommen.

Ist die Lösung ganzzahlig, wird geprüft, ob der gefundene Zielfunktionswert kleiner oder gleich der aktuellen oberen Schranke ist. Falls die Prüfung positiv ist, wird der oberen Schranke des Problems der aktuelle Zielfunktionswert zugewiesen. Alle Knoten aus der Menge der zu untersuchenden Knoten deren Zielfunktionswert größer als die obere Schranke ist, werden aus der Knotenmenge gelöscht. Falls die Menge der noch zu untersuchenden Knoten nach diesem Vorgang leer ist, ist das Verfahren beendet und eine optimale Lösung wurde gefunden. Andernfalls wird mit der Auswahl des nächsten zu untersuchenden Knotens fortgefahren. Ist der gefundene Zielfunktionswert größer als die obere Schranke, wird gleich mit der Auswahl des nächsten zu untersuchenden Knotens weitergemacht.

4.2. Lösung des Pricing-Problems

Beim Pricing-Problem für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden liegt ein Kürzeste-Wege-Problem vor. Zum Erfolg des Column-Generation-Verfahrens haben Kürzeste-Wege-Probleme maßgeblich beigetragen. Dazu führen Irnich und Desaulniers (2005) folgende drei Gründe an:

- Komplexe Kostenstrukturen können mit Kürzeste-Wege-Problemen aufgrund der Ressourcenbeschränkungen abgebildet werden. Darüber hinaus kann eine breite Palette an Regeln definiert werden, die für eine Route gelten sollen. Beides zusammen macht Kürzeste-Wege-Probleme sehr flexibel.
- Da Kürzeste-Wege-Probleme keine Ganzzahligkeitseigenschaft besitzen, können im Column-Generation schärfere Schranken erhalten werden als bei der Lösung einer linearen Relaxation von kantenbasierten Formulierungen.

- Es gibt effiziente Algorithmen für wichtige Varianten des Kürzeste-Wege-Problems.

Durch die Berücksichtigung von Dualwerten aus dem Master-Problem, die auch negative Werte annehmen können, muss ein Elementare-Kürzeste-Wege-Problem gelöst werden. Ein Pfad ist elementar, wenn Knoten nicht mehrfach besucht werden, vgl. Grünert (2005b). Wäre es in einem Minimierungsproblem, das negative Kantenbewertungen enthält, erlaubt, Knoten mehrfach zu besuchen, könnten in einer Kantenfolge Zyklen mit negativem Wert entstehen. Das Problem wäre nicht lösbar. Elementary-Shortest-Path-Probleme mit begrenzten Ressourcen sind der Klasse der NP-schweren Probleme zuzuordnen, vgl. Dror (1994). Dadurch wird auf der Suche nach einer optimalen Lösung schnell eine Grenze erreicht, an der eine Lösung nicht mehr in vertretbarem Zeitaufwand gefunden werden kann.

Zu einem der am weitesten verbreiteten effizienten Algorithmen zur Lösung des Kürzeste-Wege-Problems zählen Labeling-Algorithmen, vgl. Irnich und Desaulniers (2005). Sie zeichnen sich aus durch

- ein hohes Maß an Flexibilität, weil beliebig viele unterschiedliche Marken definiert werden können,
- eine garantiert optimale Lösung und
- die Möglichkeit, den Lösungsprozess vor dem Aufwinden einer optimalen Lösung abubrechen und das Labeling-Verfahren somit auch als Heuristik eingesetzt werden kann.

Eine Einführung in Labeling-Algorithmen findet sich in Grünert (2005b). Bekanntester Vertreter der Labeling-Algorithmen ist der Dijkstra-Algorithmus, der von Dijkstra (1959) und Dantzig (1960) unabhängig voneinander entwickelt wurde. In diesem Algorithmus wird als Komponenten eines Labels die Entfernung bis zum aktuellen Knoten und der Vorgängerknoten verwendet.

Zur Lösung des Pricing-Problems für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden wird ein Label definiert,

das sich aus 6 unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt. In Desaulniers (2010b) wurde dieses Verfahren zur Lösung des Pricing-Problems mit Zeitfenstern und 7 Komponenten des Labels verwendet. Der Algorithmus wird im folgenden skizziert.

Bei einem Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen müssen im Pricing-Problem bis zu drei Fälle der Labelerweiterung von einem Knoten zum nächsten unterschieden werden: Ganzladung, Teillieferung und Nulllieferung.

- Bei einer Ganzladung (GL) wird am Knoten i die volle vom Kunden gewünschte Menge d_i (mit $d_i \leq Q$) geliefert.
- Bei einer Teillieferung (TL) wird am Knoten i nur ein Teil der vom Kunden gewünschten Menge d_i geliefert. Dabei ist $d_i \leq Q$. Der Split wird in diesem Fall nur vorgenommen, weil er zu einer Verbesserung des Zielfunktionswertes führen kann (bzw. nicht zu einer Verschlechterung führt).
- Bei einer Nulllieferung (NL) wird ein Knoten angefahren, aber keine Ladung ausgeliefert. Nulllieferungen treten in der Praxis nicht auf. Im in dieser Arbeit gewählten Branch-and-Price-Verfahren müssen sie allerdings berücksichtigt werden, weil die Lösung des Master-Problems im Allgemeinen eine Linearkombination unterschiedlicher λ_{rw}^p aus dem Master-Problem ist. In Abbildung 4.2 ist eine solche Linearkombination an einem Beispiel gezeigt. Route 1 wird zu $\frac{1}{3}$ genutzt, Route 2 zu $\frac{2}{3}$. Erst durch die Linearkombination aus beiden Routen entsteht die Gesamtroute mit ihren Liefermengen. Die Liefermengen sind in Klammern neben den Knoten dargestellt. In Route 1 wird Knoten 2 angefahren, obwohl er keine Lieferung erhält.

Die Entwicklung der Label ist in Abbildung 4.3 an einem Beispiel dargestellt. Ausgehend von Knoten 0 wird Knoten 4 über drei mögliche Pfade erreicht, die eine Ganzladung, Teillieferung oder Nulllieferung transportieren. Jeder Pfad erzeugt ein Label am Knoten 4. Von Knoten 4 werden die Label zu Knoten 2 weiterentwickelt. Wurde Knoten 4 durch eine Ganzladung erreicht, stehen zum Knoten 2 alle drei Liefermöglichkeiten zur Verfügung. Wurde Knoten 4 durch eine Teillieferung erreicht, kann

Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden besteht aus folgenden Komponenten:

- C_i sind die maximal möglichen reduzierten Kosten eines Pfades durch das Ersetzen einer Teillieferung durch eine Nulllieferung.
- L_i ist die Summe über alle Ganzladungen eines Pfades.
- $V_i^{cust_k}$ ist ein Vektor, der für jeden Kunden $i \in \mathcal{S}$ angibt, ob bereits ein Besuch an Knoten $k \in \mathcal{S}$ stattgefunden hat, vgl. Chabrier (2006). Mit diesem Vektor wird sichergestellt, dass nur elementare Pfade konstruiert werden.
- S_i gibt an, ob an Knoten i eine Teillieferung stattgefunden hat. Pro Pfad kann maximal eine Teillieferung vorgenommen werden.
- Sobald eine Teillieferung auf einem Pfad vorgenommen wurde, gibt Π_i die maximal mögliche Restkapazität für eine Teillieferung am Knoten i an.
- Δ_i ist der im Pfad verwendete Dualwert δ_i für eine Teillieferung zu Kunde i .

Abhängig vom Label am Knoten i werden bis zu drei Label am nachfolgenden Knoten j entwickelt, vgl. Abbildung 4.3. Die einzelnen Komponenten des neuen Labels am Knoten j werden mit den Informationen aus Vorgängerknoten i , den Dualwerten aus dem Master-Problem (s. Kapitel 3.2.1), den Verzweigungsregeln (Abschnitt 4.3) und den Schnittebenen (Abschnitt 4.5) aktualisiert.

- Es wird ein Label für eine Ganzladung am Knoten j hinzugefügt, wenn im Vektor $V_i^{cust_j}$ der Kunde j noch nicht besucht wurde und $L_i + d_j \leq Q$ ist. Die Labelkomponenten am Knoten j nehmen folgende Werte an:

$$S_j = S_i \quad (4.1)$$

$$\Delta_j = \Delta_i \quad (4.2)$$

$$C_j = C_i + \alpha_{ij}^p - \delta_j d_j - 2\sigma_i^p - 2\sigma_i \quad (4.3)$$

$$L_j = L_i + d_j \quad (4.4)$$

$$\Pi_j = \min \{ \Pi_i, Q - L_i - d_j \} \quad (4.5)$$

- Es wird ein Label für eine Teillieferung am Knoten j hinzugefügt, wenn im Vektor $V_i^{cust_j}$ der Kunde j noch nicht besucht wurde, $L_i \leq Q$ und $S_i = 0$ ist. Die Entwicklung der Komponenten des Labels am Knoten j ändert sich wie folgt:

$$S_j = 1 \quad (4.6)$$

$$\Delta_j = \delta_j \quad (4.7)$$

$$C_j = C_i + \alpha_{ij}^p - \delta_j d_j - \sigma_i^p - \sigma_i \quad (4.8)$$

$$L_j = L_i + d_j \quad (4.9)$$

$$\Pi_j = \min \{d_j, Q - L_i\} \quad (4.10)$$

- Immer dann, wenn im Vektor $V_i^{cust_j}$ der Kunde j noch nicht besucht wurde, wird eine Nulllieferung am Knoten j hinzugefügt. Die Komponenten des Labels am Knoten j entwickeln sich wie folgt:

$$S_j = S_i \quad (4.11)$$

$$\Delta_j = \Delta_i \quad (4.12)$$

$$C_j = C_i + \alpha_{ij}^p - \sigma_i^p - \sigma_i \quad (4.13)$$

$$L_j = L_i \quad (4.14)$$

$$\Pi_j = \Pi_i \quad (4.15)$$

Für alle entwickelten Label wird $V_j^{cust_j} = 1$ und $V_j^{cust_k} = V_i^{cust_k} \forall k \in \mathcal{S} \setminus j$ gesetzt. α_{ij}^p ist der Wert einer Dualvariable, die sich aus Nebenbedingung (4.23) ergibt und später erläutert wird. Gleiches gilt für σ_i^p (Nebenbedingung 4.52) und σ_i (Nebenbedingung 4.53). σ_i^p ist periodenabhängig und nur dann aktiv, wenn das Pricing-Problem für die Periode p gelöst wird.

Durch die Auswahl der Komponenten in einem Label ist es möglich, Label an einem Knoten miteinander vergleichbar zu machen und zu bewerten. In dieser Arbeit heißt ein Label dominant, wenn es im paarweisen Vergleich mit allen anderen Labels an einem Knoten, in keiner Komponente einen größeren Wert aufweist, als die entsprechende Komponente der Vergleichslabel. Werden dominante Label an einem Knoten i identifiziert, werden die

dominierten Label unmittelbar gelöscht; eine weitere Entwicklung dieser Label ist damit nicht mehr nötig. Würde ein Labelingalgorithmus ohne eine Routine zur Überprüfung dominanter Label ablaufen, fände eine vollständige Enumeration statt. Der Algorithmus wäre nicht effizient.

Am Beispiel des Dijkstra-Algorithmus können an einem Knoten genau dann Label gelöscht werden, wenn an ihm mehrere Wege unterschiedlicher Länge ankommen. Nur das Label mit dem aktuell kürzesten Weg bleibt an diesem Knoten bestehen. Dieses Label dominiert die übrigen Label an dem Knoten.

Für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden ist es etwas aufwendiger, ein dominantes Label zu identifizieren. Ein Label $E_{i,1}$ dominiert ein Label $E_{i,2}$ genau dann an einem Knoten i , wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind (vgl. Irnich und Desaulniers (2005) bzw. Desaulniers (2010b)):

$$L_{i,1} \leq L_{i,2} \quad (4.16)$$

$$S_{i,1} \leq S_{i,2} \quad (4.17)$$

$$V_{i,1}^{cust_v} \leq V_{i,2}^{cust_v} \forall v \in \mathcal{J} \quad (4.18)$$

$$C_{i,1} - \Pi_{i,1}\Delta_{i,1} \leq C_{i,2} - \Pi_{i,2}\Delta_{i,2} \quad (4.19)$$

$$C_{i,1} - (L_{i,2} - L_{i,1})\Delta_{i,1} \leq C_{i,2} \quad (4.20)$$

$$C_{i,1} - (L_{i,2} + \Pi_{i,2} - L_1)\Delta_{i,1} \leq C_{i,2} - \Pi_{i,2}\Delta_{i,2} \quad (4.21)$$

Das bedeutet im Einzelnen, dass das dominante Label $E_{i,1}$ eine Ganzladung aufweist, die höchstens der von $E_{i,2}$ entspricht (4.16). Ein Label, das noch keinen Split aufweist, ist immer besser als ein Label, das einen Split aufweist, oder beide Label müssen den gleichen Wert für einen Split aufweisen (4.17). Es dürfen höchstens dieselben oder weniger Knoten besucht worden sein, um ein Label zu dominieren (4.18). Mit (4.19) werden die unmittelbaren Streckenkosten der beiden Label, nach Abzug der Kosten für den Split, verglichen. Auch die Kosten für die Ganzladung müssen ein Label dominieren (vgl. 4.20). Zuletzt muss auch Dominanz vorliegen, wenn die Differenz aus Ganzladung unter Berücksichtigung der Restkapazität für einen Split berücksichtigt wird (4.21). Die beiden letzten Fälle sind notwendig, um die Extremfälle auf dem Definitionsbereich $G \in [L_i, L_i + \Pi_i]$ zu bewerten.

Sobald alle Label entwickelt wurden, liegen am letzten Knoten die Label mit den niedrigsten Kosten vor. Das Label mit dem niedrigsten Zielfunktionswert Z_i^{PP} am letzten Knoten i berechnet sich mit:

$$Z_i^{PP}(G) = C_i - \Delta_i(G - L_i) \mid G \in [L_i, L_i + \Pi_i] \quad (4.22)$$

$Z_i^{PP}(G)$ sind die reduzierten Kosten des Pricing-Problems. Sind die reduzierten Kosten negativ, wird die gefundene Tour aus dem Pricing-Problem als neue Spalte in das Master-Problem aufgenommen. Die Kosten für die neue Spalte entsprechen der Weglänge, die sich für das Durchlaufen der neuen Tour ergibt.

4.3. Verzweigungsregeln

Zur Umsetzung eines Branch-and-Bound-Verfahrens müssen Regeln zum Verzweigen implementiert werden, nach denen der Branch-and-Bound-Baum entwickelt wird. Während sich die Verzweigung in einem binären Problem, z. B. einem Rucksackproblem, vgl. Martello (1990), noch einfach gestaltet und lediglich entschieden werden muss, ob ein Gegenstand mitgenommen wird oder nicht, stehen für Vehicle-Routing-Probleme viele Verzweigungsregeln zur Auswahl.

Beim Verzweigen sind zwei Faktoren zu beachten: Die Art der Verzweigungen, die angewendet werden, und die Reihenfolge, in der die Verzweigungen durchgeführt werden. Für Vehicle-Routing-Probleme im Allgemeinen hält Feillet (2010) fest, dass sich als Standard die Verzweigung auf Kanten etabliert hat. Zusätzlich sei es üblich, auf die Anzahl an Fahrzeugen zu verzweigen. In dieser Arbeit werden zwei weitere Arten der Verzweigung verwendet, die sich für Vehicle-Routing-Probleme mit Teillieferungen anbieten bzw. erforderlich sind, nämlich die Verzweigung auf die Anzahl der Besuche bei einem Kunden und die Verzweigung auf aufeinanderfolgende Kanten. Beim hier vorliegenden Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden werden die Verzweigungsregeln sowohl über alle Perioden hinweg als auch separat je Periode betrachtet. Bei der Betrachtung über alle Perioden werden die Variablenwerte je Periode zu einem einzigen Variablenwert zusammengefasst.

Eine Erläuterung dazu, wie in dekomponierten Vehicle-Routing-Problemen innerhalb des Master-Problems verzweigt werden kann und wo der Unterschied zur Verzweigung in der kompakten Formulierung liegt, findet sich in Feillet (2010).

Die Verzweigungsregeln werden nach absteigendem Aggregationsgrad angeordnet. Eine aggregierte Variable ist hier eine Variable, die sich durch mehrere Variablen abbilden lässt. Das Gegenstück dazu sind direkte Variablen, die sich nicht durch eine Aggregation aus anderen Variablen abbilden lassen. Die Verzweigung auf aggregierte Variablen führt schnell zu guten Branches und die Anzahl an erzeugten Knoten im Branch-and-Bound-Baum wird eingeschränkt.

Daher wird zunächst über alle Perioden hinweg auf die Anzahl an verwendeten Fahrzeugen verzweigt, dann auf die Anzahl der Kundenbesuche und schließlich auf die Nutzungshäufigkeit einer Kante. Sind diese Werte jeweils ganzzahlig, wird überprüft, ob es möglich ist, eine Verzweigung in einer der Perioden zu finden. Wurde mit keiner der Prüfungen eine nicht-ganzzahlige Lösung gefunden, wird in einem letzten Schritt getestet, ob zwei aufeinanderfolgende Kanten einen gebrochenen Wert aufweisen. Wurde in keinem der Tests eine nicht-ganzzahlige Lösung gefunden, ist die Lösung ganzzahlig.

Die Verzweigungsregeln werden im Folgenden erläutert, vgl. dazu auch Desaulniers (2010b). Hier wurden diese Verzweigungsregeln für ein Problem ohne alternative Lieferperioden eingesetzt.

Die Substitution von λ_{rw}^p durch y_{ij}^p in (4.23) trägt dazu bei, dass die Verzweigungen weitestgehend standardisiert eingefügt werden können und das Handling der Dualvariablen in der Zielfunktion des Pricing-Problems erleichtert wird. Folge dieser Substitution sind die Dualvariablen α_{ij}^p , die in der Kostenmatrix des Pricing-Problems verrechnet werden. Dieses Vorgehen wurde in Desaulniers (2010b) vorgeschlagen. Der Parameter β_{ijr}^p gibt dabei an, ob die Kante (i, j) in Route r und Period p genutzt wurde.

$$\sum_{\substack{r \in \mathcal{R} \\ w \in \mathcal{W}}} \beta_{ijr}^p \lambda_{rw}^p = y_{ij}^p \quad \forall (i, j) \in \mathcal{V} \mid i, \forall p \in \mathcal{P} \quad \rightarrow \alpha_{ij}^p \quad (4.23)$$

Nach Aufnahme dieser Nebenbedingungen in das Master-Problem wird mit folgender Zielfunktion des Pricing-Problems weitergearbeitet:

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}} (c_{ij} + \alpha_{ij}^p) \cdot x_{ij}^p - \sum_{i \in \mathcal{I}} (\delta_i \cdot d_i^p) + \gamma \right) \quad (4.24)$$

4.3.1. Verzweigung auf die Anzahl der Fahrzeuge

Ob eine Verzweigung auf die insgesamt verwendeten Fahrzeuge notwendig ist, wird über die Summe der Variablenwerte λ_{rw}^p berechnet, die in der aktuellen Lösung verwendet werden (4.25).

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^p = H_f \quad (4.25)$$

Ist H_f nicht ganzzahlig, wird eine Verzweigung auf die Fahrzeuge vorgenommen. Dazu werden zwei neue Knoten im Branch-and-Bound-Baum erzeugt, die in einem Knoten um die Nebenbedingung (4.26) und im anderen Knoten um (4.27) erweitert werden. Dabei ist $H_{f,max} = \lfloor H_f \rfloor$ und $H_{f,min} = \lceil H_f \rceil$.

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^p \leq H_{f,max} \quad \rightarrow \tau_{max} \quad (4.26)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^p \geq H_{f,min} \quad \rightarrow \tau_{min} \quad (4.27)$$

Die neuen Nebenbedingungen führen zu Dualvariablen τ_{max} bzw. τ_{min} , die in der Zielfunktion des Pricing-Problems wie folgt berücksichtigt werden müssen:

$$\min \left(\sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, i \neq j} (c_{ij} + \alpha_{ij}^p) \cdot x_{ij}^p - \sum_{i \in \mathcal{I}} (\delta_i \cdot d_i^p) + \gamma + \tau_{max} - \tau_{min} \right) \quad (4.28)$$

Weil es sich bei 4.26 um eine \leq -Restriktion handelt, kann die duale Lösung dieser Restriktion nur einen nicht-positiven Wert annehmen. Folglich wird der Wert in der Zielfunktion addiert. Für die Bedingung 4.27 kann die Dualvariable nur nicht-negative Werte annehmen, τ_{min} muss in der Zielfunktion des Pricing-Problems abgezogen werden.

4.3.2. Verzweigung auf die Anzahl der Kundenbesuche

Mit Einführung der Substitution (4.23) lässt sich je Kunde i über die Summe der Variablen y_{ij}^p überprüfen, ob die Anzahl der Kundenbesuche einen ganzzahligen Wert annimmt. In (4.29) ist H_i die Häufigkeit der Besuche bei Kunde i . Sobald für einen Kunden eine nicht-ganzzahlige Anzahl an Besuchen gefunden wird, wird für diesen Kunden i^* eine Verzweigung eingefügt.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}, j \in \mathcal{I}, i \neq j} y_{ij}^p = H_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (4.29)$$

Ist die Anzahl der Kundenbesuche ein nicht-ganzzahliger Wert, wird die Verzweigung im Branch-and-Bound-Baum durch die Bedingungen (4.30) und (4.31) realisiert; $H_{i^*,max} = \lfloor H_i \rfloor$ und $H_{i^*,min} = \lceil H_i \rceil$.

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j, p \in \mathcal{P}} y_{ij}^p \leq H_{i^*,max} \quad (4.30)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j, p \in \mathcal{P}} y_{ij}^p \geq H_{i^*,min} \quad (4.31)$$

Diese Nebenbedingungen erzeugen keine zusätzlichen Dualvariablen, weil sie nur eine Substitution der Variablen λ_{rw}^p darstellen. Die Dualvariablen werden bereits mit α_{ij}^p berücksichtigt. Daher müssen die Zielfunktionen der Pricing-Probleme nicht verändert werden.

4.3.3. Verzweigung auf die Nutzungshäufigkeit einer Kante

Die Verzweigung auf eine Kante wird mit Gleichung (4.32) überprüft. Zwei neue Knoten werden erzeugt, sobald aus den Kanten $(i, j) \in \mathcal{V}$ eine Kante ermittelt wird, die in der aggregierten Betrachtung über alle Perioden einen gebrochenen Wert hat.

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} y_{ij}^p = H_{(i,j)} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{V} \mid i \neq j \quad (4.32)$$

Ist $H_{(i,j)}$ nicht ganzzahlig wird für die ermittelte Kante $(i,j)^*$ eine Verzweigung gemäß $H_{(i,j)^*,max} = \lfloor H_{(i,j)^*} \rfloor$ und $H_{(i,j)^*,min} = \lceil H_{(i,j)^*} \rceil$ in das Master-Problem eingefügt. Die Nebenbedingungen lauten dann:

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} y_{ij}^p \leq H_{(i,j)^*,max} \quad (4.33)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} y_{ij}^p \geq H_{(i,j)^*,min} \quad (4.34)$$

Die Werte der Dualvariablen werden hier ebenfalls bereits durch Dualwerte der Nebenbedingung zur Substitutionsgleichung (4.23) berücksichtigt.

Sollte die Lösung durch die vorgestellten Verzweigungsregeln noch nicht ganzzahlig sein, wird auf Periodenebene nach weiteren Verzweigungsmöglichkeiten gesucht.

4.3.4. Verzweigung auf die Anzahl der Fahrzeuge je Periode

Die Bestimmung einer Verzweigung der Fahrzeugnutzung je Periode erfolgt analog zur Fahrzeugnutzung über alle Perioden hinweg. Allerdings wird nun je Periode überprüft, ob eine Verzweigung möglich ist (vgl. 4.35).

Für die erste Periode p^* , die einen gebrochenen Wert an Fahrzeugen aufweist, werden die neuen Knoten erzeugt.

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^p = H_f^p \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.35)$$

Der nicht-ganzzahlige Wert H_f^{p*} stellt mit $H_{f,max}^{p*} = \lfloor H_f^{p*} \rfloor$ und $H_{f,min}^{p*} = \lceil H_f^{p*} \rceil$ die obere und untere Schranke für die Verzweigung dar. Die beiden neuen Knoten werden mit den Nebenbedingungen (4.36) und (4.37) gebildet.

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^{p*} \leq H_{f,max}^{p*} \quad \rightarrow \tau_{max}^{p*} \quad (4.36)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^{p*} \geq H_{f,min}^{p*} \quad \rightarrow \tau_{min}^{p*} \quad (4.37)$$

Die Dualvariablen τ_{max}^{p*} bzw. τ_{min}^{p*} der neuen Nebenbedingungen werden in den Pricing-Problemen in folgender Form berücksichtigt:

$$\min \sum_{(i,j) \in \mathcal{V}, i \neq j} (c_{ij} + \alpha_{ij}^p) \cdot x_{ij}^p - \sum_{i \in \mathcal{I}} (\delta_i \cdot d_i^p) + \gamma + \tau_{max}^{p*} - \tau_{min}^{p*} \quad (4.38)$$

Zu beachten ist, dass die Dualvariablen sich auf eine bestimmte Periode beziehen. Daher werden sie abhängig von der zu lösenden Periode im Pricing-Problem berücksichtigt.

4.3.5. Verzweigung auf die Anzahl der Kundenbesuche je Periode

Wird es notwendig, auf die Kundenbesuche je Periode zu verzweigen, findet die Überprüfung mit Gleichung (4.39) statt.

$$\sum_{j \in \mathcal{I}, i \neq j} y_{ij}^p = H_i^p \quad \forall i \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P} \quad (4.39)$$

Für den ersten Kunden i^* , der in einer Periode p^* eine nicht-ganzzahlige Besuchshäufigkeit $H_{i^*}^{p^*}$ aufweist, wird mit den Restriktionen (4.40) und (4.41) auf zwei Knoten verzweigt. Die obere Schranke ist $H_{i^*,max}^{p^*} = \lfloor H_{i^*}^{p^*} \rfloor$ und die untere Schranke ist $H_{i^*,min}^{p^*} = \lceil H_{i^*}^{p^*} \rceil$.

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} y_{ij}^p \leq H_{i^*,max}^{p^*} \quad (4.40)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}, i \neq j} y_{ij}^p \geq H_{i^*, min}^{p^*} \quad (4.41)$$

Das Pricing-Problem ändert sich nicht; die Dualinformationen werden in der Substitution berücksichtigt. Beachtet werden muss, dass auch hier die Dualwerte abhängig von der Periode des zu lösenden Pricing-Problems verwendet werden und nun auch abhängig vom Kunden.

4.3.6. Verzweigung auf eine Kante je Periode

Direkt auf eine Variable verzweigt wird bei der Verzweigung auf eine Kante in einer Periode. Hier findet keine Aggregation der Variablen statt. Könnte keine der vorgenannten Verzweigungsregeln greifen, wird überprüft, welche Variable y_{ij}^p nicht ganzzahlig ist.

$$y_{ij}^p = H_{(i,j)}^p \quad (4.42)$$

Für diese Kante (i^*, j^*) in der Periode p^* wird eine Verzweigung eingefügt. Die Restriktionen bestehen nun lediglich darin, eine neue obere bzw. untere Schranke für die ausgewählte Variable festzulegen mit $H_{(i,j)^*, max}^{p^*} = \lceil H_{(i,j)}^p \rceil$ und $H_{(i,j)^*, min}^{p^*} = \lfloor H_{(i,j)}^p \rfloor$.

$$y_{ij}^p \leq H_{(i,j)^*, max}^{p^*} \quad (4.43)$$

$$y_{ij}^p \geq H_{(i,j)^*, min}^{p^*} \quad (4.44)$$

Die Dualwerte sind im Pricing-Problem wieder implizit durch die Substitution von λ_{rw}^p durch die Variablen y_{ij}^p berücksichtigt.

4.3.7. Verzweigung auf zwei aufeinanderfolgende Kanten je Periode

Die letzte Art der Verzweigung, um eine ganzzahlige Lösung zu finden, ist die Überprüfung auf aufeinanderfolgende Kanten in einer Periode. Die

vorgenannten Bedingungen alleine sind nicht ausreichend, um sicher gehen zu können, dass die Lösung ganzzahlig ist. Erst wenn die Gleichung (4.45) zu einer ganzzahligen Summe führt, ist sichergestellt, dass es sich um eine ganzzahlige Lösung handelt.

$$\lambda_r^p = \sum_{w \in \mathcal{W}} \lambda_{rw}^p \quad \forall r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P} \quad (4.45)$$

In Abbildung 4.4 ist ein Beispiel dargestellt, in dem diese Bedingung verletzt ist. Die vier Touren einer Periode werden durch die Variablen

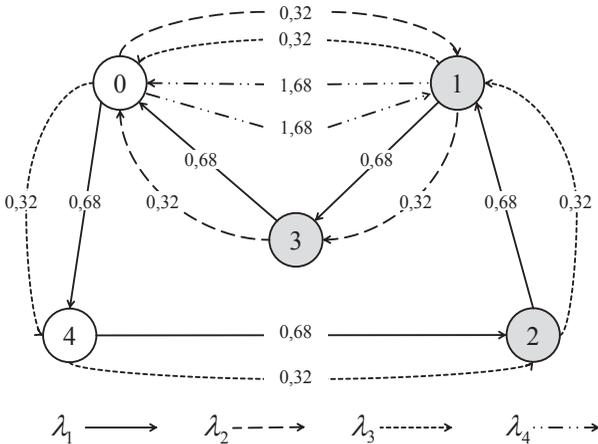


Abbildung 4.4.: Beispiel für aufeinanderfolgende Kanten

λ_1 bis λ_4 repräsentiert. Es werden zwar alle vorgenannten Bedingungen aus den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.6 erfüllt, die Lösung ist dennoch nicht ganzzahlig. Grund hierfür ist: die Variablen λ_1 bis λ_4 können nicht so kombiniert werden, dass die Ganzzahligkeitsbedingung (4.45) für λ_r^p erfüllt ist. Die zwei aufeinanderfolgenden Kanten, die die Ganzzahligkeitsbedingung verletzen, sind (2, 1) und (1, 3). Ein Vorschlag, um die Ganzzahligkeit sicherzustellen, wird in Desrochers und Soumis (1989) gemacht. Die Verletzung dieser Ganzzahligkeitsbedingung kann gefunden werden, indem alle Variablen λ_{rw}^p einer Periode, die mit einer Kante (i, j) in einen Knoten j

hineinführen und unmittelbar danach mit einer Kante (j, k) herausführen, zu einer Menge \mathbb{R}_{ijk} zusammengefasst werden. Die Summe über alle Variablen dieser Menge muss ganzzahlig sein, andernfalls ist Bedingung (4.45) verletzt. Treten nicht ganzzahlige aufeinanderfolgende Kanten auf, müssen sowohl im Master-Problem als auch in den Pricing-Problemen Änderungen vorgenommen werden. Zunächst wird in den beiden Zweigen des Branch-and-Bound-Baumes das Master-Problem angepasst. Im ersten Knoten wird verboten, die Kante (j, k) unmittelbar nach Kante (i, j) zu verwenden. Im zweiten Knoten wird die Verwendung aller Kanten außer (j, k) verboten, sobald Kante (i, j) genutzt wurde. Allgemein wird diese durch Einfügen einer Bedingung $y_{ij}^p + y_{jk}^p = 0$ realisiert. Im Anschluss daran dürfen in den Pricing-Problemen der betroffenen Periode p und Knoten im Branch-and-Bound-Baum keine Touren mehr erzeugt werden, die im Widerspruch zu den Verboten im Master-Problem stehen.

In diesem Unterkapitel wurden die Verzweigungsregeln für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden vorgestellt. Wird keine der Ganzzahligkeitsbedingungen verletzt, liegt eine ganzzahlige Lösung vor. Die Reihenfolge, in der die Regeln im Programmablauf überprüft werden, tragen dazu bei, die Verzweigungen im Branch-and-Bound-Baum einzugrenzen. Die Regeln werden erst für aggregierte Variablen durchlaufen und gehen erst dann zu direkten Variablen über.

4.4. Untere Schranken für das SDVRPA

Das Master-Problem kann durch das Einfügen von unteren Schranken verschärft werden, so dass der Branch-Price-and-Cut-Prozess schneller beendet werden kann. Für das SDVRPA werden zwei Arten von unteren Schranken eingefügt. Eine Schranke für die Mindestanzahl an Besuchen bei einem Kunden und eine untere Schranke für die mindestens zu verwendende Anzahl an Fahrzeugen.

4.4.1. Berechnung der unteren Schranken für Kundenbesuche

Eine untere Schranke $H_{i,min}$ für die Mindestanzahl an Besuchen bei einem Kunden i lässt sich über die Kapazität Q eines Fahrzeuges und die Nachfrage d_i eines Kunden bestimmen. Dabei muss für jeden Kunden i gelten:

$$H_{i,min} = \left\lceil \frac{d_i}{Q} \right\rceil \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (4.46)$$

Diese Bedingung kann dem Master-Problem bereits im Wurzelknoten für jeden Kunden i hinzugefügt werden.

4.4.2. Mindestanzahl an Fahrzeugen

Um eine untere Schranke für die insgesamt zu verwendenden Fahrzeuge $H_{f,min}$ ermitteln zu können, muss ein Bin-Packing-Problem gelöst werden, vgl. Martello (1990). Bezogen auf das SDVRPA werden auch im zu lösenden Bin-Packing-Problem Perioden betrachtet. Es wird nach der Kombination an Lieferungen gesucht, die die Mindestanzahl an Touren benötigt.

$$H_{f,min} = \min \left(\sum_{p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F}} y_f^p \right) \quad (4.47)$$

$$\text{u. d. N.} \quad \sum_{p \in \mathcal{P}_i, f \in \mathcal{F}} d_{i,f}^p = d_i \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (4.48)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_{i,f}^p \leq Q \cdot y_f^p \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (4.49)$$

$$y_f^p \in \{0; 1\} \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (4.50)$$

$$d_{i,f}^p \in \{0, 1, \dots\} \quad \forall i, p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (4.51)$$

Anhand der Kundennachfrage d_i eines Kunden i , der Kapazität Q eines Fahrzeuges f und der für einen Kunden gültigen alternativen Perioden \mathcal{P}_i lässt sich ein Minimierungsproblem für die Anzahl der zu verwendenden Fahrzeuge (4.47) formulieren. Mit (4.48) wird erreicht, dass die Summe der

Teillieferungen d_{if}^p für einen Kunden i der Kundennachfrage d_i entspricht. Wird ein Fahrzeug f in einer Periode p eingesetzt, so darf die Summe der Teillieferungen d_{if}^p die Kapazität Q des Fahrzeugs nicht übersteigen. Die Entscheidungsvariablen y_f^p für den Einsatz eines Fahrzeugs sind binär (4.50), die Variablen für die Teillieferungen d_{if}^p sind ganzzahlig (4.51).

Auch diese Bedingungen können dem Master-Problem bereits im Wurzelknoten hinzugefügt werden.

Beide unteren Schranken verkleinern den Lösungsraum. Während die erste Schranke eine bekannte und häufig eingesetzte Schranke ist, ist die zweite Schranke eine spezielle untere Schranke für das SDVRPA. Die beiden Schranken können a priori zum Problem hinzugefügt werden und ergeben sich aus der Analyse der Auftragsstruktur in den Testdaten, vgl. dazu Kapitel 5.

4.5. Schnittebenen für das SDVRPA

Während des Branch-and-Price-Prozesses können die Informationen aus den Zwischenergebnissen dazu verwendet werden, Nebenbedingungen zu identifizieren, die als Cuts den Branches hinzugefügt werden können. Jeder gelöste Knoten im Branch-and-Bound-Baum kann auf mögliche Cuts hin untersucht werden. Mit der Einfügung eines Cuts wird dem Polyeder des Lösungsraumes eine weitere Facette hinzugefügt. Der Lösungsprozess kann so beschleunigt werden, weil der Lösungsraum verkleinert wird. Im Folgenden werden die Cuts vorgestellt, die für die Lösung des SDVRPA verwendet wurden.

4.5.1. Verwendung von SMV-Ungleichungen

Die Strong-Minimum-Number-of-Vehicles-Ungleichungen sind speziell auf Vehicle-Routing-Probleme mit Split-Deliveries zugeschnitten, vgl. Archetti u. a. (2009) und Archetti u. a. (2011). Sie können für das SDVRPA angepasst und in ähnlicher Form verwendet werden. Die Nebenbedingungen werden für Kunden eingesetzt, deren Nachfrage d_i die Kapazität Q eines Fahrzeuges nicht überschreitet. Die Ungleichungen folgen der Idee,

dass in einem Split-Delivery-Problem entweder eine Lieferung erfolgen kann, die die vollständige Kundennachfrage abdeckt – sofern dadurch die Kapazität des Fahrzeuges nicht überschritten wird – oder einem Kunden bei seiner Anfahrt eine Null- bzw. Teillieferung zugestellt wird. Für den Fall alternativer Perioden, wie sie im SDVRPA vorkommen, können die Bedingungen sowohl je Periode separat 4.52 als auch für alle Perioden 4.53 gemeinsam eingefügt werden. Sie werden wie folgt formuliert:

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}} (2a_{irw}^{p,F} + a_{irw}^{p,PZ}) \lambda_{rw} \geq 2 \quad \forall i \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P} \rightarrow \sigma_i^p \quad (4.52)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}, w \in \mathcal{W}, p \in \mathcal{P}} (2a_{irw}^{p,F} + a_{irw}^{p,PZ}) \lambda_{rw} \geq 2 \quad \forall i \in \mathcal{I} \rightarrow \sigma_i \quad (4.53)$$

Der Parameter $a_{irw}^{p,F}$ ist genau dann 1, wenn auf Route r mit Liefermuster w eine Ganzladung erfolgt ist, sonst 0. Parameter $a_{irw}^{p,PZ}$ ist dann 1, wenn eine Null- bzw. Teillieferung erfolgt ist, sonst 0.

Durch Einfügen dieser zusätzlichen Nebenbedingungen müssen neue Dualvariablen in die Pricing-Probleme aufgenommen werden. σ_i^p bzw. σ_i gehen dabei mit dem Faktor zwei in die Zielfunktion des Pricing-Problems ein, wenn eine Ganzladung erfolgt. Sie gehen mit dem Faktor eins ein, wenn eine Null- bzw. Teillieferung zum Kunden gesendet wird.

4.5.2. Verwendung von Kapazitätsungleichungen

Capacity Cuts können immer dann eingefügt werden, wenn der aktuelle Fluss in eine Knotenmenge \mathcal{S} mit $|\mathcal{S}| < Q$ kleiner ist als der Mindestfluss, vgl. Toth und Vigo (2002a) oder Naddef und Rinaldi (2002). Für das SDVRPA können Schnittebenen eingefügt werden, wenn Bedingung 4.55 je Periode bzw. Bedingung 4.54 über alle Perioden hinweg verletzt werden.

$$\sum_{i \notin \mathcal{S}, j \in \mathcal{S}} x_{ijf}^p \geq \left\lceil \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}} d_j}{Q} \right\rceil \quad \forall p \in \mathcal{P}, f \in \mathcal{F} \quad (4.54)$$

$$\sum_{i \notin \mathcal{S}, j \in \mathcal{S}, p \in \mathcal{P}} x_{ijf}^p \geq \left\lceil \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}} d_i}{Q} \right\rceil \quad \forall f \in \mathcal{F} \quad (4.55)$$

Diese Cuts werden dynamisch in das Master-Problem eines Knoten des Branch-and-Bound-Baumes eingefügt, sobald sie identifiziert werden. Um sie zu identifizieren, werden die aktuellen Werte der Variablen x_{ijf}^p daraufhin untersucht, ob sie die rechte Seite für eine bestimmte Teilmenge \mathcal{S} verletzen. Ist das der Fall, wird die Schnittebene eingefügt und das Master-Problem aufs Neue gelöst, um aktualisierte Dualwerte für die Pricing-Probleme zu erhalten.

In Kapitel 4 wurde das Lösungsverfahren des SDVRPA vollständig vorgestellt. Das Zusammenspiel der Komponenten Branch-and-Bound, Column-Generation und Lösen des Pricing-Problems, die eingesetzten Verzweigungsregeln zur Erzeugung ganzzahliger Lösungen sowie die verwendeten unteren Schranken und Schnittebenen wurden in einem Ablaufdiagramm (Abbildung 4.1) zusammengefasst. Im SDVRPA werden zwei Arten von Cuts verwendet. Diese Cuts können nur mit den im Lösungsablauf erzeugten Informationen ermittelt werden, das sind namentlich die Werte der Variablen nach dem Lösen eines Knotens. Werden die Bedingungen verletzt, werden sie für die zukünftigen Knoten als lokale Schnittebenen in die nachfolgenden Knoten eingefügt.

5. Testdatensätze

Für das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden existieren in der Literatur keine Testinstanzen. Deshalb wurden zur Bewertung einer Planung mit alternativen Perioden neue Instanzen erzeugt. Neben der Einführung der alternativen Zustellmöglichkeiten, wurde das Augenmerk bei der Erzeugung dieser Instanzen auf Sendungsgrößen aus der Praxis gelegt. Dem Trend kleiner werdender Sendungsgrößen wurde damit Rechnung getragen, vgl. Abschnitt 1.1.

5.1. Räumliche Verteilung

Die räumliche Verteilung der Anfahrtpunkte folgt dem Schema der Solomon-Instanzen, vgl. Solomon (1987). Dieser hat eine Einteilung nach zufällig angeordneten R (Random), gebündelt angeordneten C (Clustered) und gemischt angeordneten RC (Random-Clustered) Standorten vorgenommen. Diese Einteilung wird auch in dieser Arbeit verwendet. Die Standorte der Testinstanzen werden in Abbildung 5.1 gezeigt.

Aus diesen drei Kategorien der räumlichen Einteilung wurden Instanzen gebildet mit 5, 10, 15, 20 und 25 Anfahrtpunkten. Die Orte für die Testinstanzen wurden derart gezogen, dass die Charakteristika Random, Clustered und Random-Clustered auch in den Instanzen mit wenigen Kunden erhalten blieben.

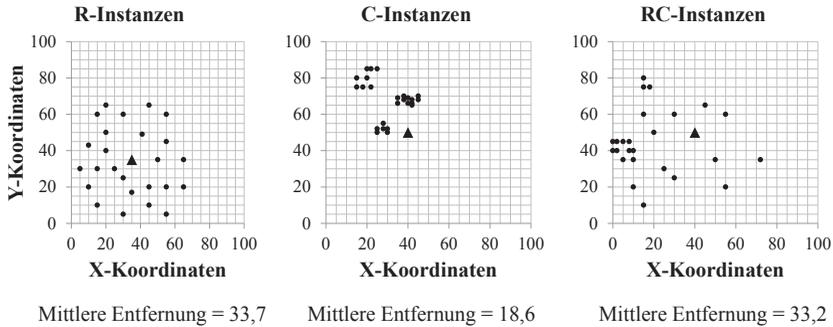


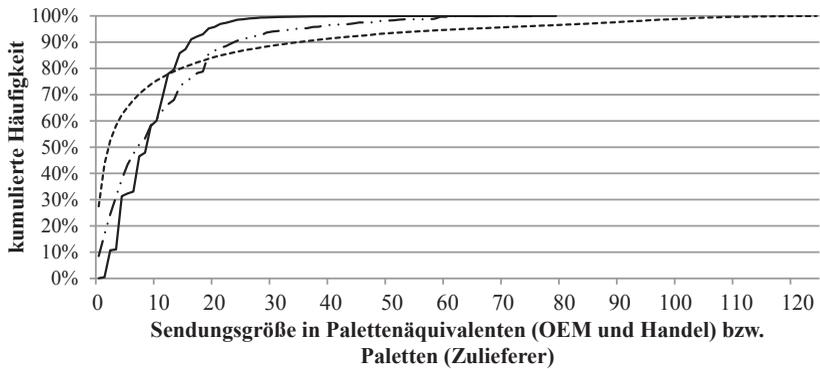
Abbildung 5.1.: Räumliche Verteilung der Kunden: Random, Clustered und Random-Clustered

5.2. Verteilung der Nachfrage

Um ein realistisches Abbild der Sendungsgrößen zu erhalten, wurden für die vorliegende Arbeit Datensätze zu Sendungsdaten verschiedener Branchen und Rollen untersucht. Dazu gehören die Daten aus dem Zulauf zu einem Autobauer (OEM - Original Equipment Manufacturer), die Daten eines Zulieferers für die Automobilindustrie mit Empfangs- und Versandaufträgen (Zulieferer) und die Daten eines Handelsunternehmens (Handel) in der Rolle eines Verteilers. Allen für die Erzeugung der Testinstanzen untersuchten Datensätzen ist gemein, dass sich eine Konzentration auf kleine Sendungsmengen zeigt. Diese Beobachtung deckt sich mit der Auswertung von Liedtke (2012), der ebenfalls eine Dominanz kleiner Sendungsmengen beobachtet hat. Auch in früheren Untersuchungen hat sich bereits ein Trend zu kleiner werdenden Sendungen abgezeichnet, vgl. Guilbault und Gouvernal (2010).

Abbildung 5.2 zeigt am Beispiel des OEM eine hohe Konzentration auf kleine Sendungsmengen. 80 Prozent der Sendungen sind kleiner als 16 Palettenäquivalente. Als Palettenäquivalent gilt hier das Sendungsvolumen von 1 m^3 . Für die Warenbewegungen beim Zulieferer sind 80 Prozent der Sendungen kleiner als 20 Paletten. Der Datensatz lag bereits mit einer

¹ Es handelt sich um diskrete Verteilungen; um die drei Verteilungen in einer Abbildung darstellen zu können, wurden jedoch Linien gewählt.



---Verteilung Automotive OEM — Verteilung Handel — Verteilung Automotive Zulieferer

Abbildung 5.2.: Verteilungen der Sendungsgröße¹

Angabe über Paletten bzw. Gitterboxen vor. Im Datensatz Handel liegt die Grenze bei 15 Palettenäquivalenten. Tabelle 5.1 stellt die Kenngrößen mittlere Sendungsgröße, Standardabweichung und Variationskoeffizient der drei Verteilungsfunktionen aus Abbildung 5.2 einander gegenüber.

	OEM	Zulieferer	Handel
mittlere Sendungsgröße $\left[\frac{Stk.}{Sendung}\right]$	12,2	11,9	10,2
Standardabweichung	21,5	11,6	5,8
Variationskoeffizient	1,76	0,97	0,57

Tabelle 5.1.: Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient der Verteilungen der Sendungsgrößen

Die mittleren Sendungsgrößen liegen in allen Datensätzen bei ähnlichen Werten zwischen 10 und 12 Paletten(äquivalenten). Der Variationskoeffizient c einer Verteilung ist das Verhältnis aus Standardabweichung σ und Mittelwert μ . Damit wird c wie folgt berechnet: $c := \frac{\sigma}{\mu}$, siehe z. B. Eckstein (2013). Während die Standardabweichung und die Variationskoeffizienten beim Datensatz des OEM am größten sind, ist der Handel mit einem Variationskoeffizienten von 0,57 am stabilsten in seinen Sendungsgrößen.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.3 durch die relativen Häufigkeiten abzulesen.

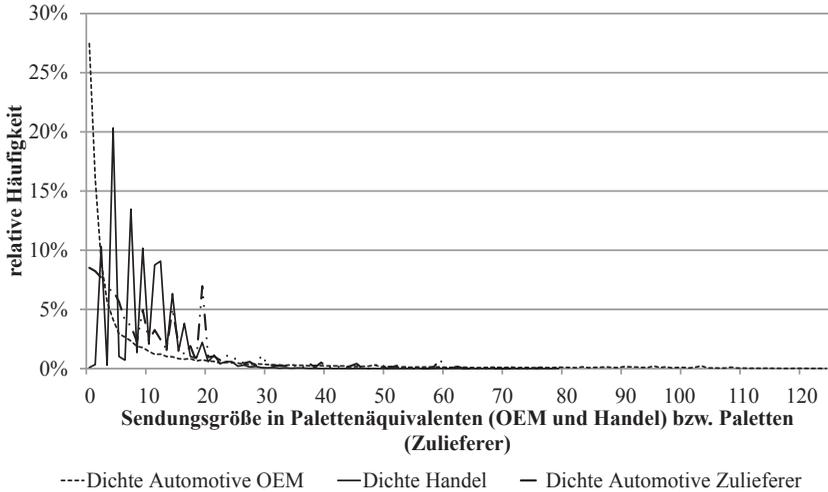


Abbildung 5.3.: Dichten der Sendungsgröße²

Diese drei Verteilungen sind die Grundlage für die weitere Erzeugung der Testdatensätze. Mit den Ausprägungen von stark schwankenden Sendungsgrößen beim OEM zu recht konstanten Sendungsgrößen im Handel mit einer ähnlichen durchschnittlichen Sendungsgröße sind unterschiedliche Charakteristika in den Testdatensätzen abgebildet. Diese finden sich in dieser Form auch in der Praxis.

Für jedes Set an Anfahrtrorten wird die Kundennachfrage über die drei Verteilungen bestimmt. Um vergleichen zu können, wie sich die Ergebnisse im Allgemeinen verhalten, wird die Nachfrage je Verteilung 10 mal gezogen.

² Es handelt sich um diskrete Dichten; um die drei Dichten in einer Abbildung darstellen zu können, wurden jedoch Linien gewählt.

5.3. Alternative Lieferperioden

Zur Bewertung des Einflusses alternativer Lieferperioden wurden drei Ausprägungen für die Testinstanzen über einen Planungshorizont von fünf Perioden verwendet.

- **Szenario 1 - single (s):** Das Ausgangsszenario lässt nur eine Alternative zu. Dazu wird den Kunden zufällig eine Periode aus fünf Perioden zugeordnet, in der die Lieferung erfolgen soll. Die Durchführung von Teillieferungen ist erlaubt. Dieses Szenario ist die Basis für die Vergleiche in Kapitel 6.
- **Szenario 2 - double (d):** Von Szenario 1 ausgehend, werden die bisherigen Einzelperioden zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent um eine Periode vorher oder nachher erweitert. Ergibt eine zufällige Ziehung, dass einem Kunden, der bisher in Periode 1 beliefert wurde, eine Alternative vor Periode 1 zugewiesen werden soll, erhält er keine zusätzliche Alternative und es bleibt bei der ursprünglichen Periode 1. Dasselbe gilt für einen Kunden, der bisher in Periode 5 beliefert wird und eine spätere Periode als Alternative erhalten soll. Es wird weiterhin nur Periode 5 als Liefertermin möglich sein.

Am Ende des Durchgangs der zufälligen Ziehungen lassen im Schnitt 45 Prozent aller Kunden zwei alternative Lieferperiode zu, 55 Prozent der Kunden erlauben weiterhin nur eine einzige feste Periode als Liefertermin (vgl. Tabelle 5.2).

	s	d
relative Häufigkeit	55%	45%

Tabelle 5.2.: Häufigkeitsverteilung der zugelassenen Alternativen s und d

- **Szenario 3 - triple (t):** Die Erzeugung des Szenario 3 verläuft analog zu Szenario 2. Über alle Kunden hinweg wird wieder mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent eine zusätzliche Periode als Alternative hinzugefügt. Randperioden werden beim Würfeln genauso behandelt wie in Szenario 2. Die relativen Häufigkeiten der nun zugelassenen Alternativen verteilen sich über alle Kunden hinweg gemäß der Übersicht in Tabelle 5.3.

	s	d	t
relative Häufigkeit	30%	46%	24%

Tabelle 5.3.: Häufigkeitsverteilung der zugelassenen Alternativen s, d und t

Um die Vergleichbarkeit sicherstellen zu können, werden bei der schrittweisen Erweiterung der alternativen Perioden alle übrigen Parameter unverändert übernommen.

Der einzige Unterschied in den Szenarien ist die unterschiedliche Ausprägung der alternativen Perioden. Die Vergleiche zwischen den Szenarien (s), (d) und (t) messen somit direkt den Einfluss, den die Hinzunahme von Perioden hat. Szenario (s), in dem nur eine Lieferalternative zugelassen wird, ist das Referenzszenario für den Vergleich mit den Szenarien (d) und (t).

Für alle drei Szenarien wird die Erzeugung der alternativen Perioden zweimal durchgeführt, um allgemeinere Aussagen gewinnen zu können.

Aus der Kombination an Ausprägungen zur räumlichen Verteilung (3 Anordnungen), Kundensets (5 Sets), Verteilung der Sendungsgrößen (3 Verteilungen), Varianten der alternativen Lieferperioden (3 Varianten) und den Mehrfachziehungen der Nachfrage (10 Ziehungen der Nachfrage) sowie der alternativen Lieferperioden (2 Ziehungen der alternativen Perioden) ergeben sich insgesamt 2.700 Testinstanzen.

In Kapitel 5 wurde der Aufbau der Testinstanzen beschrieben. Die Instanzen unterscheiden sich in räumlicher Verteilung, der Nachfrageverteilung und der Nutzung alternativer Perioden. Die Nachfragen sind so gewählt, dass sie der heutigen Sendungsstruktur möglichst gut entsprechen. Der Einfluss alternativer Perioden kann durch die Schaffung eines Referenzszenarios bewertet werden.

6. Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse aus den Testszenarien zusammengefasst. Das Lösungsverfahren aus Kapitel 4 wurde in Python 2.7 mit CPLEX 12.1 umgesetzt. Als Rechner wurde ein Windows-Server 2008 64-bit-Version mit folgenden Leistungsdaten verwendet: Intel(R) Core (TM) i7 CPU 950 @ 3.07GHz, 8 Kerne und 12 GB Arbeitsspeicher. Die Rechenzeit wurde je Instanz auf 60 Minuten (wall time) begrenzt. Wurde innerhalb dieser Zeit keine Lösung gefunden, wurde die Instanz als nicht gelöst bewertet. Die Ergebnisse beruhen auf folgenden Lösungen:

- 699 gelöste Instanzen aus 900 im Datensatz Handel
- 691 gelöste Instanzen aus 900 im Datensatz Zulieferer
- 733 gelöste Instanzen aus 900 im Datensatz OEM

Die Auswertungen in diesem Kapitel werden ausführlich am Beispiel der Testinstanzen des Handels dargestellt. Die Ergebnisse für die Datensätze Zulieferer und OEM lassen dieselben Schlüsse zu wie die Ergebnisse aus dem Datensatz Handel; daher sind diese in den Anhängen (A - F) der Arbeit zu finden.

Die folgenden Unterkapitel beziehen sich auf die forschungsleitenden Fragen aus Kapitel 1.3. Im Einzelnen wird untersucht, wie sich alternative Perioden auf die Tourlänge und die Fahrzeugauslastung auswirken. Aus logistischer Sicht und für die Teilnehmer am Transportprozess (Empfänger, Versender, Spediteur bzw. Transportunternehmen) ist relevant, wie sich die Anzahl an Touren ändert, die vom Depot abgehen, und wie sich die Besuchshäufigkeit beim Empfänger ändert. Auf diese Veränderungen wird im Folgenden eingegangen.

Es gibt einige Arbeiten, die sich mit Teillieferungen beschäftigen. Diese Veröffentlichungen gehen jedoch nicht darauf ein, wie häufig von Teillieferungen Gebrauch gemacht wird und wie sich diese auf die Stoppdichte

einer Tour auswirken. Diese Analysen sind notwendig, um den Einfluss alternativer Lieferperioden und Teillieferungen auf alle am Transportprozess beteiligten Partner zu bewerten. Nur den Einfluss eines Konzeptes auf die Tourlänge zu untersuchen wie es klassischerweise in Veröffentlichungen zu Tourenplanungsproblemen zu finden ist, ist zu einseitig, um eine Gesamtbewertung eines neuen Konzeptes vorzunehmen.

Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit des Einflusses zusätzlicher Perioden (eine Alternative, bis zu zwei Alternativen und bis zu drei Alternativen) sowie des Einflusses der räumlichen Struktur (im Raum gleichmäßig verteilte Kunden, in Gruppen angeordnete Kunden und einer Mischung aus Gruppen und gleichmäßiger Verteilung) bewertet.

Auf den Ansatz einer auf Kosten gestützten Bewertung der Ergebnisse wurde bewusst verzichtet. Kostensätze für einzelne Prozesse zeigen im Vergleich verschiedener Unternehmen bisweilen sehr hohe Unterschiede. Um eine logistische Bewertung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde die Ergebnisinterpretation nur auf Basis logistischer Kennwerte vorgenommen.

6.1. Einfluss auf die Gesamttourlänge

Die Ergebnisse zum Einfluss auf die Tourlänge sind in aggregierter Form über die Mittelwerte aller gelösten Instanzen dargestellt. Tabelle 6.1 zeigt die prozentuale Veränderung der Zielfunktionswerte im Vergleich zum Referenzszenario mit einer (single, s) Lieferperiode. Werden bis zu zwei (double, d) alternative Lieferperioden eingeräumt wird eine Reduktion der Tourlänge zwischen 8 und 12 Prozent erreicht. Bei bis zu drei (triple, t) alternativen Lieferperioden bewegt sich das durchschnittlich erreichte Einsparpotenzial im Bereich von 18 bis 21 Prozent. In Abbildung 6.1 ist die Änderung der Tourlänge in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden für die Handelsinstanzen abgetragen. Die Verkürzung der Touren ist in Klassen, mit einer Klassenbreite von 5 Prozent eingeteilt. Abhängig davon ist die relative Häufigkeit der Einsparungen dargestellt. Während sich die Einsparungen bei bis zu zwei alternativen Perioden am häufigsten auf die Klassen zwischen 5 und 20 Prozent verteilen, sind die Einsparungen bei bis zu drei Alternativen am häufigsten auf die Klassen von 15 bis 25 Prozent aufgeteilt. Die Einsparungen bei bis zu drei

	d	t
OEM	10,5%	18,4%
Zulieferer	7,8%	20,7%
Handel	11,5%	20,6%

Tabelle 6.1.: Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der Anzahl an Alternativen im Vergleich zum Referenzszenario

Alternativen sind am höchsten. Je mehr Alternativen gewährt werden, desto höher sind die Einsparungen. Dieser Verlauf zeigt sich auch für die Instanzen OEM und Zulieferer (vgl. Anhang A). Grund hierfür ist, dass die alternativen Lieferperioden eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Fahrzeugkapazität zulassen.

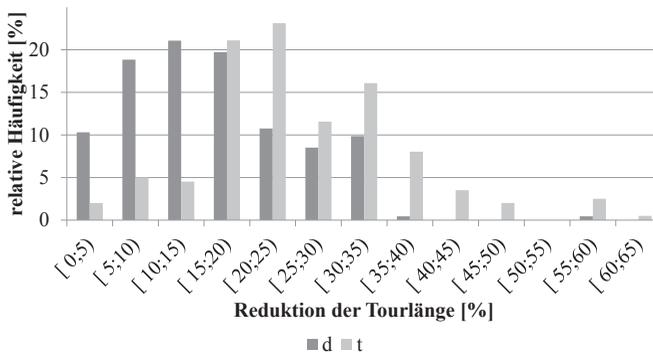


Abbildung 6.1.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel

Die relativen Einsparungen werden auch durch die räumliche Anordnung der Kunden beeinflusst. Tabelle 6.2 zeigt die relativen Einsparungen abhängig von der Anzahl an alternativen Lieferperioden und der Verteilung der Kunden R, RC und C. Unabhängig von der Anzahl alternativer Lieferperioden werden die niedrigsten Einsparungen erreicht, wenn die Kunden zufällig angeordnet sind. Sind die Kunden hingegen in einer

geclusterten Anordnung, sind die Einsparungen am höchsten. Diese Reihenfolge stellt sich im Wesentlichen auch für die Datensätze OEM und Zulieferer ein (vgl. Anhang A). Im Abschnitt 6.8 wird näher auf den Einfluss der räumlichen Anordnung auf die Ergebnisse eingegangen.

	d	t
R	7,0%	12,9%
C	16,9%	26,6%
RC	12,4%	24,3%

Tabelle 6.2.: Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel

Eine Aufschlüsselung der relativen Häufigkeiten der Tourverkürzung in Abhängigkeit der räumlichen Anordnung der Kunden ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Generell zeigt sich auch hier der Trend, dass mehr alternative Lieferperioden zu höheren Einsparungen führen. Die höchsten Einsparungen werden realisiert, wenn bis zu drei Alternativen für die Belieferung erlaubt werden. Die drei Auswertungen zeigen, wie sich die Einsparungen in Abhängigkeit der Kundenanordnung verschieben. Sind die Kunden gleichmäßig verteilt, liegen die Einsparungen am häufigsten in den Klassen bis 30 Prozent. Bei einer Anordnung in Clustern liegen die Einsparungen am häufigsten in den Klassen zwischen 15 und 35 Prozent. Bei der Mischform RC sind die Einsparungen mit ähnlicher Häufigkeit über alle Klassen bis zu 40 Prozent verteilt.

Auch hier gibt es eine vergleichbare Entwicklung bei den Datensätzen OEM und Zulieferer, die im Anhang A zu finden ist.

6.2. Einfluss auf die Fahrzeugauslastung

Der positive Einfluss von alternativen Lieferperioden auf die Gesamttourlänge ist begründet durch eine höhere Auslastung der Touren. Durch die zeitliche Verschiebung der Auftragsdurchführung um bis zu zwei Perioden, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass Lieferungen, die in die gleiche Region gehen sollen, zusammengefasst werden können. Das Risiko, eine schlecht ausgelastete Fahrt durchzuführen, nimmt so ab.

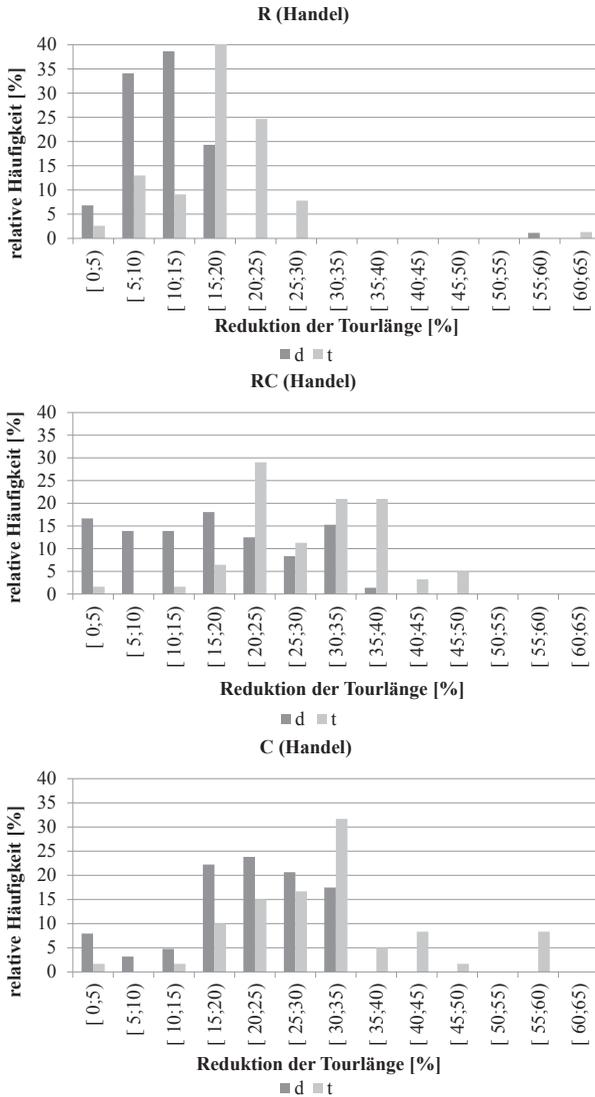


Abbildung 6.2.: Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung und nach räumlicher Anordnung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel

Die Auswertung des Handelsdatensatzes zeigt in Tabelle 6.3 den positiven Einfluss von Alternativen auf die Auslastung. Im Ausgangsszenario mit nur einer Lieferperiode liegt die durchschnittliche Auslastung eines Fahrzeuges bei rund 62 Prozent. Mit der Einführung von alternativen Lieferperioden und Teillieferungen steigt die Auslastung eines Fahrzeuges im Datensatz Handel auf bis zu rund 76 Prozent. Abbildung 6.3 zeigt

	s	d	t
Durchschnittliche Fahrzeugauslastung	62,3%	69,1%	75,6%

Tabelle 6.3.: Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz Handel

die Entwicklung der Auslastung in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden. Wird nur eine Lieferperiode erlaubt, erreichen weniger als 10 Prozent der Touren eine Auslastung, die höher als 80 Prozent ist. Mit Hinzunahme von Alternativen liegen mehr als 45 Prozent (d) bzw. mehr als 35 Prozent (t) der Touren in einem Auslastungsbereich größer als 80 Prozent. Analog zur Auswertung der Tourlängen ist in Abbildung

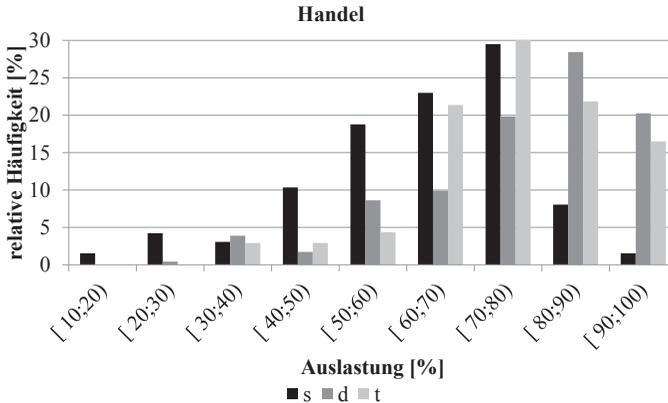


Abbildung 6.3.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz Handel

6.4 eine Auswertung der Auslastung in Abhängigkeit der räumlichen Anordnung der Kunden dargestellt. Für alle drei Arten der räumlichen Anordnung zeigen die Auswertungen, dass mit wachsender Anzahl an alternativen Lieferperioden die Auslastung weiter steigt und der Großteil der Touren eine Auslastung von mehr als 70 Prozent erreicht. Diese hohen Auslastungssteigerungen sind auch bei den Ergebnissen für die Testdaten OEM und Zulieferer (vgl. Anhang B) zu beobachten. Vergleicht man die Steigerung der Auslastungen in Bezug auf die räumliche Verteilung der Kunden (Tabelle 6.4), zeigt sich die höchste Steigerung wieder bei der Anordnung in Clustern. Bei bis zu zwei Alternativen wird eine Auslastungssteigerung von rund 30 Prozent erreicht. Bei bis zu drei Alternativen stellt sich eine Erhöhung der Fahrzeugauslastung von durchschnittlich 50 Prozent ein, verglichen mit den Instanzen mit nur einer Lieferperiode. Wie zu erwarten war, wird die höchste Steigerung der Auslastung bei einer geclusterten Anordnung der Kunden erreicht, die niedrigste Steigerung wird bei den gleichmäßig verteilten Kunden erreicht. Ein Vergleich der

	d	t
R	9,5%	30,0%
C	30,4%	50,7%
RC	16,1%	31,4%

Tabelle 6.4.: Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel

Auslastungssteigerung für die Datensätze Handel, OEM und Zulieferer lässt einen weiteren Schluss zu (Anhang B): Neben der Einführung alternativer Lieferperioden hat auch die Sendungsstruktur einen Einfluss auf die Auslastung. Je größer die durchschnittliche Sendungsgröße, desto häufiger werden Pendeltouren mit einer Auslastung von 100 Prozent durchgeführt. Der Einfluss zusätzlicher alternativer Lieferperioden nimmt ab.

Ein Vergleich der drei Verteilungen in Abbildung 5.2, S. 69, zeigt, dass die Sendungen im Handel zwischen 1 und 30 Palettenäquivalenten fast 100 Prozent des Vorkommens ausmachen. Größere Sendungsgrößen kommen nur selten vor. Bei einer Fahrzeugkapazität von 34 Palettenäquivalenten ist man daher nicht gezwungen, eine Lieferung aufzuteilen, weil die Fahrzeugkapazität je Sendung ausreicht.

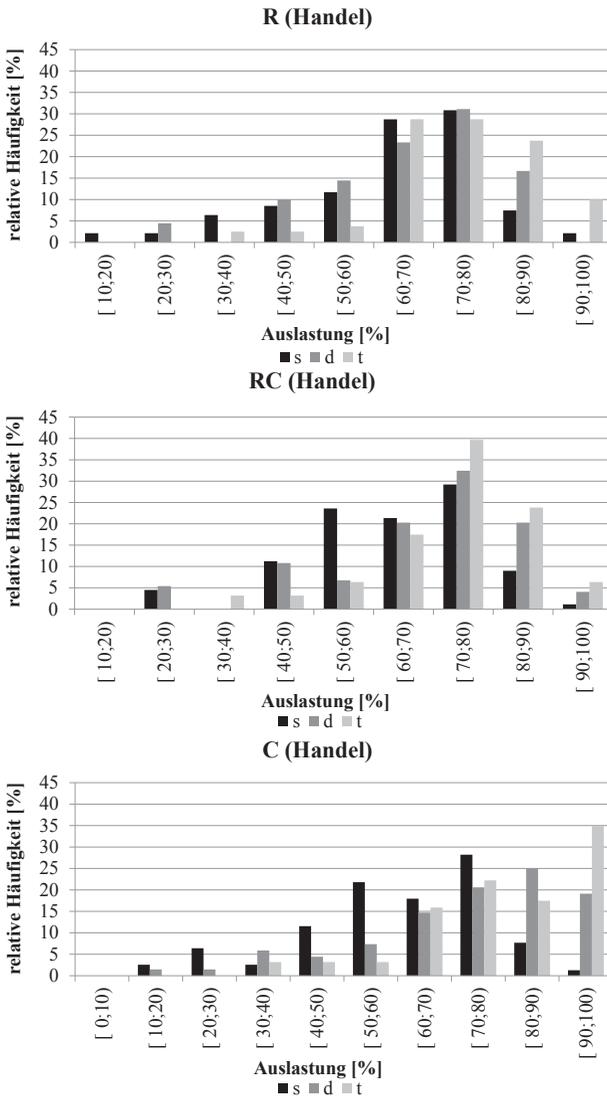


Abbildung 6.4.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad und räumlicher Anordnung der Kunden, Datensatz Handel

Im Datensatz der Zulieferer ist diese Grenze erst bei rund 60 Palettenäquivalenten erreicht. Die Wahrscheinlichkeit, Sendungsgrößen nahe der Fahrzeugkapazität zu haben, ist höher. Diese Wahrscheinlichkeit ist noch größer im Datensatz OEM. Erst ab 105 Palettenäquivalenten ist die 100 Prozent Grenze erreicht.

Die Sendungsstrukturen in den Datensätzen OEM und Zulieferer, die Aufträge größer als die Fahrzeugkapazität beinhalten, führen zu Pendeltouren mit Ganzladung. Für diese Touren wird das Einräumen alternativer Lieferperioden nicht zu einer besseren Auslastung führen können. Demnach werden Unternehmen mit vielen Aufträgen nahe oder über der Kapazitätsgrenze von Fahrzeugen anteilig nicht so stark von alternativen Perioden profitieren können, wie Unternehmen, deren Aufträge unterhalb der Kapazitätsgrenze liegen. Wie sich in Kapitel 1.1 gezeigt hat, ist für die Zukunft damit zu rechnen, dass die Sendungsgröße abnimmt. Werden zukünftig Teillieferungen und alternative Lieferperioden erlaubt, kann die Stärke des Ansatzes ausgenutzt werden.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen in Breier und Gossler (2014). Hier wurde gezielt untersucht, welche Auftragsgröße für die Nutzung alternativer Lieferperioden besonders vorteilhaft ist. Auch hier hat sich gezeigt, dass die besten Effekte durch den Einsatz des SDVRPA im Teilladungs- bzw. Sammelgutsegment erreicht werden. Der positive Einfluss alternativer Perioden wird größer, je kleiner die Kundenaufträge werden.

6.3. Einfluss auf die Anzahl zu fahrender Touren

Die Steigerung der Auslastung durch alternative Lieferperioden wirkt sich auf die Anzahl zu fahrender Touren aus. Mit zunehmender Anzahl an Alternativen sinkt die durchschnittliche Anzahl notwendiger Touren. Für den Datensatz Handel ist in Tabelle 6.5 die Entwicklung der durchschnittlichen Touranzahl in Abhängigkeit der Kundenanzahl und der Anzahl an Alternativen aufgeführt. Die meisten Touren werden gefahren, wenn nur eine Lieferperiode zugelassen wird; am wenigsten Touren sind notwendig, wenn bis zu drei Alternativen als Planungskriterium vorgegeben werden.

Unabhängig von der Kundenanzahl beträgt die absolute Differenz an den Übergängen von (s) auf (d) bzw. von (d) auf (t) zwischen 0,5 und 1,6 Touren, die eingespart werden können. Da mit zunehmender Kundenanzahl

Kunden	s	d	t
5	3,9	3,4	2,5
10	5,5	4,6	4,2
15	7,7	6,5	6,2
20	8,7	7,9	7,1
25	10,2	9,1	8,6

Tabelle 6.5.: Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz Handel

und bei gleichbleibender Nachfragestruktur die Anzahl an benötigten Touren wächst, ist in Tabelle 6.6 die relative Reduktion abgehender Touren aufgeführt. Der Trend der Einsparung zeigt, dass die relative Reduktion umso kleiner wird, je mehr Kunden in einer Planungsinstanz enthalten sind. Dennoch liegt die Einsparung bei den Instanzen mit 25 Kunden noch zwischen 11 und 15 Prozent. Die Ergebnisse zu den Datensätzen OEM und Zulieferer finden sich in Anhang C. Es kann nicht notwendigerweise

Kunden	d	t
5	13,2%	34,6%
10	16,4%	23,6%
15	15,4%	20,1%
20	10,0%	18,4%
25	11,1%	15,3%

Tabelle 6.6.: Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Handel

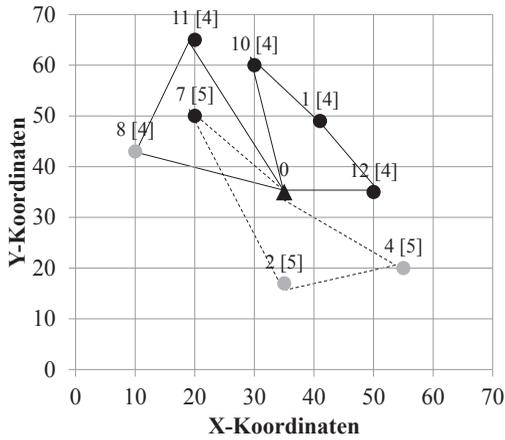
geschlossen werden, dass eine Tour einem Fahrzeug entspricht, weil ein Fahrzeug durchaus zwei Touren nacheinander fahren kann. Dennoch ist die Anzahl zu fahrender Touren ein Indikator dafür, dass mit alternativen Perioden der Ressourceneinsatz für den Spediteur sinkt.

Wenn auch die durchschnittliche absolute Anzahl an Touren fällt, tritt vereinzelt der Fall auf, mit Alternativen mehr Touren fahren zu müssen,

um den kürzesten Gesamtweg zu erreichen. Ein Beispiel dazu gibt Abbildung 6.5. Der linke Teil der Abbildung zeigt die Auftragslage einer Instanz mit nur einer Lieferperiode, der rechte Teil die Vergleichsinstanz mit bis zu zwei Alternativen je Kunde. Die Beschriftung der Knoten steht für die Nummer des Kunden. In Klammern steht die Periode, in der eine Lieferung erfolgen muss. Knoten 0 ist das Depot. Die durchgezogenen Linien stehen für eine Tour in Periode 4, die gestrichelten Linien für einen Transport in Periode 5. Grau hinterlegt sind die Knoten, die in der Vergleichsinstanz zwei Perioden erlauben.

Wird je Kunde nur eine Lieferperiode erlaubt, dann sind drei Touren nötig, um mit einer minimalen Gesamtentfernung von 259,3 Einheiten alle Kunden zu bedienen. Mit Alternativen sind vier Touren zu fahren, um eine minimale Entfernung von 229,3 Einheiten zu erreichen. Die durchschnittliche Sendungsgröße je Tour beträgt links 27 Palettenäquivalente, rechts 20,3 Palettenäquivalente. Das entspricht einer Auslastung von 79 Prozent bzw. 60 Prozent. Dieser Reduktion der Auslastung und Erhöhung der Touranzahl steht eine Entfernungseinsparung von 12 Prozent gegenüber. Kann die gleiche Arbeit mit weniger Touren durchgeführt werden, wirkt sich das auch auf die Aufwände des beladenden Distributionszentrums aus. Jede Tour, auf die verzichtet werden kann, führt zu einem Rückgang der Rampenbelegung. Dass die Rampenbelegung an Distributionszentren eine Herausforderung darstellt, zeigt die Studie von Hagenlocher u. a. (2013). Zu einem der Studie nach „grundlegenden“ Lösungsansatz gehört die Reduzierung der Rampenkontakte durch Steigerung der Auslastung. Eine konkrete Antwort, wie das Ziel erreicht werden kann, wird in der Studie nicht gegeben. Wie jedoch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, können alternative Lieferperioden mit Teillieferungen einen Beitrag dazu leisten, die Fahrzeugauslastung zu erhöhen bzw. die Rampenkontakte am Depot zu reduzieren.

Die Studie von Hagenlocher u. a. (2013) geht auch auf die Personalkapazitäten an der Rampe ein. Die Teilnehmer der Studie messen der Personalsituation eine „vergleichsweise hohe Bedeutung“ bei und kritisieren, dass von den Empfängern nicht ausreichend Personal zum Entladen zur Verfügung gestellt wird. Weniger Abgänge an der Rampe durch alternative Lieferperioden haben auch einen Einfluss auf den Personaleinsatz. Die Aufwände für das Bereitstellen von Personal an der Rampe verringern sich mit jeder eingesparten Tour. Somit wirkt sich die Reduktion von

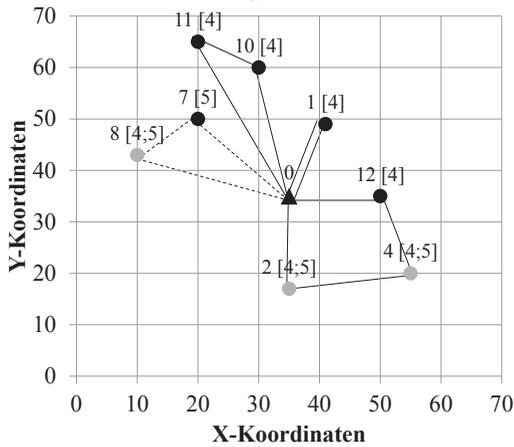


keine Alternativen (s)

3 Touren

259,3 Entfernungseinheiten

79% Auslastung



Bis zu zwei Alternativen (d)

4 Touren

229,3 Entfernungseinheiten

60% Auslastung

Abbildung 6.5.: Beispiel für die Beeinflussung der Touranzahl durch alternative Lieferperioden

Touren sowohl auf den Ressourceneinsatz bei einem Spediteur als auch bei einem Distributionszentrum aus. Die Personalbewegung zwischen den Rampen wird dadurch reduziert.

6.4. Einfluss auf die Besuchshäufigkeit beim Empfänger

Aus Sicht des Versenders (Depot) und des Transportunternehmens führen Teillieferungen mit alternativen Lieferperioden zu Einsparungen in der Transportstrecke, der Touranzahl, sowie zu einer Erhöhung der Auslastung und einem geringeren Handlingaufwand im Depot. In Abbildung 6.6 ist dargestellt, wie sich die durchschnittliche Besuchshäufigkeit beim Empfänger ändert. Die Abbildung beruht auf der Auswertung der Instanzen mit 15 Kunden im Handel. Es wurden 51 Instanzen gelöst, die einen direkten Vergleich zwischen der Anzahl an alternativen Lieferperioden zulassen (ausgedrückt durch s , d und t). In der Sendungsstruktur des Handels (vgl. Abschnitt 5.2) sind die meisten Aufkommen deutlich niedriger als die Fahrzeugkapazität. In der Abbildung ist die Nachfrage aller Kunden außer der des Kunden 5, jeweils kleiner als die Fahrzeugkapazität. Deshalb stellt die gestrichelte Linie bei 51 Anfahrten die untere Schranke an Besuchen dar. Lassen die Kunden nur eine Lieferperiode zu (s), wird bei 9 von 15 Kunden von Mehrfachanfaharten Gebrauch gemacht, um die kürzeste Distanz zu erreichen. Mit der Einführung von Alternativen (d , t), nimmt die Häufigkeit von Mehrfachanfaharten zu. Nur noch die Kunden 1, 9 und 14 werden mit der Mindestanzahl von Anfaharten besucht.

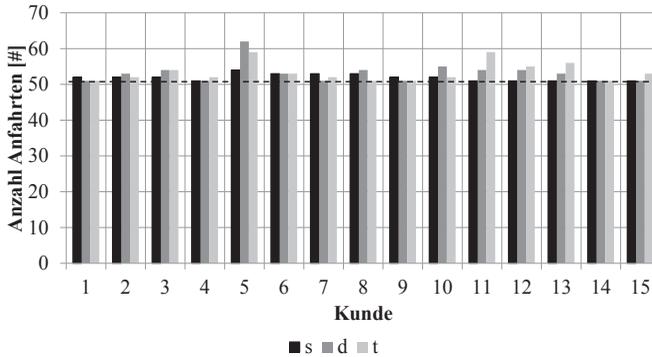


Abbildung 6.6.: Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz Handel

Dieser Effekt stellt sich auch für die übrigen Instanzen ein. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Einfluss auf die Besuchshäufigkeit nur für die Instanzen mit 15 Kunden erläutert. In absoluten Zahlen ausgedrückt wächst die Anzahl an Besuchen von 779 Besuchen im Falle keiner Alternativen auf 801 Besuche, wenn bis zu 3 Alternativen zugelassen werden. Bei bis zu zwei Alternativen sind 798 Besuche erforderlich. Die Anzahl an Besuchen nimmt insgesamt um 3 Prozent zu.

Die Zunahme der Besuche bedeutet insbesondere bei einer wachsenden Auslastung der Fahrzeuge (vgl. Kapitel 6.2) und einer fallenden Anzahl zu fahrender Touren, (vgl. Kapitel 6.3), dass die Stoppdichte je Tour steigt und es absolut zu einer leicht erhöhten Anzahl an Stopps kommen wird. Auf die Veränderung der Stoppdichte wird in Abschnitt 6.6 eingegangen.

Abbildung 6.6 zeigt auch, dass dieser Anstieg sich auf wenige Kunden konzentriert. Bei den Kunden 5, 11, 12 und 13 ist er am stärksten. Bei den übrigen Kunden gibt es nur leichte Anstiege oder gelegentlich auch Rückgänge in der Besuchshäufigkeit. Es lässt sich bei der Analyse der Ergebnisse und der Testdaten keine Ursache dafür ausmachen, weshalb sich das Anwachsen der Besuchshäufigkeit auf wenige Kunden konzentriert. Weder die räumliche Verteilung der Kunden, noch die zufällig vergebenen Alternativen je Kunde oder die Auftragsgröße unterscheiden sich bei diesen Kunden.

Ohne Alternativen sind 54 bzw. 51 Anfahrten bei den Kunden 5 und 11 notwendig. Im ungünstigsten Fall würden bei diesen Kunden zusätzlich 8 Anfahrten stattfinden und es entsteht eine Mehrbelastung an den Rampen dieser Empfänger, weil mehr Slots zur Anlieferung bereitgestellt werden müssen. Da die Anzahl der Anfahrten bei gleichbleibender Bestellmenge zunimmt, sinkt die durchschnittliche Liefermenge je Anfahrt bei diesen Kunden. Bei Kunden, die eine sehr dichte Rampenbelegung haben, kann es so zu Ressourcenkonkurrenz oder Engpässen an den Rampen kommen.

Das Ergebnis aus diesem Abschnitt ist nicht verallgemeinerbar wie in den Abschnitten 6.5 und 6.6 erläutert wird. Es gibt auch Fälle, in denen die Besuchshäufigkeit bei Kunden mit zunehmender Anzahl an alternativen Lieferperioden abnimmt, vgl. Anhänge D.

6.5. Häufigkeit von Teillieferungen

Das Anwachsen der Anfahrthäufigkeit geht einher mit dem häufigeren Gebrauch von Teillieferungen. In diesem Abschnitt wird am Beispiel der Instanzen mit 15 Kunden gezeigt, wie sich die Anlieferungen verändern. Die Zahlen beruhen auf der Auswertung, die in Abschnitt 6.4 vorgestellt wurde. Den Analysen der Häufigkeit von Teillieferungen wird vorausgeschickt, dass im Folgenden zwischen drei Arten von Lieferungen unterschieden wird:

- **Full (F)**: der Auftrag eines Kunden i wird vollständig in einem Fahrzeug geliefert, $d_i^p = d_i$ und $d_i^p < Q$
- **Full-Split (FS)**: der Auftrag eines Kunden i muss gesplittet werden, $d_i > Q$. Eine Aufteilung der Lieferung ist unvermeidbar, weil der Kundenauftrag größer ist als die Fahrzeugkapazität. Die Liefermenge der Teillieferung entspricht jedoch der Kapazität des Fahrzeuges: $d_i^p = Q$. Die Tour ist eine Pendeltour.

- **Split (S)**: der Auftrag d_i wird in Teillieferungen ausgeliefert, weil
 - nach einem oder mehreren FS-Lieferungen noch eine Restmenge zur Auslieferung übriggeblieben ist oder
 - es sinnvoll ist, den Kundenauftrag aufzuteilen, um eine kürzere Gesamtdistanz zu erreichen.

In beiden Fällen gilt: $d_i^p \neq d_i$ und $d_i^p \neq Q$

In der Abbildung 6.7 wird aggregiert über alle Arten der räumlichen Verteilung die Besuchshäufigkeit der Kunden ausgewertet. Die Besuche werden getrennt nach der Art der Belieferung F, FS oder S gezählt. In diesen Abbildungen markiert die gestrichelte Linie wieder die Grenze von 51 Mindestbesuchen.

Das Ausgangsszenario lässt nur eine Lieferperiode je Kunde zu, Abbildung 6.7 oben. Der größte Teil der Anfahrten sind Ganzladungen. Dies spiegelt deutlich die Verteilung der Nachfrage wieder, wie sie in Kapitel 5.2 für den Handel vorgestellt wurde. Der Kunde 5 ist der einzige Kunde in den Testinstanzen, dessen Nachfrage die Fahrzeugkapazität übersteigt. Somit ist er auch der einzige Kunde, der Full Split (FS) Lieferungen auslöst. Bis auf die Kunden 4, 14 und 15 werden alle Kunden auch mit Teillieferungen (S) angefahren. Insgesamt gibt es 27 Teillieferungen (S).

Werden bis zu zwei Alternativen zugelassen, erhöht sich insgesamt die Anzahl an Teillieferungen vom Typ S, Abbildung 6.7 Mitte. Die Anzahl an Splits vom Typ FS bleibt identisch. Keine Teillieferungen erhalten nun die Kunden 7, 9, 14 und 15. Kunde 5 wird am häufigsten mit Teillieferungen angefahren. Der Anteil an Teillieferungen bei den Kunden 3, 10 und 11 wächst an. Insgesamt erfolgen 73 Anfahrten mit einer Teillieferung. Davon gehören 48 Anfahrten zu Kundenaufträgen, die über zwei Perioden erfüllt werden. Somit werden 24 Kundenaufträge zeitlich gesplittet. Bei 51 gelösten Instanzen mit 15 Kunden entspricht das einem prozentualen Anteil von rund 3 Prozent der Kundenaufträge, die in zwei unterschiedlichen Perioden geliefert werden.

Die Auswertung mit bis zu drei Alternativen zeigt, dass der Anteil an Pendeltouren vom Typ FS bei Kunde 5 zurückgeht, Abbildung 6.7 unten. Die Kunden 1, 9 und 14 werden immer mit der vollen Kundennachfrage beliefert. Alle übrigen Kunden erhalten Teillieferungen. Während bei Kunde 10 die Anzahl an Teillieferungen zurückgeht, wächst sie bei Kunde

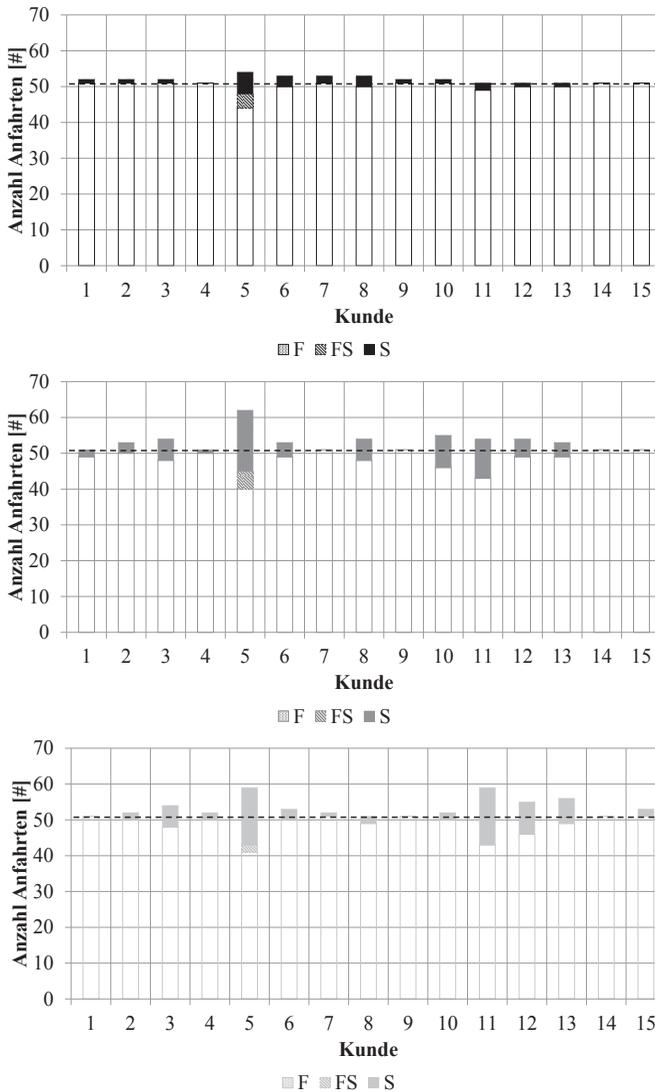


Abbildung 6.7.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, Datensatz Handel:
 Oben: eine Lieferperiode je Kunde (s)
 Mitte: bis zu zwei Alternativen (d)
 Unten: bis zu drei Alternativen (t)

11 und 12 im Vergleich zu Abbildung 6.7 Mitte, nochmal an. Die Kunden 5 und 11 werden am häufigsten mit Teillieferungen S angefahren. Von den insgesamt 70 Anfahrten mit Teillieferungen gehören 52 Anfahrten zu Teillieferungen über zwei Perioden. In der Lösung des Datensatzes Handel gibt es keine Lieferungen, deren Zustellung auf drei Perioden aufgeteilt wird. Die analogen Auswertungen für die Datensätze OEM und Zulieferer sind in den Anhängen E zu finden.

Zusammenfassend zeigt die Auswertung der Abbildung 6.7, dass

- bereits ohne die Verwendung von alternativen Perioden in geringem Umfang von Teillieferungen Gebrauch gemacht wird.
- relativ zur Mindestanzahl an Anfahrten nur ein geringer Mehraufwand durch zusätzliche Anfahrten notwendig ist, um Effizienzvorteile für den Spediteur und den Versender durch zusätzliche Lieferperioden zu erreichen.
- durch die Nutzung alternativer Lieferperioden ein Mehraufwand für den Empfänger und den Spediteur entstehen kann, weil es zu zusätzlichen Anfahrten bei den Kunden bzw. Stopps für den Spediteur kommen kann. Es lässt sich im Vorfeld nicht allgemein vorhersagen, welche Empfänger besonders von mehrfachen Anfahrten betroffen sind. Bezugnehmend auf den folgenden Abschnitt 6.6 ist die Aussage ansteigender Stopps dahingehend zu relativieren, dass die durchschnittliche absolute Anzahl an Stopps für den Spediteur fast konstant bleibt. Der Effekt einer zunehmenden Stoppdichte hebt sich durch eine geringere Anzahl an Touren auf.

6.6. Veränderung der Anzahl an Stopps je Tour

In Abschnitt 6.4 wurde darauf eingegangen, dass sich die Anzahl an Stopps je Tour durch alternative Lieferperioden ändert. Diese Veränderung ist in Tabelle 6.7 detailliert dargestellt. Sowohl mit wachsender Kundenanzahl als auch mit wachsender Anzahl alternativer Perioden ist ein Ansteigen der Stopps je Tour zu beobachten.

Je mehr Kunden eine Instanz umfasst, desto mehr Kunden liegen durchschnittlich auf einer Tour. Die Stoppdichte wächst mit zunehmender Anzahl an alternativen Perioden an, weil vermehrt von Teillieferungen Gebrauch gemacht wird, um kürzere Gesamtentfernungen zu erreichen. Die

Kunden	s	d	t
5	1,3	1,5	2,0
10	1,9	2,2	2,5
15	2,0	2,5	2,6
20	2,5	2,7	3,0
25	2,6	2,9	3,1

Tabelle 6.7.: Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz Handel

Stoppdichten bei 25 Kunden fallen aus der Reihe und sind als Ausreißer zu betrachten. Von den Instanzen mit 25 Kunden wurden im Datensatz Handel nur 6 Instanzen gelöst, die einen Vergleich zwischen s, d und t zulassen. Diese Instanzen sind aus der räumlichen Anordnung R.

Deutlich zeigt sich, dass die Stoppdichte durch Hinzunahme weiterer Perioden anwächst bzw. mindestens gleich hoch bleibt. Für Empfänger und Spediteur bedeutet dieser Effekt häufigeres Anhalten je Tour, um alle Kunden zu bedienen. Berücksichtigt man in dieser Betrachtung jedoch noch den Rückgang an Touren insgesamt (vgl. Ergebnisse aus Abschnitt 6.3, Tabelle 6.5) ergibt sich, dass die absolute Anzahl an Stopps für den Spediteur im Schnitt unverändert bleibt. Die absolute Anzahl durchgeführter Stopps ist in Tabelle 6.8 dargestellt. Die Werte sind das Produkt aus der Stoppdichte je Tour (Tabelle 6.7) und der Anzahl zu fahrender Touren (Tabelle 6.5). Auf Grundlage der Tabelle kann man schließen, dass sich die Anzahl der tatsächlichen Stopps bei Kunden durch Hinzunahme alternativer Lieferperioden im Durchschnitt kaum ändert. Das bedeutet, dass sich auch die Aufwände beim Kunden für das Entladen und den Spediteur bezüglich der Stopps (und somit Fixzeit für die Anfahrt bei einem Kunden: Anmeldung, Parken, Dokumente abgleichen etc.) nicht merklich ändern. Aus logistischer Sicht gehen zusätzliche Stopps beim Empfänger zu Lasten der Rampenbelegung und der Personalplanung. Für den Spediteur kosten zusätzliche Stopps Zeit, Personal und Fahrzeugauslastung. Da sich die absolute Anzahl an Stopps nur unwesentlich ändert, wird es auf beiden

Kunden	s	d	t
5	5,1	5,1	5,0
10	10,5	10,1	10,5
15	15,4	16,3	16,1
20	21,8	21,3	21,3
25	26,5	26,4	26,7

Tabelle 6.8.: Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz Handel

Seiten im Durchschnitt nicht zu Mehraufwänden kommen. Gleichwohl wird es für einzelne Kunden eine Mehrbelastung geben, weil die Anzahl an Stopps zunimmt (vgl. Abbildungen 6.7). Die Ergebnisse für die Datensätze OEM und Zulieferer sind im Anhang F aufgeführt.

6.7. Einfluss der Anzahl an Alternativen

Aus den Auswertungen der letzten Abschnitte lässt sich ablesen, dass alternative Lieferperioden einen Mehrwert in der Transportlogistik bieten, da

- die zurückgelegten Distanzen kürzer werden,
- die Auslastung der Fahrzeuge steigt und
- die Anzahl an zu fahrenden Touren fällt.

Zunächst entsteht der Eindruck, dass diese positiven Effekte erkaufte werden durch

- eine im Durchschnitt steigende Stoppdichte je Tour, sowie
- eine Zunahme der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern.

Rechnet man die Reduktion der Abfahrten am Depot gegen die steigende Stoppdichte auf, kompensieren sich beide Effekte und führen zu einer fast gleichbleibenden durchschnittlichen Anzahl an Kundenbesuchen.

Es zeigt sich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Anzahl an Alternativen und der Auswirkung auf die vorgenannten Kennzahlen gibt. Bereits bei bis zu zwei alternativen Auslieferperioden (d) lassen sich merkliche Einsparungen erzielen. Das bedeutet, dass auch Branchen mit wenig Spielraum in der Transportlogistik mit nur wenigen Alternativen positive Effekte in Tourlänge, Auslastung der Fahrzeuge und Anzahl an Touren realisieren können. Kleine Kompromisse in den Lieferterminen können große positive Auswirkungen haben. Werden bis zu drei Alternativen zur Auswahl gestellt, verbessern die Kennzahlen sich nochmals, verglichen mit dem Referenzszenario ohne Alternativen (s).

Es ist davon auszugehen, dass weitere zusätzliche Alternativen schnell eine Grenze des Verbesserungspotenzials erreichen und keine so deutlichen Effekte mehr nach sich ziehen. Die Auslastung der Fahrzeuge würde bis zur Vollauslastung steigen und eine weitere Verbesserung durch mehr Alternativen ist nicht mehr möglich. Es müssen immer mindestens $\left\lceil \sum_{i \in \mathcal{I}} \frac{d_i}{Q} \right\rceil$ Touren gefahren werden. Auch aus planerischer Sicht stehen mehr Alternativen gegen die Planungssicherheit, die in Realität zu erwarten ist. Die Voraussetzung, über einen langen Zeitraum planen zu können ohne Änderungen zu erwarten, ist für viele logistische Prozesse unrealistisch. Das Eintreten von Änderungen wird immer wahrscheinlicher; eine langfristige Planung hätte keinen Bestand.

6.8. Einfluss der räumlichen Anordnung der Kunden

In den Untersuchungen wurden drei unterschiedliche räumliche Anordnungen der Kunden ausgewählt. Abhängig von dieser Einteilung zeigt sich, dass die positiven Effekte der Tourenplanung mit alternativen Lieferperioden am größten sind, wenn die Kunden in Clustern (C) angeordnet sind. Cluster zeichnen sich dadurch aus, dass die Distanzen vom Depot zu einem Cluster verhältnismäßig groß sind, während die Distanzen zwischen den Kunden eines Cluster im Verhältnis zur Anfahrt zu einem Cluster klein sind. Sobald es möglich wird, durch Teillieferungen und alternative Lieferperioden auf eine Fahrt in einen Cluster zu verzichten, ergeben

sich relativ gesehen hohe Einsparpotenziale. Lange Anfahrten in einen Cluster können vermieden werden. Eine gleichverteilte Anordnung der Kunden mit ähnlichen Distanzen zwischen den Kunden, wie sie in einer zufälligen Anordnung (R) oder einer Kombination aus Ballungszentren und zufälliger Anordnung vorkommt (RC), hat zur Folge, dass die relativen Einsparungen geringer werden. Die Tendenz zu Stichfahrten nimmt ab.

Für Spediteure und Kunden ist das Konzept von Teillieferungen und alternativen Lieferperioden besonders dann interessant, wenn die Anfahrstationen geclustert angeordnet bzw. je länger die Fahrten in das Ballungszentrum sind. Darunter fällt z. B. die Verteilung von Waren aus Distributionszentren in Industrie- bzw. Gewerbegebiete oder Städte. Darunter kann auch die Versorgung von Produktionsstätten fallen, bei der die Zulieferer aus dem Fernbereich eines Werkes stammen, z. B. Belieferung eines Werkes aus einer entfernten Region.

Diese Erkenntnis gibt einen Hinweis darauf, wie man das Konzept alternativer Lieferperioden in die Praxis überführen kann. Die Kunden, die im Verhältnis zur Strecke zwischen Depot und den benachbarten Kunden nahe beieinander liegen, sollten zuerst für das Konzept gewonnen werden, weil sie das größte Einsparpotenzial versprechen. Erst dann sollten die Kunden in das Konzept eingeschlossen werden, die keine geclusterte Struktur aufweisen.

Im Rahmen der Überlegungen zum Einfluss der räumlichen Anordnung der Kunden auf das Einsparpotenzial wurde versucht, eine Maßzahl für die räumliche Verteilung zu finden. Ziel dieser Maßzahl soll es sein, das Einsparpotenzial in Abhängigkeit zur räumlichen Konzentration der Kunden abzubilden. Mit Hilfe einer einfachen und berechenbaren Einteilung in eine der Klassen R, RC oder C könnten Spediteure das Einsparpotenzial bezogen auf die räumliche Verteilung ihrer Kunden abschätzen. Umgekehrt könnten produzierende Unternehmen durch die räumliche Lage ihrer Zulieferer eine Abschätzung darüber treffen, wie hoch das Einsparpotenzial durch Einführung alternativer Lieferperioden wäre.

Als Einteilungskriterium wurden verschiedene Ansätze verfolgt, nämlich

- die Bestimmung des Variationskoeffizienten aus der Entfernungsmatrix,
- die Bestimmung des Gini-Koeffizienten, vgl. z. B. Handl (2010), aus der Entfernungsmatrix,
- die Einteilung der Kunden mit Hilfe der Cluster-Analyse Backhaus u. a. (2008),
- die Bestimmung der Kundendichte in einem 2-dimensionalen Raster und
- eine visuelle Abschätzung.

Keiner der untersuchten Ansätze liefert ein Ergebnis, das in einer verallgemeinerbaren Form für die Abschätzung des Verbesserungspotenzials verwendet werden kann.

Der Variationskoeffizient liefert gute Ergebnisse für das Erkennen der zufälligen räumlichen Anordnung (R), weil die paarweisen Distanzen zwischen den Kunden ähnlich sind. Dadurch nimmt der Variationskoeffizient einen niedrigen Wert nahe 0 an. Die Variationskoeffizienten der Instanzen (RC) und (C) weisen höhere Werte als für (R) auf, weil Cluster existieren, die lange Anfahrten erfordern. Die Werte für (RC) und (C) liegen allerdings so nahe beieinander, dass eine eindeutige Entscheidung für eine Klasse (RC) oder (C) nicht möglich ist.

Die Schwäche des Gini-Koeffizienten liegt darin, dass keine Abhängigkeiten der paarweisen Entfernungen untereinander berücksichtigt werden. Kunden, die den gleichen Abstand zum Depot aufweisen, aber in entgegengesetzter Richtung vom Depot liegen, werden genauso bewertet wie Kunden mit gleicher Entfernung vom Depot, die direkt nebeneinander liegen. Damit scheidet der Gini-Koeffizient als geeignete Maßzahl aus.

Mit Hilfe der Cluster-Analyse lassen sich gruppierte räumliche Strukturen identifizieren. In Backhaus u. a. (2008) wird zur Identifikation empfohlen, zunächst mit Hilfe des Single-Linkage-Verfahrens Ausreißer zu identifizieren und aus den Daten zu entfernen. Mit einem weiteren agglomerativen Verfahren soll im nächsten Schritt die Einteilung der Kunden in

Gruppen erfolgen. Zu den agglomerativen Verfahren gehören das Single-, Complete- und Average-Linkage-Verfahren, die Zentroid-Methode, die Median-Methode und das Verfahren von Ward. Gute Ergebnisse liefert hier das Ward-Verfahren. Der Zielkonflikt, der bei agglomerativen Verfahren besteht, ist die Abwägung der Homogenität der Cluster und der Handhabbarkeit der Cluster. Übertragen auf die Anforderung, eine Einteilung in die Klasse (R), (RC) und (C) vorzunehmen, kann nicht eindeutig beantwortet werden, wie eine Unterscheidung zwischen (R) und (RC) erfolgen kann. Gut erkennbar ist hingegen eine Einteilung in (C), sofern es nicht zu viele Ausreißer gibt, die im ersten Schritt aus der Datenmenge eliminiert werden müssen.

Bei der Ermittlung des Konzentrationsgrades über ein Raster wird die Idee verfolgt, die Anzahl der Kunden in Rasterabschnitten zu bestimmen. Das Verfahren liefert keine eindeutige Aussagen, weil die Ergebnisse von der Rastergröße abhängig sind und kein Bezug zwischen den Rastern hergestellt wird. Diese Einteilung ist damit ebenfalls ungeeignet, um eine eindeutige Einteilung vorzunehmen.

Am ehesten geeignet für die Zuordnung zu einer Klasse (R), (C) oder (RC) scheint es, eine visuelle Einteilung vorzunehmen, indem die Kundenstandorte auf einer Karte abgetragen werden. Entsprechend der räumlichen Lage der Kunden wird nun identifiziert, in welche Klasse eingeteilt wird. Das Augenmerk ist dabei auf das Verhältnis zwischen Anfahrestrecke zu einem Ballungszentrum zu legen und die paarweisen Abstände der Kunden innerhalb eines Ballungszentrums. Das tatsächliche Einsparpotenzial ist allerdings nur mit einer Berechnung möglich, die die Touren vor und nach Einführung alternativer Lieferperioden bestimmt und bewertet. Beeinflusst wird das Verbesserungspotenzial stark von dem Verhältnis Länge der Anfahrt zu Abständen innerhalb des Clusters.

Wie das Kapitel zeigt, hat der Ansatz, Touren mit alternativen Lieferperioden zu planen, Auswirkungen auf alle am Transport beteiligten Parteien. In Abbildung 6.8 sind die Änderungen qualitativ je Partner einander gegenübergestellt.

Versender/ Depot	Spediteur/ Transportunternehmen	Empfänger
(+) Entlastung der Rampe, weil weniger Touren abgehen	(+) Weniger Touren (+) Kürzere Touren (+) Höhere Auslastung (-) Höhere Stoppdichte	(+/-) Höhere/Niedrigere Auslastung der Rampe

Abbildung 6.8.: Einfluss alternativer Lieferperioden auf Versender, Transporteur und Empfänger

Die Rampen am Depot werden entlastet, weil durch die bessere Auslastung der Fahrzeuge weniger Touren abgehen. Konsequenz für das Depot ist, dass die Personalplanung vereinfacht wird, die Rampenkontakte am Depot gehen zurück und das Yard-Management der ankommenden Fahrzeuge wird vereinfacht. Der Fixkostenanteil von sich anmeldenden Fahrzeugen geht zurück.

Die Transportunternehmen können ebenfalls von der erhöhten Auslastung der Fahrzeuge profitieren. Mit höherer Auslastung der Fahrzeuge wird der Ressourceneinsatz an Personal und Fahrzeugen zurückgehen. Die Effizienz des Transportunternehmens steigt. Personalkosten und Abschreibungen für Fahrzeuge sind die größten Kostenblöcke in einem Transportunternehmen. Zusätzlich zum effizienteren Ressourceneinsatz werden die Touren kürzer. Die Kennzahl der Stopps je Tour wächst beim Spediteur an. Dieses Anwachsen wird jedoch durch den Rückgang der zu fahrenden Touren kompensiert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Stoppkosten des Transportunternehmens insgesamt unverändert bleiben, die Effizienz insgesamt aber steigt. Spediteure bzw. Transportunternehmen profitieren vom Konzept alternativer Lieferperioden.

Die Untersuchungen zu den Auswirkungen beim Empfänger deuten darauf hin, dass mit einer Zunahme der Rampenkontakte zu rechnen ist. In den Auswirkungen aus Abschnitt 6.4 konzentriert sich die Zunahme der Rampenkontakte auf wenige Kunden. Die Ergebnisse im Anhang D.1 und D.2 zeigen diese Zunahme der Rampenkontakte beim Empfänger nicht in dieser Form, sondern liegen eher auf einem konstanten Niveau. Für

manche Kunden geht die Anzahl an Rampenkontakten mit zunehmender Anzahl an alternativen Lieferperioden zurück. Eindeutige Aussagen unter welchen Voraussetzungen mit einem Anstieg oder einem Rückgang der Rampenkontakte zu rechnen ist, können nicht getroffen werden. Dazu wirken zu viele unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Tourenplanung mit alternativen Lieferperioden, z. B. die Kombination an Kunden, die in einer Periode gleichzeitig eine Lieferung zulassen, und die Nachfragemenge bei einem Kunden, die wiederum auf die Nutzung der Fahrzeugkapazität wirkt. Es lässt sich jedoch deutlich beobachten, dass die Einsparungen an Rampenkontakten immer auf Seiten des zentralen Punktes (Depot) liegt. Der Anstieg an Rampenkontakten verteilt sich auf die dezentralen Punkte (die einzelnen Kunden). In einer Distributionsstruktur würde die Entlastung am Distributionszentrum stattfinden und die Belastung bei den Empfängern. In einem Produktionsumfeld wird die Entlastung der Rampen am Werk stattfinden. Die Mehrbelastung entsteht bei den Zulieferern des Werkes. Relativ gesehen wird somit die höchste Entlastung im System an den Bündelungspunkten stattfinden, also den Knoten, die im Transportprozess bezüglich des Ressourceneinsatzes die kritischsten sind.

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind Testinstanzen, die keine alternativen Lieferperioden zulassen. Die Lösungen zu diesen Instanzen weisen bereits Teillieferungen vom Typ (S) auf. Mit der Hinzunahme weiterer alternativer Perioden ändert sich die Anzahl der Teillieferungen (S) nur geringfügig. Der größte Teil der Lieferungen wird weiterhin als Ganzladung (F) oder Full-Split (FS) transportiert. Daraus lässt sich schließen, dass die positiven Effekte in erster Linie auf die zeitliche Flexibilität der Auftragsdurchführung zurückzuführen sind, weil die Aufträge zum transportoptimalen Zeitpunkt durchgeführt werden können. Teillieferungen (S, FS), die über mehrere Perioden aufgeteilt sind, werden nur selten genutzt. Die Kunden erhalten ihre Lieferung in der Regel in einer Periode und nicht zeitlich versetzt.

Das Konzept, Split-Deliveries zuzulassen, führt bereits zu Einsparungen, vgl. Kapitel 2. Wird zusätzlich eine Flexibilisierung des Liefertermins erlaubt, werden weitere Einsparungen erreicht. Bereits wenn ein Teil der Kunden nur eine zusätzliche Alternative für die Transportdurchführung anbietet, können hohe Verbesserungspotenziale realisiert werden. Die Überführung des Ansatzes kann somit schrittweise und selektiv erfolgen.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 6.2 und Breier und Gossler (2014) zeigen, dass der positive Effekt für Auftragsstrukturen mit $d_i < Q$ höher ist als bei Auftragsstrukturen mit $d_i \geq Q$. Das Konzept ist somit besonders für das Teilladungs- und Sammelgutsegment zu empfehlen. Systeme, die hauptsächlich im Full-Truck-Load-Bereich operieren, werden von dem Konzept nicht so stark profitieren.

Die Untersuchungen in Abhängigkeit der räumlichen Anordnung der Kunden lassen den Schluss zu, dass das Konzept höhere Einsparpotenziale zulässt, wenn das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen paarweisen Kundenentfernung und dem Anfahrweg in ein Ballungszentrum klein ist. Das Konzept sollte somit vorrangig eingesetzt werden, wenn Depots Ballungszentren bedienen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat das Vehicle-Routing-Problem mit alternativen Perioden und Split-Deliveries (SDVRPA) untersucht. Bei dem Problem handelt es sich um eine Relaxation des Vehicle-Routing-Problems mit Split-Deliveries, denn es wird erlaubt, alternative Lieferperioden in das Problem einzubeziehen. Die Alternativen sind nicht exklusiv, so dass Teillieferungen auch über mehrere Perioden erfolgen dürfen. Eine zeitliche Verschiebung der Auftragsdurchführung wird somit möglich.

Das Studium der Literatur in Kapitel 2 hat gezeigt, dass diese Fragestellung wissenschaftlich noch nicht untersucht wurde. Untersucht wurden bisher Probleme, die sich entweder mit alternativen Lieferperioden auseinandersetzen, ohne Teillieferungen zu betrachten. Oder es wurden Probleme mit Teillieferungen gelöst, die keine alternativen Perioden zulassen. Damit schließt diese Arbeit eine Lücke, die nicht nur methodisch interessant, sondern auch praktisch relevant ist.

Zur Lösung des Problems wurde ein Branch-and-Price-Ansatz verwendet. Basierend auf der kompakten Formulierung des Problems wurde ein Zerlegung in ein Master-Problem für alle Perioden und ein Pricing-Problem je Periode vorgenommen. Diese Zerlegung kann zukünftig allgemein für Vehicle-Routing-Probleme mit alternativen Perioden verwendet werden. Zur Bestimmung einer unteren Schranke wurde ein eigens dafür aufgestelltes Optimierungsproblem gelöst. Diese Formulierung ist neu und kann zukünftig allgemein für Tourenplanungsprobleme mit Teillieferungen genutzt werden, um die Mindestanzahl an benötigten Touren zu bestimmen. Es handelt sich hier um eine globale untere Schranke. Globale und lokale Schnittebenen werden dem SDVRPA im Lösungsprozess hinzugefügt. Die Lösung der Pricing-Probleme erfolgt über einen Labeling-Algorithmus,

der für das SDVRPA angepasst wurde. Mit dem vorgestellten Verfahren können Instanzen mit bis zu 25 Knoten bei einer Laufzeitbeschränkung von 60 Minuten gelöst werden.

Da es sich beim SDVRPA um ein noch nicht untersuchtes Problem handelt, existieren keine Testinstanzen. Die Testinstanzen wurden deshalb neu entwickelt. Die räumliche Verteilung der Kunden folgt der Anordnung der Solomon-Instanzen. Die künstlichen Nachfragen der Solomon-Instanzen wurden durch reale Sendungsdaten ersetzt und in drei Ausprägungen untersucht: Sendungsdaten aus dem Handel, von einem OEM und einem Zulieferer. Den Daten ist gemein, dass die charakteristische Verteilung mit einem Schwerpunkt auf kleine Sendungsgrößen abgebildet wird. Die alternativen Perioden wurde zufällig gezogen und Testinstanzen mit bis zu drei Lieferalternativen erzeugt.

Vor dem Hintergrund steigender Umweltauforderungen, steigender Ölpreise, dem Ziel, den CO_2 -Ausstoß zu reduzieren und allgemein steigenden Transportkosten entgegenzuwirken, leistet der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz alternative Lieferperioden und Teillieferungen miteinander zu kombinieren, einen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele. Die Ergebnisse folgen der Beantwortung der forschungsleitenden Fragen aus Unterkapitel 1.3. Die forschungsleitenden Fragen sind so gewählt, dass Aussagen für die am Transportprozess beteiligten Akteure einer Supply Chain getroffen werden können: Versender, Empfänger und Transportunternehmen bzw. Spediteure. Klassischerweise wird bei der Interpretation der Ergebnisse von Tourenplanungsproblemen der Zielfunktionswert in den Fokus gerückt. Was aus mathematischer Sicht ausreichend ist, um die Wirkung einer neuen Methode zu belegen, ist aus logistischer Sicht zu einseitig. Daher wurde bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit der logistische Aspekt in den Vordergrund gerückt und die Auswirkungen auf die am Transportprozess beteiligten Rollen untersucht.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass Spediteure bzw. Transportunternehmen stark von diesem neuen Ansatz profitieren können. Die Gesamtdistanz geht bei Verwendung alternativer Lieferperioden und Split-Deliveries deutlich zurück. Damit geht eine steigende Auslastung der Fahrzeuge einher. Auch die Anzahl an Touren reduziert sich, wodurch ein Beitrag zur Reduktion des Fuhrparks geleistet werden kann. Die absolute Anzahl an Stopps bleibt für den Spediteur in den untersuchten Instanzen

im Durchschnitt der Lösungen fast unverändert. Damit werden die absoluten Stoppkosten konstant bleiben. Aus Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die positiven Effekte größer sind, wenn die Auftragsgrößen klein sind. Ebenfalls ableiten lässt sich, dass der positive Effekt alternativer Lieferperioden am größten ist, wenn die Kunden geclustert angeordnet sind. Die Ableitung für die Praxis ist, dass das Konzept vor allem im Teilladungsbereich mit geclustelter Kundenanordnung interessant ist. Da es bereits ausreichend ist, wenn einige wenige Kunden alternative Lieferperioden zulassen, um positive Effekte zu erreichen, sollte die Einführung des Konzeptes mit Kunden beginnen, die paarweise nahe beieinander liegen, aber eine große Anfahrtstrecke zum Depot haben.

Durch den Rückgang der Anzahl an Touren profitiert auch das Depot vom Ansatz alternativer Lieferperioden. Die Personalbereitstellungskosten an den Rampen nehmen dadurch ab. Die Rampenkontakte am Depot werden durch den Rückgang an Touren ebenfalls reduziert. Der Anmeldeprozess eines Fahrzeuges am Depot wird so seltener durchlaufen; damit kann eine Reduktion der Verwaltungskosten einhergehen.

Zur Veränderung der Rampenkontakte bei den Empfängern kann keine eindeutige Aussage gemacht werden. Manche Testinstanzen lassen auf einen Rückgang der Rampenkontakte, manche Instanzen auf eine Zunahme der Rampenkontakte schließen. Offen bleibt, wie die Änderung der Rampenkontakte zwischen den Empfängern verteilt ist. In den vorgestellten Ergebnissen der Testinstanzen mit 15 Kunden erfahren wenige Kunden einen Anstieg der Rampenkontakte und der Rest der Kunden kaum eine Veränderung. Unter welchen Bedingungen die Erhöhung der Rampenkontakte bei wenigen Kunden erfolgt oder wodurch diese Erhöhung begünstigt wird, kann aus den Ergebnissen nicht geklärt werden.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Ansatz alternativer Lieferperioden mit Teillieferungen in der Tourenplanung wurde bezüglich der forschungsleitenden Fragen untersucht. Mit der Beantwortung dieser Fragen wurden gleichzeitig neue Fragen sichtbar. Diese können die Grundlage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen des Ansatzes sein, alternative Lieferperioden und Teillieferungen im Transport zuzulassen. Mit Hilfe des exakten Verfahrens dieser Arbeit wurde deutlich, dass der Ansatz Vorteile für die am Transportprozess beteiligten Partner hat. Durch eine Heuristik zur Lösung des Problems ließen sich schnell eine Vielzahl an Testläufen in

kürzerer Zeit als bei einem exakten Verfahren realisieren. Dadurch wäre eine Grundlage geschaffen, statistische Untersuchungen im Rahmen einer Studie vorzunehmen, um folgende Fragen zu beantworten:

Wie wirkt sich das Verhältnis zwischen Kunden, die alternative Lieferperioden und Teillieferungen anbieten, und Kunden, die keine Alternativen und Splits erlauben auf das Gesamteinsparpotenzial aus? Die Beantwortung dieser Frage ist für die Übertragung des Ansatzes in die Praxis relevant. Je weniger Kunden Alternativen und Splits zulassen müssen, um Einsparungen zu erreichen, desto kleiner sind die Aufwände zur Überführung in die Praxis.

Lässt sich ein Mechanismus erkennen, nach dem die Änderung der Rampenkontakte bei den Empfänger im Vorfeld bestimmt werden kann? Wenn es einen solchen Mechanismus gibt, lässt sich darüber steuern, welche Empfänger nach Einführung alternativer Lieferperioden und Teillieferungen wie stark von Änderungen betroffen sind. Dadurch wird es möglich, den Gesamtgewinn für das Transportnetzwerk aufzuteilen.

Gibt es einen quantifizierbaren Zusammenhang zwischen der räumlichen Anordnung der Kunden und dem Einsparpotenzial, der über die Einteilung in geclusterter, zufälliger und gemischter Anordnung hinausgeht? Damit ließen sich in der Praxis Strukturen identifizieren für die alternative Lieferperioden und Teillieferungen besonders vorteilhaft sind.

Literaturverzeichnis

- Archetti, C., N. Bianchessi und M. G. Speranza (2011). A column generation approach for the split delivery vehicle routing problem. *Networks* 58(4), S. 241–254.
- Archetti, C., M. Bouchard und G. Desaulniers (2009). Enhanced Branch-and-Price-and-Cut for Vehicle Routing with Split Deliveries and Time Windows. *Les Cahiers du GERAD*.
- Archetti, C., M. Bouchard und G. Desaulniers (2011). Enhanced Branch and Price and Cut for Vehicle Routing with Split Deliveries and Time Windows. *Transportation Science* 45(3), S. 285–298.
- Archetti, C., M. W. Savelsbergh und M. G. Speranza (2008). To split or not to split: That is the question. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44(1), S. 114–123.
- Archetti, C., M. W. P. Savelsbergh und M. G. Speranza (2006). Worst-Case Analysis for Split Delivery Vehicle Routing Problems. *Transportation Science* 40(2), S. 226–234.
- Athanasopoulos, T. (2011). *The Multi-Period vehicle routing problem and its applications*. Dissertation, University of the Aegean, Mytilene.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber (2008). *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (12. Aufl.). Berlin: Springer.
- Beratergruppe Verkehr und Umwelt GmbH (Hrsg.) (2007). *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. Intraplan Consult GmbH.
- Bünder, H. (2009). Optimistisch in die Zukunft. *Frankfurter Allgemeine Zeitung* (276), S. 21.

- Bramel, J. und D. Simchi-Levi (2002). The vehicle routing problem. Chapter Set-covering-based algorithms for the capacitated VRP, S. 85–108. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Breier, H. und T. Gossler (2014). Branch-and-Price on the Split Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows and Alternative Delivery Periods. In: *Operations Research Proceedings 2013*, Rotterdam. Springer International Publishing.
- Bundesamt für Güterverkehr (Hrsg.) (2013). *Marktbeobachtung Güterverkehr – Jahresbericht 2012*. Köln.
- Cardeneo, A. (2005). *Modellierung und Optimierung des B2C-Tourenplanungsproblems mit alternativen Lieferorten und -zeiten*. Dissertation, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Chabrier, A. (2006). Vehicle Routing Problem with elementary shortest path based column generation. *Computers & Operations Research* 33(10), S. 2972–2990.
- Chvátal, V. (1983). *Linear programming*. A series of books in the mathematical sciences. New York: Freeman.
- Cordeau, Laporte und Mercier (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society* 52(8), S. 928–936.
- Dantzig, G. B. (1960). On the Shortest Route Through a Network. *Management Science* 6(2), S. 187–190.
- Dantzig, G. B. und J. H. Ramser (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science* 6(1), S. 80–91.
- Dantzig, G. B. und P. Wolfe (1960). Decomposition Principle for Linear Programs. *Operations Research* 8(1), S. 101–111.
- Desaulniers, G. (2010a). Appendix A and B: Branch-and-Price-and-Cut for the Split-Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research* 58, S. 179–192.

- Desaulniers, G. (2010b). Branch-and-Price-and-Cut for the Split-Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research* 58(1), S. 179–192.
- Desaulniers, G. H. (Hrsg.) (2005). *Column generation*. GERAD 25th anniversary series. New York: Springer.
- Desrochers, M., J. Desrosiers und M. Solomon (1992). A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research* 40(2), S. pp. 342–354.
- Desrochers, M. und F. Soumis (1989). A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem. *Transportation Science* 23, S. 1–14.
- Desrosiers, J., F. Soumis und M. Desrochers (1984). Routing with time windows by column generation. *Networks* 14(4), S. 545–565.
- Deutsche Speditions- und Logistikverband e. V. (Hrsg.) (2010). *Zahlen – Daten – Fakten aus Spedition und Logistik*. Bonn.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1(1), S. 269–271.
- Dror, M. (1994). Note on the Complexity of the Shortest Path Models for Column Generation in VRPTW. *Operations Research* 42(5), S. 977–978.
- Dror, M., G. Laporte und P. Trudeau (1994). Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics* 50(3), S. 239–254.
- Dror, M. und P. Trudeau (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Transportation Science* 23(2), S. 141.
- Dror, M. und P. Trudeau (1990). Split Delivery Routing. *Naval Research Logistics* 37, S. 383–402.
- Eckstein, P. P. (2013). *Repetitorium Statistik: Deskriptive Statistik-Stochastik-Induktive Statistik* (7. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler.
- EHI und IML (2012). Trends in der Handelslogistik 2012. *EHI Retail Institute und Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML*.

- Establish (2013). Logistics Cost and Service 2012. Internet. http://www.establishinc.com/cs_supply_chain.asp am 06.08.2013.
- Eurostat (2013). Inländischer Frachttransport ausgewählter Länder. <http://stats.oecd.org> am 16.07.2013.
- Feillet, D. (2010). A tutorial on column generation and branch-and-price for vehicle routing problems. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 8(4), S. 407–424.
- Frizzell, P. W. und J. W. Giffin (1995). The split delivery vehicle scheduling problem with time windows and grid network distances. *Computers & Operations Research* 22(6), S. 655 – 667.
- Gendreau, M., P. Dejax, D. Feillet und C. Gueguen (2006). Vehicle routing with time windows and split deliveries. Forschungsbericht, Laboratoire Informatique d’Avignon, Avignon.
- Granzow, A. (2009). Logistiker machen Tempo beim Klimaschutz. *Handelsblatt* (89), S. A1.
- Grünert, Tore; Irnich, S. (2005a). *Optimierung im Transport*, Band 1: Grundlagen. Aachen: Shaker.
- Grünert, Tore; Irnich, S. (2005b). *Optimierung im Transport*, Band 2: Wege und Touren. Aachen: Shaker.
- Guilbault, M. und E. Gouvernal (2010). Transport and Logistics Demand - New Input from Large Surveys of Shippers in France. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2168, S. 71–77.
- Hagenlocher, S., D. F. Wilting und P. D. P. Wittenbrink (2013). Schlussbericht: Schnittstelle Rampe - Lösungen zur Vermeidung von Wartezeiten. Forschungsbericht, hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH.
- Handl, A. (2010). *Multivariate Analysemethoden: Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hillier, F. S. (2010). *Introduction to operations research* (9. Aufl.). Boston: McGraw-Hill.

- Irnich, S. und G. Desaulniers (2005). *Shortest Path Problems with Resource Constraints*, Chapter 2, S. 33–65. GERAD 25th Anniversary Series. Springer.
- Jungnickel, D. (Hrsg.) (2007). *Graphs, Networks and Algorithms* (5. Aufl.). Algorithms and Computation in Mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kohl, N. (1995). *Exact methods for time constrained routing and related scheduling problems*. Dissertation, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Delft.
- Kohl, N., J. Desrosiers, O. B. G. Madsen, M. M. Solomon und F. Soumis (1999). 2-Path Cuts for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Transportation Science* 33(1), S. 101–116.
- Krumke, S. O. (2009). *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen* (2. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg und Teubner.
- Land, A. H. und A. G. Doig (1960). An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica* 28(3), S. 497–520.
- Lübbecke, M. E. und J. Desrosiers (2005). Selected Topics in Column Generation. *Operations Research* 53, S. 1007–1023.
- Liedtke, G. (2012). Estimation of the benefits for shippers from a multimodal transport network. *Logistics Research* 4(3-4), S. 113–125.
- Martello, Silvano; Toth, P. (1990). *Knapsack problems: algorithms and computer implementations*. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. Chichester: Wiley.
- Merziger, G. und T. Wirth (2010). *Repetitorium höhere Mathematik* (6. Aufl.). Barsinghausen: Binomi.
- Meyer, A. (2012). A constraint programming based approach for planning milk runs. In: *The 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP'12)*, Bologna, S. 85–90. Verolog Conference.
- Naddef, D. und G. Rinaldi (2002). The vehicle routing problem. Chapter Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP, S. 53–84. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

- Pacheco, J., A. Alvarez, I. García und F. Angel-Bello (2012). Optimizing vehicle routes in a bakery company allowing flexibility in delivery dates. *Journal of the Operational Research Society* 63(5), S. 569–581.
- Pataki, G. (2003). Teaching Integer Programming Formulations Using the Traveling Salesman Problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review* 45(1), S. 116–123.
- Pirkwieser, S. und G. R. Raidl (2009). A column generation approach for the periodic vehicle routing problem with time windows. In: M. G. Scutellà (Hrsg.), *Proceedings of the International Network Optimization Conference 2009*.
- Reimann, S. (2011). Preise im Ladungsverkehr erklimmen Allzeithoch. *Deutsche Verkehrs-Zeitung* (101).
- Schlatter, S. (2012). Unternehmensprofil Transporeon. http://www.transporeon.com/fileadmin/images/presse/Pressemappe/TRANSPOREON_Unternehmensprofil.pdf am 05.08.2013.
- Selinger, U., G. Liedtke und K. Furmans (2010). *A new Approach to Transportation Network Design for medium Flows of Goods*, Chapter 17, S. 281–301. Number 16 in Leobener Logistik Cases. Gabler. Supply Chain Network Management.
- Solomon, M. M. (1983). *Vehicle Routing and Scheduling with Time Windows Constraints: Models and Algorithms*. Dissertation, University of Pennsylvania.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research* 35, S. 254–265.
- Toth, P. (Hrsg.) (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM monographs on discrete mathematics and applications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Toth, P. und D. Vigo (2002a). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics* 123(1-3), S. 487–512.

- Toth, P. und D. Vigo (2002b). The vehicle routing problem. Chapter An overview of vehicle routing problems, S. 1–26. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Tricoire, F., M. Romauch, K. F. Doerner und R. F. Hartl (2010). Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows. *Computers & Operations Research* 37(2), S. 351–367.
- Wittenbrink, P. (2010). Logistik 2015. *Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik (e.V.)*.
- Wolsey, L. A. (1998). *Integer programming*. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. New York: Wiley.

A. Einfluss auf die Gesamttourlänge

A.1. Datensatz OEM

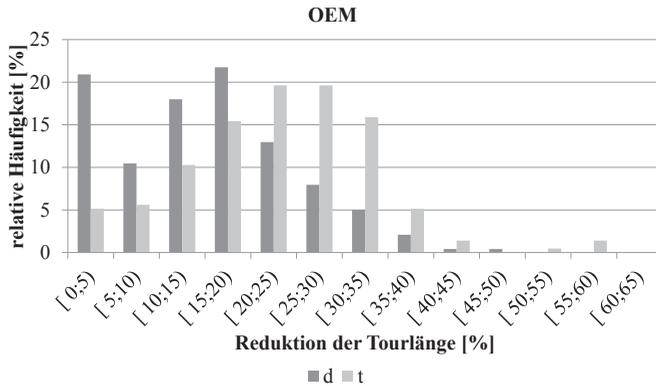


Abbildung A.1.: Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM

A.2. Datensatz OEM, abhängig von räumlicher Anordnung

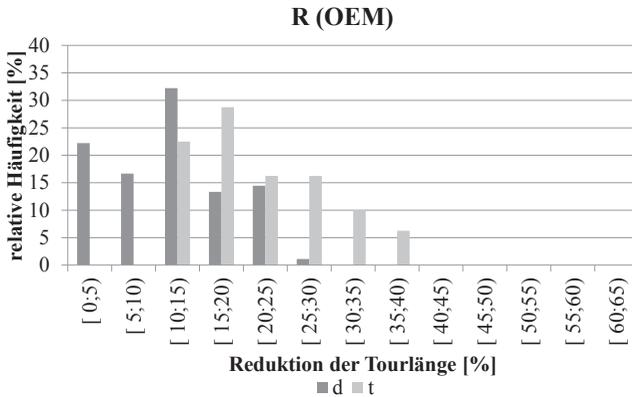


Abbildung A.2.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (R) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM

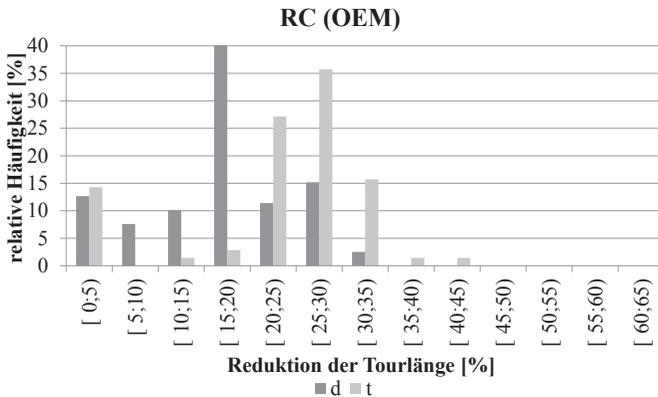


Abbildung A.3.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (RC) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM

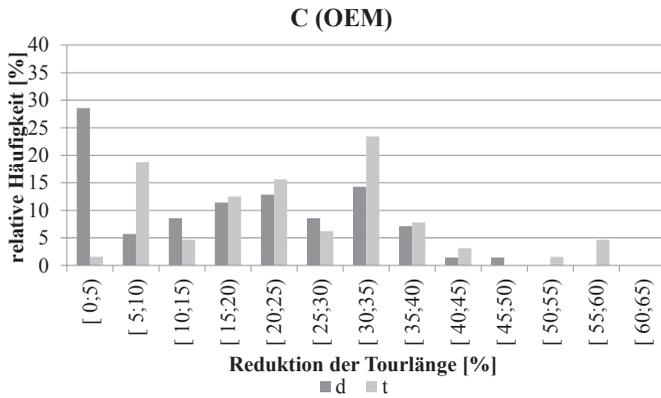


Abbildung A.4.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (C) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz OEM

	d	t
R	6,9%	16,9%
C	13,4%	19,9%
RC	12,1%	18,8%

Tabelle A.1.: Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM

A.3. Datensatz Zulieferer

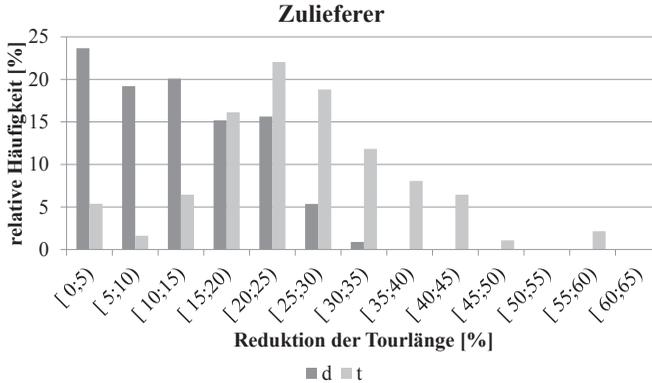


Abbildung A.5.: Verkürzung der Touren, klassifiziert nach prozentualer Einsparung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer

A.4. Datensatz Zulieferer, abhängig von räumlicher Anordnung

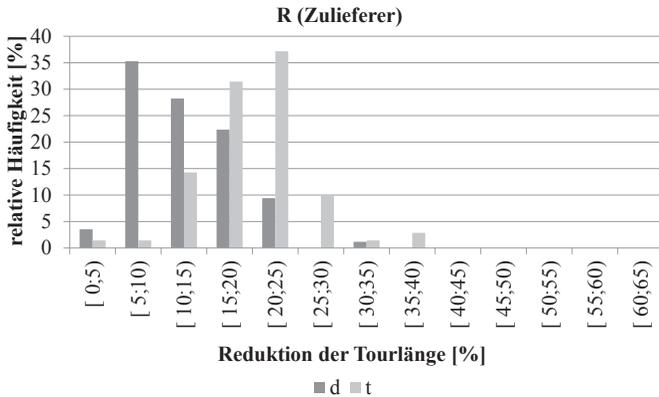


Abbildung A.6.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (R) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer

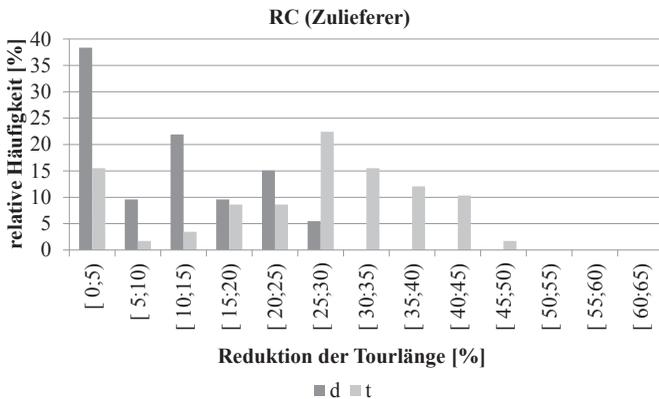


Abbildung A.7.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (RC) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer

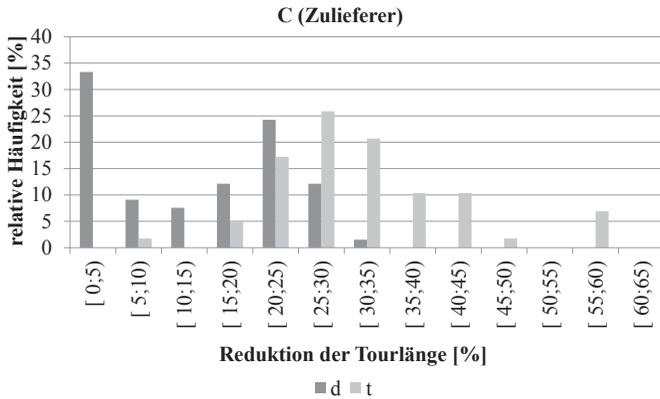


Abbildung A.8.: Verkürzung der Touren klassifiziert nach prozentualer Einsparung (C) im Vergleich zum Referenzszenario (s), Datensatz Zulieferer

	d	t
R	7,5%	15,7%
C	9,6%	26,9%
RC	6,6%	20,7%

Tabelle A.2.: Mittlere Verkürzung der Tourlänge in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Kunden im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer

B. Fahrzeugauslastung

B.1. Auslastung beim Datensatz OEM

	s	d	t
durchschnittliche Fahrzeugauslastung	56,8%	61,2%	63,6%

Tabelle B.1.: Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz OEM

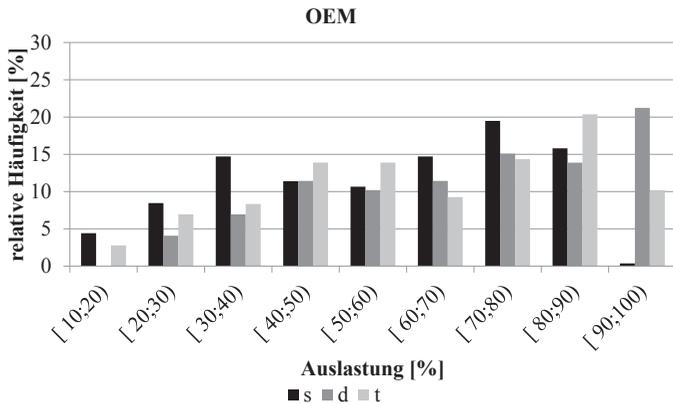


Abbildung B.1.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz OEM

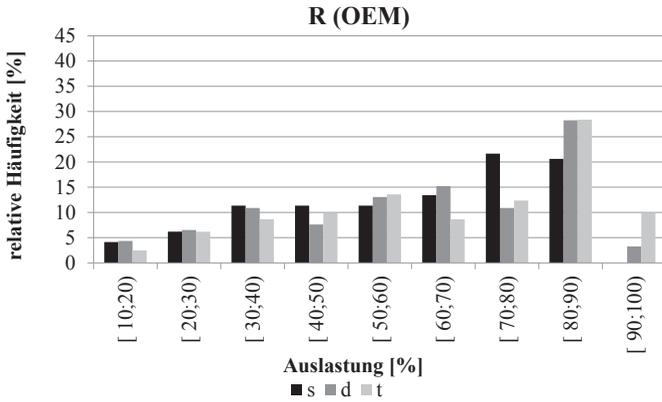


Abbildung B.2.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (R), Datensatz OEM

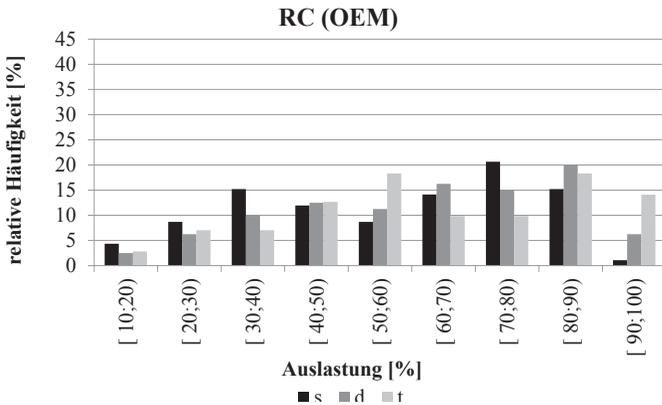


Abbildung B.3.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (RC), Datensatz OEM

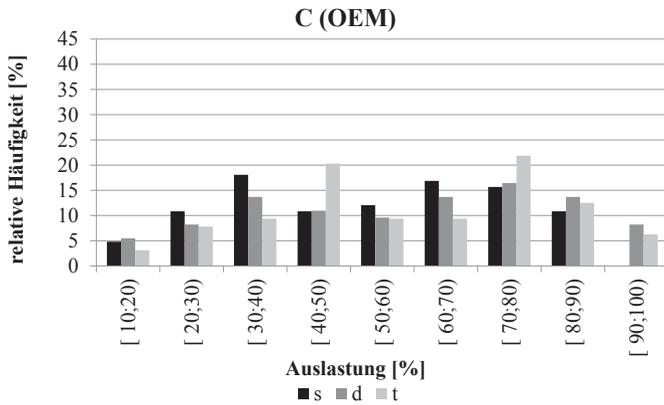


Abbildung B.4.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (C), Datensatz OEM

	d	t
R	6,5%	22,8%
C	18,3%	30,5%
RC	20,5%	30,5%

Tabelle B.2.: Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM

B.2. Auslastung beim Datensatz Zulieferer

	s	d	t
durchschnittliche Fahrzeugauslastung	63,8%	68,0%	73,6%

Tabelle B.3.: Durchschnittliche Fahrzeugauslastung, in Abhängigkeit der Anzahl alternativer Lieferperioden, Datensatz Zulieferer

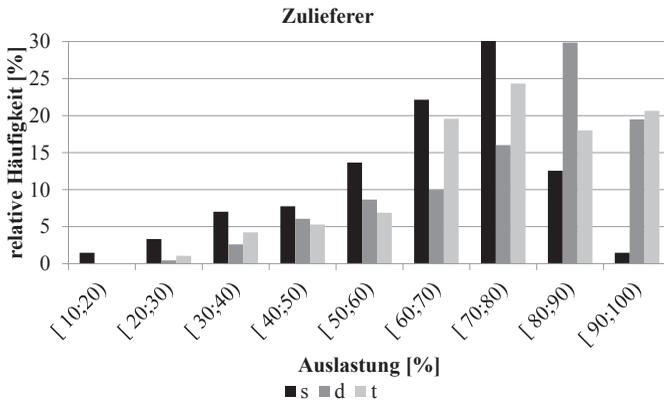


Abbildung B.5.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad, Datensatz Zulieferer

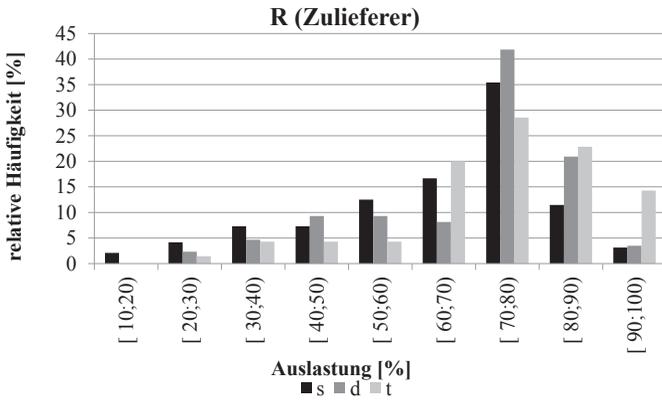


Abbildung B.6.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (R), Datensatz Zulieferer

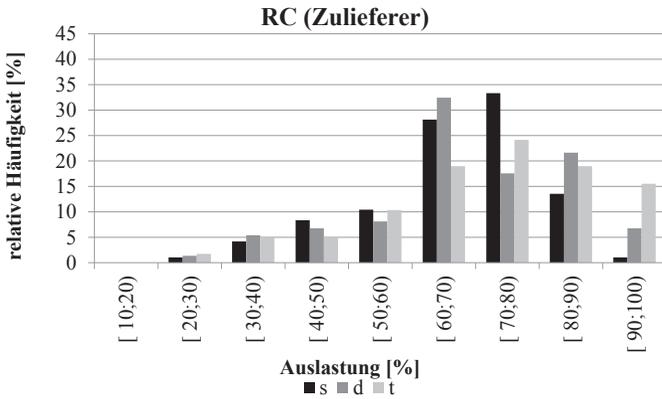


Abbildung B.7.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (RC), Datensatz Zulieferer

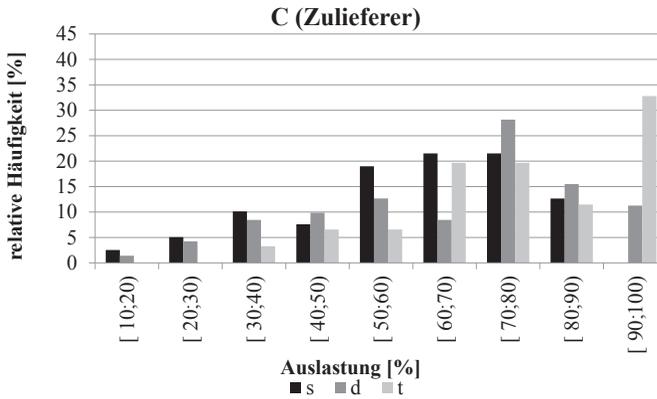


Abbildung B.8.: Häufigkeiten der Fahrzeugauslastung, klassifiziert nach Auslastungsgrad (C), Datensatz Zulieferer

	d	t
R	13,4%	30,0%
C	16,7%	48,6%
RC	8,1%	19,2%

Tabelle B.4.: Anwachsen der Fahrzeugauslastung nach räumlicher Anordnung im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer

C. Änderung der Anzahl zu fahrender Touren

C.1. Änderung beim Datensatz OEM

Kunden	s	d	t
5	3,0	2,9	2,5
10	5,4	4,3	4,0
15	7,2	6,2	5,7
20	8,8	7,7	6,9
25	10,6	9,0	7,8

Tabelle C.1.: Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz OEM

Kunden	d	t
5	5,5%	17,0%
10	19,9%	24,9%
15	14,9%	21,4%
20	12,9%	21,1%
25	15,3%	27,0%

Tabelle C.2.: Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz OEM

C.2. Änderung beim Datensatz Zulieferer

Kunden	s	d	t
5	3,8	3,3	2,7
10	5,6	5,0	4,2
15	7,2	6,4	5,6
20	8,5	7,6	7,2
25	10,3	9,9	8,0

Tabelle C.3.: Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren bei zunehmender Anzahl an Alternativen, Datensatz Zulieferer

Kunden	d	t
5	12,2%	27,7%
10	11,0%	24,4%
15	11,0%	21,9%
20	9,9%	15,6%
25	4,5%	22,5%

Tabelle C.4.: Relativer Rückgang der durchschnittlichen Anzahl zu fahrender Touren im Vergleich zum Referenzszenario, Datensatz Zulieferer

D. Einfluss auf die Besuchshäufigkeit beim Empfänger

D.1. Anzahl der Anfahrten bei den Empfängern am Beispiel des Datensatzes OEM

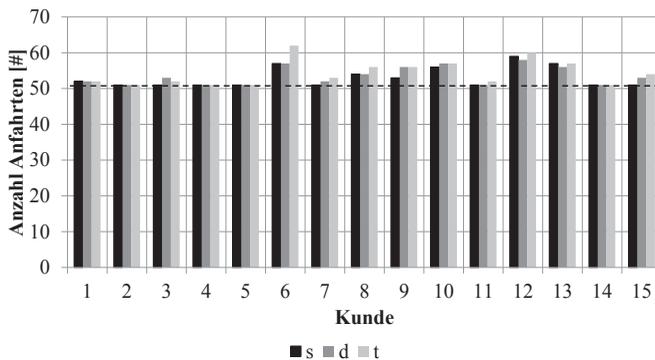


Abbildung D.1.: Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz OEM

D.2. Anzahl der Anfahrten bei den Empfängern am Beispiel des Datensatzes Zulieferer

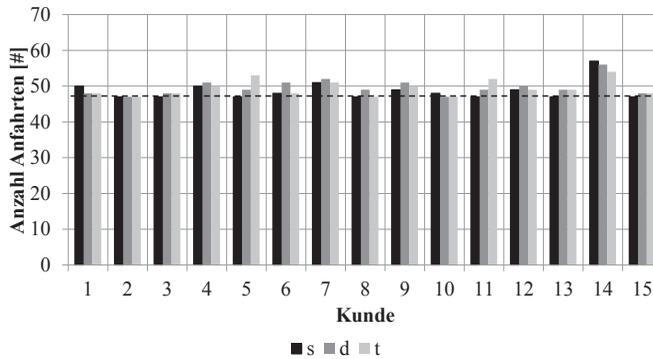


Abbildung D.2.: Entwicklung der Besuchshäufigkeit bei den Empfängern mit zunehmender Anzahl alternativer Perioden, Datensatz Zulieferer

E. Häufigkeit von Teillieferungen

E.1. Anzahl Splits am Beispiel des Datensatzes OEM

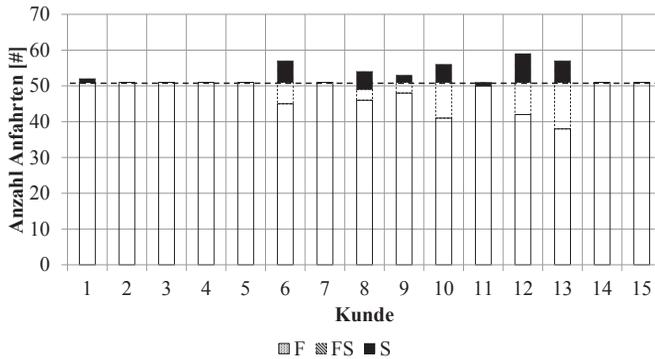


Abbildung E.1.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, eine Lieferperiode je Kunde (s), Datensatz OEM

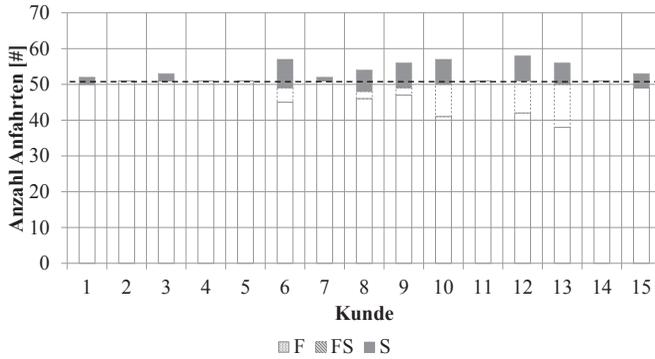


Abbildung E.2.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu zwei Alternativen (d), Datensatz OEM

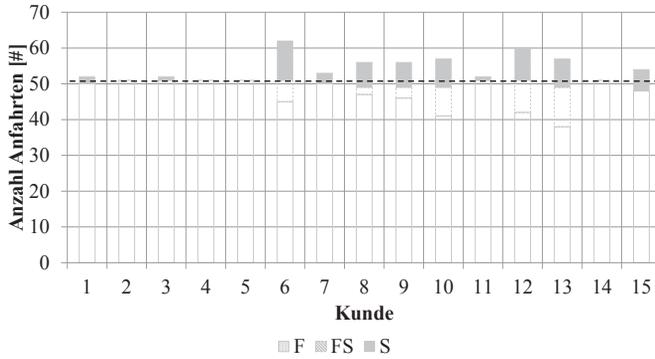


Abbildung E.3.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu drei Alternativen (t), Datensatz OEM

E.2. Anzahl Splits am Beispiel des Datensatzes Zulieferer

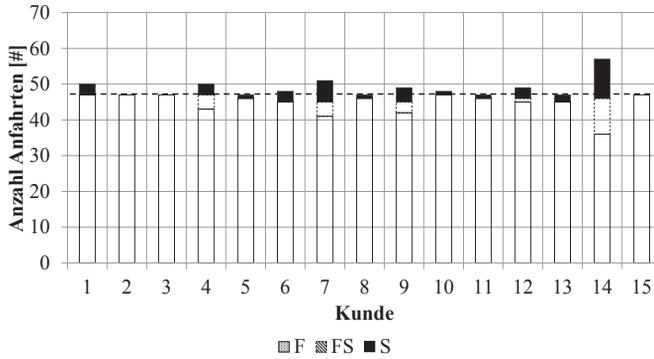


Abbildung E.4.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, eine Lieferperiode je Kunde (s), Datensatz Zulieferer

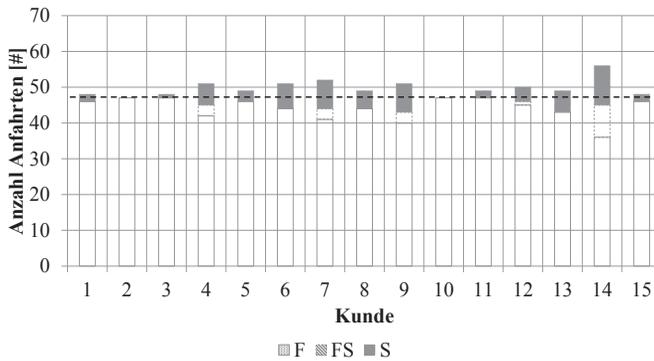


Abbildung E.5.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu zwei Alternativen (d), Datensatz Zulieferer

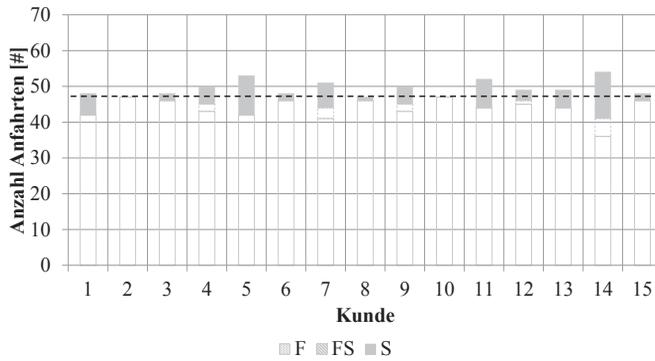


Abbildung E.6.: Aufteilung der Splits auf die Kunden, bis zu drei Alternativen (t), Datensatz Zulieferer

F. Anzahl Stopps je Tour

F.1. Stoppdichte beim Datensatz OEM

Kunden	s	d	t
5	1,6	1,7	2,0
10	2,0	2,5	2,7
15	2,3	2,7	3,0
20	2,6	3,0	3,2
25	2,9	3,2	3,7

Tabelle F.1.: Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz OEM

Kunden	s	d	t
5	4,8	4,9	5,0
10	10,8	10,8	10,8
15	16,6	16,7	17,1
20	22,9	23,1	22,1
25	30,7	28,8	28,9

Tabelle F.2.: Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz OEM

F.2. Stoppdichte beim Datensatz Zulieferer

Kunden	s	d	t
5	1,3	1,5	1,9
10	1,9	2,1	2,5
15	2,3	2,6	2,9
20	2,4	2,7	3,1
25	2,5	3,5	3,4

Tabelle F.3.: Einfluss alternativer Lieferperioden auf die Stoppdichte in Abhängigkeit der Anzahl Kunden, Datensatz Zulieferer

Kunden	s	d	t
5	4,9	5,0	5,1
10	10,6	10,5	10,5
15	16,6	16,6	16,2
20	20,4	20,5	22,3
25	25,8	34,7	27,2

Tabelle F.4.: Absolute Anzahl an Stopps, Datensatz Zulieferer

In dieser Arbeit wird das Vehicle-Routing-Problem mit Teillieferungen und alternativen Lieferperioden (SDVRPA) vorgestellt, gelöst und die Ergebnisse werden evaluiert. Während in der Literatur zu Tourenplanungsproblemen entweder nur Teillieferungen oder alternative Perioden betrachtet werden, wird in dieser Arbeit die Kombination aus beiden Varianten untersucht. Zur Lösung des Problems wird ein Branch-and-Price-Ansatz gewählt, der das Problem in ein Master-Problem und Pricing-Probleme zerlegt. Neue gültige Touren werden mit Hilfe eines Column-Generation-Verfahrens erzeugt. Die Ganzzahligkeit der Lösung wird über Branchingregeln sichergestellt. Zur Lösung der Pricing-Probleme wird ein Labeling-Algorithmus verwendet. Neben der Untersuchung des Einflusses dieses Planungsansatzes auf den Spediteur, wird der Einfluss auf die Empfänger und den Versender untersucht. Werden alternative Lieferperioden und Teillieferungen erlaubt, erhalten Spediteure einen größeren Planungsspielraum und können effizientere Touren planen. Die Fahrzeugauslastung steigt und die Anzahl zu fahrender Touren sinkt bei abnehmender Gesamtentfernung. Der Versender profitiert davon, dass weniger Touren das Depot verlassen. Bereits bei wenigen alternativen Lieferperioden sind hohe Einsparungen möglich. Grund für die Einsparungen ist die bessere Fahrzeugauslastung, die durch die Freiheit des Lieferzeitpunktes erreicht wird.

ISSN 0171-2772

ISBN 978-3-7315-0311-8

ISBN 978-3-7315-0311-8

