

Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW unter Berücksichtigung von Kooperationsmöglichkeiten

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

genehmigte Dissertation

von
Nicolas Rückert

aus
Hamburg

2024

Gutachter:in

1. Gutachterin: Prof. Dr. Kathrin Fischer

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn

Prüfungsausschussvorsitzender: Prof. Dr. Anusch Taraz

Tag der mündlichen Prüfung: 04.03.2024

Creative Commons Lizenzvertrag

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann unter <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de> aufgerufen werden.

DOI: <https://doi.org/10.15480/882.9567>

ORCID-ID des Autors:  <https://orcid.org/0000-0003-4178-7850>

Zusammenfassung

Der in der Vergangenheit weltweit stark gestiegene Containertransport stellt die Akteure in der maritimen Supply Chain hinsichtlich der Leercontainerlogistik vor eine große Herausforderung. Der höchste Kostenanteil entsteht dabei beim Transport im Hafenhinterland. Insbesondere die LKW-Fuhrunternehmen sind einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Fehlende Skaleneffekte, geringe Margen und die Austauschbarkeit der Dienstleistung erfordern neue Lösungen zur Stärkung ihrer wirtschaftlichen Position. Die Wissenschaft diskutiert hier das Konzept der horizontalen Kooperation, bei der die Wettbewerber Kundenaufträge profitmaximierend untereinander austauschen.

Das Ziel einer horizontalen Kooperation besteht neben der Effizienz- und Profitsteigerung für alle Beteiligten vor allem auch darin, diese fair und langfristig stabil zu etablieren. Eine Interviewstudie unter Hamburger Fuhrunternehmen zeigt, dass die Wahrnehmung des Marktes entscheidend ist für die Kooperationsbereitschaft. Solche Fuhrunternehmen, die einer Kooperation proaktiv gegenüberstehen, bevorzugen es, ihre Kundenaufträge nur mit ausgewählten vertrauenswürdigen Wettbewerbern zu teilen. Die wissenschaftliche Literatur untermauert zudem die Notwendigkeit, dass monetärer und nicht-monetärer Nutzen der Kooperation unter den Teilnehmern fair verteilt werden sollte.

Auf Basis des Literature Reviews und der Interviewstudie wird ein mathematisches Modell entwickelt, das anhand von zwei praxisnahen Fallstudien aus dem Hamburger Hafenhinterland evaluiert wird. Dieses leistet einen wesentlichen Forschungsbeitrag, da darin erstmalig die Aspekte Vertrauensgruppen, Kompensationszahlungen und Fairnessmechanismen gleichzeitig berücksichtigt werden.

Die Anwendung des Modells zeigt, dass der Profit mit der Größe der Vertrauensgruppe zunimmt. Eine Profitsteigerung ist bereits ab zwei kooperierenden Fuhrunternehmen, die eine Vertrauensgruppe bilden, der Fall. Zu berücksichtigen ist gleichzeitig, dass eigene Kundenaufträge für eine Weitergabe innerhalb der Vertrauensgruppe zur Verfügung gestellt werden sollten. Eine Auswertung hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs macht deutlich, dass durch die Vermeidung von Leercontainer- und Leerfahrten auch gleichzeitig CO₂-Emissionen reduziert werden. Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass Fairnessmechanismen, die auf Wochenbasis für einen Ausgleich sorgen, eine höhere Profitsteigerung erreichen im Vergleich zu tagesbasierten Fairnessmechanismen. Als grundlegendes Ergebnis ist hervorzuheben, dass eine gleichzeitige Anwendung von profit- und kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen der Zielsetzung einer fairen und langfristig stabilen Kooperation am besten gerecht wird.

Summary

The growth in container transportation worldwide in the past is a major challenge for players in the maritime supply chain regarding empty container logistics. The highest proportion of costs in the maritime supply chain arises from transportation in the port hinterland. Truck carriers are exposed to intense competition. Lack of economies of scale, low margins and service interchangeability require new solutions to strengthen their economic position. Here, in the scientific community the concept of horizontal collaboration is discussed, in which competitors exchange customer orders in a profit-maximizing manner.

The aim of horizontal collaboration is not only to increase efficiency and profit for all parties involved, but also to establish it in a fair and stable manner in the long run. An interview study among truck carriers in Hamburg shows that the perception of the market is decisive for the willingness to collaborate. Those carriers who are proactive towards collaboration, prefer to share their customer orders only with selected trustworthy competitors. Furthermore, the academic literature supports the need for monetary and non-monetary benefits of collaboration to be fairly distributed among participants.

Based on a literature review and an interview study, a mathematical model is developed and evaluated using two real-world case studies from the Hamburg port hinterland. This model makes a significant contribution to research, as it is the first to consider the aspects of trust groups, compensation payments and fairness mechanisms simultaneously.

The application of the model shows that the profit rises with the size of the trust group. This is already the case for two collaborating carriers that form a trust group. It must be considered that own customer orders should be made available for sharing with the trust group. An evaluation regarding fuel consumption shows that avoiding empty container trips and empty trips also reduces CO₂ emissions. The results also show that week-based fairness mechanisms achieve a higher profit increase compared to day-based fairness mechanisms. As a fundamental result it should be emphasized that a simultaneous application of profit- and customer order-based fairness mechanisms meets the aim of achieving a fair and long-term stable collaboration.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
Symbolverzeichnis	x
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Hinterlandtransporte in der maritimen Supply Chain.....	7
2.1 Container und Containertransporte in der maritimen Supply Chain	7
2.2 Leercontainerlogistik im maritimen Transport	9
2.2.1 Ursachen für Leercontainertransporte	10
2.2.2 Akteure in der Leercontainerlogistik	11
2.2.3 Auswirkungen der Leercontainerlogistik	13
2.3 Containerfahrtentypen im Hafenhinterland	15
2.4 Verwandte Aspekte	20
2.4.1 Transportemissionen und Ökologie	20
2.4.2 Unsicherheit	21
2.4.3 Angrenzende Planungsprobleme	22
3 Kooperation.....	25
3.1 Ökonomische Theorien zu Kooperation.....	25
3.2 Kooperationen in der Logistik	28
3.2.1 Voraussetzungen und Chancen	30
3.2.2 Hindernisse und Risiken.....	33
3.3 Behandlung von Logistikkoperationen im Operations Research	35
3.3.1 Aktuelle Literature Reviews	36
3.3.2 Arbeiten zur Quantifizierung der Kooperationsvorteile in der Logistik	38
3.3.3 Aufteilungsmechanismen	39
3.3.4 Ausgewählte relevante Veröffentlichungen.....	41
3.4 Containerfahrtentypen im Hafenhinterland mit Kooperation.....	44

4	Analyse von Operations Research Ansätzen für Kooperation im Hafenhinterland per LKW	51
4.1	Methodik des Literature Reviews.....	51
4.2	Auswertung der Literatur	54
4.2.1	Tabellarischer Literaturüberblick.....	54
4.2.2	Detaillierter Literaturüberblick zu Kooperation im Hafenhinterland mit LKW	58
5	Kooperation in der Praxis	67
5.1	Plattformen zum Austausch in der Logistik.....	67
5.2	Kooperation in der maritimen Logistik	69
5.3	Interviewstudie zu Kooperation in der Containerlogistik im Hafenhinterland	71
5.3.1	Relevanz	71
5.3.2	Methodik	72
5.3.3	Ergebnisse	73
6	Zwischenfazit: Forschungsbedarf für Kooperation im Hafenhinterland.....	75
7	Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation.....	79
7.1	Ausgangssituation und Annahmen	79
7.2	Modellformulierung.....	84
7.2.1	Mengen	84
7.2.2	Parameter	85
7.2.3	Entscheidungsvariablen	92
7.2.4	Zielfunktion.....	94
7.2.5	Nebenbedingungen	94
7.2.6	Berücksichtigung einer ökologischen Zielsetzung	113
7.2.7	Berücksichtigung von zweitägigen Kombinationsfahrten	115
8	Numerische Auswertung.....	123
8.1	Vorstellung der Fallstudien	123
8.1.1	Fallstudie 1	125
8.1.2	Fallstudie 2.....	129
8.1.3	Kraftstoffverbrauch.....	130
8.2	Vorgehen	132
8.2.1	Implementierung	132
8.2.2	A Priori Berechnungen	132

8.3	Analysen zu Fallstudie 1	139
8.3.1	Analyse der Fairnessmechanismen.....	139
8.3.2	Parametervariation des Alpha-Faktors	141
8.3.3	Analyse der Profitverteilung.....	143
8.3.4	Parametervariation des Verhandlungsfaktors	147
8.3.5	Analyse der Kundenauftragsverteilung	148
8.3.6	Analyse der Fahrtentypen	156
8.3.7	Parametervariation der Containerdrehpauschale	160
8.3.8	Zwischenfazit Fallstudie 1	161
8.4	Analysen zu Fallstudie 2	163
8.4.1	Analyse der Fairnessmechanismen.....	163
8.4.2	Parametervariation des Alpha-Faktors	167
8.4.3	Analyse der Profitverteilung.....	167
8.4.4	Analyse der Kundenauftragsverteilung	170
8.4.5	Analyse der Fahrtentypen	176
8.4.6	Parametervariation der Containerdrehpauschale	182
8.4.7	Zwischenfazit Fallstudie 2	182
8.5	Vergleich Fallstudie 1 und Fallstudie 2	184
8.6	Mehrfache Zielsetzung	187
8.6.1	Minimierung der Auftragsweitergabe	187
8.6.2	Minimierung des Verbrauchs.....	189
9	Kritische Diskussion	195
9.1	Modellvergleich	195
9.2	Limitationen und Ausblick.....	196
10	Fazit	203
11	Literaturverzeichnis	207
12	Anhang.....	227
12.1	Suchstrings des Literature Reviews	228
12.2	Beispiel Datensatz Fallstudie 1 Instanz c	231
12.3	Beispiel Datensatz Fallstudie 2 Instanz g	237

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Abbildungen.

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Maritime Supply Chain.....	7
Abbildung 3: Auswahl der Akteure in der Seecontainerlogistik (in Anlehnung an Wolff 2014, S. 46; Schlingmeier 2016, S. 16), dunkelblau: Fuhrunternehmen i.w.S.	13
Abbildung 4: Containerfahrten Importkundenauftrag (blau) und Exportkundenauftrag (grün).....	16
Abbildung 5: Kombinationsfahrten.....	18
Abbildung 6: Kombinationsfahrt mit Containerdrehen.....	19
Abbildung 7: Angrenzende Planungsprobleme.....	22
Abbildung 8: Voraussetzungen von horizontaler Kooperation (in Anlehnung an Cruijssen et al. 2007b)	31
Abbildung 9: Chancen von horizontaler Kooperation (in Anlehnung an Cruijssen et al. 2007b).....	32
Abbildung 10: Hindernisse und Risiken von Kooperation (in Anlehnung an Cruijssen et al. 2007b).....	33
Abbildung 11: Unterschiedliche räumliche bzw. regionale Verteilung der Orte von Kundenaufträgen (entnommen aus Gansterer et al. 2020, S. 529)	42
Abbildung 12: Zwei Einzelfahrten mit identischem Leercontainerdepot	46
Abbildung 13: Zwei Einzelfahrten mit unterschiedlichem Leercontainerdepot.....	46
Abbildung 14: Direkte Kombinationsfahrten.....	48
Abbildung 15: Indirekte Kombinationsfahrten	49
Abbildung 16: Kombinationsfahrten mit Containerdrehen.....	50
Abbildung 17: Forschungsbedarf zur langfristig stabilen horizontalen Kooperation.....	77
Abbildung 18: Zeitfensterschema Einzelfahrt Exportkundenauftrag.....	100
Abbildung 19: Zeitfensterschema Kombinationsfahrten Import-Export.....	105
Abbildung 20: Zeitfensterschema Kombinationsfahrten mit Containerdrehen	106
Abbildung 21: Zeitfensterschema Kombinationsfahrt mit Containerdrehen und Übernachtung.....	122
Abbildung 22: Standorte Fallstudie 1 (Hintergrundkarten maps.google.de)	124
Abbildung 23: Standorte Fallstudie 2 (Hintergrundkarten maps.google.de)	124
Abbildung 24: Vorgehen der A Priori Berechnungen (Eigene Darstellung)	134
Abbildung 25: A Priori Profit Berechnungen.....	135
Abbildung 26: Vergleich PriorProfit (oben) mit RealPriorProfit Total (unten) für Fuhrunternehmen 1 in Fallstudie 2, Instanz b.	137
Abbildung 27: Vergleich der Gesamtprofite von Fallstudie 1.....	140
Abbildung 28: Vergleich der Gesamtprofite mit Alpha-Faktor-Variation von Fallstudie 1.....	142

Abbildung 29: Profitsteigerungsvergleich für Vertrauensgruppen und Fairnessmechanismen von Fallstudie 1	146
Abbildung 30: Auswirkung des Verhandlungsfaktors (VHF) auf den Gesamtprofit.....	147
Abbildung 31: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1 1TG.....	149
Abbildung 32: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1 2TG (oben) und 3TG (unten).....	150
Abbildung 33: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+PIUT 0,5 1TG.....	151
Abbildung 34: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+PIUT 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten).....	151
Abbildung 35: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+ONET 1TG.....	152
Abbildung 36: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+ONET 2TG (oben) und 3TG (unten).....	153
Abbildung 37: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OCT 0,5 1TG	154
Abbildung 38: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OCT 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten).....	154
Abbildung 39: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OMD 0,5 1TG.....	155
Abbildung 40: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OMD 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten).....	156
Abbildung 41: Fahrtentypen Fallstudie 1.....	157
Abbildung 42: Streckenlängenveränderung der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 1	158
Abbildung 43: Streckenlängen der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 1	158
Abbildung 44: Anteil der Streckenlängen für rpP T und PIT1 1TG in Fallstudie 1	159
Abbildung 45: Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten Fallstudie 1	160
Abbildung 46: Fahrtentypen abhängig von der Containerdrehschale Fallstudie 1.....	161
Abbildung 47: Vergleich der Gesamtprofite von Fallstudie 2.....	164
Abbildung 48: Vergleich des Gesamtprofits von Fallstudie 2 E5:I5	166
Abbildung 49: Vergleich des Gesamtprofits von Fallstudie 2 E4:I6	166
Abbildung 50: Vergleich der Gesamtprofite mit Alpha-Faktor-Variation von Fallstudie 2.....	167
Abbildung 51: Profitsteigerungsvergleich für Vertrauensgruppen und Fairnessmechanismen von Fallstudie 2 (unabhängig vom Exportanteil)	169
Abbildung 52: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1 1TG.....	171
Abbildung 53: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1 2TG (oben) und 3TG (unten).....	172
Abbildung 54: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+PIUT 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)	173
Abbildung 55: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+ONET 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)	174
Abbildung 56: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+OCT 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)	175
Abbildung 57: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+OMD 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)	176
Abbildung 58: Fahrtentypen Fallstudie 2.....	178

Abbildung 59: Streckenlängenveränderung der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 2	179
Abbildung 60: Streckenlängen der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 2	179
Abbildung 61: Anteil der Streckenlängen für rpP T und PIT1 1TG in Fallstudie 2	180
Abbildung 62: Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten Fallstudie 2.....	181
Abbildung 63: Fahrtentypen abhängig von der Containerdrehpauschale Fallstudie 2	182
Abbildung 64: Vergleich Fallstudie 1 und 2 Instanzen a-e mit Exportanteil 50 % und niedrigem VHF-Bereich	185
Abbildung 65: Vergleich Fahrtentypen Fallstudie 1 und 2	186
Abbildung 66: Mehrfache Zielsetzung: Entwicklung des Profits bei ansteigendem Alpha bei OCT in Kombination mit PIT 1.....	189
Abbildung 67: Zielraum mit Paretofront zum Verbrauchs- und Profitziel für Fallstudie 1 Instanz j	190
Abbildung 68: Zielraum mit Paretofront zum Verbrauchs- und Profitziel für Fallstudie 2 Instanz g.....	192

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typen bzw. Varianten von Kombinationsfahrten durch Kooperation	47
Tabelle 2: Suchbegriffe des Literature Reviews	53
Tabelle 3: Literaturüberblick	56
Tabelle 4: Typencharakterisierung (in Anlehnung an Reinecke et al. 2023).....	73
Tabelle 5: Übersicht aller Fahrtmöglichkeiten	83
Tabelle 6: Auswirkungen auf Zeitrestriktionen für Kombinationsfahrten.....	101
Tabelle 7: Vertrauensgruppenaufteilung	126
Tabelle 8: Fallstudie 1 Instanzübersicht.....	129
Tabelle 9: Fallstudie 2 Instanzübersicht.....	130
Tabelle 10: Genutzte Verbrauchswerte	131
Tabelle 11: Durchschnittliche Anzahl von Kombinationsfahrten ohne Kooperation.....	136
Tabelle 12: Zwei Kombinationsfahrten bei RealPriorProfit Total für Fuhrunternehmen 1 in Fallstudie 2, Instanz b.	138

Abkürzungsverzeichnis

40HC	40-Fuß HighCube-Container (40HC)
45HC	45-Fuß HighCube-Container (45HC)
CTA	Container Terminal Altenwerder
CTB	Container Terminal Burchardkai
CTT	Container Terminal Tollerort
DSS	Decision Support System; Deutsch: Entscheidungsunterstützungssystem
DSV	De Sammensluttede Vognmænd; Deutsch: Die vereinigten Fuhrmänner (dänisches Transportunternehmen)
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FEU	Forty-Foot Equivalent Unit; Deutsch: 40-Fuß-Standardcontainer
Fu	Fuhrunternehmen
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)
HHLA	Hamburger Hafen und Logistik AG
HVCC	Hamburg Vessel Coordination Center
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, hydriertes Pflanzenöl
HVZ	Hauptverkehrszeit
i.w.S.	im weiteren Sinne
I:E	Import- und Exportkundenauftragsverhältnis
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
ISO	International Organization for Standardization; Deutsch: Internationale Organisation für Normung
ITT	Inter-Terminal Transport
L	Liter Kraftstoffverbrauch
LKW	Lastkraftwagen (Es wird auch im Plural LKW verwendet)
LTL	Less-Than-Truckload; Deutsch: Transporte von Teilladungen, die einen LKW nicht vollständig ausfüllen

MDTSPPD	multi depot travelling salesman problem with Pickup and Delivery
MDVRP	multi depot vehicle routing problem
MDVRPPD	multi depot vehicle routing problem with Pickup and Delivery
NDR	Norddeutscher Rundfunk
NVOCC	non-vessel-operating-common-carrier; Deutsch: Reederei ohne eigenes Schiff
OCT	Order Change Total (Fairnessmechanismus)
OMD	Order Minimum Daily (Fairnessmechanismus)
ONET	Order Number Equality Total (Fairnessmechanismus)
OR	Operations Research
PIDT	Profit Increase Day and Total (Fairnessmechanismus)
PIT	Profit Increase Total (Fairnessmechanismus)
PIUDT	(absolute) Profit Increase Uniformity Day and Total (Fairnessmechanismus)
PIUT	(absolute) Profit Increase Uniformity Total (Fairnessmechanismus)
pP	PriorProfit, siehe pP_r^t
rpP D	RealPriorProfit Day, siehe pPD_r^t
rpP T	RealPriorProfit Total, siehe pPT_r^t
TAS	Truck Appointment System
TEU	Twenty-Foot Equivalent Unit; Deutsch: 20-Fuß-Standardcontainer
TG	Trustgroup; Deutsch: Vertrauensgruppe
TSP	Travelling salesman problem
u.B.v.	unter Bedingung von
VHF	Verhandlungsfaktor
VRP	Vehicle routing problem

Symbolverzeichnis

M: Menge, P: Parameter, EV: Entscheidungsvariable

- α P: Konstanter Faktor für Restriktionen, wird für Analysen variiert.
- $Alliance_n$ P: Allianz der Reederei des zum Kundenauftrag $n \in N$ zugehörigen zu transportierenden Containers.
- $CarLKWNacht_r$ P: Minimal notwendige Ruhezeit bei zweitägiger Fahrt vor dem Startort des zweiten Kundenauftrages, die ein LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ benötigt.
- $CarLKWStd_r$ P: Maximal mögliche Stundenanzahl, die ein LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ an einem Tag fahren kann.
- $CarOwn_n$ P: Fuhrunternehmen, bzw. Kundenauftragseigentümer des Kundenauftrages $n \in N$.
- $CarVG_r$ P: Vertrauensgruppe des Fuhrunternehmens $r \in R$.
- Cc_n P: Kompensationskosten des Kundenauftrages $n \in N$.
- Ce_n P: Verfrühungskosten pro Stunde des Kundenauftrages $n \in N$.
- cd_n P: Knoten des gewünschten Leercontainerdepots des Kundenauftrages $n \in N$, $cd_n \in KCD$.
- Ch_r P: Kostensatz des Fuhrunternehmens $r \in R$ (pro Stunde), ohne distanzabhängige Kosten.
- Ckm_r P: Kostensatz des Fuhrunternehmens $r \in R$ (pro km Distanz), ohne zeitabhängige Kosten.
- Cl_n P: Verspätungskosten pro Stunde des Kundenauftrages $n \in N$.
- $CNacht_r$ P: Kosten für die Übernachtung des LKW-Fahrers, die das ausführende Fuhrunternehmen $r \in R$ bezahlen muss.
- $ComM_r^t$ EV: Kompensationszahlung, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ zahlen muss.
- $ComP_r^t$ EV: Kompensationszahlung, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ erhält.
- Cp P: Pauschale Kosten, die bei einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen anfallen.
- d_n P: Zielort des Kundenauftrages $n \in N$.

D_r^t	<u>EV</u> : Verfrühungs- und Verspätungskosten aufgrund der Verletzung weicher Zeitfenster von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
E	<u>M</u> : Menge an Exportkundaufträgen.
$EarlTardnx_{nr}^t$	<u>EV</u> : Verfrühungs- und Verspätungskosten der Einzelfahrt des Kundauftrages $n \in N$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$EarlTardny_{nmr}^t$	<u>EV</u> : Verfrühungs- und Verspätungskosten der Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t$	<u>EV</u> : Verfrühungs- und Verspätungskosten der Kombinationsfahrt mit Containerdrehen $(n, m) \in PIE$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$EMohne$	<u>P</u> : Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn kein Container transportiert wird.
$EMleer_{Typ_n}$	<u>P</u> : Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn ein leerer Container vom Typ_n des Kundauftrages $n \in N$ transportiert wird.
$EMvoll_{Typ_n}$	<u>P</u> : Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn ein voller Container vom Typ_n des Kundauftrages $n \in N$ transportiert wird.
f_n^t	<u>EV</u> : Ankunftszeit in Stunden am Zielort (vor der Servicezeit am Zielort) des Kundauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$fearly_n^t$	<u>EV</u> : Verfrühung in Stunden des Kundauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort (Unterschreitung des weichen Zeitfensters).
$flate_n^t$	<u>EV</u> : Verspätung in Stunden des Kundauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort (Überschreitung des weichen Zeitfensters).
g_{nm}^t	<u>EV</u> : Ankunftszeit in Stunden am Zielort (vor der Servicezeit am Zielort) des zweiten Kundauftrages $m \in N$ von Kombinationsfahrt aus zwei Kundaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$gearly_{nm}^t$	<u>EV</u> : Verfrühung in Stunden von Kombinationsfahrt aus zwei Kundaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundauftrages $m \in N$ (Unterschreitung des weichen Zeitfensters).
$glate_{nm}^t$	<u>EV</u> : Verspätung in Stunden von Kombinationsfahrt aus zwei Kundaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundauftrages $m \in N$ (Überschreitung des weichen Zeitfensters).
I	<u>M</u> : Menge an Importkundaufträgen (meistens mit Laufvariable $n \in I$).

I_r^t	<u>EV</u> : Kundendeckungsbeitrag von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
K	<u>M</u> : Menge aller Knoten.
KCD	<u>M</u> : Menge der Leercontainerdepots.
ka_r^t	<u>P</u> : Anzahl an Kundenaufträgen, die ein Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ ohne Kooperation und Kombinationsfahrten durchführen würde, d. h., die Anzahl an Kundenaufträgen am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem das Fuhrunternehmen $r \in R$ der Auftragseigentümer ist.
$KErl_n$	<u>P</u> : Erlös eines beliebigen Fuhrunternehmens bei Durchführung von Kundenauftrag $n \in N$.
ld_r	<u>P</u> : Ort des LKW-Depots von Fuhrunternehmen $r \in R$.
M	<u>P</u> : Große Zahl, sie wird zur linearen Schreibweise von Restriktionen benötigt.
$MaxLKW_r^t$	<u>P</u> : Anzahl an LKW, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ zur Verfügung hat.
N	<u>M</u> : Menge an Kundenaufträgen $N = I \cup E$.
Nk_r^t	<u>EV</u> : Übernachtungskosten von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
o_n	<u>P</u> : Startort des Kundenauftrages $n \in N$.
P	<u>M</u> : Menge an allen möglichen Paaren von Kombinationsfahrten aus je einer Import- und Exportfahrt.
PEI	<u>M</u> : Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Exportkundenauftrag beginnen und mit einem Importkundenauftrag enden.
PIE	<u>M</u> : Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Importkundenauftrag beginnen und mit einem Exportkundenauftrag enden.
\widehat{PIE}	<u>M</u> : Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Importkundenauftrag beginnen und mit einem Exportkundenauftrag enden und für die eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen möglich ist, die also denselben Containertyp und dieselbe Allianz haben.
pP_r^t	<u>P</u> : Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
pPD_r^t	<u>P</u> : Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem Kombinationsfahrten möglich sind (RealPriorProfit Day).

pPT_r^t	<u>P</u> : Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem Kombinationsfahrten und die tageweise Verschiebung von Kundenaufträgen möglich sind (RealPriorProfit Total).
R	<u>M</u> : Menge der Fuhrunternehmen.
sh_{ij}	<u>P</u> : Strecke in Stunden zwischen zwei Knoten $i, j \in K$.
skm_{ij}	<u>P</u> : Strecke in km zwischen zwei Knoten $i, j \in K$.
std_n	<u>P</u> : Servicezeit in Stunden zum Abladen des Containers oder Entladen der Güter aus dem Container am Zielort des Kundenauftrages $n \in N$.
stl_i	<u>P</u> : Servicezeit in Stunden zum Auf- oder Abladen eines Containers an einem Leercontainerdepot $i \in KCD$.
sto_n	<u>P</u> : Servicezeit in Stunden zum Aufladen des Containers oder Beladen der Güter in den Container am Startort des Kundenauftrages $n \in N$.
$stWearlyE_n$	<u>P</u> : Beginn des <i>harten</i> Zeitfensters des Zielortes des Kundenauftrages $n \in N$.
$stWearlyS_n$	<u>P</u> : Beginn des <i>harten</i> Zeitfensters des Startortes des Kundenauftrages $n \in N$.
$stWlateE_n$	<u>P</u> : Ende des <i>harten</i> Zeitfensters des Zielortes des Kundenauftrages $n \in N$.
$stWlateS_n$	<u>P</u> : Ende des <i>harten</i> Zeitfensters des Startortes des Kundenauftrages $n \in N$.
T	<u>P</u> : Planungshorizont in Tagen.
$TaglProfit_r^t$	<u>EV</u> : Gesamtprofit des Fuhrunternehmens $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
te_n	<u>P</u> : Frühester Fahrtag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in N$
tg_n	<u>P</u> : Gewünschter Fahrtag des Ausführens des Kundenauftrages $n \in N$.
tl_n	<u>P</u> : Spätester Fahrtag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in N$
$TWearly_n$	<u>P</u> : Beginn des <i>weichen</i> Zeitfensters des Zielortes am gewünschten Fahrtag des Kundenauftrages $n \in N$.
$TWlate_n$	<u>P</u> : Ende des <i>weichen</i> Zeitfensters des Zielortes am gewünschten Fahrtag des Kundenauftrages $n \in N$.
Typ_n	<u>P</u> : Typ des zum Kundenauftrag $n \in N$ zugehörigen zu transportierenden Containers.
$v_{nmr}^t \in \{0,1\}$	<u>EV</u> : 1, wenn eine Kombinationsfahrt mit Übernachtung (mit oder ohne Containerdrehen) aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{0, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird; sonst 0.

$Verbrauch_r$ EV: Kraftstoffverbrauch des Fuhrunternehmens $r \in R$.

w_{nmr}^t EV: Wartezeit eines LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ bei einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ angibt.

Wk_r^t EV: Wartekosten des Fuhrunternehmens $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.

$x_{nr}^t \in \{0,1\}$ EV: 1, wenn der Kundenauftrag $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ als Einzelfahrt durchgeführt wird; sonst 0.

$y_{nmr}^t \in \{0,1\}$ EV: 1, wenn eine Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird; sonst 0.

$\hat{y}_{nmr}^t \in \{0,1\}$ EV: 1, wenn eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in \widehat{PIE}$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird; sonst 0.

$z_n^r \in \{0,1\}$ P: 1, wenn Kundenauftrag $n \in N$ dem Fuhrunternehmen $r \in R$ gehört, d. h., wenn das Fuhrunternehmen $r \in R$ Kundenauftragseigentümer von Kundenauftrag $n \in N$ ist; sonst 0.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Seeschifffahrt bildet die Basis für den weltweiten Handel mit Gütern. Seit ihrer Erfindung im Jahr 1956 werden Container als Ladungsträger in der Seeschifffahrt genutzt, um unterschiedliche Sorten von Waren wie z. B. Elektrogeräte, Lebensmittel und Maschinen zu transportieren (Jähn 2016). Der weltweite Containertransport ist in den vergangenen 10 Jahren um ca. 40 % gewachsen (UNCTAD 2022). Laut Prognosen wird der maritime Containertransport in den nächsten Jahren weiter moderat zunehmen (ebd.). Aus diesem Grund wird eine weitere Steigerung der Anzahl an Containerschiffen und ihrer jeweiligen Größe erwartet. Während im Jahr 2012 das größte Containerschiff eine Kapazität von 16.000 TEU (twenty-foot equivalent unit) aufwies, transportierte in 2022 das größte Containerschiff bis zu 24.000 TEU (Schiff&Hafen 2012, 2022). Die größten Schiffe werden von den Reedereien vor allem auf den nachfragestarken Ost-West Verkehren eingesetzt und laufen damit auch die Häfen der Nordrange wie z. B. Hamburg an (UNCTAD 2022; Johanning 2022).

Der Kostendruck ist in der Logistik und insbesondere im Containertransport hoch (u. a. Reinecke et al. 2023; Gansterer und Hartl 2020; Tran et al. 2017). So konkurrieren Reedereien zunehmend um Größenvorteile und Skaleneffekte. Sie investieren nicht nur in größere Schiffe, sondern kooperieren mit Containerterminals und bilden dabei gleichzeitig Allianzen mit weiteren Reedereien, um ihre Lieferketten zu optimieren (UNCTAD 2022; Frese 2021). Allerdings führt das erhöhte Transportaufkommen zu neuen Herausforderungen in der maritimen Supply Chain. Sowohl Seehäfen mit ihren Containerterminals als auch Fuhrunternehmen im Hafenhinterland werden mit zeitlich ungleichmäßig und erhöht auftretenden Transportaufträgen konfrontiert (Lange et al. 2017).

Die Seecontainerhäfen sind gezwungen, ihre Infrastruktur entsprechend anzupassen. So hat zum Beispiel der Hamburger Hafen eine Fahrrinnenanpassung auf der Unterelbe 2022 abgeschlossen, um größeren Schiffen den Zugang zum Hamburger Hafen zu ermöglichen (Hafen Hamburg Marketing e.V. 2022). Die Anpassungen in den Containerterminals umfassen größere Krane am Kai, größere Containerlager und nicht zuletzt Kapazitätserweiterungen für

den Anschluss am Hinterland per LKW, Zug oder Binnenschiff (Hafen Hamburg Marketing e.V. 2019).

Das Wachstum der Anzahl der zu transportierenden Container ist eng verbunden mit der Frage nach den Transportkosten im Hafenhinterland, denn 40 % bis 80 % der Kosten in der maritimen Logistikkette fallen im Hinterland an, da im Gegensatz zur Seeschifffahrt keine Skaleneffekte genutzt werden können (Notteboom und Rodrigue 2005; Tran et al. 2017). Der LKW ist für den Containertransport vom Seehafen zum Zielort im Hafenhinterland und zurück aufgrund seiner Flexibilität und Schnelligkeit das bevorzugte Transportmittel. Für die LKW-Fuhrunternehmen entsteht Kostendruck nicht nur aufgrund der begrenzten Skaleneffekte, sondern auch durch das hohe Containertransportvolumen, das unmittelbar eine hohe Anzahl an zur Verfügung stehenden und benötigten Leercontainern zur Folge hat (Islam und Olsen 2014). Es kommt zu Leercontainertransporten, wenn Nachfrage und Angebot an Containern global oder lokal ungleich verteilt sind (Wolff 2014, S. 157). Die Leercontainertransporte erzeugen für die Fuhrunternehmen und Spediteure sowie für alle in der Logistikbranche Beteiligten erhöhte Kosten, die es einzudämmen bzw. zu reduzieren gilt (Hüttmann 2013, S. 48 f.); denn ihnen stehen keine Erlöse aus diesen Transporten gegenüber.

Gleichzeitig ist die Logistikbranche aufgrund des Klimawandels gefordert, ihre Emissionen deutlich zu senken. Die aktuelle Regierung plant entsprechend, die LKW-Maut um eine CO₂-Differenzierung zu ergänzen (Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) 2023; SPD, Grüne, FDP 2021). Die Frage bleibt, ob mehr Containertransporte auf die Bahn oder das Binnenschiff verlagert werden können, da insbesondere auf der Kurzstrecke im Hafenhinterland der LKW den anderen Transportmitteln bzgl. Schnelligkeit und Flexibilität überlegen ist.

Vor dem Hintergrund der o. g. Problematik ist es dringend erforderlich, ein nachhaltiges und profitorientiertes Konzept für den Containertransport durch LKW im Hafenhinterland zu entwickeln, das die Effizienz für die Fuhrunternehmen erhöht, Kosten und Emissionen reduziert und zudem die knappe Infrastruktur weniger belastet. In diesem Zusammenhang liegt das Hauptaugenmerk auf der Frage, wie sich Leercontainertransporte und Leerfahrten reduzieren bzw. vollständig vermeiden lassen.

Die Wissenschaft hat sich dieser Frage nach einer effizienteren Leercontainerlogistik bereits angenommen und favorisiert das Konzept der Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen (Islam et al. 2013; Islam et al. 2021; Krajewska et al. 2008; Hüttmann 2013, S. 95, 104). So kann das Teilen und der Austausch von Kundenaufträgen die Leercontainerlogistik effizienter gestalten (Hüttmann 2013, S. 95, 103; Boile 2006). Die Konzeptionierung und Organisation der Kooperation sind dabei die relevanten Aspekte. Dabei geht es um die Frage, wie die Nutzenvorteile der Kooperation zwischen den beteiligten Unternehmen gemessen, bewertet und verteilt werden. Außerdem sind Anreize für die Teilnahme und die langfristige Bindung an die Kooperation zu definieren und zu berücksichtigen. (Guajardo und Rönnqvist 2016, S. 388).

In der wissenschaftlichen Diskussion fehlt bislang eine Antwort auf die Frage, wie langfristig stabile Kooperationen mit den damit verbundenen wirtschaftlichen Folgen im Hafenhinterland zwischen den LKW-Fuhrunternehmen etabliert werden können.

Der Containertransport im Hafenhinterland erfordert eine gesonderte Betrachtung, da er einen weit höheren Standardisierungsgrad als andere Transporte aufweist. Dies führt auf der einen Seite dazu, dass sich die Fuhrunternehmen im Wettbewerb kaum voneinander abgrenzen können, bietet aber auf der anderen Seite eine gute Grundlage für Kooperation, da die Kundenaufträge einfach ausgetauscht werden können (Reinecke et al. 2023).

Die Standardisierung führt jedoch auch dazu, dass die Kunden der Fuhrunternehmen (z. B. Reedereien) eine starke Verhandlungsposition aufgrund geringer Wechselkosten haben und damit starken Druck auf die Fuhrunternehmen ausüben können. Hier kann Kooperation eine Chance für die Fuhrunternehmen sein, um durch Kostensenkung die eigene wirtschaftliche Lage zu verbessern (Caballini et al. 2016).

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der horizontalen Kooperation, d. h. der Kooperation zwischen LKW-Fuhrunternehmen im Hafenhinterland. Hier wird ein hohes Potenzial für Kooperation gesehen (Caballini et al. 2016). Dabei wird die Kooperation durch den zunehmenden Datenaustausch mittels Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) erleichtert, die im Rahmen der Digitalisierung von Häfen alle Akteure der maritimen Supply Chain miteinander verbinden (Saxe et al. 2017, S. 2; Harris et al. 2015).

Beim Blick in die Praxis ist festzustellen, dass Kooperation zwischen Fuhrunternehmen nur vereinzelt stattfindet (Reinecke et al. 2023). Es stellt sich die Frage, welche konkreten Gründe aus Sicht der Fuhrunternehmen gegen eine Kooperation sprechen. Aus diesem Grund werden eine ausführliche Literaturrecherche und eine Interviewstudie durchgeführt. Für die identifizierten Hinderungsgründe werden Lösungen entwickelt und in einem mathematischen Modell in Form von unterschiedlichen Nebenbedingungsgruppen berücksichtigt. Einzelne Nebenbedingungsgruppen werden im Rahmen der Analyse aktiviert oder deaktiviert, um den Einfluss bestimmter Aspekte, die bspw. die Fairness einer Kooperation steigern sollen, zu untersuchen.

Die Arbeit fokussiert sich bei der Untersuchung konkreter Fallstudien auf den Hamburger Hafen und das Hamburger Hinterland. Der Hamburger Hafen ist der drittgrößte Containerhafen in Europa (Notteboom 2023). Die Containerterminals des Hafens befinden sich innerhalb der Stadt, sodass der Transport von Containern auf der Straße durch den allgemeinen Verkehr einer Großstadt beeinflusst wird. Aufgrund einer begrenzten Straßenverkehrsinfrastruktur, die gemeinsam mit dem privaten Individualverkehr genutzt wird, entstehen Verzögerungen im Containertransport. Angesichts dieser Situation sind Effizienzsteigerungen, wie sie durch Kooperation erreicht werden können, von besonderer Relevanz.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Modell für die **Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW** zu entwickeln, anzuwenden und zu evaluieren. Das Modell soll eine **faire und langfristig stabile horizontale Kooperation** ermöglichen sowie den **Nutzen und die Vorteile der Kooperation unter realistischen und praxisnahen Aspekten quantifizieren**.

Die Arbeit ist in die vier übergeordneten Abschnitte Theorie, Analyse, Entwicklung sowie Anwendung und Bewertung gegliedert (vgl. Abbildung 1).

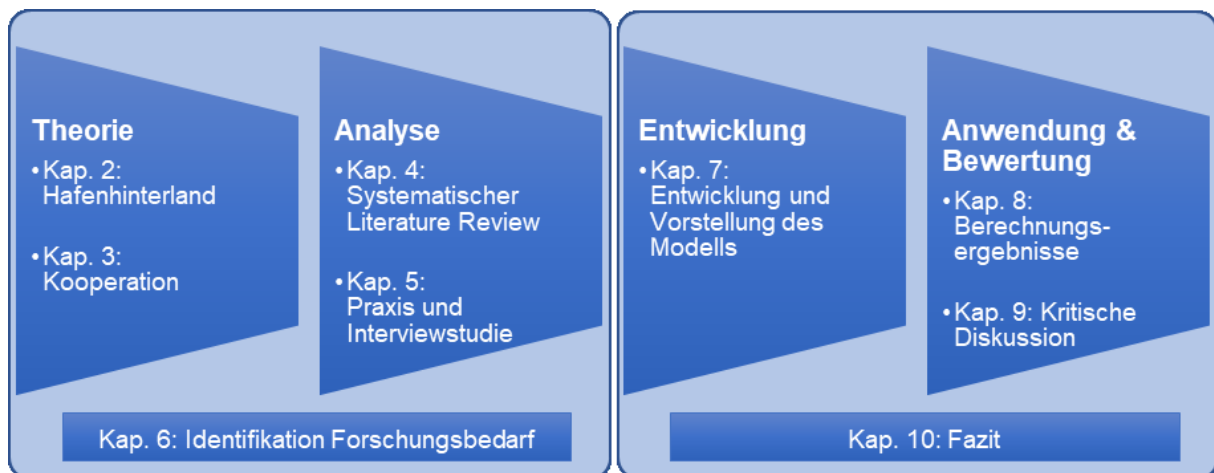


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Die Kapitel 2 und 3 bilden den **Theorie**-Abschnitt. In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen der Arbeit bzgl. der maritimen Supply Chain im Hafenhinterland und insbesondere die Leercontainerlogistik erläutert. In Kapitel 3 wird anschließend das Konzept der Kooperationen im Allgemeinen sowie im Speziellen in der Logistik dargestellt. Hierfür werden sowohl ökonomische Theorien kurz vorgestellt als auch grundsätzliche Vorteile und logistikspezifische Effekte im Hinblick auf die Leercontainerlogistik erläutert. Zudem werden Veröffentlichungen zu mathematischen Modellen im Themengebiet der Kooperation allgemein, d. h. ohne Bezug zum Hafenhinterland, diskutiert.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit folgt die **Analyse**. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse des systematischen Literature Reviews bzgl. der Thematik Kooperation im Hafenhinterland vorgestellt, um den aktuellen Stand der Forschung zu diskutieren. Im anschließenden Kapitel 5 wird auf die Kooperationspraxis in der maritimen Logistik eingegangen, bevor die Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie mit Managern und Entscheidungsträgern von Fuhrunternehmen und Spediteuren, die im Hafenhinterland aktiv sind, erörtert werden. Ziel der Interviews ist es, die Hintergründe der aktuellen Marktsituation zu identifizieren und realistische Perspektiven für zukünftige Kooperationen abzuleiten, um diese in das Modell einfließen zu lassen. Anhand der Analyse aus Literatur und Praxis wird der Forschungsbedarf in Kapitel 6 detailliert identifiziert.

Im dritten Abschnitt der Arbeit, in Kapitel 7, steht die **Entwicklung** des mathematischen Modells im Zentrum. Auf der Grundlage der Vorstellung der konkreten Ausgangssituation, werden Zielfunktion und Nebenbedingungsgruppen ausführlich erläutert. Dabei werden auch Erweiterungen des Grundmodells vorgestellt.

Anschließend folgt im vierten Abschnitt die **Anwendung** dieses Modells (Kapitel 8). Die Datengrundlage zur Generierung der Instanzen wird thematisiert und der Einfluss der Fairnessmechanismen und der weiteren Faktoren analysiert. Ebenfalls werden die Ergebnisse der Berechnung bezüglich der Quantifizierung der Vorteile von Kooperation dargestellt. Das Kapitel 9 widmet sich der kritischen Analyse der Ergebnisse, die die Überleitung zu den zukünftigen Forschungsperspektiven bildet.

Das Fazit in Kapitel 10, das die Erkenntnisse der Untersuchung zusammenfasst, rundet diese Arbeit ab.

2 Hinterlandtransporte in der maritimen Supply Chain

Dieses Kapitel bildet die theoretische Grundlage für das Thema Hinterlandtransporte und geht im Besonderen auf die Leercontainerlogistik ein.

2.1 Container und Containertransporte in der maritimen Supply Chain

Die maritime Supply Chain gliedert sich in den Vorlauf, den Hauptlauf und den Nachlauf (vgl. Abbildung 2). Der Vorlauf beschreibt den Transport vom Verloader hin zum Seehafen. Der Hauptlauf beschreibt den Transport von Gütern auf dem eigentlichen Seetransport. Der Nachlauf beschreibt den Transport weg vom Seehafen hin zum Empfänger. Der Transport der Güter im Vorlauf und Nachlauf kann per LKW, Eisenbahn oder auch Binnenschiff erfolgen (vgl. Abbildung 2) (Schönknecht 2009, S. 1; Jahn 2010, S. 1; Pawlik 1999) und findet im sog. Hinterland von Seehafenterminals statt (Notteboom und Rodrigue 2005).

Das Hafenhinterland (oder auch nur Hinterland) bezeichnet den Raum, in dem nach bzw. vor dem Seeschifftransport Güter transportiert werden, d. h., dass Hinterlandtransporte an einem Seehafenterminal beginnen oder enden. Alle Güter, die per Seeschiff transportiert werden, werden vor und nach dem eigentlichen Seeschifftransport im Hinterland transportiert (u.a. Schönknecht 2009, S. 1).

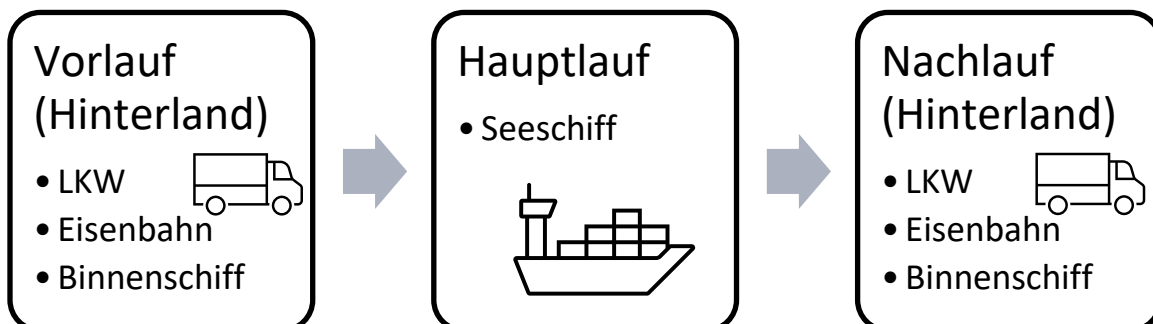


Abbildung 2: Maritime Supply Chain

Die Gütertypen im internationalen maritimem Handel können in Flüssiggut (wie Öl und Ölprodukte, Gas und chemische Erzeugnisse), Schüttgut (wie Kohle, Erze, Getreide), konventionell verpacktes Stückgut (z. B. Fahrzeuge) und Container unterschieden werden (United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) 2021, S. 8; Statistisches Bundesamt 2021). Seit der Einführung des Containers ist die Containerschifffahrt stark angewachsen und macht mittlerweile mehr als die Hälfte der Stückguttransporte aus (Notteboom und Rodrigue 2009; Rowbotham 2014, S. 9 f.). Daher liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den Containertransporten.

Der Container ist, vereinfacht formuliert, eine nach einer ISO-Norm standardisierte Metallbox, in der Güter für einen Transport geladen werden können. Gemäß den Normen der Internationalen Organisation für Standardisierung (engl. International Organization for Standardization, ISO) ist ein Frachtcontainer ein Transportequipment, das (1) für den dauerhaften wiederholten Einsatz konzipiert ist, (2) zum Befördern von Gütern auf verschiedenen Verkehrsträgern ohne Umladung des Gutes designt ist, (3) mit Vorrichtungen für eine leicht handhabbare Umladung zwischen den Verkehrsträgern ausgestattet ist, (4) leicht zu be- und entladen ist und (5) mindestens ein Füllvolumen von einem Kubikmeter umfasst. Die Befestigung des Containers erfolgt an dessen Ecken mittels sog. Twistlocks. (ISO 830:1999; ISO 668:2020; Verband der Chemischen Industrie e.V. 2021)

Über die Jahre haben sich aus dem standardisierten Frachtcontainer unterschiedliche Containerausführungen entwickelt. Zu den populärsten Containerausführungen gehören der Standard Zwanzig-Fuß-Container (TEU, 20' DC), der Standard Vierzig-Fuß-Container (FEU, 40' DC), der Vierzig-Fuß HighCube Container (40' HC), der Fünfundvierzig-Fuß HighCube Container (45' HC), Kühlcontainer unterschiedlicher Größe, OpenTop (Container ohne Deckel), sowie Tankcontainer (Hapag-Lloyd AG 2022a; Frese 2022; Kuehne + Nagel Management AG 2022).

Der Container wird als Ladungsträger in allen drei Teilen der maritimen Supply Chain genutzt (vgl. Abbildung 2). Daher kann in Bezug auf den Container auch von einer intermodalen Lieferkette gesprochen werden, d. h., der Container wechselt den Verkehrsträger. Der Vorteil beim Umschlag der Container zwischen den einzelnen Verkehrsträgern ist, dass die Ladung im Container verbleibt und nur der Ladungsträger Container bewegt werden muss. So sind die Umschlageinheiten standardisiert. Durch diesen speziellen Vorteil des Containers ist ein schneller und effizienter Umschlag möglich, der zu kurzen Liegezeiten der Schiffe und im Vergleich zu konventionell verpacktem Stückgut zu geringeren Kosten führt. Durch die vielseitige Einsetzbarkeit des Containers dominiert der Container das Transportaufkommen in den Seehäfen. (Rowbotham 2014, S. 21 f.; Branch und Robarts 2014, S. 346 f.; Schönknecht 2009, S. 1 f.)

Im Hauptlauf der maritimen Supply Chain werden immer größere Seecontainerschiffe eingesetzt, um Skaleneffekte auszuschöpfen. Durch den Einsatz größerer Seeschiffe konnten in der Vergangenheit die Kosten pro transportiertem Container um ungefähr ein Drittel reduziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig weitere Transportkostenreduzierungen durch größere Schiffe marginal sind und im Gegenzug die

Folgekosten für die Infrastrukturanpassungen in den Häfen steigen werden. Darüber hinaus wachsen durch größere Schiffe die Bestandskosten für die Container. Insgesamt können durch höhere Infrastruktur- und Bestandskosten die durch die Skaleneffekte bei den Seeschiffen entstandenen Kostenreduktionen aufgehoben werden. Diese Thematik wirft die Frage auf, inwieweit sich noch größere Schiffe überhaupt lohnen würden. (Tran et al. 2017, S. 689; Merk et al. 2015, S. 9–10)

Weitere Kostenreduktionen sind somit im Hauptlauf kaum noch zu erreichen, daher liegt das Potenzial für weitere Kosteneinsparungen im Hinterland bzw. Vor- und Nachlauf, da es das größte Potenzial für Kosteneinsparungen bietet (Hüttmann 2013, S. 134, 324–328). Entsprechend liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem Vor- und Nachlauf der maritimen Supply Chain.

Der Transport von Containern im Vor- und Nachlauf per LKW ist bei Strecken von weniger als 300 km im Hinterland üblich, da der LKW hier die größtmögliche Flexibilität bietet und sich der Transport per Binnenschiff und Eisenbahn inkl. des Umschlags bzw. Wechsels des Verkehrsträgers erst ab größeren Distanzen lohnt (Aberle 2009, S. 251). Für LKW bestehen jedoch gesetzliche und praktische Gewichts- und Längenbegrenzungen. Um den Vor- und Nachlauf bei größer werdenden Seeschiffen durchführen zu können, können LKW ausschließlich in ihrer Anzahl zunehmen (Schönknecht 2009, S. 4; Notteboom und Rodrigue 2009, S. 21; Langen et al. 2013, S. 368). Dies führt jedoch zu einer erhöhten Belastung der begrenzten Straßeninfrastruktur. Hinzu kommt, dass durch die Nutzung weniger großer anstelle mehrerer kleiner Schiffe die Auslastung im Terminal und damit auch im Hinterland stark schwankt, sodass dauerhaft viel Kapazität und Infrastruktur für die Nachfragespitzen bereitgestellt werden muss (Lange et al. 2017). Die Begrenzung der Straßeninfrastruktur auf der einen Seite und die Notwendigkeit, Kapazität, z. B. in Form von Personal oder LKW, vorzuhalten, belasten die Akteure im Hafenhinterland und stehen möglichen Kostenreduktionen entgegen.

2.2 Leercontainerlogistik im maritimen Transport

Eine weitere Herausforderung für den LKW-Verkehr im Vor- und Nachlauf ist der Transport von Leercontainern, weil dadurch Fahrten entstehen, die nur mit Kosten, aber nicht mit Erlösen verbunden sind. Für den Vorlauf ist es notwendig, dass der Verloader einen leeren Container an seinem Beladeort zur Verfügung hat, den er beladen kann. Nach dem Nachlauf wird der Container entladen und steht wieder als Leercontainer zur Verfügung. Wenn an dem Ort, an dem ein voller Container entladen wird, anschließend genau ein leerer Container dieses Containertyps zum Beladen mit Gütern benötigt würde, wäre kein Leercontainertransport nötig (Olivo et al. 2005). Dieser Fall tritt allerdings nur sehr selten ein. Somit stellt die Leercontainerlogistik eine wesentliche Herausforderung für die gesamte maritime Supply Chain dar.

2.2.1 Ursachen für Leercontainertransporte

Die Ursachen für die hohe Belastung durch Leercontainertransporte bzw. Leercontainerfahrten in der maritimen Supply Chain sind vielfältig.

Der Hauptgrund sind **Handelsungleichgewichte**. So werden nicht an allen Orten weltweit die gleichen Mengen an bestimmten Containern für die Beladung mit Gütern benötigt. Wenn an einem Ort viele Leercontainer anfallen und ein Überschuss entsteht und an einem anderen Ort eine Nachfrage nach Leercontainern für die Beladung besteht, ist es notwendig, dass diese Leercontainer zum Nachfrageort transportiert werden. Diese Ungleichgewichte treten auf globaler, regionaler und lokaler Ebene auf. Auf globaler Ebene werden z. B. viele Leercontainer in Fernost/China benötigt, um sie mit Produkten für den Transport nach Europa zu beladen (Wolff 2014, S. 157). Die regionale Ebene beinhaltet das Ungleichgewicht bzw. die nötige Repositionierung zwischen dem Hafenhinterland und dem Seehafenterminal. Die lokale Ebene bezeichnet die Repositionierung innerhalb des Hafengebietes zwischen den Terminals und den Leercontainerdepots (Theofanis und Boile 2009, S. 58). Die Ungleichgewichte können auch saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt sein, z. B. zu Weihnachten und zum chinesischen Neujahrsfest (Song und Carter 2009, S. 294).

Ungleichgewichte können auf bestimmten Relationen auch nur für einzelne Containertypen, z. B. Kühlcontainer, bestehen (Konings und Thijs 2001). Damit die Kühlcontainer auch in der Gegenrichtung benutzt werden und nicht als Leercontainer transportiert werden müssen, bietet z. B. die Reederei Hapag-Lloyd ihren Kunden „non-operated reefer“ an, d. h., das Kühlaggregat der Kühlcontainer ist ausgeschaltet, aber andere Vorteile der Kühlcontainer, wie ein besonders geschützter Laderaum, bleiben bestehen (Hapag-Lloyd AG 2022b).

Auch der Eigentümer des Containers bzw. die Aufschrift des Containers können von Bedeutung sein und für ein Ungleichgewicht sorgen. Wenn ein Verloader für einen Auftrag mit Reederei A einen Leercontainer benötigt, kann ein vorhandener Leercontainer von Reederei B z. B. aus Wettbewerbsgründen (Firmenlogo auf Container) nicht genutzt werden (Notteboom und Rodrigue 2009; Hüttmann 2013, S. 132). So entstehen unternehmensspezifische Ungleichgewichte (Olivo et al. 2003; Olivo et al. 2005). Container unterscheiden sich folglich hinsichtlich des Typs und des Eigentümers. Entsprechend sind nur die Leercontainer austauschbar, die denselben Typ und denselben Eigentümer haben. (Lei und Church 2011, S. 739)

Die Handelsungleichgewichte werden durch einen unzureichenden Informationsaustausch zwischen den Unternehmen verschärft. So sind Informationen zu Standorten mit Überschuss oder Mangel von Leercontainern nicht für alle Unternehmen zugänglich (Islam et al. 2013; Song und Carter 2009). Hinzu kommt, dass die Transportzeiten von Containern in der Seeschifffahrt unsicher sind, da Fahrpläne selten eingehalten werden können (Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) 2022). Beides zusammen erschwert eine passgenaue Planung von Containertransporten im Hafenhinterland.

Die räumlichen/geographischen, zeitlichen/saisonalen und containerspezifischen Ursachen für Ungleichgewichte erfordern den Leercontainertransport bzw. die Leercontainer-

repositionierung. Das Ziel der Leercontainerrepositionierung ist es, die Leercontainer möglichst kostengünstig und effizient umzuverteilen, sodass der Kundenbedarf nach den spezifischen Leercontainern am richtigen Ort zur richtigen Zeit gedeckt wird (Song und Dong 2015, S. 172; Hüttmann 2013, S. 46). Für einen bestmöglichen Transportplan, der sowohl die Vollcontainertransporte als auch die Leercontainertransporte berücksichtigt, um die Praxis möglichst realitätsnah abzubilden, ist eine Optimierung der Transporte sinnvoll (u.a. Song und Dong 2015, Theofanis und Boile 2009, Song und Carter 2009, S. 294, Olivo et al. 2005).

2.2.2 Akteure in der Leercontainerlogistik

In der maritimen Supply Chain existieren viele Akteure, die miteinander interagieren und voneinander abhängig sind. Alle Akteure in der Containerlogistik sind zwangsläufig auch in der Leercontainerlogistik tätig und werden im Folgenden vorgestellt. Da unternehmensspezifische Ungleichgewichte als Ursache für Leercontainerlogistik wesentlich sind (vgl. Kap. 2.2.1), kommt dem **Eigentümer** des Containers als Akteur eine besondere Bedeutung zu.

Die **Eigentümer** von Containern sind meistens die Reedereien oder sog. **Containerleasingunternehmen**. Die Containerleasingunternehmen vermieten die Container meistens an die Reedereien, sodass die Reedereien selbst eine höhere Flexibilität haben, um auf Nachfrage zu reagieren (Theofanis und Boile 2009, S. 54). Auch wenn die Container den Leasingunternehmen gehören, werden diese meist von den Reedereien betrieben und mit deren Logo versehen (Hüttmann 2013, S. 22).

Die **Fuhrunternehmen** im weiteren Sinne bzw. Verfrachter (engl. Carrier) transportieren mit eigenem Equipment die Container. Zu diesen zählen sowohl die Reedereien, non-vessel-operating-common-carrier (NVOCC) als auch die Binnenschiffsreedereien, Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und die klassischen LKW-Fuhrunternehmen (Hüttmann 2013, S. 26–28).

Die wesentlichen Fuhrunternehmen sind die **Reedereien**. Sie transportieren den leeren oder vollen Container im Hauptlauf mit dem Schiff auf dem Seeweg (Hüttmann 2013, S. 22). Eine wichtige Unterscheidung bei einem Containertransport ist die Frage bzgl. der Zuständigkeit für den Vor- und Nachlauf. Wenn die Reederei neben dem Hauptlauf auch für den Vor- und Nachlauf zuständig ist, spricht man von *Carriers Haulage*. Wenn ein Spediteur oder der Versender dafür zuständig ist, spricht man von *Merchant Haulage*. Diese Zuständigkeit wirkt sich auch auf die Bereitstellung von Leercontainern aus. So sind bei Carriers Haulage meistens die Reedereien dafür zuständig, die notwendigen Leercontainer für den Transport einer Ware bereitzustellen (Wolff 2014, S. 49; Veenstra 2005, S. 66; Li et al. 2014b; freightcourse 2022).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf **LKW-Fuhrunternehmen**, die hier als Fuhrunternehmen im engeren Sinne gelten. Sie transportieren die Container ausschließlich im Vor- und Nachlauf auf der Straße. Das beinhaltet meist neben den Vollcontainerfahrten auch die notwendigen Leercontainerfahrten (Hüttmann 2013, S. 27). Sie können differenziert werden nach Unternehmen, die im nahen Hinterland und im Hafengebiet Container transportieren (engl. Drayage) und solchen Unternehmen, die größere Strecken im Hinterland zurücklegen (Lange

et al. 2017; Braekers et al. 2014). Die möglichen Arten von Fahrten werden in Kapitel 2.3 vorgestellt.

Weitere Akteure sind der Befrachter/**Verlader** (engl. Shipper) und der **Empfänger** (engl. Consignee). Beim Verlader, z. B. Hersteller eines Guts, startet der Containertransport. Aus diesem Grund muss ein Leercontainer zum Verlader transportiert werden. Beim Empfänger endet der Containertransport und der Leercontainer muss zu einem Leercontainerdepot gefahren werden. Der Verlader muss nicht zwingend der Eigentümer der Ware sein, sondern kann auch vom Eigentümer mit der Verladung beauftragt worden sein (Schlingmeier 2016, S. 17; Wolff 2014, S. 46).

An den **Terminals** im Hafen oder auch im Hinterland findet der Umschlag der Container zwischen den Verkehrsträgern statt. In der Nähe der Terminals können außerdem Container gelagert werden. In Terminals werden vor allem Vollcontainer gelagert, die auf den Weitertransport warten. Die Lager für die Leercontainer befinden sich meist in räumlicher Nähe zu den Terminals; ein Lager in den Terminals selbst ist meist aufgrund der Platzknappheit zu teuer (Rodrigue und Notteboom 2012; Di Francesco et al. 2009, S. 758; Hüttmann 2013, S. 23).

Die **Leercontainerdepots** werden nicht nur für die Lagerung der Leercontainer, sondern auch für Reparaturen dieser genutzt (Iannone et al. 2007). Die Leercontainerdepots können im Terminal, im Hafengebiet, aber auch außerhalb des Hafens im Hafenhinterland liegen. Der Standort der Depots hat dabei einen großen Einfluss auf die Repositionierungsdistanzen der Leercontainer (Schlingmeier 2016, S. 33; Theofanis und Boile 2009; Hüttmann 2013, S. 24).

Darüber hinaus gibt es weitere Akteure, wie z. B. Seefrachtspediteure. **Spediteure** müssen nicht zwingend eigenes Equipment besitzen, ihre Dienstleistung besteht in der Organisation und Planung der Logistik (Hüttmann 2013, S. 26; Wolff 2014, S. 49–50). Zudem gehören auch Hafenverwaltungen zu den Akteuren der maritimen Supply Chain, die aber einen geringen Einfluss auf die Leercontainerlogistik haben (Wolff 2014, S. 54–56).

Die einzelnen Akteure sind nicht trennscharf abzugrenzen; z. B. kann ein Spediteur auch ein LKW-Fuhrunternehmen beinhalten (Boile 2006). Außerdem besteht der Trend zur vertikalen Integration der maritimen Supply Chain durch die Reedereien, d. h., dass die Reedereien verstärkt im Terminal und im Hinterland aktiv sind und bestehende Unternehmen übernehmen. Insbesondere beteiligen sich Reedereien an Containerterminals, die sie dann gerne bevorzugt nutzen (sog. dedicated terminals); z. B. besitzt die Reederei Maersk mit den APM Terminals mehrere Tiefseeterminals und die Reederei Cosco Shipping hat im Jahr 2023 eine Minderheitsbeteiligung am Containerterminal Tollerort (CTT) in Hamburg erworben (Notteboom und Rodrigue 2005; Lorenz 2021; NDR 2023).

Die folgende Abbildung 3 gibt einen Überblick über die oben vorgestellten Akteure in der Containerlogistik.



Abbildung 3: Auswahl der Akteure in der Seecontainerlogistik (in Anlehnung an Wolff 2014, S. 46; Schlingmeier 2016, S. 16), dunkelblau: Fuhrunternehmen i.w.S.

Für eine effiziente Leercontainerrepositionierung innerhalb der Containerlogistik müssen die möglicherweise in Konflikt stehenden Interessen der einzelnen Akteure berücksichtigt werden (Boile 2006).

2.2.3 Auswirkungen der Leercontainerlogistik

Die Auswirkungen der Leercontainerlogistik auf die maritime Supply Chain sind vielfältig. Insgesamt wird geschätzt, dass circa 20 % aller Container, die in Seehäfen umgeschlagen bzw. in der Seeschifffahrt transportiert werden, Leercontainer sind. Im Hamburger Hafen waren im Jahr 2021 von den 8,7 Mio. Containern, die umgeschlagen wurden, ca. 1 Mio. Leercontainer; das entspricht einem Anteil von 11,5 % (Ulken 2022a). Im Hafenhinterland ist der Anteil noch höher. Es wird geschätzt, dass der Anteil an Leercontainertransporten im Hinterland bei ungefähr 40 % liegt (Shintani et al. 2010, S. 750; Konings 2005, S. 224; Hüttmann 2013, S. 48). Für das Jahr 2022 erwarteten die Analysten der Beratung Drewry Maritime Research einen Leercontaineranteil von circa 25 % bei Transporten mit dem Seeschiff (Drewry Maritime Research 2020).

Analysten schätzten im Jahr 2011, dass mehr als 30 Milliarden US-Dollar Kosten durch die weltweite Leercontainerrepositionierung entstanden. Das entspricht 19 % der gesamten Erlöse der maritimen Logistikbranche (Drewry Maritime Research 2012 zitiert nach Wolff 2014, S. 159). Ein weiterer Artikel aus dem Jahr 2008 geht von 20 bis 25 % Kostenbeitrag durch die Leercontainerrepositionierung bei den Reedereien aus (Brito und Konings 2008). Diese Kosten werden hauptsächlich von den Reedereien und Fuhrunternehmen getragen (Hüttmann 2013, S. 48 f.). Im Hinblick auf die Reedereien wurde 2005 ermittelt, dass die Kosten der Leercontainerrepositionierung mit 27 % zu den insgesamt entstehenden operativen Kosten beitragen (Song et al. 2005, S. 15).

Den Auslastungsgrad bzgl. des Verkehrsaufkommens der Beförderungsleistung in Tonnenkilometern (tkm) im Containerverkehr **im Hinterland** in Deutschland schätzte das

Krafftahrtbundesamt für das Jahr 2021 auf 42 % (Krafftahrt-Bundesamt (KBA) 2022). Zwar lassen sich aus dieser Zahl nicht unmittelbar die Leercontainerkilometer abschätzen, da das Gewicht mitberücksichtigt wird; die Zahl macht aber deutlich, dass noch Effizienzpotenzial vorhanden ist.

Im Vergleich zur Seeschifffahrt sind die Kosten für Transporte pro km im Hinterland grundsätzlich höher, da wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, die Skaleneffekte geringer sind und die Infrastruktur stärker begrenzt ist. So wird geschätzt, dass zwischen 40 und 80 % der Kosten der maritimen Supply Chain durch die Transporte im Hafenhinterland entstehen (Notteboom und Rodrigue 2005; Tran et al. 2017). Die begrenzte Infrastruktur führt im Hinterland im Straßenverkehr zu Staus und Verzögerungen, die auch durch den hohen Anteil an Leercontainertransporten begründet sind (Langen et al. 2013, S. 368; van der Horst und Langen 2008, S. 109). 2004 wurde geschätzt, dass zwischen 25 und 40 % der Kosten im intermodalen Transport (inkl. kontinentaler Verbindungen) durch die vergleichsweise kurzen Transporte per LKW im Vor- und Nachlauf entstehen (Macharis und Bontekoning 2004, S. 404).

Durch den Transport und Umschlag von Leercontainern entstehen den Unternehmen somit hohe Kosten. Durch den Flächenverbrauch für die Lagerung von Leercontainern entstehen zusätzlich indirekte Kosten, die nicht unmittelbar dem Transport zugeordnet werden sollten, sondern separat berechnet werden können (Rodrigue und Notteboom 2012; Braekers et al. 2013, S. 458; Erera et al. 2009). Bei jedem Containertransport entstehen darüber hinaus auch klimaschädliche Emissionen und Feinstaub. In den Hafenstädten sorgen Leercontainerfahrten zusätzlich für Lärmbelastung und Stau auf der Straßeninfrastruktur (Islam et al. 2013; Schulte et al. 2017; Tran et al. 2017; Hüttmann 2013, S. 52; Le Hanh 2003; Schlingmeier 2016, S. 19).

Aufgrund der dargestellten Herausforderungen in der Leercontainerlogistik, wie die der Ungleichgewichte, der Vielzahl an Akteuren und der hohen Kosten, wird die Leercontainerlogistik bzw. -repositionierung als *“one of the most complex problems concerning global freight distribution”* (Notteboom und Rodrigue 2008, S. 168) und in der Folge als *“key logistical challenge”* (Notteboom und Rodrigue 2008, S. 172) bzw. als *„Achillesferse der Schifffahrtsindustrie“* bezeichnet (Hüttmann 2014, S. 1).

Es bestehen unterschiedliche Lösungsansätze zur Reduzierung, Vermeidung bzw. Kostensenkung der Leercontainertransporte. Schlingmeier (2016) unterscheidet hierbei vier Kategorien:

1. Unternehmensinterne Reduzierung der Kosten je Leercontainertransport, z. B. durch optimierte Verteilung der eigenen Container auf verschiedene Leercontainerlager oder das Falten von Leercontainern (s. hierzu auch: Konings 2005; Moon et al. 2013).
2. Unternehmensinterne Vermeidung von Leercontainertransporten, wie z. B. durch eine gezielte Ladungsauswahl, die auch die sog. Triangulation ermöglichen kann (s. Kap. 2.3) oder die Nutzung alternativer Containertypen (s. o. g. Beispiel zur Nutzung von Kühlcontainern).

3. Kooperation zur Reduzierung der Kosten je Leercontainertransport, wie z. B. ein Austausch von Slots.
4. Kooperation zur Vermeidung bzw. Reduzierung der Anzahl der Leercontainertransporte, wie z. B. ein Austausch von Containern (Schlingmeier 2016, S. 25 f.).

Kooperation wird von vielen Autoren in der Wissenschaft als Chance und Strategie für eine effizientere Leercontainerlogistik gesehen (Islam et al. 2013; Islam et al. 2021; Krajewska et al. 2008; Hüttmann 2013, S. 95, 104). Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den Möglichkeiten und Potenzialen von Kooperation zur Vermeidung von Leercontainertransporten und somit zur Effizienzsteigerung. Auf Kooperationen allgemein und insbesondere auf die Vorteile von Kooperation wird in Kapitel 3.2.1 ausführlich eingegangen.

2.3 Containerfahrtentypen im Hafenhinterland

Fuhrunternehmen erhalten von anderen Akteuren der maritimen Supply Chain Kundenaufträge, um Container zu transportieren. Sowohl die Zuordnung dieser Kundenaufträge zum verfügbaren Equipment, wie z. B. LKW, als auch die Fahrtroutenbestimmung der LKW zählen zu dem in der vorliegenden Arbeit betrachteten Planungsproblem, das es zu optimieren gilt (s. weitere Informationen in Kapitel 7.1).

Bevor der Frage nachgegangen wird, welchen Beitrag Kooperation zur Lösung des Planungsproblems und zur Reduzierung der Leercontainertransporte leisten kann (in Kapitel 3.4), sollen die Containerfahrten im Hafenhinterland an einem Beispiel veranschaulicht werden. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Containerfahrten, die in Abbildung 4 dargestellt sind: Die Importfahrt auf Basis eines Importkundenauftrages und die Exportfahrt auf Basis eines Exportkundenauftrages. Die Importfahrt entspricht somit dem Nachlauf, d. h. vom Seehafen zum Empfänger im Hinterland. Die Exportfahrt entspricht in der maritimen Supply Chain dem Vorlauf, d. h. dem Transport, der vor dem Hauptlauf mit dem Seeschiff erfolgt.

Containerfahrten: Import und Export

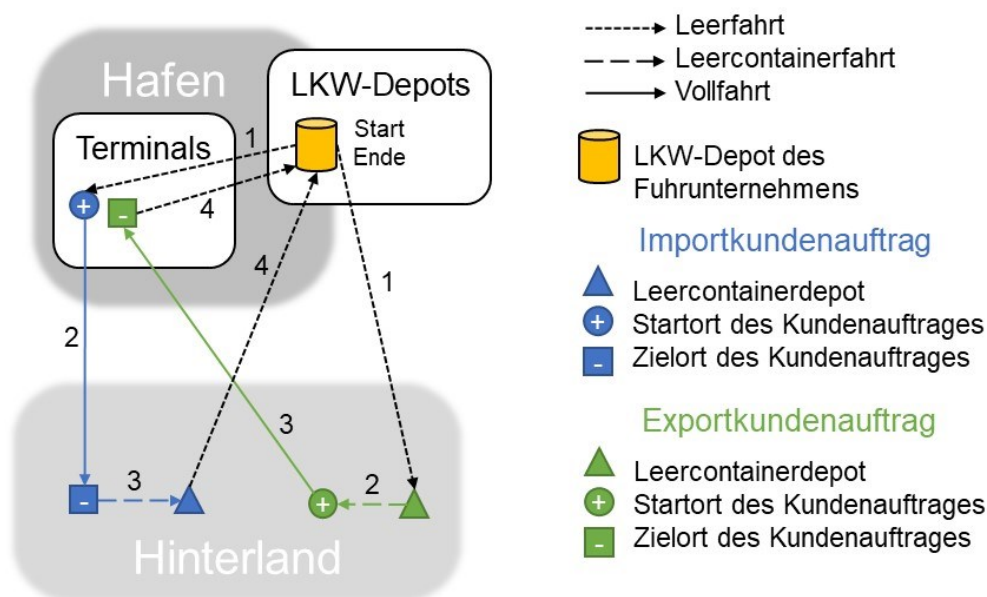


Abbildung 4: Containerfahrten Importkundauftrag (blau) und Exportkundauftrag (grün)

Bei der Importfahrt, bzw. der Ausführung eines Importkundauftrages, ist es das Ziel, von einem Containerterminal im Hafen einen vollgeladenen Container, der mit einem Seeschiff importiert wurde, ins Hinterland zu transportieren (Nachlauf). Für ein Fuhrunternehmen ergeben sich daraus im Regelfall folgende Fahrten (vgl. Abbildung 4 blau): Ein LKW verlässt leer das LKW-Depot des Fuhrunternehmens und fährt zu dem Containerterminal (1). Dort nimmt der LKW den vollen Container auf und fährt mit diesem zum Empfänger ins Hafenhinterland (2). Diese Fahrt wird in der Literatur u. a. „Inbound-Full“ genannt (Zhang et al. 2010). Dort wird die Ware, die importiert wurde, aus dem Container entladen. Dann fährt der LKW mit dem leeren Container zu einem Leercontainerdepot und gibt den Leercontainer dort ab (3). Abschließend fährt der LKW von dort wieder zurück zum LKW-Depot (4).

Bei der Exportfahrt, bzw. der Ausführung eines Exportkundauftrages, ist es das Ziel, einen vollgeladenen Container aus dem Hinterland zum Containerterminal im Hafen zu fahren (Vorlauf), um diesen von dort via Seeschiff zu *exportieren*. Für ein Fuhrunternehmen ergeben sich daraus im Regelfall folgende Fahrten (in Abbildung 4 grün): Ein LKW verlässt leer das LKW-Depot des Fuhrunternehmens und fährt zu einem Leercontainerdepot (1). Dort nimmt der LKW einen Leercontainer auf und fährt mit diesem zum Versender ins Hafenhinterland (2). Dort wird der Leercontainer mit der Ware, die zu exportieren ist, beladen. Dann fährt der LKW mit dem vollen Container zum Containerterminal im Hafen und lädt diesen dort ab (3). Diese Fahrt wird in der Literatur u. a. „Outbound-Full“ genannt (Zhang et al. 2010). Abschließend fährt der LKW unbeladen wieder zurück zum LKW-Depot (4).

Es ist selbstverständlich auch möglich, dass das (bevorzugte) Leercontainerdepot in Hafennähe oder sogar im Hafengebiet liegt, und nicht im Hafenhinterland. In diesem Fall würden sich nur die Längen der Kanten verändern, die Routen blieben gleich. Aus diesem Grund wird dieser Fall hier nicht extra betrachtet.

Bei den Fahrten besteht der LKW aus einer Sattelzugmaschine mit Fahrerhaus und einem angehängten Containerchassis. Auf dem Containerchassis wird der Container transportiert und mit sog. Twistlocks am Containerchassis befestigt.

Für den Empfänger oder Verloader werden zum Laden oder Entladen des Containers meistens 2 Stunden kostenlos vom LKW-Fuhrunternehmen gewährt bzw. diese sind im Transportpreis inklusive. Wird diese kostenlose Zeit überschritten, erheben die LKW-Fuhrunternehmen Gebühren zwischen 30 und 50 € je angefangene halbe Stunde (OTC global GmbH 2022; CTD Container-Transport-Dienst GmbH 2021; Ancotrans GmbH 2022).

Es besteht die theoretische Möglichkeit, dass vor dem und für den Ladevorgang des Containers der Container vom Chassis gehoben werden kann und dann der LKW diesen Startort eines Exportkundenauftrages für eine andere Fahrt verlässt. Ein anderer LKW könnte dann nach erfolgter Beladung des Containers zum Startort fahren, den Container auf ein Chassis laden und dann mit dem vollgeladenen Container weiterfahren (Islam et al. 2021; Macharis und Bontekoning 2004). So würden sich zwei LKW den Kundenauftrag teilen. Gleiche Überlegungen bzgl. des Absetzens eines Containers und der Teilung der zugehörigen Fahrten auf zwei LKW bestehen auch für das Entladen beim Empfänger eines Importkundenauftrages im Hinterland. Für beide Fälle ist jedoch Equipment zum Hochheben eines vollgeladenen Containers nötig (Funke und Kopfer 2016), also z. B. ein Reachstacker, Gabelstapler oder Mobilkran. Dieses Equipment ist in der Praxis in der Regel jedoch meist nicht an den Hinterlandstandorten vorhanden und die Benutzung dieses Equipments würde auch Mehrkosten sowie zusätzlichen Zeitaufwand verursachen, die vermieden werden sollten. Auch eine Abkopplung der Zugmaschine vom Chassis während einer Be- oder Entladung eines Seecontainers und eine Nutzung der Zugmaschine währenddessen für andere Tätigkeiten ist in der Praxis nicht verbreitet. (OTC global GmbH 2022; Elbtainer Trading GmbH 2022; iCON Container Service GmbH 2022)

Im Übrigen wird die Komplexität des zu formulierenden mathematischen Modells durch eine dann zwingend notwendige Differenzierung zwischen dem LKW (Sattelzugmaschine und Chassis) und dem Container auf dem Chassis deutlich erhöht (Funke und Kopfer 2016; Schönberger et al. 2013). Aus diesen Gründen liegt der vorliegenden Arbeit die Annahme zugrunde, dass der LKW (mit Zugmaschine und Chassis) immer auf das Be- bzw. Entladen des Containers beim Versender bzw. Empfänger wartet.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, mehr als einen Container pro Chassis zu transportieren (Lai et al. 2013). Das ist allerdings in der Realität nur möglich, wenn kleinere Container transportiert werden, also z. B. zwei TEU (Caballini et al. 2015; Daham et al. 2017; Funke und Kopfer 2016; Ghezelsouf et al. 2018). Ein Transport von zwei 40-Fuß Containern ist nicht möglich und wird in der Literatur auch nicht betrachtet. Außerdem muss bei double container loads der Versender bzw. Empfänger das Equipment haben, um den Container vom Chassis ab- bzw. aufzuladen, um das Be- oder Entladen des ersten TEU nach der Zugmaschine zu ermöglichen. Hinzu kommt, dass die deutliche Mehrheit von 68 % der Container, die im Hamburger Hafen umgeschlagen werden, 40-Fuß Container oder größer

sind (Ulken 2022b). Daher wird das Thema der double container loads aufgrund der geringen Relevanz für die Praxis hier ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Abbildung 4 zeigt, dass die Länge und Anzahl der Leerfahrten und Leercontainerfahrten in diesem Beispiel größer ist als die Länge und Anzahl der erlösbringenden Vollfahrten. Bereits ohne Kooperation gibt es Möglichkeiten, die Länge nicht erlösbringender Fahrten zu reduzieren (vgl. Abbildung 5). Eine Möglichkeit ist eine sog. Kombinationsfahrt (engl. round trip), bei der die o. g. Einzelfahrten zu einer Fahrt kombiniert werden. Es sind zwei Kombinationsarten möglich: Im Anschluss an eine Importfahrt kann eine Exportfahrt vorgenommen werden oder umgekehrt kann im Anschluss an eine Exportfahrt eine Importfahrt durchgeführt werden. Wie die Abbildung 5 zeigt, ist die Länge der Leerfahrten bei der linken Kombinationsfahrt (Import→Export) kürzer als bei der rechten Kombinationsfahrt (Export→Import). Dies ist genau dann der Fall, wenn sich das LKW-Depot in der Nähe des Hafens und des Containerterminals befindet. In der Praxis ist dies auch meist der Fall (z. B. CTD Container-Transport-Dienst GmbH 2022).

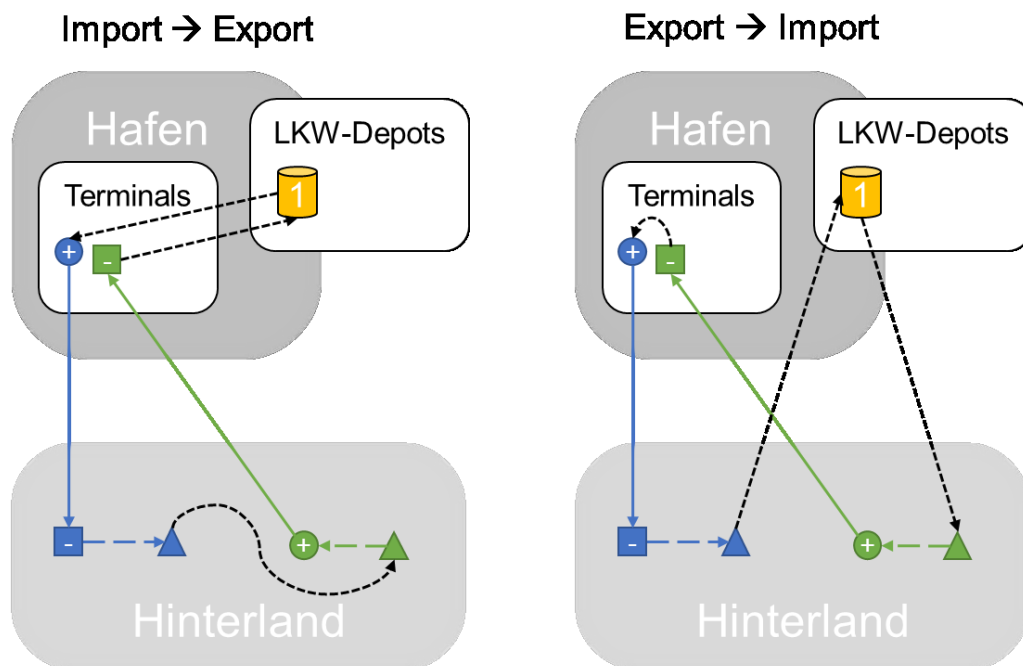


Abbildung 5: Kombinationsfahrten

Eine weitere Möglichkeit, die Anzahl und die Länge an Leerfahrten und Leercontainerfahrten zu reduzieren, ist das sog. Containerdrehen bzw. die sog. Triangulation (vgl. Abbildung 6). Das Containerdrehen beschreibt eine Kombinationsfahrt von einer Import- und einer anschließenden Exportfahrt, bei der der Leercontainer nach der Importfahrt direkt weiter für die Exportfahrt genutzt wird. Es wird also kein Leercontainerdepot angefahren, sondern der LKW fährt mit dem Leercontainer im Hinterland vom Zielort der Importfahrt zum Startort der Exportfahrt. Dieses Konzept wird in der Literatur häufig betrachtet und wird im Englischen *street-turn* genannt. (Funke und Kopfer 2016, S. 73; Hüttmann 2013, S. 97; Wolff 2014, S. 220–221)

Für das Containerdrehen bestehen jedoch folgende Voraussetzungen: Der freiwerdende Container muss die gleichen Spezifikationen bzw. den gleichen Typ haben wie der benötigte Container und der Containereigentümer muss mit der direkten Weiternutzung einverstanden sein. Es ist z. B. auch erforderlich, dass der Container auf Schäden geprüft wird und die Transportsicherheit garantiert werden kann (Wolff 2014, S. 220–221). Es müssen Informationen über den Standort und den Status des Containers vorhanden sein (Hüttmann 2013, S. 97). Aus diesem Grund ist der Anteil von street-turns an den Containertransporten in der Praxis eher gering. Nach Wolff wird der Anteil von street-turns im Hamburger Hinterland auf Basis von Interviews mit 5 bis 10 % beziffert (Wolff 2014, S. 220). Das Containerdrehen ist nicht für eine Kombinationsfahrt von Export- und anschließender Importfahrt möglich.

Insgesamt sind zur Ausführung von Kundenaufträgen also drei Fahrtentypen möglich, nämlich Einfahrten, Kombinationsfahrten und Kombinationsfahrten mit Containerdrehen.

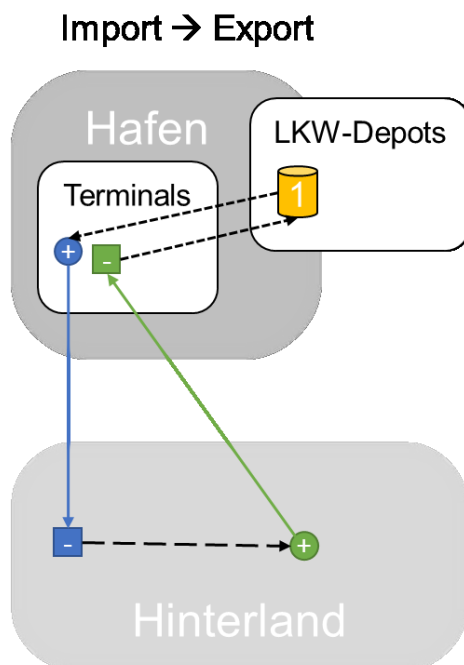


Abbildung 6: Kombinationsfahrt mit Containerdrehen

Grundsätzlich ist es denkbar, dass ein LKW seine Fahrt nicht am Depot beginnt oder beendet, sondern sich an einem anderen geografischen Standort für eine längere Zeit aufhält. Bei mehrtägigen Fahrten über eine lange Strecke sind z. B. Übernachtungen auf Rasthöfen möglich. Das später vorgestellte Modell (s. Kapitel 7.2) berücksichtigt mit Fallstudie 1 ausschließlich kurze Export- und Importfahrten ohne Übernachtungsmöglichkeit. Eine Erweiterung des Modells, die eine Übernachtung ermöglicht, wird in Kapitel 7.2.7 vorgestellt und mit Fallstudie 2 in Kapitel 8.4 angewendet und analysiert. Mehr als eine Übernachtung in einer Fahrt wird nicht berücksichtigt, da diese im geografisch nahen Hafenhinterland nicht notwendig ist.

2.4 Verwandte Aspekte

Im folgenden Kapitel werden verwandte Aspekte, die in Verbindung mit den Hinterlandtransporten in der maritimen Supply Chain stehen, dargestellt und eingeordnet.

2.4.1 Transportemissionen und Ökologie

In der Regel verfolgt die Logistik, und damit auch der Transport im Hinterland, ökonomischen Zielsetzungen, wie z. B. Kostensenkung, Effizienz- und Gewinnsteigerungen (u.a. Lam und Gu 2013; Aloui et al. 2021). Vor dem Hintergrund der Klimakrise und – global betrachtet – immer noch steigenden Emissionen steigt jedoch das Umweltbewusstsein bei Geschäftskunden und Endverbrauchern. Diese wünschen sich auch in der Logistik Emissionsreduktion, um das Klima zu schützen (Hüttmann 2013, S. 133; Aloui et al. 2021).

Diese ökologische Perspektive ist neben der ökonomischen und der sozialen eine von drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Aloui et al. 2021; Santos et al. 2020). Auch die Teilnahme an einer Kooperation kann nicht nur die ökonomische Effizienz steigern (s. Kapitel 3.2.1), sondern kann zudem ein Mittel sein, um ökologische Ziele zu erreichen (Aloui et al. 2021; Gansterer et al. 2020; Hacardiaux et al. 2021; Schulte et al. 2017). Die ökologischen Zielsetzungen werden am häufigsten mit dem Ziel der Minimierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen in mathematischen Modellen des OR umgesetzt (Aloui et al. 2021). Hier besteht die Herausforderung, die Emissionen in der Logistik korrekt zu berechnen, z. B. in Abhängigkeit vom Fahrverhalten und der Verkehrssituation (Aloui et al. 2021). Aus diesem Grund werden häufig die Emissionen abgeschätzt auf Basis der Distanz in gefahrenen Kilometern oder auf Basis des Kraftstoffverbrauches, der neben der Distanz auch von der Beladung des Fahrzeuges abhängen kann. In den mathematischen Modellen können entweder ausschließlich ökonomische oder ökologische Zielsetzungen oder mehrfache Zielsetzungen, d. h. eine Kombination und gemeinsame Analyse von ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen, verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Emissionen mit einem theoretischen oder durch einen Zertifikathandel realistischen Preis zu versehen, der für den Ausstoß zu bezahlen ist, sodass die Minimierung der Emissionen ebenfalls in Geldeinheiten gemessen werden kann (Aloui et al. 2021; Schulte et al. 2017; Erdoğdu und Karabulut 2022).

Im Bereich der maritimen Supply Chain mit Containern befassen sich mehrere Veröffentlichungen mit diesem Thema. Tran et al. (2017) beschäftigen sich zum Beispiel mit der Optimierung von Containerflüssen auf der See- und Landseite. Sie entwickeln ein Modell, welches die Kosten, inkl. der Kosten für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid, minimiert (Tran et al. 2017). Lam und Gu (2016) fokussieren sich auf die taktische Planung von intermodalen Containerflüssen. Bei ihrem Modell werden die Kosten und Fahrzeiten minimiert, dabei sind die Emissionen durch eine Restriktion beschränkt und dürfen einen bestimmten Wert nicht überschreiten (Lam und Gu 2016). Schulte et al. (2017) beschäftigen sich mit den Truck Appointment Systemen an Containerterminals. Unter Berücksichtigung einer begrenzten Auswahl an Zeitfenstern am Terminal werden die LKW-Fahrten optimiert, sodass der Profit

maximiert wird. Die Autoren nutzen einen Preis für die entstandenen Emissionen, um insgesamt den Profit zu maximieren (Schulte et al. 2017).

Weiterführende Informationen zu diesem Thema finden sich in den Veröffentlichungen von Lam und Gu (2013), Demir et al. (2014), Santos et al. (2020), Moghdani et al. (2021) und Aloui et al. (2021).

2.4.2 Unsicherheit

Ein weiterer Aspekt, der in der Logistik von Bedeutung ist, ist die Unsicherheit in der Planung und Durchführung von Transporten. Klassische Planungsprobleme gehen davon aus, dass z. B. die Fahrzeit für eine Strecke oder die Kundennachfrage deterministisch ist. Das heißt, die Informationen über die Fahrzeit oder Kundennachfrage sind vor der Planung bekannt und ändern sich nicht. In der Realität ist dies selten der Fall. Meist sind z. B. die Anzahl von Kundenanfragen und die Modalitäten, wie der gewünschte Abfahrtszeitpunkt von Kundenanfragen, unsicher und können sich ändern.

Ferner werden Fahrzeiten durch Staus und Baustellen unsicher und können sich auf bestimmten Strecken auch innerhalb eines Tages (z. B. zwischen Hauptverkehrszeit und nachts) deutlich unterscheiden (Dekker et al. 2013). Fuhrunternehmen, die sich auf den Verkehr im Hafengebiet fokussieren, sind – da die Häfen meist in der Nähe oder innerhalb von Städten liegen – besonders von unsicheren Fahrzeiten betroffen. Hier untersuchen z. B. Escuerdo et al. (2013), wie man beim Containertransport Echtzeitdaten von Positionssystemen (GPS) einsetzen kann, um dieser Unsicherheit zu begegnen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Einsparungen bei den Betriebskosten von durchschnittlich 5 % bei Nutzung dieser Daten möglich sind (Escudero et al. 2013).

Mit dem Thema der Unsicherheit in Bezug auf die Kundennachfrage befassen sich u. a. Wong et al. (2015). Sie entwickeln für die globale Leercontainerrepositionierung per Seeschiff ein mathematisches Modell. Das Modell kann unsichere Nachfragesteigerungen von Leercontainern an Häfen berücksichtigen. Tritt eine nicht erwartete Nachfragesteigerung ein, kann das Modell den Wechsel des Zielortes eines Leercontainers noch während seines Seetransportes veranlassen, um das Angebot an Leercontainern an eben diesem Hafen zu erhöhen (Wong et al. 2015).

Unsicherheit in der maritimen Supply Chain betrifft auch die sog. Liegeplatzplanung, z. B., wenn es aufgrund schlechter Wetterverhältnisse oder technischer Störungen zur verspäteten Ankunft von Containerschiffen an Terminals kommt (siehe z.B. Kolley et al. 2021; Ksciuk et al. 2023; Kolley et al. 2023; Böse 2020, S. 139). Dies wirkt sich wiederum auf die Zeitplanung der Hinterlandtransporte per LKW aus.

In Kapitel 4.2 werden im Rahmen des strukturierten Literature Reviews drei weitere Arbeiten, die Unsicherheit in der Kundennachfrage oder bei den Fahrzeiten und Kooperation im Hafenhinterland per LKW berücksichtigen, identifiziert und näher erläutert.

2.4.3 Angrenzende Planungsprobleme

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit der Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW auseinander. Einige andere Planungsprobleme stehen damit im Zusammenhang (vgl. Abbildung 7) und werden der Vollständigkeit halber im Folgenden kurz dargestellt. Für zukünftige Forschung können sich interessante Kombinationen mit der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Fragestellung ergeben.

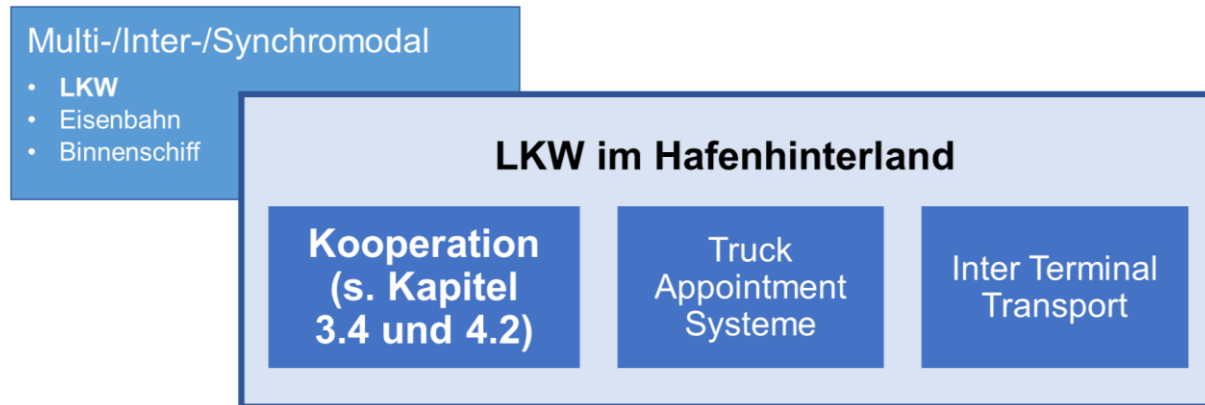


Abbildung 7: Angrenzende Planungsprobleme

Während die o. g. Liegeplatzplanung das Planungsproblem der Ankunft von Schiffen auf der Seeseite an dem Containerterminal behandelt, werden unter dem Begriff **Truck Appointment Systems (TAS)** die Planungsprobleme auf der Landseite betrachtet, die die Ankunft von LKW planen und steuern. Durch immer größer werdende Containerschiffe, die schnell be- und entladen werden sollen, schwankt die Auslastung im Containerterminal stark. Dies führt auch dazu, dass der LKW-Verkehr an den Toren (engl. Gates) zum Containerterminal schwankt, sodass bei einer hohen Auslastung die LKW vermehrt warten müssen und unnötige (Personal-)Kosten und Emissionen verursachen. Um Verzögerungen zu vermeiden, müssen sich die LKW-Fahrer bei einem TAS ein Zeitfenster zur Anfahrt an das Containerterminal buchen. Diese Zeitfenster stehen abhängig von der Tageszeit in begrenztem Maße zur Verfügung. So wird auch zu Spitzenlastzeiten der LKW-Verkehr gesteuert. Lange et al. stellen in einem Literature Review aus dem Jahr 2017 fest, dass in Publikationen zu dem Thema TAS der Fokus entweder auf den Containerterminals oder auf den Fuhrunternehmen liegt; eine Kombination oder gar eine Kooperation von beiden Akteuren findet selten statt (Lange et al. 2017). Drei Veröffentlichungen aus diesem Themenfeld werden hier exemplarisch näher vorgestellt.

Torjazi et al. (2018) entwickeln ein mathematisches Modell, das die Containerterminalbetreiber und die LKW-Fuhrunternehmen im Rahmen eines TAS berücksichtigen kann. Dabei wird auf das Interesse der Containerterminalbetreiber geachtet, die LKW-Ankünfte gleichmäßig über den Tag zu verteilen. Ebenso wird das Interesse der LKW-Fuhrunternehmen berücksichtigt, die Abweichungen vom ursprünglichen Fahrplan so gering wie möglich zu halten. So berücksichtigt dieses Modell beide Seiten. Die Autoren zeigen, dass unter Berücksichtigung von LKW-Fahrplänen im TAS, die Kosten für die LKW-Fuhrunternehmen sinken können, da z. B. die Anzahl an benötigten LKW verringert werden kann. Die Autoren weisen darauf hin,

dass die Kosten allerdings auch von dem Verhältnis von Import- und Exportkundenaufträgen abhängen und es für den Praxiseinsatz notwendig wäre, dass die Containerterminalbetreiber und LKW Fuhrunternehmen Informationen über die Kundenaufträge austauschen; dies erfolgt jedoch bisher nicht. (Torkjazi et al. 2018)

Schulte et al. (2017) befassen sich mit der Kooperation zwischen mehreren LKW-Fuhrunternehmen mit Fokus auf TAS, um Leerfahrten zum oder vom Containerterminal zu reduzieren. Hierfür entwickeln die Autoren ein mathematisches Modell, welches, wie in Kapitel 2.4.1 bereits beschrieben, auch Emissionskosten berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Kooperation von Fuhrunternehmen beim TAS der Gewinn gesteigert und die Emissionen reduziert werden können. Dabei korrelieren die Emissionen nicht direkt mit dem Gewinn, da angenommen wird, dass durch die Verletzung von sog. weichen Zeitfenstern zwar Kosten, aber keine Emissionen entstehen. (Schulte et al. 2017)

Caballini et al. (2018) entwickeln ein mathematisches Modell für TAS, mit dem die Zuordnung der LKW zu den verfügbaren Zeitfenstern, ferner ein festgelegtes Servicelevel für die Fuhrunternehmen und außerdem die gleichmäßige Nutzung der Infrastruktur im Containerterminal berücksichtigt werden kann. Das bedeutet, dass bei der Be- und Entladung von Schiffen die Anzahl an verfügbaren Slots für die LKW reduziert wird, um die Ressourcen nicht übermäßig zu nutzen und damit Staus innerhalb des Containerterminals zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kapazität des Terminals und die Anfahrtshäufigkeiten der LKW die möglichen Staus am meisten beeinflussen. (Caballini et al. 2018)

Ein weiteres Planungsproblem, das unmittelbar mit den Hinterlandtransporten und mit TAS in Verbindung steht, ist der **Inter-Terminal Transport (ITT)**. Hiermit sind alle Transporte gemeint, die zwischen Terminals innerhalb eines Hafengebietes stattfinden. Der Übergang zum engl. Begriff „Drayage“ ist dabei fließend und dieser wird teilweise synonym verwendet (Heilig et al. 2017). Neben den Containerterminals und Leercontainerdepots, die zwingend bei allen Kundenaufträgen angefahren werden müssen, gibt es weitere Orte im Hafengebiet zu denen bzw. von denen Containertransporte erfolgen. Hierzu zählen z. B. Reparaturstationen für Container, administrative Einrichtungen wie der Zoll oder andere spezielle Terminals und Lagerhäuser. Heilig et al. (2017) entwickeln hierfür u. a. ein mathematisches Modell und geeignete Heuristiken. Sie zeigen, dass eine optimierte Koordination der LKW im ITT die Leercontainertransporte und damit die Kosten reduziert (Heilig et al. 2017). Um darüber hinaus die Kosten bei ITT zu reduzieren, können das Terminal Layout, die Liegeplatzplanung, die Flotte und das Routing von Fahrzeugen angepasst sowie der Austausch von Informationen zwischen den Akteuren verbessert werden, wie Hu et al. (2019) in einem Literature Review feststellen (Hu et al. 2019).

Wie unter 2.1 beschrieben, kann für den Vor- und Nachlauf im Hinterland neben dem LKW auch die Eisenbahn oder das Binnenschiff zum Einsatz kommen. Man spricht von **intermodalen Verkehren**, wenn unterschiedliche Transportmodi für den Transport eines Containers im Hinterland genutzt werden, also z. B. die Eisenbahn und der LKW. Dadurch können die Vorteile der Verkehrsträger, wie geringe Kosten auf langen Strecken per Eisenbahn und die Flexibilität des LKW, kombiniert werden (Li et al. 2014a; Peng et al. 2019;

StadieSeifi et al. 2014). Allerdings macht eine intermodale Transportkette vor allem auf langen Strecken im Hinterland Sinn, da die Kosten und der Zeitaufwand für ein erneutes Umladen z. B. von der Eisenbahn auf den LKW erheblich sind (Peng et al. 2019). Unterschiedliche mathematische Modelle werden in der Literatur beschrieben, die bspw. eine zweistufige Planung vorsehen (Li et al. 2015; Zhang et al. 2015) oder auch Revenue Management betrachten (Peng et al. 2019). Auch kooperative intermodale Transporte, bei denen Fuhrunternehmen sich untereinander austauschen, sind ein Thema in der Forschung (Li et al. 2014a; Zhang et al. 2015).

Neben dem Begriff der intermodalen Transporte existieren auch die Begriffe der multimodalen und der synchronmodalen Transporte. **Multimodale** Transporte sind nach StadieSeifi et al. (2014) Transporte mit mindestens zwei unterschiedlichen Transportmodi, wobei das Transportgut auch ein Fahrzeug, eine Box oder ein Container sein kann. Intermodaler Transport ist eine Unterkategorie der multimodalen Transporte, bei denen der Ladungsträger, also z. B. der Container, nicht gewechselt wird. Der Ladungsträger ist also darauf ausgelegt, auf unterschiedlichen Transportmodi transportiert zu werden. Das Gut bleibt dabei die ganze Zeit innerhalb des Ladungsträgers. **Synchromodale** Transporte beinhalten effiziente, synchronisierte und damit verlässliche und flexible Transporte mit unterschiedlichen Verkehrsträgern. Hierbei sind die Kooperation und Koordination, d. h. der Austausch von Informationen und Daten, zwischen den einzelnen Unternehmen der maritimen Supply Chain von großer Bedeutung. (StadieSeifi et al. 2014; Giusti et al. 2019; Resat und Turkay 2019; Li et al. 2017)

3 Kooperation

In diesem Kapitel steht die wissenschaftliche Betrachtung von Kooperation im Vordergrund. Hierzu werden eine Auswahl an ökonomischen Theorien (Kapitel 3.1) und darüber hinaus Voraussetzungen und Chancen sowie Hindernisse von Kooperationen dargestellt (Kapitel 3.2). Es folgt eine Vorstellung von ausgewählten Literature Reviews und weiteren Veröffentlichungen, die mit Methoden des OR Kooperation betrachten (Kapitel 3.3). Abschließend werden anhand von Abbildungen und Beispielen die Vorteile von horizontaler Kooperation im Containertransport im Hafenhinterland per LKW vorgestellt (Kapitel 3.4).

3.1 Ökonomische Theorien zu Kooperation

Dieser Abschnitt widmet sich den wissenschaftlichen Theorien, die in der Kooperationsforschung genutzt werden. Hierzu zählen die **Transaktionskostentheorie** sowie die kooperative und nicht-kooperative **Spieltheorie** (Schlingmeier 2016, S. 34 f.).

Die **Transaktionskostentheorie** bildet eine theoretische Grundlage für die Koordination von Wirtschaftsleistungen zwischen Unternehmen. Im Zentrum der Theorie steht der Vertrag bzw. die Verhandlung, auf Basis derer insbesondere eine Transaktion, also ein Tausch eines Gutes oder einer Dienstleistung, durchgeführt wird. Für jede dieser Transaktionen fallen Kosten an, die im Sinne eines Effizienzziels minimiert werden sollen. Teilnehmer kooperieren also dann in einem Markt (um ihre Wirtschaftsleistung zu koordinieren), wenn sie damit Kosten einsparen. Die Unternehmen, die die Transaktionen durchführen, handeln begrenzt rational und zeigen opportunistisches Verhalten (Simon 1997, S. 72 f.; Williamson 2008, S. 46). Die begrenzte Rationalität ist vorhanden, da die Unternehmen aufgrund von Unsicherheit am Markt und den begrenzten Informationen nicht vollständig rational handeln können. Dies führt dazu, dass insbesondere alle komplizierten Verträge unvermeidlich unvollständig sind (Simon 1997, S. 72 f.; Williamson 2008, S. 46). Mit dem Opportunismus wird beschrieben, dass die Unternehmen durch ihr Eigeninteresse bei Transaktionen zuerst auf ihren eigenen Vorteil bedacht sind und dafür auch bereit sind, den jeweils anderen zu täuschen (Williamson 1996, S. 54 f.). Aufgrund der begrenzten Rationalität und des opportunistischen Verhaltens können die Transaktionskosten, z. B. bei komplexen Verhandlungen, sehr hoch werden. Auf der anderen Seite können bei effizienten Strukturen die Transaktionskosten geringgehalten werden (Williamson 1975, 1996, 2008; van der Horst und Langen 2008). Wenn also z. B. zwischen Unternehmen eine Kooperationsvereinbarung besteht, kann dies insgesamt die

Effizienz steigern. Unternehmen kooperieren dann miteinander, wenn „die Kosten der Kooperation geringer sind als bei der eigenen Leistungserstellung“ (Schlingmeier 2016, S. 34).

Im Rahmen der **Spieltheorie** interagieren mehrere Akteure miteinander und können gegenseitig ihre Spielergebnisse beeinflussen. Grundsätzlich geht auch diese Theorie davon aus, dass die Akteure ihren eigenen Nutzen maximieren wollen. Es wird unterschieden zwischen der kooperativen und der nicht-kooperativen Spieltheorie (Wiese 2005, S. 8–10).

In der **kooperativen Spieltheorie** besteht zwischen den Akteuren bzw. Unternehmen oder Spielern eine vertraglich verbindliche Beziehung. Hierbei kann (und soll) der Nutzen durch die Beziehung bzw. die Kooperation weitergegeben und ausgetauscht bzw. ausgezahlt werden. Denn durch die Beziehung bzw. Kooperation kann ein Nutzenüberschuss entstehen, der unter den Akteuren verteilt werden muss. Die Herausforderung besteht darin, diesen Nutzen, quantifiziert als Gut oder Geld, geeignet zwischen den Akteuren zu verteilen (Shapley 1953a, 1953b; Wiese 2005, S. 6–8). Ziel sollte dabei sein, dass die Lösung zur Nutzenverteilung so gestaltet ist, dass die Kooperation langfristig stabil sein kann (Osicka et al. 2019; Guajardo und Rönqvist 2016; Krajewska et al. 2008). Es müssen dabei nicht zwingend alle Akteure miteinander zusammenarbeiten. Es ist auch möglich, sog. Koalitionen als Teilmenge von Akteuren zu bilden (Wiese 2005, S. 5). Als Lösungen für die Nutzenverteilung gibt es z. B. die Konzepte des Kerns oder des Shapley-Werts (Wiese 2005, S. VII; Guajardo und Rönqvist 2016).

Die Kernlösung ist so definiert, dass jeder Akteur in einer Koalition mindestens den Nutzen erreicht, den er ohne Koalition auch erreichen würde. Grundsätzlich möchte jede Koalition immer den höchsten Nutzen und die Koalitionsakteure die beste Auszahlung erhalten, der für diese Koalition möglich bzw. zulässig ist. Wenn die Nutzenverteilung so geartet ist, dass keine Koalition Grund hat, von dieser abzuweichen, hat diese die Kerneigenschaft, ist stabil und erfüllt damit die Effizienz- und Rationalitätsbedingungen, andernfalls ist die Koalition nicht möglich bzw. wird blockiert. (Wiese 2005, S. 60, 143 f.; Guajardo und Rönqvist 2016; Osicka et al. 2019)

Bei der Nutzenverteilung mithilfe des Shapley Werts werden drei Axiome berücksichtigt, die erfüllt sein müssen. Diese drei Axiome sind Symmetrie, Effizienz und Additivität. Die Symmetrie bedeutet, dass Akteure, die den gleichen Beitrag zur Kooperation leisten, auch gleichbehandelt werden bzw. den gleichen Betrag ausbezahlt bekommen müssen. Effizienz bedeutet, dass alle Überschüsse aus einer Kooperation restlos an alle beteiligten Akteure ausgezahlt werden müssen. Additivität bedeutet, dass, wenn zwei Kooperationen bzw. Koalitionen kombiniert werden, jeder Akteur die Summe der Auszahlungen aus den einzelnen Koalitionen erhält (Shapley 1953a, 1953b; Wiese 2005, S. 62–63, 197 f.). Dabei wird auch berücksichtigt, welchen Nutzen der Akteur zu allen anderen möglichen Koalitionen hätte beitragen können. Hier ist insbesondere der sog. marginale Beitrag, d. h. die Wertsteigerung, von Bedeutung, wenn ein neuer Akteur einer Koalition beitreten will und sich so der Gesamtnutzen der Koalition, aber auch die Beiträge der einzelnen Akteure verändern. Der Shapley-Wert bildet somit, ebenso wie eine Kernlösung, eine quantifizierte Nutzenzuteilung und kann für jeden Akteur in jeder Koalition berechnet werden. (Wiese 2005, S. 62–63, 197 f.;

Ouhader und El Kyal 2017; Defryn et al. 2016; Guajardo und Rönnqvist 2016; Cruijssen 2020, S. 61–62)

Die kooperative Spieltheorie kann als Basis für die Verteilung von Nutzen und Vorteilen in einer Kooperation herangezogen werden. Bei Anwendung der Konzepte der kooperativen Spieltheorie werden Lösungen erreicht, die langfristig stabile Kooperation begünstigen. Sie kann als auszahlungsorientiert betrachtet werden, denn sie orientiert sich am quantifizierbaren Nutzen für die Koalitionen und die einzelnen Akteure (Wiese 2005, S. 9).

Die **nicht-kooperative Spieltheorie** ist im Gegensatz dazu strategieorientiert. Der Fokus liegt hier auf den Aktionen und Strategien einzelner Akteure. Ein wichtiges Konzept ist hierbei das Nash-Gleichgewicht, bei dem kein Akteur von seiner Strategie abweicht, da es für keinen Akteur sinnvoll ist, seine Strategie zu verändern, wenn die Strategien der anderen Akteure gleichbleiben. Jeder Akteur passt seine Strategien an die Strategien der anderen Akteure an, um seinen eigenen Nutzen zu maximieren. (Nash 1951; Wiese 2005, S. 8–9, 403-404; Facchinei und Kanzow 2010).

Die vorgestellten Theorien erlauben es, die Kooperation und den Austausch zwischen Unternehmen mit Hilfe von wissenschaftlichen Konzepten zu erfassen. Sie stellen ein Fundament an Überlegungen zur Verfügung, wie die Ausgestaltung des Austausches in einer Kooperation erfolgen kann. Allerdings ist die konkrete Anwendung der gesamten Theorien für die Untersuchung in dieser Arbeit nicht sinnvoll, da die Theorien und ihre Berechnungsverfahren wenig praxistauglich für die tägliche Anwendung bei Fuhrunternehmen sind. Beispielsweise wird die Berechnung des Shapley Wertes mit zunehmender Anzahl an Akteuren immer aufwendiger und dauert immer länger, da die Anzahl der möglichen Koalitionen exponentiell ansteigt. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit für schnelle Entscheidungen in der Praxis sind solche berechnungsintensiven Verfahren ungeeignet (Osicka et al. 2019). Was die Frage bzgl. der spieltheoretischen Lösungen angeht, ist es nach Cruijssen sinnvoll, eine Näherung für spieltheoretische Lösungen zu wählen, da hier der Vorteil der Stabilität mit einer gleichzeitig effizienten Berechnung verbunden wird (Cruijssen 2020, S. 139). Hinzu kommt nach Schlingmeier, dass erst die Quantifizierung des Gesamtnutzens der Kooperation im Vergleich zum Fall ohne Kooperation erfolgen sollte, bevor spieltheoretische Überlegungen zur Nutzenverteilung in Erwägung gezogen werden (Schlingmeier 2016, S. 35).

Aus diesem Grund erscheint es sinnvoller für die vorliegende Arbeit ausgewählte Aspekte der genannten Theorien aufzunehmen und zur Erreichung des Ziels der Arbeit zu nutzen.

Bezüglich des oben erwähnten Aspekts der Fairness stellt sich die Frage, wie Kooperationsvorteile angemessen unter den Unternehmen verteilt werden können. Die kooperative Spieltheorie und die Axiome des Shapley Wertes liefern hierfür verschiedene Ansätze, die im Folgenden diskutiert und zusammengefasst werden, sodass eine praxistaugliche und für das Ziel dieser Arbeit angemessene Definition von Fairness abgeleitet werden kann.

Wenn die o. g. drei Axiome eingehalten werden, kann im Sinne des Shapley Wertes von einer fairen Verteilung der Kooperationsvorteile gesprochen werden. Krajewska et al. (2008) fassen die drei Axiome unter dem Begriff Fairness so zusammen, dass ähnliche Akteure gleich zu

behandeln sind: „Similar players are treated equally“ (Krajewska et al. 2008). In Bezug auf horizontale Kooperation in der Logistik beschreiben Lozano et al. (2013) Fairness als Identifikation und Ausschöpfung von Win-Win-Situationen, um die Effizienz aller beteiligten Akteure zu verbessern (Lozano et al. 2013; Cruijssen et al. 2007b). Darüber hinaus ist für die Fairness neben monetären Aspekten auch eine ausgewogene Nutzung der Ressourcen der Akteure und eine ausgeglichene Verteilung der Arbeitslast auf die Akteure von Bedeutung (Gansterer et al. 2020). So gilt eine Kooperation als unfair, wenn einige Akteure eine hohe Arbeitslast haben und andere Akteure von dem Kooperationsnutzen profitieren, aber deutlich weniger Arbeitslast haben (Soriano et al. 2023). Lösungen, die von den Akteuren als unfair wahrgenommen werden, sind die, bei denen es große Veränderungen in der Erlösverteilung im Vergleich zur nicht kooperativen Lösung gibt, d. h., wenn ein Akteur überdurchschnittlich profitiert. Hier ist es wichtig hervorzuheben, dass z. B. mit dem Shapley Wert eine gemäß der Axiome faire Lösung bestimmt werden kann, es in der Praxis aber auch immer auf die Wahrnehmung der Akteure bzgl. der Fairness ankommt. Wenn sich ein Akteur vermeintlich subjektiv unfair behandelt fühlt oder tatsächlich objektiv unfair behandelt wird, kann dies dazu führen, dass dieser Akteur die Kooperation verlässt. (Soriano et al. 2023)

Vor dem Hintergrund der o. g. Ausführungen wird eine *faire* horizontale Kooperation in dieser Arbeit definiert als die gleichmäßige Verteilung von Kooperationsvorteilen, die aus monetären und nicht-monetären Bestandteilen bestehen, um eine langfristig stabile und von den teilnehmenden Unternehmen als gerecht empfundene Kooperation umzusetzen.

Hinzu kommt, dass die vorgestellten Theorien besagen, dass opportunistisches Verhalten bzw. die eigene Nutzenmaximierung bei Verträgen und bei Kooperation zwischen Unternehmen gegeben sind. Dies erhöht die Relevanz dafür, dass horizontale Kooperation fair gestaltet wird, um eigene Nutzenmaximierung zu begrenzen. Diese Anforderungen und die Berücksichtigung der Fairness werden später in Bedingungen erfasst (vgl. Kapitel 6) und in das mathematische Modell integriert (vgl. u. a. Kapitel 7.2.5.5).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Theorien nicht unmittelbar auf den in dieser Arbeit untersuchten Praxisfall anwendbar sind. Deshalb werden im Folgenden nur einige Aspekte der Theorien wie Fairness und Opportunismus berücksichtigt, da diese praktische Relevanz und Umsetzbarkeit betreffen.

Im folgenden Kapitel wird Kooperation in der Logistik definiert und im Detail auf die Voraussetzungen und Chancen sowie die Hindernisse und Risiken von Kooperation eingegangen.

3.2 Kooperationen in der Logistik

Kooperationen existieren teilweise bereits seit Jahrzehnten in der Logistik, z. B. in der Seeschifffahrt. Der Begriff Kooperation wird von Aberle (2009, S. 86) als „vertragliche Zusammenarbeit auf definierten Geschäftsfeldern“ beschrieben. Diese vertragliche Zusammenarbeit besteht zwischen ansonsten unabhängigen Unternehmen (Islam und Olsen

2014). Mit der Steigerung des Wettbewerbs entwickeln sich seit den 80er Jahren neue Kooperationen zwischen Unternehmen. Diese werden häufig mit den Begriffen „strategische Allianzen“ oder „Interessengemeinschaft“ bezeichnet. (Aberle 2009, S. 78 f.)

Ein Ziel von Kooperationen in der Logistik ist die Verbesserung der Supply Chain, sodass die Gesamtkosten von kooperierenden Unternehmen geringer sind als die Summe der individuellen Kosten der einzelnen Logistik-Teilnehmer ohne Kooperation (u.a. Basso et al. 2019). Da die Leistungen in der Logistik häufig austauschbar sind und der intensive Wettbewerb die Preise und damit die Margen drückt, gewinnen Kooperationen an Bedeutung. Auch vor dem Hintergrund ökologischer Überlegungen, wie z. B. die Reduzierung von Staus, Lärmbelastung und belastenden Emissionen, werden Kooperationen schon länger als Chance gesehen (u. a. Audy et al. 2012b; Gansterer und Hartl 2018b). In der Literatur wird im Zusammenhang mit Kooperation als ein weiteres Ziel auch die Steigerung des Marktanteils und der Kapazitäten diskutiert. Kooperation ist in vielen Anwendungsfeldern möglich, z. B. in der Lagerhaltung, der Distribution bzw. Verteilung und in dem Transport von Gütern (Audy et al. 2012b).

Die Begriffe Kooperation, Kollaboration, Allianzen und Partnerschaften werden dabei oft synonym verwendet. Dabei kann der Begriff Kollaboration als Bezeichnung für eine stärkere Kooperationsform verstanden werden. (Crujssen et al. 2007b)

Eine Kooperation kann entweder vertikal oder horizontal erfolgen. Bei der **vertikalen Kooperation** arbeiten Unternehmen von hierarchisch unterschiedlichen Ebenen (der Supply Chain) zusammen, d. h., ein Unternehmen ist der Kunde eines anderen. Bei der **horizontalen Kooperation** arbeiten Unternehmen auf der gleichen Stufe (der Supply Chain) zusammen. Diese Unternehmen stehen in aller Regel in Konkurrenz zueinander, sodass bei einer horizontalen Kooperation Wettbewerber miteinander kooperieren. Dies macht vor allem dann Sinn, wenn die Unternehmen einen sich ergänzenden Transportbedarf haben und durch Kooperation diese Transporte bündeln können. (Vanovermeire et al. 2014; Gansterer und Hartl 2018b; Basso et al. 2019; Pan et al. 2019; Crujssen et al. 2007b)

Pan et al. (2019) definiert horizontale Kooperation im Transportbereich wie folgt:

“all types of horizontal cooperation or collaboration in freight transport between players operating at the same level of the supply chain (carriers, logistics service providers, shippers or receivers), between independent supply chains, and between transport networks, from occasional cooperation to long-lasting collaboration, and from operational level to strategic level.” (Pan et al. 2019)

Generell müssen die **Rahmenbedingungen** für eine Kooperation so gestaltet sein, dass alle beteiligten Unternehmen davon mehr profitieren, als wenn sie nicht kooperieren. Für den Aufbau einer langfristig stabilen Kooperation ist es wichtig, dass der Profit bzw. die Vorteile der Kooperation gleichmäßig unter den Partnerunternehmen aufgeteilt werden (vgl. Kapitel 3.1). Hierbei ist es entscheidend zu quantifizieren, welche Vorteile entstehen und es ist wichtig, die Informationen, die zwischen den kooperierenden Unternehmen ausgetauscht werden können, klar zu benennen (Audy et al. 2012b, S. 634).

Gansterer und Hartl (2018b) identifizieren in ihrem Literature Review drei große Ausgestaltungsmöglichkeiten von Kooperation, die voneinander abgegrenzt werden können, nämlich die **zentrale Kooperation**, die **dezentrale Kooperation ohne Auktionen** und die **dezentrale Kooperation mit Auktionen**. (Gansterer und Hartl 2018b)

Bei der **zentralen Kooperation** wird die Kooperation zwischen den Teilnehmern zentral gesteuert. Diese zentrale kollaborative Planung kann durch eine neutrale Institution, z. B. eine Organisation wie die Hafenbehörde oder eine Onlineplattform, erfolgen. Die zentrale Institution verfügt über vollständige Information, z. B. bzgl. der Kundenaufträge der Teilnehmer, und kann diese Information in die Entscheidungen für die Kooperation mit einfließen lassen. Bei Vorliegen vollständiger Informationen kann somit eine global optimale Lösung ermittelt werden, die als maximal bestmögliches Ergebnis einer Kooperation gesehen werden kann. Sollte keine Beschränkung hinsichtlich Fairness der Kooperation vorhanden sein, kann die zentrale Instanz die Kundenaufträge aller Akteure ohne Rücksicht auf die individuellen Akteure optimieren. In diesem Fall wäre die Lösung identisch zu einer Lösung mit nur einem Akteur, der alle Aufträge erhält. (Gansterer und Hartl 2018b; Gansterer et al. 2020)

Wenn Teilnehmer ihre Informationen nicht vollständig an eine zentrale Institution preisgeben möchten, sind **dezentrale Kooperationen** möglich. Hier tauschen die Teilnehmer nur einen Teil von Informationen (z. B. Kundenaufträge) aus und geben folglich weniger Informationen weiter als bei der zentralen Kooperation. Die Teilnehmer können sich dabei individuell untereinander oder mit einer Institution, der keine vollständigen Informationen vorliegen, austauschen. (Gansterer und Hartl 2018b)

Dieser **dezentrale Ansatz** kann auch **mit Auktionen** realisiert werden. Auktionen haben in der Theorie Potential, da Informationen über die Präferenzen der Teilnehmer indirekt in dem Auktionspreis enthalten sind. Wichtige oder besonders attraktive Kundenaufträge können einen besonders hohen Auktionspreis erreichen. Allerdings ist die Anwendung in der Praxis aufgrund der Notwendigkeit von Verhandlungsmechanismen komplex und zeitintensiv und steht damit im Widerspruch zu dem Wunsch nach schnellen Entscheidungen. Hinzu kommt, dass durch Auktionen nicht immer die optimale Lösung (z. B. im Hinblick auf die Verteilung von Kundenaufträgen) für alle Fuhrunternehmen gefunden werden kann, da es sich um einen dezentralen Ansatz handelt, in dem kein Akteur vollständige Informationen hat. Durch Auktionen erhöht sich also der Organisations- und Zeitaufwand für die Fuhrunternehmen bei gleichzeitigem Risiko, eine schlechtere als die optimale Lösung zu erhalten. (Gansterer und Hartl 2018b; Pan et al. 2019; Berger und Bierwirth 2010; Gansterer et al. 2020)

Aus diesem Grund nutzt und entwickelt die vorliegende Arbeit keine Auktionen, sondern fokussiert sich auf zentral geplante horizontale Kooperation, um so die erzielbaren Kooperationsvorteile quantifizieren zu können.

3.2.1 Voraussetzungen und Chancen

Es existieren viele Gründe und Motive für eine Kooperation. Um diese strukturiert zu erläutern, wird die Kategorisierung von Cruijssen et al. (2007b) verwendet, die nach Voraussetzungen für und Chancen durch eine horizontale Kooperation in der Logistik unterscheiden. Diese

Veröffentlichung wird in der Literatur häufig angeführt (u. a. Gansterer und Hartl 2018b; Pan et al. 2019; Calore et al. 2017). Da die Veröffentlichung sich nicht auf die Hinterlandtransporte fokussiert, wird ihre Differenzierung nach Voraussetzungen und Chancen durch aktuelle und Hinterland spezifische Veröffentlichungen ergänzt.

In dem Literature Review von Cruijssen et al. (2007b) identifizieren die Autoren auf Basis der analysierten und zusammengefassten Literatur folgende Voraussetzungen für horizontale Kooperation: Informationsaustausch, Informationstechnologie, Anreize sowie Beziehungsmanagement und Verträge (vgl. Abbildung 8).

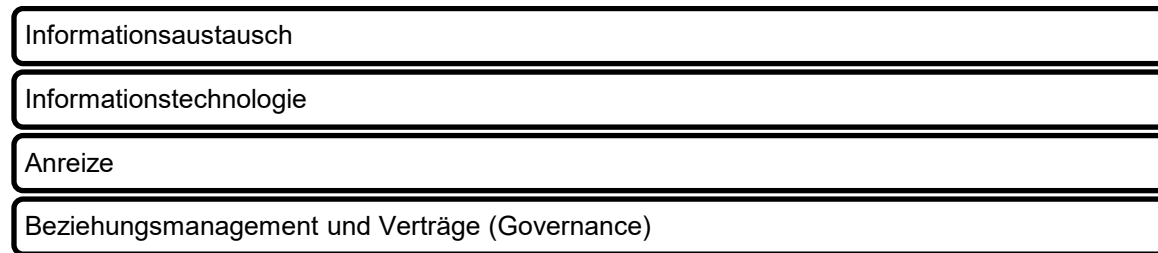


Abbildung 8: Voraussetzungen von horizontaler Kooperation (in Anlehnung an Cruijssen et al. 2007b)

Dass der Informationsaustausch, also das Teilen von Informationen, ein wesentlicher Bestandteil für Kooperation ist, wird auch von aktuelleren Veröffentlichungen bestätigt. Nur durch diesen kann eine gute Koordinierung der Aufträge ermöglicht werden. (Islam und Olsen 2014; Berger und Bierwirth 2010; Los et al. 2020)

Hinsichtlich der Informationstechnologie wird in den letzten Jahren außerdem festgestellt, dass vor allem der günstige und schnelle Austausch von Informationen, z. B. zu Kundenanfragen oder dem Ort der Fahrzeugflotte, mit Hilfe von neuen IK-Technologien an Bedeutung gewonnen hat (Pan et al. 2019; Cruijssen et al. 2007b; Harris et al. 2015).

Wesentliche Voraussetzung für Anreizsysteme ist Vertrauen zwischen den Akteuren in einer horizontalen Kooperation, da Unternehmen aus der gleichen Ebene, also Wettbewerber, miteinander kooperieren. Dieses Vertrauen kann durch gegenseitige Unterstützung und gemeinsames Engagement während der Kooperation weiter gestärkt werden. Hierbei ist eine ähnliche kooperative Kultur zwischen den Unternehmen wichtig (Sanchez Rodrigues et al. 2015; Serrano-Hernández et al. 2017; Pomponi et al. 2015; Cruijssen 2020, S. 136).

Im Bereich des Beziehungsmanagements liegt u. a. die Vertragsgestaltung der Kooperation. Während man auf der einen Seite detaillierte Verträge mit den Kooperationspartnern verhandeln und vereinbaren kann, empfiehlt die Literatur eher „offene“ Verträge zu schließen, die die Regeln und Rahmenbedingungen festlegen und nicht jedes Detail im Vorhinein regeln. Ein detaillierter Vertrag kann in der Praxis eher hinderlich sein und für kleinere Unternehmen mit geringen juristischen Fachkenntnissen eine Hürde darstellen. Damit offene Verträge Risiken hinsichtlich der Interessenkonflikte und des opportunistischen Verhaltens minimieren, ist es notwendig, dass die Unternehmen von der strategischen Ausrichtung her zueinander passen und sich vertrauen (Cruijssen et al. 2007b; Brekalo und Albers 2016; Schmolzi und Wallenburg 2011). Teile des Begriffs „Beziehungsmanagement“ werden in aktuellen

Veröffentlichungen auch den Governance-Mechanismen zugeordnet. Hierzu zählen neben der Vertragsgestaltung auch Steuerungs- und Kontrollmaßnahmen (Schmoltzi und Wallenburg 2011; Pan et al. 2019). Außerdem ist es wichtig, dass die Partner hinsichtlich ihres Engagements, ihrer Ressourcen und ihrer Strategie zueinander passen (Brekalo und Albers 2016; Pomponi et al. 2015), welches auch u.g. Partnerauswahl (vgl. Abbildung 10) beeinflusst. Es wird deutlich, dass die einzelnen hier dargestellten Punkte alle eng miteinander zusammenhängen.

Voraussetzung für die Kombination von Fahrten, die durch Kooperation ermöglicht wird, ist die geografische Nähe zwischen den Unternehmen mit den dazugehörigen Kundenaufträgen. Andernfalls können zwar Kundenaufträge ausgetauscht werden, aber es werden keine Vorteile, wie eine Kostenreduzierung, erreicht. (Brekalo und Albers 2016; Sheffi et al. 2019)

Als Chancen von horizontaler Kooperation führen Cruijssen et al. (2007b) Kosten und Produktivität, verbesserten Kundenservice sowie Verbesserung der Marktposition an (vgl. Abbildung 9).

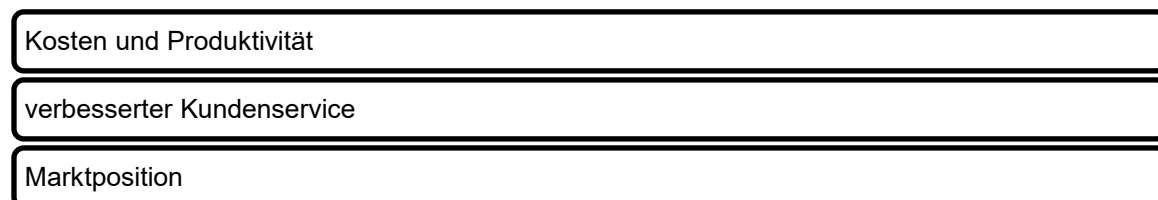


Abbildung 9: Chancen von horizontaler Kooperation (in Anlehnung an Cruijssen et al. 2007b)

Die Vorteile von Kooperation im Hinblick auf Kosten und Produktivität werden differenziert bewertet. Der bekannte Aspekt der Kostenreduktion aufgrund von höherer Effizienz wird sehr häufig als Chance genannt und mithilfe von mathematischen Modellen gezeigt (u.a. Basso et al. 2019; Gansterer und Hartl 2018b; Cruijssen und Salomon 2004; Serrano-Hernández et al. 2017; Pomponi et al. 2015; Verdonck et al. 2013) und darüber hinaus auch als wichtigster Grund für Kooperationen in empirischen Studien identifiziert (Gulati et al. 2012; Islam und Olsen 2014). Durch die o. g. geografische Nähe können Skaleneffekte (economies of scale) durch effizientere Touren generiert (u.a. Cruijssen und Salomon 2004) und Leercontainer- und Leerfahrten durch eine erhöhte Auslastung der LKW reduziert werden (Islam und Olsen 2014; Hüttmann 2013, S. 118). Durch die höhere Effizienz werden darüber hinaus auch ökologische Vorteile, wie geringere Emissionen (vgl. Kapitel 2.4.1), weniger Verkehr und weniger Stau realisiert (u.a. Islam 2018; Serrano-Hernández et al. 2017).

Unter dem Aspekt des verbesserten Kundenservice wird die Ausweitung der Kapazität und die Qualitätsverbesserung verstanden, wie z. B. eine schnellere Reaktionsfähigkeit oder ein erweitertes Angebot an Dienstleistungen (Audy et al. 2012b; Serrano-Hernández et al. 2017; Pomponi et al. 2015; Verdonck et al. 2013; Schmoltzi und Wallenburg 2011).

Es ist auch möglich, die Chancen nach operativen und strategischen Vorteilen zu differenzieren. Insbesondere die Aspekte bzgl. der Kategorie Marktposition haben vor allem strategische Auswirkung. Hierzu zählen Entscheidungen bzgl. der Geschäftstätigkeit, wie z. B.

hinsichtlich der Entwicklung von neuen Produkten und Dienstleistungen und der Erschließung neuer Märkte, die durch eine Kooperation vereinfacht werden (Gulati et al. 2012; Schmolzti und Wallenburg 2011; Serrano-Hernández et al. 2017).

3.2.2 Hindernisse und Risiken

Neben den o. g. Chancen von Kooperation gibt es auch Gründe, die gegen eine Kooperation sprechen. Diese Gründe können unmittelbare Nachteile für die einzelnen Unternehmen haben und betreffen sowohl Hindernisse beim Aufbau einer Kooperation als auch Risiken, die während einer Kooperation auftreten können.

Crujssen et al. (2007b) ordnen die Hindernisse und Risiken für bzw. von Kooperation folgenden vier Kategorien zu (vgl. Abbildung 10): Partnerauswahl, Bestimmung und Aufteilung der Kooperationsvorteile bzw. -gewinne, Verhandlungen und Koordination sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).

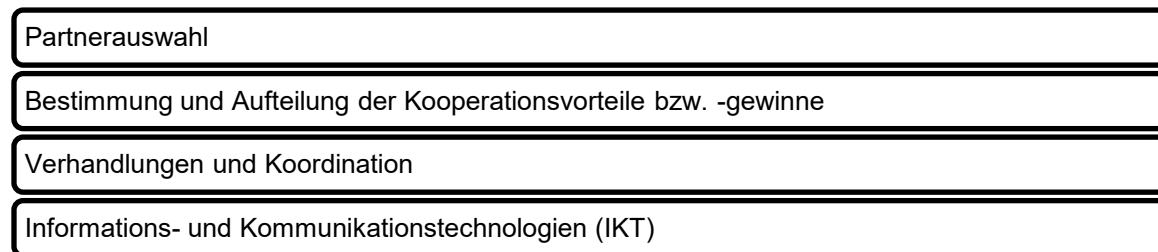


Abbildung 10: Hindernisse und Risiken von Kooperation (in Anlehnung an Crujssen et al. 2007b)

In der Partnerauswahl kommt es darauf an, die richtigen bzw. passenden und vertrauenswürdigen Partner für eine Kooperation zu finden, um eine langfristige Kooperation etablieren zu können. Die Auswahl sollte sorgfältig auf Basis von harten und weichen Faktoren erfolgen. Zu den harten Faktoren zählen neben der Größe des favorisierten Kooperationsunternehmens, die Anzahl an Gütern, Dienstleistungen und Kundenaufträgen sowie das geografische Gebiet des Unternehmens. Weiche Faktoren, wie die tatsächliche oder erwartete geringe Verlässlichkeit, können eine Kooperation erschweren bzw. den Aufwand für eine Kooperation stark erhöhen. Der Punkt des fehlenden Vertrauens zwischen den Unternehmen ist dabei von besonderer Bedeutung. Hinzu kommen können unterschiedliche Managementkulturen und Interessen der Unternehmen, die nicht zusammenpassen. Außerdem können bei einer zentralen Kooperation die Unternehmen möglicherweise einen Teil ihrer Unabhängigkeit und Flexibilität verlieren. (Crujssen et al. 2007b; Serrano-Hernández et al. 2017; Hüttmann 2013, S. 136; Pomponi et al. 2015; Pan et al. 2019; Speranza 2018; Palhazi Cuervo et al. 2016; Martin et al. 2018; Verdonck et al. 2019).

In diesem Zusammenhang ist in der Literatur auch häufig vom sog. Koalitionsstabilitätsproblem (engl. Partner selection, coalition stability problem) die Rede. Darunter versteht man das Problem der Auswahl der Kooperationspartner(-unternehmen). Im einfachsten Fall wird eine große Kooperationsgruppe angenommen bzw. gebildet, sodass alle Akteure bzw. Unternehmen (in einer Menge) miteinander kooperieren (Aloui et al. 2021). Tatsächlich ist es aber auch möglich, dass sich kleinere Untergruppen bilden, die nur innerhalb der jeweiligen Untergruppen miteinander kooperieren, da sich nur die Akteure in dieser Untergruppe

gegenseitig vertrauen (im späteren Verlauf werden für den Begriff Untergruppe synonym die Begriffe Vertrauensgruppe oder Koalition genutzt). Denkbar ist auch, dass Unternehmen in mehr als einer Untergruppe teilnehmen und kooperieren. Hier kann dann untersucht werden, welche Vertrauensgruppenaufteilung entweder unter der Zielsetzung des zu maximierenden Nutzens für die Unternehmen oder mit dem Ziel der Stabilität am besten geeignet ist. Dabei muss, basierend auf der gegebenen Kundenstruktur und dem Netzwerk, beachtet werden, dass eine kritische Masse an Unternehmen mit ausreichend austauschbaren Kundenaufträgen kooperieren muss, damit o. g. Vorteile auch wirksam werden können. (Aloui et al. 2021; Pan et al. 2019; Audy et al. 2012a; Hüttmann 2013, S. 134; Gansterer und Hartl 2018b; Guajardo et al. 2018)

Dabei ist auch der Umgang mit sensiblen Informationen, die nicht alle Kooperationspartner erhalten sollen, wichtig. Eine wesentliche Frage ist daher, wie eine zentrale Institution die Teilnehmer zur Offenlegung von Informationen motivieren kann. Hier kann ein unabhängiger Dritter, z. B. eine Plattform (s. Kapitel 5.1), der die Daten erhält, nicht weitergibt und selbstständig eine Entscheidung über die Kooperation, bzw. die Weitergabe von Informationen, Kundenaufträgen, Gütern oder Dienstleistungen trifft, eine Lösung sein (Guajardo und Rönnqvist 2016; Gansterer und Hartl 2018b). So können auch Unternehmen miteinander kooperieren, wenn das Vertrauen in die Partnerunternehmen geringer ausgeprägt ist. Abhängig von den ausgewählten Kooperationspartnern ist die Aufteilung der Kooperationsvorteile ein weiteres Hindernis (Guajardo und Rönnqvist 2016; Gansterer und Hartl 2018b).

Die Bestimmung und Aufteilung der Kooperationsvorteile bzw. -gewinne ist eine ganz wesentliche Problematik bei Kooperationen. Hierbei spielt die Fairness (vgl. Kapitel 3.1) eine Rolle, denn die unmittelbaren Vorteile durch die Kooperation könnten auch nur bei wenigen Unternehmen entstehen. Hierzu zählt auch die Befürchtung, dass einige Kooperationsunternehmen z. B. besonders viele Kundenaufträge ausführen könnten und andere Unternehmen durch die Kooperation hauptsächlich oder ausschließlich Kunden verlieren könnten, und zwar bei gleichzeitiger Beibehaltung hoher Fixkosten. Sollten einige Kooperationsunternehmen den Eindruck oder die Vermutung haben, nicht fair an den Vorteilen beteiligt zu sein, könnten diese die Kooperation beenden und o. g. Vorteile wären nicht mehr generierbar (Crujssen et al. 2007b; Hüttmann 2013, S. 126; Serrano-Hernández et al. 2017; Pan et al. 2019; Gansterer et al. 2020; Himstedt und Meisel 2021).

Um die Vorteile möglichst fair zu verteilen, kann eine Vielzahl von Aufteilungs- bzw. Fairnessmechanismen angewandt werden, die sich anteilig an der Anzahl der Kundenaufträge, anteilig an der gefahrenen Strecke oder den daraus resultierenden Kosten orientieren. Es ist sinnvoll, mehrere Aufteilungsmechanismen miteinander zu kombinieren, da sonst bei Fokus auf eine einzige Kennzahl langfristig einzelne Unternehmen weniger Kooperationsvorteile erhalten, als ihnen (objektiv und/oder subjektiv) zustehen würden (Crujssen et al. 2007b). Hierzu ist auch die o. g. kooperative Spieltheorie zu beachten. (Pan et al. 2019; Krajewska et al. 2008).

In enger Verbindung dazu steht die nächste Kategorie, die der Verhandlungen und Koordination einer Kooperation. Hier ist es wichtig, dass die Verhandlungen, die zu einer Kooperation führen sollen, zu einer Win-Win-Situation für alle Unternehmen führen. Die Verhandlungen sollten wertschätzend, wohlwollend und kompromissorientiert sowie einander zugewandt geführt werden, d. h., dass sich nicht die sehr dominierenden Unternehmen durchsetzen sollten. Interessenkonflikte und Opportunismus würden der Kooperation schaden. (Crujssen et al. 2007b; Wallenburg und Schäffler 2014; Pomponi et al. 2015). Unter Koordination kann auch der Mechanismus zum Austausch der Güter, Dienstleistungen oder Kundenaufträge fallen. Dabei können Zahlungen in einer festgelegten Höhe oder Auktionen für den Austausch erfolgen (Pan et al. 2019).

Für eine Kooperation müssen auch Daten, z. B. Kundenaufträge, zwischen den einzelnen Unternehmen ausgetauscht werden (vgl. Voraussetzungen in Abbildung 8). Damit dies (nahezu) automatisiert erfolgen kann, sind Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) notwendig. Da in der Logistikbranche viele klein- und mittelständische Unternehmen arbeiten, können die (Anfangs-)Investitionen für IKT den Vorteil der Kooperation übersteigen und so eine Kooperation insgesamt unattraktiv machen (Crujssen et al. 2007b; Pan et al. 2019).

Ein weiteres Hindernis von horizontaler Kooperation können rechtliche Fragestellungen sein. Hierbei besteht z. B. die Sorge der Unternehmen, dass Absprachen über die Aufteilung von Kundenaufträgen dazu führen, dass das Kartellamt aktiv wird und ggf. Strafen verhängt (Crujssen 2020, S. 63–64).

Grundsätzlich kann auch eine unklare Zielsetzung einer Kooperation ein Hindernis sein. Dies ist dann der Fall, wenn im Vorhinein nicht konkret festgelegt wird, mit welchem gemeinsamen Ziel eine Kooperation eingegangen worden ist bzw. mit welchem Ziel die Optimierung der Transporte verfolgt wird. Als Ziele können z. B. die Reduzierung von Leerfahrten oder eine höhere Auslastung (bei Less-Than-Truckload, LTL) definiert werden (Pan et al. 2019).

Die oben genannten Veröffentlichungen fokussieren sich meist nicht auf das Hafenhinterland, sodass eine separate Betrachtung für diesen Fall notwendig ist (s. Kapitel 4 und 5.3).

3.3 Behandlung von Logistikkoooperationen im Operations Research

Es soll nun diskutiert werden, wie horizontale Kooperationen mit den Methoden des OR untersucht und die Vorteile quantifiziert werden können. Im Feld des OR identifizierte u. a. Speranza (2018) Kooperation als einen wichtigen Trend und eine Chance für die Supply Chain. Im Folgenden wird dafür zunächst ein kurzer chronologischer Überblick über die strukturierten Literature Reviews der letzten zehn Jahre gegeben, bevor auf ausgewählte Veröffentlichungen genauer eingegangen wird.

3.3.1 Aktuelle Literature Reviews

Verdonck et al. 2013 fokussieren sich auf horizontale Kooperation in der operativen Planung im Straßenverkehr. Hierbei unterscheiden sie zwischen dem Teilen von Kundenaufträgen (16 Arbeiten) und von Kapazitäten (5 Arbeiten). Mit dem Teilen von Kundenaufträgen ist gemeint, dass durch die Kooperation ermöglicht wird, dass Fuhrunternehmen an andere Fuhrunternehmen Kundenaufträge weitergeben oder gegenseitig Kundenaufträge austauschen. Das Teilen von Fahrzeugkapazitäten beinhaltet, dass Fuhrunternehmen ihre Fahrzeugkapazitäten anderen Fuhrunternehmen zur Verfügung stellen, um die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen. Die Autoren betonen die Relevanz von praxisorientierten Modellen und Fallstudien. Hierzu zählt auch die Fragestellung, in welchem Umfang Kundenaufträge in der Praxis geteilt werden. (Verdonck et al. 2013)

Der Literature Review von Guajardo und Rönnqvist (2016) befasst sich mit 55 Veröffentlichungen (von 2010 bis 2015) zu grundsätzlichen Kooperationsmöglichkeiten im Transportwesen. Dabei werden nicht nur Planungsprobleme wie das Vehicle Routing (VRP) bzw. das Traveling Salesman Problem (TSP), sondern auch Verteilungs- und Lagerhaltungsprobleme berücksichtigt. Hier liegt der Fokus auf der Nutzung von theoretischen Allokationsmodellen (wie z. B. Shapley Wert) zum Teilen von Vorteilen wie Profit und Ressourcen. Als wesentliche Chance für zukünftige praxisorientierte Forschung sehen die Autoren Überlegungen zur Quantifizierung des Nutzens einzelner Akteure in der Kooperation und die Entwicklung von Mechanismen und Anreizen, um langfristige Kooperation zu fördern. (Guajardo und Rönnqvist 2016)

Serrano-Hernández et al. (2017) gehen in ihrem Literature Review auf Herausforderungen von Optimierung bei horizontaler Kooperation auf strategischer, taktischer und operativer Ebene ein. Dabei differenzieren sie u. a. die Vor- und Nachteile anhand der Entscheidungsprobleme auf den drei Ebenen. So geht es auf strategischer Ebene, die langfristig orientiert ist und ein gesamtes Unternehmen beeinflusst, eher um die gemeinsame Nutzung von Lagerhäusern, die einen hohen Kapitaleinsatz erfordert. Bzgl. der taktischen Ebene, welche mittelfristig orientiert ist und viele Bereiche eines Unternehmens betrifft, listen die Autoren Veröffentlichungen auf, die sich mit der gemeinsamen Planung von Fahrten befassen. Die Grenze zur operativen Ebene, die kurzfristig orientiert ist, ist dabei fließend. Hier liegt der Fokus auf einer guten Auslastung der Fahrzeuge, d. h. auf einem hohen Ladefaktor und gleichzeitig auf den Möglichkeiten von kooperativen Kombinationsfahrten. (Serrano-Hernández et al. 2017)

Die Autoren Gansterer und Hartl (2018b) befassen sich in ihrem Literature Review mit horizontaler Kooperation im Transportwesen und klassifizieren die existierenden Arbeiten und Artikel nach drei Forschungsfeldern: zentrale Kooperation und dezentrale Kooperation mit und ohne Auktion (vgl. Kapitel 3). Für die zentrale Kooperation zeigen die analysierten Veröffentlichungen eine Steigerung des Profits von maximal 20 bis 30 % (je nach Veröffentlichung) im Vergleich zur Situation ohne Kooperation bei LTL-Problemstellungen, und bestätigen damit eine wesentliche Chance (s. Kapitel 3.2.1) von horizontaler Kooperation. Allerdings fokussieren sich die Veröffentlichungen auf deterministische Szenarien, d. h. ohne die Berücksichtigung von Unsicherheit. Nicht nur hier wird weiterer Forschungsbedarf

gesehen, sondern auch bei der Fragestellung, welche Informationen in welchem Umfang von Wettbewerbern miteinander geteilt werden sollten, um eine erfolgreiche Kooperation im Sinne des Profits zu garantieren. (Gansterer und Hartl 2018b)

In dem aktualisierten Literature Review von 2020 untersuchen Gansterer und Hartl die Veröffentlichungen erneut nach zentraler und dezentraler Kooperation. 29 Paper ordnen sie den zentralen Ansätzen zu und stellen fest, dass etwa die Hälfte dieser Paper sog. Profitsharing Mechanismen berücksichtigen, die der Sicherung von langfristigen Kooperationen dienen. Lediglich neun Paper nutzen neben monetären auch umweltbezogene Zielfunktionen. Die untersuchten Paper beziehen sich auf den Straßentransport, allerdings ohne Berücksichtigung von Containertransporten bzw. maritimen Supply Chain, mit Ausnahme des Papers zu kooperativen Truck Appointment Strategien (s. Kapitel 2.4.3) von Schulte et al. (2017). Weiteren Forschungsbedarf sehen die Autoren in der Forschung zu Fairness, die über kostenbasierte Ansätze hinaus geht und z. B. auch die Verteilung von Kundenaufträgen sowie Emissionen oder zeitliche Flexibilität berücksichtigt. Diese Aspekte könnten in mathematischen Modellen durch die Erfassung mehrfacher Zielsetzungen erreicht werden. (Gansterer und Hartl 2020)

Der Schwerpunkt des Literature Reviews von Pan et al. (2019) liegt auf der praktischen Umsetzung der existierenden theoretischen Modelle für horizontale Kooperation. Sie klassifizieren ihre Ergebnisse nach Lösungen und Umsetzungsfaktoren von horizontaler zentraler Kooperation. Der Vorteilsausgleich wird als wichtiger Umsetzungsfaktor identifiziert. Hervorzuheben ist, dass dieser Literature Review auch Managementaspekte von Kooperation, wie z. B. die Unternehmenskultur und das Verhalten der Mitarbeiter, berücksichtigt. Als zukünftiges Forschungsfeld sehen die Autoren nicht nur die Nutzung von Echtzeitinformationen, um zeitnah Entscheidungen zum Teilen von Aufträgen und zur Routenoptimierung zu treffen, sondern auch die Berücksichtigung von Umweltaspekten. (Pan et al. 2019)

Aloui et al. fokussieren sich in ihrem Literature Review zum Thema horizontale Kooperation auf Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte. 89 Paper (von 2010 bis 2020) werden untersucht, von denen 26 Veröffentlichungen Umweltaspekte betrachten, dagegen aber nur vier Veröffentlichungen mehrfache Zielsetzungen, also die gemeinsame Betrachtung von ökonomischen und ökologischen Zielen, erörtern. Die Klassifizierung der Literatur zeigt, dass deterministische Kontexte überwiegen und nur sehr wenige Forschungsbeiträge Unsicherheit berücksichtigen. Hinsichtlich der Gewinnverteilung stellt dieser Review fest, dass sich die Forschung bisher wenig mit der Stabilität von Kooperation auseinandergesetzt hat. (Aloui et al. 2021)

Die sieben Literature Reviews zeigen deutlich den Forschungsbedarf bzgl. horizontaler Kooperationen auf. Dabei geht es um die Fragen nach dem Umfang, in dem Informationen, insbesondere Kundenaufträge geteilt werden, ferner nach dem Nutzen einzelner Akteure und darüber hinaus nach einer langfristig stabilen Kooperation. Diese aufgezeigten Forschungslücken adressiert die vorliegende Arbeit (vgl. Kapitel 6).

3.3.2 Arbeiten zur Quantifizierung der Kooperationsvorteile in der Logistik

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Veröffentlichungen gegeben, die sich schwerpunktmäßig mit der Quantifizierung des Kostenvorteils bei Kooperation befassen.

Nach Gansterer und Hartl (2018b) eignet sich horizontale Kooperation dafür, um bei Tourenplanungsproblemen den Profit um bis zu 30 % (bei zentraler Kooperation) zu steigern (s.o.) (Gansterer und Hartl 2018b). Eine der ersten Studien zu den Potentialen von kollaborativem Vehicle Routing war die Arbeit von Cruijssen et al. (2007a). Es wird ein Modell erstellt, in dem verschiedene Unternehmen jeweils eine eigene Menge an Aufträgen haben. Die Waren werden an einem zentralen Punkt aufgenommen und von dort an die Kunden geliefert. Es kann gezeigt werden, dass eine gemeinsame Tourenplanung eine Kostensenkung bei den Distributionskosten von bis zu 30 % ermöglicht (Cruijssen et al. 2007a).

Zuvor können bereits Cruijssen und Salomon (2004) am Beispiel der Blumenlogistik in den Niederlanden zeigen, dass die Transportkosten bei einem Tausch der Kundenaufträge bei 50 Simulationsläufen um 5 bis 15 % (durchschnittlich um 12,3 %) sinken können. Außerdem stellen die Autoren fest, dass die Kosteneinsparungen größer sind, wenn mehrere kleinere Unternehmen miteinander kooperieren, im Vergleich zu einer Kooperation von wenigen großen Unternehmen. Kleinere Unternehmen profitieren bei einem passenden Austausch von Aufträgen, z. B. mit dem Ziel der Vermeidung von Leerfahrten, stärker, da bei ihren wenigen eigenen Aufträgen eine erfolgreiche Kooperation stärker ins Gewicht fällt. Dies deckt sich auch mit einer weiteren Analyse, die feststellt, dass die Kosteneinsparungen je Auftrag durch Auftragsaustausch bei wenigen eigenen Aufträgen höher sind als bei vielen eigenen Aufträgen, denn bei vielen eigenen Aufträgen sind die unternehmenseigenen Skaleneffekte schon groß, sodass weitere passende Aufträge nur noch kleine Kosteneinsparungen zur Folge haben. (Cruijssen und Salomon 2004)

Krajewska et al. (2008) analysieren die Kosteneinsparungen bei horizontaler Kooperation für ein Pickup-and-Delivery-Problem, bei dem jeder Kunde einen Abholort und einen Lieferort angibt, die nacheinander von den Fahrzeugen angefahren werden müssen. Zusätzlich bestehen Zeitfenster, die eingehalten werden müssen. Die Einsparung beträgt abhängig vom Fuhrunternehmen 10 bis 20 %. (Krajewska et al. 2008)

Ouhader und Kyal (2020) entwickeln ein Optimierungsmodell (two-echelon location routing problem) für horizontale Kooperation im urbanen Frachttransport mit zwei Zielfunktionen zur Kosten- und Emissionsminimierung und zeigen, dass gleichzeitig die Emissionen um mehr als 50 % und die Kosten um mehr als 15 % reduziert werden können (Ouhader und El Kyal 2020).

Die Auswahl der vorgestellten Veröffentlichungen zeigt, dass durch Kooperation grundsätzlich Kosten und auch Emissionen durch eine höhere Effizienz eingespart werden können. Die von den Autoren ermittelte Spanne der prozentualen Einsparungen liegt bei unterschiedlichen Problemstellungen zwischen 5 und 30 %.

3.3.3 Aufteilungsmechanismen

Die Bestimmung und Aufteilung der Kooperationsvorteile (s. Kapitel 3.2.2) ist von besonderer Relevanz, insbesondere, wenn die mögliche Gesamtkostenreduktion bekannt ist. In der Literatur existieren unterschiedliche Konzepte für die in dieser Arbeit genannten Aufteilungsmechanismen.

Der Review von Guajardo und Rönnqvist (2016) identifiziert die meisten Artikel zu den Mechanismen „*ad hoc*“ (31 Artikel), *Shapley Wert* (23), *Proportional* (18) und *Nukleolus* (12). Unter den „*ad hoc*“ Mechanismen fassen die Autoren individuell problembasierte, spezielle Mechanismen zusammen, z. B. die Nutzung von Ausgleichszahlungen zwischen den Akteuren. Aus dem Feld der kooperativen Spieltheorie stammen die Mechanismen des Shapley Wertes und der proportionalen Methoden (Guajardo und Rönnqvist 2016). Die proportionale Methode beschreibt, dass die Vorteile bzw. die Kosteneinsparungen gleichmäßig zwischen den Akteuren verteilt werden (egalitäre proportionale Methode). Durch einen beliebigen Faktor kann diese Methode angepasst werden und z. B. die Nachfragemenge, die ein Akteur in die Kooperation mit einbringt, oder die Nachfrage, die er bedient, volumenbasiert berücksichtigt werden. Außerdem ist es auch möglich, die Aufteilung so vorzunehmen, dass Akteure, die hohe Kosten ohne die Kooperation hätten, mit der Kooperation einen größeren Teil der Kosteneinsparung erhalten (Ouhader und El Kyal 2017; Guajardo und Rönnqvist 2016; Crujssen 2020, S. 59–60). Die Nukleolus Methode basiert auf der Idee der Minimierung des Maximums bzgl. der Unzufriedenheit der Akteure. Wenn der Vorteil eines Akteurs in einer Subkoalition größer ist als in einer großen Koalition mit allen Akteuren, wird dieser Akteur in der großen Koalition unzufrieden. Diese Unzufriedenheit in der großen Koalition kann interpretiert werden als der nicht realisierte Vorteil, den ein Akteur in einer Subkoalition im Vergleich zur großen Koalition hätte erzielen können. Die Berechnung wird mit zunehmender Anzahl der Akteure kompliziert und ist damit wenig praxistauglich (Defryn et al. 2016; Guajardo und Rönnqvist 2016).

Auch die von Gansterer und Hartl (2020) identifizierten Paper, die Aufteilungsmechanismen bei zentraler Kooperation nutzen, könnten den o. g. vier Mechanismenkategorien zugeordnet werden. So nutzen Defryn und Sörensen (2018) den Shapley Wert als Mechanismus in ihrer Simulationsstudie, um den Einfluss von unterschiedlichen Zielsetzungen der Akteure zu analysieren (Defryn und Sörensen 2018). Im Nachfolgepaper wird ein volumenbasierter Aufteilungsmechanismus angewandt, der zu den proportionalen Methoden gezählt werden kann. Im mathematischen Modell des Papers wird an einem Beispiel der Distributionslogistik die gefahrene Strecke minimiert. Die Autoren stellen fest, dass eine Lösung, die leicht schlechter ist als die optimale Gesamtlösung, für einzelnen Akteure im Hinblick auf ihre jeweiligen individuellen Ziele deutlich attraktiver sein kann als die optimale Gesamtlösung (Defryn et al. 2019).

Ouhader und El Kyal (2017) entwickeln in ihrem Paper ein mathematisches Modell für die horizontale Kooperation, bei der die Tourenplanung und die Auswahl von Depotstandorten hinsichtlich Nachhaltigkeitsaspekten berücksichtigt wird. Die Autoren vergleichen hierbei die Aufteilungsmechanismen Shapley Wert sowie proportionale Methoden, entweder abhängig

von den Kosten oder abhängig von der transportierten Menge des Unternehmens. Der Shapley Wert verteilt in dem vorgestellten urbanen Anwendungsbeispiel die Kostenersparnis ähnlich wie eine Methode, die nur die individuellen Unternehmenskosten berücksichtigt (Ouhader und El Kyal 2017). Eine kooperative Variante des Standorttourplanungproblems (engl. Location routing problem) haben Osicka et al. (2019) entwickelt. Sie vergleichen verschiedene Aufteilungsmechanismen, wie z. B. Shapley Wert, Nukleolus sowie proportional nachfragebasierte und proportional kostenbasierte Mechanismen. Die proportionalen Mechanismen, dabei insbesondere der nachfragebasierte Mechanismus, erzielen im Vergleich zu Shapley Wert und Nukleolus etwas schlechtere Ergebnisse im Hinblick auf die Metrik der Einhaltung der Rationalität, d. h. der Abweichung zum Kern. Die Autoren weisen allerdings darauf hin, dass zur Berechnung des Shapley-Wertes und des Nukleolus die Kosten mit allen möglichen Koalitionsgruppen berechnet werden müssen. Dies stellt bei einer hohen Anzahl an Fuhrunternehmen ein Problem hinsichtlich der Berechnung dar, weil die Anzahl an möglichen Koalitionen exponentiell zur Anzahl der Fuhrunternehmen steigt (Osicka et al. 2019). Wang et al. (2017) entwickeln ein Optimierungsmodell für das multi-depot VRP, bei dem die Depots unterschiedlichen Akteuren gehören. Als Aufteilungsmechanismus wird die Shapley Wert Methode genutzt (Wang et al. 2017).

Das Paper Schulte et al. (2017) wird bereits im Kapitel 2.4.3 vorgestellt und nutzt als Aufteilungsmechanismus eine „ad hoc“ Methode. So teilen sich die LKW-Fuhrunternehmen den Profit einer Kundenauftragsfahrt, wenn Fuhrunternehmen A den Auftrag von Fuhrunternehmen B ausführt. Konkret erhält das Fuhrunternehmen B nach wie vor die Erlöse des Kundenauftrages, muss aber einen Teil als Kompensationszahlung an das ausführende Fuhrunternehmen A zahlen. Die auftragsabhängige Kompensationszahlung ist als Parameter gegeben und wird durch die Autoren nicht weiter spezifiziert. (Schulte et al. 2017)

Darüber hinaus kann auch unterschieden werden, ob die Profitaufteilungsmechanismen kurzfristig, also z. B. auf Tagesbasis, oder langfristig aggregiert, also z. B. auf Wochen- oder Monatsbasis, orientiert sind. Defryn et al. (2016) vergleichen die Profitaufteilung tagesbasiert mit einem über acht Wochen aggregierten Profit und stellen für ihr Problem und die gewählten Profitaufteilungsmechanismen fest, dass die tagesweise Aufteilung die realen Kosten besser abbildet und die achtwöchige Aggregation aus ihrer Sicht zu stark auf den durchschnittlichen Leistungen beruht (Defryn et al. 2016).

Die oben genannten Veröffentlichungen machen deutlich, dass es keinen Aufteilungsmechanismus gibt, der für alle Fälle und Planungssituationen gleichermaßen am besten (d. h. am fairsten bzw. für die Koalition am stabilsten) anwendbar ist. Vielmehr muss für jeden Fall der jeweilige vielversprechendste Aufteilungsmechanismus entwickelt und evaluiert werden (Ouhader und El Kyal 2017; Defryn et al. 2016).

In diesem Zusammenhang sei noch darauf hingewiesen, dass in der Literatur auch Auktionen als Alternative zu Aufteilungsmechanismen angeführt werden. Wie bereits im Kapitel 3.2 erläutert, werden diese allerdings nur für dezentrale Kooperation eingesetzt und in dieser Arbeit nicht genutzt. Weiterführende Arbeiten hierzu sind die Veröffentlichungen von Berger

und Bierwirth 2010; Gansterer und Hartl 2018a; Gansterer et al. 2019, die Auktionen in diesem Zusammenhang einsetzen und die Auswirkungen analysieren.

3.3.4 Ausgewählte relevante Veröffentlichungen

Die Autoren Gansterer und Hartl haben, teilweise zusammen mit Coautoren, neben den o. g. zwei Literature Reviews und Artikeln mit Auktionsbezug auch einige weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen im Bereich der Kooperation in der Tourenplanung publiziert. Im Folgenden werden diese und weitere aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit kurz vorgestellt.

Gansterer et al. (2018) entwickeln ein mathematisches Modell für ein multi-depot Tourenplanungsproblem mit Abholung und Ablieferung (multi depot travelling salesman problem with Pickup and Delivery; MDTSPPD), bei dem durch eine zentrale horizontale Kooperation Kundenaufträge zwischen den Unternehmen ausgetauscht werden können, um die Kosten zu minimieren. Um allen Unternehmen eine Mindest-Arbeitsbelastung (gemessen in der Kundenanzahl) zu garantieren, werden entsprechende Restriktionen eingeführt. Andernfalls wäre es möglich, dass die optimale Lösung festlegt, dass alle Kundenaufträge von einem Unternehmen durchgeführt würden, was die anderen Unternehmen nicht zulassen würden. Dieser Ansatz unterstützt also die Kooperation im Hinblick auf die langfristige Stabilität. Das Anwendungsbeispiel besteht aus drei Fuhrunternehmen mit jeweils einem Depot und jeweils drei Kundenaufträgen. Hervorzuheben ist, dass die Autoren je zehn Instanzen mit unterschiedlicher Wettbewerbsintensität bzgl. der benachbarten, überlappenden oder identischen Kundenregionen zwischen den Fuhrunternehmen entwickeln. Durch die Forderung einer Mindest-Arbeitsbelastung verschlechtert sich allerdings das Optimierungsergebnis. Im Vergleich zur optimalen Kooperationslösung ohne Mindest-Arbeitsbelastung erhöhen sich die Kosten durchschnittlich um 18 %, wenn jedes Unternehmen mindestens einen von drei eigenen Kunden behalten soll, dagegen um durchschnittlich 32 %, wenn jedes Unternehmen mindestens zwei von drei eigenen Kunden behalten soll. Diese Kostenerhöhung ist am stärksten für die Instanzen mit geografisch überlappenden Kundenaufträgen. (Gansterer et al. 2018)

Gansterer et al. (2020) entwickeln den Ansatz weiter und haben zum Ziel, das Potenzial von zentraler horizontaler Kooperation zu quantifizieren. Wie in allen Veröffentlichungen von Gansterer wird kein Anwendungsbeispiel aus der maritimen Supply Chain oder dem Seecontainertransport gewählt, sondern in diesem Fall im Kontext der Abholung und Zustellung ein MDTSPPD (ein Fahrzeug je Depot) und ein MDVRPPD (multi depot vehicle routing problem with Pickup and Delivery; mehrere Fahrzeuge je Depot) verwendet. Hinzu kommt die Option von mehreren kapazitätsbeschränkten Fahrzeugen je Depot bzw. Fuhrunternehmen. Im Anwendungsbeispiel werden wieder Instanzen für unterschiedliche geografische Verteilungen der Kundenaufträge genutzt. Eine beispielhafte Verteilung der Kundenaufträge der drei Unternehmen (schwarz, blau, rot) um ihre Depots herum (entsprechende Farbe der Quadrate) ist in Abbildung 11 dargestellt. Die drei Unternehmensdepots haben in allen drei Instanztypen denselben Abstand zueinander. Dabei zeigen diejenigen Instanzen die *clustered* genannt werden (O1), dass Kundenaufträge geografisch dicht zum Depot des jeweiligen Unternehmens liegen und wenig Überschneidung

zu den anderen Unternehmen und wenig Wettbewerb haben. Instanzen (O3), bei denen die Kundenaufträge eines Unternehmens einen großen Abstand zum Depot des Unternehmens haben, sind geografisch gleichmäßig verteilt, was folglich zu Überschneidungen und Wettbewerb zwischen den Unternehmen führt. Außerdem besteht eine Zwischenstufe mit mittlerem Abstand der Kundenaufträge zum zugehörigen Unternehmensdepot (O2).

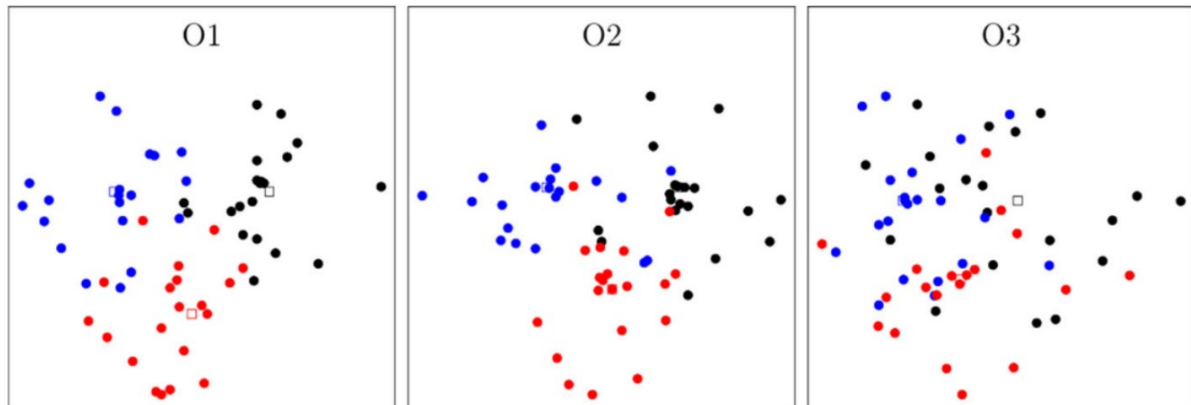


Abbildung 11: Unterschiedliche räumliche bzw. regionale Verteilung der Orte von Kundenaufträgen (entnommen aus Gansterer et al. 2020, S. 529)

Die Autoren ergänzen mehrere Restriktionen, um eine ungleiche Verteilung der Kundenaufträge zu vermeiden und so eine langfristig stabile Kooperation zu ermöglichen. Diese Restriktionen ermöglichen Fuhrunternehmen das Behalten/Ausführen einer Mindestanzahl an eigenen Kundenaufträgen, einen Mindestanteil an Kundenaufträgen, die ausgeführt werden sollen (Mindest-Arbeitsbelastung), unabhängig davon, ob dies eigene oder fremde Kundenaufträge sind, und einen mindestens zu erreichenden Profit nach bzw. durch die Kooperation. Ohne diese Restriktionen sinken die Kosten durch die Kooperation um 25 % bei einem Fahrzeug je Depot (TSP) und um 17 % bei mehreren Fahrzeugen je Depot (VRP), wobei die Kostenreduktion besonders groß ist bei den Instanzen mit gleichmäßig verteilten Kunden (O3). Unter Einsatz ausgewählter Restriktionen ist z. B. die Kostenreduktion schwächer und liegt zwischen 12 und 18 % (TSP) bzw. zwischen 2 und 7 % (VRP). Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Rückgang der Kostenreduktion durch die Restriktionen besonders stark bei denjenigen Instanzen ausfällt, die ursprünglich durch Kooperation eine hohe Kostenreduktion generieren konnten. Insgesamt stellen die Autoren somit fest, dass ohne o. g. Restriktionen die Kundenaufträge zwischen den Fuhrunternehmen sehr ungleichmäßig verteilt sind, aber die Restriktionen, die eine langfristig stabile Kooperation ermöglichen, den Kostenvorteilen einer Kooperation entgegenstehen. Der Einfluss auf die Abschwächung der Kostenvorteile ist dabei vor allem bei dem Wunsch, einen Mindestprofit zu erreichen, besonders hoch und bei einem Fahrzeug je Depot (TSP) stärker ausgeprägt im Vergleich zu mehreren Fahrzeugen je Depot (VRP). (Gansterer et al. 2020)

Das Paper von Mancini et al. (2021) befasst sich mit dem Austausch von Kundenaufträgen auf regelmäßiger Basis und berücksichtigt dabei Zeit- und Servicekontinuität, sodass möglichst immer zur selben Tageszeit das gleiche Fuhrunternehmen für einen Kundenauftrag genutzt werden soll. Das Ziel des Optimierungsmodells (VRP) ist es, den Profit an der Kooperation zu maximieren. Jedes Fuhrunternehmen soll durch die Kooperation mindestens so viel Profit

erreichen, wie ohne Kooperation. Außerdem besteht eine Mindest-Arbeitsbelastung, die jedes Fuhrunternehmen angibt und die mit der Kooperation mindestens erreicht werden muss, um die Aufträge gleichmäßig zu verteilen. Es zeigt sich, dass der Profit je nach Instanz durch die Kooperation um 9 bis 11 % steigt, ferner die o. g. Kontinuitätsberücksichtigungen den Profit nur um maximal 1,15 % vermindern, während die Mindest-Arbeitsbelastung gar keinen Einfluss auf den Profit hat. (Mancini et al. 2021)

Neu in der Veröffentlichung von Soriano et al. (2023) ist, dass dem kooperativen MDVRP (ohne Abholung; nur ein Standort je Kunde) neben dem Ziel der Kostenminimierung eine zweite Zielfunktion zur Fairness hinzugefügt wird. Diese Zielfunktion der Fairness ist so formuliert, dass die geringste Profitausbeute von allen Fuhrunternehmen, berechnet als Division des Profits mit Kooperation durch den Profit ohne Kooperation, zu maximieren ist. Um die Zielfunktionskonflikte zu analysieren, wird die ϵ -constraint-Methode für die Fairnesszielfunktion angewandt. Auch hier werden wieder drei Fuhrunternehmen mit Depot als Datensatz genommen, deren Kundenaufträge entweder gehäuft an Depots oder gleichmäßig verteilt sind. Dabei stellen die Autoren fest, dass bei Fairnesssteigerung um 1 %, gemessen am o. g. Ziel, die Kosten, also das andere Ziel, um weniger als 5 % steigen. Die Ergebnisse werden mithilfe von Paretofronten ermittelt. Die Autoren stellen außerdem fest, dass langfristig orientierte Fairnessmechanismen im Vergleich zu kurzfristigen Fairnessmechanismen einen geringeren Einfluss auf das Ziel der Kostenminimierung haben, d. h., bei kurzfristigen Mechanismen sind die Kosten höher. Grundsätzlich gilt für alle Instanzen, dass eine weitere Reduzierung der Kosten möglich ist, wenn der Zeithorizont der Fairnessberechnung weiter verlängert wird. (Soriano et al. 2023)

Das Paper von Himstedt und Meisel (2021) untersucht den Einfluss von drei Erweiterungen des kooperativen VRP, in welchem Kundenaufträge zwischen Fuhrunternehmen ausgetauscht werden können. Im vorgestellten kostenminimierenden mathematischen Modell hat jedes Fuhrunternehmen ein Depot, von wo aus es seine Kunden mit kapazitätsbeschränkten Fahrzeugen beliefert. Dabei ist es möglich, dass ein Kunde von mehreren Depots beliefert wird. Durch zentrale horizontale Kooperation können 12 bis 38 % an Kosten eingespart werden, abhängig von der jeweiligen Instanz, in der die Anzahl an Kunden und Anzahl an Fuhrunternehmen variiert. Die erste Erweiterung legt fest, dass kein Fuhrunternehmen mehr Kosten durch die Kooperation generiert als ohne Kooperation und unterstützt damit, dass die Kooperation attraktiv bleibt. Durch diese Erweiterung schwächt sich die Kostenreduktion durch die Kooperation ab und liegt zwischen 6 und 28 %. In der zweiten Erweiterung werden Zeitfenster an den Kundenknoten berücksichtigt. Hier ist die Kostenreduktion durch Kooperation stärker und beträgt zwischen 15 und 45 %. Allerdings sind die Kosten absolut höher als beim Kooperationsfall ohne Zeitfenster, da durch die Zeitfenster die Kosten im kooperationslosen Fall deutlich größer sind. Die dritte Erweiterung macht das Modell realistischer, indem es für den Fall festlegt, dass ein Fuhrunternehmen für ein anderes Fuhrunternehmen einen Kundenauftrag ausführt, ein Transferfahrzeug mit den Gütern des Kundenauftrages vom Depot des Kundenauftragseigentümers zum Depot des Kundenauftragsausführers fahren muss. Dadurch wird die Kostenreduktion durch die

Kooperation erwartungsgemäß schwächer, sodass die Kostenreduktion zwischen 3 und 22 % liegt. (Himstedt und Meisel 2021)

Zusammenfassend untersuchen die Veröffentlichungen unterschiedliche Ansätze, um die zentrale horizontale Kooperation mit dem Austausch von Kundenaufträgen langfristig stabiler zu machen. Zum Einsatz kommen Restriktionen, die ein Mindestniveau an Arbeitsbelastung, ein Mindestwert an Profit und/oder eine Mindestanzahl an eigenen Kundenaufträgen garantieren. Es wird deutlich, dass die Stärke des Einflusses dieser Ansätze auf die Vorteile der Kooperation (Kostenreduktion oder Profitsteigerung) sehr unterschiedlich ist. Es ist also maßgeblich von den verwendeten Instanzen, der Verteilung der Kundenaufträge und der Planungssituation abhängig, ob mehr als die Hälfte oder ein kleiner Teil der Vorteile durch diese Stabilitätsansätze wieder verloren geht. Es bleibt festzuhalten, dass die Anwendung von Restriktionen, die eine langfristig stabile Kooperation ermöglichen sollen, zu einer schlechteren Lösung im Sinne des Optimierungsziels führen, d.h. zu weniger Kostenreduktion bzw. Gesamtprofit. Damit ist das Ziel einer langfristig stabilen Kooperation konkurrierend zu dem Ziel der maximalen Vorteile einer Kooperation. Zur Berechnung der relativen Einsparungen im Kooperationsfall ist es entscheidend, die Ausgangslage der Fuhrunternehmen, d. h. die bestehenden Kosten und Erlöse, zu kennen. Denn die relativen Einsparungen werden im Verhältnis zu diesen berechnet und darauf basierend werden Aussagen zum Potential der Kooperation getroffen.

Weitere Erkenntnisse werden in den zugrunde liegenden Veröffentlichungen der o.g. Literature Reviews und in der Monografie (Cruijssen 2020) vorgestellt. Eine tiefere Analyse von Veröffentlichungen mit Bezug zum Hafenhinterland und Containertransport erfolgt in Kapitel 4.2.

3.4 Containerfahrtentypen im Hafenhinterland mit Kooperation

Die Vorteile von Kooperation werden durch die Containerreederei-Allianzen in der maritimen Logistik bereits realisiert (s. Kapitel 5.2). Für die Containerlogistik im Hafenhinterland per LKW existieren derzeit hingegen kaum formalisierte Kooperationen. Die Ergebnisse bzgl. der Gründe, die über die allgemeinen Hindernisse hinaus gehen, wie in Kapitel 3.2.2 aufgeführt, werden im Rahmen einer Interviewstudie in Kapitel 5.3 dargestellt.

Dieses Kapitel zeigt an einem Beispiel grafisch auf, wie Vorteile (vgl. Kapitel 3.2.1) und insbesondere eine Kostenreduktion durch eine erhöhte Auslastung bzw. Effizienz der LKW-Fuhrunternehmen realisiert werden können. Dabei bauen diese Grafiken auf den Abbildungen aus Kapitel 2.3 auf. In Kapitel 4.2 wird dann im Rahmen des systematischen Literature Reviews auf Veröffentlichungen auf dem Gebiet des OR zu Kooperationen von LKW-Fuhrunternehmen im Hafenhinterland eingegangen.

Grundsätzlich ist die mögliche Kostenreduktion durch die Verringerung von Fahrtstrecken, Leerfahrten und der Anzahl der LKW der wesentliche Vorteil einer Kooperation. Eine

Besonderheit bei Kooperationen im Containertransport im Hafenhinterland gegenüber Kooperationen in der Logistik im Allgemeinen ist, dass keine Möglichkeit für den Transport von Teilladungen wie bei LTL besteht, sondern nur der Container als Ganzes transportiert werden kann. Dies liegt daran, dass ein Container ein Ladungsträger ist, der nicht auf einem LKW wie Paletten oder ähnliches gestapelt oder umsortiert werden kann. Außerdem erfordern die Besonderheiten der Import- und Exportfahrten und die Existenz von Leercontainerdepots eine hohe Zahl von Leerfahrten und Leercontainerfahrten. (Islam und Olsen 2014)

Für eine Kooperation in der Containerlogistik im Hafenhinterland sind mindestens zwei Fuhrunternehmen nötig, die Kundenaufträge untereinander austauschen können. Anhand des folgenden Beispiels werden die Effekte der Kooperation anschaulich erläutert. Das LKW-Fuhrunternehmen 1 mit dem LKW-Depot 1 (helle Farbtöne) und das LKW-Fuhrunternehmen 2 mit dem LKW-Depot 2 (dunkle Farbtöne) besitzen jeweils einen Import- (blau) und einen Exportkundenauftrag (grün), die sie als Einzelfahrten ausführen. Die Erläuterung der Containerfahrtentypen in Abbildung 12 erfolgt anhand der Darstellung einer Importfahrt des Fuhrunternehmens 1 und anhand einer Exportfahrt des Fuhrunternehmens 2 bei Nutzung des identischen Leercontainerdepots. In Abbildung 13 dagegen werden zwei unterschiedliche Leercontainerdepots genutzt, wobei jetzt die Importfahrt von Fuhrunternehmen 2 und die Exportfahrt von Fuhrunternehmen 1 betrachtet werden.

Bei Nutzung des identischen Leercontainerdepots (s. Abbildung 12) fährt Fuhrunternehmen 1 einen LKW von seinem Depot leer zum Terminal (1), nimmt dort den vollen Container auf und fährt diesen zum Zielort im Hinterland (2), wartet dort auf das Entladen des Containers, fährt anschließend den Leercontainer zu einem Leercontainerdepot (3), an dem er den Leercontainer abgibt, bevor er leer zurück zum LKW-Depot fährt (4; vgl. linke Tour in Abbildung 12).

Für den Exportkundenauftrag von Fuhrunternehmen 2 fährt ein LKW von seinem Depot leer zu einem Leercontainerdepot (1), fährt dann mit dem Leercontainer zum Startort des Kundenauftrages im Hinterland (2), an dem der Container beladen wird, fährt anschließend mit dem beladenen Container zum Terminal im Hafen (3) und anschließend ohne Container zurück zum LKW-Depot (4; vgl. rechte Tour in Abbildung 12). Die Besonderheit der beiden Touren der unterschiedlichen Fuhrunternehmen in Abbildung 12 liegt darin, dass das bediente Leercontainerdepot identisch ist (dargestellt durch die leichte Überlappung). Dies kann die Kostenreduktion durch eine mögliche Kooperation verstärken.

Zwei Einzelfahrten mit identischem Leercontainerdepot

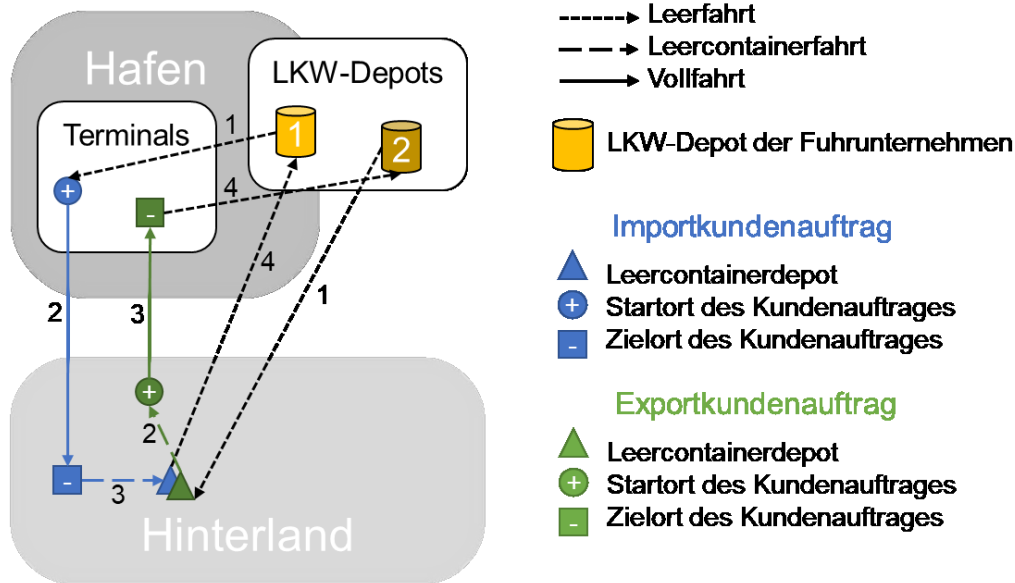


Abbildung 12: Zwei Einzelfahrten mit identischem Leercontainerdepot

Auch bei Nutzung von zwei unterschiedlichen Leercontainerdepots verläuft die Import-Tour von Fuhrunternehmen 2 (vgl. rechte Tour in Abbildung 13) ähnlich zu der o.g. Tour von Fuhrunternehmen 1; ebenso erfolgt auch der Ablauf der Export-Tour von Fuhrunternehmen 1 (vgl. linke Tour in Abbildung 13) ähnlich zur o.g. Tour von Fuhrunternehmen 2.

Zwei Einzelfahrten mit unterschiedlichem Leercontainerdepot

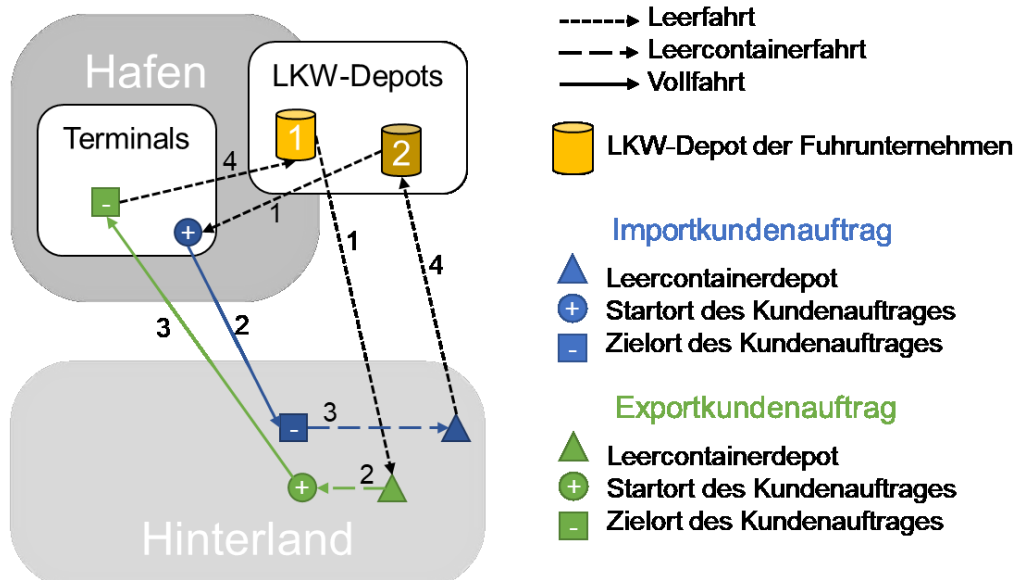


Abbildung 13: Zwei Einzelfahrten mit unterschiedlichem Leercontainerdepot

Es ist nun möglich, dass die beiden Fuhrunternehmen eine horizontale Kooperation eingehen, um von den Vorteilen einer Kooperation zu profitieren. Bei der vorgestellten Art der Kooperation können, wie in der Mehrheit der oben zitierten Veröffentlichungen dargestellt,

Kundenaufträge zwischen den Fuhrunternehmen ausgetauscht bzw. weitergegeben werden. In der Folge kann Fuhrunternehmen 1 Kundenaufträge, die im Besitz von Fuhrunternehmen 2 sind, ausführen. In dieser Arbeit wird dann das Fuhrunternehmen 1 Auftragsausführer und das Fuhrunternehmen 2 Auftragseigentümer genannt. Diese Rollen können auch umgekehrt sein, wenn Fuhrunternehmen 2 einen Auftrag von Fuhrunternehmen 1 ausführt. Diese Ausführung erfolgt entweder in Form einer Einzelfahrt, bei der der Kundenauftrag allein ausgeführt wird, oder in Form einer Kombinationsfahrt mit einem anderen Kundenauftrag. Differenziert nach Import- und Exportkundenauftrag sowie danach, ob das gleiche Leercontainerdepot genutzt wird, können fünf verschiedenen Typen von Kombinationsfahrten auftreten (s. Tabelle 1), die im Folgenden erläutert werden.

Tabelle 1: Typen bzw. Varianten von Kombinationsfahrten durch Kooperation

		Genutzte Leercontainerdepots		
		Identisch	Verschieden	Ohne
Kundenauftragsreihenfolge	Import vor Export	Direkte Kombinationsfahrt	Indirekte Kombinationsfahrt	Kombinationsfahrt mit Containerdrehen
	Export vor Import	(Direkte) Kombinationsfahrt	(Indirekte) Kombinationsfahrt	<i>nicht möglich</i>

Kombinationsfahrten von zwei aufeinanderfolgenden Importkundenaufträgen oder von zwei aufeinanderfolgenden Exportkundenaufträgen sind nicht sinnvoll, da die Strecken zwischen den beiden Kundenaufträgen sehr lang wären. Dies liegt daran, dass Leerfahrten vom Terminal ins Hinterland oder vom Hinterland zum Terminal entstehen. Aus diesem Grund werden sie hier nicht betrachtet. Eine Kombinationsfahrt von Import- mit Exportkundenauftrag und umgekehrt ist dagegen sinnvoll, um Leer- und Leercontainerfahrten im Hinterland in ihrer Anzahl und Länge zu reduzieren. Alle Kombinationsfahrten können entweder von Fuhrunternehmen 1 oder von Fuhrunternehmen 2 ausgeführt werden. In den Abbildungen sind die Fahrten jeweils für eines der beiden Fuhrunternehmen dargestellt.

Eine direkte Kombinationsfahrt, die mit einem Importkundenauftrag beginnt, startet wie alle Fahrten am Depot und führt von dort zum Terminal, an dem der volle Container aufgenommen wird. Danach fährt der LKW mit dem vollen Container zum Zielort des Importkundenauftrages ins Hinterland, an dem der volle Container entladen wird. Anschließend fährt der LKW mit dem Leercontainer zu einem Leercontainerdepot und gibt den Leercontainer des Importkundenauftrages ab. Die Besonderheit ist, dass nun am selben Leercontainerdepot ein anderer Leercontainer aufgenommen wird, der für den nun folgenden Exportkundenauftrag genutzt wird. Der LKW fährt also mit dem Leercontainer zum Startort des Exportkundenauftrages, an dem der Leercontainer beladen wird, und fährt anschließend den vollen Container zum Terminal. Zum Schluss fährt der leere LKW wieder zum Depot. Im Vergleich zu zwei separaten Einzelfahrten (vgl. Abbildung 12) kann die Anzahl der Leerfahrten

von vier auf zwei reduziert werden. Zusätzlich ist auch die Länge der Leerfahrten geringer. (s. linke Grafik in Abbildung 14).

Es ist auch denkbar, eine Kombinationsfahrt durchzuführen, die mit dem Exportkundenauftrag beginnt. In diesem Fall muss der LKW erst zum Leercontainerdepot fahren, bevor er mit dem Leercontainer zum Startort des Exportkundenauftrages und anschließend zum Zielort des Auftrages (dem Terminal) fährt. Von diesem Terminal fährt der LKW leer zu einem anderen Terminal, welches dem Startort des Importkundenauftrages entspricht. Dabei ist es auch möglich, dass es sich um das identische Terminal handelt, was aber hier nicht extra differenziert wird. Anschließend fährt der LKW mit dem vollen Container zum Zielort des Importkundenauftrages. Zum Schluss fährt der LKW den nun (ausgeladenen) leeren Container zum Leercontainerdepot, das er zu Beginn seiner Fahrt schon besucht hatte und anschließend zurück zum LKW-Depot (s. rechte Grafik in Abbildung 14). Da in dieser Fahrt der Vorteil des identischen Leercontainerdepots nicht genutzt wird, steht in der Tabelle 1 der Begriff „direkte“ in Klammern. So können bei einer direkten Import-Export-Kombinationsfahrt zwei Leerfahrten und bei einer Export-Import-Kombinationsfahrt eine Leerfahrt eingespart werden (vgl. Abbildung 14 mit Abbildung 12). Attraktiver ist die Export-Import-Kombinationsfahrt dann, wenn sich das Leercontainerdepot geografisch zwischen dem LKW-Depot und dem Startort des Exportkundenauftrages sowie dem Endknoten des Importkundenauftrages befindet, sodass die Länge der Leerfahrten kürzer ist.

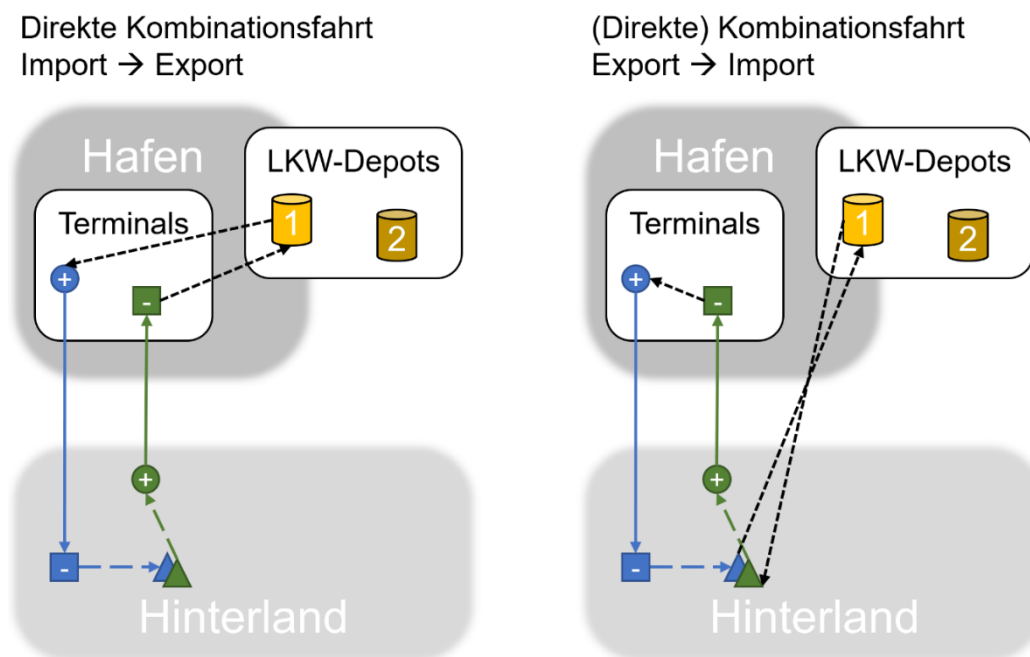


Abbildung 14: Direkte Kombinationsfahrten

Bei den indirekten Kombinationsfahrten sind die Leercontainerdepots unterschiedlich, sodass bei einer Kombination von einem Import- und einem anschließenden Exportkundenauftrag zwingend eine weitere Leerfahrt zwischen den Leercontainerdepots entsteht. In diesem Fall reduziert sich die Anzahl der Leerfahrten von vier auf drei Leerfahrten (s. linke Grafik in Abbildung 15 im Vergleich zu Abbildung 13). Die restlichen Strecken sind vom Typ her

identisch zum o. g. Fall der direkten Kombinationsfahrt, die mit einem Importkundenauftrag beginnt.

Der Unterschied zwischen der „(indirekten) Kombinationsfahrt“ und der „(direkten) Kombinationsfahrt“ besteht nur darin, dass die (indirekte) Kombinationsfahrt, die mit einem Exportkundenauftrag beginnt, für die Abholung des Exportcontainers ein anderes Leercontainerdepot nutzt als später für die Abgabe des Importcontainers (s. rechte Grafik in Abbildung 15). Ansonsten sind die restlichen Strecken vom Typ her identisch.

Indirekte Kombinationsfahrt
Import → Export

(Indirekte) Kombinationsfahrt
Export → Import

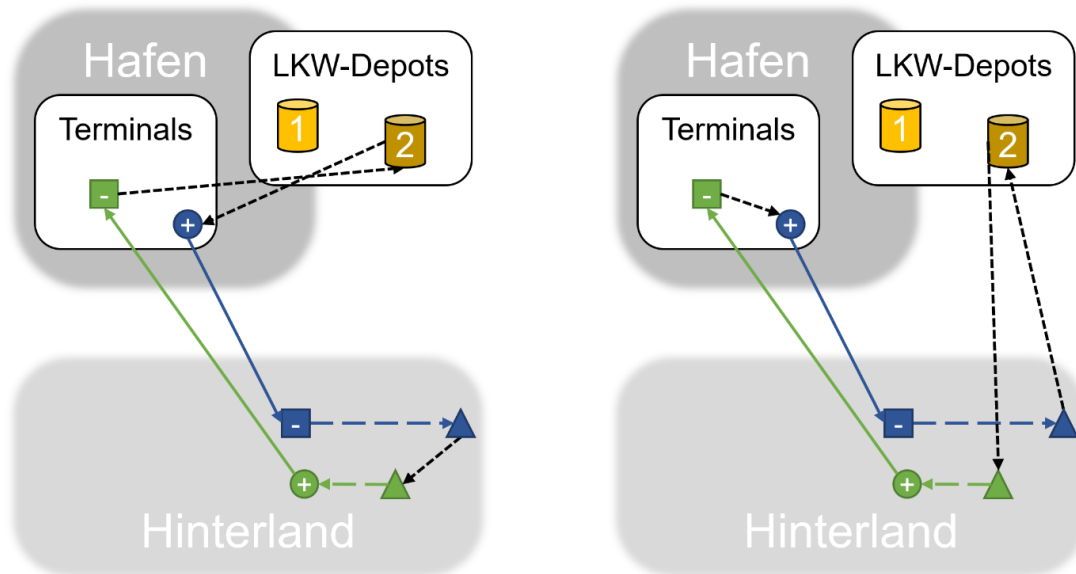


Abbildung 15: Indirekte Kombinationsfahrten

Die Kombinationsfahrt mit Containerdrehen ist nur für die Kombination aus einem Importkundenauftrag mit einem anschließenden Exportkundenauftrag möglich und benötigt keinen Halt an einem Leercontainerdepot. Vom LKW-Depot wird zuerst das Terminal, welches der Startort des Importkundenauftrages ist, angefahren, bevor der volle Container zum Zielort im Hinterland transportiert wird. An diesem Zielort wird der Container entladen und geprüft, ob er unmittelbar weiterverwendet werden kann. Ist dies der Fall, wird er nicht zu einem Leercontainerdepot, sondern direkt zum Startort des Exportkundenauftrages transportiert. Dort wird er wieder beladen und anschließend zum Zielort des Exportkundenauftrages, einem Terminal, transportiert. Zuletzt fährt der LKW leer wieder zum Depot. Durch diese Tour ist eine Reduzierung der Anzahl der vier Leerfahrten auf zwei Leerfahrten und auch eine Reduzierung der Anzahl der zwei Leercontainerfahrten auf nur noch eine Leercontainerfahrt möglich. Die Kosten der reduzierten Fahrten werden eingespart und dadurch die Effizienz gesteigert. Die Abbildung 16 zeigt die Kombinationsfahrt mit Containerdrehen in den zwei möglichen Ausführungen, bei denen jeweils eine Kundenauftragsfahrt nicht vom Kundenauftrags-eigentümer ausgeführt wird (dunkelgrün links ist im Eigentum von Fuhrunternehmen 2; hellgrün rechts ist im Eigentum von Fuhrunternehmen 1).

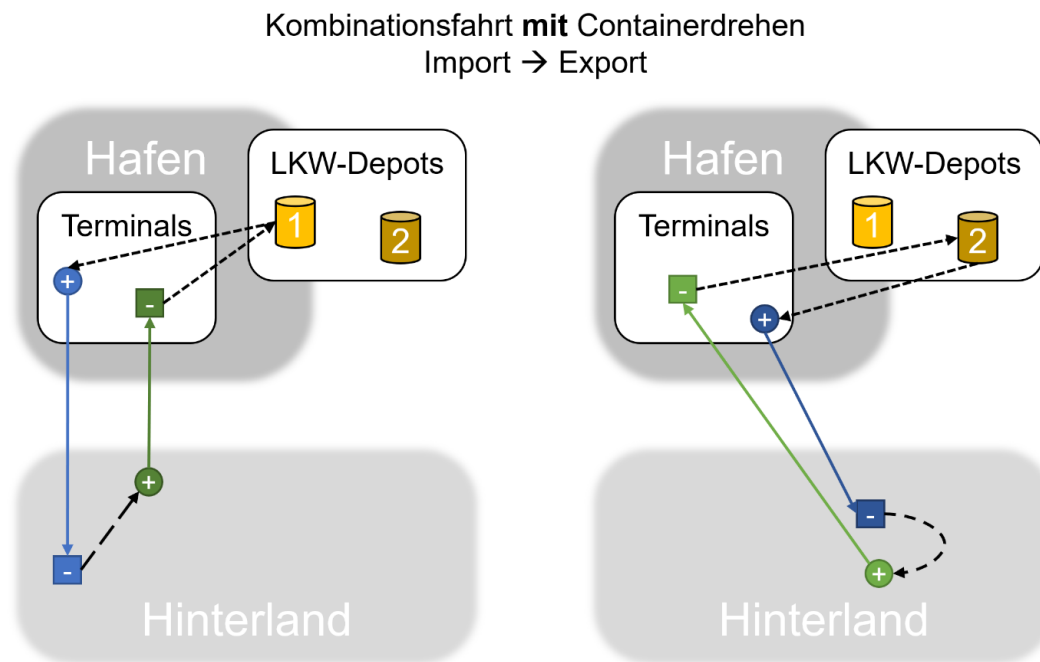


Abbildung 16: Kombinationsfahrten mit Containerdrehen

Uddin und Huynh nennen die kooperative Kombinationsfahrt mit Containerdrehen *horizontal street turn*, im Gegensatz zum Containerdrehen ohne Kooperation (vgl. Abbildung 6), welches die Autoren *vertical street turn* nennen (Uddin und Huynh 2020). Ebenso gelten die in Kapitel 2.3 beschriebenen Voraussetzungen für das Containerdrehen (gleiche Spezifikationen, Einverständnis Containereigentümer) für den Fall, dass die Kombinationsfahrt mit Containerdrehen durch Kooperation entstanden ist.

Durch die reduzierte Anzahl und Länge an Leercontainer- und Leerfahrten wird illustriert, dass durch die Kooperation in der Containerlogistik im Hafenhinterland per LKW die Effizienz gesteigert und die Kosten reduziert werden können. Die Kombinationsfahrten mit Kooperation sind vergleichbar mit den Kombinationsfahrten ohne Kooperation. Allerdings ist es entscheidend, dass man genug (in zeitlicher und geografischer Sicht) zueinander passende Kundenaufträge besitzt, um Kombinationsfahrten zu entwickeln. Um eben diese kritische Masse an Kundenaufträgen zu erreichen, ist es sinnvoll, eine horizontale Kooperation mit anderen Fuhrunternehmen einzugehen.

Veröffentlichungen im Bereich des OR, die sich dem Aspekt der Optimierung von Containertransporten per LKW im Hafenhinterland mit Kooperation widmen, werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

4 Analyse von Operations Research Ansätzen für Kooperation im Hafenhinterland per LKW

Das vorangegangene Kapitel 3.3 hat gezeigt, dass mithilfe der Anwendung der Methoden des OR in vielen Veröffentlichungen das Thema der Kooperation in der Logistik behandelt wird. Die Besonderheiten der Containertransporte im Hafenhinterland (vgl. Kapitel 2.3 und 3.4) erfordern allerdings eine genauere Betrachtung dieser Problemstellung. Daher werden nun mithilfe eines systematischen Literature Reviews die bestehenden Ansätze und Veröffentlichungen, in denen eine Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW mit Kooperation vorgestellt wird, analysiert und diskutiert. Dabei sind u. a. folgende Aspekte von Bedeutung und werden in der Analyse berücksichtigt:

- Faire und langfristig-orientierte Kooperation (Forschungslücken identifiziert von: Aloui et al. 2021; Pan et al. 2019)
- Emissionsminimierung, die für den LKW-Verkehr politisch diskutiert wird (vgl. Kapitel 2.4.1; erweiterter Forschungsbedarf benannt von Aloui et al. 2021; Gansterer und Hartl 2020)
- Unsicherheit (vgl. Kapitel 2.4.2, Forschungslücke identifiziert von: Aloui et al. 2021; Gansterer und Hartl 2018b)

4.1 Methodik des Literature Reviews

Der Aufbau dieses Literature Reviews orientiert sich an der Methodik von Tranfield et al. (2003) und Durach et al. (2017). Das Vorgehen gliedert sich wie folgt: 1. Festlegung der Suchwörter, 2. Definition von Inklusions- und Exklusionskriterien, 3. Auswahl der Datenbanken, 4. Auswahl der Paper, 5. Auswertung und Analyse. Ziel des Literature Reviews ist es, den aktuellen Stand der Forschung zur Optimierung des Containertransportes mit Kooperation im Hafenhinterland per LKW zu erheben. Es wird dabei untersucht, ob und wenn ja, wie in den vorgestellten mathematischen Modellen Ansätze zur fairen Vorteilsverteilung bzw. zur Unterstützung langfristig stabiler Kooperation umgesetzt werden. Außerdem wird analysiert, ob und wenn ja, wie Unsicherheit und ökologische Zielsetzungen berücksichtigt werden.

Die Festlegung der Suchwörter erfolgt mithilfe der Überlegung, dass die Veröffentlichungen Forschungsergebnisse zum Thema maritimes Hinterland und Straßentransport per LKW und

Kooperation und Optimierung vorstellen müssen. Diese vier Themen müssen also gemeinsam behandelt werden. Zu jedem dieser Themen werden Synonyme ausgewählt, die ebenfalls als Suchbegriffe genutzt werden.

Bezüglich der Inklusions- und Exklusionskriterien ist festgelegt, dass peer reviewed Beiträge in Journals und Proceedings sowie Buchkapitel berücksichtigt werden. Es werden englische Suchbegriffe verwendet, um relevante wissenschaftliche Journals zu berücksichtigen. Alle nicht englischsprachigen Quellen sind ausgeschlossen. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Arbeit und der Aktualität des Themas ist der Zeithorizont von 2010 bis April 2021 festgelegt.

Nicht betrachtet werden sollen Publikationen, die sich ausschließlich mit vertikaler Kooperation oder dezentraler horizontaler Kooperation befassen. Der Fokus liegt auf quantitativer Forschung, sodass auch qualitative Forschung in diesem Review ausgeschlossen wird. Außerdem soll nur der Verkehrsträger Straße betrachtet werden. Publikationen, die sich mit mehreren Verkehrsträgern im Hafenhinterland, also mit intermodalen Verkehren, auseinandersetzen, sind nicht Teil des Reviews. Auch Veröffentlichungen, die sich auf die Optimierung innerhalb eines Containerterminals fokussieren, wie bspw. das Routing von Fahrzeugen von der Kaikante zum Lager, sind ausgeschlossen.

Des Weiteren werden die Datenbanken Scopus, Web of Science und IEEE verwendet, um alle relevanten Publikationen aus verschiedenen Disziplinen wie Management, Logistik und Ingenieurwesen zu identifizieren.

Die folgende Tabelle 2 beschreibt die Struktur der verwendeten Suchbegriffe, die aus den vier "und"-Themenspalten bestehen, in denen jeweils unterschiedliche Synonyme mit "oder" kombiniert werden. Suchbegriffe mit einem * akzeptieren unterschiedliche Endungen wie Collaboration oder collaborative. Suchbegriffe mit einem „?“ akzeptieren jeden Buchstaben an dieser Stelle wie Optimisation oder Optimization.

Tabelle 2: Suchbegriffe des Literature Reviews

	AND	AND	AND	AND
OR	Maritime*	„Freight forwarder“	Cooperati*	Optimi?ation
OR	Port	Carrier*	Collaborati*	„Operation Research“
OR	Container	Truck*	Share*	„Mathematical Programming“
OR	Hinterland	Trailer	Alliance	MILP
OR	Drayage	Chassi	Coalition	MLP
OR		„Road freight“		Simulation
OR				Heuristic
OR				Model
OR				Algorithm*
OR				Machine Learning
OR				Deep Learning
OR				Artificial Intelligence
OR				DSS
OR				Decision Support System
OR				Analytics

Die exakten Suchstrings für die drei Datenbanken sind im Anhang 12.1 zu finden. Die Kombination dieser Suchbegriffe wird in Titel, Abstract und Keywords der Publikationen in den Datenbanken gesucht.

Insgesamt resultieren bei Verwendung der Suchbegriffe mehr als 300 Publikationen in den drei Datenbanken (214 Scopus + 18 IEEE + 95 Web of Science). Durch das Entfernen von Duplikaten verbleiben 226 Publikationen. Es ist festzuhalten, dass trotz Verwendung dieses präzisen Suchstrings viele Artikel aufgelistet sind, die sich mit anderen Themen beschäftigen. Diese Publikationen wurden durch das Lesen der Titel und des Abstracts identifiziert und entfernt. 47 verbleibende Paper wurden anschließend vollständig untersucht. Alle Kriterien dieses systematischen Literature Reviews erfüllten letztlich jedoch nur sechs Paper vollständig.

Mithilfe eines Schneeballverfahrens wurden weitere Publikationen identifiziert. Beim Snowballing-Verfahren wird die Referenzliste bereits gefundener und ausgewählter Veröffentlichungen im Hinblick auf weitere geeignete Paper analysiert (backward snowballing). Darüber hinaus können auch die Paper analysiert werden, die eine bereits gefundene Veröffentlichung zitieren (forward snowballing). Diese weiteren Arbeiten werden dann ausgewertet und ggf. dem Literatur Review hinzugefügt (Wohlin, 2014). Durch Snowballing-Techniken wurden drei neue Publikationen ergänzt. Damit stehen insgesamt neun Paper für die detaillierte Auswertung zur Verfügung

4.2 Auswertung der Literatur

In diesem Kapitel werden die einzelnen Paper detailliert untersucht. Hierzu erfolgt zunächst ein tabellarischer Überblick über die neun Paper (Kapitel 4.2.1). Im Anschluss werden die Paper jeweils detailliert mit ihren Besonderheiten vorgestellt und ausgewertet (Kapitel 4.2.2).

4.2.1 Tabellarischer Literaturüberblick

Die folgende Tabelle 3 gibt einen Überblick über die identifizierten neun Veröffentlichungen, die ein oder z.T. mehrere mathematische Modelle zur **Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW unter Berücksichtigung von Kooperation** vorstellen. Die Veröffentlichungen werden nach folgenden Kriterien kategorisiert:

- horizontale und vertikale Kooperation, wobei vertikale Kooperation nur in Kombination mit horizontaler Kooperation auftreten kann aufgrund o. g. Exklusionskriterien
- Austauschgut: Kapazität oder Kundenauftrag
- Anwendung von Ansätzen zur langfristigen Kooperation
- Verwendete Zielsetzung(en)
- Berücksichtigung von Unsicherheit.

Es ist festzustellen, dass fünf Veröffentlichungen die Thematik „Austausch von Kundenaufträgen“ und vier Veröffentlichungen den „Austausch von Kapazität“ behandeln. Fünf der neun Paper wenden Ansätze zur Unterstützung langfristig stabiler Kooperation an. Alle Veröffentlichungen nutzen ökonomische bzw. monetäre Zielfunktionen. Aus diesem Grund werden ökologische Ziele, wie die Minimierung von Emissionen, in der Analyse nicht mit betrachtet. Lediglich drei Paper berücksichtigen Unsicherheit.

Tabelle folgt im Querformat auf Doppelseite.

Tabelle 3: Literaturüberblick

Paper	Kooperationstyp		Teilen/Austausch von		Ansätze zur langfristigen Kooperation	Ökonomische Ziele	Berücksichtigung von Unsicherheit
	Hori-zontal	vertikal	Kapa-zität	Kunden-aufträgen			
Caballini et al. 2016	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> (heterogene) Kompensation <input checked="" type="checkbox"/> besser durch Kooperation	<input checked="" type="checkbox"/> Max Profit	Nein, deterministisch
Caballini et al. 2017	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> besser durch Kooperation (via Zielfunktion)	<input checked="" type="checkbox"/> Max Profit	Nein, deterministisch
Calore et al. 2017	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> (heterogene) Kompensation <input checked="" type="checkbox"/> besser durch Kooperation	<input checked="" type="checkbox"/> Max Profit	Nein, deterministisch
Irannezhad et al. 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	Nein	<input checked="" type="checkbox"/> Min Zeit und Anzahl LKW	Nein, aber vier Fahrzeiten je Strecke
Kopfer et al. 2010	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		Nein	<input checked="" type="checkbox"/> Min Betriebs- und Wartezeit	Nein, deterministisch

Paper	Kooperationstyp		Teilen/Austausch von		Ansätze zur langfristigen Kooperation	Ökonomische Ziele	Berücksichtigung von Unsicherheit
	Hori-zontal	vertikal	Kapa-zität	Kunden-auftrag			
Luo et al. 2021	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Kompensation	<input checked="" type="checkbox"/> Max Profit	<input checked="" type="checkbox"/> Nachfrage stochastisch,
Sterzik et al. 2015	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		Nein	<input checked="" type="checkbox"/> Min Zeit und davor Min Anzahl LKW	Nein, deterministisch
Uddin und Huynh 2020	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> besser durch Kooperation <input checked="" type="checkbox"/> Gleichmäßiger Vorteilsausgleich	<input checked="" type="checkbox"/> Min Cost	<input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeiten stochastisch, umgesetzt mit 1-Alpha Restriktion
Widjanarka et al. 2018	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		Nein	<input checked="" type="checkbox"/> Max Profit	<input checked="" type="checkbox"/> Nachfrage stochastisch

4.2.2 Detaillierter Literaturüberblick zu Kooperation im Hafenhinterland mit LKW

Das Paper von Caballini et al. (2016) beschäftigt sich mit der Reduzierung von Leercontainerfahrten im direkten Hinterland von Seehäfen durch Kooperation zwischen LKW-Fuhrunternehmen.

Die Autoren wählen einen zentralen Kooperationsansatz mit einem Kompensationsmechanismus. Der Kompensationsmechanismus beinhaltet, dass Unternehmen monetäre Beträge von einem anderen Unternehmen erhalten, wenn sie an dieses ihre Kundenaufträge weitergeben. Der Auftragsausführer zahlt also einen Betrag an den Auftragseigentümer. Die Höhe des Betrags kann je nach Relevanz des Kundenauftrages für den Auftragseigentümer variieren. Darüber hinaus wird garantiert, dass jedes einzelne Unternehmen durch kooperatives Verhalten mindestens so viel Profit generiert, wie es ohne Kooperation erreicht hätte (in Tabelle als „besser durch Kooperation“ gekennzeichnet). Hierdurch sollen die Fuhrunternehmen motiviert werden, ihre Kundenaufträge immer wieder und somit langfristig mit den Wettbewerbern zu teilen.

Ziel des mathematischen Modells ist es, die Kundenaufträge profitmaximal auf die Fuhrunternehmen zu verteilen. Der Profit berücksichtigt die Erlöse je Kundenauftrag und Kosten je Fahrt (inkl. etwaiger Repositionierungs-Fahrtkosten bei kombinierten Fahrten) sowie Verspätungskosten. Zeitfenster der Kundenaufträge und die maximale Anzahl an verfügbaren LKW werden außerdem berücksichtigt. Das Modell beinhaltet, dass eine Import- und eine Exportfahrt (oder umgekehrt) miteinander kombiniert werden können, um Leerfahrten zu vermeiden. Da es sich um eine tägliche Planung handelt, können nicht mehr als zwei Fahrten bzw. Kundenaufträge miteinander kombiniert werden, d. h., längere tagesübergreifende Kombinationsfahrten sind nicht möglich. Eine Vereinfachung ist, dass das Leercontainerdepot in diesem Modell immer im Hafen ist und daher die Strecke zwischen Leercontainerdepot und den Startorten von Importkudenaufträgen bzw. den Zielorten von Exportkudenaufträgen vernachlässigt wird. Außerdem wird angenommen, dass bei kombinierten Fahrten immer der gleiche Container genutzt werden kann, sodass kein Leercontainerdepot genutzt werden muss. Es werden Wartezeiten für den Fahrer durch das Aus- und Einladen berücksichtigt. Bezüglich Einzelfahrten differenzieren Caballini et. al (2016) zwischen zwei Strategien: Entweder können Einzelfahrten, bestehend aus nur einem Kundenauftrag, nicht kombiniert (s. Kapitel 3.4) werden und werden entsprechend nur vom Auftragseigentümer gefahren, oder die Einzelfahrten können an ein anderes Unternehmen weitergegeben werden.

Das betrachtete Anwendungsbeispiel ist ein sternförmiges Netzwerk mit einem Terminal, basierend auf der Stadt Genua. Alle Daten sind deterministisch, es wird keine Unsicherheit berücksichtigt. Der Basisfall besteht aus 30 täglichen Kundenaufträgen. Umfangreiche Analysen, wie z. B. eine Variation der Kompensationsbeträge, werden durchgeführt. Die Experimente zeigen unter anderem, dass die Wahl bzw. Höhe des Kompensationsbetrags, insbesondere in Abhängigkeit von der Kostenstruktur des Kundenauftragsausführers, ein entscheidendes Kriterium für eine Kooperation ist.

Außerdem ist festzustellen, dass die Profitsteigerungen durch die Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen sehr ungleichmäßig verteilt sind, sodass der Profit für alle Fuhrunternehmen zwar gesteigert wird, allerdings für ausgewählte Fuhrunternehmen eine deutliche Steigerung von mehr als 100 % möglich ist. Als zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten identifizieren die Autoren weitere Restriktionen, wie die Berücksichtigung der maximalen Arbeitszeit der LKW-Fahrer und die Standorte der LKW-Depots. (Caballini et al. 2016)

In ihrem Konferenzbeitrag legen Caballini et al. (2017) ihren Fokus auf einen zweiphasigen Ansatz. Das erste mathematische Modell kombiniert die Kundenaufträge aller Fuhrunternehmen, optimiert diese zwar hinsichtlich der Kosten, lässt jedoch die Zuordnung der Fahrten zu den Fuhrunternehmen außer Acht. Diese erfolgt dann im zweiten Modell. Hier werden die Einzel- oder Kombinationsfahrten einer fixierten Anzahl von Fuhrunternehmen zugeordnet. Das zweite Modell wird mehrmals mit einer unterschiedlichen Anzahl an Fuhrunternehmen optimiert. Hierbei werden dann auch sog. Koalitionsmanagementkosten vom o. g. Profit subtrahiert; diese Kosten steigen linear mit der Anzahl der teilnehmenden Fuhrunternehmen. So soll am Ende die Anzahl an Fuhrunternehmen bestimmt werden, mit der der höchste Profit erreicht werden kann.

Die zu minimierende Zielfunktion des zweiten Modells besteht aus zwei Summanden. Der erste Summand gibt die Summe aller Transportkosten an. Der zweite Summand erfasst die Differenz zwischen dem initialen Profit ohne Kooperation und den finalen Profit mit Kooperation je Fuhrunternehmen. Dabei werden nur Differenzen, bei denen der initiale Profit größer als der finale Profit ist, in der Zielfunktion berücksichtigt. Diese Werte, die also für jedes Fuhrunternehmen den Profitverlust durch die Kooperation angeben, wirken dann als Strafkosten in der Zielfunktion. Damit unterstützt das zweite Modell eine faire Vorteilsverteilung, indem es einen Profitrückgang durch Kooperation bestraft, aber nicht grundsätzlich ausschließt bzw. eine Profitsteigerung durch die Kooperation begünstigt. Es werden im zweiten Modell allerdings nur Kombinationsfahrten und keine Einzelfahrten berücksichtigt, da nach Meinung der Autoren Einzelfahrten stets beim Auftragseigentümer verbleiben. Dies ist eine Vereinfachung, da auch Einzelfahrten von einem anderen Fuhrunternehmen als dem Auftragseigentümer ausgeführt werden könnten. Unsicherheit und nicht monetäre Zielsetzungen werden nicht berücksichtigt.

Als Anwendungsbeispiel werden reale Daten aus Norditalien verwendet. Die Autoren kommen zu folgenden zwei Ergebnissen: Je höher die Koalitionsmanagementkosten, desto weniger Fuhrunternehmen sollten miteinander kooperieren, und je höher die Anzahl an Kundenaufträgen ist, desto mehr Fuhrunternehmen sollten kooperieren. Die Autoren stellen fest, dass eine Kooperation vieler Fuhrunternehmen angesichts nur weniger Kundenaufträge unter dem Aspekt des Profits einen Nachteil bedeutet. Das liegt daran, dass die vielen Fuhrunternehmen möglichst keinen Kostennachteil durch die Kooperation haben sollen und so den Lösungsraum deutlicher einschränken als wenige Fuhrunternehmen. Der Profit kann abhängig von der Instanz um 1 bis 20 % gesteigert werden. Als Themen für zukünftige Forschung sehen die Autoren die Einführung nicht-linearer Kostenstrukturen und eine Integration beider Modelle in ein Modell. (Caballini et al. 2017)

Der Konferenzbeitrag von Calore et al. (2017) mit Caballini als Co-Autorin stellt eine Weiterentwicklung zu o. g. Paper dar. Die Problemstellung besteht auch hier aus der optimalen Zuordnung von Kundenaufträgen unterschiedlicher Fuhrunternehmen mit Kooperation und Kombinationsfahrten. Eine Verbesserung besteht hinsichtlich eines erweiterten Zeithorizontes. Mit diesem Modell können nun mehrere Tage zusammen optimiert werden. Hierdurch ist es möglich, dass Kundenaufträge, die geteilt oder kombiniert werden, an anderen als den ursprünglich vorgesehenen Tagen ausgeführt werden. Dadurch sind die Verfrühungs- und Verspätungskosten, die neben den Fahrtkosten und Auftragserlösen in der Zielfunktion berücksichtigt werden, von großer Bedeutung. Insgesamt wird mit der Zielfunktion der Gesamtprofit maximiert. Auch die Kompensationszahlungen von Fuhrunternehmen an andere Fuhrunternehmen sind in der Zielfunktion berücksichtigt, diese gleichen sich aber über alle Fuhrunternehmen aus und sind daher eigentlich in der Zielfunktion nicht nötig. Die Systematik der Kompensationskosten ist identisch zu der von Caballini et al. (2016) verwendeten Systematik. Auch hier wird wieder verlangt, dass der initiale Profit ohne Kooperation kleiner ist als der finale Profit mit Kooperation. Das Modell unterstützt also auch langfristige Kooperation. Unsicherheit und nicht monetäre Zielsetzungen werden allerdings nicht berücksichtigt. Das Anwendungsbeispiel besteht aus einem sternförmigen theoretischen Netzwerk. Im Ergebnis kann durch die Kooperation der Profit für alle Fuhrunternehmen gesteigert werden, wobei die Profitsteigerung je Fuhrunternehmen sehr unterschiedlich ausfällt und zwischen ca. 20 % und ca. 200 % liegen kann (Calore et al. 2017). Das Modell wird in dieser Arbeit genutzt als Basis für das neu entwickelte mathematische Modell (s. Kapitel 7.2).

Irannezhad et al. (2020) kombinieren vertikale und horizontale Kooperation, indem sie ein Decision Support System (DSS) für Fuhrunternehmen, Containerterminals, Importeure und Exporteure sowie Stauereien in der Hafenlogistik entwickeln. Hierfür nutzen sie eine multi-agenten Simulation, die auch ein Optimierungsmodell beinhaltet. Das Verhalten der Agenten basiert auf einem Reinforcement Learning Modell. Die Agenten können in jeder Lernphase entscheiden, ob sie ihren Status quo beibehalten, ihren eigenen Fahrtenplan optimieren oder mit einem anderen Agenten einen gemeinsamen Fahrtenplan optimieren wollen, um so ihre eigene Ersparnis zu erhöhen. Für den Fahrtenplan wird eine zentrale Optimierung durchgeführt, die mit einem Tabu Search Algorithmus gelöst wird. Damit bewegt sich das Paper an der Grenze von zentraler und dezentraler Kooperation. Das Optimierungsmodell minimiert die Fahrzeit und die Anzahl an LKW unter Berücksichtigung von Kapazitäten und Zeitfenstern. Unsicherheit wird rudimentär im Optimierungsmodell berücksichtigt, indem für jede Strecke vier unterschiedliche Fahrzeiten möglich sind (HVZ morgens, mittags, HVZ abends, nachts).

Das Paper geht nicht auf Ansätze zu fairer Vorteilsverteilung oder nicht-monetäre Zielsetzungen ein. Die Datengrundlage basiert auf Containerbewegungen im Port of Brisbane über die Dauer von zwei Wochen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auslastung der LKW durch Austauschen von Fahrten erhöht und die Fahrtstrecken und -kosten reduziert werden können. 50 % an Kostenreduktion ist insgesamt möglich, wenn alle Marktteilnehmer bzw. Agenten an der Kooperation teilnehmen. Außerdem stellten die Autoren fest, dass eine Kooperation insbesondere für kleinere Agenten sinnvoll ist. (Irannezhad et al. 2020)

Kopfer et al. (2010) stellen in ihrem Konferenzbeitrag zwei mathematische Modelle mit und ohne „Container Sharing“ vor. Das Anwendungsbeispiel bilden ein Containerterminal, ein Leercontainerdepot und eine limitierte Anzahl an LKW, um Kundenaufträge (Export oder Import) auszuführen und Leercontainer im Hinterland zu transportieren. Im ersten Modell können die Leercontainer nur zu einem bestimmten Leercontainerdepot gefahren werden. Im zweiten Modell können Leercontainer zwischen den Kunden ausgetauscht werden. Somit werden sowohl die LKW als auch die Container koordiniert und geplant. Es handelt sich also nicht um das Teilen von Kundenaufträgen, sondern um das Teilen von Containern. Die Optimierungsmodelle minimieren die Betriebs- und Wartezeiten der LKW. Allerdings finden Ansätze zur langfristigen Kooperation und zur Unsicherheit keine Berücksichtigung. Ergebnisse von Optimierungsrechnungen werden in dem Konferenzbeitrag nicht vorgestellt. (Kopfer et al. 2010)

Luo et al. (2021) stellen einen Ansatz für eine Leercontainerkapazitätsplanung aus der Sicht von Spediteuren vor. Hierbei ist es möglich, dass die Spediteure zu Beginn des Zeithorizontes die Anzahl an Leercontainerleasings für die vorhergesagte Nachfrage und Leercontaineroptionen für mögliche unvorhergesehene Schwankungen der Nachfrage festlegen. Die tatsächliche Nachfrage ist also unsicher. Die Autoren stellen drei Varianten vor. Nur das erste Modell beinhaltet keine Optionsverträge. Im zweiten Modell können Spediteure mit Optionsverträgen Leercontainer bestellen und diese nutzen, wenn diese auch tatsächlich benötigt werden. Da die Spediteure vor und während der Planungsperiode ihre Optionen anpassen können, sprechen die Autoren von einem „two-echelon option contract“. Ein drittes Modell ermöglicht die Kooperation zwischen zwei Spediteuren, in der Optionen miteinander gehandelt werden können. Hier geht es also um den Austausch von Kapazitäten gegen eine Kompensationszahlung. Das Ziel ist, dass die Spediteure ihren Profit maximieren. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass Optionshandel die Risiken der Spediteure reduzieren und gleichzeitig eine win-win Situation herbeiführen kann. (Luo et al. 2021)

In dem Paper von Sterzik et al. (2015) widmen sich die Autoren dem Container Sharing. Konkret können hier LKW-Fuhrunternehmen im Hafenhinterland Leercontainer miteinander austauschen, um Kosten zu sparen. Die Ausgangssituation bilden mehrere Terminals, eine bekannte Anzahl an Kunden(-aufträgen) und mehrere LKW-Fuhrunternehmen mit eigenen Depots. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass in diesen Depots auch die Leercontainer lagern. Gegeben sind Exportkundenaufträge (im Paper Outbound-Full genannt) vom Hinterland zum Containerterminal und Importkundenaufträge (im Paper Inbound-Full genannt) vom Containerterminal ins Hinterland. In der Konsequenz muss die Optimierung u. a. die Leercontainerrepositionierung aus Inbound-Empty und Outbound-Empty Fahrten ermitteln.

Eine Besonderheit des vorgestellten mathematischen Modells ist, dass durch die Differenzierung zwischen Container und LKW, der LKW nicht auf das Aus- oder Einladen des Containers warten muss, sondern den Container sofort abladen und später wieder abholen kann. Dabei kann die Abholung auch durch einen anderen LKW erfolgen. Das ermöglicht eine Differenzierung der Zeitfenster, nämlich ein Zeitfenster für die Ankunft des

Containertransportes am Knoten und ein Zeitfenster für das Abholen des Containers am Knoten.

Zwei Szenarien werden verglichen. Im ersten Szenario ohne Kooperation können Leercontainer nur in den Depots desselben Fuhrunternehmens gelagert werden. Im zweiten Szenario ist Kooperation möglich, sodass der Austausch von Leercontainern zwischen den Fuhrunternehmen erlaubt ist, was zu einer höheren Flexibilität bei der Gestaltung der Route führt. Es handelt sich hierbei also um das Teilen der Kapazitäten. Die Kundenaufträge dürfen auch im Kooperationsszenario nicht ausgetauscht werden, sodass jedes Fuhrunternehmen weiterhin seine Aufträge ausführt. Konkret sollen die Routen der LKW und der Container unter Berücksichtigung der Fahrzeiten optimiert werden. Dies wird in einem ersten Schritt abgebildet durch die Minimierung der Anzahl an LKW, bevor in einem zweiten Schritt die Betriebszeit (der mindestens erforderlichen) LKW minimiert wird. Im ersten Schritt wird dabei iterativ die Anzahl an LKW erhöht, und zwar so lange, bis das Optimierungsmodell des zweiten Schrittes eine zulässige Lösung generieren kann. Dieses Vorgehen hat also zum Ziel, die (nicht näher betrachteten fixen) Kosten von LKW und die Fahrzeit der benötigten LKW zu minimieren. Eine Berücksichtigung der Fahrdistanz der LKW erfolgt nicht.

Zur Ermittlung der optimalen Lösung wird eine Tabu Search Heuristik angewandt. Die Daten basieren auf fünf Fuhrunternehmen mit je einem Depot und je 15 Kundenaufträgen sowie drei Terminals. Durch das Teilen der Leercontainer kann bei kleinen Zeitfenstern die Anzahl an LKW (fixe Kosten) um 5 bis 12 % und die Betriebszeit der LKW (variable Kosten) um durchschnittlich 8 % reduziert werden. Bei großen Zeitfenstern ist die durchschnittliche Reduktion der gesamten Betriebszeit der LKW nicht so groß und liegt bei 6 %, da die Flexibilität für das eigene Fuhrunternehmen bereits ohne Kooperation bei der Routenerstellung größer ist als bei kleinen Zeitfenstern. Das eigene Fuhrunternehmen kann in dem Fall die Anzahl an LKW (fixe Kosten) um weniger als 2 % durch Kooperation reduzieren. Die Autoren zeigen auf, dass in einzelnen Datenbeispielen die Vorteile durch die Kooperation sehr ungleich verteilt sind. Dies liegt daran, dass keine Fairnessmechanismen für eine Vorteilsverteilung bzw. Ansätze zur langfristig stabilen Kooperation berücksichtigt werden. Ferner wird in dem Modell auch keine Unsicherheit berücksichtigt. Aus diesem Grund sehen die Autoren auch Raum für zukünftige Forschung, die sich auf Methoden fokussiert, Unternehmen zu motivieren, Kooperationen einzugehen und langfristig daran teilzunehmen. (Sterzik et al. 2015)

Uddin und Huynh (2020) stellen ein Modell zum Austausch von Kundenaufträgen zwischen Fuhrunternehmen vor, das sowohl Ansätze zur langfristigen Kooperation als auch Unsicherheit berücksichtigt. Kundenaufträge können als Einzelfahrt oder als Kombinationsfahrt (Export- und Importkundenauftrag) durchgeführt werden. Das Ziel ist, die Betriebskosten für alle Fuhrunternehmen zu minimieren. Zur Unterstützung einer langfristigen Kooperation beinhaltet das mathematische Modell eine Restriktionsgruppe. Die Restriktionsgruppe legt konkret für jedes Fuhrunternehmen fest, dass die Kosten ohne Kooperation größer sind als die Kosten mit Kooperation plus die durchschnittliche Kostenreduktion aller Fuhrunternehmen. Die durchschnittliche Kostenreduktion kann mit einem Faktor noch abgeschwächt werden, sodass bspw. bei einem Faktor von 0,5 die Kosten eines Fuhrunternehmens mit Kooperation um die

Hälfte der durchschnittlichen Kostenreduktion unter den Kosten dieses Fuhrunternehmens ohne Kooperation liegen müssen.

In dem mathematischen Modell werden zufällige Fahrzeiten in mehreren Restriktionsgruppen genutzt, sodass ein stochastisches Modell entsteht. Eine Restriktion stellt z. B. sicher, dass bei einer Fahrtenkombination mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die maximal zulässige Fahrzeit des LKW nicht überschritten wird. Allerdings geht die Erhöhung der Sicherheit, also die Wahrscheinlichkeit, dass alle Restriktionen erfüllt werden, mit höheren Betriebskosten einher. Alle Fahrzeiten, nämlich die zwischen Versender/Empfänger und Terminal, zwischen Versender/Empfänger und Leercontainerdepot und zwischen Versender und Empfänger, werden als unsicher betrachtet. Die Autoren weisen darauf hin, dass es für ein Fuhrunternehmen möglich ist, mehr Fahrten durchzuführen als ein anderes Fuhrunternehmen, und zwar unabhängig von der gleichmäßigen Verteilung der Kostenreduzierung auf die Fuhrunternehmen.

Durch die Kooperation kann eine Kosteneinsparung von durchschnittlich 23 % erreicht werden. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Kosteneinsparungen am höchsten sind, wenn in der Instanz im Vorhinein die Anzahl an Import- und Exportkundenaufträgen gleich groß ist. Fällt die Anzahl an Importkundenaufträgen und die Anzahl an Exportkundenaufträgen in der gegebenen Instanz unterschiedlich aus, sind die Kosteneinsparungen weniger deutlich. Außerdem verändert die Anzahl der an einer Kooperation beteiligten Fuhrunternehmen (bei gleicher Anzahl an Aufträgen) die Kosteneinsparung nicht wesentlich. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit in den Fahrzeiten ist es den Autoren zufolge möglich, ein realistisches und höheres Serviceniveau zu erreichen, da Verzögerungen in der Planung beachtet werden. (Uddin und Huynh 2020)

Widjanarka et al. (2018) betrachten die Planungssituation von Spediteuren. Diese buchen auf der einen Seite bei Fuhrunternehmen Kapazitäten und verkaufen diese Kapazität weiter an Versender. Da die Buchung bei den Fuhrunternehmen im Voraus durchgeführt wird, also bei unsicherer Nachfrage von den Versendern, besteht für den Spediteur das Risiko, bei tatsächlicher Nachfrage zu wenig oder zu viel Kapazität für die Anfragen der Versender gebucht zu haben.

Die Zielsetzung ist, dass die Spediteure ihren Profit maximieren. Dabei ist es möglich, dass die Spediteure untereinander gebuchte Kapazitäten bei Fuhrunternehmen austauschen, um damit Über- und Unterkapazitäten auszugleichen. Durch diese Kooperation und den Austausch von Kapazitäten besteht die Möglichkeit, dass die Spediteure weniger Kapazitäten bei den Fuhrunternehmen im Voraus buchen müssen. Im Ergebnis führt das zu einer Profitsteigerung durch die Kooperation um durchschnittlich 11 %. Die Autoren berücksichtigen allerdings keine Ansätze für eine langfristige Kooperation. (Widjanarka et al. 2018)

Zusammenfassend untersuchen die Veröffentlichungen unterschiedliche Ansätze für die Optimierung von zentraler horizontaler Kooperation beim Transport von Containern per LKW im Hafenhinterland. Eine Veröffentlichung kombiniert dabei horizontale mit vertikaler Kooperation (Irannezhad et al. 2020). Vier der neun Veröffentlichungen betrachten als

Kooperationsgegenstand einen Austausch bzw. eine Weitergabe von Kapazitäten in Form von Leercontainern (Kopfer et al. 2010, Sterzik et al. 2015), Optionen von Leercontainern (Luo et al. 2021) oder gebuchten Containerfahrten (Widjanarka et al. 2018). Die anderen fünf Veröffentlichungen betrachten, wie die vorliegende Arbeit, den Austausch, die Weitergabe und/oder das Zusammenführen von Kundenaufträgen.

Ein wesentliches Merkmal der Hinterlandlogistik ist der Transport der Leercontainer und das Vorhandensein von Leercontainerdepots (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3). Hier ist festzustellen, dass alle Veröffentlichungen entweder grundsätzlich keine Leercontainerdepots berücksichtigen (Caballini 2016, Caballini et al. 2017, Calore et al. 2017, Luo et al. 2021, Widjanarka et al. 2018) oder nicht zwischen Leercontainerdepots und Depots der LKW-Fuhrunternehmen differenzieren, mit der Folge, dass auch nicht zwischen Leerfahrten und Leercontainerfahrten unterschieden wird (Irannezhad et al. 2020, Kopfer, et al. 2010, Sterzik et al. 2015, Uddin und Huynh 2020). Ebenfalls gibt es keine Veröffentlichung, die die Transportwege, also die realistische Situation, wie sie in den Kapiteln 2.3 und 3.4 beschrieben wird, untersucht.

Ein wesentliches Ergebnis des systematischen Literature Reviews ist, dass Ansätze für eine faire und langfristige Kooperation sowohl in der allgemeinen Literatur zu Kooperation (vgl. u. a. Kapitel 3.3.4) als auch in der Literatur zum Containertransport im Hafenhinterland per LKW vorhanden sind. So behandeln fünf der neun Veröffentlichungen diese Ansätze, wobei drei Publikationen die Nutzung von Kompensationszahlungen, also der Beträge, die ein Auftragsausführer an einen Auftragseigentümer zahlt, beinhalten (Caballini et al. 2016, Calore et al. 2017, Luo et al. 2021). Dazu zählt auch das Vorhandensein von Mechanismen, die eine Verbesserung der Unternehmen, z. B. in Bezug auf Profitsteigerung, durch die Kooperation erzwingen oder zumindest eine Verschlechterung bestrafen (Caballini et al. 2016, Caballini et al. 2017, Calore et al. 2017, Uddin und Huynh 2020). Diese Verbesserung kann zusätzlich auch noch möglichst gleichmäßig über die Kooperationspartnerunternehmen verteilt sein, um die Fairness zu steigern (Uddin und Huynh 2020). Keine der Veröffentlichungen betrachtet andere Aspekte (wie z. B. die Anzahl an Aufträgen) außer monetären Aspekten als Ansatz zur Unterstützung der langfristigen Kooperation.

Der Aspekt Unsicherheit wird in der gegebenen Planungssituation im Hafenhinterland teilweise berücksichtigt. So werden teilweise die Kundennachfrage oder die Fahrzeiten als unsicher bzw. als veränderlich angesehen (Irannezhad et al. 2020, Luo et al. 2021, Uddin und Huynh 2020, Widjanarka et al. 2018). Die Mehrzahl der Veröffentlichungen berücksichtigt dagegen Unsicherheit nicht, sondern nutzt deterministische, also vorab bekannte, Daten. Infolgedessen findet der Aspekt Unsicherheit in dieser Arbeit ebenfalls keine tiefergehende Betrachtung. Die Auswirkungen des entwickelten Modells (s. Kapitel 7) werden entsprechend mit deterministischen Daten analysiert (s. Kapitel 8). Die Berücksichtigung von Unsicherheit wird dennoch als interessanter Aspekt für zukünftige Forschung identifiziert (s. Kapitel 9.2).

Alle neun Veröffentlichungen nutzen ökonomische Zielsetzungen auf Profit-, Kosten- oder Zeitbasis. Kein Paper betrachtet ökologische Zielsetzungen, wie die Minimierung der Emissionen oder des Kraftstoffverbrauches. Während also in der Optimierung von Kooperationen in der Logistik teilweise schon ökologische Zielsetzungen betrachtet werden

(vgl. Aloui et al. 2021), ist dies in dem speziellen Feld der Kooperation im Containertransport im Hafenhinterland per LKW nicht der Fall.

Durch die Nutzung der Kooperation stellen alle Veröffentlichungen einen Vorteil im Sinne der Zielsetzung fest. In den Veröffentlichungen von Caballini et al. (2016) und Calore et al. (2017) kann der Profit von einzelnen Fuhrunternehmen durch die Kooperation um teilweise mehr als 100 % gesteigert werden. Im Paper von Caballini et al. (2017) liegt die Profitsteigerung maximal bei 20 %. Die Autoren Widjanarka et al. (2018) stellen für ihre Form des Kapazitätsteilens eine Profitsteigerung von 11 % fest. Durch Handeln der Optionen für Leercontainer kann bei Luo et al. (2021) der Profit um durchschnittlich 5 % gesteigert werden. Sterzik et al. (2015) können mit ihrem Ansatz die Anzahl an LKW um bis zu 12 % und die Betriebszeit der LKW um durchschnittlich 6 bis 8 % (abhängig von der Zeitfenstergröße) reduzieren und damit Kosten senken. Bei Uddin und Huynh (2020) betragen die Kosteneinsparungen bis zu 23 % und bei Irannezhad et al. (2020) können bis zu 50 % der Kosten eingespart werden, wenn alle Marktteilnehmer miteinander kooperieren.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die neun Veröffentlichungen Vorteile durch Kooperation identifizieren. Allerdings werden hinsichtlich der Ansätze zur fairen Kooperation und ökologischer Zielsetzungen noch Forschungslücken festgestellt. Bevor das mathematische Modell, das diese Forschungslücken schließt, in Kapitel 7 erläutert wird, werden im Folgenden die Erkenntnisse aus der Praxis aus einer Interviewstudie vorgestellt und anschließend ein Zwischenfazit gezogen.

5 Kooperation in der Praxis

In den Kapiteln 2 und 3 wurden die Herausforderungen beim Containertransport im Hafenhinterland und die Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen als Lösungsmöglichkeit vorgestellt. In Kapitel 4 konnte durch die Diskussion wissenschaftlicher Publikationen unter anderem gezeigt werden, dass Kooperation eine Lösung für die Herausforderungen des Containertransportes per LKW im Hafenhinterland sein kann. Dieses Kapitel widmet sich nun der Umsetzung von Kooperation in der Praxis. Dabei beleuchtet Kapitel 5.1 die existierenden Plattformen in der Logistik, mittels derer in der Praxis bereits der Austausch von Informationen bzw. Gütern für eine Kooperation möglich ist. Kapitel 5.2 geht auf aktuelle Kooperationen in der maritimen Logistik ein. In Kapitel 5.3 wird eine Interviewstudie vorgestellt, die mit Akteuren des Containertransportes per LKW im Hafenhinterland durchgeführt wurde. In dieser Studie wird untersucht, wie Fuhrunternehmen Kooperation wahrnehmen und umsetzen, um Herausforderungen in ihrer unternehmerischen Tätigkeit zu begegnen.

5.1 Plattformen zum Austausch in der Logistik

Im Rahmen einer zentralen horizontalen Kooperation (vgl. Kapitel 3) ist es notwendig, dass eine zentrale Stelle, bzw. bei mehreren Koalitionen bzw. Vertrauensgruppen auch mehrere zentrale Stellen, die notwendigen Informationen von den Unternehmen erhalten. Auf Basis dieser Informationen können Kundenaufträge, Güter oder Kapazitäten zwischen den Unternehmen bestmöglich ausgetauscht werden. Ein schneller Informationsaustausch wird durch die Entwicklung und Anwendung von IKT ermöglicht. Grundsätzlich könnten zum Informationsaustausch zwischen Unternehmen das Telefon oder das Telefax genutzt werden. Heutzutage ermöglichen E-Mail oder API-Schnittstellen und in der Cloud abgelegte geteilte Informationen jedoch einen deutlich reibungsloseren und automatisierten Informationsaustausch.

Diesen Trend wollen sich auch viele Startups und sogenannte Plattform-Anbieter in der Logistik zu Nutze machen. Einige Startups fokussieren sich dabei auf die Vermittlung zwischen Fuhrunternehmen, die Ladung transportieren können, und Versendern bzw. Unternehmen, die Ladung transportiert haben wollen. Hierzu zählen zum Beispiel Produkte des Unternehmens *sennder*. Sennder bietet mit dem Produkt *orcas* eine Plattform an, auf der sich Versender und Frachtführer, wie z. B. die LKW-Fuhrunternehmen, vernetzen können, damit die Frachtführer Kundenaufträge von den Versendern annehmen. Diese Kundenaufträge können z. B. die E-

Commerce Logistik oder Kühltransporte betreffen. Dabei fokussiert sich Sennder nicht auf Hafenhinterlandtransporte (sennder Deutschland GmbH 2022a).

Ähnliche Anbieter wie Sennder sind im Bereich des Containertransportes tätig. Den Fokus auf den Container als wesentliches Equipment in der maritimen Logistik haben *Visitrans* und *XChange* gelegt. Das Unternehmen Visitrans bietet mit dem Produkt Visimatch ein zu Sennder vergleichbares Produkt an. Hier können Unternehmen angeben, wo sie Leercontainer abgeben wollen. Andere Unternehmen können dann diese Information nutzen und unter bestimmten Voraussetzungen, d. h., wenn am Ort der Leercontainerabnahme dieser Leercontainer wieder zum Einsatz kommen kann, diesen für ihren Gütertransport, also als Vollcontainer, nutzen. Auch die Berücksichtigung von Containerdrehen ist in diesem Produkt möglich (VisiTrans GmbH 2022).

XChange fokussiert sich auf den internationalen Containertransport und bietet eine Plattform an, auf der Unternehmen Container für eine Einzelfahrt (in eine Richtung) leasen können. Zusätzlich können auf dieser Plattform Container verkauft oder gekauft werden. So können Unternehmen Leercontainer anbieten, die sie an einem Hafen nicht benötigen und die an einem anderen Hafen von diesem Unternehmen gebraucht werden. Andere Unternehmen können dann prüfen, ob sie für diesen Leercontainer auf der betreffenden Relation (z. B. von Hamburg nach Shanghai) Verwendung haben. Der Vorteil ist, dass aus einem notwendigen Leercontainertransport durch die Kooperation mit anderen Unternehmen ein Vollcontainertransport werden kann und so die Effizienz erhöht wird. Diese Plattform wird nach Angaben von xChange erfolgreich von Unternehmen wie Kühne+Nagel oder DSV genutzt. (xChange Solutions GmbH 2022; Schlingmeier 2016, S. 40)

Ein Projekt zur Reduzierung von Leercontainerfahrten im Hamburger Hafen war das Projekt des „virtuellen Depots“, das die Hamburg Port Authority (HPA) bis 2018 betrieb und mit dem die Organisation von Leercontainern zwischen den einzelnen Hafenakteuren durch einen virtuellen Marktplatz erleichtert werden sollte. Dabei sollten die Leercontainer digital ausgetauscht werden, mit der Folge, dass das Drehen von Containern möglich werden konnte, damit die Fahrten zu den Leercontainerdepots wegfallen konnten. Das Depot lag also virtuell beim Zielort eines Importkundenauftrages bzw. bei einem Packbetrieb. Das Projekt wurde vom Hamburger IT Dienstleister *Dakosy* im Jahr 2018 übernommen, in das Produkt *Myboxplace* und später in die anderen Softwarelösungen von *Dakosy* integriert. (Pangritz 2018; DAKOSY Datenkommunikationssystem AG 2018)

Für den Hamburger Hafen hat *Dakosy* das Port Community System entwickelt, welches die Vernetzung von mehr als 2.000 Unternehmen der Hafen- und Logistikwirtschaft ermöglicht, um den Austausch von Informationen zu Schiffsanläufen sowie Import- und Exporttransporten im Hinterland zu standardisieren und zu vereinfachen (DAKOSY Datenkommunikationssystem AG 2022). Eine ähnliche Plattform zum Informationsaustausch ist das Port Community System des Gemeinschaftsunternehmens der Häfen Rotterdam und Amsterdam *Portbase Port infolink B.V.* (Portbase 2022). Beide Plattformen in den Häfen der Niederlande und in Hamburg ermöglichen den Informationsaustausch und erhöhen die Effizienz und Transparenz der aktuellen Prozesse. Eine enge Kooperation, wie die Weitergabe von Kundenaufträgen zur

Ausführung durch ein anderes Unternehmen, ist über diese Plattformen allerdings nicht möglich.

Bisher kann keine Plattform, kein Produkt oder Startup solche LKW-Fuhrunternehmen, die im Hafenhinterland tätig sind, dazu bewegen, über den Informationsaustausch hinaus eine engere Kooperation einzugehen. Das hat neben den fehlenden Voraussetzungen (s. Kapitel 3.2.1) und den vorhandenen Hindernissen (s. Kapitel 3.2.2) mehrere Gründe. Die privatwirtschaftlichen Unternehmen wie Startups agieren als Intermediär zwischen den Fuhrunternehmen oder zwischen den Fuhrunternehmen und deren Kunden. Da die Startups profitorientiert arbeiten, verlangen sie für die Vermittlung eine Vergütung bzw. Provision (s. z.B. sender Deutschland GmbH 2022b). Dies führt zu einer Verringerung des Gewinns der Fuhrunternehmen. Weitere Gründe für und gegen eine Kooperation aus dem Blickwinkel Hamburger LKW-Fuhrunternehmen und Speditionen werden im Kapitel 5.3.3 dargestellt.

5.2 Kooperation in der maritimen Logistik

Unabhängig von Plattformen finden in der maritimen Logistik Kooperationen in anderen Teilbereichen als dem Hinterlandtransport statt. Für Kooperationen in der maritimen Logistik mit ihren Planungsproblemen in der Seeschifffahrt gelten die unter Kapitel 3.2 diskutierten Voraussetzungen, Chancen und Hindernisse gleichermaßen.

Es ist festzustellen, dass in der Seeschifffahrt bereits Kooperationen etabliert sind. Die wohl bekanntesten horizontalen Kooperationen bestehen zwischen den Containerreedereien in Form von Allianzen. Insgesamt gibt es drei große Containerreederei-Allianzen. Der 2M Allianz gehören die Reedereien Maersk (inkl. Hamburg Süd) und MSC an.¹ Die Ocean Alliance besteht aus den Reederei CMA, COSCO, Evergreen und OOCL. Die THE Alliance beinhaltet die Reedereien Yangming, Hapag Lloyd (inkl. UASC) und ONE (Containergeschäfte der Reedereien NYK, MOL, K-Line). Insgesamt dominieren die drei Allianzen mit in Summe 80 % Marktanteil die globale Containerschifffahrt. (Frese 2021; Liu und Wang 2019)

Die Tatsache, dass trotz des harten Wettbewerbs zwischen den Containerreedereien ein Anreiz zur Kooperation besteht, wird darauf zurückgeführt, dass die Investitions-, Wartungs- und Transportkosten (v. a. Kraftstoff) sehr hoch sind und die Margen zum Zeitpunkt der Allianzentwicklung niedrig waren. Insbesondere die hohen Fixkosten durch die immer größeren Containerschiffe und die nach Fahrplänen orientierte Containerschifffahrt haben zur Folge, dass die Auslastung der Schiffe (mit Containern) ein wirtschaftlich entscheidender Faktor ist. Durch eine Kooperation kann diese Auslastung z. B. durch sog. vessel sharing agreements abgesichert und gesteigert werden. Darüber hinaus können die Allianzen mithilfe ihrer Marktmacht die Verträge mit Häfen und Containerterminals zu ihren Gunsten anpassen und so günstigere Preise an den Terminals verhandeln. (Frese 2021; Gansterer et al. 2020; Liu und Wang 2019)

¹ Gemäß einer Pressemitteilung der Reederei Maersk vom Januar 2023 soll diese Allianz bis zum Jahre 2025 entflochten werden (A.P. Moller - Maersk 25.01.2023).

Der Containertausch zwischen Reedereien und anderen Unternehmen ist eine weitere Möglichkeit der Kooperation in der maritimen Logistik. Hierbei werden in einer Überschussregion des einen Unternehmens die Leercontainer für einen geringen Betrag einem zweiten Unternehmen überlassen, damit dieses den Container wieder zurück zur Nachfrageregion des ersten Unternehmens bringt. Diese Rückführung des Containers macht für das zweite Unternehmen Sinn, wenn für diese Strecke ein Kundenauftrag zum Transport von Gütern vorliegt, das zweite Unternehmen also diesen Container beladen und so nutzen kann. (Schlingmeier 2016, S. 41; Hüttmann 2013, S. 103; Vojdani et al. 2013) Das unter Kapitel 5.1 genannte Startup xChange verfolgt mit der Plattform zum kurzzeitigen Leasen von Leercontainern genau diese Idee (xChange Solutions GmbH 2022).

Die Forschung beschäftigt sich auch mit der Kooperation von Containereigentümern, um Containerpools aufzubauen. Das Ziel von Containerpools ist es, dass die Container nicht mehr vielen Containereigentümern, sondern einer übergeordneten Containerpoolorganisation gehören. Diese Container haben dann nicht mehr die Lackierung einer Reederei, weswegen die Idee auch unter dem Begriff „Graue Container“ bekannt ist. Mit Umsetzung dieser Idee wären weniger Leercontainerfahrten nötig, weil sich die containereigentümerspezifischen Ungleichgewichte reduzieren würden (Schlingmeier 2016, S. 53). In der Praxis hat sich dieser Ansatz allerdings nicht durchgesetzt und wird daher hier nicht weiterverfolgt.

Auch die Kooperation und der Informationsaustausch zwischen den Unternehmen in einem Hafen ist von Relevanz und wird wissenschaftlich untersucht (u.a. Vairetti et al. 2019). Seo et al. untersuchten 2015 (u. a. mithilfe von Umfragen) in Südkorea, welche Faktoren eine Kooperation in der maritimen Supply Chain zwischen dem Hafen und den Hafennutzern unterstützen. Sie stellten fest, dass neben dem notwendigen Informationsaustausch vor allem die Ähnlichkeit der jeweiligen Unternehmensziele und die daraus folgenden harmonischen Entscheidungen der Kooperation dienen. (Seo et al. 2015)

Im Hamburger Hafen besteht zwischen den Terminals eine Kooperation in Form eines Informationsaustauschs: Die Organisation Hamburg Vessel Coordination Center (HVCC) vernetzt und koordiniert alle Unternehmen, u. a. die Reedereien mit ihren Seeschiffen, Schleppern und Lotsen, auf der Seeseite bezüglich des Schiffsbetriebs. Über diese Organisation als zentrale Anlaufstelle werden Daten zu den Fahrplänen von Seeschiffen und kleineren Binnenschiffen für das Hinterland ausgetauscht, sodass die Fahrpläne verschiedener Reedereien, bzw. die Fahrtgeschwindigkeiten der Schiffe, aufeinander abgestimmt werden können, um Kosten und Wartezeiten zu reduzieren. Eigentümer der HVCC sind alle Hamburger Containerterminalbetreiber; dies ermöglicht Neutralität in der Koordination. Im landseitigen Hinterland des Hafens ist dieser Dienst jedoch nicht aktiv. (HVCC Hamburg Vessel Coordination Center GmbH 2022)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die Containerreederei-Allianzen die Vorteile von Kooperation in der maritimen Logistik in der Praxis realisiert werden und in diesem Bereich Kooperation etabliert ist. xChange hat eine Lösung für die Herausforderungen der internationalen Leercontainerlogistik entwickelt, indem es eine Plattform für das kurzfristige Containerleasing erfolgreich etabliert hat. Auch die Häfen arbeiten an (einfachen)

Kooperationen, in dem sie den Austausch von Informationen zwischen den Unternehmen im Hafen digitalisieren, unterstützen und verbessern.

5.3 Interviewstudie zu Kooperation in der Containerlogistik im Hafenhinterland

Wie in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben, kann Kooperation eine Chance für den Containertransport im Hafenhinterland sein. Vor dem Hintergrund des Ziels dieser Arbeit, ein möglichst praxisnahes mathematisches Modell zur Quantifizierung von Kooperationsvorteilen zu entwickeln, ist es notwendig, die Gründe für und gegen horizontale Kooperationen im Hafenhinterland unter Fuhrunternehmen und Spediteuren im LKW-Transport zu identifizieren, damit diese in der Modellierung berücksichtigt werden können.

Aus diesem Grund wurde gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern eine Interviewstudie durchgeführt. Das Ziel der Interviewstudie ist die Untersuchung, wie Fuhrunternehmen und Spediteure im Hafenhinterland den Wettbewerb und mögliche Kooperation wahrnehmen, um den Herausforderungen, wie z. B. dem Kostendruck, zu begegnen.

Die Durchführung und Analyse der Interviews sowie die Feststellung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes an der TU Hamburg. Die Forschungsgruppe der TU Hamburg bestand aus vier Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Die Bearbeitung der Interviewstudie erfolgte gemeinsam, wobei jeweils zwei Wissenschaftler inhaltliche Schwerpunkte zum strategischen Management bzw. zur Optimierung von Containertransporten in die Studie einbrachten. Die zugehörige Veröffentlichung der Studie erfolgt im Jahr 2023 im International Journal of Physical Distribution & Logistics Management (Reinecke et al. 2023). Der Autor dieser Arbeit war einer der vier Wissenschaftler und damit an dem Forschungsprojekt und an der Interviewstudie beteiligt. Die Texte in den folgenden Unterkapiteln sind teilweise aus Reinecke et al. (2023) übernommen und ins Deutsche übersetzt.

5.3.1 Relevanz

Die zunehmende Bedeutung von horizontaler Kooperation in allen Logistikbereichen zeigt sich an der gestiegenen Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu diesen Themen (z.B. Serrano-Hernández et al. 2017; Gansterer und Hartl 2018b; Soosay und Hyland 2015). Bereits in Kapitel 3 wurden die Chancen und Risiken von Kooperation anhand der veröffentlichten Literatur erläutert. Diese Veröffentlichungen nutzen meist quantitative Methoden (wie OR), um z. B. die Chancen von Kooperation zu quantifizieren.

Fuhrunternehmen und Spediteure, die im Hafenhinterland tätig sind, stehen vor einer komplexen Marktsituation (Reinecke et al. 2023). Während die schwache Marktposition der Spediteure und der starke Wettbewerb unter den Logistikanbietern die Zusammenarbeit erschweren, erhöhen Standardisierung und hohe Kosten den Druck zur Kooperation (Islam et al. 2013; Islam et al. 2021; Krajewska et al. 2008). Islam und Olsen (2014) identifizieren in ihrer Studie über Containertransporte in Neuseeland Aspekte wie mangelndes Vertrauen,

fehlende Koordination zwischen den Spediteuren und mangelnde Flexibilität in den Häfen als Hindernisse für Kooperation. In einer Folgestudie in Bangladesch bestätigen Islam et al. (2019) die bereits bekannten Aspekte des mangelnden Vertrauens und der fehlenden Koordination und ergänzen als weiteres Problem den starken Wettbewerb unter den Fuhrunternehmen. Beim Vergleich der Motive für die Zusammenarbeit von Spediteuren mit Verladern stellen Islam et al. (2021) fest, dass die betriebliche Effizienz für beide Marktteilnehmer das wichtigste Motiv ist, während Spediteure Nachhaltigkeit und Sicherheit im Transport als weniger wichtig einstufen als Verlager.

In der Literatur wird der Bedarf weiterer Forschung bzgl. der Wahrnehmung von Kooperation durch Fuhrunternehmen betont (Islam und Olsen 2014; Islam et al. 2019). Daher liegt der Schwerpunkt dieser Interviewstudie auf der Frage, wie die Möglichkeit der Zusammenarbeit von Fuhrunternehmen und Spediteuren, die bisher noch nicht kooperieren, von diesen wahrgenommen wird und welche Folgen diese Wahrnehmung für die Umsetzung der Zusammenarbeit hat (Reinecke et al. 2023).

5.3.2 Methodik

Da aktuell keine umfassende horizontale Kooperation im Hafenhinterland per LKW von den beteiligten Marktteilnehmern, also den Fuhrunternehmen und Spediteuren, besteht, stellt sich mit Blick auf die Praxistauglichkeit des mathematischen Modells die Frage, wie die Marktteilnehmer horizontale Kooperation verstehen, wahrnehmen und bewerten. Die Bewertung der Kooperation basiert auf der jeweiligen Wahrnehmung des Wettbewerbs und der Marktsituation, da davon ausgehend die Einschätzung zu Potenzialen und Hindernissen von horizontaler Kooperation erfolgt.

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, fokussiert sich diese Arbeit auf das Hamburger Hafenhinterland. Aus diesem Grund wurde auch die Interviewstudie mit Hamburger Fuhrunternehmen und Spediteuren durchgeführt. Damit findet eine Ergänzung zu den bereits bestehenden Studien statt, die Motive von Unternehmern in anderen Ländern erforschen (z. B. Neuseeland: Islam und Olsen 2014; Bangladesch: Islam et al. 2019; Islam et al. 2021).

Im Rahmen der Studie wurden zwischen Sommer 2020 und Oktober 2022 insgesamt 40 semi-strukturierte Interviews durchgeführt. Die Interviews wurden mit Geschäftsführern, Betriebsleitern und Industrieexperten auf Deutsch geführt (Reinecke et al. 2023). Es wurden offene Fragen gewählt, um den Interviewpartnern die Möglichkeit zu geben, eigene Erfahrungen in ihrer eigenen Wortwahl auszuführen und auch flexible Nachfragen durch die Interviewer zu ermöglichen (Gioia et al. 2013).

Die empirische Analyse der Interviews basiert auf der Grounded Theory (Gioia et al. 2013; Strauss und Corbin 2003), die in der qualitativen Logistikforschung bereits etabliert ist (u.a. Mello et al. 2021). Es erfolgte ein zweistufiges Coding. Im ersten Schritt wurden die Codes während des Lesens der Interviews entwickelt und sind somit nah an den Wahrnehmungen der Interviewpartner. Es wurden die von den Interviewten verwendeten Begriffe zur Codierung genutzt. Im zweiten Schritt wurden die Codes hinsichtlich Ähnlichkeiten und Unterschieden analysiert, um die zugrundeliegenden Konzepte zu erkennen (Reinecke et al. 2023). Dieser

Prozess des Codings wird auch „axial coding“ genannt (Gioia et al. 2013; Strauss und Corbin 2003, S. 123).

5.3.3 Ergebnisse

In der Studie mit dem Titel „A typology of the collaboration willingness of carriers in hinterland logistics“ (Reinecke et al. 2023) konnten die interviewten Experten als zwei Typen (Developer und Adapter) klassifiziert werden, und zwar bzgl. Marktwahrnehmung, Kooperationseinschätzung und Handlungsstrategie. Die Auswertung der Interviews zeigte, dass die Unterschiede zwischen den beiden Typen in diesen drei Dimensionen am deutlichsten vorhanden sind. Folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Charakterisierung.

Tabelle 4: Typencharakterisierung (in Anlehnung an Reinecke et al. 2023)

	Developer = Entwickler	Adapter = Angepasste
Marktwahrnehmung	Durch Unternehmen selbstgenerierte geringe Marktattraktivität Markt durch eigenes Handeln veränderbar	Marktbedingungen schränken eigene Handlungen ein Markt durch eigenes Handeln <u>nicht</u> veränderbar
Kooperationseinschätzung	Proaktiv	Defensiv
Strategie	Zukunftsgestaltung	Abschottung

Fuhrunternehmen und Spediteure vom Typ **Developer** beschreiben die Probleme am Markt, wie z. B. den aggressiven Preiskampf durch Wettbewerber und die Marktmacht der Kunden als eine Folge der Handlungen aller am Markt Beteiligten. Opportunistisches Verhalten und Preiskämpfe beruhen auf den geringen Markteintrittsbarrieren. Aus diesem Grund sehen Developer Handlungsbedarf, um den Markt für die Akteure attraktiver zu gestalten. Nach Einschätzung der Developer kann horizontale Kooperation dieses Marktumfeld verbessern. Sie zeigen ein proaktives Verhalten, denn sie nutzen z. B. bereits teilweise Mailinglisten zum Austausch von Kundenaufträgen und planen teilweise auch weitere Aktivitäten zur Förderung von Kooperation. Gleichwohl stellen sie fest, dass eine horizontale Kooperation nur erfolgreich sein kann, wenn gegenseitiges Vertrauen im Vordergrund steht und opportunistisches Verhalten eingestellt wird. Sie stehen einem gemeinsamen Austausch offen gegenüber, um die Weitergabe von Kundenaufträgen zu ermöglichen.

Im Gegensatz dazu sehen Unternehmen vom Typ **Adapter** keine oder kaum Möglichkeiten, den Markt durch eigenes Handeln zu beeinflussen. Sie haben die Erfahrung gemacht, dass die Reedereien die Marktpreise durch ihre Marktmacht vorgeben. Adapter beschreiben als Hinderungsgrund für Kooperation das geringe gegenseitige Vertrauen in die Wettbewerber, gepaart mit opportunistischem Verhalten. Weiter führen sie als Grund für fehlende Kooperationsbereitschaft an, dass ein Austausch von Containern für Kombinationsfahrten mit Containerdrehen kaum möglich ist, da jede Reederei ihre eigenen Container in ihrer Markenfarbe lackiert. Im Gegensatz zur Gruppe der Developer sehen sie keine Möglichkeit

das Marktumfeld zu verbessern, was zur Abschottung gegenüber den Wettbewerbern führt. Eine ausführliche Analyse zur Thematik findet sich in der Veröffentlichung Reinecke et al. (2023).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Aspekt des fehlenden Vertrauens als Folge eines unattraktiven Marktumfeldes horizontale Kooperation erschwert. Das unattraktive Marktumfeld ist gekennzeichnet durch hohen Wettbewerbsdruck, große Marktmacht der Kunden und eine standardisierte und austauschbare Transportleistung. Hieraus entwickeln die unterschiedlichen Typen Developer und Adapter allerdings, basierend auf ihrer unterschiedlichen Marktwahrnehmung, die beiden verschiedenen Handlungsstrategien Zukunftsgestaltung bzw. Abschottung.

Die von 2020 bis 2022 durchgeführte Interviewstudie für das Hamburger Hinterland bestätigt die Ergebnisse vorheriger Publikationen (vgl. Kapitel 3.2 und 5.3.1) und ergänzt diese um eine Typologisierung der Marktteilnehmer hinsichtlich der Bereitschaft zur Kooperation. Darüber hinaus wird deutlich, dass im Rahmen der strategischen Entscheidung bzgl. dem Beginn einer Kooperation zunächst die Frage nach den vertrauenswürdigen Kooperationspartnern gestellt werden muss, bevor Fragen zur konkreten Umsetzung der Kooperation geklärt werden können (Reinecke et al. 2023).

6 Zwischenfazit: Forschungsbedarf für Kooperation im Hafenhinterland

Die vorangegangenen Kapitel haben die theoretischen Grundlagen für die Themen Hafenhinterland (Kapitel 2) und Kooperation (Kapitel 3) gelegt. Mithilfe des systematischen Literature Reviews wurde der aktuelle Stand in der Wissenschaft (Kapitel 4) und mithilfe der Interviewstudie der aktuelle Stand in der Praxis (Kapitel 5) analysiert. Diese Kapitel bilden die Basis dafür, ein praxisnahes mathematisches Modell zu entwickeln, das faire und langfristig stabile Kooperationen im Rahmen der Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW ermöglicht.

Die Kooperation von Unternehmen im Hafenhinterland, die den Vor- und Nachlauf der maritimen Supply Chain durchführen, ist deswegen von besonderer Relevanz, da aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks eine besondere Notwendigkeit zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung besteht. Hier bildet die horizontale Kooperation, mit dem Ziel durch Austausch und Weitergabe von Kundenaufträgen kostengenerierende Leercontainer- und Leerfahrten zu reduzieren, einen vielversprechenden Lösungsansatz. Allerdings ist zu beachten, dass die unabdingbare Voraussetzung für Kooperation das gegenseitige Vertrauen zwischen den Wettbewerbern ist. In der Interviewstudie wird deutlich, dass die Fuhrunternehmen, von einigen Ausnahmen abgesehen, den anderen Marktteilnehmern wenig Vertrauen entgegenbringen (Reinecke et al. 2023). Im Fall des gegenseitigen Vertrauens, ist ein Austausch von Kundenaufträgen möglich. Die unterschiedliche Kooperationsbereitschaft aufgrund der Wahrnehmung des Marktes und des Vertrauens in die anderen Marktteilnehmer, ist für die Forschung im Hafenhinterland ein neuer Aspekt.

Dort, wo einzelne Unternehmen in einem Markt miteinander kooperieren, spricht die Kooperationsforschung von Koalitionen (u. a. Aloui et al. 2021; Guajardo und Rönnqvist 2016). Während die wissenschaftliche Literatur untersucht, welche Akteure für eine Koalition am besten geeignet sind (vgl. coalition formation problem in Kapitel 3.2.2), zeigt die Praxis, dass bereits Koalitionen aus sich individuell vertrauenden Unternehmen bzw. Wettbewerbern gebildet werden. Dieser Zusammenschluss von Unternehmen bzw. Wettbewerbern wird in der vorliegenden Arbeit **Vertrauensgruppe** genannt (s. a. Rückert et al. 2023). Der Einfluss von

gegebenen Vertrauensgruppen im Hafenhinterland wird in der Optimierung des mathematischen Modells untersucht. Dabei ist der Zielkonflikt zwischen dem Wunsch, mit möglichst wenigen Wettbewerbern Informationen zu teilen und dem Wunsch, einen möglichst großen Vorteil durch die Kooperation zu generieren, in der Literatur zur Logistik im Allgemeinen bereits benannt worden (Gansterer und Hartl 2018b). Diese Arbeit wird in den folgenden Kapiteln gegebene Vertrauensgruppen berücksichtigen, sodass die Weitergabe von Kundenaufträgen ausschließlich auf die eigene Vertrauensgruppe beschränkt ist. So wird die bisherige Forschung um diesen für die Praxis relevanten Aspekt erweitert.

In der Interviewstudie wird deutlich, dass der Kostendruck in den Fuhrunternehmen sehr hoch ist. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, den bekannten Aspekt der **Kompensationszahlungen** mit aufzunehmen (vgl. u. a. Calore et al. 2017). Kompensationskosten müssen von Unternehmen, die einen Kundenauftrag ausführen und dadurch Erlöse generieren, an die Unternehmen gezahlt werden, denen der Kundenauftrag ursprünglich gehörte. Diese Kompensationskosten hängen vom Kundenauftrag ab. Die Kundenaufträge werden hierfür von den Fuhrunternehmen nach Wichtigkeit bzw. Wertigkeit segmentiert, da für die Fuhrunternehmen einige Aufträge (z. B. aufgrund langjähriger Vertragsbeziehung) besonders wichtig sind (vgl. u. a. Calore et al. 2017).

Das große Risiko von Kooperation ist neben der Partnerauswahl, der durch o. g. Bildung von Vertrauensgruppen begegnet wird, die notwendige Bestimmung und Aufteilung der Kooperationsvorteile bzw. -gewinne (vgl. Kapitel 3.2.2). Mehrere Veröffentlichungen sehen in einer fairen Aufteilung der Kooperationsvorteile, die über Kompensationszahlungen hinaus geht, einen wichtigen Untersuchungsgegenstand für zukünftige Forschung (u.a. Gansterer und Hartl 2020; Verdonck et al. 2019; Himstedt und Meisel 2021). So stellen u. a. Sterzik et al. (2015) fest, dass sich zukünftige Forschung grundsätzlich mit Mechanismen beschäftigen sollte, die Unternehmen motivieren können an einer Kooperation teilzunehmen. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Schließung dieser Forschungslücke leisten. Hierbei soll der Einfluss unterschiedlicher **Fairnessmechanismen**, z. B. zur Gewinnverteilung, analysiert werden. Es sollen unterschiedliche Mechanismen entwickelt und die Auswirkungen auf die Kooperation analysiert werden. Grundsätzlich gilt, nur wenn die Hindernisse (vgl. Kapitel 3.2.2) adäquat überwunden werden, ist eine langfristige und stabile horizontale Kooperation möglich.

Die folgende Abbildung 17 fasst die in den vorangegangenen Kapiteln identifizierten Forschungsbedarfe für horizontale Kooperationen im Hafenhinterland zusammen. Diese werden im mathematischen Modell im folgenden Kapitel berücksichtigt. Sie wirken damit auf die Zielerreichung dieser Arbeit hin.

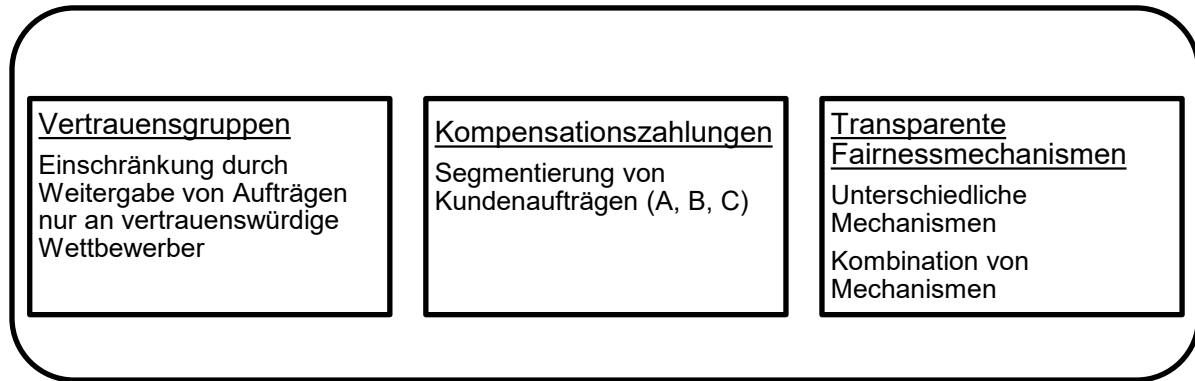


Abbildung 17: Forschungsbedarf zur langfristig stabilen horizontalen Kooperation

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

In diesem Kapitel wird ein Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation entwickelt. Beginnend mit der Beschreibung der Ausgangssituation und den Annahmen wird anschließend das Modell mit all seinen Bestandteilen erläutert. Anschließend wird das Modell um eine ökologische Zielsetzung und um zweitägige Kombinationsfahrten erweitert.

7.1 Ausgangssituation und Annahmen

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass ein erhöhter Forschungsbedarf bei mathematischen Optimierungsmodellen besteht, und zwar hinsichtlich der Modelle, die faire und damit langfristig stabile Kooperation unter realistischen Bedingungen für das Anwendungsgebiet von Containertransporten im Hafenhinterland mit dem LKW abbilden. Die folgende Ausgangssituation liegt dem in Kapitel 7.2 ausführlich beschriebenen Modell zu Grunde.

In einem Hafenhinterland sind unterschiedliche LKW-Fuhrunternehmen tätig, die jeweils unterschiedliche Kundenaufträge besitzen.

Gegeben sind die Kundenaufträge. Diese beinhalten durchzuführende Containertransporte, von denen es zwei Arten gibt. Bei einem Importcontainertransport bzw. Importkundenauftrag soll für den Kunden ein voll beladener Container von einem Seehafenterminal zu einem Ort im Hinterland transportiert werden und anschließend (nach dem Ausladen) von diesem Ort zu einem Leercontainerdepot transportiert werden. Bei einem Exportcontainertransport bzw. Exportkundenauftrag soll für den Kunden ein voll beladener Container von einem Ort im Hinterland zu einem Seehafenterminal transportiert werden. Hierzu ist es notwendig, dass das Fuhrunternehmen zuerst einen Leercontainer in einem Leercontainerdepot abholt und zum Ort im Hinterland zur Beladung des Containers transportiert (vgl. Kapitel 2.3 und 3.4). Ein Kundenauftrag repräsentiert einen Containertransport.

Bei den zu transportierenden Containern handelt es sich um unterschiedliche Containertypen. Die Berücksichtigung heterogener Container entspricht einer von Funke und Kopfer identifizierten Forschungslücke für mathematische Modelle, die sich mit Transporten im Hafenhinterland auseinandersetzen (Funke und Kopfer 2016).

Weitere Parameter, die im Modell gegeben sind und die Kundenaufträge beschreiben, sind das gewünschte Leercontainerdepot, Servicezeiten an den verschiedenen Orten, harte Zeitfenster am Seehafenterminal und am Hinterlandort, die zwingend eingehalten werden müssen, und weiche Zeitfenster für die Zielorte. Es wird angenommen, dass bei Exportkundenaufträgen bereits ein Slot für das Containerterminal reserviert wurde und für Importkundenaufträge bereits eine voraussichtliche Ankunftszeit kommuniziert wurde, sodass bei Verletzung dieser weichen Zeitfenster festgelegte Strafkosten anfallen. Außerdem ist der Erlös des Kundenauftrages im Voraus bekannt.

Das Fuhrunternehmen, welches den Auftrag von seinem Kunden erhalten hat, wird im folgenden Auftragseigentümer genannt. Es kann diesen Kundenauftrag an ein anderes Fuhrunternehmen abgeben, im Folgenden Auftragsausführer genannt. Wenn diese Auftragsabgabe bzw. -weitergabe erfolgt, kann von einer horizontalen Kooperation zwischen den beiden beteiligten Fuhrunternehmen gesprochen werden.

Eine Abgabe von Kundenaufträgen erfolgt nur dann, wenn es sinnvoll ist, also der Zielfunktionswert, in diesem Fall Gesamtprofit, verbessert wird. Es handelt sich hierbei um einen zentralen Ansatz der Kooperation (s. Kapitel 3.2). So wird eine Optimierung für das Gesamtsystem mit allen Fuhrunternehmen und Kundenaufträgen durchgeführt. Das bedeutet, dass alle Kundenaufträge zeitgleich (u. a. unter Berücksichtigung der Vertrauensgruppen) auf die Fuhrunternehmen verteilt werden. Eine dezentrale Entscheidung zwischen zwei Fuhrunternehmen, bei denen diese einzeln über eine Kundenauftragsweitergabe entscheiden, findet nicht statt.

Die Interessen der einzelnen Fuhrunternehmen werden über sog. Ansätze zur langfristigen Kooperation in dem mathematischen Modell berücksichtigt. So müssen Auftragsausführer Kompensationszahlungen an den Auftragseigentümer zahlen, wenn sie den Auftrag vom Auftragseigentümer übernehmen und damit auch ausführen wollen. Der Preis dieser Zahlung ist im Vorhinein festgelegt und unterscheidet sich je nach Kundenauftrag (hinsichtlich der Wertigkeit des Kunden). Fairnessmechanismen werden durch unterschiedliche Restriktionsgruppen abgebildet, um bspw. festzulegen, dass ein festgelegter Profit nicht unterschritten werden kann. Darüber hinaus wird das Konzept der Vertrauensgruppen angewandt, sodass eine Weitergabe von Aufträgen eingeschränkt wird und Aufträge nur an vertrauenswürdige konkurrierende Fuhrunternehmen abgegeben werden können.

Bezüglich der Fuhrunternehmen ist festgelegt, welche Kundenaufträge ihnen jeweils gehören, wie viele LKW sie pro Tag einsetzen können, wie lange ein LKW pro Tag fahren darf, wie hoch die Kosten (in €) für einen Transport pro Strecke (in km) und pro Stunde sind, und wo sich das LKW-Depot des Unternehmens befindet. Weitere Parameter des Modells sind die Länge des Zeithorizonts und die mit Fahrzeit (in h) und Strecke (in km) bewerteten Kanten.

Gesucht ist die *optimale* Aufteilung der Kundenaufträge über die Fuhrunternehmen innerhalb der Vertrauensgruppen und innerhalb des Planungshorizontes sowie das Routing der Fahrzeuge. Bei der optimalen Aufteilung kann es zur Weitergabe von Kundenaufträgen, also Kooperation, kommen. Optimal ist die Lösung des mathematischen Modells und damit die Aufteilung und das Routing dann, wenn der Gesamtprofit maximal ist. Für jeden Auftrag ist zu entscheiden, ob ein Auftrag als Einzelfahrt oder als Kombinationsfahrt (vgl. Kapitel 3.4) durchgeführt wird und von wem der Auftrag durchgeführt wird. Außerdem werden zeitliche Variablen definiert. Es gibt keine Entscheidungsvariablen zu einzelnen LKW. Die Fahrten der LKW leiten sich aus den Variablen bzw. Entscheidungen zur Durchführung der Kundenaufträge ab (s. z. B. Formel 7.19). Die Uhrzeiten der Abfahrten leiten sich aus den zeitlichen Variablen ab. Ein genauer Fahrplan einzelner LKW wird also nicht berechnet, sondern ergibt sich aus anderen Variablenwerten. Dies hat den Vorteil, dass die Lösungsgeschwindigkeit erhöht wird.

Folgende Annahmen und Prämissen werden festgelegt, die das mathematische Modell vereinfachen und die Lösungsgeschwindigkeit erhöhen, ohne die Realitätsnähe zu stark einzuschränken.

Zu den Kundenaufträgen:

- Jeder Kundenauftrag beinhaltet den Transport eines einzigen Containers.
- Der Container ist einem von vier verschiedenen Containertypen und einer der drei Containerreederei-Allianzen (s. Kapitel 5.2) zugeordnet. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Reedereien innerhalb ihrer Allianz ihre Container für andere Allianzpartner zur Verfügung stellen. Containerleasinggesellschaften oder andere Containereigentümer werden nicht berücksichtigt. Für eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen muss der Containertyp und die Allianz des Importkundenauftrages und des Exportkundenauftrages identisch sein. Das bedeutet, dass dies rechnerisch nur für jede zwölfte Import-Exportkombination möglich ist.
- Für jeden Kundenauftrag ist im Vorhinein ein gewünschtes Leercontainerdepot festgelegt, das angefahren werden muss und vom Kunden des Auftrages festgelegt wird. Die Auswahl des Leercontainerdepots kann nicht durch das Fuhrunternehmen getroffen werden. Das gewünschte Leercontainerdepot ist standardmäßig das nächstgelegene Depot am Startort eines Exportkundenauftrages bzw. am Zielort eines Importkundenauftrages.
- Nicht berücksichtigt werden andere Standorte, die der LKW mit dem Container anfahren könnte, wie etwa eine Zollstation. Es wird davon ausgegangen, dass alle administrativen Prozesse entweder direkt am Containerterminal oder im Hinterland durchgeführt werden können und dass Containerreparaturstationen an den Leercontainerdepots bestehen.
- Die Durchführung eines Kundenauftrages muss mittels eines LKW erfolgen. Innerhalb eines Kundenauftrages kann der LKW nicht gewechselt werden. Dies bedeutet, dass der LKW (mit Zugmaschine und Chassis) immer auf die Beladung an dem Startort des Exportkundenauftrages (sog. Gestellungsadresse des Versenders) oder auf die

Entladung an dem Zielort des Importkundenauftrages (beim Empfänger) wartet. Dies entspricht der gängigen Praxis (s. Kapitel 2.3 und 3.4). Andernfalls wären mehrere Entscheidungsvariablen für die LKW und die Kundenaufträge mit den Containern nötig, was die Komplexität und den Rechenaufwand deutlich erhöhen würde (Schönberger et al. 2013; Funke und Kopfer 2016)

- Die Fahrzeiten und die Kundenaufträge sind deterministisch, im Vorhinein bekannt und nicht unsicher.
- Es wird davon ausgegangen, dass Einzelfahrten immer durchgeführt werden können, andernfalls hätte der Auftragseigentümer diesen Auftrag nicht annehmen können. Daher wird für Einzelfahrten die maximale LKW-Fahrzeit nicht geprüft. Die Durchführung einer Kombinationsfahrt, aufgeteilt auf zwei aufeinanderfolgende Tage, ist im mathematischen Grundmodell nicht möglich, da im nahe gelegenen Hinterland kurze Fahrten ausgeführt werden. Für Kombinationsfahrten, in denen Kundenaufträge von zwei voneinander weit entfernten Hinterlandstandorten kombiniert werden, ist hingegen in einigen Fällen eine Übernachtung des LKW-Fahrers notwendig. Hierzu wird nach der Vorstellung des mathematischen Grundmodells eine Erweiterung in Kapitel 7.2.7 vorgestellt, die zweitägige Kombinationsfahrten berücksichtigt.

Zu den Fuhrunternehmen:

- Jedes Fuhrunternehmen hat jeweils ein LKW-Depot. Von diesem Depot aus starten alle LKW und an dieses Depot kehren alle LKW nach der Durchführung einer Fahrt zurück.
- Bei Einzelfahrten treten keine Wartezeiten auf, da bei diesen nur ein individueller Kundenauftrag transportiert wird. Bei Kombinationsfahrten sind zwischen zwei Kundenaufträgen Wartezeiten möglich, um Zeitfenster einzuhalten. Diese Wartezeiten werden bepreist und sind zielfunktionswirksam.
- Dem Fuhrunternehmen, das einen Kundenauftrag ausführt, wird der Erlös dieses Kundenauftrages gutgeschrieben. Bei einer Kooperation erhält dann der ursprüngliche Kundenauftragseigentümer für eben diese Weitergabe des Kundenauftrages die Kompensationszahlung vom Auftragsausführer.

Die folgende Tabelle 5 gibt einen Überblick über alle Möglichkeiten, wie ein Kundenauftrag oder eine Kombination von zwei Kundenaufträgen gefahren werden kann.

Tabelle 5: Übersicht aller Fahrtmöglichkeiten

	Kundenauftrag 1		Kundenauftrag 2		Ausführer ist Eigentümer	Kooperation
	Import	Export	Import	Export		
Einzelfahrt	✓				✓	
Einzelfahrt		✓			✓	
Einzelfahrt	✓					✓
Einzelfahrt		✓				✓
Direkte Kombinationsfahrt	✓			✓	✓	
(Direkte) Kombinationsfahrt		✓	✓		✓	
Direkte Kombinationsfahrt	✓			✓		✓
(Direkte) Kombinationsfahrt		✓	✓			✓
Indirekte Kombinationsfahrt	✓			✓	✓	
(Indirekte) Kombinationsfahrt		✓	✓		✓	
Indirekte Kombinationsfahrt	✓			✓		✓
(Indirekte) Kombinationsfahrt		✓	✓			✓
Kombinationsfahrt mit Containerdrehen	✓			✓	✓	
Kombinationsfahrt mit Containerdrehen	✓			✓		✓

Bei einer Kombinationsfahrt ist es möglich, dass beide Kundenaufträge, nur einer der beiden Kundenaufträge oder kein Kundenauftrag dem ausführenden Fuhrunternehmen gehört.

7.2 Modellformulierung

Im Folgenden wird das mathematische Modell vorgestellt. Es orientiert sich an dem Modell von Calore et al. (2017). Modellbestandteile, die vom Autor dieser Arbeit ergänzt werden, sind mit „neu“ gekennzeichnet. Dieses Modell wird ausgewählt, da es bereits Kompensationskosten im Hinterland berücksichtigt. Die in diesem Modell vom Autor vorgenommenen Weiterentwicklungen und Korrekturen sind kenntlich gemacht. Zunächst werden die Mengen, die gegebenen Parameter und die gesuchten Entscheidungsvariablen definiert und kurz erklärt, bevor die Zielfunktion und die Nebenbedingungsgruppen inhaltlich und in ihrer Funktionsweise erläutert werden.

7.2.1 Mengen

Es besteht eine Menge an Kundenaufträgen N , die wiederum die Vereinigungsmenge der Menge an Importkundenaufträgen I und Exportkundenaufträgen E ist.

Importkundenaufträge können mit Exportkundenaufträgen kombiniert werden, wodurch die Menge P entsteht, die wiederum aus der Menge PIE und PEI besteht. Die Mengenelemente sind Tupel. Die Menge \widehat{PIE} ist eine Teilmenge von PIE und beinhaltet ausschließlich die Tupel, für die eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen möglich ist. Die Menge KCD beinhaltet alle Leercontainerdepots. Für die Menge der Fuhrunternehmen wird R genutzt.

N Menge an Kundenaufträgen $N = I \cup E$.

$I \subset N$ Menge an Importkundenaufträgen.

$E \subset N$ Menge an Exportkundenaufträgen.

PIE Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Importkundenauftrag beginnen und mit einem Exportkundenauftrag enden.

$$PIE := \{(n, m) : n \in I \wedge m \in E\}$$

\widehat{PIE} Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Importkundenauftrag beginnen und mit einem Exportkundenauftrag enden und für die eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen möglich ist, bei denen Containertyp und Allianz identisch sind.

$$\widehat{PIE} := \{(n, m) : n \in I \wedge m \in E \wedge Alliance_n = Alliance_m \wedge Typ_n = Typ_m\} \subset PIE$$

PEI Menge an möglichen Paaren von Kombinationsfahrten, die mit einem Exportkundenauftrag beginnen und mit einem Importkundenauftrag enden.

$$PEI := \{(m, n) : m \in E \wedge n \in I\}$$

P Menge an allen möglichen Paaren von Kombinationsfahrten aus je einer Import- und Exportfahrt. $P := \{(n, m) : n \in N \wedge m \in N\} = PIE \cup PEI$

K Menge aller Knoten

KCD	Menge der Leercontainerdepots.
R	Menge der Fuhrunternehmen.

7.2.2 Parameter

Die Parameter stellen die gegebenen Informationen des Optimierungsmodells dar. Die Parameter können kategorisiert werden nach Parametern der Kundenaufträge, Parametern der Fuhrunternehmen und allgemeinen Parametern. Zu den allgemeinen Parametern zählt Big M , ein konstanter Faktor α , der Planungshorizont T und die Strecken zwischen zwei Knoten in km und in Stunden sowie die Servicezeit am Leercontainerdepot. Die Differenzierung der Strecke in Distanz- und Zeiteinheiten erfolgte durch den Autor. Der konstante Faktor wird diesem Modell hinzugefügt und findet auch in anderen Veröffentlichungen Anwendung (Uddin und Huynh 2020). Durch den konstanten Faktor ist es möglich die in Kapitel 7.2.5.5 vorgestellten Fairnessmechanismen abzuschwächen, um so den Einfluss der Mechanismen besser analysieren zu können. Die Existenz von Leercontainerdepots wird in diesem mathematischen Modell ergänzt. Aus diesem Grund sind alle Symbole im Zusammenhang mit Leercontainerdepots, wie z. B. KCD und stl_i ergänzt worden. Der Planungshorizont wird mit T beschrieben und gibt den Tag des zeitlich letzten Kundenauftrages an.

α	konstanter Faktor für Restriktionen, wird für Analysen variiert ($\alpha > 0$).
M	große Zahl, sie wird zur linearen Schreibweise von Restriktionen benötigt.
skm_{ij}	Strecke in km zwischen zwei Knoten $i, j \in K$. (Neu)
sh_{ij}	Strecke in Stunden zwischen zwei Knoten $i, j \in K$. (Neu)
stl_i	Servicezeit in Stunden zum Auf- oder Abladen eines Containers an einem Leercontainerdepot $i \in KCD$. (Neu)
T	Planungshorizont in Tagen.

7.2.2.1 Parameter der Kundenaufträge

Zu den Parametern der Kundenaufträge zählen der Startort und der Zielort des Kundenauftrages mit der jeweiligen Servicezeit sowie der Knoten des gewünschten Leercontainerdepots. Das gewünschte Leercontainerdepot wird vom Kunden des Auftrages festgelegt. Der mathematische Begriff Knoten wird in diesem Zusammenhang als Synonym des bisher verwendeten Begriffs Ort genutzt. Jeder Kundenauftrag erbringt bei Ausführung einen Erlös und für die Weitergabe des Kundenauftrages an ein anderes Fuhrunternehmen werden Kompensationskosten fällig. Der Container des Kundenauftrages gehört außerdem einer Allianz und einem Containertyp an.

o_n	Startort des Kundenauftrages $n \in N$.
d_n	Zielort des Kundenauftrages $n \in N$.

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

cd_n	Knoten des gewünschten Leercontainerdepots des Kundenauftrages $n \in N$, $cd_n \in KCD$. (Neu)
$KErl_n$	Erlös eines beliebigen Fuhrunternehmens bei Durchführung von Kundenauftrag $n \in N$. (Neu)
sto_n	Servicezeit in Stunden zum Aufladen des Containers oder Beladen der Güter in den Container am Startort des Kundenauftrages $n \in N$. (Neu)
std_n	Servicezeit in Stunden zum Abladen des Containers oder Entladen der Güter aus dem Container am Zielort des Kundenauftrages $n \in N$. (Neu)
Cc_n	Kompensationskosten des Kundenauftrages $n \in N$.
$Alliance_n$	Allianz der Reederei des zum Kundenauftrag $n \in N$ zugehörigen zu transportierenden Containers. (Neu)
Typ_n	Typ des zum Kundenauftrag $n \in N$ zugehörigen zu transportierenden Containers. (Neu)

Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass innerhalb einer Allianz die Container ausgetauscht werden können. Lei und Church (2010) stellen fest, dass die Mehrzahl der Optimierungsmodelle die beiden Aspekte Containereigentümer und Containertyp nicht berücksichtigen (Lei und Church 2011). Aufgrund der Tatsache, dass beide Aspekte für die Praxis von außerordentlicher Relevanz sind, werden diese hier ergänzt. Der Erlös in Abhängigkeit vom Kundenauftrag wird korrigiert. In Calore et al. (2017) ist der Erlös eines Kundenauftrages abhängig vom ausführenden Fuhrunternehmen, was mindestens praxisfern und eigentlich fehlerhaft erscheint. Die Servicezeiten werden – ebenfalls zur Erhöhung der Praxisnähe – ergänzt.

Jeder Kundenauftrag hat einen gewünschten Tag, an dem der Auftrag ausgeführt werden soll. Von diesem Tag kann abgewichen werden, sodass ein tageweises weiches Zeitfenster zwischen dem frühestmöglichen Tag und dem spätestmöglichen Tag entsteht. Dabei gilt für Exportkundenaufträge standardmäßig, dass ausschließlich am gewünschten Tag der Auftrag durchgeführt werden kann, um zu garantieren, dass das geplante Containerschiff noch erreicht werden kann. Unter Kapitel 7.2.2.3 folgen weitere Informationen zur Zeitenberechnung.

tg_n	gewünschter Fahrtag zum Ausführen des Kundenauftrages $n \in N$.
tl_n	spätester Fahrtag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in N$ $tl_m = tg_m \forall m \in E$ (Neu).
te_n	frühester Fahrtag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in N$ $te_m = tg_m \forall m \in E$ (Neu).

7.2.2.2 Parameter der Fuhrunternehmen

Für die Fuhrunternehmen wird in Parametern festgelegt, welche Kundenaufträge ihnen gehören, wie lange ein LKW pro Tag fahren darf und wie hoch der Kostensatz je km Distanz ist. Alle weiteren Parameter der Fuhrunternehmen werden in der Weiterentwicklung des Modells ergänzt. Die Kostensätze werden unterteilt in distanzabhängige Kosten je Strecke wie Kosten am LKW (Kraftstoff, Maut, Verschleiß) und zeitabhängige Kosten je Strecke wie Kosten für den Fahrzeugführer (Stundenlohn, Zuschläge). Außerdem werden Kosten berechnet für das Containerdrehen des Containers während einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen. Diese Kosten sollen den Aufwand für das Containerdrehen widerspiegeln, also den Aufwand für eine externe Person (nicht zwingend den Fahrzeugführer) für das Prüfen des Containers auf Transportsicherheit und für sonstige Verwaltungsaufwände.

Außerdem gibt ein Parameter das zugehörige LKW-Depot und die Vertrauensgruppe des Fuhrunternehmens an. In Abhängigkeit von z_n^r steht $CarOwn_n$. Da in der Praxis auch die Anzahl an LKW je Fuhrunternehmen begrenzt ist, existiert der Parameter $MaxLKW_r^t$, der angibt, wie viele LKW dem Fuhrunternehmen am Tag zur Verfügung stehen. Er ist definiert als die größte Anzahl an eigenen Kundenaufträgen an einem Tag (s. Formel 7.1). Es entspricht also der maximalen Anzahl an Kundenaufträgen, die ein Fuhrunternehmen ohne Kooperation und Kombinationsfahrten ausführen würde. $MaxLKW_r^t$ ist für alle Tage vereinfachend identisch, sodass der Index t unerheblich für den Wert des Parameters ist. Für die späteren Fairnessmechanismen werden außerdem die Parameter pP_r^t , pPD_r^t und pPT_r^t (vgl. Kapitel 8.2.2) sowie ka_r^t festgelegt. pP_r^t , pPD_r^t und pPT_r^t legen den Profit ohne Kooperation fest. Die genaue Berechnung dieser Werte wird in Kapitel 8.2.2 erläutert. ka_r^t legt die Anzahl der Kundenaufträge fest, wenn keine Kombinationsfahrt und keine Kooperation durchgeführt wird.

$z_n^r \in \{0,1\}$ 1, wenn Kundenauftrag $n \in N$ dem Fuhrunternehmen $r \in R$ gehört, d. h., wenn das Fuhrunternehmen $r \in R$ Kundenauftragseigentümer von Kundenauftrag $n \in N$ ist; sonst 0.

$CarLKWStd_r$

maximal mögliche Stundenanzahl, die ein LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ an einem Tag fahren kann.

Ckm_r

Kostensatz des Fuhrunternehmens $r \in R$ (pro km Distanz), ohne zeitabhängige Kosten.

Ch_r

Kostensatz des Fuhrunternehmens $r \in R$ (pro Stunde), ohne distanzabhängige Kosten.

Cp

pauschale Kosten, die bei einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen anfallen.

ld_r

Ort des LKW-Depots von Fuhrunternehmen $r \in R$.

$CarVG_r$

Vertrauensgruppe des Fuhrunternehmens $r \in R$.

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

$CarOwn_n$ Fuhrunternehmen, bzw. Kundenauftragseigentümer des Kundenauftrages $n \in N$
 $CarOwn_n = r$, wenn $z_n^r = 1 \forall r \in R \wedge n \in N$.

$MaxLKW_r^t$ Anzahl an LKW, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ zur Verfügung hat.

$$MaxLKW_r^t = \max_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(\sum_{n \in N} z_n^r \cdot (1 - \min(|t - tg_n|, 1)) \right) \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.1)$$

pP_r^t Profit ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von Fuhrunternehmen $r \in R$

pPD_r^t Profit ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von Fuhrunternehmen $r \in R$, bei dem Kombinationsfahrten möglich sind (RealPriorProfit Day)

pPT_r^t Profit ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von Fuhrunternehmen $r \in R$, bei dem Kombinationsfahrten und die tageweise Verschiebung von Kundenaufträgen möglich sind (RealPriorProfit Total)

ka_r^t Anzahl an Kundenaufträgen, die ein Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ ohne Kooperation und Kombinationsfahrten durchführen würde, d. h., die Anzahl an Kundenaufträgen am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem das Fuhrunternehmen $r \in R$ der Auftragseigentümer ist.

7.2.2.3 Informationen zur Zeiten- und Streckenberechnung

Im Folgenden wird die Zeiten- und Streckenberechnung erläutert. Gemäß den Erklärungen in Kapitel 2.3, 3.4 und 7.1 bestehen für Importkundenaufträge zwei Teilfahrten, nämlich die Vollcontainerfahrt vom Seehafenterminal zu einem Ort im Hinterland und die Leercontainerfahrt von diesem Ort zum Leercontainerdepot. Die Exportkundenaufträge beginnen mit der Leercontainerfahrt zu einem Ort im Hinterland, an dem der Container beladen wird (der komplette LKW wartet während der Beladung) und enden mit einer Vollcontainerfahrt zum Seehafenterminal. Die Streckendistanzen setzen sich also wie folgt zusammen:

$$\text{Importkundenauftrag: } skm_{o_n d_n} + skm_{d_n c d_n} \forall n \in I \quad (7.2)$$

$$\text{Exportkundenauftrag: } skm_{c d_m o_m} + skm_{o_m d_m} \forall m \in E \quad (7.3)$$

Führt ein Fuhrunternehmen $r \in R$ den Kundenauftrag als Einzelfahrt durch, werden zu den Fahrten des Kundenauftrages noch die Leerfahrten von und zum Depot des Fuhrunternehmens addiert.

Importkundenauftrag als Einzelfahrt

$$skm_{l d_r o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n c d_n} + skm_{c d_n l d_r} \forall n \in I \wedge r \in R : z_n^r = 1 \quad (7.4)$$

Exportkundenauftrag als Einzelfahrt

$$skm_{l d_r c d_m} + skm_{c d_m o_m} + skm_{o_m d_m} + skm_{d_m l d_r} \forall m \in E \wedge r \in R : z_n^r = 1 \quad (7.5)$$

Wie oben beschrieben, besteht die Möglichkeit Import- und Exportkundenaufträge miteinander zu kombinieren, um insgesamt Fahrtstrecke und somit Kosten und Emissionen einzusparen. Unabhängig davon, welches Fuhrunternehmen die Kundenaufträge durchführt, kann zwischen fünf Varianten von Kombinationsfahrten unterschieden werden, die auch in Tabelle 1 bzw. differenzierter in Tabelle 5 aufgelistet sind.

In einer Variante wird eine sog. *indirekte Kombinationsfahrt* von Fuhrunternehmen $r \in R$ ausgeführt. Hier entsteht zwischen einem Import- ($n \in I$) und einem anschließenden Exportkundenauftrag ($m \in E$) eine Strecke vom Leercontainerdepot des Importkundenauftrages zum Leercontainerdepot des Exportkundenauftrages, da die Leercontainerdepots nicht identisch sind ($cd_n \neq cd_m \Leftrightarrow skm_{cd_n cd_m} > 0$; vgl. Abbildung 15 links). Die Berechnung der Gesamtstrecke der Kombinationsfahrt lautet wie folgt².

$$(skm_{ld_r o_n}) + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + \mathbf{skm}_{cd_n cd_m} + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + (skm_{d_m ld_r}) \quad (7.6)$$

Zwischen einem Export- und einem anschließenden Importkundenauftrag entsteht auch eine Strecke vom Containerterminal des Exportkundenauftrages (Zielort) zum Containerterminal des Importkundenauftrages (Startort), da die beiden Containerterminals nicht identisch sind ($d_m \neq o_n \Leftrightarrow skm_{d_m o_n} > 0$). Entweder werden bei dieser Kombination zwei unterschiedliche Leercontainerdepots genutzt, dann wird von einer (indirekten) Kombinationsfahrt gesprochen (vgl. Abbildung 15 rechts), oder die beiden Kundenaufträge haben dasselbe präferierte Leercontainerdepot, dann wird von einer (direkten) Kombinationsfahrt gesprochen (vgl. Abbildung 14 rechts). Dieser Unterschied hat aber keine Auswirkungen auf die Berechnung der Gesamtstrecke der Kombinationsfahrt, da die Leercontainerdepots nicht unmittelbar nacheinander angefahren werden. Die Berechnung lautet wie folgt:

$$(skm_{ld_r cd_m}) + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + \mathbf{skm}_{d_m o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + (skm_{cd_n ld_r}) \quad (7.7)$$

Im Gegensatz dazu werden bei der sog. *direkten Kombinationsfahrt* eines Import- und eines anschließenden Exportkundenauftrages die o. g. zusätzlichen Strecken vermieden. Dies ist nur möglich, wenn das Leercontainerdepot des Importkundenauftrages identisch ist zum Leercontainerdepot des anschließenden Exportkundenauftrages ($cd_n = cd_m \Leftrightarrow skm_{cd_n cd_m} = 0$; vgl. Abbildung 14 links). Die Berechnung der Gesamtstrecke der Kombinationsfahrt kann unverändert bleiben, da der betreffende Summand null wird (unten ausgegraut).

$$(skm_{ld_r o_n}) + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + \mathbf{skm}_{cd_n cd_m} + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + (skm_{d_m ld_r}) \quad (7.8)$$

² Auf die *für alle* Bezeichnungen wird aufgrund der Tatsache, dass die Entscheidungsvariablen noch nicht vorgestellt sind, hier verzichtet.

Bei einer Kombinationsfahrt eines Export- und eines anschließenden Importkundenauftrages ist es möglich, dass das Containerterminal des Exportkundenauftrages identisch zum Containerterminal des Importkundenauftrages ist ($d_m = o_n \Leftrightarrow skm_{d_m o_n} = 0$). Die Berechnung der Gesamtstrecke der Kombinationsfahrt kann hier auch unverändert bleiben, da der betreffende Summand null wird.

$$(skm_{ld_r cd_m}) + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + skm_{d_m o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + (skm_{cd_n ld_r}) \quad (7.9)$$

Die letzte Variante ist die Besonderheit der Kombinationsfahrt mit Containerdrehen. Die Variante existiert nur für den Fall, wenn ein Importkundenauftrag mit einem anschließenden Exportkundenauftrag kombiniert wird. In diesem Fall wird der leere Container vom Zielort des Importkundenauftrages direkt zum Startort des Exportkundenauftrages transportiert, ohne ein Leercontainerdepot zu nutzen. Das heißt, es wird der identische Container für beide Kundenaufträge benutzt und die Fahrten zu und von dem Leercontainerdepot entfallen. Diese Variante ist nur möglich, wenn eine Überprüfung des Containers auf Transportfähigkeit stattfinden kann und z. B. vom LKW-Fahrer vorgenommen wird. Die Berechnung der Gesamtstrecke der Kombinationsfahrt lautet, im Unterschied zu den ersten beiden Varianten, wie folgt:

$$(skm_{ld_r o_n}) + skm_{o_n d_n} + \mathbf{skm}_{d_n o_m} + skm_{o_m d_m} + (skm_{d_m ld_r}) \quad (7.10)$$

Es ist darüber hinaus denkbar, dass der Zielort des Importkundenauftrages identisch zum Startort des Exportkundenauftrages ist, also $d_n = o_m \Leftrightarrow skm_{d_n o_m} = 0$ gilt. Diese Variante tritt eher selten auf, da hierfür ein großer Hinterlandstandort nötig ist, bei dem Importkundenaufträge enden und Exportkundenaufträge starten. In diesem Fall bleibt die Berechnung identisch durch den Summanden, der null ist:

$$(skm_{ld_r o_n}) + skm_{o_n d_n} + \mathbf{skm}_{d_n o_m} + skm_{o_m d_m} + (skm_{d_m ld_r}) \quad (7.11)$$

Die berechneten Strecken der Varianten können auch auf die notwendige Zeit zur Bewältigung dieser übertragen werden. Hierbei müssen allerdings zusätzlich noch die Servicezeiten berücksichtigt werden. Von besonderer Relevanz sind die langen Servicezeiten, die das Be- bzw. Entladen des Containers beschreiben (fett).

$$\text{Importkundenauftrag: } sto_n + sh_{o_n d_n} + \mathbf{std}_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} \forall n \in I \quad (7.12)$$

$$\text{Exportkundenauftrag: } stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + \mathbf{sto}_m + sh_{o_m d_m} + std_m \forall m \in E \quad (7.13)$$

Die Gesamtzeit einer Kombinationsfahrt bestehend aus einem Import- und einem anschließenden Exportkundenauftrag ist wie folgt definiert (für den Fall ohne Kooperation):

$$\begin{aligned} & sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} + \mathbf{std}_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n cd_m} \\ & + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + \mathbf{sto}_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m ld_r} \end{aligned} \quad (7.14)$$

$$\forall n \in I \wedge m \in E \wedge r \in R : z_n^r = 1 \wedge z_m^r = 1$$

Hierbei ist (wie oben) zu beachten, dass die Leercontainerdepots identisch sein können, $cd_n = cd_m$, also $sh_{cd_n cd_m} = 0$ ist. In diesem Fall wird trotzdem zweimal die identische Servicezeit $stl_{cd_n} = stl_{cd_m}$ addiert, da davon auszugehen ist, dass der Zeitaufwand für die Verwaltung und das Handling (Hochheben des einen und Absetzen des anderen Containers) nicht reduziert werden kann.

Die Gesamtzeit einer Kombinationsfahrt bestehend aus einem Export- und einem anschließenden Importkundenauftrag ist wie folgt definiert (für den Fall ohne Kooperation):

$$\begin{aligned} & sh_{ld_r cd_m} + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + \mathbf{sto}_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m o_n} \\ & + sto_n + sh_{o_n d_n} + \mathbf{std}_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n ld_r} \end{aligned} \quad (7.15)$$

$$\forall n \in I \wedge m \in E \wedge r \in R : z_n^r = 1 \wedge z_m^r = 1$$

Hierbei ist (wie oben) zu beachten, dass das Containerterminal als Zielort von m und als Startort von n identisch sein kann $d_m = o_n$, also $sh_{d_m o_n} = 0$. In diesem Fall wird trotzdem zweimal die identische Servicezeit $std_m = sto_n$ addiert, da davon auszugehen ist, dass der Zeitaufwand für die Verwaltung und das Handling (Hochheben des einen und Absetzen des anderen Containers) nicht reduziert werden kann.

Die Gesamtzeit für die *Kombinationsfahrt mit Containerdrehen* (nur für den Fall Importkundenauftrag mit einem anschließenden Exportkundenauftrag) berechnet sich wie folgt (für den Fall ohne Kooperation). Die direkte Kombinationsfahrt mit Containerdrehen tritt auf, wenn $d_n = o_m$ ist, also $sh_{d_n o_m} = 0$.

$$\begin{aligned} & sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} + \mathbf{std}_n + sh_{d_n o_m} + \mathbf{sto}_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m ld_r} \end{aligned} \quad (7.16)$$

$$\forall n \in I \wedge m \in E \wedge r \in R : z_n^r = 1 \wedge z_m^r = 1$$

Folgende Zeitfensterparameter beziehen sich auf den Zielort oder auf den Startort der Kundenaufträge. Es bestehen keine Zeitfenster für die Leercontainerlager oder die LKW-Depots der Fuhrunternehmen. Eine Übersicht zur Funktion der Zeitfenster folgt bei der Vorstellung der Restriktionen. Das weiche Zeitfenster wird bereits in Calore et al. (2017) genutzt. Die harten Zeitfenster werden in der Modellerweiterung hinzugefügt.

$TWearly_n$ Beginn des *weichen* Zeitfensters des Zielortes am gewünschten Fahrtag des Kundenauftrages $n \in N$

$TWlate_n$ Ende des *weichen* Zeitfensters des Zielortes am gewünschten Fahrtag des Kundenauftrages $n \in N$

$sTWearlyS_n$ Beginn des *harten* Zeitfensters des Startortes des Kundenauftrages $n \in N$ (Neu)

$sTWlateS_n$ Ende des *harten* Zeitfensters des Startortes des Kundenauftrages $n \in N$ (Neu)

$sTWearlyE_n$ Beginn des *harten* Zeitfensters des Zielortes des Kundenauftrages $n \in N$ (Neu)

$sTWlateE_n$ Ende des *harten* Zeitfensters des Zielortes des Kundenauftrages $n \in N$ (Neu)

Harte Zeitfenster müssen eingehalten werden, d. h., die Ankunftszeit des LKW an dem jeweiligen Knoten muss innerhalb des Zeitfensters liegen. Weiche Zeitfenster sollten eingehalten werden. Wenn weiche Zeitfenster nicht eingehalten werden, also verletzt werden, entstehen Strafkosten. Es bestehen unterschiedliche Strafkosten für eine Unterschreitung Ce_n und eine Überschreitung Cl_n des weichen Zeitfensters.

Ce_n Verfrühungskosten pro Stunde des Kundenauftrages $n \in N$

Cl_n Verspätungskosten pro Stunde des Kundenauftrages $n \in N$

7.2.3 Entscheidungsvariablen

Es sind die folgenden Entscheidungsvariablen zu definieren.

7.2.3.1 Entscheidungsvariablen mit Kundenauftrags- und Fahrtentypenbezug

Es bestehen drei binäre Entscheidungsvariablengruppen mit Kundenauftragsbezug, die festlegen, ob der Kundenauftrag als Einzelfahrt, Kombinationsfahrt oder Kombinationsfahrt mit Containerdrehen durchgeführt wird.

$x_{nr}^t \in \{0,1\}$ 1, wenn der Kundenauftrag $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ als Einzelfahrt durchgeführt wird; sonst 0.

$y_{nmr}^t \in \{0,1\}$ 1, wenn eine Kombinationsfahrt (direkt oder indirekt) aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird; sonst 0.

$\hat{y}_{nmr}^t \in \{0,1\}$ 1, wenn eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in \widehat{PIE}$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ von dem Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird; sonst 0.

7.2.3.2 Entscheidungsvariablen mit Zeitbezug

Es existieren sieben kontinuierliche Entscheidungsvariablengruppen mit Zeitbezug. Hiervon beziehen sich drei Entscheidungsvariablen auf Einzelfahrten und vier Entscheidungsvariablen auf Kombinationsfahrten (direkt, indirekt und Containerdrehen). Die letzte Variablengruppe zur Wartezeit wird dem Modell neu hinzugefügt.

f_n^t Ankunftszeit in Stunden am Zielort (vor der Servicezeit am Zielort) des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.

$f_{late}_n^t$ Verspätung in Stunden des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort (Überschreitung des weichen Zeitfensters).

$f_{early}_n^t$ Verfrühung in Stunden des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort (Unterschreitung des weichen Zeitfensters).

g_{nm}^t Ankunftszeit in Stunden am Zielort (vor der Servicezeit am Zielort) des zweiten Kundenauftrages $m \in N$ von einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.

$glate_{nm}^t$	Verspätung in Stunden bei einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundenauftrages $m \in N$ (Überschreitung des weichen Zeitfensters).
$gearly_{nm}^t$	Verfrühung in Stunden bei einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundenauftrages $m \in N$ (Unterschreitung des weichen Zeitfensters).
w_{nmr}^t	Wartezeit eines LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ bei einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. (Neu)

7.2.3.3 Entscheidungsvariablen mit Zielfunktionsbezug

Die Zielfunktion besteht aus mehreren Summanden, die jeweils mit einer eigenen kontinuierlichen Entscheidungsvariablen­gruppe abgebildet werden. Darüber hinaus werden drei Hilfsvariablen­gruppen für die Verfrühungs- und Verspätungskosten definiert, damit das resultierende mathematische Modell linear bleibt.

I_r^t	Aus Kundenaufträgen erwirtschafteter Deckungsbeitrag von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. Der Kundendeckungsbeitrag gibt den Deckungsbeitrag (Erlös minus Fahrtkosten) aller durchgeführten Kundenaufträge des Fuhrunternehmens am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ an.
D_r^t	Verfrühungs- und Verspätungskosten aufgrund der Verletzung weicher Zeitfenster von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$EarlTardn x_n^t$	Verfrühungs- und Verspätungskosten der Einzelfahrt des Kundenauftrages $n \in N$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$EarlTardn y_{nmr}^t$	Verfrühungs- und Verspätungskosten der Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$Earl\widehat{Tardn} y_{nmr}^t$	Verfrühungs- und Verspätungskosten der Kombinationsfahrt mit Containerdrehen $(n, m) \in PIE$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$ComP_r^t$	Kompensationszahlung, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ erhält.
$ComM_r^t$	Kompensationszahlung, die Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ zahlt.
Wk_r^t	Wartekosten des Fuhrunternehmens $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.
$TaglProfit_r^t$	Gesamtprofit des Fuhrunternehmens $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.

7.2.4 Zielfunktion

$$\begin{aligned} & \text{Maximiere } \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} I_r^t - D_r^t - Wk_r^t \\ \Leftrightarrow & \text{Maximiere } \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \text{TaglProfit}_r^t \end{aligned} \quad (7.17)$$

Die Zielfunktion hat zum Ziel den Gesamtprofit über alle Fuhrunternehmen und alle Tage zu maximieren. Hierfür werden vom Kundendeckungsbeitrag die Verfrühungs- und Verspätungskosten und die Wartekosten subtrahiert und dies für alle Tage $t \in \{1, \dots, T\}$ und Fuhrunternehmen $r \in R$ summiert. Im engeren Sinne kann daher auch von einer Deckungsbeitragsmaximierung gesprochen werden, da keine Fixkosten berücksichtigt werden.

Die Kompensationskosten $ComP_r^t$ und $ComM_r^t$ sind in der Veröffentlichung von Calore et al. (2017) noch in der Zielfunktion enthalten. Das ist aber nicht notwendig, da sich die zu zahlenden und die erhaltenen Kompensationskosten über die Summe der Fuhrunternehmen R wieder ausgleichen. Sie sind nur notwendig für die Restriktionsgruppen 7.29 und 7.30. Aus diesem Grund ist die Zielfunktion ohne die Kompensationskosten äquivalent zur Zielfunktion mit Kompensationskosten, welche den Gesamtprofit aller Fuhrunternehmen beschreibt.

7.2.5 Nebenbedingungen

Es bestehen Nebenbedingungsgruppen u. a. für die Definition der Zielfunktionsterme, für die Zeitenberechnung und für die Fairness. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

7.2.5.1 Nebenbedingungsgruppen für die Definition der Zielfunktion:

$$\text{TaglProfit}_r^t = I_r^t - D_r^t - Wk_r^t + ComP_r^t - ComM_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.18)$$

Diese Restriktionsgruppe definiert den Gesamtprofit an jedem Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ für jedes einzelne Fuhrunternehmen $r \in R$. Hierfür werden jeweils der Kundendeckungsbeitrag und die erhaltenen Kompensationszahlungen summiert und davon die Verfrühungs- und Verspätungskosten, die Wartekosten sowie die Kompensationszahlungen, die gezahlt werden müssen, subtrahiert.

Die folgende Restriktionsgruppe dient zur Berechnung des Kundendeckungsbeitrags I_r^t . Sie wird für jeden Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ und für jedes Fuhrunternehmen $r \in R$ gebildet. Sie besteht aus fünf Summanden. Es besteht je ein Summand zur Berechnung des Kundendeckungsbeitrags für Importeinzelfahrten ($n \in I$), Exporteinzelfahrten ($m \in E$), Import-Export-Kombinationsfahrten ($(n, m) \in PIE$), Export-Import-Kombinationsfahrten ($(m, n) \in PEI$) und Import-Export-Kombinationsfahrten-mit-Containerdrehen ($(n, m) \in \widehat{PIE}$). In jedem einzelnen Summanden werden die Erlöse für entweder einen oder zwei Kundenaufträge addiert und die jeweiligen Strecken- und Zeitkosten (vgl. Kapitel 7.2.2.3) subtrahiert, wobei die Streckendistanz in km mit dem Kostensatz Ckm_r und die Strecke in Stunden mit dem Kostensatz Ch_r multipliziert werden.

$$\begin{aligned}
 I_r^t = & \sum_{n \in I} x_{nr}^t \cdot \left(KErl_n - Ckm_r \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + skm_{cd_n ld_r}) - Ch_r \right. \\
 & \cdot (sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} + std_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n ld_r}) \\
 & + \sum_{m \in E} x_{mr}^t \\
 & \cdot \left(KErl_m - Ckm_r \cdot (skm_{ld_r cd_m} + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + skm_{d_m ld_r}) - Ch_r \right. \\
 & \cdot (sh_{ld_r cd_m} + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m ld_r}) \\
 & + \sum_{(n,m) \in PIE} y_{nmr}^t \\
 & \cdot \left(KErl_n + KErl_m - Ckm_r \right. \\
 & \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} + skm_{cd_n cd_m} + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} \\
 & + skm_{d_m ld_r}) - Ch_r \\
 & \cdot (sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} + std_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n cd_m} + stl_{cd_m} \\
 & + sh_{cd_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m ld_r}) \\
 & + \sum_{(m,n) \in PEI} y_{mnr}^t \\
 & \cdot \left(KErl_n + KErl_m - Ckm_r \right. \\
 & \cdot (skm_{ld_r cd_m} + skm_{cd_m o_m} + skm_{o_m d_m} + skm_{d_m o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n cd_n} \\
 & + skm_{cd_n ld_r}) - Ch_r \\
 & \cdot (sh_{ld_r cd_m} + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} + std_m + sh_{d_m o_n} + sto_n \\
 & + sh_{o_n d_n} + std_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n ld_r}) \\
 & + \sum_{(n,m) \in \widehat{PIE}} \hat{y}_{nmr}^t \\
 & \cdot \left(KErl_n + KErl_m - Cp - Ckm_r \right. \\
 & \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{o_n d_n} + skm_{d_n o_m} + skm_{o_m d_m} + skm_{d_m ld_r}) - Ch_r \\
 & \cdot (sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} + std_n + sh_{d_n o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} + std_m \\
 & + sh_{d_m ld_r}) \left. \right) \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \tag{7.19}
 \end{aligned}$$

Alle Summanden sind analog aufgebaut. Im letzten Summanden für die Import-Export-Kombinationsfahrt mit Containerdrehen wird noch zusätzlich die Kostenpauschale für das Containerdrehen Cp subtrahiert, bevor hier mit der Entscheidungsvariable für die Kombinationsfahrt mit Containerdrehen multipliziert wird und über alle Import-Export-Kombinationsfahrten mit Containerdrehen summiert wird $((n, m) \in \widehat{PIE})$. Durch die Multiplikation mit den jeweiligen Entscheidungsvariablen fließen nur die Erlöse und Kosten der tatsächlich durchgeführten Aufträge in den Kundendeckungsbeitrag I_r^t mit ein (in entsprechender Form $x_{nr}^t = 1 \vee y_{nmr}^t = 1 \vee \hat{y}_{nmr}^t = 1$). Diese Restriktion wird im Vergleich zu Calore et al. (2017) korrigiert und umfangreich erweitert, um die Praxisnähe zu erhöhen. So wird nach Streckenkilometern und Stundenkosten, nach Vollfahrten, Leercontainerfahrten und

Leerfahrten differenziert (inkl. Berücksichtigung der Leercontainerterminals) sowie der Fall der Kombinationsfahrten mit Containerdrehen ergänzt.

$$\begin{aligned}
 D_r^t = & \sum_{n \in N} x_{nr}^t \cdot (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 & + \sum_{(n,m) \in P} y_{nmr}^t ((Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 & + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t)) \\
 & + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} \hat{y}_{nmr}^t ((Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 & + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t)) \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.20)
 \end{aligned}$$

Die obige Restriktionsgruppe definiert die Verfrühungs- und Verspätungskosten, welche aus einem Summanden für die Einzelfahrten, einem Summanden für die Kombinationsfahrten und einem Summanden für die Kombinationsfahrten mit Containerdrehen besteht. Diese Restriktionsgruppe ist nicht linear, da Entscheidungsvariablen multipliziert werden. Die Restriktionsgruppe kann wie folgt linearisiert werden.

$$\begin{aligned}
 EarLTardnx_{nr}^t \geq & \left(100 + \max_{n \in N}(Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N}(Cl_n) \cdot T \cdot 24\right) \cdot (x_{nr}^t - 1) \\
 & + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \quad \forall n \in N \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EarLTardnx_{nr}^t \leq & - \left(100 + \max_{n \in N}(Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N}(Cl_n) \cdot T \cdot 24\right) \cdot (x_{nr}^t - 1) \\
 & + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \quad \forall n \in N \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.22)
 \end{aligned}$$

Die obigen beiden Restriktionsgruppen legen für den Fall $x_{nr}^t = 1$ fest, dass $EarLTardnx_{nr}^t$ exakt den Verfrühungs- und Verspätungskosten des Kundenauftrages am ausgeführten Tag t entspricht. Hierfür werden jeweils die Verfrühung und die Verspätung mit dem betreffenden Kostensatz pro Stunde multipliziert. Der Faktor $\left(100 + \max_{n \in N}(Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N}(Cl_n) \cdot T \cdot 24\right)$ entspricht einem sogenannten BigM und ist 100 Einheiten höher als der höchste theoretische Wert von $(Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t)$. Die Restriktionsgruppen gelten für alle Kundenaufträge, Fuhrunternehmen und Tage und deren Kombination. In der Regel entstehen für Einzelfahrten keine Verspätungs- oder Verfrühungskosten, da auf keinen zweiten Kundenauftrag Rücksicht genommen werden muss. Dennoch sind die Restriktionen notwendig, damit die Ankunftszeiten f_n^t in späteren Restriktionsgruppen sinnvoll und realistisch gewählt werden können.

$$\begin{aligned}
 EarLTardny_{nmr}^t & \geq 2 \cdot \left(100 + \max_{n \in N}(Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N}(Cl_n) \cdot T \cdot 24\right) \cdot (y_{nmr}^t - 1) \\
 & + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 & + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t) \quad \forall (n,m) \in P \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &EarlTardny_{nmr}^t \\
 &\leq -2 \cdot \left(100 + \max_{n \in N} (Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N} (Cl_n) \cdot T \cdot 24 \right) \cdot (y_{nmr}^t - 1) \\
 &\quad + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 &\quad + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t) \quad \forall (n, m) \in P \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned} \tag{7.24}$$

Die obigen beiden Restriktionsgruppen legen für den Fall $y_{nmr}^t = 1$ fest, dass $EarlTardny_{nmr}^t$ exakt den Verfrühungs- und Verspätungskosten der beiden Kundenaufträge der Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am ausgeführten Tag t entspricht. Hierfür werden jeweils die Verfrühung und Verspätung mit dem betreffenden Kostensatz pro Stunde multipliziert und für beide Kundenaufträge addiert. Der o. g. BigM Faktor wird hier, da zwei Kundenaufträge vorliegen, noch mit dem Faktor 2 multipliziert. Die Restriktionsgruppen werden erweitert und gelten für alle Kundenaufträge, Fuhrunternehmen und Tage und deren Kombination.

$$\begin{aligned}
 &Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t \\
 &\geq 2 \cdot \left(100 + \max_{n \in N} (Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N} (Cl_n) \cdot T \cdot 24 \right) \cdot (\hat{y}_{nmr}^t - 1) \\
 &\quad + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 &\quad + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t) \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned} \tag{7.25}$$

$$\begin{aligned}
 &Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t \\
 &\leq -2 \cdot \left(100 + \max_{n \in N} (Ce_n) \cdot T \cdot 24 + \max_{n \in N} (Cl_n) \cdot T \cdot 24 \right) \cdot (\hat{y}_{nmr}^t - 1) \\
 &\quad + (Ce_n \cdot fearly_n^t + Cl_n \cdot flate_n^t) \\
 &\quad + (Ce_m \cdot gearly_{nm}^t + Cl_m \cdot glate_{nm}^t) \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned} \tag{7.26}$$

Die obigen beiden Restriktionsgruppen legen für den Fall $\hat{y}_{nmr}^t = 1$ fest, dass $Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t$ exakt den Verfrühungs- und Verspätungskosten der beiden Kundenaufträge der Kombinationsfahrt $(n, m) \in \widehat{PIE}$ am ausgeführten Tag t entspricht. Die Funktionsweise ist ähnlich zu 7.23.

Durch die Verknüpfung der kundenauftragsbezogenen Entscheidungsvariablen mit den zeitbezogenen Entscheidungsvariablen werden nur die Verspätungen und Verfrühungen berücksichtigt, die tatsächlich auch eintreten. Die oben genannten sechs Restriktionsgruppen stellen damit eine wesentliche Verknüpfung der Entscheidungsvariablen mit Zeitbezug zu den Entscheidungsvariablen mit Kundenauftragsbezug her.

$$D_r^t = \sum_{n \in N} EarlTardnx_{nr}^t + \sum_{(n,m) \in P} EarlTardny_{nmr}^t + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.27)$$

Durch die Nutzung der Hilfsvariablen $EarlTardnx_{nr}^t$ für die Einzelfahrten, $EarlTardny_{nmr}^t$ für die Kombinationsfahrten und $Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t$ für die Kombinationsfahrten mit Containerdrehen ist eine lineare Schreibweise möglich, sodass die nicht-lineare Restriktionsgruppe 7.20 durch die lineare Restriktionsgruppe 7.27 ersetzt werden kann. Diese Restriktionsgruppe summiert die Verfrühungs- und Verspätungskosten für Einzelfahrten, Kombinationsfahrten und Kombinationsfahrten mit Containerdrehen für alle Fuhrunternehmen und Tage.

$$Wk_r^t = \sum_{(n,m) \in P} w_{nmr}^t \cdot Ch_r \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.28)$$

Diese Restriktionsgruppe definiert die Wartekosten von allen Fuhrunternehmen an allen Tagen. Hierfür werden die Wartezeiten von Kombinationsfahrten mit dem Kostensatz pro Stunde multipliziert und über alle Kundenauftragskombinationen summiert. Die Berücksichtigung von Wartezeiten stellt eine Erweiterung gegenüber dem Modell von Calore et al. (2017) dar.

$$ComP_r^t = \sum_{q \in R, q \neq r} \left(\sum_{n \in N} x_{nq}^t \cdot Cc_n \cdot z_n^r + \sum_{(n,m) \in P} y_{nmq}^t \cdot (Cc_n \cdot z_n^r + Cc_m \cdot z_m^r) + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} \hat{y}_{nmq}^t \cdot (Cc_n \cdot z_n^r + Cc_m \cdot z_m^r) \right) \quad (7.29)$$

$$\forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}$$

Die Kompensationszahlungen, die ein Fuhrunternehmen erhält, entstehen aus der Abgabe von Kundenaufträgen, bei denen das Fuhrunternehmen der Eigentümer ist. Hierfür werden für Einzelfahrten die Kompensationskosten Cc_n summiert, die dem Fuhrunternehmen gehören ($z_n^r = 1$) und von einem anderen Fuhrunternehmen durchgeführt werden ($x_{nq}^t = 1$). Für die Kombinationsfahrten $(n, m) \in P$ und die Kombinationsfahrten mit Containerdrehen $(n, m) \in \widehat{PTE}$ ist das Vorgehen ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Kompensationskosten von bis zu zwei Kundenaufträgen, falls einer oder beide vom Fuhrunternehmen abgegeben werden, summiert werden. Insgesamt werden die Kosten über alle anderen, potenziell ausführenden, Fuhrunternehmen ($q \in R, q \neq r$) summiert. Die Restriktionsgruppe gilt für alle Fuhrunternehmen $r \in R$ und alle Tage $t \in \{1, \dots, T\}$. Es ist möglich, dass bei einer kooperativen Kombinationsfahrt die kombinierten Kundenaufträge an unterschiedliche andere Fuhrunternehmen abgegeben werden, was durch die Differenzierung nach z_n^r und z_m^r möglich ist. Außerdem ist es dadurch auch möglich, dass nur einer der beiden Aufträge abgegeben wird.

$$\begin{aligned}
 ComM_r^t = & \sum_{q \in R, q \neq r} \left(\sum_{n \in N} x_{nr}^t \cdot Cc_n \cdot z_n^q + \sum_{(n,m) \in P} y_{nmr}^t \cdot (Cc_n \cdot z_n^q + Cc_m \cdot z_m^q) \right. \\
 & \left. + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} \hat{y}_{nmr}^t \cdot (Cc_n \cdot z_n^q + Cc_m \cdot z_m^q) \right) \\
 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned} \tag{7.30}$$

Die Kompensationszahlungen, die ein Fuhrunternehmen $r \in R$ bezahlt, entstehen aus der Annahme und Ausführung von fremden Kundenaufträgen. Hierfür werden für Einzelfahrten die Kompensationskosten summiert, die einem anderen Fuhrunternehmen gehören ($z_n^q = 1$) und von diesem Fuhrunternehmen durchgeführt werden ($x_{nr}^t = 1$). Für die Kombinationsfahrten $(n, m) \in P$ und die Kombinationsfahrten mit Containerdrehen $(n, m) \in \widehat{PTE}$ ist das Vorgehen ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Kompensationskosten von bis zu zwei Kundenaufträgen, wenn einer oder beide vom Fuhrunternehmen ausgeführt werden, summiert werden. Insgesamt werden die Kosten wie oben über alle anderen Fuhrunternehmen ($q \in R, q \neq r$) summiert. Die Restriktionsgruppe gilt für alle Fuhrunternehmen $r \in R$ und alle Tage $t \in \{1, \dots, T\}$.

7.2.5.2 Nebenbedingungsgruppen für die Zeitenberechnung

$$f_{late}_n^t \geq f_n^t - TW_{late}_n + 24 \cdot (t - tg_n) \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \tag{7.31}$$

Diese Restriktionsgruppe bestimmt eine mögliche Verspätung in Stunden bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. Sollte die Ankunftszeit am Zielort f_n^t größer sein als das Ende des *weichen* Zeitfensters des Zielortes am Fahrttag TW_{late}_n , besteht eine Verspätung. Ist der Fahrttag t ein späterer Tag als der gewünschte Tag tg_n , werden diese 24 Stunden auch auf $f_{late}_n^t$ hinzuaddiert. Die Restriktionsgruppe stammt aus Calore et al. (2017).

$$f_{early}_n^t \geq TW_{early}_n - f_n^t + 24 \cdot (tg_n - t) \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \tag{7.32}$$

Diese Restriktionsgruppe bestimmt eine mögliche Verfrühung in Stunden bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. Sollte die Ankunftszeit am Zielort f_n^t kleiner sein als der Beginn des *weichen* Zeitfensters des Zielortes am Fahrttag TW_{early}_n , besteht eine Verfrühung. Ist der Fahrttag t ein früherer Tag als der gewünschte Tag tg_n , werden diese 24 Stunden auch auf $f_{early}_n^t$ hinzuaddiert. Die Restriktionsgruppe stammt aus Calore et al. (2017).

$$f_n^t \leq sTW_{late}E_n \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \tag{7.33}$$

$$sTW_{early}E_n \leq f_n^t \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \tag{7.34}$$

Diese neuen Restriktionsgruppen legen fest, dass das *harte* Zeitfenster bzgl. der Ankunftszeit am Zielort des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ nicht überschritten oder unterschritten, also verletzt werden darf.

$$f_n^t - (sto_n + sh_{o_n d_n}) \leq sTWlateS_n \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.35)$$

$$sTWearlyS_n \leq f_n^t - (sto_n + sh_{o_n d_n}) \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.36)$$

Diese neuen Restriktionsgruppen legen fest, dass das *harte* Zeitfenster bzgl. der Ankunftszeit am Startort des Kundenauftrages $n \in N$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ nicht überschritten oder unterschritten, also verletzt werden darf. Hierfür werden von der Ankunftszeit am Zielort die Servicezeit am Startort und die Fahrzeit vom Startort zum Zielort subtrahiert, um die Ankunftszeit am Startort zu erhalten.

Folgende Abbildung 18 gibt einen schematischen Überblick über den Zusammenhang zwischen den gegebenen Zeitfenstern und Servicezeiten und den gesuchten Ankunfts- und ggf. Verfrühungs- bzw. Verspätungszeiten am Beispiel eines Exportkundenauftrages. Es ist zu erkennen, dass die Ankunftszeiten am Startort und Zielort in ihrem harten Zeitfenster bleiben müssen. Die Ankunftszeit am Zielort kann aber innerhalb des harten Zeitfensters von den Grenzen des weichen Zeitfensters z. B. nach vorne (s. gestrichelte Linien links) abweichen. Die harten Zeitfenster können z. B. die Öffnungszeiten eines Standorts im Hafenhinterland darstellen. Die weichen Zeitfenster hingegen können gewünschte Ankunftszeiten der Container im Hafenhinterland oder insbesondere gebuchte Zeitfenster am Containerterminal darstellen. Die harten Zeitfenster bestehen an jedem Tag, sodass es auch möglich ist, den Auftrag um einen Tag zu verschieben, was zu einer hohen Verspätung führt (s. gestrichelte Linien rechts). Die Zeit zwischen der Ankunftszeit am Startort und der Ankunftszeit am Zielort ist unveränderlich.

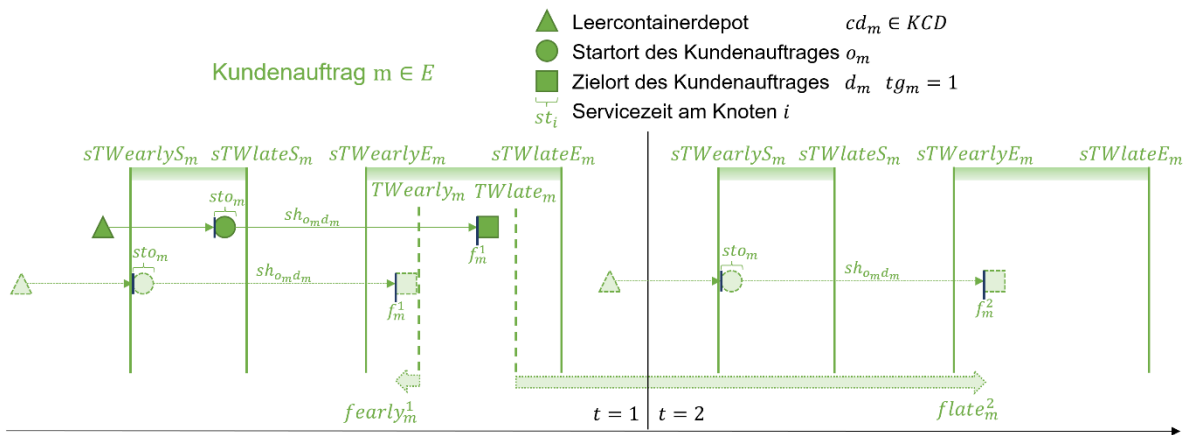


Abbildung 18: Zeitfensterschema Einzelfahrt Exportkundenauftrag

Die Zeitfensterrestriktionsgruppen für die Kombinationsfahrten sind ähnlich aufgebaut, aber umfangreicher, da die Zeitfenster von zwei Kundenaufträgen berücksichtigt werden müssen.

$$g_{nm}^t \geq f_n^t + std_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n cd_m} + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} - M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t\right) \quad \forall (n, m) \in PIE \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.37)$$

Diese Restriktionsgruppe gibt an, dass für die Kombinationsfahrt aus einem Importkundenauftrag und einem anschließenden Exportkundenauftrag (*PIE*) die Ankunftszeit am Zielort des Exportkundenauftrages g_{nm}^t mindestens so groß ist wie die Ankunftszeit am Zielort des Importkundenauftrages f_n^t zuzüglich der Service- und Fahrzeiten zwischen den Kundenaufträgen inkl. der Leercontainerdepots. Diese Restriktionsgruppe gilt nicht, wenn es sich um eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen handelt bzw. gilt nur, wenn es sich um eine Kombinationsfahrt ohne Containerdrehen handelt, also für ein Fuhrunternehmen gilt $y_{nmr}^t = 1$. Dabei werden y_{nmr}^t über alle Fuhrunternehmen summiert, da jeweils nur ein $y_{nmr}^t = 1$ aus $r \in R$ sein kann (s. Kapitel 7.2.5.4). Alternativ könnte die Restriktionsgruppe für alle $r \in R$ erweitert werden, was allerdings den Nachteil einer Vervielfachung der Restriktionsgruppe um den Faktor $|R|$ nach sich zieht. Die Restriktionsgruppe gilt für alle möglichen Import-Export-Kombinationsfahrten *PIE* und alle Tage. Die Restriktionsgruppe wird u. a. hinsichtlich der Servicezeiten weiterentwickelt.

$$g_{nm}^t \geq f_n^t + std_m + sh_{d_n o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m} \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.38)$$

Handelt es sich um eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen, gilt nur diejenige Restriktionsgruppe, die festlegt, dass die Ankunftszeit am Zielort des Exportkundenauftrages g_{nm}^t mindestens so groß ist wie die Ankunftszeit am Zielort des Importkundenauftrages f_n^t zuzüglich der Service- und Fahrzeiten zwischen den Kundenaufträgen (ohne Fahrten von/zu Leercontainerdepots). Da diese Restriktionsgruppe immer „schwächer“ ist, also weniger eingrenzt als die vorherige Restriktionsgruppe, kann diese immer aktiv bleiben, auch wenn eine normale Kombinationsfahrt oder auch keine Kombinationsfahrt für das spezifische Tupel $(n, m) \in \widehat{PIE}$ stattfindet. Es ist daher keine Konstruktion mit einem BigM nötig. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die vier Fälle, die die Entscheidungsvariablen (y_{nmr}^t und \hat{y}_{nmr}^t) (theoretisch) annehmen können und ihre Auswirkungen auf die o. g. zwei Restriktionsgruppen. Die Restriktionsgruppe (7.38) wird neu entwickelt. Durch die Einschränkung auf \widehat{PIE} statt *PIE* können viele Restriktionen eingespart werden.

Tabelle 6: Auswirkungen auf Zeitrestriktionen für Kombinationsfahrten

		Restriktion <i>PIE</i> 7.37	Restriktion \widehat{PIE} 7.38
$y_{nmr}^t = 1$	$\hat{y}_{nmr}^t = 1$	Nicht möglich (nach Restriktion 7.63)	
$y_{nmr}^t = 1$	$\hat{y}_{nmr}^t = 0$	Aktiv und zielfunktionswirksam	Aktiv, aber schwächer als 7.37 und nicht zielfunktionswirksam durch Restriktionen 7.25 und 7.26
$y_{nmr}^t = 0$	$\hat{y}_{nmr}^t = 1$	Inaktiv durch BigM	Aktiv und zielfunktionswirksam
$y_{nmr}^t = 0$	$\hat{y}_{nmr}^t = 0$	Inaktiv durch BigM	Aktiv, aber nicht zielfunktionswirksam durch Restriktion 7.25 und 7.26

$$g_{mn}^t \geq f_m^t + std_m + sh_{d_m o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n} \quad \forall (m, n) \in PEI \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.39)$$

Die o.g. Restriktionsgruppe (7.39) gibt an, dass für die Kombinationsfahrt aus einem Exportkundenauftrag und einem anschließenden Importkundenauftrag (*PEI*) die Ankunftszeit am Zielort des Importkundenauftrages g_{mn}^t mindestens so groß ist wie die Ankunftszeit am Zielort des Exportkundenauftrages f_m^t zuzüglich der Service- und Fahrzeiten zwischen den Kundenaufträgen. Diese Restriktionsgruppe wird u. a. hinsichtlich der Servicezeiten weiterentwickelt.

$$glate_{nm}^t \geq g_{nm}^t - TWlate_m + 24 \cdot (t - tg_m) \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.40)$$

Diese Restriktionsgruppe bestimmt eine mögliche Verspätung in Stunden bzgl. der Ankunftszeit am Zielort von Kundenauftrag $m \in N$ in einer Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. Die Restriktionsgruppe stammt aus Calore et al. (2017).

$$gearly_{nm}^t \geq TWearly_m - g_{nm}^t + 24 \cdot (tg_m - t) \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.41)$$

Diese Restriktionsgruppe bestimmt eine mögliche Verfrühung in Stunden bzgl. der Ankunftszeit am Zielort von Kundenauftrag $m \in N$ in einer Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$. Die Restriktionsgruppe stammt aus Calore et al. (2017).

$$g_{nm}^t + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \leq sTWlateE_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.42)$$

$$g_{nm}^t + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \geq sTWearlyE_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.43)$$

$$g_{nm}^t + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \leq sTWlateE_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.44)$$

$$g_{nm}^t + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \geq sTWearlyE_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.45)$$

Diese neuen Restriktionsgruppen legen fest, dass das *harte* Zeitfenster bzgl. der Ankunftszeit am Zielort von Kundenauftrag $m \in N$, welcher in einer Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ oder von Kundenauftrag $m \in E$, welcher in einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen $(n, m) \in \widehat{PIE}$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ durchgeführt wird, nicht überschritten oder unterschritten, also verletzt werden darf. Hierbei wird ein BigM genutzt, damit diese Restriktion jeweils nur aktiv ist, falls ein Fuhrunternehmen $r \in R$ tatsächlich diese Kombinationsfahrt durchführt. Die Restriktionsgruppen werden neu entwickelt. Das BigM ist hier im Gegensatz zu den ähnlichen Restriktionen für f_n^t notwendig, da alle möglichen (auch nicht durchgeführten) g_{nm}^t auf Basis von f_n^t gebildet werden.

$$g_{nm}^t - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \leq stWlateS_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.46)$$

$$g_{nm}^t - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \geq stWearlyS_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.47)$$

$$g_{nm}^t - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \leq stWlateS_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.48)$$

$$g_{nm}^t - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \geq stWearlyS_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.49)$$

Diese Restriktionsgruppen legen fest, dass das *harte* Zeitfenster bzgl. der Ankunftszeit am Startort von Kundenauftrag $m \in N$, welcher in einer Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ oder von Kundenauftrag $m \in E$, welcher in einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen $(n, m) \in \widehat{PIE}$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ durchgeführt wird, nicht überschritten oder unterschritten, also verletzt werden darf. Hierfür werden von der Ankunftszeit am Zielort die Servicezeit am Startort und die Fahrzeit vom Startort zum Zielort subtrahiert, um die Ankunftszeit am Startort zu erhalten. Hierbei wird ein BigM genutzt, damit diese Restriktion jeweils nur aktiv ist, falls ein Fuhrunternehmen $r \in R$ tatsächlich diese Kombinationsfahrt durchführt. Diese Restriktionsgruppe wird neu entwickelt.

$$\sum_{r \in R} \left(x_{mr}^{tg_m} + \sum_{n \in I} y_{nmr}^{tg_m} + \sum_{n \in I} y_{mnr}^{tg_m} + \sum_{\substack{n \in I: \\ (n, m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^{tg_m} \right) = 1 \quad \forall m \in E \quad (7.50)$$

Diese neue Restriktionsgruppe regelt, dass alle Exportkundenaufträge $m \in E$ am gewünschten Tag tg_m gefahren werden müssen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass das auslaufende Containerschiff verpasst wird. Auch eine frühere Fahrt des Exportkundenauftrages zum Terminal wird damit ausgeschlossen, um mögliche Lagerkosten zu vermeiden.

$$-T \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \left(x_{nr}^t + \sum_{m \in E} y_{nmr}^t + \sum_{m \in E} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in E: \\ (n, m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) + t \leq tl_n \quad \forall n \in \{1, \dots, T\} \quad (7.51)$$

Diese neue Restriktionsgruppe gibt an, dass der späteste Tag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in I$ nicht überschritten werden kann, der Tag der Durchführung t also kleiner oder gleich tl_n sein muss. Der erste Term aktiviert die jeweilige Restriktion, wenn der Kundenauftrag an dem betreffenden Tag ausgeführt wird. Das T wirkt hierbei wie ein BigM. Diese Restriktionsgruppe wird auch neu entwickelt.

$$T \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \left(x_{nr}^t + \sum_{m \in E} y_{nmr}^t + \sum_{m \in E} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in E: \\ (n,m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) + t \geq te_n \quad \forall n \in I \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.52)$$

Diese Restriktionsgruppe gibt an, dass der früheste Tag für die Ausführung eines Kundenauftrages $n \in I$ nicht unterschritten werden kann, der durchgeführte Tag also größer oder gleich te_n sein muss. Die Funktionsweise ist analog zur Restriktionsgruppe 7.51. Diese Restriktionsgruppe wird auch neu entwickelt.

$$g_{nm}^t - (f_n^t + std_n + sh_{d_n c_d_n} + stl_{c_d_n} + sh_{c_d_n c_d_m} + stl_{c_d_m} + sh_{c_d_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m}) - M \cdot (1 - y_{nmr}^t) \leq w_{nmr}^t \quad \forall (n, m) \in PIE \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.53)$$

$$g_{mn}^t - (f_m^t + std_m + sh_{d_m o_m} + sto_n + sh_{o_n d_n}) - M \cdot (1 - y_{mnr}^t) \leq w_{mnr}^t \quad \forall (m, n) \in PEI \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.54)$$

$$g_{nm}^t - (f_n^t + std_n + sh_{d_n o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m}) - M \cdot (1 - \hat{y}_{nmr}^t) \leq w_{nmr}^t \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.55)$$

Diese drei neuen Restriktionsgruppen haben den Zweck, die Wartezeit eines LKW von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ bei einer Kombinationsfahrt aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in PIE$, $(m, n) \in PEI$ oder $(n, m) \in \widehat{PIE}$ zu bestimmen. Hierfür wird von der Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundenauftrages g_{nm}^t bzw. g_{mn}^t die Ankunftszeit am Zielort des ersten Kundenauftrages f_n^t bzw. f_m^t sowie die spezifischen dazwischen liegenden Service- und Fahrzeiten subtrahiert. Der daraus entstehende Betrag entspricht dem zeitlichen Abstand zwischen der, auf Basis des ersten Kundenauftrages frühestmöglichen, Ankunftszeit und der tatsächlichen Ankunftszeit am zweiten Kundenauftrag. Die Wartezeit muss größer gleich diesem Betrag sein. Durch die Zielfunktion, die die Wartekosten und damit die Wartezeit minimieren möchte, entspricht die Wartezeit immer exakt dem geringstmöglichen Betrag. Der Betrag ist also die Wartezeit. Hierbei wird ein BigM genutzt, damit die jeweilige Restriktionsgruppe nur aktiv ist, falls ein Fuhrunternehmen $r \in R$ tatsächlich die jeweilige Kombinationsfahrt durchführt.

Folgende Abbildung 19 gibt einen schematischen Überblick über den Zusammenhang zwischen den gegebenen Zeitfenstern und Servicezeiten und den gesuchten Ankunfts- und ggf. Verfrühungs- bzw. Verspätungszeiten für Import-Export-Kombinationsfahrten (PIE). Links besteht eine indirekte Kombinationsfahrt mit zwei unterschiedlichen Leercontainerdepots. Rechts ist eine direkte Kombinationsfahrt zu sehen, bei der das Leercontainerdepot identisch ist und somit die Strecke und die Fahrzeit zwischen den Leercontainerdepots gleich null ist. Die harten Zeitfenster werden immer eingehalten. Die weichen Zeitfenster für die Ankunftszeiten am Zielort des jeweiligen Auftrages werden für den Importkundenauftrag unterschritten ($f_{early}_n^2 > 0$) und für den anschließenden Exportkundenauftrag überschritten ($g_{late}_{nm}^2 > 0$). Es ist auch zu erkennen, dass bei der direkten Kombinationsfahrt die Unterschreitung des weichen Zeitfensters des Importkundenauftrages geringer ist aufgrund der Tatsache, dass das identische Leercontainerdepot benutzt wird. Dies verdeutlicht, dass

für Verspätungen und Verfrühungen auch die Leercontainerdepots, die erstmalig in einem solchen Modell Berücksichtigung finden, eine besondere Relevanz haben.

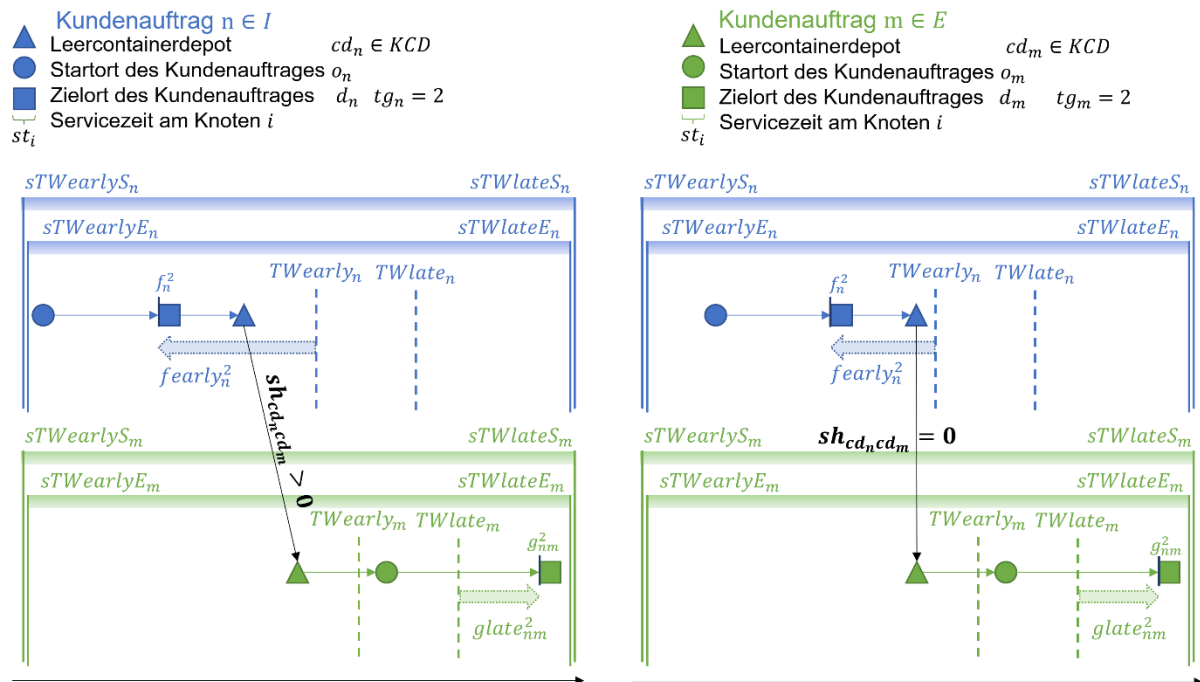


Abbildung 19: Zeitfensterschema Kombinationsfahrten Import-Export

Folgende Abbildung 20 gibt einen schematischen Überblick über den Zusammenhang zwischen den gegebenen Zeitfenstern und Servicezeiten und den gesuchten Ankunfts- und ggf. Verfrühungs- bzw. Verspätungszeiten für Import-Export-Kombinationsfahrten mit Containerdrehen (\widehat{PIE}). Links ist eine indirekte Kombinationsfahrt mit Containerdrehen zu sehen, in der kein Leercontainerdepot angefahren wird, sondern direkt vom Zielort des Importkundenauftrages zum Startort des Exportkundenauftrages (beide im Hinterland) gefahren wird. Im rechten Bild sind die weichen Zeitfenster anders gesetzt, sodass eine Wartezeit zwischen dem Importkundenauftrag und dem anschließenden Exportkundenauftrag entsteht.

Da Entscheidungsvariablen ausschließlich für die Zielorte bestehen, entscheidet das mathematische Modell nicht, an welcher Stelle gewartet wird. Es könnte entweder, wie hier, vor dem Startort oder zwischen Start- und Zielort gewartet werden, solange die harten Zeitfenster eingehalten werden. Es wäre in diesem Schema bei großen harten Zeitfenstern auch denkbar, dass, statt der Wartezeit, eine Verfrühung am Zielort entsteht. Ob eine Wartezeit oder eine Verfrühung entsteht, ist dabei abhängig von den zugrundeliegenden Kosten.

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

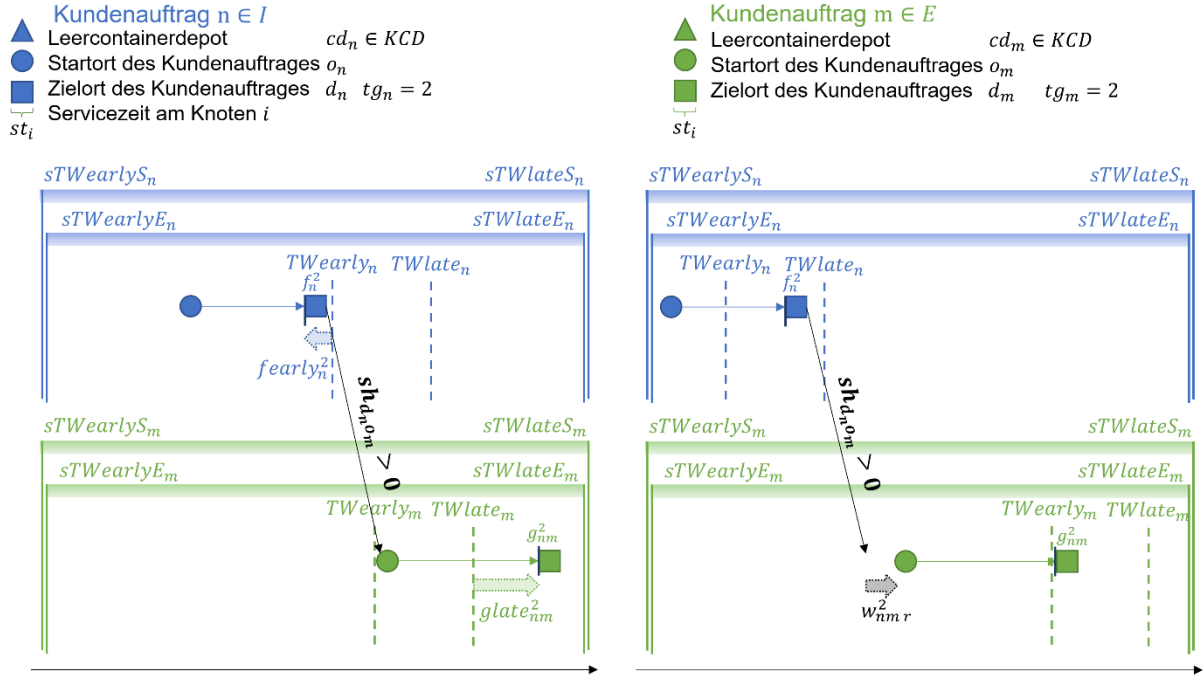


Abbildung 20: Zeitfensterschema Kombinationsfahrten mit Containerdrehen

$$\begin{aligned} & (g_{nm}^t + std_m + sh_{d_m l_{d_r}}) - (f_n^t - (sh_{l_{d_r} o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n})) - M \cdot (1 - y_{nmr}^t) \\ & \leq CarLKWStd_r \quad \forall (n, m) \in PIE \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \end{aligned} \quad (7.56)$$

$$\begin{aligned} & (g_{mn}^t + std_n + sh_{d_n c_{d_n}} + stl_{c_{d_n}} + sh_{c_{d_n} l_{d_r}}) \\ & - (f_m^t - (sh_{l_{d_r} c_{d_m}} + stl_{c_{d_m}} + sh_{c_{d_m} o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m})) - M \cdot (1 - y_{mnr}^t) \\ & \leq CarLKWStd_r \quad \forall (m, n) \in PEI \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \end{aligned} \quad (7.57)$$

$$\begin{aligned} & (g_{nm}^t + std_m + sh_{d_m l_{d_r}}) - (f_n^t - (sh_{l_{d_r} o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n})) - M \cdot (1 - \hat{y}_{nmr}^t) \\ & \leq CarLKWStd_r \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \end{aligned} \quad (7.58)$$

Diese neuen Restriktionsgruppen legen fest, dass die Durchführung einer Kombinationsfahrt $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ nur möglich ist, wenn die maximale LKW Fahrzeit des Fuhrunternehmens $r \in R$ nicht überschritten wird. Es wird der Ankunftszeitpunkt am LKW-Depot nach der Kombinationsfahrt vom Abfahrtszeitpunkt am LKW-Depot vor der Kombinationsfahrt subtrahiert. Hierzu wird die Ankunftszeit am Zielort des zweiten Kundenauftrages g_{nm}^t zu den zusätzlichen nachlaufenden Zeiten addiert und von der Ankunftszeit am Zielort des ersten Kundenauftrages f_n^t abzgl. der vorlaufenden Zeiten subtrahiert. Die zusätzlichen nachlaufenden und vorlaufenden Zeiten sind abhängig vom Typ der Kombinationsfahrt (PIE , PEI oder \widehat{PIE}), bzw. davon, wann die Leercontainerdepots angefahren werden müssen (vgl. hierzu Kapitel 2.3, 3.4 und 7.2.2.3 mit der Aufstellung der einzelnen Kombinationsfahrten). Die drei Restriktionsgruppen benötigen ein BigM in Verbindung mit der jeweiligen Binärvariable y_{nmr}^t , y_{mnr}^t oder \hat{y}_{nmr}^t , um abhängig von dem Wert dieser Variable aktiviert oder deaktiviert zu sein. Die Restriktionsgruppe ist nicht für

Einzelfahrten nötig, da – wie in den Annahmen beschrieben – davon ausgegangen wird, dass Einzelfahrten immer innerhalb der maximalen LKW Fahrzeit liegen.

7.2.5.3 Nebenbedingungsgruppen für die Fuhrunternehmen

$$\sum_{n \in N} x_{nr}^t + \sum_{(n,m) \in P} y_{nmr}^t + \sum_{(n,m) \in \widehat{P\bar{E}}} \hat{y}_{nmr}^t \leq \text{MaxLKW}_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.59)$$

Diese Restriktionsgruppe legt fest, dass die maximale Anzahl an LKW, die ein Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$ zur Verfügung hat, nicht überschritten wird. Hierfür werden je Fuhrunternehmen und Tag alle Entscheidungsvariablen mit Kundenauftragsbezug addiert. Diese Summe muss kleiner sein als die maximale Anzahl an LKW. Die Berechnung der LKW-Kapazität erfolgt nur tageweise, d. h., das Fahren von Kundenaufträgen über eine Dauer von zwei Tagen ist gemäß Annahmen hier nicht möglich und wird hier auch nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass der LKW die Fahrt am LKW-Depot beginnt und am Ende des Tages wieder am Depot sein muss. Dies schließt jedoch nicht aus, dass ein Fuhrunternehmen einen Kundenauftrag an einem späteren Tag als vom Kunden gewünscht, ausführt. Die Restriktionsgruppe wird neu entwickelt.

$$x_{nr}^t = 0 \quad \forall n \in N \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} : \text{CarVG}_r \neq \text{CarVG}_{\text{CarOwn}_n} \quad (7.60)$$

$$y_{nmr}^t = 0 \quad \forall (n,m) \in P \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} : \text{CarVG}_r \neq \text{CarVG}_{\text{CarOwn}_n} \vee \text{CarVG}_r \neq \text{CarVG}_{\text{CarOwn}_m} \quad (7.61)$$

$$\hat{y}_{nmr}^t = 0 \quad \forall (n,m) \in \widehat{P\bar{E}} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} : \text{CarVG}_r \neq \text{CarVG}_{\text{CarOwn}_n} \vee \text{CarVG}_r \neq \text{CarVG}_{\text{CarOwn}_m} \quad (7.62)$$

Diese Restriktionsgruppen legen fest, dass nur innerhalb der eigenen Vertrauensgruppe Kundenaufträge abgegeben werden, also Kooperation erfolgt. Dabei wird der Fall ausgeschlossen, dass die Vertrauensgruppen zwischen dem Auftragseigentümer $\text{CarVG}_{\text{CarOwn}_n}$ und dem Auftragsausführer CarVG_r unterschiedlich, also ungleich sind, d. h., in diesem Fall keine Einzelfahrten und Kombinationsfahrten (mit und ohne Containerdrehen) möglich sind. Die Restriktionsgruppen gelten für alle Kundenaufträge und Kundenauftragskombinationen sowie für alle Fuhrunternehmen und Tage. Die Idee der Vertrauensgruppen und somit auch diese Restriktionen werden neu entwickelt.

7.2.5.4 Nebenbedingungsgruppen zur Berücksichtigung der Kundenaufträge

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \sum_{r \in R} \left(x_{nr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in P}} y_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in P}} y_{mnr}^t + \sum_{(n,m) \in \widehat{P\bar{E}}} \hat{y}_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in \widehat{P\bar{E}}}} \hat{y}_{mnr}^t \right) = 1 \quad \forall n \in N \quad (7.63)$$

Diese erweiterte Restriktionsgruppe legt für jeden Kundenauftrag fest, dass er genau einmal von einem beliebigen Fuhrunternehmen an einem beliebigen Tag durchgeführt wird. Dies geschieht entweder als Einzelfahrt oder als erster oder zweiter Teil in einer Kombinationsfahrt mit oder ohne Containerdrehen.

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(x_{nr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in P}} y_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in P}} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in \overline{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in \overline{PIE}}} \hat{y}_{mnr}^t \right) = 1 \quad \forall n \in N \wedge \forall r \in R : z_n^r = 1 \quad (7.64)$$

Für die Berechnung des Profits ohne Kooperation, aber mit fuhrunternehmensinternen Kombinationsfahrten ist es notwendig, eine Nebenbedingungsgruppe zu definieren, die festlegt, dass keine Kooperation stattfindet. Das ist gleichbedeutend mit der Tatsache, dass jedes Fuhrunternehmen die eigenen Kundenaufträge ausführt. Hier wird für alle Kundenaufträge $n \in N$, die dem Fuhrunternehmen gehören ($z_n^r = 1$), festgelegt, dass diese von genau diesem Fuhrunternehmen als Einzelfahrt oder als erster oder zweiter Teil in einer Kombinationsfahrt mit oder ohne Containerdrehen durchgeführt werden müssen. Die Restriktionsgruppe wird neu entwickelt und wird nur benötigt, wenn der Profit ohne Weitergabe von Aufträgen zu berechnen ist (s. Kapitel 8.2.2).

7.2.5.5 Nebenbedingungsgruppen mit Fairnessbezug

Die Nebenbedingungsgruppen mit Fairnessbezug sind von entscheidender Bedeutung für das mathematische Modell. Sie sorgen dafür, dass die Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen fair verläuft und damit langfristig erhalten bleiben kann, ohne dass ein Unternehmen sich als benachteiligt wahrnimmt und die Kooperation verlässt (vgl. hierzu Kapitel 3.2.2). Es werden verschiedene Fairnessmechanismen entworfen, die aus einer oder mehreren Nebenbedingungsgruppen bestehen und im Folgenden vorgestellt werden (s. a. Rückert et al. 2023).

- **Profit Increase Day and Total (PIDT)**
- **Profit Increase Total (PIT)**
- **(absolute) Profit Increase Uniformity Total (PIUT)**
- **(absolute) Profit Increase Uniformity Day and Total (PIUDT)**
- **Order Number Equality Total (ONET)**
- **Order Change Total (OCT)**
- **Order Minimum Daily (OMD)**

Diese Nebenbedingungsgruppen gelten immer für alle Vertrauensgruppen gleichermaßen. Die Nebenbedingungsgruppen können im mathematischen Modell allein oder allein in abgeschwächter Form $\alpha < 1$ (bei PIT auch $\alpha > 1$) sowie in Kombination miteinander oder in Kombination miteinander in abgeschwächter Form aktiviert sein. Der Faktor α ermöglicht für spätere Analysen (s. u. a. Kapitel 8.3.2, 8.4.2, 8.6.1), einzelne Restriktionsgruppen abzuschwächen. So gilt z. B. bei $\alpha = 0,9$ von PIT, dass der Profit mit Kooperation mindestens 90 % des Profits ohne Kooperation entsprechen muss. Die daraus resultierenden Effekte und Unterschiede zu anderen α -Werten sind zu untersuchen. Ist keine dieser Nebenbedingungsgruppen aktiviert, handelt es sich um eine nicht-faire Kooperation innerhalb der jeweiligen Vertrauensgruppe. Die Ergebnisse und Analysen aus den Kombinationen der Nebenbedingungsgruppen sind ab Kapitel 8.3 dargestellt.

Profit Increase Day and Total (PIDT)

$$TaglProfit_r^t \geq \alpha \cdot pPD_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.65)$$

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} TaglProfit_r^t \geq \alpha \cdot \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} pPD_r^t \quad \forall r \in R \quad (7.66)$$

Diese beiden Restriktionsgruppen stammen aus Calore et al. (2017). Der Faktor α wird vom Autor ergänzt. Die erste Restriktionsgruppe legt fest, dass für jedes Fuhrunternehmen an jedem Tag der Profit mit Kooperation größer oder gleich (bei $\alpha = 1$) sein muss als der Profit ohne Kooperation pPD_r^t . Die zweite Restriktionsgruppe legt fest, dass in Summe über alle Tage, also total, für alle Fuhrunternehmen der Profit mit Kooperation größer oder gleich (bei $\alpha = 1$) sein muss als der Profit ohne Kooperation pPD_r^t . In dem Profit der jeweiligen Fuhrunternehmen werden bereits Kompensationszahlungen, die bezahlt oder erhalten werden, berücksichtigt.

Profit Increase Total (PIT)

$$\sum_{t \in T} TaglProfit_r^t \geq \alpha \cdot \sum_{t \in T} pPT_r^t \quad \forall r \in R \quad (7.67)$$

Dieser Fairnessmechanismus ist ähnlich zur zweiten Restriktionsgruppe des Fairnessmechanismus PIUT, wobei der RealPriorProfit Total pPT_r^t verwendet wird (vgl. Kapitel 8.2.2). Er wirkt also weniger eingrenzend auf die Lösungsmenge des mathematischen Modells, da nur auf totaler Basis über den ganzen Planungshorizont und nicht auch auf täglicher Basis der Profit durch Kooperation bei $\alpha = 1$ größer oder gleich dem Profit ohne Kooperation sein muss. Die Restriktionsgruppe stammt aus Calore et al. (2017). Der Faktor α wird ergänzt. Wenn dieser Mechanismus aktiviert ist, ist es möglich, dass die Fuhrunternehmen an einem Tag einen geringeren Profit erreichen als ohne Kooperation, diese kurzzeitige Einbuße aber akzeptierten, da an einem anderen Tag dieses ausgeglichen wird. Die Ergänzung des Faktors α stellt einen neuen Ansatz dar. Die Nutzung eines mehrperiodigen Ansatzes, in dem Kooperationsteilnehmer für eine kurze Zeit, hier ein Tag, akzeptieren schlechter gestellt zu sein, um dann zu einem anderen Zeitpunkt, hier innerhalb der Woche, dafür einen Ausgleich zu erfahren, wird von Gansterer und Hartl (2020) als Forschungslücke gesehen (Gansterer und Hartl 2020).

(absolute) Profit Increase Uniformity Total (PIUT)

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} (TaglProfit_r^t - pPT_r^t) \geq \alpha \cdot \frac{\sum_{q \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} (TaglProfit_q^t - pPT_q^t)}{|R|} \quad \forall r \in R \quad (7.68)$$

Die Restriktionsgruppe dieses Fairnessmechanismus PIUT wird vom Autor dieser Arbeit neu entwickelt. Sie sorgt dafür, dass die Profitsteigerung durch die Kooperation möglichst gleich verteilt ist. Dabei ist die absolute, nicht die relative, Profitsteigerung über alle Fuhrunternehmen aller Vertrauensgruppen gemeint. Der absolute Unterschied zwischen dem Profit mit Kooperation und ohne Kooperation über den gesamten Planungshorizont soll größer oder gleich (bei $\alpha = 1$) dem durchschnittlichen absoluten Unterschied zwischen dem Profit mit

Kooperation und ohne Kooperation über den gesamten Planungshorizont über alle Fuhrunternehmen $|R|$ sein. Diese Restriktion gilt für alle Fuhrunternehmen. Wenn $\alpha = 1$ ist, ist die Profitveränderung für alle Fuhrunternehmen identisch und die Restriktionen sind per Gleichheit erfüllt. Ohne Verknüpfung mit PIT oder PIDT betrachtet diese Restriktionsgruppe für sich genommen ausschließlich die Profitveränderung, sodass theoretisch auch eine durchschnittliche Profitverschlechterung denkbar wäre, die dann auf die Fuhrunternehmen verteilt wird.

(absolute) Profit Increase Uniformity Day and Total (PIUDT)

$$(TaglProfit_r^t - pPD_r^t) \geq \alpha \cdot \frac{\sum_{q \in R} (TaglProfit_q^t - pPD_q^t)}{|R|} \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.69)$$

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} (TaglProfit_r^t - pPD_r^t) \geq \alpha \cdot \frac{\sum_{q \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} (TaglProfit_q^t - pPD_q^t)}{|R|} \quad \forall r \in R \quad (7.70)$$

Bei diesem Fairnessmechanismus ist die zweite Restriktionsgruppe ähnlich zur Restriktionsgruppe unter PIUT, wobei pPD_r^t verwendet wird. Die erste Restriktionsgruppe hat eine ähnliche Funktionsweise und bezieht sich nicht auf den gesamten Planungshorizont, sondern auf jeden einzelnen Tag. Es soll also der absolute Unterschied zwischen dem Profit mit Kooperation und ohne Kooperation größer oder gleich (bei $\alpha = 1$) dem durchschnittlichen absoluten Unterschied zwischen dem Profit mit Kooperation und ohne Kooperation aller Fuhrunternehmen $|R|$ sein. Diese Restriktion gilt für alle Fuhrunternehmen und alle Tage. Die Anmerkungen von PIUT gelten entsprechend.

Order Number Equality Total (ONET)

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(\sum_{n \in N} x_{nr}^t + \sum_{(n,m) \in P} 2y_{nmr}^t + \sum_{(n,m) \in \widehat{PIE}} 2\hat{y}_{nmr}^t - ka_r^t \right) \geq 0 \quad \forall r \in R \quad (7.71)$$

Dieser Fairnessmechanismus nimmt nicht den Profit als Bezugspunkt, sondern die Kundenaufträge (engl. Order). Hierbei soll die Anzahl aus allen ausgeführten Kundenaufträgen (Multiplikation mal 2 für Kombinationsfahrten) abzüglich der Kundenaufträge, bei denen das Fuhrunternehmen Eigentümer ist, summiert über alle Tage größer gleich 0 sein. Damit wird garantiert, dass das Fuhrunternehmen genauso viele Aufträge mit Kooperation durchführt, wie es auch ohne Kooperation durchführen würde. Diese Restriktion gilt für jedes Fuhrunternehmen. Diese Kundenaufträge müssen aber nicht ursprünglich dem jeweiligen Fuhrunternehmer gehört haben, sondern es kann sich auch um Kundenaufträge handeln, bei denen ein anderes Fuhrunternehmen der Auftragseigentümer ist.

Order Change Total (OCT)

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(\sum_{n \in N} x_{nr}^t \cdot z_n^r + \sum_{(n,m) \in P} y_{nmr}^t \cdot (z_n^r + z_m^r) + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} \hat{y}_{nmr}^t \cdot (z_n^r + z_m^r) \right) \geq \alpha \cdot \sum_{n \in N} z_n^r \quad \forall r \in R \quad (7.72)$$

Dieser Fairnessmechanismus legt den Fokus auf die Kundenauftragseigentümer und bestimmt, dass jedes Fuhrunternehmen einen Teil seiner eigenen Aufträge während einer Kooperation weiterhin durchführt. Die Restriktionsgruppe legt fest, dass mindestens 50 % (bei $\alpha = 0,5$) aller Kundenaufträge, bei denen ein Fuhrunternehmen Auftragseigentümer ist, auch von eben diesem Fuhrunternehmen durchgeführt werden. Hierfür wird auf der linken Seite über alle Tage die Ausführung von Einzel- und Kombinationsfahrten addiert, bei denen das Fuhrunternehmen Auftragseigentümer ist. Die Restriktionsgruppe ist nur sinnvoll für $\alpha < 1$, da für $\alpha = 1$ kein Austausch von Kundenaufträgen und damit keine Kooperation stattfinden würde. Die Restriktionsgruppe schränkt nicht die Durchführung von zusätzlichen fremden Kundenaufträgen ein. Dieser Fairnessmechanismus schließt eine Forschungslücke, die Gansterer und Hartl (2018b) identifiziert haben.

Order Minimum Daily (OMD)

$$\sum_{n \in N} x_{nr}^t + \sum_{(n,m) \in P} 2y_{nmr}^t + \sum_{(n,m) \in \widehat{PTE}} 2\hat{y}_{nmr}^t \geq \alpha \cdot ka_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.73)$$

Dieser Fairnessmechanismus betrachtet die täglich durchgeführten Fahrten. Die Restriktionsgruppe legt fest, dass die Anzahl an Kundenaufträgen, die an einem Tag gestartet bzw. ausgeführt werden, mindestens 50 % (bei $\alpha = 0,5$) der Anzahl an durchgeführten Kundenaufträgen ohne Kooperation und Kombinationsfahrten an diesem Tag des jeweiligen Fuhrunternehmens entsprechen soll. Die Eigentümerstruktur der Kundenaufträge wird hier nicht berücksichtigt. Die Restriktionsgruppe gilt für alle Tage des Planungshorizontes und alle Fuhrunternehmen.

7.2.5.6 Nebenbedingungsgruppen bzgl. der Definition der Entscheidungsvariablen

$$x_{nr}^t \in \{0,1\} \quad \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.74)$$

$$y_{nmr}^t \in \{0,1\} \quad \forall (n,m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.75)$$

$$\hat{y}_{nmr}^t \in \{0,1\} \quad \forall (n,m) \in \widehat{PTE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.76)$$

Die o. g. Restriktionsgruppen definieren die binären Entscheidungsvariablen, die entweder den Wert 0 oder 1 annehmen können.

$$f_n^t \geq 0 \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.77)$$

$$f_{late}_n^t \geq 0 \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.78)$$

$$f_{early}_n^t \geq 0 \forall n \in N \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.79)$$

$$g_{nm}^t \geq 0 \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.80)$$

$$g_{late}_{nm}^t \geq 0 \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.81)$$

$$g_{early}_{nm}^t \geq 0 \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.82)$$

$$w_{nmr}^t \geq 0 \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.83)$$

$$I_r^t \geq -1000 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.84)$$

$$D_r^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.85)$$

$$EarlTardnx_{nr}^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge n \in N \quad (7.86)$$

$$EarlTardny_{nmr}^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge (n, m) \in P \quad (7.87)$$

$$Earl\widehat{Tardny}_{nmr}^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge (n, m) \in \widehat{PIE} \quad (7.88)$$

$$ComP_r^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.89)$$

$$ComM_r^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.90)$$

$$Wk_r^t \geq 0 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.91)$$

$$TaglProfit_r^t \geq -1000 \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.92)$$

Die o. g. Restriktionsgruppen sind die Nichtnegativitätsbedingungen und definieren die kontinuierlichen Entscheidungsvariablen, die fast alle größer gleich 0 sein müssen. Ausgenommen sind die Variablen des Kundendeckungsbeitrages I_r^t sowie des täglichen Gesamtprofits $TaglProfit_r^t$. Hier muss der Wert größer als -1.000 sein. Im wettbewerbsintensiven Markt der Containertransporte im Hafenhinterland kann es möglich sein, auch wenn dies nicht gewünscht ist und möglichst vermieden wird, an einzelnen Tagen einen Verlust zu erwirtschaften. Diesen Verlust soll das mathematische Modell auch abbilden können, sodass ein täglicher Verlust von bis zu 1.000 € mathematisch möglich ist. Damit ist das in dieser Arbeit weiterentwickelte mathematische Modell zur Planung der Zuordnung von Aufträgen abschließend vorgestellt.

7.2.6 Berücksichtigung einer ökologischen Zielsetzung

Wie bereits in Kapitel 2.4.1 vorgestellt, wird das Thema der Ökologie bei der Optimierung von Transporten wissenschaftlich untersucht. Dabei werden häufig ökologische Zielsetzungen wie die Minimierung von Emissionen oder Verbräuchen genutzt. Während das Thema der Emissionsminimierung in der Wissenschaft relevant ist, ist es aus Sicht von Experten aus der Praxis von nachrangiger Bedeutung (s. Kapitel 5.3.3 und Rückert et al. 2023).

Es stellt sich die Frage, ob und wenn ja, welchen Einfluss die Berücksichtigung einer ökologischen Zielsetzung auf das o. g. Modell der Containertransporte hat. Abhängig davon kann festgestellt werden, inwiefern eine ökologische Zielsetzung zu ähnlichen oder unterschiedlichen Ergebnissen wie die ökonomische Zielsetzung führt.

Das Modell wird dahingehend erweitert, dass es auch eine ökologische Zielsetzung berücksichtigen kann. Dabei wird der Kraftstoffverbrauch als Messgröße der Emissionen genutzt. Dies ist sinnvoll, da die Emissionen von Kohlenstoffdioxid und anderen Gasen direkt von dem benötigten Kraftstoffverbrauch des LKW-Motors abhängen. Literature Reviews, wie z. B. Demir et al. (2014), zeigen, dass der Kraftstoffverbrauch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen häufig für ökologische Zielsetzungen verwendet wird. Der Kraftstoffverbrauch hängt dabei grundsätzlich von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Da in der Untersuchung in dieser Arbeit weniger der genaue Wert des Kraftstoffverbrauches, sondern vielmehr der Vergleich zur Lösung mit ökonomischer Zielsetzung von Relevanz und Interesse ist, werden nicht alle Faktoren berücksichtigt, sondern eine vereinfachte Berechnung genutzt.

Andere Emissionen, wie z. B. die des Reifenabriebes oder Lärmemissionen werden nicht berücksichtigt. Auch Steigungsprofile oder unterschiedliche LKW mit unterschiedlichen Verbrauchsspezifikationen finden keine Beachtung. Es wird folglich davon ausgegangen, dass alle Fuhrunternehmen LKW mit den gleichen Verbrauchsspezifikationen verwenden.

Der Kraftstoffverbrauch wird je Streckenkilometer angegeben. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit des LKW, das Anfahren nach dem Stehenbleiben oder das Warten (z. B.: im Stau) bei laufendem Motor nicht beachtet wird. Es wird davon ausgegangen, dass alle LKW mit einer Start-Stopp-Automatik ausgerüstet sind, also beim längeren Stehen ausgeschaltet sind. Da die LKW überwiegend auf Autobahnen fahren, werden unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile der Strecken nicht berücksichtigt.

Folgende Modellerweiterung zeigt, wie der Verbrauch als Zielsetzung im mathematischen Modell berücksichtigt werden kann. Es werden **drei neue Parameter** benötigt, die den Verbrauch des LKW, abhängig von der Beladung und vom Containertyp angeben.

$EMohne$ Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn kein Container transportiert wird.

$EMleer_{Typ_n}$ Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn ein leerer Container vom Typ_n des Kundenauftrages $n \in N$ transportiert wird.

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

$EM_{voll_{Typ_n}}$ Kraftstoffverbrauch eines LKW je km, wenn ein voller Container vom Typ_n des Kundenauftrages $n \in N$ transportiert wird

Es wird **eine neue Entscheidungsvariable** benötigt, die den Kraftstoffverbrauch abbildet.

$Verbrauch_r$ Kraftstoffverbrauch des Fuhrunternehmens $r \in R$

Die ökologische **Zielsetzung** ist in dieser Formulierung dann die Minimierung des Kraftstoffverbrauches aller Fuhrunternehmen (7.93).

$$\text{Minimiere } \sum_{r \in R} Verbrauch_r \quad (7.93)$$

Die **Nebenbedingungsgruppe** zur Berechnung des Verbrauchs (7.94) erfolgt ähnlich wie die Berechnung des aus Kundenaufträgen erwirtschafteten Deckungsbeitrags (s. Formel 7.19). Für alle Fuhrunternehmen wird jeweils der über alle Tage des Planungshorizontes summierte Verbrauch berechnet. Die Restriktionsgruppe besteht aus fünf Summanden. Enthalten ist je ein Summand zur Berechnung des Kraftstoffverbrauches für Importeinzelfahrten ($n \in I$), Exporteinzelfahrten ($m \in E$), Import-Export-Kombinationsfahrten ($(n, m) \in PIE$), Export-Import-Kombinationsfahrten ($(m, n) \in PEI$) und Import-Export-Kombinationsfahrten-mit-Containerdrehen ($(n, m) \in \widehat{PIE}$). Dabei wird jeweils die zurückgelegte Strecke in km, mit dem jeweils auf dieser Strecke anwendbaren Kraftstoffverbrauch je km multipliziert. Für den fünften Summanden sei daran erinnert, dass $Typ_n = Typ_m \forall (n, m) \in \widehat{PIE}$ gilt.

$$\begin{aligned}
 Verbrauch_r = & \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(\sum_{n \in I} x_{nr}^t \right. \\
 & \cdot (EMohne \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{cd_n ld_r}) + EMleer_{Typ_n} \cdot (skm_{d_n cd_n}) + EMvoll_{Typ_n} \\
 & \cdot (skm_{o_n d_n})) \\
 & + \sum_{m \in E} x_{mr}^t \\
 & \cdot (EMohne \cdot (skm_{ld_r cd_m} + skm_{d_m ld_r}) + EMleer_{Typ_m} \cdot (skm_{cd_m o_m}) \\
 & + EMvoll_{Typ_m} \cdot (skm_{o_m d_m})) \\
 & + \sum_{(n,m) \in PIE} y_{nmr}^t \\
 & \cdot (EMohne \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{cd_n cd_m} + skm_{d_m ld_r}) + EMleer_{Typ_n} \cdot (skm_{d_n cd_n}) \\
 & + EMvoll_{Typ_n} \cdot (skm_{o_n d_n}) + EMleer_{Typ_m} \cdot (skm_{cd_m o_m}) + EMvoll_{Typ_m} \\
 & \cdot (skm_{o_m d_m})) \\
 & + \sum_{(m,n) \in PEI} y_{mnr}^t \\
 & \cdot (EMohne \cdot (skm_{ld_r cd_m} + skm_{d_m o_n} + skm_{cd_n ld_r}) + EMleer_{Typ_m} \cdot (skm_{cd_m o_m}) \\
 & + EMvoll_{Typ_m} \cdot (skm_{o_m d_m}) + EMleer_{Typ_n} \cdot (skm_{d_n cd_n}) + EMvoll_{Typ_n} \\
 & \cdot (skm_{o_n d_n})) \\
 & + \sum_{(n,m) \in PTE} \hat{y}_{nmr}^t \\
 & \cdot (EMohne \cdot (skm_{ld_r o_n} + skm_{d_m ld_r}) + EMleer_{Typ_n} \cdot (skm_{d_n o_m}) + EMvoll_{Typ_n} \\
 & \cdot (skm_{o_n d_n} + skm_{o_m d_m})) \left. \right) \forall r \in R \tag{7.94}
 \end{aligned}$$

Die Entscheidungsvariable Verbrauch muss für alle Fuhrunternehmen größer gleich 0 sein.

$$Verbrauch_r \geq 0 \forall r \in R \tag{7.95}$$

7.2.7 Berücksichtigung von zweitägigen Kombinationsfahrten

Das oben vorgestellte mathematische Modell berücksichtigt, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, keine zweitägigen Fahrten, d. h., alle Fahrten müssen innerhalb eines Tages im Rahmen der maximal möglichen Stundenzahl $CarLKWStd_r$ erfolgen. Für Instanzen, bei denen die Hinterlandstandorte der Kundenaufträge weiter entfernt vom Seehafen sind, ist es sinnvoll das mathematische Modell zu erweitern, sodass die Möglichkeit besteht, dass eine Kombinationsfahrt an zwei aufeinanderfolgenden Tagen ausgeführt werden kann.

Für diese Erweiterung bedarf es allerdings nicht nur der Anpassung der Restriktionen 7.56 bis 7.58, sondern auch einer Anpassung nahezu aller Nebenbedingungsgruppen für die Zeitenberechnung (vgl. Kapitel 7.2.5.2), um u. a. die Zeitfensterprüfung auch am zweiten Tag adäquat abbilden zu können. Darüber hinaus bedeutet eine zweitägige Kombinationsfahrt auch, dass für den LKW-Fahrer eine Unterkunft zur Übernachtung vorhanden sein und vom Fuhrunternehmen bezahlt werden muss. Es wird angenommen, dass diese Unterkunft an der Fahrtroute liegt, die der LKW-Fahrer im Rahmen der Auftragsdurchführung entlangfährt. Eine zusätzliche Fahrt von oder zu einer Unterkunft findet also nicht statt.

Es sind zwei neue Parameter erforderlich, nämlich für die minimal notwendige Ruhezeit und für die Übernachtungskosten in einer Unterkunft.

$CarLKWNight_r$ Minimal notwendige Ruhezeit bei zweitägiger Fahrt vor dem Startort des zweiten Kundenauftrages, die ein LKW des Fuhrunternehmens $r \in R$ benötigt.

$CNight_r$ Kosten für die Übernachtung des LKW-Fahrers, die das ausführende Fuhrunternehmen $r \in R$ bezahlen muss.

Es sind zwei neue Entscheidungsvariablengruppen erforderlich, und zwar eine zur Entscheidung, ob eine zweitägige Kombinationsfahrt durchgeführt wird, und eine weitere für die entstehenden Übernachtungskosten

$v_{nmr}^t \in \{0,1\}$ 1, wenn eine Kombinationsfahrt (mit oder ohne Containerdrehen) aus zwei Kundenaufträgen $(n, m) \in P$ am Tag $t \in \{0, \dots, T\}$ von Fuhrunternehmen $r \in R$ durchgeführt wird und eine Übernachtung zwischen der Ausführung des Kundenauftrages n und des Kundenauftrages m stattfindet, sodass zwangsläufig der Auftrag m am Tag $t + 1$ durchgeführt wird; sonst 0. Diese Variable ist auch für $t = 0$ definiert, um u.g. Restriktionen, die ein $t - 1$ nutzen können, möglichst wenig zu verändern (7.50b und 7.59b).

$Nk_r^t \geq 0$ Übernachtungskosten von Fuhrunternehmen $r \in R$ am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$.

Die Zielfunktion (7.17) muss um den Subtrahenden Nk_r^t erweitert werden. Damit die Äquivalenz weiterhin gegeben ist, wird auch die Nebenbedingungsgruppe (7.18) um den Subtrahenden Nk_r^t ergänzt.

$$\text{Maximiere } \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} I_r^t - D_r^t - Wk_r^t - Nk_r^t \quad (7.17b)$$

$$\Leftrightarrow \text{Maximiere } \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} TaglProfit_r^t$$

u.B.v.

$$TaglProfit_r^t = I_r^t - D_r^t - Wk_r^t - Nk_r^t + ComP_r^t - ComM_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.18b)$$

Die neue Restriktionsgruppe (7.96) dient der Berechnung von Nk_r^t . Sie legt fest, dass für alle Fuhrunternehmen R und Tage $\{1, \dots, T\}$ Nk_r^t den tatsächlich entstandenen Übernachtungskosten entspricht.

$$Nk_r^t = \sum_{(n,m) \in P} v_{nmr}^t \cdot CNacht_r \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.96)$$

Die beiden neuen Restriktionsgruppen (7.97) und (7.98) legen in Verbindung mit Restriktionsgruppe (7.63) fest, dass v_{nmr}^t nur 1 sein kann, wenn ausschließlich $y_{nmr}^t = 1$ oder ausschließlich $\hat{y}_{nmr}^t = 1$ ist. Da \hat{y}_{nmr}^t nur für $(n, m) \in \widehat{PIE}$ definiert ist, sind zwei separate Restriktionsgruppen notwendig. Die Erste gilt für alle Tupel $\forall (n, m) \in P \setminus \widehat{PIE}$. Die zweite gilt für alle Tupel $(n, m) \in \widehat{PIE}$. Da Tupel aus der Menge \widehat{PIE} entweder als Kombinationsfahrt oder als Kombinationsfahrt mit Containerdrehen erfolgen können, müssen auf der linken Seite beide Entscheidungsvariablen stehen.

$$y_{nmr}^t \geq v_{nmr}^t \quad \forall (n, m) \in P \setminus \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.97)$$

$$y_{nmr}^t + \hat{y}_{nmr}^t \geq v_{nmr}^t \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.98)$$

Die neue Restriktionsgruppe 7.99 legt fest, dass am letzten Tag des Planungshorizontes keine zweitägigen Kombinationsfahrten starten können, um sicherzustellen, dass eine Ausführung des zweiten Tages einer Kombinationsfahrt nach Abschluss des Planungshorizontes ausgeschlossen ist. Die Restriktionsgruppe 7.100 legt fest, dass vor dem ersten Tag des Planungshorizontes keine zweitägigen Kombinationsfahrten starten können.

$$v_{nmr}^T = 0 \quad \forall (n, m) \in P \wedge r \in R \quad (7.99)$$

$$v_{nmr}^0 = 0 \quad \forall (n, m) \in P \wedge r \in R \quad (7.100)$$

Da nur für Kombinationsfahrten eine zweitägige Fahrt sinnvoll ist und möglich sein soll, betrifft die Anpassung der Restriktionen vor allem die Restriktionsgruppen, die g_{nm}^t beinhalten. Die Restriktionsgruppen 7.37, 7.38 und 7.39 werden um einen Summanden erweitert. Dieser Summand ist gleich 0, wenn keine zweitägige Fahrt durchgeführt wird, also keine Übernachtung anfällt. Der Summand entspricht, $CarLKWNacht_r$ wenn die Kombinationsfahrt mit einer Übernachtung anfällt. Damit ist sichergestellt, dass die frühestmögliche (also geringste) Ankunftszeit am Zielort in Stunden beim zweiten Kundenauftrag auch die Übernachtungsdauer berücksichtigt.

$$g_{nm}^t \geq f_n^t + std_n + sh_{d_n c d_n} + stl_{c d_n} + sh_{c d_n c d_m} + stl_{c d_m} + sh_{c d_m o_m} + \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot CarLKW Nacht_r + sto_m + sh_{o_m d_m} - M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t\right) \forall (n, m) \in PIE \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.37b)$$

$$g_{nm}^t \geq f_n^t + std_m + sh_{d_n o_m} + \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot CarLKW Nacht_r + sto_m + sh_{o_m d_m} \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.38b)$$

$$g_{mn}^t \geq f_m^t + std_m + sh_{d_m o_n} + \sum_{r \in R} v_{mnr}^t \cdot CarLKW Nacht_r + sto_n + sh_{o_n d_n} \forall (m, n) \in PEI \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.39b)$$

Durch 7.37b bis 7.39b ist es nun möglich, dass der Wert der Variable $g_{nm}^t \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\}$ größer als 24 ist. Das bedeutet, dass die Ankunftszeit am Zielort beim zweiten Kundenauftrag am darauffolgenden Tag stattfindet. Ein $g_{nm}^t = 30$ bedeutet daher das gleiche wie $g_{nm}^{t+1} = 30 - 24 = 6$.

Die Restriktionsgruppen 7.40 und 7.41, die der Prüfung der weichen Zeitfenster dienen, müssen nicht angepasst werden, da hier die tatsächliche Abweichung vom gewünschten Zeitfenster in Stunden und Tagen berechnet wird. Dagegen müssen die Restriktionsgruppen 7.42 bis 7.49, die der Prüfung der harten Zeitfenster dienen, angepasst werden, da diese auf Stundenbasis die Einhaltung der harten Zeitfenster prüfen und diese Zeitfenster für jeden Tag im Planungshorizont identisch sind. Jede Restriktionsgruppe wird um den Subtrahenden $-\sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24$ ergänzt, der -24 ist, wenn eine zweitägige Kombinationsfahrt durchgeführt wird und sonst den Wert 0 annimmt. Damit werden von der Ankunftszeit am zweiten Kundenauftrag bei Übernachtung 24 Stunden subtrahiert, sodass die harte Zeitfensterprüfung wieder durchgeführt wird. Die Funktionsweise des BigM in Abhängigkeit des Wertes der Variable y_{nmr}^t oder \hat{y}_{nmr}^t bleibt davon unberührt.

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t\right)\right) \leq sTWlateE_m \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.42b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t\right)\right) \geq sTWearlyE_m \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.43b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t\right)\right) \leq sTWlateE_m \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.44b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t\right)\right) \geq sTWearlyE_m \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.45b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \leq sTWlateS_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.46b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} y_{nmr}^t \right) \right) \geq sTWearlyS_m \quad \forall (n, m) \in P \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.47b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(-M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \leq sTWlateS_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.48b)$$

$$g_{nm}^t - \sum_{r \in R} v_{nmr}^t \cdot 24 - (sto_m + sh_{o_m d_m}) + \left(M \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) \geq sTWearlyS_m \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.49b)$$

Die Restriktionsgruppe 7.50 wird durch die neue Variable zur Restriktionsgruppe 7.50b. Hier ist es nötig, den Fall zu berücksichtigen, dass ein Exportkundenauftrag als zweiter Kundenauftrag einer zweitägigen Kombinationsfahrt ausgeführt wird. Die Restriktionsgruppe legt fest, dass alle Exportkundenaufträge am gewünschten Tag transportiert werden. Durch den Subtrahenden wird sichergestellt, dass eine zweitägige Kombinationsfahrt, bei der der Exportkundenauftrag der zweite Kundenauftrag ist, nicht am gewünschten Tag, sondern bereits einen Tag vorher, durchgeführt werden kann. So ist sichergestellt, dass der Exportkundenauftrag nicht einen Tag zu spät durchgeführt wird. Durch die Formulierung $tg_m - 1$ wird dargestellt, dass die zweitägige Kombinationsfahrt am Vortag starten muss, damit der zweite Auftrag $m \in E$ am gewünschten (nämlich zweiten) Tag der Kombinationsfahrt ausgeführt wird.

$$\sum_{r \in R} \left(x_{mr}^{tg_m} + \sum_{n \in I} y_{nmr}^{tg_m} - \sum_{n \in I} v_{nmr}^{tg_m} + \sum_{n \in I} v_{nmr}^{tg_m-1} + \sum_{n \in I} y_{mnr}^{tg_m} + \sum_{\substack{n \in I: \\ (n,m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^{tg_m} \right) = 1 \quad \forall m \in E \quad (7.50b)$$

Die Restriktionsgruppen 7.51 und 7.52, die das Tagfenster für Importkundenaufträge festlegen, müssen auch angepasst werden, für den Fall, dass ein Importkundenauftrag als zweiter Auftrag einer Kombinationsfahrt mit Übernachtung ausgeführt wird. Ist dies der Fall, d. h. $v_{mnr}^t = 1$, wird auf der linken Seite der Restriktionsgruppen der Wert 1 addiert, der den zweiten Tag der Kombinationsfahrt mit Übernachtung wiedergibt. Dadurch kann der Fahrtag, d. h., der Wert von t zusammen mit der Entscheidungsvariable y_{mnr}^t , einen Tag früher sein.

$$-T \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \left(x_{nr}^t + \sum_{m \in E} y_{nmr}^t + \sum_{m \in E} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in E: \\ (n,m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) + t + \left(\sum_{r \in R} \left(\sum_{m \in E} v_{mnr}^t \right) \right) \leq tl_n \forall n \in I \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.51b)$$

$$T \cdot \left(1 - \sum_{r \in R} \left(x_{nr}^t + \sum_{m \in E} y_{nmr}^t + \sum_{m \in E} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in E: \\ (n,m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t \right) \right) + t + \left(\sum_{r \in R} \left(\sum_{m \in E} v_{mnr}^t \right) \right) \geq te_n \forall n \in I \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.52b)$$

Durch die Übernachtung ist es möglich, dass aufgrund von harten Zeitfenstern am Folgetag Wartezeiten entstehen. Damit die Übernachtungszeit nicht in den kostenerzeugenden Wartezeiten berücksichtigt wird, werden die Restriktionsgruppen 7.53 bis 7.55 angepasst und jeweils um den Summanden $v_{nmr}^t \cdot CarLKWNacht_r$ ergänzt, der $CarLKWNacht_r$ entspricht, wenn $v_{nmr}^t = 1$ und sonst 0 ist.

$$g_{nm}^t - (f_n^t + std_n + sh_{d_n c d_n} + stl_{c d_n} + sh_{c d_n c d_m} + stl_{c d_m} + sh_{c d_m o_m} + v_{nmr}^t \cdot CarLKWNacht_r + sto_m + sh_{o_m d_m}) - M \cdot (1 - y_{nmr}^t) \leq w_{nmr}^t \forall (n, m) \in PIE \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.53b)$$

$$g_{mn}^t - (f_m^t + std_m + sh_{d_m o_n} + v_{mnr}^t \cdot CarLKWNacht_r + sto_n + sh_{o_n d_n}) - M \cdot (1 - y_{mnr}^t) \leq w_{mnr}^t \forall (m, n) \in PEI \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.54b)$$

$$g_{nm}^t - (f_n^t + std_n + sh_{d_n o_m} + v_{nmr}^t \cdot CarLKWNacht_r + sto_m + sh_{o_m d_m}) - M \cdot (1 - \hat{y}_{nmr}^t) \leq w_{nmr}^t \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.55b)$$

Die Restriktionsgruppen 7.56, 7.57 und 7.58 begrenzen für Kombinationsfahrten die maximale Dauer in Stunden, die die Durchführung einer Kombinationsfahrt dauern darf. Hier ist eine Anpassung notwendig. Diese Anpassung ist es, die dem mathematischen Modell mehr „Lösungsraum“ zur Verfügung stellt, um insgesamt bessere Zielfunktionswerte erreichen zu können. Es wird bei allen drei Restriktionsgruppen jeweils auf der rechten Seite der Summand $v_{nmr}^t (CarLKWNacht_r + CarLKWStd_r)$ ergänzt. Dieser addiert bei einer Übernachtung (also $v_{nmr}^t = 1$) auf die maximal mögliche Fahrtdauer die Ruhezeit und die maximal mögliche Fahrtdauer des zweiten Tages hinzu. Somit kann zwischen dem Beginn einer Fahrt an einem LKW-Depot bis zum Ende einer Fahrt beim identischen LKW-Depot ein Zeitraum von zwei maximalen Fahrtauern (also Arbeitstagen) und einer Ruhezeit (also Übernachtung) liegen. In der Ruhezeit, bzw. während der Übernachtung, darf der LKW aber nicht gefahren werden. Dies wird durch die Restriktionsgruppen 7.37b bis 7.39b in Verbindung mit 7.56b bis 7.58b abgesichert.

$$(g_{nm}^t + std_m + sh_{d_m l d_r}) - (f_n^t - (sh_{l d_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n})) - M \cdot (1 - y_{nmr}^t) \leq CarLKWStd_r + v_{nmr}^t (CarLKWNacht_r + CarLKWStd_r) \forall (n, m) \in PIE \wedge r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.56b)$$

$$\begin{aligned}
 & (g_{mn}^t + std_n + sh_{d_n cd_n} + stl_{cd_n} + sh_{cd_n ld_r}) & (7.57b) \\
 & - \left(f_m^t - (sh_{ld_r cd_m} + stl_{cd_m} + sh_{cd_m o_m} + sto_m + sh_{o_m d_m}) \right) - M \cdot (1 - y_{mnr}^t) \\
 & \leq CarLKWStd_r + v_{mnr}^t (CarLKWNight_r + CarLKWStd_r) \quad \forall (m, n) \in PEI \wedge r \\
 & \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (g_{nm}^t + std_m + sh_{d_m ld_r}) - \left(f_n^t - (sh_{ld_r o_n} + sto_n + sh_{o_n d_n}) \right) - M \cdot (1 - \hat{y}_{nmr}^t) & (7.58b) \\
 & \leq CarLKWStd_r + v_{nmr}^t (CarLKWNight_r + CarLKWStd_r) \quad \forall (n, m) \in \widehat{PIE} \wedge r \\
 & \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\}
 \end{aligned}$$

Hier sei noch einmal anzumerken, dass die maximale Fahrtdauer nicht bei Durchführung von Einzelfahrten geprüft wird. Es wird davon ausgegangen, dass entweder die Einzelfahrt innerhalb der maximalen Fahrtdauer bzw. Arbeitszeit möglich ist oder die Einzelfahrt tatsächlich auch nur mit einer Übernachtung durchgeführt werden kann. Letzterer Fall würde dann auch ohne Kooperation stattfinden und ist dann bereits in der Berechnung des Profits ohne Kooperation enthalten.

Die Restriktionsgruppe (7.59), welche die maximale Anzahl der LKW festlegt, muss auch angepasst werden, da nun der Fall eintreten kann, dass ein LKW auch einen Tag später noch eingesetzt wird. Hierfür wird v_{nmr}^{t-1} ergänzt. Die Variable sorgt dafür, dass bei der Durchführung einer zweitägige Kombinationsfahrt auch am zweiten Tag der LKW nicht für andere Fahrten genutzt werden kann, d. h., dass am Tag t der LKW noch in Benutzung ist, der am Vortag $t - 1$ eine zweitägige Kombinationsfahrt begonnen hat.

$$\sum_{n \in N} x_{nr}^t + \sum_{(n,m) \in P} (y_{nmr}^t + v_{nmr}^{t-1}) + \sum_{(n,m) \in \widehat{PIE}} \hat{y}_{nmr}^t \leq MaxLKW_r^t \quad \forall r \in R \wedge t \in \{1, \dots, T\} \quad (7.59b)$$

Die folgende Abbildung 21 zeigt exemplarisch, wie eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen und Übernachtung die unterschiedlichen Zeitfenster an zwei aufeinanderfolgenden Tagen beachten muss. In dem konkreten Beispiel ist der gewünschte Ausführtag des Importkundenauftrages Tag 2 und des Exportkundenauftrages Tag 3. Die harten Zeitfenster gelten an jedem Tag. Die weichen Zeitfenster gelten nur für den gewünschten Tag. Durch die Übernachtung zwischen den Tagen können Verspätungskosten und Verfrühungskosten durch Verletzung von weichen Zeitfenstern sowie Wartezeiten durch das harte Zeitfenster am Startort des Exportkundenauftrages entstehen. Es ist zu beachten, dass alle Entscheidungsvariablen, die den darauffolgenden Tag, also Tag 3, beschreiben, trotzdem den Index 2 nutzen, da die Kombinationsfahrt mit Containerdrehen am Tag 2 begonnen wird.

7 Modell für die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland mit horizontaler Kooperation

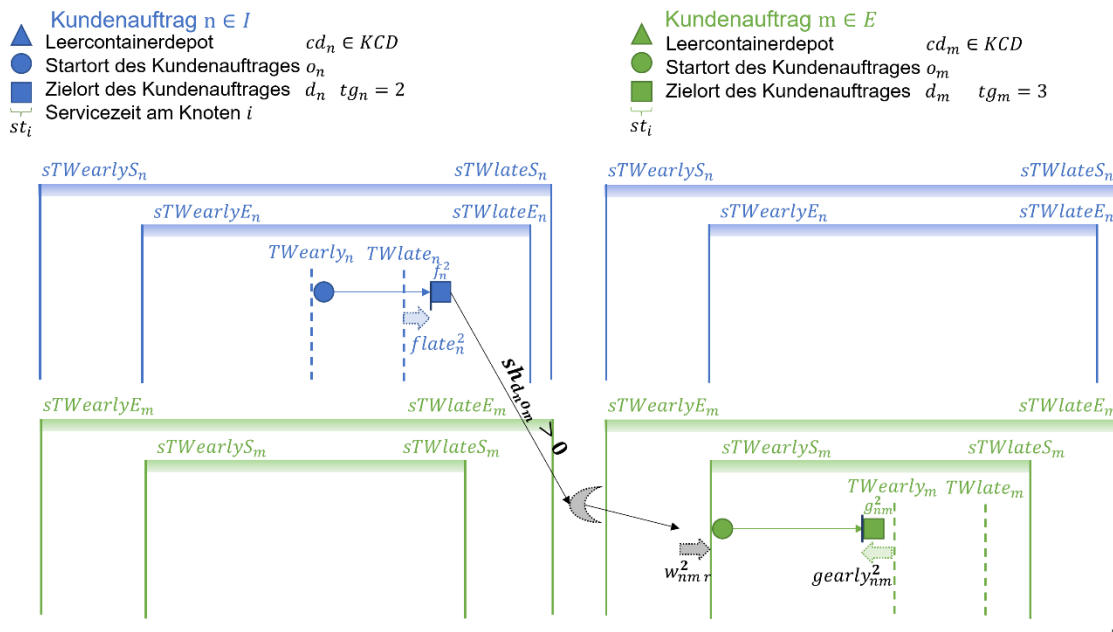


Abbildung 21: Zeitfensterschema Kombinationsfahrt mit Containerdrehen und Übernachtung

Für die beiden neuen Entscheidungsvariablen bestehen entsprechende Nichtnegativitäts- bzw. Binärbedingungen.

$$v_{nmr}^t \in \{0,1\} \forall (n,m) \in P \wedge t \in \{0, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.101)$$

$$Nk_r^t \geq 0 \forall t \in \{1, \dots, T\} \wedge r \in R \quad (7.102)$$

8 Numerische Auswertung

Das folgende Kapitel stellt die Berechnungsergebnisse auf Basis des im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Modells mit seinen beiden Erweiterungen vor. Hierzu werden zunächst die beiden genutzten Fallstudien und anschließend das Vorgehen hinsichtlich der Implementierung dargestellt. Die Ergebnisse werden analysiert und im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit bewertet.

8.1 Vorstellung der Fallstudien

Es werden zwei Fallstudien verwendet, die jeweils aus zehn Instanzen bestehen, die alphabetisch benannt sind, jeweils a bis j. In der Fallstudie 1 werden fiktive Daten genutzt, die auf Basis einer Recherche möglichst realitätsnah gewählt wurden. Die Fallstudie 2 ist ähnlich zur Fallstudie 1, jedoch mit dem Unterschied, dass die Standorte im Hinterland auf Basis einer anonymisierten Auswertung eines Hamburger Speditionsunternehmens identifiziert wurden. Für die Daten der Fuhrunternehmen ist vor allem eine realistische Kosten- und Erlösstruktur von Bedeutung, da die davon abhängige Profitsteigerung als Ziel des mathematischen Modells und als operatives Ziel einer Kooperation definiert wird. Die für das Modell entwickelten Erlös- und Kostensätze wurden mit einem Experten, der auch an der Interviewstudie teilnahm (vgl. Kapitel 5.3), erörtert und von diesem als realistisch eingeschätzt.

Beide Fallstudien nutzen den geografischen Raum des Hinterlands des Hamburger Hafens und in beiden Fallstudien werden die vier Containerterminals des Hamburger Hafens (CTB, CTA, CTT, Eurogate) berücksichtigt. In beiden Fallstudien existieren sieben Fuhrunternehmen, von denen jedes je ein LKW-Depot auf Hamburger Stadtgebiet hat. Die beiden Fallstudien unterscheiden sich in den Hinterlandkundenstandorten und Leercontainerdepots. Es wird das geografisch zum Hinterlandstandort (Startort Exportkundenauftrag oder Zielort Importkundenauftrag) nächstgelegene Leercontainerdepot genutzt. Die Servicezeit am Leercontainerdepot beträgt für alle Containertypen 12 Minuten.

In **Fallstudie 1** existieren neben den vier Hamburger Containerterminals 20 Standorte im Hinterland. An diesen Standorten können Kundenaufträge beginnen oder enden. Zudem existieren zwölf Leercontainerdepots, von denen je Kundenauftrag eines durch das Fuhrunternehmen angefahren werden muss. (vgl. Abbildung 22).

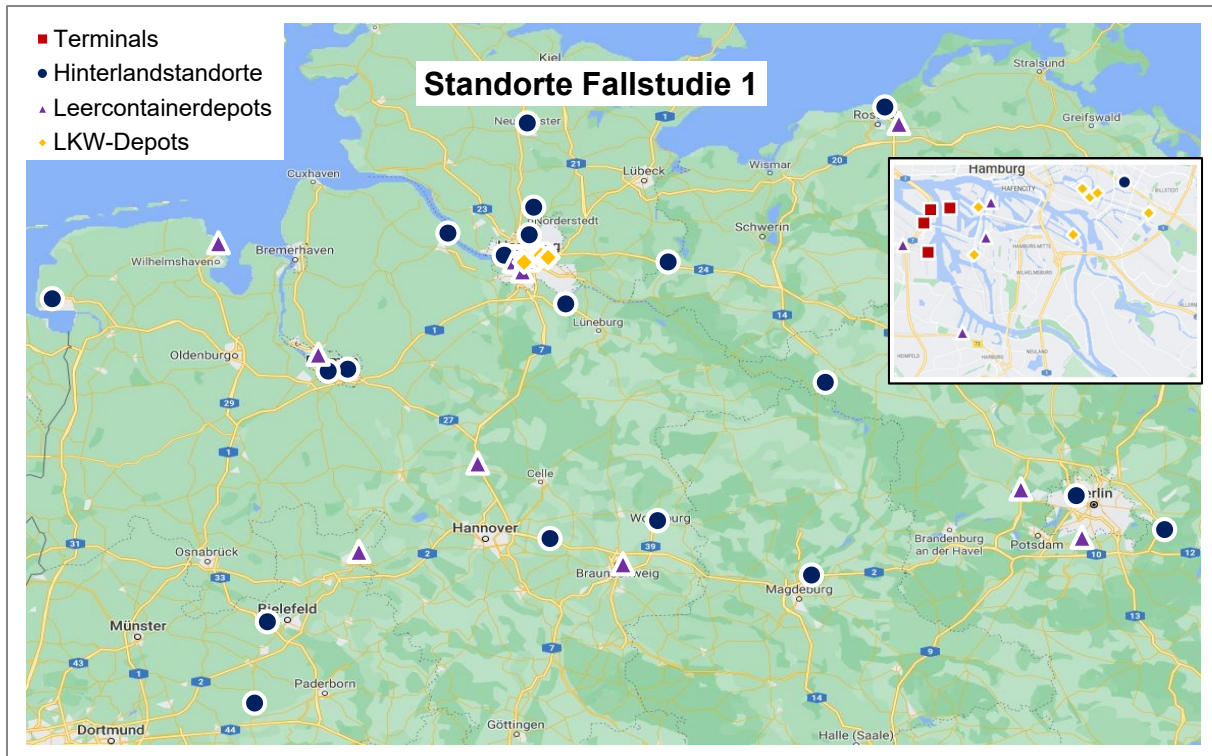


Abbildung 22: Standorte Fallstudie 1 (Hintergrundkarten maps.google.de)

In **Fallstudie 2** existieren neben den vier Hamburger Containerterminals ebenfalls 20 Standorte im Hinterland. Dabei handelt es sich jedoch in der Mehrzahl um andere Standorte als in Fallstudie 1. An diesen Standorten können Kundenaufträge starten oder enden. Zudem existieren sieben Leercontainerdepots, von denen je Kundenauftrag eines durch das Fuhrunternehmen angefahren werden muss. (vgl. Abbildung 23).

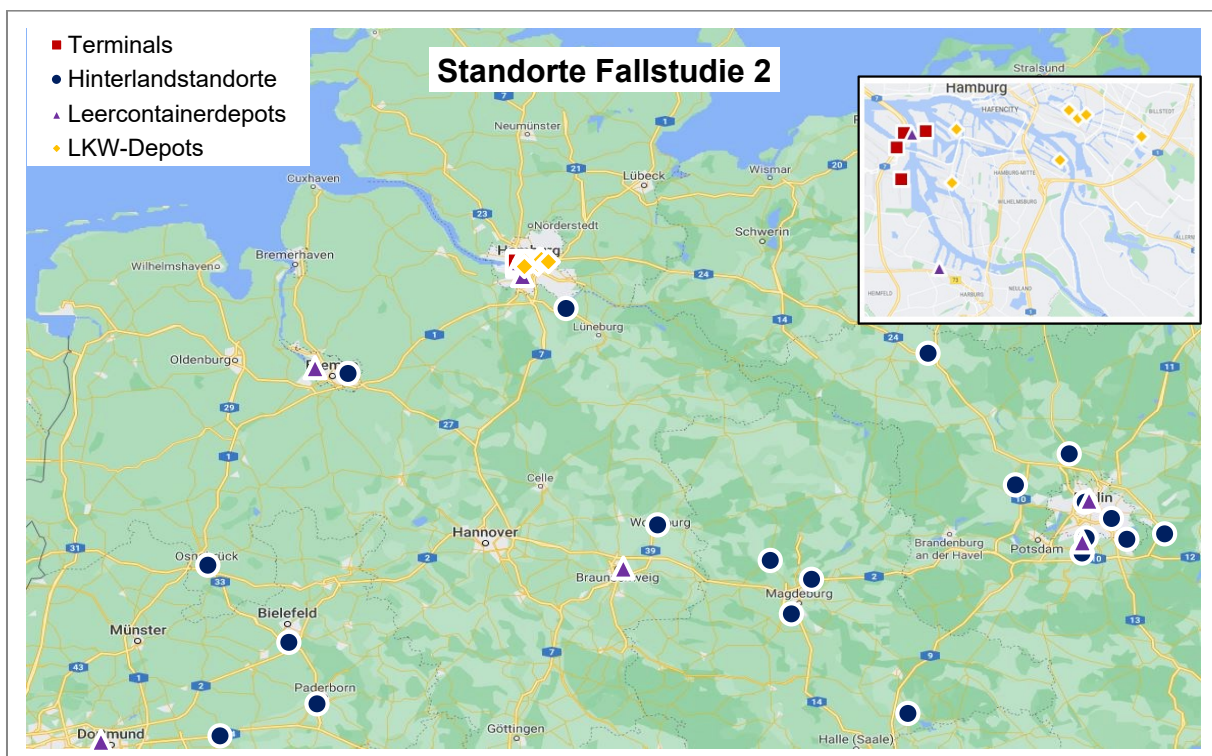


Abbildung 23: Standorte Fallstudie 2 (Hintergrundkarten maps.google.de)

8.1.1 Fallstudie 1

Für die Fallstudie werden realistische Daten für alle Mengen und Parameter (s. Kapitel 7.2.1 und 7.2.2) entwickelt und genutzt.

8.1.1.1 Daten der Fuhrunternehmen

Jede Instanz besteht aus 7 Fuhrunternehmen, wobei die Zuordnung der Kundenaufträge zu den Fuhrunternehmen gegeben ist.

Die Kosten für die Fahrt eines LKW werden angegeben als Distanzkostensatz in € je km und als Zeitkostensatz in € je Stunde. Da beide Kostensätze von den gefahrenen Fahrtstrecken abhängen, besteht ein Zusammenhang zwischen den beiden Kostenbestandteilen.

Der Distanzkostensatz ($C_{km,r}$) beinhaltet keine zeitlich abhängigen Kosten, sondern ausschließlich distanzabhängige Kosten, wie z. B. die Dieselmotorkraftstoffkosten und die LKW-Maut, die aber nicht danach differenziert sind, ob eine Autobahn befahren wird oder nicht. Der Kostensatz je Kilometer wird für jede Instanz und jedes Fuhrunternehmen zufällig gewählt und liegt zwischen 0,40 €/km und 0,50 €/km. Diese Werte wurden auf Basis einer Recherche (u.a. teleroute 2023) bei einer jährlichen Fahrleistung von ca. 100.000 km (Lerner 2017) ermittelt. Wenn auch die Kosten für den Fahrer auf die Kilometer umgelegt würden, würde sich ein Wert von ca. 0,80 €/km ergeben. Da Fahrer jedoch auf Stundenbasis und nicht auf Kilometerbasis bezahlt werden, werden die Kosten für den Fahrer im Zeitkostensatz berücksichtigt.

Der Zeitkostensatz (Ch_r) berücksichtigt keine distanzabhängigen Kosten, sondern ausschließlich zeitabhängige Kosten, wie z. B. die Lohnkosten für den LKW-Fahrer. Der Zeitkostensatz liegt je Instanz und Fuhrunternehmen bei 14 €/h oder 15 €/h. Die Daten werden auf Basis von Gehaltsvergleichen (u.a. Glassdoor 2023), zuzüglich des Arbeitgeberanteils der Nebenkosten, geschätzt. Es ist davon auszugehen, dass LKW-Fahrer für Container eher einen unterdurchschnittlichen Lohn erhalten, da die Fahrtätigkeit einfach ist und keine Ladungssicherung im Innenraum, sondern nur die Sicherung mit Twistlocks nötig ist.

Es werden ausschließlich variable Kosten und keine Fixkosten für die Verwaltung o.ä. berücksichtigt, da die Fixkosten unabhängig von der Anzahl der ausgeführten Kundenaufträge sind.

Gemäß den gesetzlichen Regelungen in Deutschland darf die durchschnittliche Arbeitszeit eines LKW-Fahrers 8 Stunden pro Tag nicht überschreiten (exkl. Ruhezeiten). Hiervon sind allerdings Ausnahmen möglich, sodass eine Erhöhung auf bis zu 10 Stunden möglich ist (Bußgeldkatalog 2022). Aus diesem Grund liegt die maximal mögliche Arbeitszeit eines LKW-Fahrers zwischen 8 und 10 Stunden pro Tag und wird je Instanz und je Fuhrunternehmen zufällig festgelegt, um die Realitätsnähe zu gewährleisten und auch ungeplante Verzögerungen (z. B. Staus), die eine 10 Stunden-Schicht erfordern, abzubilden. Pausen während dieser Arbeitszeit werden nicht berücksichtigt.

Es ist zu berücksichtigen, dass Kunden individuelle Preise mit ihren Auftragnehmern, den Fuhrunternehmen, verhandeln. Dies führt zu unterschiedlichen Erlösen auf Seiten der

Fuhrunternehmen. Um diese Heterogenität in den Erlösen abbilden zu können, wird ein sog. Verhandlungsfaktor (VHF) berücksichtigt. Dieser kann die Erlöse eines Kundenauftrages (abhängig vom Fuhrunternehmen) erhöhen. Für die Instanzen a bis e ist eine Erhöhung um bis zu 30 % möglich ($VHF \leq 1,3$). Für die Instanzen f bis j liegt die Erhöhung zwischen 30 % und 60 % ($1,3 \leq VHF \leq 1,6$).

Jedes Fuhrunternehmen hat für jeden Tag mindestens einen Kundenauftrag, der an diesem Tag ausgeführt werden soll. Die Containerdrehpauschale (C_p), die fällig wird, wenn ein Fuhrunternehmen eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen durchführt, liegt je Instanz bei 1 €, 10 € oder 100 €. Die unterschiedlichen drei Werte wurden deswegen gewählt, um möglichst klar den Einfluss der Containerdrehpauschale in den Ergebnissen ablesen zu können. Jede Instanz wird für drei Vertrauensgruppeneinteilungen (Trustgroup, TG) berechnet, um deren Einfluss zu beurteilen. Die Tabelle 7 zeigt die drei verschiedenen Vertrauensgruppeneinteilungen. Bei 1TG vertrauen sich alle Fuhrunternehmen gegenseitig. Bei 2TG bestehen zwei Vertrauensgruppen (1, 2), innerhalb derer sich die Fuhrunternehmen jeweils vertrauen und kooperieren. Bei 3TG sind es drei Vertrauensgruppen (1, 2, 3) mit je zwei bzw. drei Fuhrunternehmen.

Tabelle 7: Vertrauensgruppeneinteilung

	1TG	2TG	3TG	
Fuhrunternehmen 1	Vertrauensgruppe 1	Vertrauensgruppe 1	Vertrauensgruppe 1	
Fuhrunternehmen 2			Vertrauensgruppe 2	Vertrauensgruppe 2
Fuhrunternehmen 3				Vertrauensgruppe 3
Fuhrunternehmen 4				
Fuhrunternehmen 5				
Fuhrunternehmen 6				
Fuhrunternehmen 7				

8.1.1.2 Daten der Kundenaufträge

Insgesamt besteht jede Instanz aus 100 Kundenaufträgen. In der Fallstudie 1 liegt der Anteil von Import- zu Exportkundenaufträgen bei jeweils 50 % (I:E 50:50), d. h., es existieren 50 Importkundenaufträge und 50 Exportkundenaufträge. Der Planungshorizont beträgt eine Woche mit 5 Tagen (Montag bis Freitag), an denen die Kundenaufträge ausgeführt werden können, wobei jeder Kundenauftrag sich auf einen gewünschten Tag bezieht.

Jeder Kundenauftrag besteht aus dem gewünschten Transport von einem Container vom Hinterland zum Seehafenterminal (Export) oder vom Seehafenterminal ins Hinterland (Import). Jeder Container ist einem von vier verschiedenen Containertypen zugeordnet und jeder LKW kann jeden Containertyp transportieren:

- 20-Fuß Standardcontainer (TEU)
- 40-Fuß Standardcontainer (FEU)
- 40-Fuß HighCube-Container (40HC)
- 45-Fuß HighCube-Container (45HC)

Der Containertyp wird zufällig vergeben. Ca. 25 % aller Container sind TEU-Container und ca. 75 % zählen zu den größeren Containern. Das ist realistisch, da die unterschiedlichen Typen von größeren Containern (40- und 45-Fuß) deutlich häufiger transportiert werden (Ulken 2022a, 2022b).

Der zu transportierende Container ist einer der drei Allianzen, nämlich 2M Alliance, Ocean Alliance oder THE Alliance, zuzuordnen. Es können jeweils nur Kundenaufträge zu einer Kombinationsfahrt mit Containerdrehen zusammengeführt werden, die den gleichen Containertyp haben und deren Container der gleichen Allianz zugeordnet ist.

Die Servicezeit beträgt für alle Container am Seehafenterminal 15 Minuten (0,25 Stunden). Dieser Zeitraum ist für die Ankunft und die Fahrt auf dem Terminalgelände vom Gate zum Blocklager und zurück sowie für das Hochheben eines vollen Containers vom Chassis (Export) oder das Absetzen eines vollen Containers auf das Chassis (Import) nötig. Im Hinterland ist die Servicezeit abhängig von der Containergröße, da die Servicezeit hauptsächlich aus dem Ausladen des Containers (Import) oder Beladen des Containers (Export) besteht. Die Servicezeiten liegen zwischen ein und zwei Stunden, aufsteigend in Abhängigkeit zu den o. g. Containertypen. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, wartet der LKW immer das Ein- oder Ausladen des Containers ab.

Das harte Zeitfenster am Hinterlandstandort, also am Zielort eines Importkundenauftrages oder am Startort eines Exportkundenauftrages, beginnt zufällig, zur festen Uhrzeit um 6 oder 7 Uhr und endet zufällig, zur festen Uhrzeit zwischen 20 und 23 Uhr, sodass es maximal 17 Stunden lang ist. Da die Fallstudie hauptsächlich solche Standorte, wie die der Automobilproduktionen und der Warenlager des Onlinehandels, im Hinterland berücksichtigt, wird davon ausgegangen, dass diese auch länger, d. h. bis 23 Uhr, geöffnet haben. Das harte Zeitfenster am Containerterminal (also am Startort eines Importkundenauftrages oder am Zielort eines Exportkundenauftrages) ist 22 Stunden lang. Es wird angenommen, dass theoretisch jederzeit, mit Ausnahme eines Wartungsfensters, das Seehafenterminal angefahren werden kann. Das weiche Zeitfenster entspricht demgegenüber immer einer Größe von einer Stunde oder drei Stunden (abhängig von der Instanz, s. Tabelle 8) und wird zufällig zwischen 7 und 21 Uhr festgesetzt. Dies entspricht der Praxis, da an Hamburger Seehafenterminals einstündige Slots für die LKW vergeben werden, die jedoch, sofern freie Kapazitäten verfügbar sind, auch verschoben werden können (HHLA 2022a, 2022b, 2021).

Exportkundenaufträge müssen, wie im Modell festgelegt, am gewünschten Tag ausgeführt werden, da davon auszugehen ist, dass diese auf ein Seecontainerschiff geladen werden und das Schiff sonst ohne den Container das Terminal verlässt. Aus diesem Grund sind auch die stündlichen Verspätungskosten, die das Fuhrunternehmen tragen muss, für

Exportkundenaufträge höher als für Importkundenaufträge. Importkundenaufträge können bis zu zwei Tage später als gewünscht ausgeführt werden.

Jeder Kundenauftrag wird aus Sicht des Fuhrunternehmens einer der drei Kategorien im Hinblick auf den Kundenwert, nämlich hoch, mittel und gering, zugeordnet. Dabei bringen Kundenaufträge der Kategorie hoch einen höheren Erlös für das Fuhrunternehmen als die Kundenaufträge der Kategorie mittel bzw. gering. Zudem sind die Kompensationskosten (Cc_n), die im Falle der Übernahme eines Kundenauftrages durch ein ausführendes Unternehmen an das Eigentümer-Unternehmen gezahlt werden, abhängig vom Kundenwert des Auftrages.

Die Erlöse für die Fuhrunternehmen entsprechen den Preisen, die die Kunden dafür bezahlen müssen. Die Preise pro Kilometer im LKW-Transport lagen im Jahr 2021 je nach Quelle bei durchschnittlich 1,6 €/km (Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) 2021) oder bei durchschnittlich 1,9 €/km (BMEnet GmbH 2021), wobei die Spanne zwischen 1,5 und 3,1 €/km liegt (ebd.). Andere Quellen sprechen davon, dass ein Betrag von 1,25 € pro Kilometer als „auskömmlich“ für das Fuhrunternehmen gilt (Rathmann 2020). Wie bereits erwähnt ist davon auszugehen, dass der Transport von Containern aufgrund seiner Einfachheit und Ersetzbarkeit (s. Kapitel 5.3) eher unterdurchschnittliche Erlöse erzielt. Aus diesem Grund wird der Erlössatz für die Fallstudie für Kunden mit einem hohen Wert bei 1,9 €/km, für Kunden mit einem mittleren Wert bei 1,8 €/km und für Kunden mit einem geringen Wert bei 1,7 €/km festgelegt.

Der Erlös eines Kundenauftrages ergibt sich aus der Multiplikation der zu fahrenden Distanz der Vollcontainerfahrt mit dem Erlössatz pro Kilometer in Abhängigkeit der o. g. Kundenwerte multipliziert mit dem Verhandlungsfaktor des Fuhrunternehmens:

Erlös Kundenauftrag

$$= \text{Distanz Vollcontainerfahrt} * \text{Erlössatz (abh. v. Kundenwert)} * \text{VHF}$$

So ergibt sich beispielsweise für einen Kundenauftrag für eine Vollcontainerfahrt von Hamburg nach Bremen bei einer Distanz der Vollcontainerfahrt von 105 km und einem Erlössatz von 1,8 €/km (Kategorie Mittel) sowie einem Verhandlungsfaktor von 1,3 ein Erlös für diesen Auftrag von 246 €. Die gesamte Fahrdistanz bei Ausführung als Einzelfahrt (inkl. Leer- und Leercontainerfahrt) liegt bei ca. 270 km, sodass die Distanzkosten ca. 108 € betragen. Bei 7 Stunden Arbeitszeit (Fahrt- und Servicezeiten) betragen die Zeitkosten ca. 100 €. Der Deckungsbeitrag dieses Kundenauftrages, liegt also bei $246\text{€} - 208\text{€} = 38\text{€}$ und bei 0,14 €/km für die gesamte Tour dieses Beispiels. Diese aus der Recherche entwickelten Erlös- und Kostensätze wurden einem Experten vorgelegt, der diese als realistisch eingeschätzt hat. Die folgende Tabelle 8 gibt einen Überblick über die wesentlichen Daten der Instanzen der Fallstudie 1. Die Daten der Fuhrunternehmen und der Kundenaufträge der Instanz c sind exemplarisch im Anhang 12.2 aufgeführt.

Tabelle 8: Fallstudie 1 Instanzübersicht

Instanz	I:E	$Ck_{m,r}$	Ch_r	Cp	Erlös	VHF	Cc_n	Weiches Zeitfenster
a	5:5	0,4 bis 0,5	14 bis 15	1	Hoch: 1,9 Mittel: 1,8 Gering: 1,7	<u>Niedrig</u> 1,0 bis 1,3	Hoch: 150 Mittel: 100	1 Stunde
b				10				1 Stunde
c				100				1 Stunde
d				1				3 Stunden
e				10				3 Stunden
f				10		1 Stunde		
g				100		1 Stunde		
h				10		3 Stunden		
i				100		3 Stunden		
j				100		3 Stunden		

8.1.2 Fallstudie 2

Die Fallstudie 2 ähnelt Fallstudie 1. Es werden im Folgenden ausschließlich die Unterschiede benannt. Der wesentliche Unterschied liegt in der Nutzung von anonymisierten Daten eines Hamburger Fuhrunternehmens. Konkret werden die Daten bzgl. der Hinterlandstandorte von Kundenaufträgen und bzgl. der Standorte von Leercontainerdepots im Hamburger Hinterland genutzt. Dabei werden die Daten anonymisiert, sodass in o. g. Karte (Abbildung 23) nicht die tatsächlichen Kunden des Fuhrunternehmens abgebildet sind, sondern mögliche Kunden, die in direkter Nähe zu den Originalkunden existieren. Da die durchschnittliche Entfernung von den Seehafenterminals zu den Hinterlandstandorten höher ist als bei Fallstudie 1, folgte eine Erweiterung des Modells um zweitägige Kombinationsfahrten (s. Kapitel 7.2.7). Für alle Instanzen und Fuhrunternehmen beträgt die Dauer der Ruhezeit für die Übernachtung 10 Stunden und die Kosten hierfür 60 €. Die harten Zeitfenster für die Hinterlandstandorte erstrecken sich für alle Instanzen von 7 bis 16 Uhr.

Die Instanzen f bis j sind identisch zu den Instanzen a bis e mit dem Unterschied, dass diese 60 Importkundenaufträge und 40 Exportkundenaufträge beinhalten. Dies entspricht dem Anteil des Hamburger Fuhrunternehmens. Die folgende Tabelle 9 gibt einen Überblick über die wesentlichen Daten der Instanzen der Fallstudie 2. Die Daten der Fuhrunternehmen und der Kundenaufträge der Instanz g sind exemplarisch im Anhang 12.3 aufgeführt.

Tabelle 9: Fallstudie 2 Instanzübersicht

Instanz	I:E	Ck_{m_r}	Ch_r	Cp	Erlös	VHF	Cc_n	Weiches Zeitfenster
a	5:5	0,4 bis 0,5	14 bis 15	1	Hoch: 1,9 Mittel: 1,8 Gering: 1,7	<u>Niedrig</u> 1,0 bis 1,3	Hoch: 150 Mittel: 100 Gering: 50	1 Stunde
b				10				1 Stunde
c				100				1 Stunde
d				1				3 Stunden
e				10				3 Stunden
f	6:4	0,4 bis 0,5	14 bis 15	1	Hoch: 1,9 Mittel: 1,8 Gering: 1,7	<u>Niedrig</u> 1,0 bis 1,3	Hoch: 150 Mittel: 100 Gering: 50	1 Stunde
g				10				1 Stunde
h				100				3 Stunden
i				1				3 Stunden
j				10				3 Stunden

Es wird darauf hingewiesen, dass die Kostensätze für den Dieselkraftstoff und den Arbeitslohn durch die globale geopolitische und wirtschaftliche Situation (Krieg, Inflation) schwanken und aktuell stark gestiegen sind. Diese Kostensteigerungen geben die Fuhrunternehmen in den Preisen auch an ihre Kunden weiter. So stieg von Anfang 2021 bis Ende 2022 der Preis pro Transportkilometer von durchschnittlich 1,93 €/km um 16 % auf 2,24 €/km (BMEnet GmbH 2022). Da die Preise mit den Kosten steigen, kann davon ausgegangen werden, dass das Verhältnis von Kosten und Erlös ähnlich bleibt und somit auch die unten durchgeführten Analysen weiterhin Bestand haben.

8.1.3 Kraftstoffverbrauch

Die Parameter für den Kraftstoffverbrauch je km Strecke müssen vorab definiert werden. Wie in Kapitel 7.2.6 beschrieben, wird der Kraftstoffverbrauch abhängig von der Strecke definiert.

Für die Festlegung des Verbrauches je Strecke (in km) ist es erforderlich, für alle Parameter und Containertypen den Verbrauch abhängig vom Gesamtgewicht des LKW zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass, wie in der Praxis üblich, Dieselkraftstoff verwendet wird. Der Verbrauch an Dieselkraftstoff ist abhängig von der Motorleistung sowie vom Gesamtgewicht des Fahrzeugs. LKW, die Container transportieren können, benötigen eine hohe Nutzlast. Bei LKW mit hoher Nutzlast ist der Verbrauch je Tonnenkilometer (tkm) geringer als bei LKW mit niedriger Nutzlast. Bei den LKW, die Container transportieren, beträgt der Verbrauch ca. 1 Liter je 100 tkm, d. h., ca. 1 Liter Dieselkraftstoff wird auf 100 km je Tonne LKW-Gewicht verbraucht (Webfleet 2020; Schmidt 2021). Es sind bereits vereinzelt LKW im Einsatz, die weniger als 1 Liter je 100 tkm Kraftstoff verbrauchen (Volvo Trucks 2022).

Der leere LKW ohne Container besteht aus der Zugmaschine und dem Chassis. Eine Zugmaschine hat ein Gewicht von circa 7 Tonnen (s. u. a. Europa-LKW.de 2022a, 2022b). Ein

Chassis, welches mit 20-Fuß, 40-Fuß und 45-Fuß Container beladen werden kann, wiegt circa 5 Tonnen (KTH Trailer GmbH 2018). In Summe wiegt ein LKW ohne Container folglich ca. 12 Tonnen. Das bedeutet, dass ein leerer LKW je 100 km 12 Liter Dieselkraftstoff verbraucht ($EMohne = \frac{12}{100}$).

Ein 20-Fuß Container wiegt leer, d. h. ohne Beladung, circa 1 bis 2 Tonnen (Freightfinders GmbH 2022a). Da bei 20-Fuß Containern auch kürzere und leichtgewichtigere Chassis genutzt werden können, wird das Gesamtgewicht einer Zugmaschine mit Chassis und einem leeren 20-Fuß Container auf 13 t geschätzt, sodass der Verbrauch 13 l je 100km entspricht. Das maximale Zuladungsgewicht des Containers beträgt 28 t (ebd.). Dies wird in der Realität aber meist nicht erreicht. Es wird daher ein mittleres Containergewicht von 16 t (Leergewicht und Beladung) geschätzt, sodass der LKW mit beladenem 20-Fuß Container insgesamt 28 t (12+16) wiegt und 28 l je 100km verbraucht.

Ein 40-Fuß Container wiegt leer, d. h. ohne Beladung, circa 4 Tonnen (Freightfinders GmbH 2022b; HHDR 2019). HighCube und 45-Fuß Container wiegen leer etwas mehr als der normale 40-Fuß Container. Dies wird hier nicht berücksichtigt. Das Gesamtgewicht einer Zugmaschine mit Chassis und leerem 40-Fuß Container wird auf 15 t geschätzt, sodass der Verbrauch 15 l je 100km entspricht. Das maximale Zuladungsgewicht des Containers beträgt 30 t (ebd.). Dies wird insbesondere im Straßenverkehr, aufgrund von Gewichtsbeschränkungen, meist nicht erreicht. Es wird daher ein mittleres Containergewicht von 23 t geschätzt, sodass der LKW mit beladenem 40-Fuß Container insgesamt 35 t (12+23) wiegt und 35 l je 100 km verbraucht. Bei den Vollcontainerverbräuchen wird zwischen 40-Fuß und 45-Fuß Containern nicht differenziert, da die unterschiedliche Größe sich meist nur geringfügig aufs Ladungsgewicht auswirkt. Die größeren Container sind jedoch attraktiv aufgrund ihres größeren Volumens (ebd., MT Container GmbH 2022). Die folgende Tabelle 10 bietet einen Überblick über die genutzten Verbrauchswerte.

Tabelle 10: Genutzte Verbrauchswerte

Typ_n	$EMohne$	$EMleer_{Typ_n}$	$EMvoll_{Typ_n}$
<i>unabhängig</i>	$\frac{12\ l}{100\ km}$	-	-
20-Fuß Standard-container (TEU)	-	$\frac{13\ l}{100\ km}$	$\frac{28\ l}{100\ km}$
40-Fuß Standard-container (FEU)	-	$\frac{15\ l}{100\ km}$	$\frac{35\ l}{100\ km}$
40-Fuß HighCube-Container (40HC)	-	$\frac{15\ l}{100\ km}$	$\frac{35\ l}{100\ km}$
45-Fuß HighCube-Container (45HC)	-	$\frac{15\ l}{100\ km}$	$\frac{35\ l}{100\ km}$

8.2 Vorgehen

8.2.1 Implementierung

Das mathematische Modell ist in Python 3.8 implementiert. Zum Lösen des mathematischen Modells wird das Python-Paket gurobipy genutzt, welches den Solver Gurobi in der Version 9 verwendet (Gurobi Optimization 2023). Die Berechnungen werden auf unterschiedlichen Computern durchgeführt. Computer 1 ist ausgestattet mit einem Intel Xeon E5-2687 mit 3.1 GHz, insgesamt 16 Kernen und 128 GB Arbeitsspeicher. Computer 2 ist ausgestattet mit zwei Intel Xeon E5-2650 v4 Prozessoren mit je 2,20 GHz, insgesamt 24 Kernen und 128 GB Arbeitsspeicher. Für das Lösen wird je Fairnessmechanismus und Vertrauensgruppenaufteilung einer Instanz ein Zeitlimit von einer Stunde festgelegt. Nur in wenigen Einzelfällen kann im Rahmen des Zeitlimits nicht sichergestellt werden, dass die optimale Lösung gefunden wird. In diesen Fällen wird nach einer Stunde die bis dahin beste Lösung angegeben. Die MIP-Gap ist dabei stets kleiner als 1 %, die Lösung ist folglich sehr gut. Diese Einzelfälle traten gehäuft in Verbindung mit den Fairnessmechanismen PIUT und PIUDT auf, was dafür spricht, dass ein erhöhter Rechenaufwand nötig ist, wenn auf eine gleichmäßige Verteilung des Profits unter den Fuhrunternehmen geachtet werden muss. Darüber hinaus gab es wenige Einzelfälle, bei denen nach einer Stunde noch keine zulässige Lösung ermittelt werden konnte (vgl. Kapitel 8.3 und 8.4).

8.2.2 A Priori Berechnungen

Da die Fairnessmechanismen PIT, PIDT, PIUT und PIUDT den Profit mit Kooperation im Vergleich zum Profit ohne Kooperation bewerten, ist es erforderlich, den Profit ohne Kooperation a priori zu berechnen. Hierfür sind insgesamt drei Berechnungen je Instanz notwendig. Zuerst wird einmalig der Fall berechnet, in dem keine Kooperation erfolgt und jeder Kundenauftrag als Einzelfahrt durchgeführt wird (PriorProfit). Dabei wird das oben beschriebene mathematische Modell einmalig um folgende zwei Restriktionsgruppen ergänzt. Die erste Restriktionsgruppe 7.64 legt fest, dass Kundenaufträge nur von den jeweiligen Auftragseigentümern ($z_n^r = 1$) ausgeführt werden dürfen. Diese Restriktionsgruppe wird auch für die folgenden Berechnungen genutzt und deckt auch die Kombinationsfahrten (Summanden zwei bis fünf) mit ab, die bei dieser Berechnung des PriorProfit gleich null sind, da sie durch die zweite Restriktionsgruppe ausgeschlossen werden. Die zweite Restriktionsgruppe 8.1 legt nämlich fest, dass alle Kundenaufträge als Einzelfahrt durchgeführt werden müssen. Durch die Pflicht zur Einzelfahrt wird auch gewährleistet, dass die Kundenaufträge an dem gewünschten Tag durchgeführt werden, um Kosten durch Verspätung oder Verfrühung zu vermeiden.

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(x_{nr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in P}} y_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in P}} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in \widehat{P}IE}} \hat{y}_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in \widehat{P}IE}} \hat{y}_{mnr}^t \right) = 1 \quad (7.64)$$

$$\forall n \in N \wedge \forall r \in R : z_n^r = 1$$

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \sum_{r \in R} x_{nr}^t = 1 \quad \forall n \in N \quad (8.1)$$

Das mathematische Modell wird gelöst und der Profit für jedes Fuhrunternehmen an jedem Tag in dem Parameter pP_r^t abgespeichert.

pP_r^t Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$

Selbstverständlich versuchen die Fuhrunternehmen auch ohne Kooperation ihre eigenen Kundenaufträge zu Kombinationsfahrten zu verbinden. Dies wird im zweiten und dritten Fall berücksichtigt. Im zweiten Fall erfolgt weiterhin keine Kooperation, aber es ist nun möglich, Kombinationsfahrten mit zwei aufeinanderfolgenden Kundenaufträgen durchzuführen. Dabei wird das oben beschriebene mathematische Modell einmalig um zwei Restriktionsgruppen ergänzt. Die erste Restriktionsgruppe 7.64 legt fest, dass Kundenaufträge nur von den jeweiligen Auftragseigentümern ausgeführt werden dürfen (identisch zu o. g. ersten Fall). Die zweite Restriktionsgruppe 8.2 legt fest, dass der Profit mit Kombinationsfahrten an jedem Tag höher sein muss als der o. g. PriorProfit (pP_r^t) ohne Kombinationsfahrten. Der Profit von zweitägigen Kombinationsfahrten wird dem ersten Tag der Fahrt zugeordnet. Dabei wird der PriorProfit zur Vereinfachung auf den nächsten ganzzahligen Wert in € abgerundet.

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(x_{nr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in P}} y_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in P}} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in \widehat{P}IE}} \hat{y}_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in \widehat{P}IE}} \hat{y}_{mnr}^t \right) = 1 \quad \forall n \quad (7.64)$$

$$\in N \wedge \forall r \in R : z_n^r = 1$$

$$\text{TaglProfit}_r^t \geq [pP_r^t] \quad \forall r \in R \wedge \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (8.2)$$

Das mathematische Modell wird gelöst und der Profit für jedes Fuhrunternehmen an jedem Tag abgespeichert (**RealPriorProfit Day**). Bei Nutzung der Fairnessmechanismen PIDT und PIUDT wird dieser abgespeicherte Profit in dem Parameter pPD_r^t angegeben.

pPD_r^t Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem Kombinationsfahrten möglich sind (RealPriorProfit Day, rpP D)

Im dritten Fall erfolgt weiterhin keine Kooperation, aber Kombinationsfahrten sind möglich. Hier wird wieder das oben beschriebene mathematische Modell einmalig um zwei Restriktionsgruppen ergänzt und gelöst. Die Restriktionsgruppe 7.64 legt fest, dass Kundenaufträge nur von den jeweiligen Auftragseigentümern ausgeführt werden dürfen (identisch zu o. g. Fällen). Die zweite Restriktionsgruppe 8.3 legt fest, dass der Profit über den

Planungszeitraum, also die Woche, höher sein muss als der o.g. PriorProfit ohne Kombinationsfahrten. Dabei wird der PriorProfit zur Vereinfachung auf den nächsten ganzzahligen Wert in € abgerundet. Somit können Kundenaufträge vermehrt auch tageweise verschoben werden, falls der Kundenauftrag dies erlaubt. Exportkundenaufträge können aufgrund von Restriktionsgruppe 7.50 nicht verschoben werden.

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} \left(x_{nr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in EP}} y_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in EP}} y_{mnr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (n,m) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{nmr}^t + \sum_{\substack{m \in N: \\ (m,n) \in \widehat{PIE}}} \hat{y}_{mnr}^t \right) = 1 \quad \forall n \in N \wedge \forall r \in R : z_n^r = 1 \quad (7.64)$$

$$\sum_{t \in \{1, \dots, T\}} TaglProfit_r^t \geq \left| \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} p_{P_r}^t \right| \quad \forall r \in R \quad (8.3)$$

Das mathematische Modell wird gelöst und der Profit für jedes Fuhrunternehmen an jedem Tag abgespeichert (**RealPriorProfit Total**). Bei Nutzung aller anderen Fairnessmechanismen z. B. PIT und PIUT wird dieser abgespeicherte Profit in dem Parameter $p_{PT_r}^t$ angegeben.

$p_{PT_r}^t$ Profit des Fuhrunternehmens $r \in R$ ohne Kooperation am Tag $t \in \{1, \dots, T\}$, bei dem Kombinationsfahrten und die tageweise Verschiebung von Kundenaufträgen möglich sind (RealPriorProfit Total, rpP T)

In allen drei Berechnungen werden die Vertrauensgruppen vernachlässigt und keine Fairnessmechanismen aktiviert, da noch nicht kooperiert wird. Die Differenzierung zwischen dem zweiten und dem dritten Fall ist notwendig, um für Berechnungen mit den Fairnessmechanismen PIDT und PIUDT mit RealPriorProfit Day den vergleichbaren Wert auf Tagesbasis zu nutzen. Diese strengere Auslegung bzgl. des Tageswerts (Day) benötigen die anderen Fairnessmechanismen nicht, da diese nur auf Wochenbasis angewandt werden. Für die Fairnessmechanismen auf Wochenbasis wird der aufgrund des erweiterten Lösungsraums etwas höhere Wert des RealPriorProfit Total verwendet. Die Abbildung 24 veranschaulicht die A Priori Berechnungen.

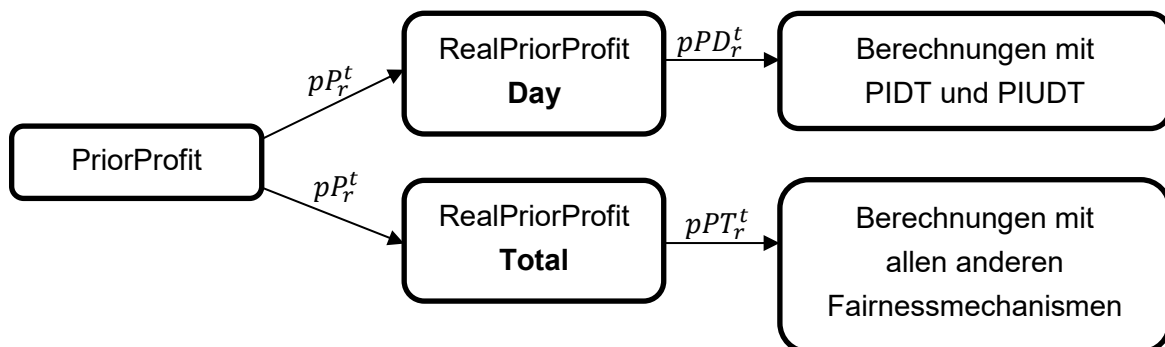


Abbildung 24: Vorgehen der A Priori Berechnungen (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 25 zeigt die Profitsteigerungen, die durch Kombinationsfahrten ohne Kooperation möglich sind (100 % RealPriorProfit T), also einen Vergleich der o. g. drei Fälle. Es zeigt sich, dass zwischen den beiden Fallstudien ein erheblicher Unterschied besteht. In Fallstudie 1 sind durch Kombinationsfahrten innerhalb eines Fuhrunternehmens nur marginale Profitsteigerungen möglich (s. dunkel- und hellblaue Linie). Diese sind bei der PriorProfit Berechnung unabhängig vom Verhandlungsfaktor, da durch den höheren Faktor der absolute Profit für alle Profitberechnungen höher ist und die Unterschiede ähnlich bleiben (s. dunkel- und hellblaue Säulen).

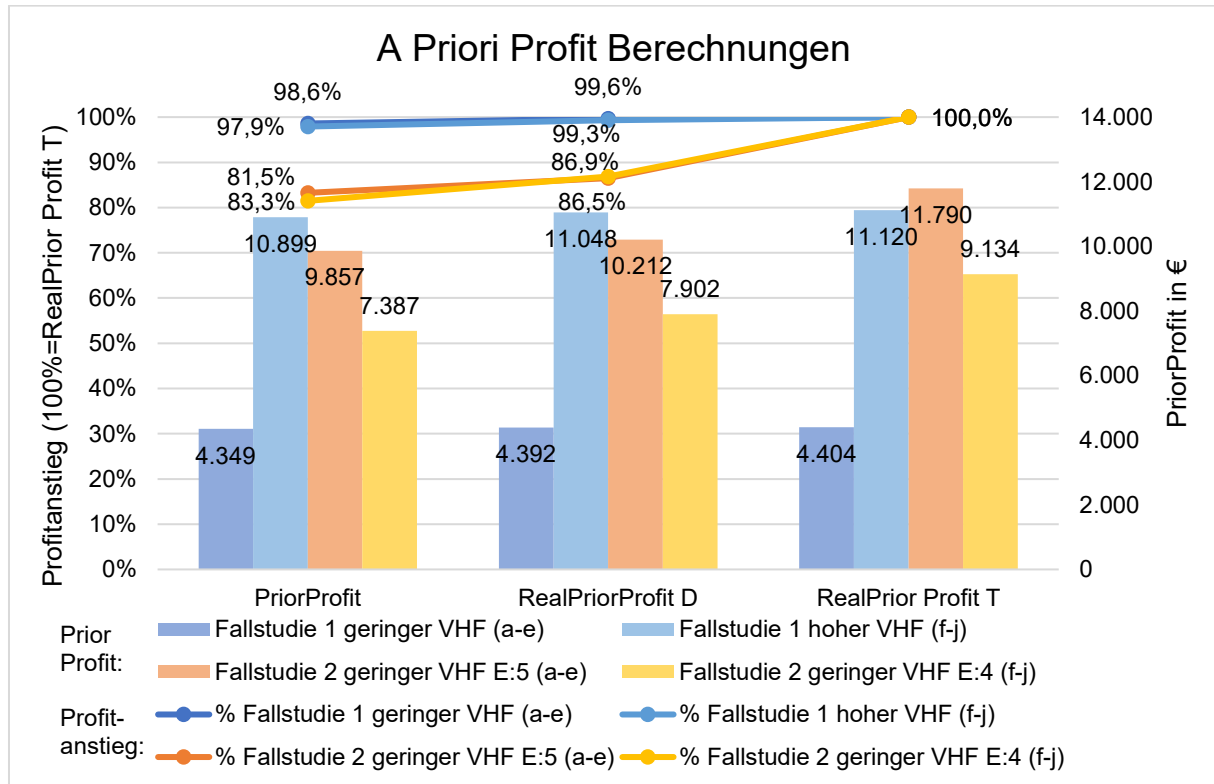


Abbildung 25: A Priori Profit Berechnungen

In Fallstudie 2 hingegen ist eine deutliche absolute und relative Profitsteigerung erkennbar, für den Fall, dass statt Einzelfahrten auch Kombinationsfahrten durch jedes Fuhrunternehmen möglich sind. Dies gilt gleichermaßen für die Instanzen mit 50 Exportkundenaufträgen (orange Säulen) und 40 Exportkundenaufträgen (gelbe Säulen). Die relativen Profitsteigerungen für Fallstudie 2 sind für beide Exportkundenauftragsverhältnisse ähnlich (PriorProfit: 83,3 % und 81,5 %, bzw. RealPriorProfit D: 86,5 % und 86,9 % vom RealPriorProfit T). Die absoluten Profitunterschiede zwischen den orangenen und gelben Säulen ergeben sich durch den je Fuhrunternehmen und Instanz zufällig festgelegten Verhandlungsfaktor im niedrigen Bereich. So ist das arithmetische Mittel der Verhandlungsfaktoren der Fuhrunternehmen mit der Anzahl der Kundenaufträge dieser Fuhrunternehmen in den Instanzen a bis e höher gewichtet als bei den Instanzen f bis j.

Der deutliche Unterschied in der relativen Profitsteigerung zwischen Fallstudie 1 und Fallstudie 2 hat zwei Gründe. Erstens sind in Fallstudie 2 zweitägige Kombinationsfahrten möglich. Im Durchschnitt werden in Fallstudie 2 bei RealPriorProfit Day 3,6 und bei RealPriorProfit Total

15,2 Kundenaufträge als zweitägige Kombinationsfahrten durchgeführt. Zweitens werden in Fallstudie 2 bei der RealPriorProfit Total Berechnung aufgrund der größeren Entfernungen häufiger Kombinationsfahrten und Kombinationsfahrten mit Containerdrehen durchgeführt. Tabelle 11 listet die Kombinationsfahrten je PriorProfit Berechnung und Fallstudie auf.

Tabelle 11: Durchschnittliche Anzahl von Kombinationsfahrten ohne Kooperation

		Einzelfahrten	Kombinationsfahrten	Kombinationsfahrten mit Containerdrehen
	PriorProfit	100	0	0
Fallstudie 1	RealPriorProfit D	92,2	7,4	0,4
	RealPriorProfit T	91	8,6	0,4
Fallstudie 2	RealPriorProfit D	95,6	3,6 (davon 2,8 zweitägig)	0,8 (davon 0,8 zweitägig)
	RealPriorProfit T	83,8	13,6 (davon 12,6 zweitägig)	2,6 (davon 2,6 zweitägig)

Als anschauliches Beispiel dienen die Fahrten von Fuhrunternehmen 1 in der Instanz b der Fallstudie 2. In der oberen Karte (PriorProfit) der Abbildung 26 ist zu erkennen, dass die Aufträge in Berlin und um Magdeburg als Einzelfahrten durchgeführt werden, was lange Leerfahrten (gepunktet) zwischen Berlin und Hamburg zur Folge hat. In der unteren Karte (RealPriorProfitT) erkennt man, dass nun zwei Importkundenaufträge in Berlin mit jeweils einem Exportkundenauftrag von Magdeburg mit Containerdrehen und Übernachtung kombiniert werden. So werden vier lange Leerfahrten durch kürzere Leerfahrten im Hamburger Hafen und zwei lange Leercontainerfahrten im Hinterland ersetzt und der Profit kann – bereits ohne Kooperation – gesteigert werden.

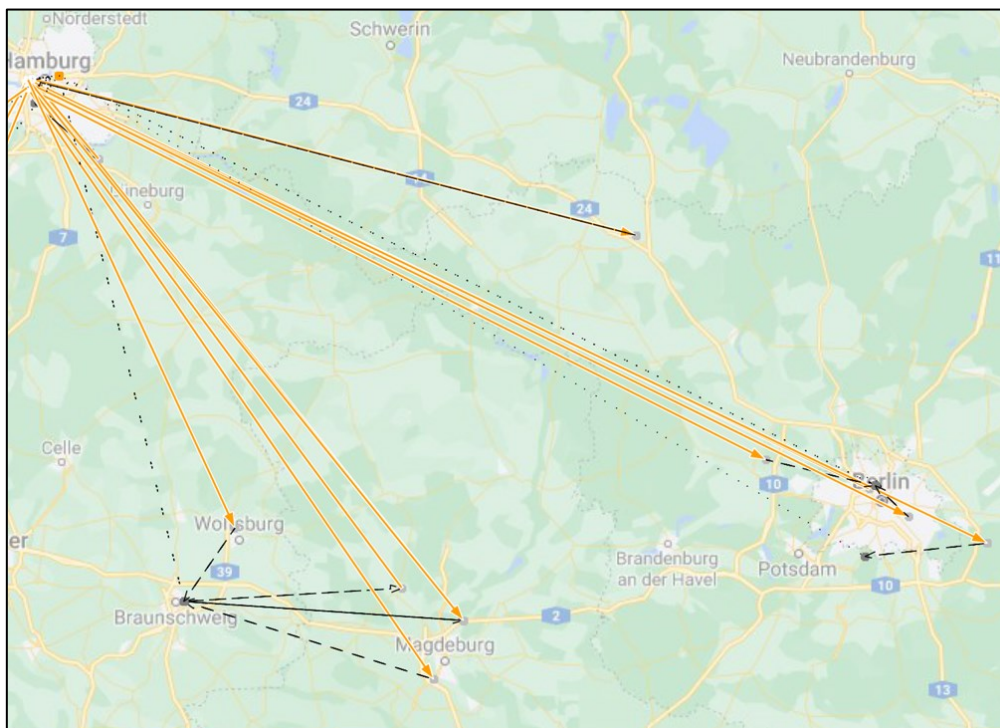


Abbildung 26: Vergleich PriorProfit (oben) mit RealPriorProfit Total (unten) für Fuhrunternehmen 1 in Fallstudie 2, Instanz b.

Legende der Linien: orange: Vollcontainerfahrt; schwarz gestrichelt/durchgängig: Leercontainerfahrt; schwarz gepunktet: Leerfahrt. Es gilt zu beachten, dass in beiden grafischen Darstellungen teilweise Linien übereinander liegen.

Folgende Tabelle 12 erläutert die beiden Kombinationsfahrten im zeitlichen Verlauf.

Tabelle 12: Zwei Kombinationsfahrten bei RealPriorProfit Total für Fuhrunternehmen 1 in Fallstudie 2, Instanz b.

Zeit	Kombinationsfahrt \widehat{PTE} (40HC, Ocean Alliance) $53 \rightarrow 14$ ($\widehat{y}_{53;14}^3$ Car1 = 1)	Zeit	Kombinationsfahrt \widehat{PTE} (20S, THE Alliance) $61 \rightarrow 28$ ($\widehat{y}_{61;28}^4$ Car1 = 1)
Mi, 9:52	Abfahrt am LKW-Depot	Do, 10:00	Abfahrt am LKW-Depot
10:36	Abfahrt Vollcontainer am Terminal Eurogate	10:42	Abfahrt Vollcontainer am Terminal Eurogate
16:00 $f_{53}^3 = 16$	Ankunft am Standort 8 im Hinterland bei Berlin (Verspätungskosten entstehen)	16:00 $f_{61}^4 = 16$	Ankunft am Standort 12 im Hinterland in Berlin
17:48	Abfahrt am Standort 8 mit identischem, nun leerem Container	17:00	Abfahrt am Standort 12 mit identischem, nun leerem Container
+2:48 +10:00 +0:18	Leercontainerfahrt Übernachtung ☾ Warten wg. hartem Zeitfenster von Standort 19	+3:13 +10:00 +0:46	Leercontainerfahrt Übernachtung ☾ Warten wg. hartem Zeitfenster von Standort 17
Do, 7:00	Ankunft am Standort 19 bei Magdeburg	Fr, 7:00	Ankunft am Standort 17 bei Magdeburg
8:48	Abfahrt am Standort 19 bei Magdeburg	8:00	Abfahrt am Standort 17 bei Magdeburg
13:38 $g_{53;14}^3$ = 37,63	Ankunft mit Vollcontainer am Terminal CTT (Verspätungskosten entstehen)	12:45 $g_{61;28}^4$ = 36,74	Ankunft mit Vollcontainer am Terminal Eurogate (Verfrühungskosten entstehen)
14:20	Ankunft am LKW-Depot	13:40	Ankunft am LKW-Depot
Mi 8:20 Do 9:00	Dauer der Fahr- und Lenkzeit ohne Übernachtungszeit	Do 8:37 Fr 8:16	Dauer der Fahr- und Lenkzeit ohne Übernachtungszeit

Die RealPriorProfit Ermittlung ist von besonderer Bedeutung, da die Fuhrunternehmen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Kooperation ihren möglichen Profit mit Kooperation vergleichen, und zwar mit dem Profit ohne Kooperation, aber mit fuhrunternehmereigenen Kombinationsfahrten. Denn das Fuhrunternehmen vergleicht den Profitanstieg durch Kooperation auf Basis des bestmöglichen Profits, den es ohne Kooperation erreichen könnte. Daher wird der RealPriorProfit Day als Untergrenze für PIDT und PIUDT verwendet und der RealPriorProfit Total als Untergrenze für alle anderen Fairnessmechanismen wie PIT und PIUT.

Die Berücksichtigung und Berechnung eines realistischen PriorProfits (rpP D und rpP T) ohne Kooperation stellt eine Neuerung dar, die bisher nicht in der Literatur bezogen auf das

Hafenhinterland vorgenommen wird. Alle Veröffentlichungen, die im systematischen Literature Review (vgl. Kapitel 4.2.1) vorgestellt werden, berücksichtigen dies nicht, sondern gehen in der Regel von Einzelfahrten bei keiner Kooperation aus (u. a. Calore et al. 2017; Uddin und Huynh 2020).

8.3 Analysen zu Fallstudie 1

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fallstudie 1 vorgestellt. Zunächst werden in Kapitel 8.3.1 die Fairnessmechanismen und ihre Kombinationen im Hinblick auf den Gesamtprofit analysiert. Anschließend werden in den Kapiteln 8.3.2 bis 8.3.4 die Auswirkungen der Kooperation auf den Profit und auf die individuelle Profitverteilung unter den Fuhrunternehmen unter Berücksichtigung des Alpha- und des Verhandlungsfaktors analysiert. Es erfolgt in Kapitel 8.3.5 die Analyse der Auswirkungen der Kooperation auf die Verteilung der Kundenaufträge sowie in Kapitel 8.3.6 und 8.3.7 die Analyse der Fahrten unter Berücksichtigung der Fahrtentypen und Containerdrehkosten.

Für jede der in Tabelle 8 aufgeführten Instanzen erfolgt für alle drei Vertrauensgruppenaufteilungen und für alle Fairnessmechanismen bzw. Fairnessmechanismus-Kombinationen eine Berechnung. Für Fallstudie 1 wurden 480 Berechnungen durchgeführt. Diese ergeben sich aus 15 Fairnessmechanismen bzw. deren Kombination, inkl. ohne Fairnessmechanismus (none), multipliziert mit drei Vertrauensgruppenaufteilungen und zehn Instanzen, zuzüglich der drei priorProfit Berechnungen je Instanz. Für 16 dieser 480 Berechnungen konnte der Solver innerhalb einer Stunde keine zulässige Lösung ermitteln. Dies entspricht 3,3 % der Fälle. Von diesen 16 unzulässigen Lösungen treten 11 in Verbindung mit PIT $\alpha = 1,1$ auf (vgl. Kapitel 8.3.2). Die Vertrauensgruppenaufteilung 3TG führt ebenfalls und meist im Zusammenhang mit PIT mit dem Alpha-Faktor 1,1 dazu, dass keine zulässige Lösung gefunden wird. Um dennoch eine Auswertung durchführen zu können, werden diese 16 Fälle wie Fälle ohne Kooperation bewertet, d. h. wie der RealPriorProfit Day (Abk.: rpP D bzw. pPD_r^t) bei PIDT oder PIUDT oder wie der RealPriorProfit Total (Abk.: rpP T bzw. pPT_r^t). Wenn also keine Lösung mit Kooperation unter Berücksichtigung eines bestimmten Fairnessmechanismus gefunden werden kann, ist keine Kooperation möglich, die die Fairnessanforderung erfüllt.

8.3.1 Analyse der Fairnessmechanismen

Zur Analyse der Fairnessmechanismen wird der Gesamtprofit, differenziert nach Vertrauensgruppenaufteilung und Fairnessmechanismen bzw. Fairnessmechanismus-Kombinationen, in folgender Abbildung 27 betrachtet. Alle Daten sind indexiert auf den Fall, dass keine Kooperation, aber Kombinationsfahrten möglich sind (RealPriorProfit Total bzw. rpP T). Dieser Fall entspricht 100 % und dient als Vergleichsbasis für die Fairnessmechanismen. Wie bereits in Kapitel 8.2.2 in Abbildung 25 dargestellt, ist der PriorProfit, der eine tageweise Verschiebung von Kombinationsfahrten nicht ermöglicht (rpP D), in Fallstudie 1 marginal geringer. Jede Säule im Diagramm in der Abbildung 27 entspricht dem arithmetischen Mittel (Durchschnitt) der Ergebnisse der zehn Instanzen der Fallstudie 1. Die Zahlen 1 bzw. 0,5 hinter der Fairnessmechanismusabkürzung geben den für

den Fairnessmechanismus genutzten Alpha-Faktor an. Die Ergebnisse von 2TG werden in der Abbildung zur besseren Lesbarkeit nicht beschriftet.

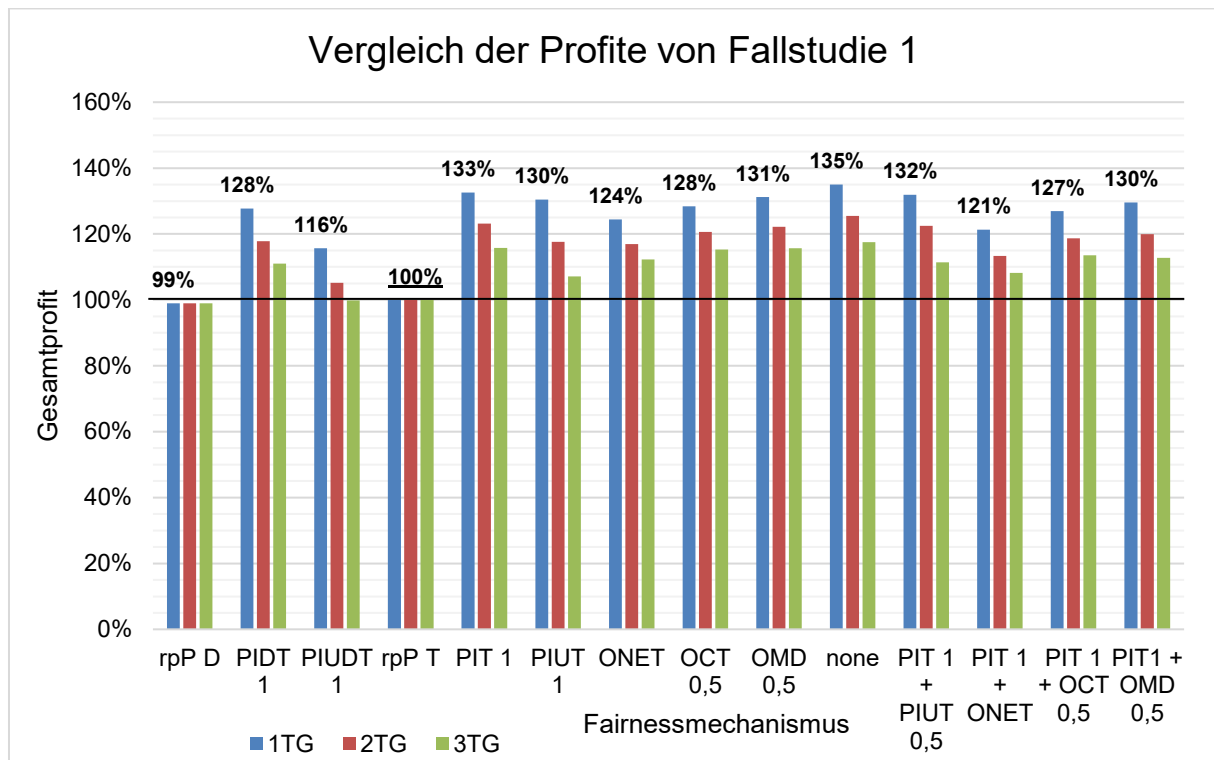


Abbildung 27: Vergleich der Gesamtprofite von Fallstudie 1

Die Profitsteigerung ist deutlich vom genutzten Fairnessmechanismus und von der Vertrauensgruppenaufteilung abhängig. Es ist festzustellen, dass die Profitsteigerung desto höher ausfällt, je größer die Vertrauensgruppe ist, d. h., je mehr Fuhrunternehmen miteinander kooperieren. Hervorzuheben ist hier, dass bereits drei kleine Vertrauensgruppen (3TG) mit jeweils zwei bis drei Fuhrunternehmen (vgl. Tabelle 7) eine erkennbare Profitsteigerung erzielen. Das bedeutet, dass, selbst wenn nur zwei oder drei Fuhrunternehmen sich gegenseitig vertrauen und Kundenaufträge austauschen, eine Profitsteigerung von meist mehr als 10 % möglich ist. Dies gilt ausnahmslos für alle untersuchten Fairnessmechanismen.

Die Fairnessmechanismen PIT 1 und PIUT 1 (jeweils mit $\alpha = 1$), die nur auf Wochenbasis Fairness sicherstellen, bewirken eine höhere Profitsteigerung als PIDT 1 und PIUDT 1 (jeweils mit $\alpha = 1$), die zusätzlich auch auf Tagesbasis eine Profitsteigerung sicherstellen. Dieser Effekt ist insbesondere bei PIUT 1 im Vergleich zu PIUDT 1 sehr deutlich (130 % zu 116 %). Der Effekt, dass langfristige im Vergleich zu kurzfristigen Fairnessmechanismen einen geringeren (negativen) Einfluss auf eine monetäre Zielsetzung haben, wird von Soriano et al. (2023) für ein anderes Planungsproblem (MDVRP) bereits festgestellt und kann somit hier für das Planungsproblem des Containertransportes im Hinterland bestätigt werden. Aus diesem Grund sind langfristige, d. h. wochenbasierte, Fairnessmechanismen zu bevorzugen. Die Fairnessmechanismen, die nur den eigenen Profit der Fuhrunternehmen berücksichtigen (PIDT und PIT), erreichen einen höheren Profit als die Fairnessmechanismen, die auch noch die Profit-Durchschnittswerte der anderen Fuhrunternehmen (PIUDT und PIUT) berücksichtigen.

Während ONET per Definition nicht auf den Profit, sondern ausschließlich auf die Anzahl der zu verteilenden Kundenaufträge abzielt, ist durch die profitmaximierende Zielfunktion dennoch eine durchschnittliche Profitsteigerung erkennbar. Bei den weiteren kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen OCT 0,5 und OMD 0,5 (mit jeweils $\alpha = 0,5$) ist die Profitsteigerung für alle drei Vertrauensgruppeneinteilungen höher als bei ONET (z. B. für 1TG 128 % und 131 % im Vergleich zu 124 %). Dies liegt daran, dass durch den geringen Alpha-Faktor und die Formulierung flexibler Fairnessmechanismen die Kundenaufträge profitsteigernder verteilt werden können.

Es ist auch erkennbar, dass bei der Anwendung keiner Fairnessmechanismen (none) die durchschnittliche Profitsteigerung für alle Fuhrunternehmen bei Kooperation je Instanz am größten ist, denn der durchschnittliche Gesamtprofit steigt um bis zu 35 %. Diese Profitsteigerung ist bei einer Vertrauensgruppe (1TG) lediglich 2 Prozentpunkte höher als bei PIT 1, bei dem jedes Fuhrunternehmen eine garantierte Profitsteigerung erfährt. Bei drei Vertrauensgruppen (3TG) beträgt der Abstand nur noch 1 Prozentpunkt. Dies ist ein Argument für die Anwendung von Fairnessmechanismen, da die Fairness und die damit die langfristige Kooperationsbereitschaft wichtiger sein sollte als die um 1 bzw. 2 Prozentpunkte geminderte Profitsteigerung.

Die vier Fälle bezüglich der **Kombination der Fairnessmechanismen** PIT ($\alpha = 1$) jeweils mit PIUT ($\alpha = 0,5$), mit ONET, mit OCT ($\alpha = 0,5$) und mit OMD ($\alpha = 0,5$) zeigen eine schwächere Profitsteigerung als PIT 1 allein. Dies ist erwartbar, da der Lösungsraum durch den jeweils zusätzlichen Fairnessmechanismus stärker eingeschränkt wird. Unter den vier zusätzlichen Fairnessmechanismen schränkt PIUT 0,5 mit der Festlegung, dass jedes Fuhrunternehmen mindestens 50 % der durchschnittlichen absoluten wöchentlichen Profitsteigerung erhält, den Profit am wenigsten ein. Die Kombinationen von PIT 1 mit OCT 0,5 oder OMD 0,5 führt im Hinblick auf die Gesamtprofitsteigerung zu überwiegend niedrigeren Werten im Vergleich zu PIT 1 mit PIUT 0,5. Die zusätzliche Bedingung ONET schränkt den Profit am stärksten ein. Eine genaue Analyse von PIT 1 mit OCT 0,5 im Hinblick auf eine mehrfache Zielsetzung folgt in Kapitel 8.6.1. Bezogen auf die Vertrauensgruppeneinteilung ist festzustellen, dass die höchste Profitsteigerung unter den Mechanismus-Kombinationen von 32 % bei einer Vertrauensgruppe (1TG) bei PIT 1 mit PIUT 0,5 liegt. Wenn die Menge der Fuhrunternehmen in drei Vertrauensgruppen aufgeteilt ist, fällt die Profitsteigerung für die Mechanismus-Kombination PIT 1 mit OCT 0,5 mit 14 % am höchsten aus.

Bei dem Fairnessmechanismus PIUT 1 ist der Einfluss der Vertrauensgruppeneinteilung am größten, denn es liegen 23 Prozentpunkte zwischen der Profitsteigerung bei 1TG im Vergleich zu 3TG. Das liegt daran, dass sich die Gleichverteilung (uniformity) durch die drei kleinen Vertrauensgruppen (bei 3TG) besonders profitmindernd bemerkbar macht.

8.3.2 Parametervariation des Alpha-Faktors

Die Anwendung des Fairnessmechanismus PIT 1 bewirkt unter allen Fairnessmechanismen für alle Vertrauensgruppeneinteilungen die stärkste Gesamtprofitsteigerung, die auch das grundlegende Ziel der Kooperation bzw. des Optimierungsmodells darstellt. Dabei wird in

Abbildung 27 immer von einer Steigerung gegenüber dem rpP T ausgegangen. Der Alpha-Faktor ist auf 1 gesetzt, d. h., der Profit mit Kooperation muss für jedes Fuhrunternehmen mindestens dem Profit ohne Kooperation entsprechen. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Alpha-Faktor auf die Profitsteigerungen hat.

Die Abbildung 28 stellt die Gesamtprofitsteigerungen für verschiedene Alpha-Faktoren (0,5; 0,9; 1; 1,1) gegenüber. Es ist festzustellen, dass mit geringerem Alpha-Faktor (0,5), wenn also Fuhrunternehmen mindestens 50 % des Profits ohne Kooperation erhalten, der durchschnittliche Gesamtprofit bei allen Vertrauensgruppeneinteilungen im Vergleich zu Alpha-Faktor 1 leicht steigt. Dies liegt daran, dass einige Fuhrunternehmen bis zu 50 % ihres vorherigen Profits verlieren und andere dadurch wiederum deutlich mehr Profit erwirtschaften. Eine Reduzierung des Alpha-Faktors von 1 auf 0,9 hat nahezu keinen Einfluss auf den Gesamtprofit. Eine Erhöhung des Alpha-Faktors auf 1,1 bedeutet, dass mit einer Kooperation mindestens eine 10-prozentige individuelle Profitsteigerung jedes beteiligten Unternehmens erreicht werden soll. Diese Erhöhung bewirkt eine insgesamt geringere Gesamtprofitsteigerung als bei einem Alpha-Faktor von 1.

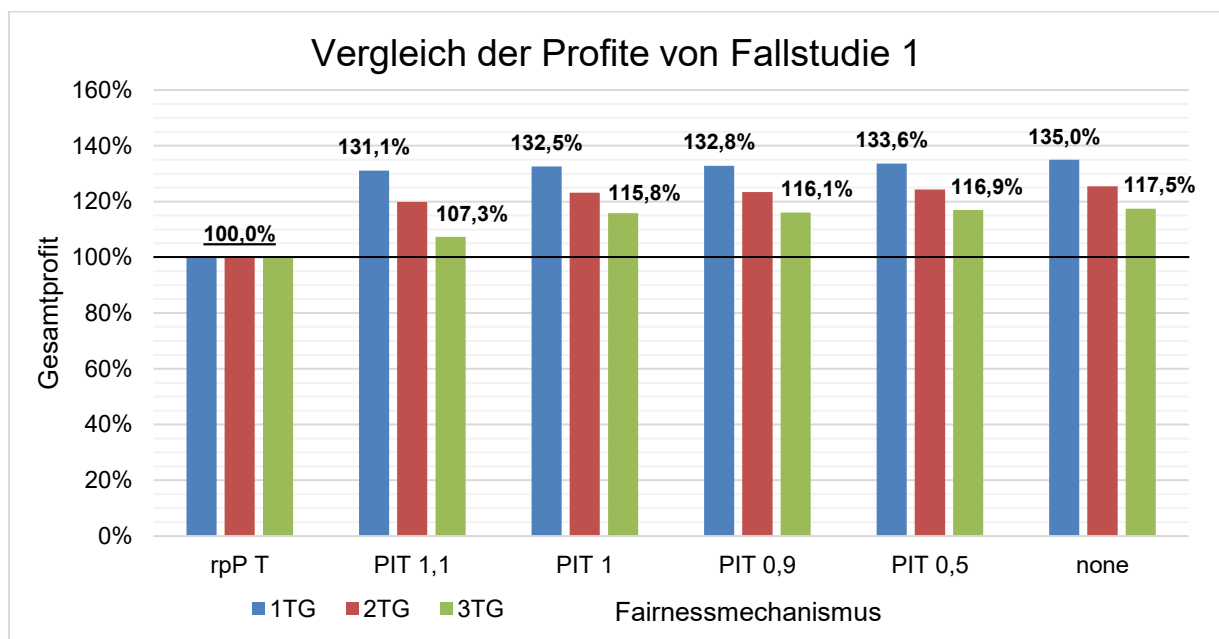


Abbildung 28: Vergleich der Gesamtprofite mit Alpha-Faktor-Variation von Fallstudie 1

Bei einem Alpha-Faktor von 1,1 ist hervorzuheben, dass bei 2TG nur noch bei sieben von zehn Instanzen und bei 3TG nur noch bei drei von zehn Instanzen eine zulässige Lösung gefunden wird (vgl. Kapitel 8.3). In der Praxis bedeutet dies, dass bei den unzulässigen Lösungen keine Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen stattfinden würde. Aus diesem Grund wurden unzulässige Lösungen manuell mit 100 % bewertet, d. h. keine Profitsteigerung, da keine Kooperation erfolgt. Ohne diese manuelle Anpassung, d. h., wenn unzulässige Instanzen ignoriert werden würden, würde die durchschnittliche Gesamtprofitsteigerung bei 2TG (für die sieben von zehn Instanzen) bei 128 % bzw. bei 3TG (für die drei von zehn Instanzen) bei 124 % liegen. Eine garantierte individuelle Profitsteigerung für alle zehn Instanzen um 10 % ist somit nur bei einer großen Vertrauensgruppe (1TG) möglich.

Daraus folgt, dass in der Praxis nicht der Anspruch erhoben werden kann, dass mit Kooperation jedes Fuhrunternehmen mindestens 10 % Profitsteigerung erfährt, insbesondere nicht bei kleinen Vertrauensgruppen mit wenigen Fuhrunternehmen (2TG, 3TG). Die Abbildung 28 bestätigt zudem das Ergebnis der Abbildung 27: Je größer die Vertrauensgruppe, desto höher der durchschnittliche Gesamtprofit. Jedoch hat die Variation des Alpha-Faktors kaum Auswirkung auf die Gesamtprofitsteigerung.

8.3.3 Analyse der Profitverteilung

Für eine langfristig stabile Kooperation ist es wichtig, dass alle Fuhrunternehmen sich fair behandelt fühlen und zumindest subjektiv einen ähnlichen oder fairen Anteil an den Vorteilen der Kooperation, hier vor allem bezogen auf den Profit, erhalten (s. Kapitel 3). Die Abbildung 27 stellt den durchschnittlichen Gesamtprofit aller sieben Fuhrunternehmen dar. Die folgende Abbildung 29 stellt für die drei Vertrauensgruppeneinteilungen nach Fairnessmechanismen über alle zehn Instanzen dar, wie hoch die minimale, die maximale und die durchschnittliche individuelle Profitsteigerung der sieben Fuhrunternehmen ist. Hierfür wird jeweils das arithmetische Mittel über die zehn Instanzen gebildet. Die Ermittlung erfolgt jeweils für die individuell geringste, individuell stärkste und über die durchschnittliche Profitsteigerung aller sieben Fuhrunternehmen. Die Steigerung gilt im Vergleich zum Fall ohne Kooperation, also den $rpP D$ für PIDT und PIUDT sowie den $rpP T$ für alle anderen Fairnessmechanismen. In der Abbildung wird auf die Darstellung der Referenzwerte zu den PriorProfits verzichtet.

Es ist festzustellen, dass bei allen Profitincrease Fairnessmechanismen (PI*) auch die kleinste Profitsteigerung größer gleich null ist, die Fairnessmechanismen also ihren Zweck erfüllen. Die Fairnessmechanismen PIUDT und PIUT vergleichen die absoluten Steigerungen zwischen den Fuhrunternehmen. Die relativen Steigerungen sind selbstverständlich unterschiedlich und werden in der Abbildung dargestellt. Der Abstand zwischen der maximalen und der minimalen Profitsteigerung ist bei PIUDT und PIUT in Prozentpunkten am geringsten. Dies ist in der gleichmäßigen Verteilung der Profitsteigerung über alle Fuhrunternehmen begründet. Im Gegensatz dazu wird bei PIDT und PIT die Profitsteigerung zwischen den Fuhrunternehmen nicht ausgeglichen verteilt. Daraus resultiert, dass einige Unternehmen sehr stark von der Kooperation profitieren, sodass z. B. bei einer Vertrauensgruppe (1TG) eine maximale individuelle Profitsteigerung über alle zehn Instanzen von 324 % möglich ist. Allerdings profitieren andere Fuhrunternehmen weniger. So erreichen bei allen Vertrauensgruppeneinteilungen einige Fuhrunternehmen im Durchschnitt über alle Instanzen lediglich bis zu 1 % mehr Profit als ohne Kooperation. Für die Fairnessmechanismen PIUDT und PIUT fällt bei 2TG und insbesondere bei 3TG die individuelle durchschnittliche Profitsteigerung geringer aus als bei PIDT und PIT. Dies liegt daran, dass durch die erzwungene gleichmäßige Verteilung der absoluten Profitsteigerung der Lösungsraum sehr stark eingeschränkt ist, und zwar bei wenig Kooperationsmöglichkeiten durch mehrere kleine Vertrauensgruppen.

Bei Aktivierung der Fairnessmechanismen ONET, OCT oder OMD, sowie bei keiner Aktivierung (none), ist der Profit nicht fair verteilt. Durch den Fairnessmechanismus ONET soll jedes Fuhrunternehmen genauso viele Kundenaufträge wie vor der Kooperation ausführen.

Bei OCT 0,5 soll jedes Fuhrunternehmen mindestens 50 % der Anzahl seiner eigenen Kundenaufträge über die Woche ausführen. Bei OMD 0,5 soll jedes Fuhrunternehmen pro Tag mindestens 50 % der Auftragsmenge ohne Kooperation durchführen, wobei es sich dabei nicht um eigene Kundenaufträge handeln muss. Alle drei Fairnessmechanismen sind folglich kundenauftragsorientiert und nicht profitorientiert. Bei diesen Fairnessmechanismen tritt rechnerisch sogar der Fall ein, dass ein Fuhrunternehmen mehr als den ursprünglichen Profit verliert, also das Unternehmen einen Verlust erwirtschaftet, obwohl es Kundenaufträge ausführt. Grundsätzlich ist ein negativer Profit bis 1.000 € pro Tag möglich (vgl. Kapitel 7.2.5.6), da auch in der Realität aufgrund des hohen Kostendruckes nicht an allen Tagen kostendeckend gewirtschaftet werden kann (vgl. Kapitel 5.3.3).

Auch wenn kein Fairnessmechanismus aktiviert ist (none), gibt es Fuhrunternehmen, die durch die Kooperation einen deutlichen Verlust erwirtschaften, u. a. aufgrund von hohen Kompensationskosten, die sie wegen der Übernahme und Ausführung von Kundenaufträgen zu zahlen haben. So kann der individuelle Fall eintreten, dass der Verlust über die gesamte Woche um ein Vielfaches größer ist als der Profit ohne Kooperation. Dies ist z. B. bei einer Vertrauensgruppe (1TG) der Fall, bei der im schlechtesten Fall eine Profitreduzierung um durchschnittlich 463 % eintritt, der Verlust also mehr als 3,5-mal so groß ist, wie der Profit ohne Kooperation. Dies tritt insbesondere dann ein, wenn der absolute Profit eines Fuhrunternehmens schon vor Kooperation im Vergleich zu den anderen Fuhrunternehmen eher gering war oder das Fuhrunternehmen vergleichsweise geringe Erlössätze (inkl. geringem VHF) mit vergleichsweise hohen Kostensätzen hat. Das bedeutet, das betroffene Fuhrunternehmen war bereits vor Kooperation im Vergleich zu anderen Fuhrunternehmen weniger wirtschaftlich tätig.

Die Abbildung 29 zeigt, dass bei PIT 1 in **Kombination** mit PIUT 0,5, ONET, OCT 0,5 oder OMD 0,5 der Abstand der Profitsteigerungen zwischen den Fuhrunternehmen geringer ist als bei der Anwendung von PIT allein. Dies liegt daran, dass zwei Fairnessmechanismen miteinander kombiniert werden und so im Hinblick auf die Fairness ein besseres Ergebnis erzielt wird. Dies gilt insbesondere, wenn Profit- und Kundenauftragsverteilung gleichzeitig Berücksichtigung finden.

Es ist bei einer Vertrauensgruppe (1TG) festzustellen, dass die Kombination aus PIT 1 mit PIUT 0,5 zu einer höheren durchschnittlichen Profitsteigerung je Fuhrunternehmen (65 %) führt, als dies bei PIT 1 (62 %) der Fall ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Verknüpfung mit PIUT die absolute Profitsteigerung jedes Fuhrunternehmens mindestens 50 % der durchschnittlichen Profitsteigerung entsprechen muss. Hierdurch müssen Fuhrunternehmen mit sehr geringem Profit, relativ gesehen, eine besonders große Profitsteigerung erhalten. Dies spiegelt sich im höheren Durchschnittswert von 65 % wider.

Beim Vergleich der durchschnittlichen individuellen Profitsteigerung über die Vertrauensgruppenaufteilung schneidet bei allen Fairnessmechanismen und Kombinationen die 1TG am besten ab, d. h., der durchschnittliche Wert ist am höchsten (blaue Säulen). Dies zeigt: Je größer die Vertrauensgruppe, desto höher die durchschnittliche Profitsteigerung. Allerdings gibt es eine Ausnahme: Bei 2TG liegt die durchschnittliche Profitsteigerung für den

Mechanismus OCT 0,5 mit 67 % höher als bei 1TG mit 56 %. Dies liegt daran, dass u.a. in der Instanz c bei 2TG Fuhrunternehmen mit einem geringen rpP_T deutliche individuelle Profitsteigerungen bei OCT 0,5 erzielen. Diese individuellen Profitsteigerungen werden bei 1TG nicht erzielt, da dort diese Fuhrunternehmen mehr eigene Kundenaufträge ausführen und weniger Kompensationszahlungen erhalten.

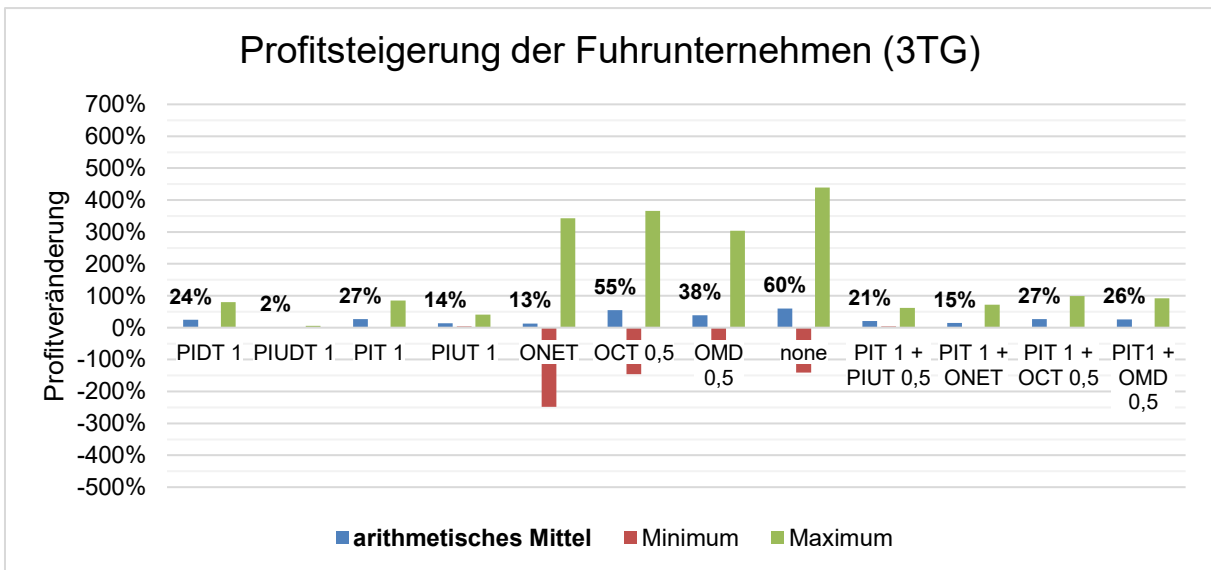
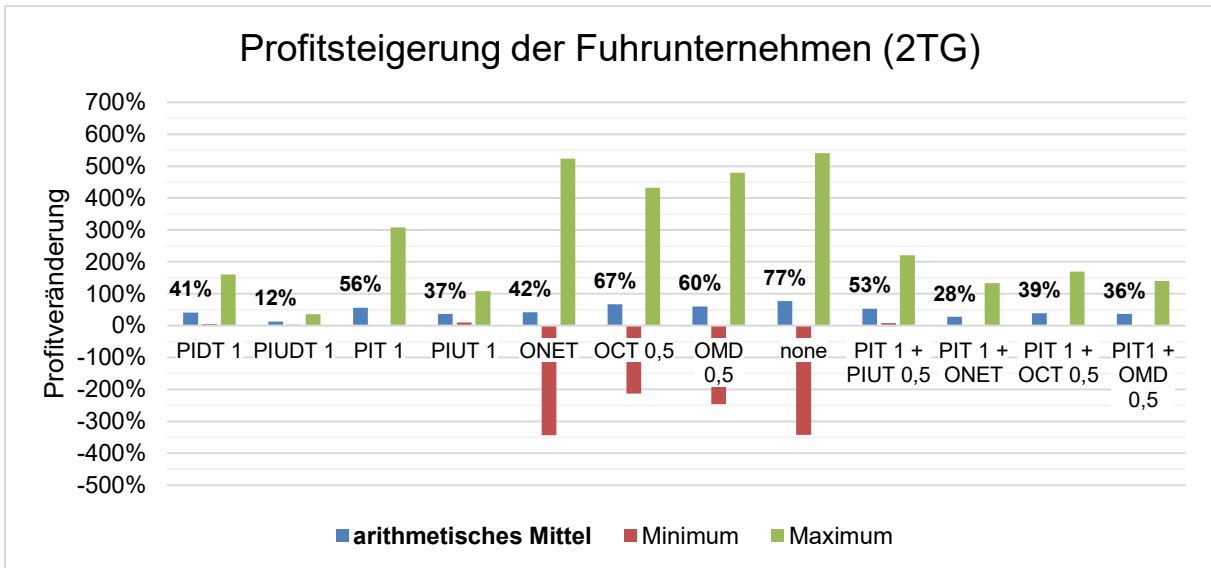
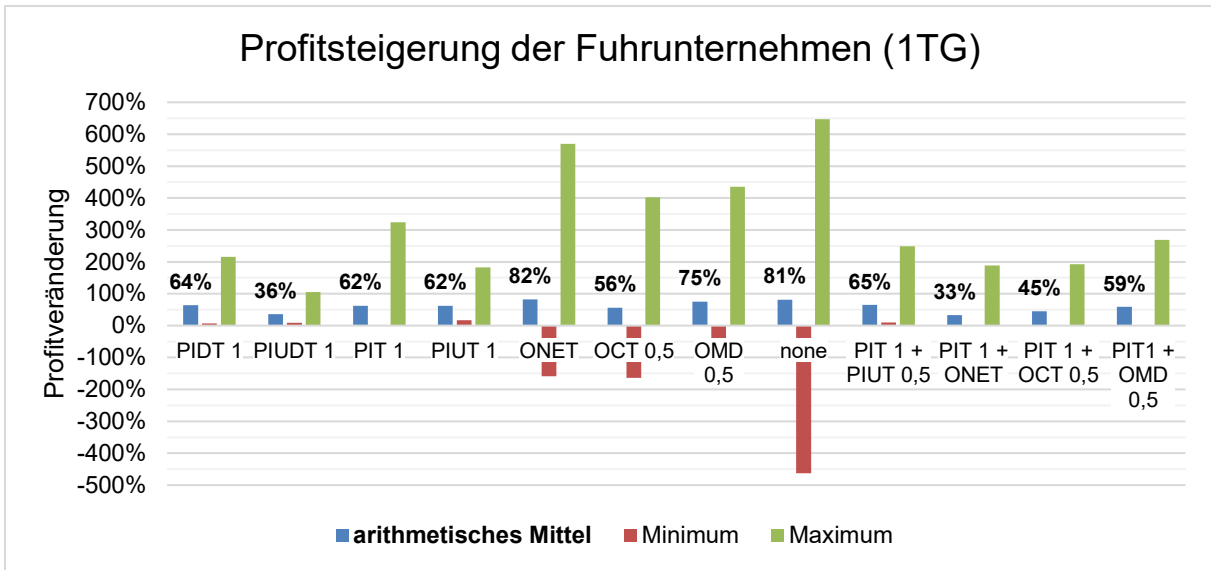


Abbildung 29: Profitsteigerungsvergleich für Vertrauensgruppen und Fairnessmechanismen von Fallstudie 1

8.3.4 Parametervariation des Verhandlungsfaktors

Die für Fallstudie 1 bestehenden zehn Instanzen (vgl. Tabelle 8) teilen sich auf in je fünf Instanzen mit niedrigem VHF-Bereich (1 bis 1,3) und fünf Instanzen mit hohem VHF-Bereich (1,3 bis 1,6). Die Höhe des VHF gibt Auskunft über die Höhe der Erlöse der Fuhrunternehmen: Je höher der VHF, desto höher die Erlöse des Fuhrunternehmens. Um die Auswirkungen der Variation des Verhandlungsfaktors zu analysieren, wird der absolute Profit und die Profitsteigerung nach niedrigem VHF und hohem VHF differenziert (vgl. Abbildung 30). In der Abbildung sind die Steigerungen von 1TG mit PIT 1 und none beispielhaft beschriftet und angegeben.

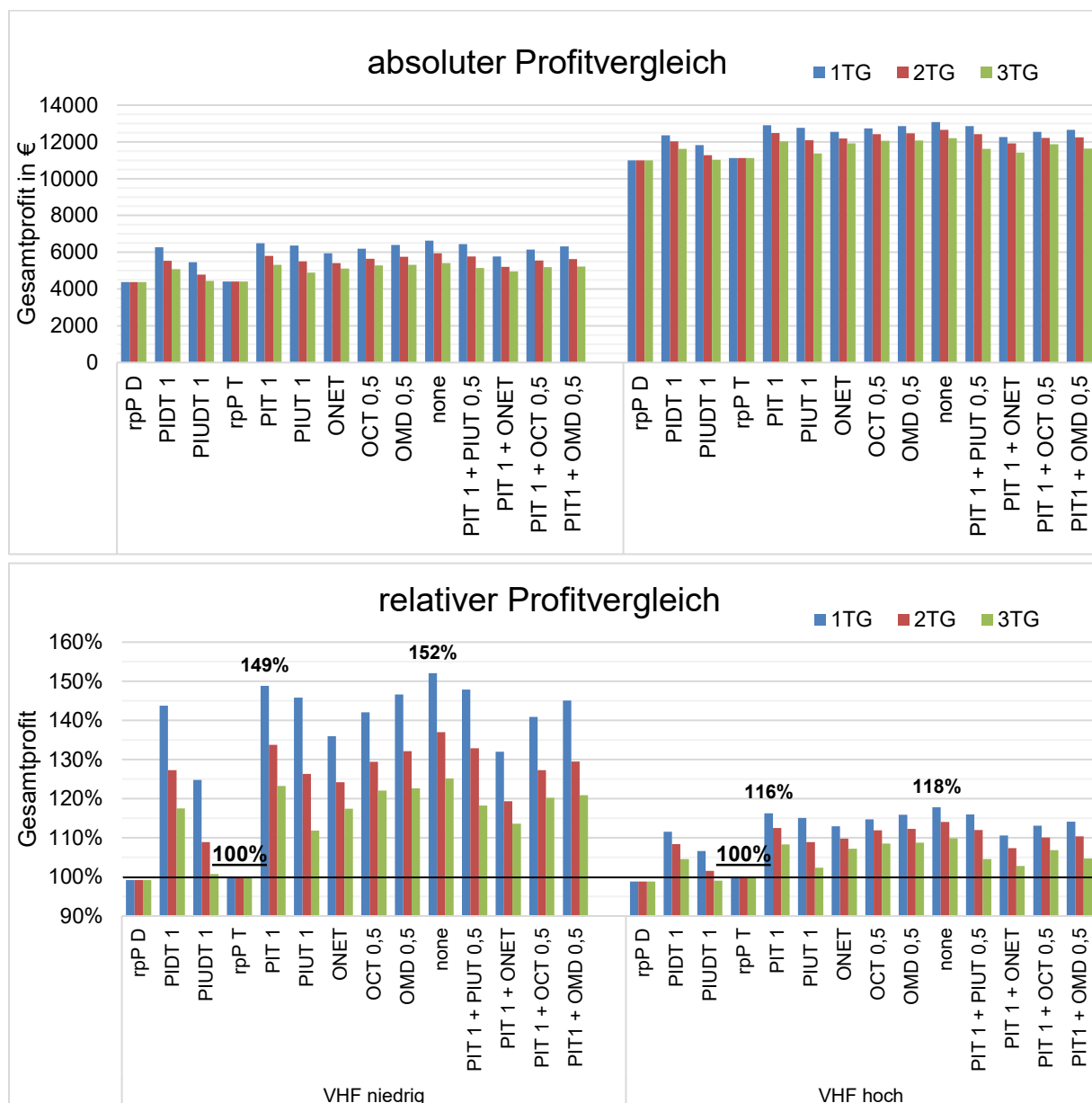


Abbildung 30: Auswirkung des Verhandlungsfaktors (VHF) auf den Gesamtprofit

Die Abbildung 30 zeigt, dass bei einem niedrigen VHF der Profit absolut, sowohl in den PriorProfit Fällen als auch in den Kooperationsfällen, wie erwartet, deutlich niedriger ist als bei einem hohen VHF. Bei Betrachtung der Profitsteigerung lässt sich erkennen, dass bei

niedrigem VHF die relative Profitsteigerung höher ist als bei einem hohen VHF. Dies betrifft unterschiedliche Vertrauensgruppeneinteilungen und Fairnessmechanismen gleichermaßen und liegt daran, dass bei niedrigem VHF absolute Profitsteigerungen relativ bzw. im Verhältnis stärker ins Gewicht fallen.

Es zeigt sich deutlich, dass der VHF einen sehr großen Einfluss auf die Profitsteigerung hat. Es werden in der Fallstudie 1 niedrige und hohe VHF genutzt, um eine Gegenüberstellung der künstlich erstellten Instanzen zu ermöglichen. In der Praxis ist der Mechanismus des VHF bei den Fuhrunternehmen in der Kosten- und Erlöskalkulation enthalten. Der niedrige VHF-Bereich wird im Rahmen von Gesprächen mit Experten als realistischer eingeschätzt. Daher wird in den Instanzen der Fallstudie 2 ausschließlich der niedrige VHF-Bereich verwendet. Unabhängig von dem gewählten Verhandlungsfaktor lassen sich sowohl die Verteilung der Kundenaufträge als auch die Auswirkungen auf die Fahrtentypen gesondert im Folgenden analysieren.

8.3.5 Analyse der Kundenauftragsverteilung

Die Auswirkungen der Kooperation auf die Weitergabe und Verteilung von Kundenaufträgen auf die Fuhrunternehmen lassen sich mithilfe von Sankey-Diagrammen anschaulich darstellen und analysieren.

Hier werden beispielhaft die Ergebnisse der Instanz c analysiert (Daten s. Anhang 12.2). Dabei wird die Kundenauftragsverteilung abhängig von der Vertrauensgruppeneinteilung und den Fairnessmechanismen PIT 1, PIT 1 mit PIUT 0,5, PIT 1 mit ONET, PIT 1 mit OCT 0,5 sowie PIT 1 mit OMD 0,5 analysiert. Diese Fairnessmechanismen werden für eine detaillierte Darstellung ausgewählt, da sie im Hinblick auf die Profitverteilung gute Ergebnisse erzielen (vgl. Kapitel 8.3.3). Der Gesamterlös aller 100 Kundenaufträge bleibt unabhängig von der Aufteilung auf die sieben Fuhrunternehmen (Carrier 1 bis Carrier 7) konstant. Es ändert sich jedoch die Aufteilung der Kundenaufträge und damit die Aufteilung der Erlöse. Die Verteilung ist davon abhängig, bei welchem Fuhrunternehmen der Kundenauftrag am kostengünstigsten, ggf. durch die Nutzung einer Kombinationsfahrt, durchgeführt werden kann. Die Breite der Linien repräsentiert dabei den Erlös der zugrundeliegenden Kundenaufträge: Je breiter die Linie, desto mehr Erlös bringt der Kundenauftrag (abhängig von der Fahrdistanz und dem Kundenwert, vgl. Kapitel 8.1.1.2). Die Breite der Balken je Fuhrunternehmen entspricht der Summe der Linien und stellt den Gesamterlös je Fuhrunternehmen dar. Dabei wird jedem Fuhrunternehmen eine Farbe zugeordnet (Fuhrunternehmen 1 „Car1“ orange, wie in Abbildung 26). Je intensiver die jeweilige Farbe in den Linien, desto höher ist der Kundenwert des jeweiligen Auftrages und damit der Erlös je km und damit auch die Kompensationszahlung.

Die folgende Abbildung 31 zeigt den Austausch von Kundenaufträgen bei einer Vertrauensgruppe (1TG) mit dem angewandten Fairnessmechanismus **PIT 1**. Auf der linken Seite sind die sieben Fuhrunternehmen mit ihren Kundenaufträgen ohne Kooperation dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Verteilung der Kundenaufträge mit Kooperation abgebildet. Es ist an der Länge der Balken erkennbar, dass die Fuhrunternehmen 4 und 6 mit Kooperation mehr Kundenaufträge ausführen als ohne Kooperation. Diese beiden

Fuhrunternehmen haben gemäß des Datensatzes der Instanz die geringsten Kostensätze je km. Im Gegensatz dazu endet die Kooperation für das Fuhrunternehmen 1 mit lediglich einem Kundenauftrag, der einen geringen Erlös hat. Fuhrunternehmen 1 hat den höchsten Kostensatz je km und je Stunde, sodass die zentrale Optimierung mit dem Ziel der Profitsteigerung es vermeidet, Kundenaufträge durch Fuhrunternehmen 1 ausführen zu lassen. Neben den Kostensätzen können auch der Hinterlandstandort, das Zeitfenster und der Typ (Export oder Import) des jeweiligen Kundenauftrages sowie die verfügbaren Kapazitäten beim Fuhrunternehmen entscheidend sein für die Wahl des ausführenden Fuhrunternehmens. Fuhrunternehmen 1 erhält für die Abgabe seiner Kundenaufträge entsprechend viele Kompensationszahlungen von Fuhrunternehmen, die diese Kundenaufträge kostengünstiger ausführen. Dies führt zu einem höheren Profit für Fuhrunternehmen 1. Allerdings ist der Profit, der auch die erhaltenen Kompensationszahlungen berücksichtigt, nicht im Sankey-Diagramm ablesbar. Dennoch wird deutlich, dass eine langfristige Kooperation für Fuhrunternehmen 1 nicht wirtschaftlich ist, da es keinen Kundenkontakt mehr hat und, von einem Kundenauftrag abgesehen, die eigene LKW-Flotte und die eigenen Fahrer ungenutzt bleiben. Diese Schlussfolgerung gilt in abgeschwächter Form auch für die Fuhrunternehmen 5 und 7.

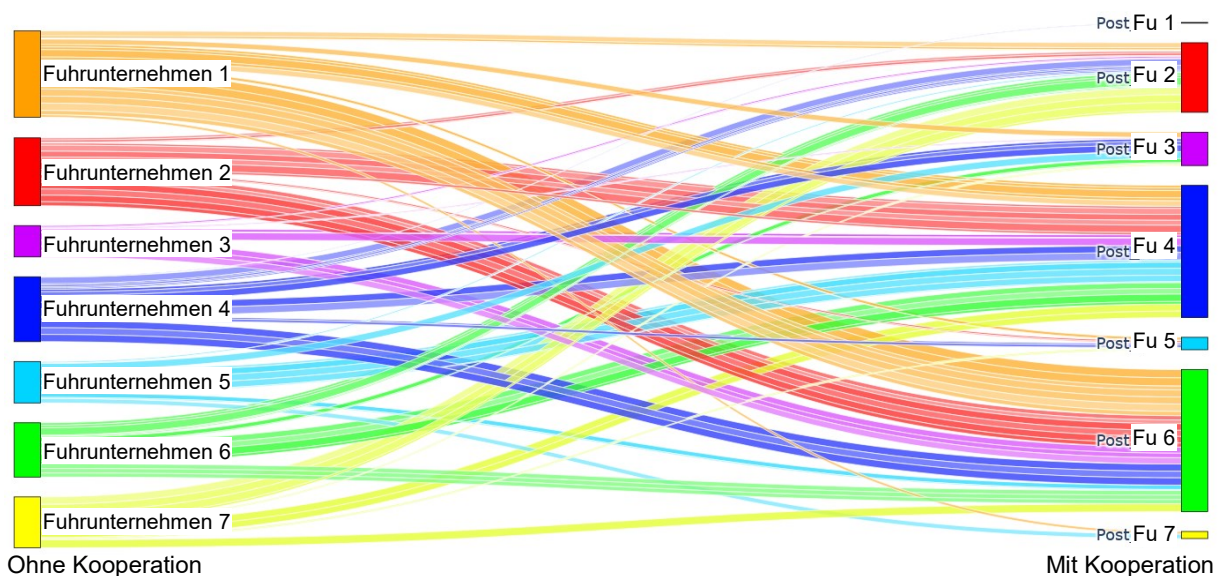


Abbildung 31: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1 1TG

Die Anwendung der Vertrauensgruppenaufteilung 2TG und 3TG sorgt dafür, dass nur noch innerhalb dieser Vertrauensgruppen kooperiert wird (vgl. Abbildung 32). Zur besseren Lesbarkeit sind die Vertrauensgruppen durch schwarze horizontale Linien getrennt. Jedoch bleibt die o. g. Problematik bezüglich langfristiger Kooperation in abgeschwächter Form für Fuhrunternehmen 1 bestehen. Dies gilt auch für die Fuhrunternehmen 5 und 7 und in der Vertrauensgruppenaufteilung 3TG insbesondere für Fuhrunternehmen 3.

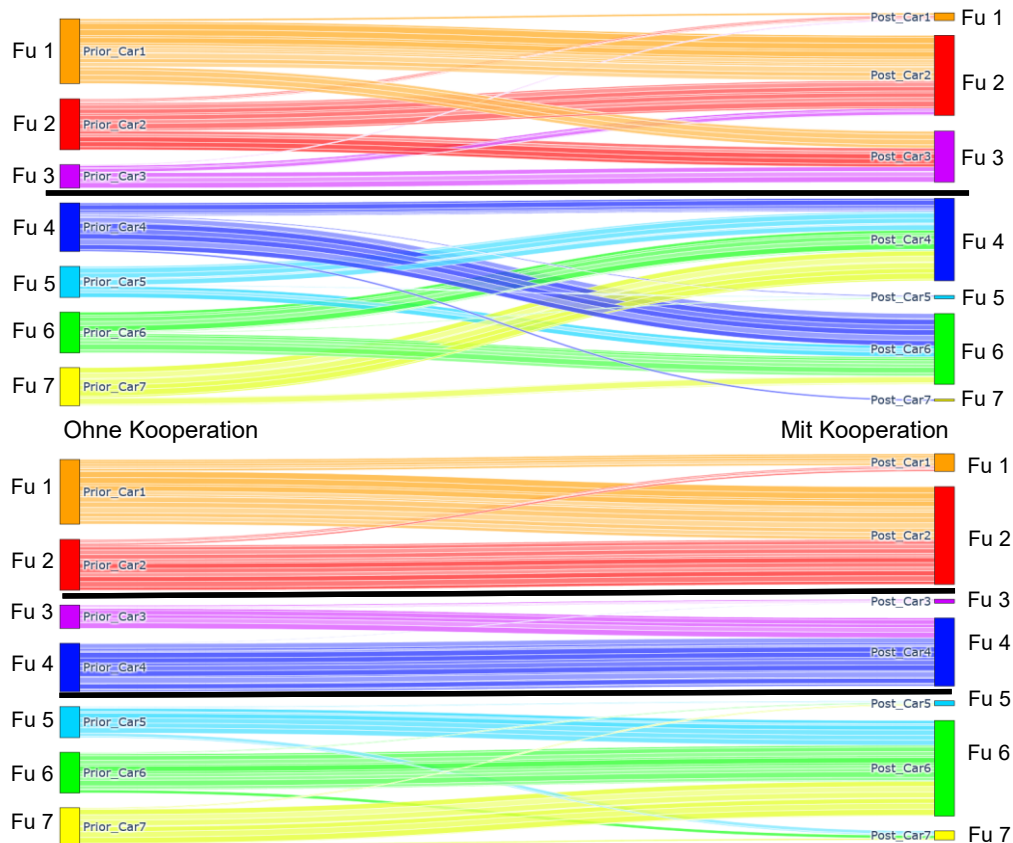


Abbildung 32: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1 2TG (oben) und 3TG (unten)

Eine mögliche Fairnessmechanismus-Kombination ist **PIT 1 mit PIUT 0,5**, bei der zusätzlich zur garantierten individuellen Profitsteigerung auch die absolute individuelle Profitsteigerung mindestens 50 % der durchschnittlichen absoluten Profitsteigerung aller Fuhrunternehmen betragen muss. Hier zeigt sich allerdings, dass Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 wenige und wenig erlösbringende Kundenaufträge erhalten bzw. durchführen (vgl. Abbildung 33). So wird der Profit zwar gesteigert und die absolute Profitsteigerung entspricht mindestens 50 % der durchschnittlichen absoluten Profitsteigerung, allerdings ist die geringe Anzahl an Kundenaufträgen für die Fuhrunternehmen unattraktiv.

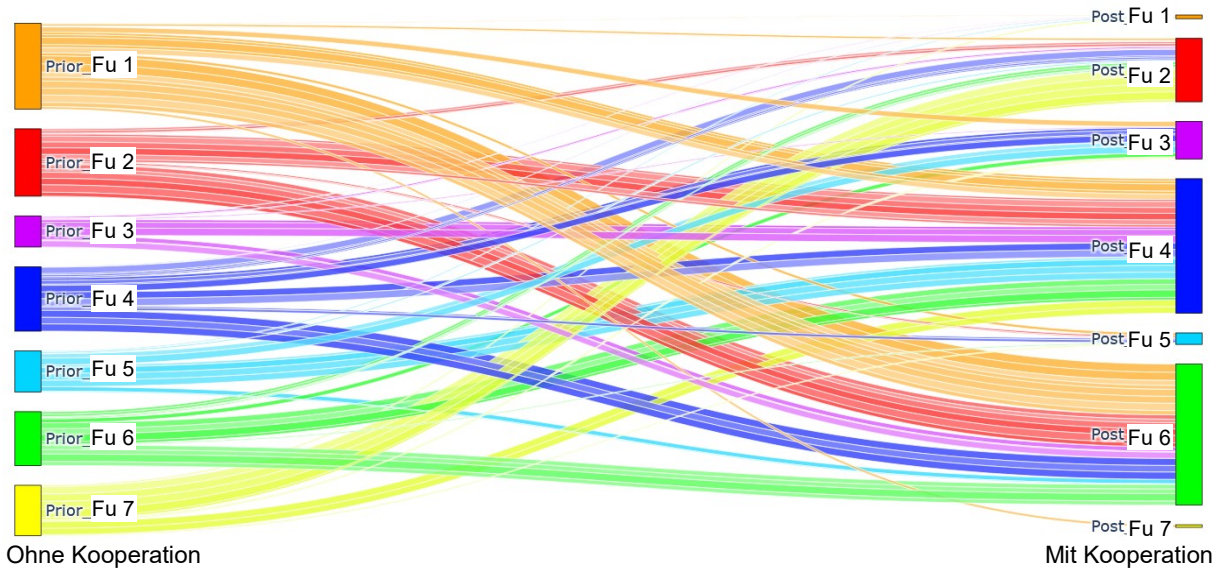


Abbildung 33: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+PIUT 0,5 1TG

Auch in der Vertrauensgruppenaufteilung 2TG erhalten Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 nur wenige und wenig erlösbringende Kundenaufträge. Lediglich bei 3TG erhalten Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 deutlich mehr Kundenaufträge (vgl. Abbildung 34). Allerdings werden bei 3TG in der zweiten Vertrauensgruppe nur noch wenige Kundenaufträge von Fuhrunternehmen 3 und fast alle von Fuhrunternehmen 4 ausgeführt.

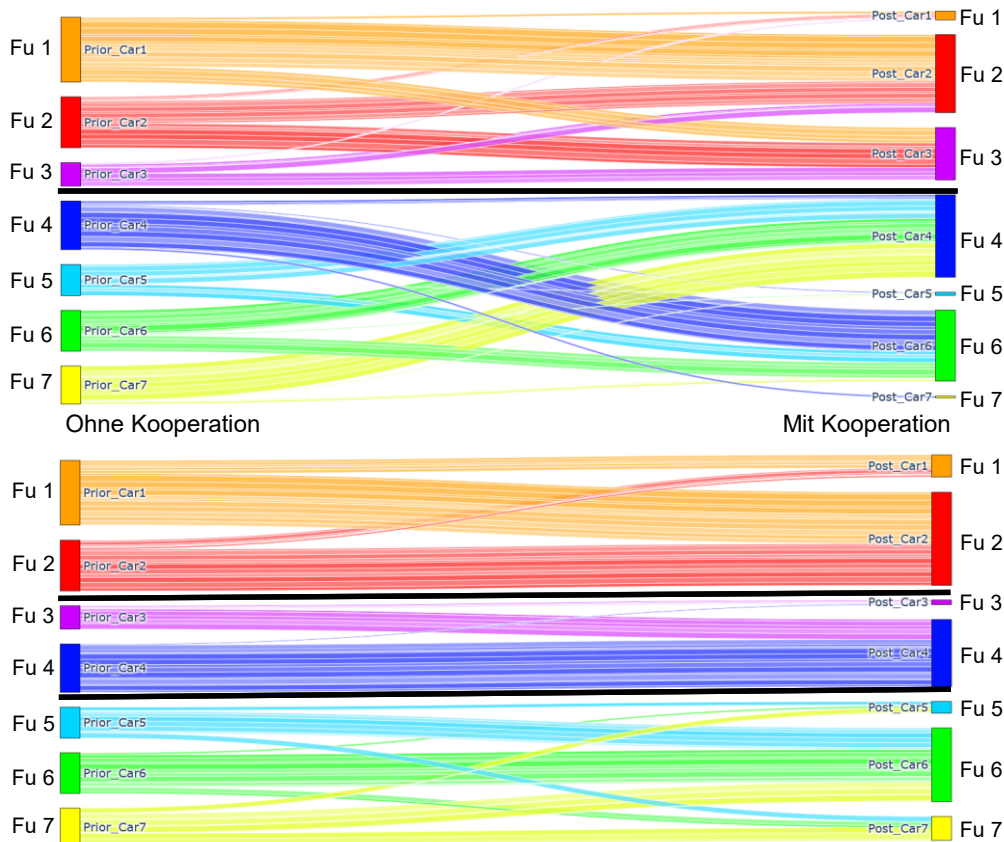


Abbildung 34: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+PIUT 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten)

Die o. g. Auswirkungen sind nicht zielführend, da die wirtschaftlich schwächeren Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 an einer solchen Kooperation nicht langfristig teilnehmen würden,

und zwar unabhängig von der Vertrauensgruppenaufteilung. Folglich gewinnt der angewandte Fairnessmechanismus an Bedeutung. Hier kann es sinnvoll sein, PIT mit den auftragsorientierten Fairnessmechanismen ONET, OCT und OMD zu kombinieren. Die folgende Abbildung 35 zeigt für 1TG das Ergebnis der Kombination **PIT 1 mit ONET**. Anhand dieses Sankey-Diagramms lässt sich feststellen, dass in dieser Konstellation die Verteilung der Kundenaufträge unter Kooperation gleichmäßiger auf die Fuhrunternehmen erfolgt als in Abbildung 31 und die o. g. Problematik für Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 deutlich abgemildert wird. Durch den Mechanismus ONET führen die Fuhrunternehmen nun genauso viele Kundenaufträge aus wie ohne Kooperation, allerdings teilweise mit geringeren Erlösen. Dies lässt sich anhand des halbierten Erlöses von Fuhrunternehmen 1 (orange Balken an den Seiten) erkennen. Es wird auch deutlich, dass Fuhrunternehmen 7 in dieser Lösung keine eigenen Kundenaufträge mehr fährt, sondern Kundenaufträge von anderen Fuhrunternehmen erhält.

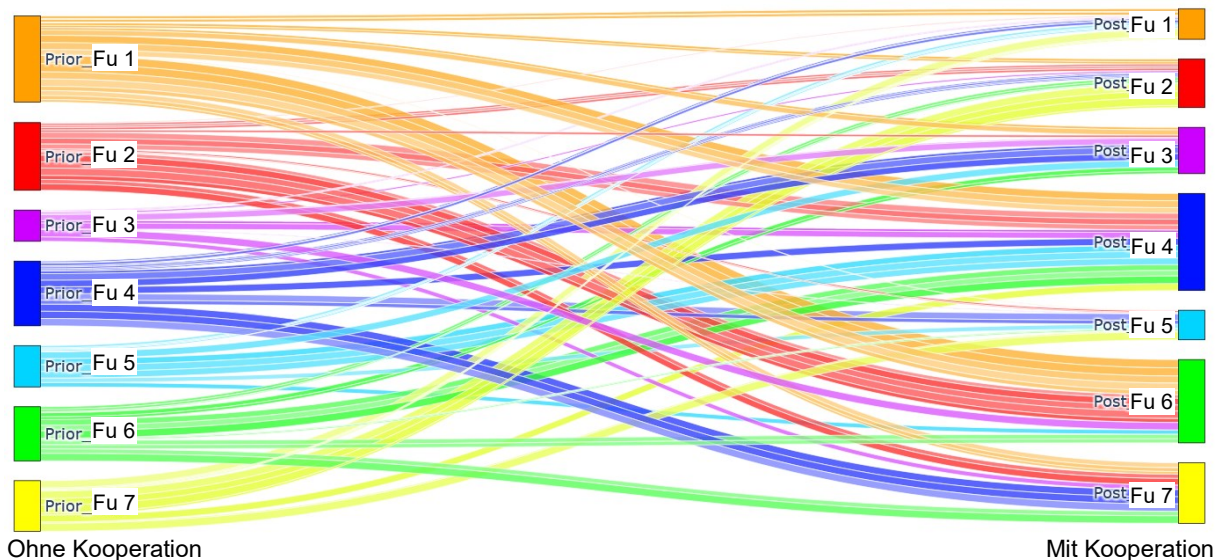


Abbildung 35: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+ONET 1TG

Auch für die Vertrauensgruppenaufteilung 2TG und 3TG treten für die Kombination der Mechanismen PIT und ONET dieselben Effekte bzgl. der Abschwächung der Problematik für Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 auf (vgl. Abbildung 36). Die drei Sankey-Diagramme zeigen, dass jede Vertrauensgruppenaufteilung hinsichtlich der Erlöse für einige Fuhrunternehmen günstiger und für andere Fuhrunternehmen ungünstiger ist. So ist z. B. für Fuhrunternehmen 3 (violett) die Aufteilung 2TG mit höheren Erlösen verbunden als bei 1TG oder 3TG. Die Erlöse, die Fuhrunternehmen 3 in 2TG erhält, fehlen entsprechend bei anderen Fuhrunternehmen.

In der Praxis sind die sich daraus theoretisch ergebenden individuellen Präferenzen der Fuhrunternehmen für eine bestimmte Vertrauensgruppenaufteilung zu vernachlässigen. Das liegt daran, dass zunächst die strategische Entscheidung des Fuhrunternehmens zu treffen ist, welchen anderen Fuhrunternehmen vertraut werden kann und wie die damit verbundene Bereitschaft, Kundenaufträge auszutauschen, umgesetzt wird. Diese strategische Entscheidung steht über und zeitlich vor dem tatsächlichen operativen Tagesgeschäft der Fuhrunternehmen, also der Ausführung von Kundenaufträgen.

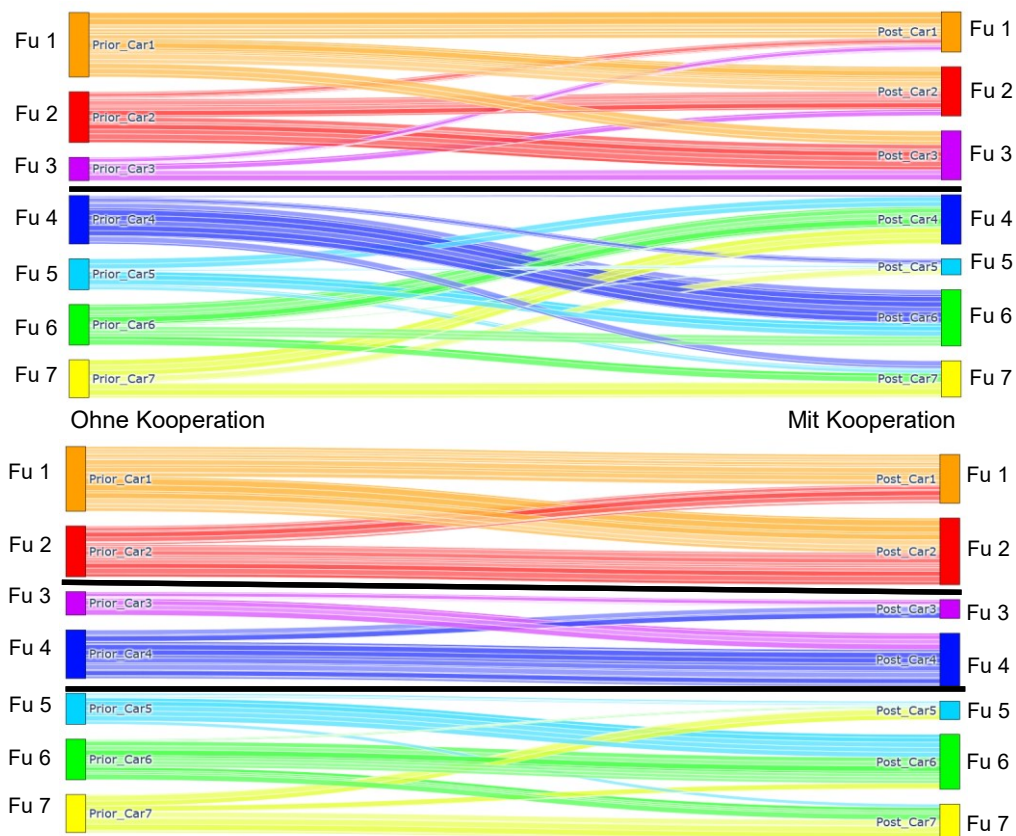


Abbildung 36: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+ONET 2TG (oben) und 3TG (unten)

Bei der o. g. Kombination von PIT 1 mit ONET mit 1TG (vgl. Abbildung 35) besteht bei Fuhrunternehmen 7 der Fall, dass es keine eigenen Kundenaufträge mehr fährt, sondern Kundenaufträge von anderen Fuhrunternehmen erhält. Dies ist mit einem hohen organisatorischen Aufwand verbunden. Es kann sinnvoll und von Fuhrunternehmen gewünscht sein, einen Teil der eigenen Kundenaufträge zu behalten, um diese selbst und unabhängig von der Kooperation auszuführen. Diese Thematik berücksichtigt der Fairnessmechanismus OCT, der ebenfalls mit PIT 1 kombiniert wird. Im konkreten Fall ist der Alpha-Faktor von OCT 0,5, sodass mindestens 50 % der eigenen Kundenaufträge ausgeführt werden.

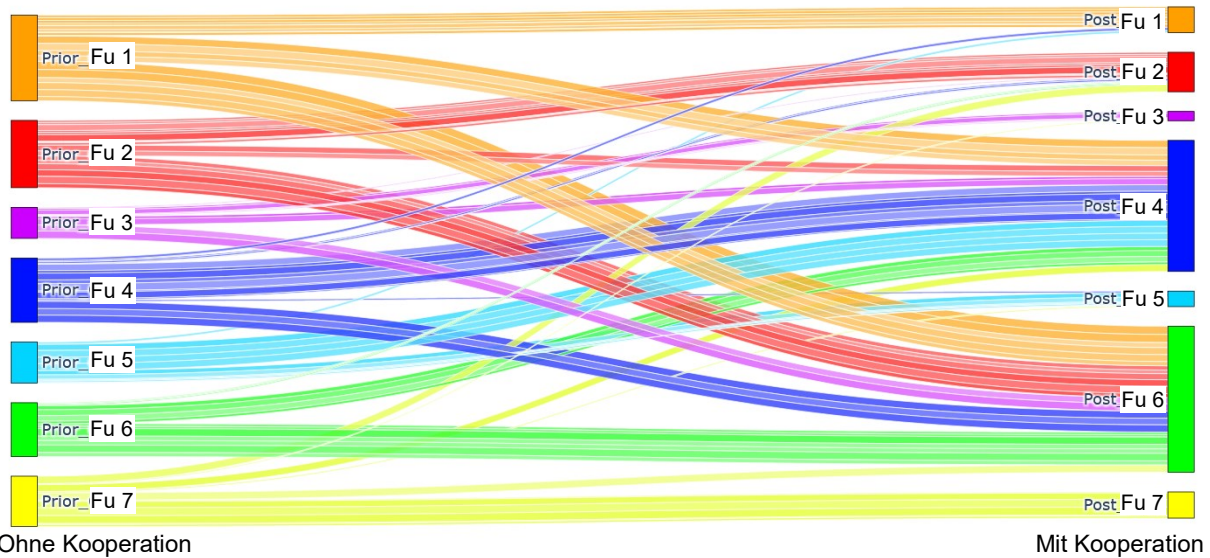


Abbildung 37: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OCT 0,5 1TG

Abbildung 37 zeigt das Ergebnis der Kombination **PIT 1 und OCT 0,5**. Es ist festzustellen, dass nun Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 durch die Vorgabe, eigene Kundenaufträge ausführen zu müssen, mehr Erlöse generieren können als bei der ausschließlichen Anwendung des Fairnessmechanismus PIT 1 (Abbildung 31). Gleiches gilt für die Vertrauensgruppenaufteilungen 2TG und 3TG (vgl. Abbildung 38).

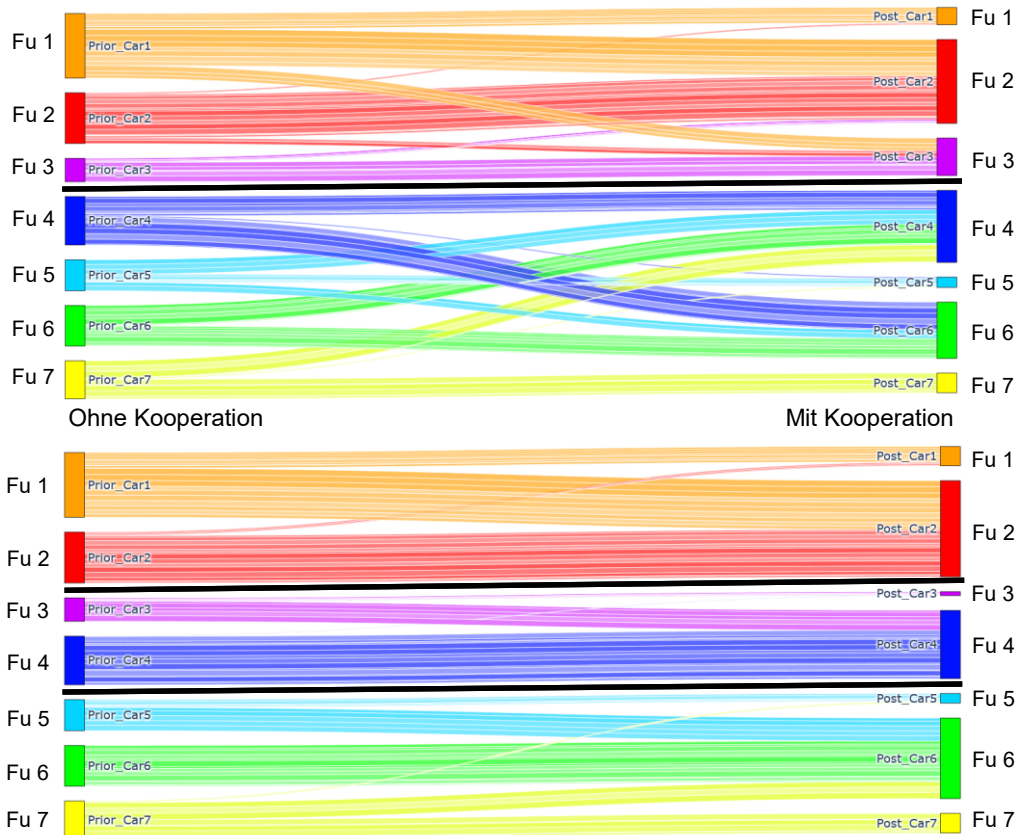


Abbildung 38: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OCT 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten)

Der Fairnessmechanismus PIT 1 kann auch mit OMD 0,5 kombiniert werden. Dies bedeutet, dass an allen Tagen jedes Fuhrunternehmen mindestens 50 % der Anzahl an

Kundenaufträgen, die es ohne Kooperation durchführen würde, ausführen muss. Dies gilt unabhängig davon, ob es sich um eigene oder fremde Kundenaufträge handelt. In der Praxis spielt nämlich die tägliche Nutzung der im Fuhrunternehmen vorhandenen Ressourcen (LKW und Mitarbeiter), die unabhängig von der Ausführung von Kundenaufträgen Fixkosten generieren, eine wichtige Rolle. Auch die gleichmäßige Auslastung der Ressourcen über eine Woche ist im wirtschaftlichen Interesse der Fuhrunternehmen. Die Abbildung 39 zeigt das Ergebnis der angewandten Fairnessmechanismen **PIT 1 und OMD 0,5** auf Wochenbasis. Es lässt sich feststellen, dass Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 zwar mehr Kundenaufträge ausführen und damit mehr Erlöse generieren als bei der Anwendung von PIT allein, allerdings sind es eher Kundenaufträge mit geringem Erlös. So scheint die Fairnessmechanismus-Kombination von PIT mit ONET oder PIT mit OCT 0,5 besser geeignet als PIT mit OMD 0,5 vor dem Hintergrund des Ziels einer langfristig fairen und stabilen Kooperation.

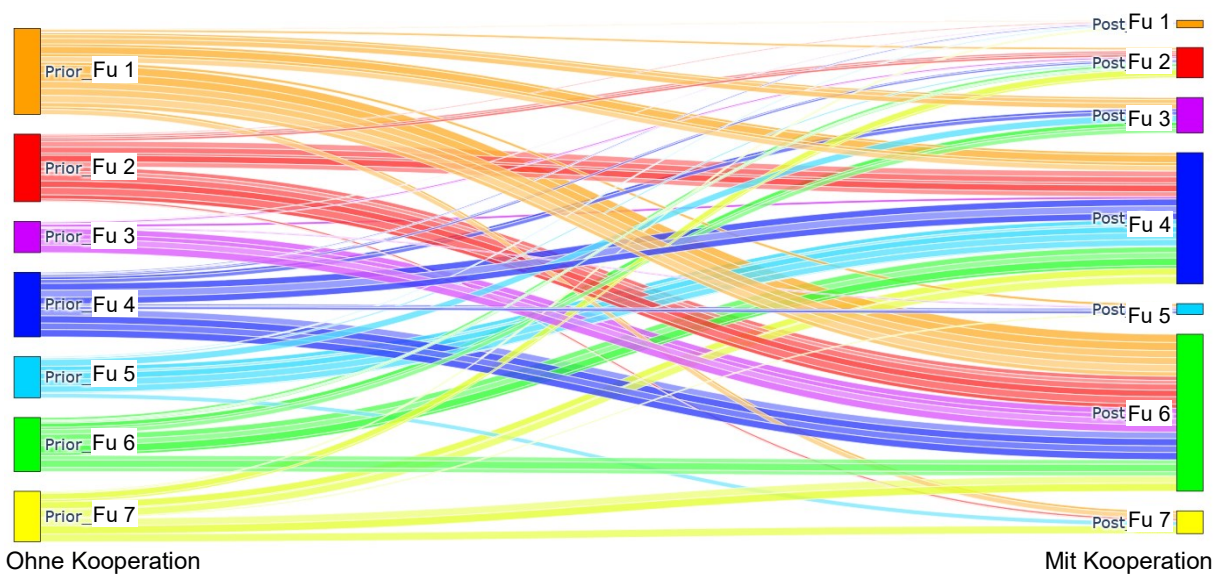


Abbildung 39: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OMD 0,5 1TG

Ein ähnliches Ergebnis lässt sich auch bei 2TG und 3TG für die Kombination PIT und OMD 0,5 feststellen (vgl. Abbildung 40). Auch hier erhalten die Fuhrunternehmen 1, 5 und 7 weniger Kundenaufträge mit Kooperation als bei der Kombination PIT mit OCT 0,5 bzw. PIT mit ONET. Ausschließlich bei 3TG ist zu erkennen, dass das Fuhrunternehmen 1 mehr erlösstarke Kundenaufträge durchführt als bei 2TG und 1TG, jedoch immer noch weniger Erlöse generiert als bei den Kombinationen PIT mit OCT 0,5 oder PIT mit ONET.

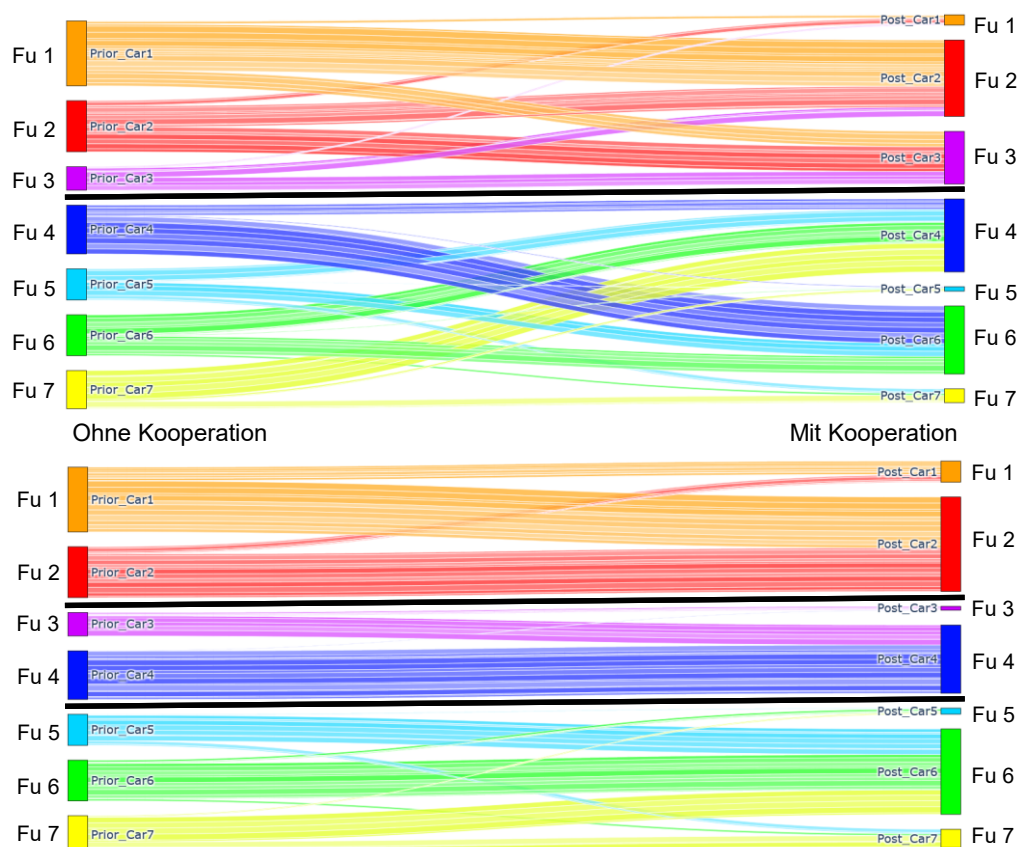


Abbildung 40: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 1 Instanz c PIT 1+OMD 0,5 2TG (oben) und 3TG (unten)

8.3.6 Analyse der Fahrtentypen

Durch die Kooperation und die Weitergabe von Kundenaufträgen ist insbesondere dann eine Profitsteigerung möglich, wenn zwei Kundenaufträge, die verschiedenen Fuhrunternehmen gehören, nicht mehr als Einfahrten, sondern als Kombinationsfahrt (mit oder ohne Containerdrehen) ausgeführt werden. Diese Ausführung kann entweder durch eines der beiden Fuhrunternehmen, denen einer der beiden Aufträge ursprünglich gehörte, oder durch ein drittes Fuhrunternehmen erfolgen. Containerdrehen ist möglich, wenn der Container des Importkundenauftrages vom selben Typ ist und derselben Allianz angehört wie der Container, der für den Exportkundenauftrag benötigt wird (vgl. Abbildung 16 in Kapitel 3.4 und Kapitel 8.1.1.2). Je größer die Anzahl an Kundenaufträgen, desto einfacher und häufiger können Kombinationsfahrten unter Berücksichtigung zeitlicher und geografischer Restriktionen erstellt werden.

Die folgende Abbildung 41 zeigt, dass in den Fällen ohne Kooperation (erste drei Säulen) nur wenige Kombinationsfahrten möglich sind, da diese nur unternehmensintern durchgeführt werden können. Jede Säule im Diagramm entspricht dem arithmetischen Mittel (Durchschnitt) der Ergebnisse der zehn Instanzen der Fallstudie 1. Grundsätzlich ist anhand der Abbildung – wie auch zu erwarten war – festzustellen, dass je größer die Vertrauensgruppe ist, desto mehr Kombinationsfahrten mit und ohne Containerdrehen (blauer und oranger Anteil) sind möglich. So werden bei 1TG im arithmetischen Mittel über alle Fairnessmechanismen 31

Kundenaufträge mit Kombinationsfahrten, davon 6 mit Containerdrehen, und bei 3TG nur noch 17 Kundenaufträge mit Kombinationsfahrten, davon 3 mit Containerdrehen, durchgeführt. Wenn kein Fairnessmechanismus angewandt wird (none), finden dennoch vergleichbar ebenso viele Kombinationsfahrten wie unter der Anwendung von Fairnessmechanismen statt. Die geringste Anzahl an Einzelfahrten, nämlich 67, erfolgt bei dem Fairnessmechanismus PIT 1 1TG.

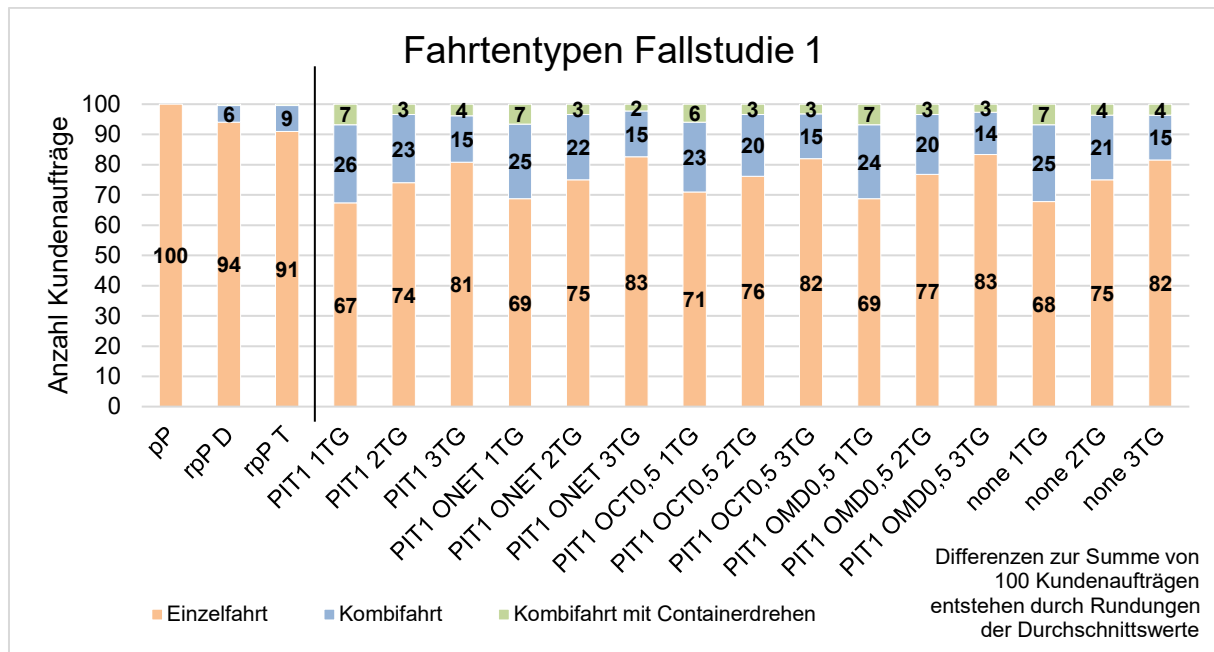


Abbildung 41: Fahrtentypen Fallstudie 1

Die Fahrtentypen beeinflussen die Anzahl und die Länge der Leer- und Leercontainerfahrten (vgl. Kapitel 3.4). Die folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Streckenlängen der Leer- und Leercontainerfahrten der Fuhrunternehmen. Dabei wurde das arithmetische Mittel der zehn Instanzen für die PriorProfits sowie das arithmetische Mittel der zehn Instanzen, differenziert nach Vertrauensgruppeneinteilungen für none, PIT 1 allein und in Kombination mit kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen gebildet. Abbildung 42 zeigt die prozentuale Streckenlängenveränderung, relativ bezogen auf den Fall rpP T (=100%). Abbildung 43 bildet die absoluten Streckenlängen sowie zum Vergleich die durchschnittliche Länge aller Vollcontainerfahrten (grün gestrichelt) ab. Die Vollcontainerfahrten entsprechen der Ausführung der erlösbringenden Kundenaufträge und bleiben daher unverändert. Leer- und Leercontainerfahrten erzeugen hingegen ausschließlich Kosten und sollten daher durch Kooperation möglichst reduziert bzw. vermieden werden (vgl. Kapitel 3.4).

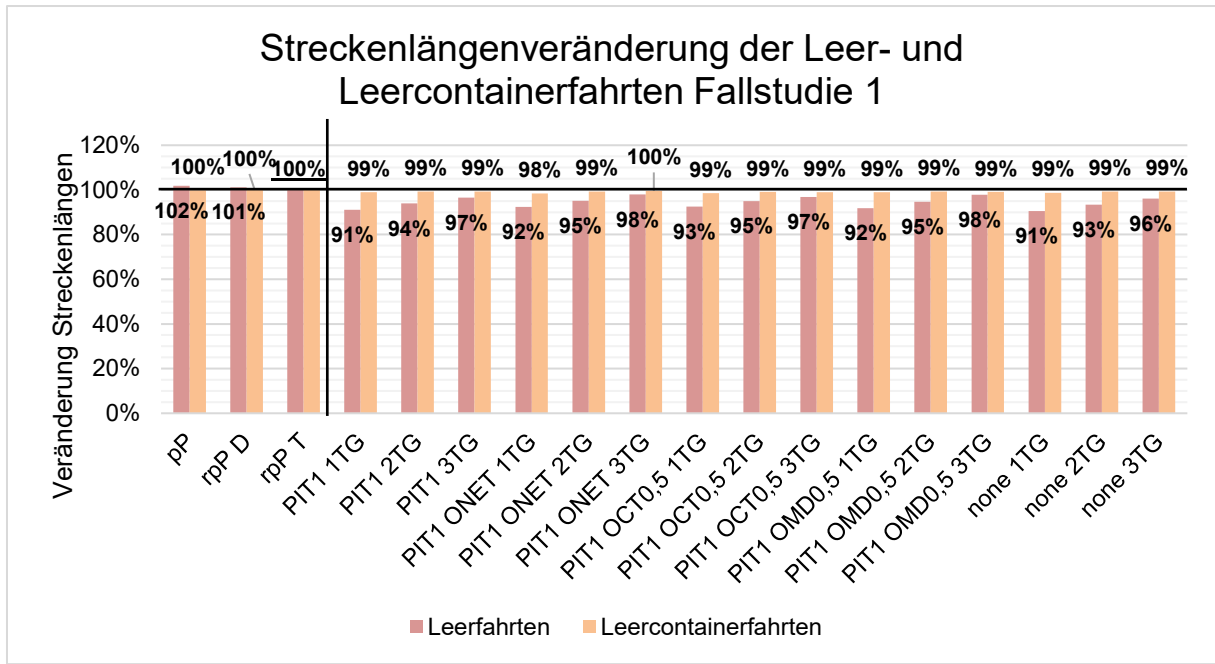


Abbildung 42: Streckenlängenveränderung der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 1

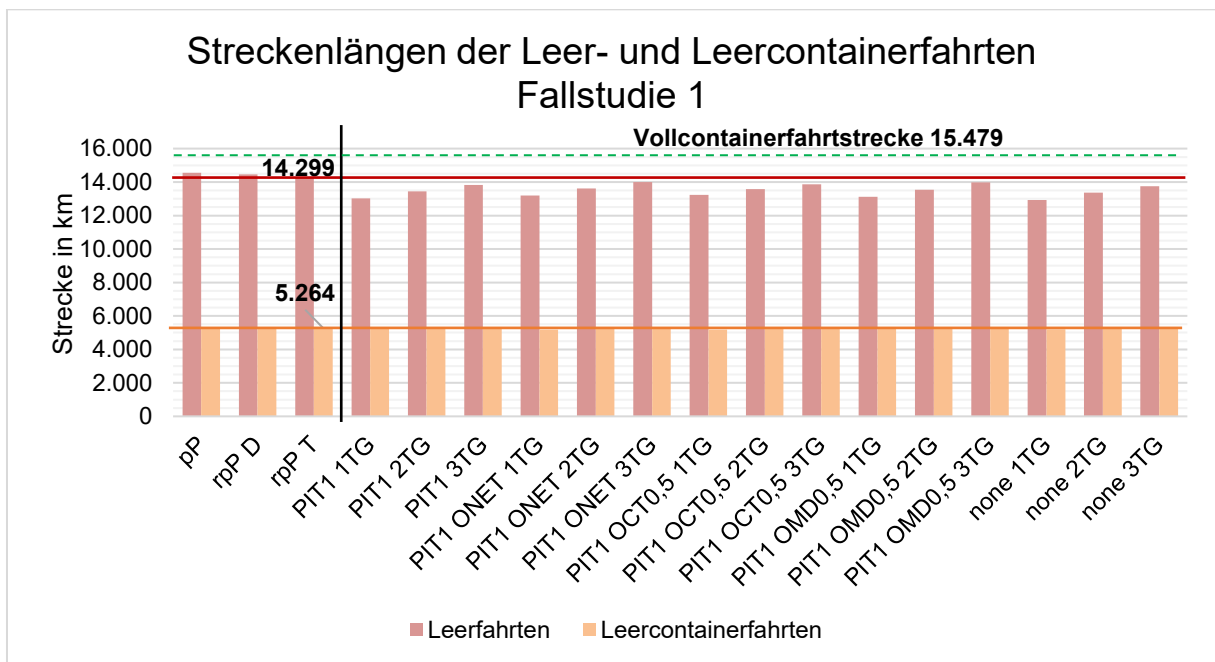


Abbildung 43: Streckenlängen der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 1

Es ist festzustellen, dass sich die Streckenlänge der Leercontainerfahrten durch Kooperation, unabhängig von der Vertrauensgruppenaufteilung und dem Fairnessmechanismus, kaum verringert. Hingegen reduziert sich die Streckenlänge der Leerfahrten durch die Kooperation um bis zu 9 % (PIT 1 1TG). Je größer die Vertrauensgruppe ist, desto stärker sinkt die Streckenlänge der Leerfahrten. Der angewandte Fairnessmechanismus wirkt sich hingegen nur geringfügig auf die Länge der Leerfahrten aus.

Es werden durch die Kooperation kostengenerierende Fahrten eingespart und damit der Profit gesteigert. Durch die Reduktion der Leerfahrtenstreckenlänge steigt außerdem der Anteil der

erlösbringenden Vollcontainerfahrt an der gesamten durchschnittlichen Fahrtstrecke (siehe exemplarisch für die Fälle rpP T und PIT 1 1TG Abbildung 44).

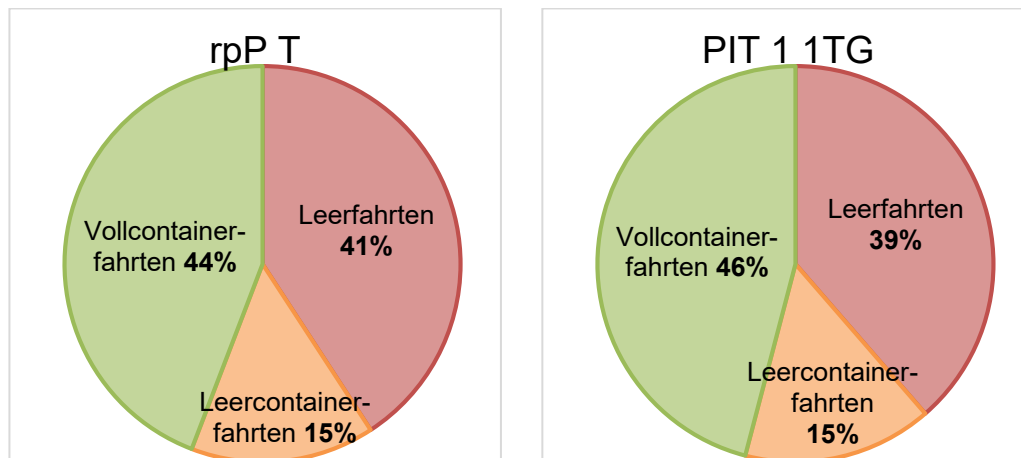


Abbildung 44: Anteil der Streckenlängen für rpP T und PIT1 1TG in Fallstudie 1

Abbildung 45 zeigt die Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 1. Es zeigt sich, dass die Anzahl neben der Länge der Leerfahrten bereits durch Kombinationsfahrten ohne Kooperation (rpP T) um 2 % gegenüber pP reduziert werden kann. Ferner wird deutlich, dass sich die Anzahl der Leerfahrten durch Kooperation und große Vertrauensgruppen reduzieren lässt. Auch die Anzahl der Leercontainerfahrten lässt sich durch Kooperation reduzieren, wenn auch nur in sehr geringem Umfang. Durch Kooperation und damit der Möglichkeit der Kombinationsfahrten mit Containerdrehen sinkt die Anzahl der Leercontainerfahrten etwas stärker als die Länge der Leercontainerfahrten. Dies geschieht unabhängig vom Fairnessmechanismus. Allerdings lässt sich durch Kombinationsfahrten mit Containerdrehen nicht notwendigerweise auch die Länge der Leercontainerfahrten reduzieren, denn es besteht die Möglichkeit, dass aus zwei kürzeren Leercontainerfahrten durch das Containerdrehen eine längere Leercontainerfahrt entsteht. In der unteren Darstellung von Abbildung 26 ist dieser Sachverhalt der langen Leercontainerfahrten bei Kombinationsfahrten mit Containerdrehen durch gestrichelte Linien visualisiert.

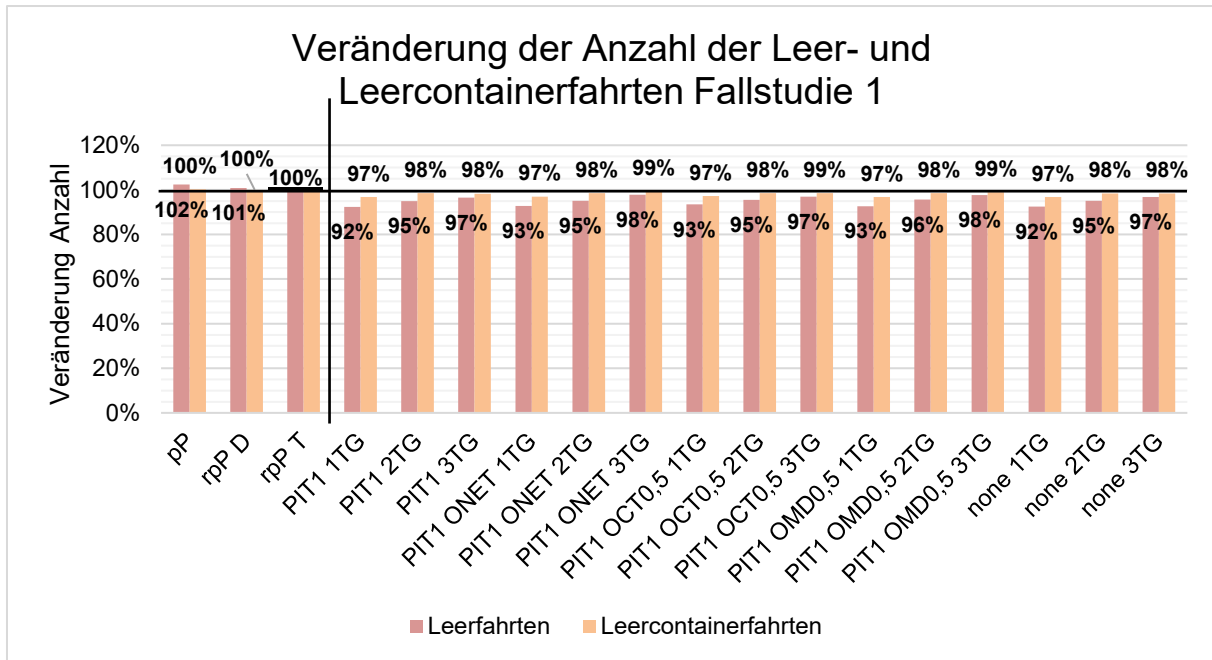


Abbildung 45: Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten Fallstudie 1

8.3.7 Parametervariation der Containerdrehpauschale

Die oben genannten Fahrtentypen (Einzelfahrt, Kombinationsfahrt mit/ohne Containerdrehen) können mit Blick auf den Einfluss der Höhe der Containerdrehpauschale (C_p) analysiert werden. Diese Pauschale muss das ausführende Fuhrunternehmen zahlen, wenn es eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen durchführt. Sie wird fällig, wenn der identische Container einer Importfahrt direkt wieder für eine Exportfahrt genutzt wird. Dabei ist es notwendig, dass der Container nach der Entladung am Endknoten des Importkundenauftrages auf die Seetauglichkeit für eine Exportfahrt geprüft wird. Dieser Vorgang und der administrativ-organisatorische Aufwand dazu sind im mathematischen Modell mit dieser Containerdrehpauschale (C_p) abgebildet. Es stellt sich nun die Frage, wie die Höhe der Pauschale die Kombinationsfahrten mit Containerdrehen beeinflusst.

Die folgende Abbildung 46 zeigt wieder, dass grundsätzlich bei einer größeren Vertrauensgruppe (1TG) mehr Kombinationsfahrten durchgeführt werden. Bei $C_p = 100$ (vier Instanzen, vgl. Kap. 8.1.1) ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Kombinationsfahrten mit Containerdrehen geringer ist als bei $C_p = 1$ und $C_p = 10$. Dies lässt sich mit den deutlich höheren Containerdrehkosten erklären. Bei $C_p = 1$ (zwei Instanzen, vgl. Kap. 8.1.1) und $C_p = 10$ (vier Instanzen, vgl. Kap. 8.1.1) ist die Anzahl für Kombinationsfahrten mit und ohne Containerdrehen vergleichbar, d. h., der absolut geringe Abstand zwischen $C_p = 1$ und $C_p = 10$ hat keinen wesentlichen Einfluss; andere Faktoren, wie die geografischen und zeitlichen Restriktionen scheinen für eine Entscheidung bzgl. einer Kombinationsfahrt ausschlaggebend. Es zeigt sich aber, dass die Kostensteigerung auf $C_p = 100$ einen entscheidenden Einfluss hat; denn dann sind diese Kosten prohibitiv hoch und es finden kaum noch Kombinationsfahrten mit Containerdrehen statt (s. Abbildung 46).

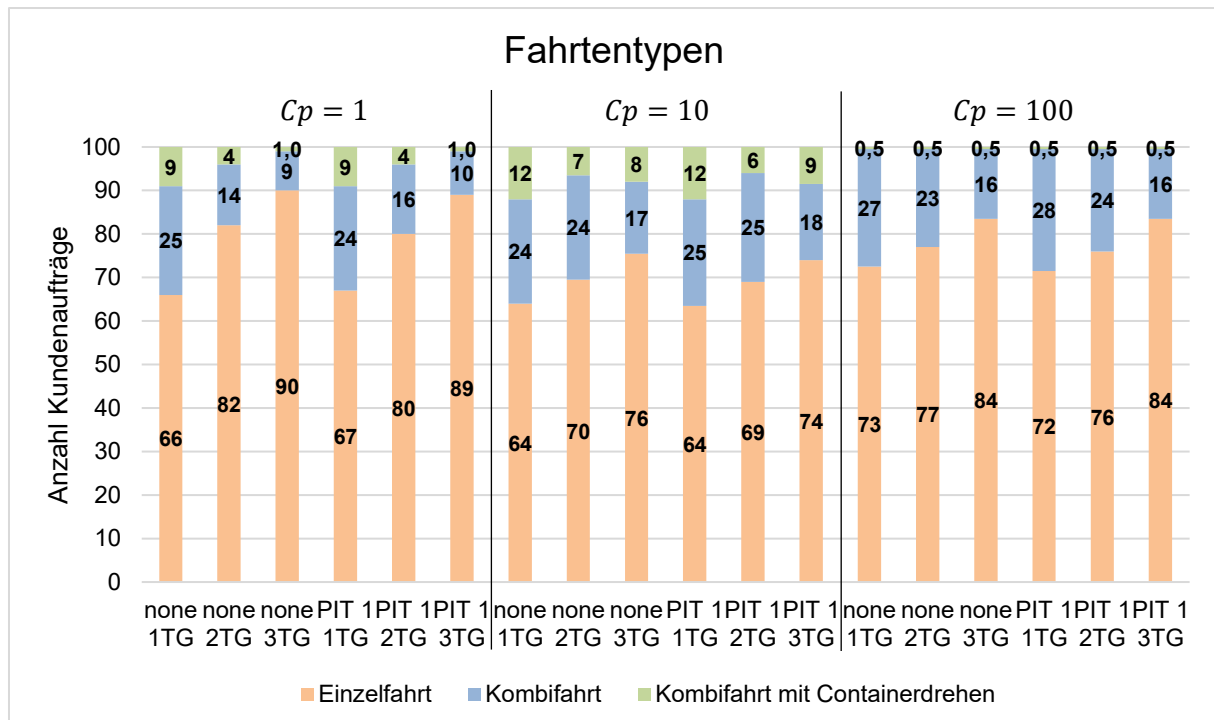


Abbildung 46: Fahrtentypen abhängig von der Containerdrehpauschale Fallstudie 1

8.3.8 Zwischenfazit Fallstudie 1

Vor dem Hintergrund einer fairen und langfristig stabilen Kooperation, die die Kooperationsvorteile gleichmäßig mit dem Ziel einer quantifizierbaren wirtschaftlichen Verbesserung für alle an der Kooperation beteiligten Fuhrunternehmen verteilt, lässt sich folgendes Zwischenfazit ziehen:

Anhand der Auswertung der Ergebnisse von Fallstudie 1 ist festzustellen, dass sich mit einer Kooperation der Gesamtprofit als Summe der Profite aller Fuhrunternehmen steigern lässt. Je größer die Vertrauensgruppe (1TG) ist, desto stärker profitieren die beteiligten Fuhrunternehmen in Summe, sodass der durchschnittliche Gesamtprofit um 16 % (PIUDT 1) bis 33 % (PIT 1) steigt. Da es in der Praxis nicht realistisch ist, dass alle Fuhrunternehmen eine große Kooperation eingehen (vgl. Kapitel 5.3.3), werden auch die Auswirkungen von kleineren Vertrauensgruppeneinteilungen (2TG, 3TG) betrachtet. Im Fall von 3TG zeigen sich spürbare Profitsteigerungen zumindest bei wochenbasierten Fairnessmechanismen, nämlich zwischen 7 % (PIUT 1) und 16 % (PIT 1 oder OMD 0,5).

Allgemein ist erkennbar, dass die angewandten Fairnessmechanismen innerhalb jeder Vertrauensgruppeneinteilung sowohl die Gesamtprofitsteigerung als auch die individuelle Profitsteigerung stark beeinflussen. Dabei fällt für jede der drei Vertrauensgruppeneinteilungen auf, dass die profitorientierten Fairnessmechanismen auf Tagesbasis (PIDT 1 und PIUDT 1) im Vergleich zu denen auf Wochenbasis (PIT 1 und PIDT 1) eine geringere Gesamtprofitsteigerung erreichen. So zeigt der Fairnessmechanismus PIT 1 die stärkste Gesamtprofitsteigerung von 33 % (vgl. Abbildung 27), allerdings mit der Folge, dass die individuelle Profitsteigerung zwischen den Fuhrunternehmen ungleich verteilt ist. Hier ist alternativ der Fairnessmechanismus PIUT 1 sinnvoll, da jedes Fuhrunternehmen die gleiche

absolute Profitsteigerung erhält. PIUT 1 schränkt jedoch den Lösungsraum stark ein und führt zu einer geringeren Gesamtprofitsteigerung. Außerdem kann hier der Fall eintreten, dass die absolute Profitsteigerung für ein bereits erfolgreiches Fuhrunternehmen so geringfügig ist, dass es kein Interesse mehr an der Kooperation hat.

Bezüglich der Frage nach den Bedingungen für eine Profitsteigerung ist festzustellen, dass eine garantierte Steigerung um 10 % für alle Fuhrunternehmen (dargestellt durch PIT 1,1) nur dann möglich ist, wenn diese sich in einer großen Vertrauensgruppe (1TG) befinden. Für Fuhrunternehmen in kleinen Vertrauensgruppen (3TG) besteht diese Garantie nicht, was entsprechend in die Vorüberlegungen der Kooperation mit einzubeziehen ist.

Ebenfalls ist eine Profitsteigerung durch eine höhere Anzahl an Kombinationsfahrten (mit und ohne Containerdrehen) möglich. Je größer die Vertrauensgruppe ist, desto mehr Kombinationsfahrten sind bei einer Kooperation möglich. Dabei ist zu beachten, dass die Organisationskosten für Containerdrehen nicht zu hoch sein dürfen, da sonst Kombinationsfahrten mit Containerdrehen für die Fuhrunternehmen nicht attraktiv sind.

Die Anzahl und Länge der Leer- und Leercontainerfahrten können durch Kombinationsfahrten reduziert werden. Dabei können die Anzahl und Länge der Leerfahrten stärker reduziert werden als die Anzahl und Länge der Leercontainerfahrten.

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass Fairnessmechanismen, die ausschließlich den Profit, aber nicht die Verteilung der Kundenaufträge beinhalten, nicht zielführend sind, da bei diesen die Aspekte Kundenkontakt und Ressourcenauslastung vernachlässigt werden. Wiederum hat die ausschließliche Konzentration auf die Kundenauftragsverteilung einen Profitverlust für einige Fuhrunternehmen zur Folge. Aus diesem Grund ist es folgerichtig, einen profitorientierten Fairnessmechanismus mit einem kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismus zu kombinieren. Hier kommen die Kombinationen PIT 1 mit ONET, PIT 1 mit OCT 0,5 und PIT 1 mit OMD 0,5 in Betracht.

Diese drei Fairnessmechanismus-Kombinationen unterscheiden sich sowohl in ihrer Gesamtprofitsteigerung als auch in ihrer individuellen Profitsteigerung nur geringfügig. PIT 1 mit ONET weist zwar für alle drei Vertrauensgruppeneinteilungen die niedrigsten Profitsteigerungen auf, zeigt aber eine gleichmäßige Kundenauftragsverteilung, da sich ONET streng an der Kundenauftragsanzahl ohne Kooperation orientiert. Im Gegensatz dazu sind bei den anderen Kombinationen die Kundenaufträge weniger gleichmäßig verteilt.

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass der Gesamtprofit bei Fairnessmechanismus-Kombinationen geringer ausfällt als bei Anwendung eines einzigen Mechanismus. Hier wird der Zielkonflikt zwischen den Zielen deutlich, auf der einen Seite eine faire und langfristige Kooperation aufzubauen und auf der anderen Seite den kurzfristig höchstmöglichen Profit aus der Kooperation zu ziehen.

8.4 Analysen zu Fallstudie 2

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fallstudie 2 vorgestellt und analysiert. Zunächst werden in Kapitel 8.4.1 die Fairnessmechanismen und ihre Kombinationen aus Gesamtprofitsicht diskutiert. Anschließend wird in Kapitel 8.4.2 die Parametervariation des Alpha-Faktors im Hinblick auf den Fairnessmechanismus PIT betrachtet, bevor in Kapitel 8.4.3 die Auswirkungen auf die individuelle Profitverteilung analysiert werden. Es erfolgt in Kapitel 8.4.4 die Analyse der Verteilung der Kundenaufträge sowie in den beiden folgenden Kapiteln 8.4.5 und 8.4.6 die Analyse der Fahrten unter Berücksichtigung der Fahrtentypen und der Containerdrehkosten.

Die Fallstudie 2 unterscheidet sich von Fallstudie 1 in drei wesentlichen Punkten. Erstens sind in dieser Fallstudie zweitägige Kombinationsfahrten möglich (vgl. Kapitel 7.2.7), zweitens werden anonymisierte Daten eines Hamburger Fuhrunternehmens genutzt und drittens werden unterschiedliche Anteile von Exportkundenaufträgen in den Instanzen berücksichtigt (vgl. Kapitel 8.1.2). Fünf Instanzen (a-e) nutzen 50 Export- und 50 Importkundenaufträge, fünf weitere Instanzen nutzen 40 Export- und 60 Importkundenaufträge (vgl. Kapitel 8.1.2). Im Unterschied zu Fallstudie 1 (vgl. Kapitel 8.3) ist der Verhandlungsfaktor auf einen niedrigen Bereich fixiert, der als praxisnäher eingestuft wird.

Für jede der in Tabelle 9 aufgeführten Instanzen wurde für alle drei Vertrauensgruppenaufteilungen und für alle Fairnessmechanismen bzw. Fairnessmechanismus-Kombinationen eine Berechnung durchgeführt. Für Fallstudie 2 finden somit 720 Berechnungen statt. Diese ergeben sich aus 15 Fairnessmechanismen (bzw. deren Kombinationen, inkl. none) multipliziert mit drei Vertrauensgruppenaufteilungen und zehn Instanzen. Hinzu kommen drei priorProfit Berechnungen für jede der zehn Instanzen und weitere 240 Berechnungen für die OCT Alpha-Variation (vgl. Kapitel 8.6.1). Diese ergeben sich aus acht zusätzlichen Variationen, multipliziert mit drei Vertrauensgruppenaufteilungen, wiederum multipliziert mit zehn Instanzen. Für 13 dieser 720 Berechnungen konnte der Solver innerhalb einer Stunde keine zulässige Lösung ermitteln. Dies entspricht 1,8 %. Diese unzulässigen Lösungen treten bei 9 dieser 13 Fälle bei PIT 1,1 auf (vgl. Kapitel 8.4.2). Die Vertrauensgruppenaufteilung 3TG führt ebenfalls und meist im Zusammenhang mit PIT 1,1 dazu, dass keine zulässige Lösung gefunden werden kann. Um dennoch eine Auswertung durchführen zu können, werden diese 13 Fälle analog zu Fallstudie 1 bzgl. des Profits mit dem $rpP T$ bewertet. Wenn also für einen Fairnessmechanismus keine Lösung gefunden wird, wird diese Berechnung wie der Fall ohne Kooperation bewertet.

8.4.1 Analyse der Fairnessmechanismen

Die folgende Abbildung 47 zeigt den Vergleich des Gesamtprofits separat nach Vertrauensgruppenaufteilung für alle Fairnessmechanismen und Fairnessmechanismus-Kombinationen. Alle Daten sind analog zu Fallstudie 1 (vgl. Kapitel 8.3.1) indiziert für den Fall, dass keine Kooperation, aber Kombinationsfahrten und tageweise Verschiebungen von Kundenaufträgen möglich sind (RealPriorProfit Total bzw. $rpP T$). Dieser Fall entspricht 100 % des Gesamtprofits und dient als Vergleichsbasis für die Fairnessmechanismen. Wie bereits in

Kapitel 8.2.2 in Abbildung 25 dargestellt, ist der PriorProfit, der eine tageweise Verschiebung von Kombinationsfahrten nicht zulässt (rpP D), in Fallstudie 2 deutlich geringer. Jede Säule im Diagramm in Abbildung 47 entspricht dem arithmetischen Mittel (Durchschnitt) der Ergebnisse der zehn Instanzen der Fallstudie 2. Die Zahlen 1 bzw. 0,5 geben den für den Fairnessmechanismus genutzten Alpha-Faktor an.

Durch den im Vergleich zu Fallstudie 1 deutlich geringeren rpP D ist es möglich, dass die tageweise orientierten Fairnessmechanismen PIUT und PIUDT niedriger als der rpP T liegen. Dies ist der Fall bei PIUDT und 3TG, bei dem zwar eine Profitsteigerung im Vergleich zum rpP D erfolgt, der Profit allerdings geringer als der rpP T ist. Hier zeigt sich der Effekt, der in Abbildung 24 dargestellt wird. Der Profit muss bei tageweise orientierten Fairnessmechanismen lediglich größer sein als der tageweise orientierte priorProfit (rpP D), um die Zielerreichung des Fairnessmechanismus nachzuweisen. Analog zu Fallstudie 1 lässt sich feststellen, dass PIDT und PIUDT eine geringere Profitsteigerung aufweisen als die Fairnessmechanismen PIT und PIUT. Dies unterstreicht, dass wochenorientierte Fairnessmechanismen attraktiver sind. Letztendlich ist eine höhere Flexibilität gegeben, vorausgesetzt, dass die Kunden mit tageweisen Verschiebungen einverstanden sind.

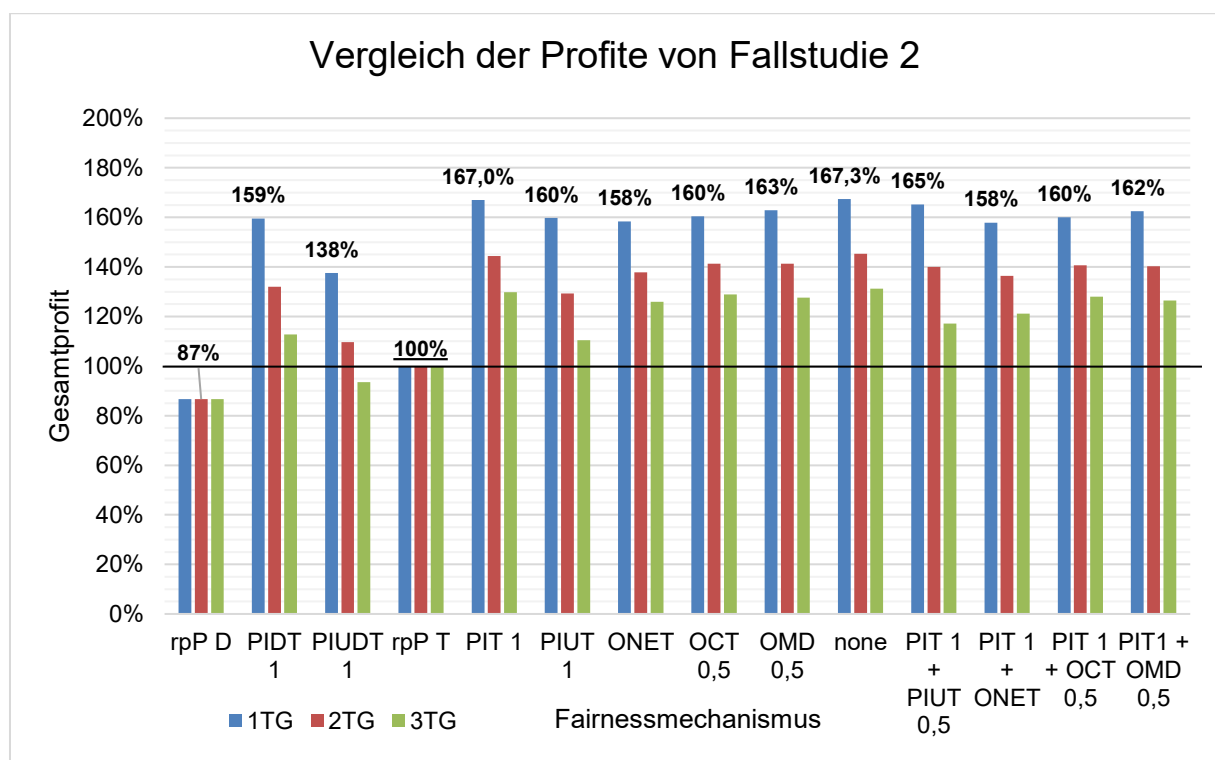


Abbildung 47: Vergleich der Gesamtprofite von Fallstudie 2

Trotz der o. g. Unterschiede in den Daten und im Modell der Fallstudie 2 im Vergleich zu Fallstudie 1, lassen sich die grundlegenden Befunde von Kapitel 8.3.1 auch hier feststellen. Je größer die Vertrauensgruppe ist, desto höher die Profitsteigerung, wobei bereits eine kleine Vertrauensgruppe für alle beteiligten Fuhrunternehmen zu spürbaren Profitsteigerungen führt. Die Fairnessmechanismen, die nur den eigenen Profit der Fuhrunternehmen (PIDT und PIT) berücksichtigen, erreichen einen höheren Profit als die Fairnessmechanismen, die zusätzlich die Profit-Durchschnittswerte der anderen Fuhrunternehmen (PIUDT und PIUT)

berücksichtigen. Ohne jeglichen Fairnessmechanismus ist die Profitsteigerung (none) nahezu identisch wie beim Fairnessmechanismus PIT 1 (167,3 % zu 167,0 %).

Die **Kombination** der Fairnessmechanismen PIT 1 mit anderen Fairnessmechanismen führt zu leicht geringeren Profitsteigerungen als PIT 1 allein. Es ist festzustellen, dass die Kombination von PIT 1 mit PIUT 0,5 bei 1TG die höchste Steigerung (65 % Steigerung) unter den Fairnessmechanismus-Kombinationen hat, allerdings bei 3TG die geringste Steigerung (17 % Steigerung). Dies liegt daran, dass bei einer großen Vertrauensgruppe (1TG) zwei profitorientierte Fairnessmechanismen weniger einschränkend auf die optimale Lösung wirken als dies bei Fairnessmechanismen, die Profitsteigerung und Kundenaufträge gleichermaßen berücksichtigen, der Fall ist. Bei vielen kleinen Vertrauensgruppen (3TG) schränkt wiederum die Notwendigkeit der gleichmäßigen absoluten Profitsteigerung (PIUT 0,5) am stärksten die Gesamtprofitsteigerung ein. Gleichzeitig ist hervorzuheben, dass bei der Kombination von profitorientierten mit kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen die Gesamtprofitsteigerung bei 3TG über 20 % und bei 1TG bei ca. 60 % liegt (vgl. Abbildung 47).

Ebenso wie in Fallstudie 1 ist bei dem Fairnessmechanismus PIUT 1 der Einfluss der Vertrauensgruppenaufteilung am größten, da zwischen der Profitsteigerung bei 1TG im Vergleich zu 3TG 50 Prozentpunkte liegen. Grundsätzlich wird die Gesamtprofitsteigerung stärker von der Vertrauensgruppenaufteilung als von dem angewandten Fairnessmechanismus beeinflusst.

Bei der Differenzierung nach den Instanzen mit einem Exportkundenauftragsanteil von 50 % (vgl. Abbildung 48) bzw. 40 % (vgl. Abbildung 49) lässt sich feststellen, dass die Gesamtprofitsteigerungen im Falle von 40 % Exportanteil deutlich höher ausfallen. So liegen die Gesamtprofitsteigerungen bei 1TG bei 50 Exportkundenaufträgen unter 54 % und bei 40 Exportkundenaufträgen über 70 %. Das liegt daran, dass die Exportkundenaufträge im Modell nicht tageweise verschiebbar sind. Das bedeutet, dass mit einem höheren Anteil an Importkundenaufträgen eine höhere zeitliche Flexibilität verbunden ist, die den Lösungsraum erweitert.

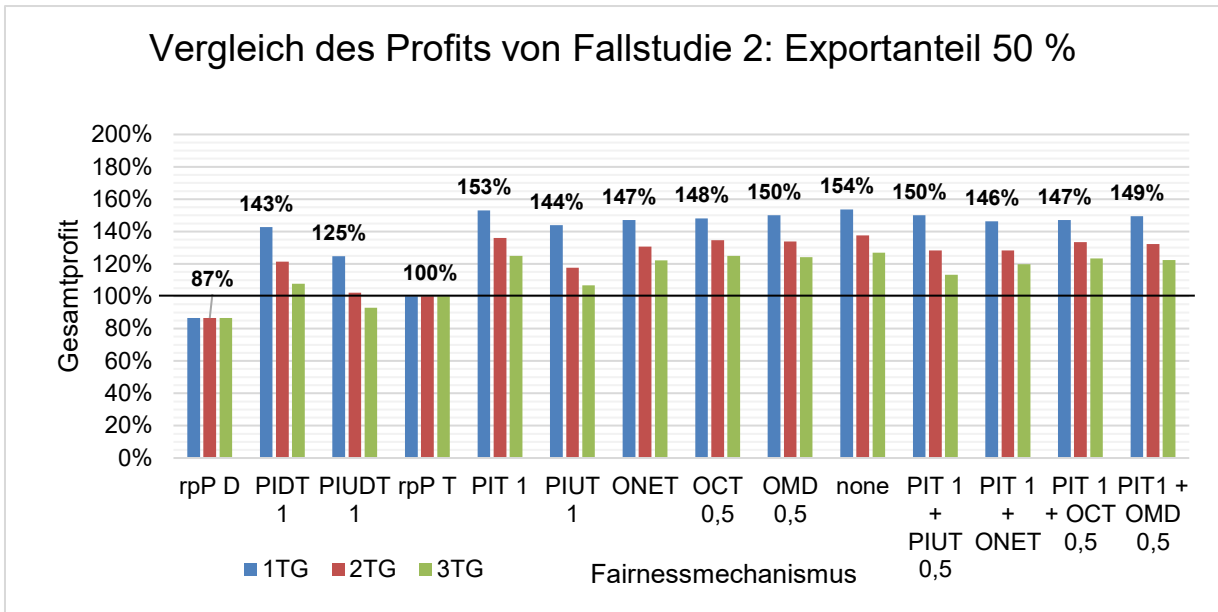


Abbildung 48: Vergleich des Gesamtprofits von Fallstudie 2 E5:I5

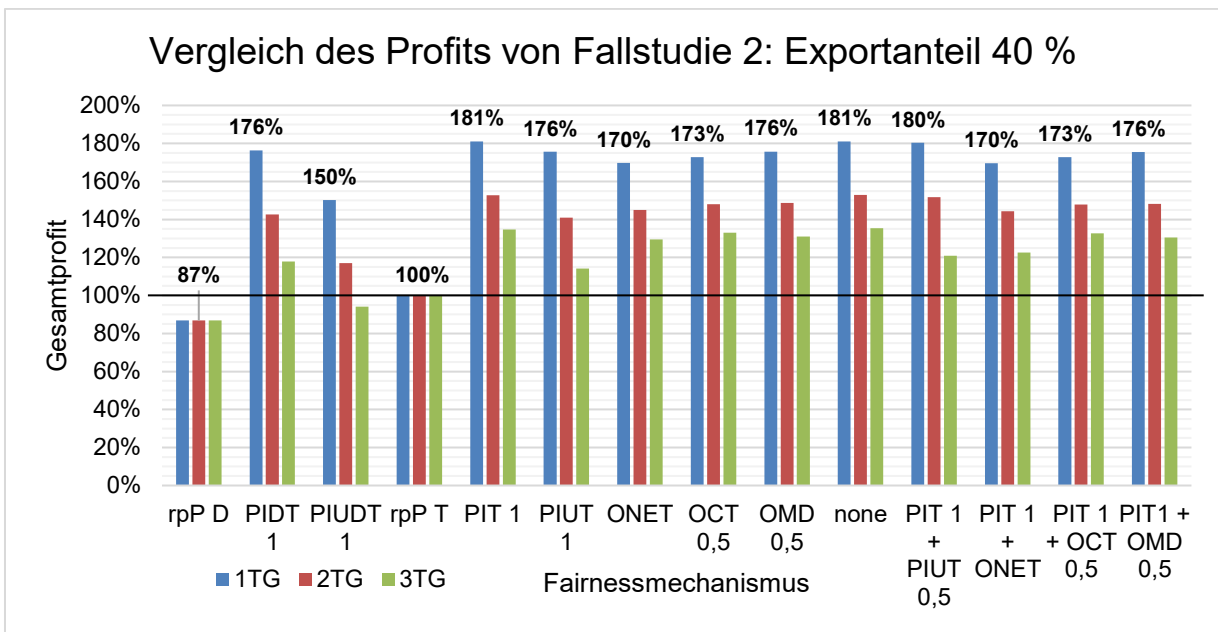


Abbildung 49: Vergleich des Gesamtprofits von Fallstudie 2 E4:I6

8.4.2 Parametervariation des Alpha-Faktors

Analog zu Fallstudie 1 kann der Alpha-Faktor bei dem Fairnessmechanismus PIT variiert werden (vgl. Abbildung 50). Bei PIT 1,1 ist zu berücksichtigen, dass zwei Instanzen für 2TG und sieben Instanzen für 3TG nicht lösbar sind (vgl. Kapitel 8.4) und folglich mit 100 % bewertet werden. Ohne diese manuelle Anpassung, d. h., ohne Berücksichtigung der unzulässigen Instanzen würden die Werte für die durchschnittliche Profitsteigerung bei 2TG bei 147 % (statt 137,8 %) liegen sowie bei 3TG bei 142 % (statt 112,5 %).

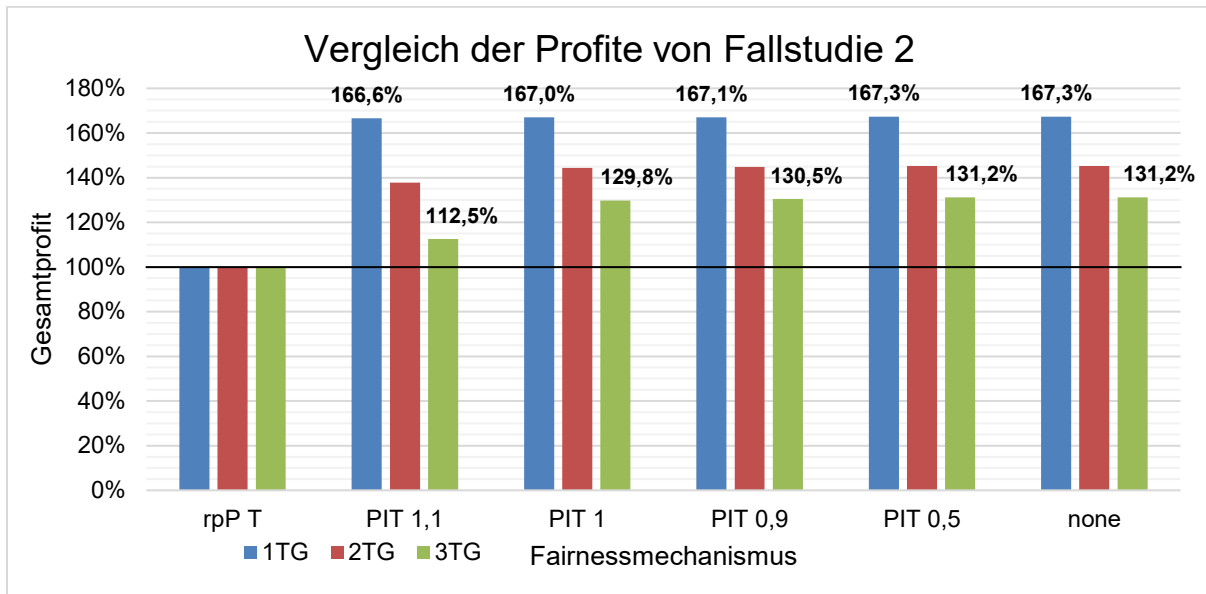


Abbildung 50: Vergleich der Gesamtprofite mit Alpha-Faktor-Variation von Fallstudie 2

Ebenso wie in Fallstudie 1 sind die Auswirkungen des variierten Alpha-Faktors auf die Gesamtprofitsteigerung gering. Dies gilt sowohl bei einem Anteil von Exportkundenaufträgen von 50 % als auch bei 40 % (hier nicht dargestellt). Gleichwohl bedeutet ein Alpha-Faktor von PIT kleiner gleich 1, dass einzelne Fuhrunternehmer eine Profitreduzierung erfahren können. Diese Tatsache wäre einer langfristig stabilen Kooperation nicht zuträglich. Im Folgenden werden erneut die individuellen Profitsteigerungen der Fuhrunternehmer analysiert.

8.4.3 Analyse der Profitverteilung

Voraussetzung für eine langfristig stabile Kooperation ist, dass diese von allen beteiligten Fuhrunternehmern als fair wahrgenommen wird. Dies beinhaltet, dass die Unternehmen einen vergleichbaren Anteil der Vorteile durch Kooperation (hier vor allem der Profit) erhalten. Hierfür ist entscheidend, wie hoch die individuelle Profitsteigerung der Fuhrunternehmer ist und wie diese im Vergleich zu den Profitsteigerungen der anderen Fuhrunternehmer ausfällt. Analog zu Kapitel 8.3.3 wird in folgender Abbildung 51 für die drei Vertrauensgruppeneinteilungen die durchschnittliche (arithmetisches Mittel), minimale und maximale individuelle Profitsteigerung nach Fairnessmechanismus differenziert betrachtet.

Es ist festzustellen, dass, im Gegensatz zu Fallstudie 1, kein durchschnittlicher Minimum-Wert -100 % unterschreitet, d. h., im Durchschnitt erleidet kein Fuhrunternehmen einen Verlust, sondern erzielt im schlechtesten Fall einen geringeren Profit als ohne Kooperation. Dies ist

insbesondere vor dem Hintergrund der Praxisnähe der Daten aus Fallstudie 2 eine wichtige Feststellung. In Hinsicht auf den Fairnessmechanismus PIDT 1 fällt auf, dass die maximale individuelle Profitsteigerung (im Durchschnitt der zehn Instanzen) bei 456 % liegt. Das bedeutet, dass ein Fuhrunternehmen mit der stärksten individuellen Profitsteigerung durchschnittlich seinen Profit mehr als verfünffachen kann. Dieser Mechanismus garantiert, dass an jedem Tag und über die gesamte Woche jedes Fuhrunternehmen mehr Profit generiert als ohne Kooperation. Es ist zu beachten, dass die Steigerungsraten bei PIDT und PIUDT auf Basis des $rpP D$ berechnet werden. Der $rpP D$ (87 %) fällt, wie in Abbildung 47 dargestellt, deutlich geringer aus als das $rpP T$ (Index 100 %), insbesondere im Vergleich zu Fallstudie 1. Das hohe durchschnittliche Maximum bei PIDT und PIUDT lässt sich daher aufgrund von hohen relativen Steigerungen aufgrund eines geringen $rpP D$ erklären.

Bezogen auf Fallstudie 1 ist erneut und in stärkerer Ausprägung erkennbar, dass PIUDT und PIUT mit kleineren Vertrauensgruppen (2TG und 3TG) eine geringere Profitsteigerung erreichen als PIDT und PIT. Dies liegt daran, dass zusätzlich zur individuellen Profitsteigerung, die absolute Profitsteigerung bei allen Fuhrunternehmen identisch sein muss.

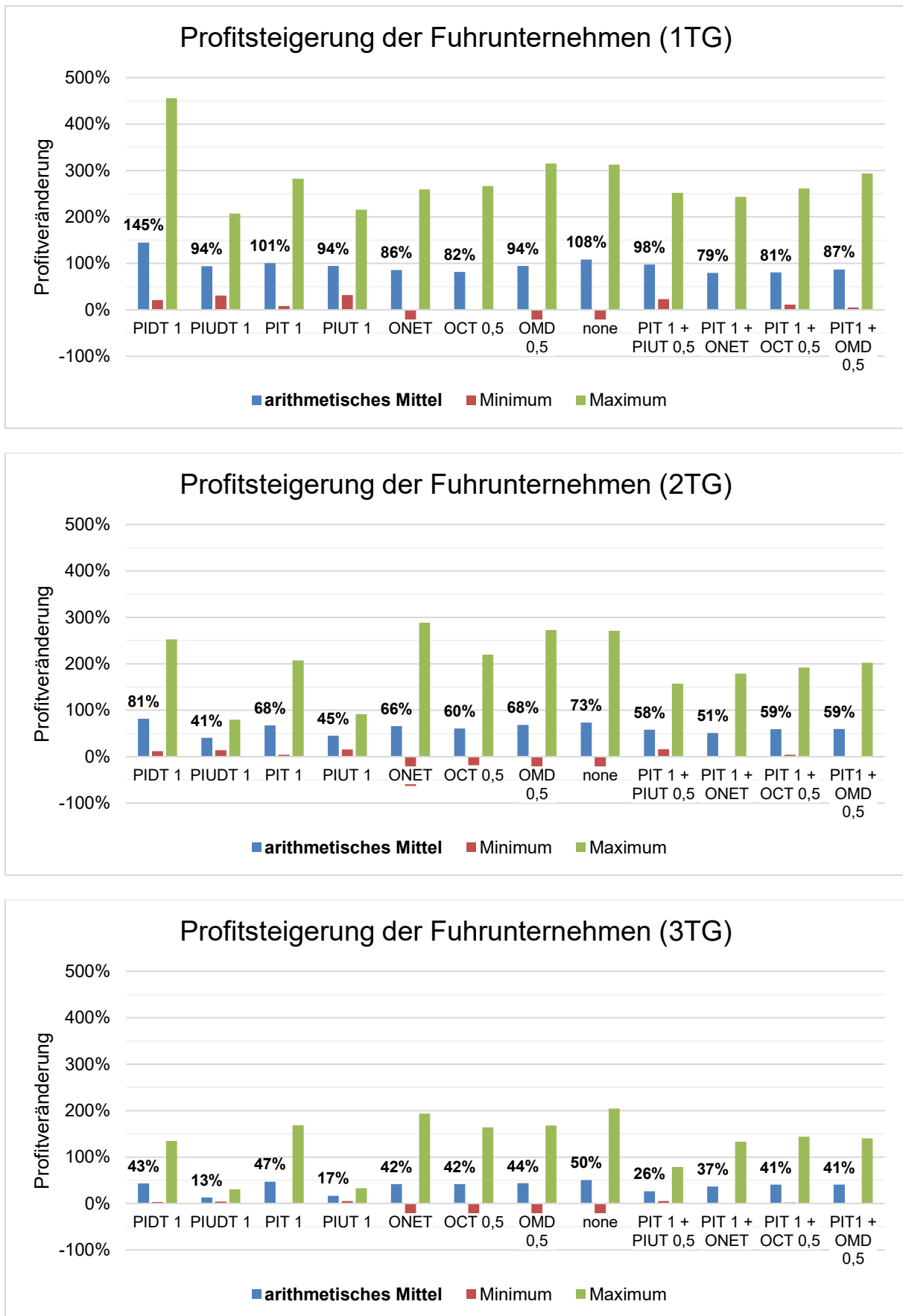


Abbildung 51: Profitsteigerungsvergleich für Vertrauensgruppen und Fairnessmechanismen von Fallstudie 2 (unabhängig vom Exportanteil)

Wie bereits Abbildung 47 für die Gesamtprofitsteigerung zeigt, ist festzustellen, dass die Kombination von PIT 1 mit PIUT 0,5 bei 1TG eine hohe durchschnittliche individuelle Profitsteigerung von 98 % unter den Fairnessmechanismus-Kombinationen bewirkt, allerdings bei 3TG die geringste Steigerung von 26 % erreicht. Aus diesem Grund sind für kleinere Vertrauensgruppen (2TG, 3TG) die Fairnessmechanismus-Kombinationen, die PIT 1 mit kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen (ONET, OCT 0,5, OMD 0,5) kombinieren, geeigneter, weil sie eine höhere individuelle Profitsteigerung aufweisen im Vergleich zu PIT 1 mit PIUT 0,5. Hervorzuheben ist, dass diese drei Fairnessmechanismus-Kombinationen sich in ihrer durchschnittlichen individuellen Profitsteigerung nur geringfügig unterscheiden.

8.4.4 Analyse der Kundenauftragsverteilung

Die Auswirkungen der Kooperation auf die Verteilung (inkl. Weitergabe) von Kundenaufträgen auf die Fuhrunternehmen lassen sich wie in Fallstudie 1 (vgl. Kapitel 8.3.5) mithilfe von Sankey-Diagrammen anschaulich darstellen und analysieren. Dabei wird die Kundenauftragsverteilung erneut abhängig von der Vertrauensgruppenaufteilung und den Fairnessmechanismen PIT 1, PIT 1 mit PIUT 0,5, PIT 1 mit ONET, PIT 1 mit OCT 0,5 sowie PIT 1 mit OMD 0,5 analysiert. Diese Fairnessmechanismen werden ausgewählt, da sie im Hinblick auf die Profitverteilung auch in Fallstudie 2 gute Ergebnisse erzielen (vgl. Kapitel 8.4.3). Es wird die Instanz g genauer analysiert, die einen Exportkundenauftragsanteil von 40 % und eine Containerdrehpauschale von 10 € aufweist (Daten s. Anhang 12.3). Im Gegensatz dazu hat Instanz c aus Fallstudie 1 einen Exportkundenauftragsanteil von 50% und eine Containerdrehpauschale von 100 € (s. Kapitel 8.3.5). So lassen sich die gewonnen Erkenntnisse unabhängig von der Höhe der Containerdrehpauschale feststellen und in dieser Hinsicht verallgemeinern. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass alle Fuhrunternehmen für eine langfristig stabile Kooperation keine Nachteile in Kauf nehmen wollen. Aus diesem Grund werden im Folgenden insbesondere die Fälle betrachtet, bei denen Nachteile auftreten, also z. B. ein Fuhrunternehmen mit Kooperation weniger Kundenaufträge ausführt als ohne Kooperation.

Bei Nutzung des Fairnessmechanismus **PIT 1** ($\alpha = 1$) mit einer großen Vertrauensgruppe (1TG) ist festzustellen, dass das Fuhrunternehmen 7 nach der Kooperation keine Aufträge mehr durchführt (vgl. Abbildung 52). Dennoch kann es seinen Profit durch die Kooperation mehr als verdreifachen. Es erhält durch die Abgabe seiner 12 Kundenaufträge insgesamt Kompensationszahlungen von 1.100 € im Planungshorizont (Woche). Der Grund dafür, dass das Fuhrunternehmen 7 (gelb) keine Aufträge mehr durchführt, liegt in den hohen Kosten je km und je Stunde und daran, dass die LKW-Fahrer des Unternehmens in dieser Instanz g pro Tag maximal 8 Stunden fahren dürfen. Andere Unternehmen haben geringere Kosten und können länger, d. h., bis zu 10 Stunden fahren. Aus diesem Grund werden, im Sinne des Ziels der Gesamtprofitmaximierung, keine Aufträge durch das Fuhrunternehmen 7 mit seinen hohen Kostensätzen ausgeführt. Die gleichen Faktoren führen dazu, dass auch Fuhrunternehmen 3 (violett) von ursprünglich 21 Kundenaufträgen lediglich zwei Kundenaufträge (einer davon ein eigener Auftrag) in der optimalen Lösung mit Kooperation ausführt.

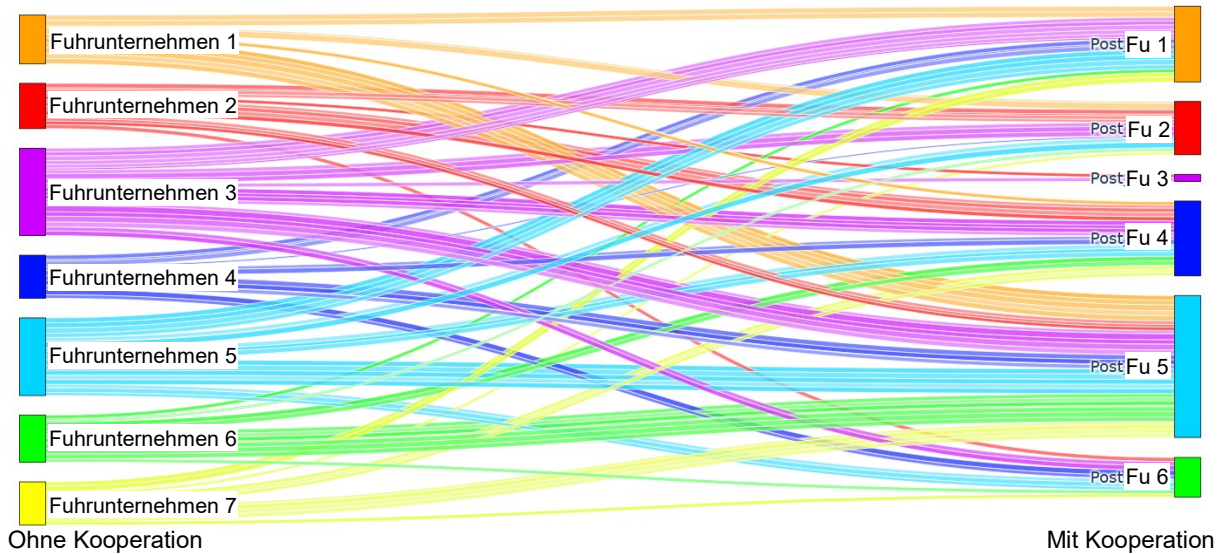


Abbildung 52: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1 1TG

Abbildung 53 zeigt für die Vertrauensgruppeneinteilungen 2TG und 3TG, dass bei 2TG Fuhrunternehmen 7 (gelb) immer noch keine Kundenaufträge ausführt. Erst bei drei Vertrauensgruppen übernimmt Fuhrunternehmen 7 wieder zwei Kundenaufträge. Diese zwei Aufträge, von denen einer dem Fuhrunternehmen 7 gehört, haben allerdings einen geringen Erlös (erkennbar an den dünnen gelben Linien), sodass durch den Containertransport der beiden Exportkundenaufträge (jeweils als Einzelfahrt) gemäß der optimalen Lösung ein Verlust entsteht. Nur durch den Erhalt von Kompensationszahlungen erreicht Fuhrunternehmen 7 eine Profitsteigerung. Allerdings ist der Profit von Fuhrunternehmen 7 bei 1TG (1.100 €) bzw. 2TG (auch 1.100 € wegen der Kompensationszahlungen) höher als bei 3TG (800 €).

Dies zeigt exemplarisch den multiplen Zielkonflikt zwischen der Gesamtprofitmaximierung, der individuellen Profitmaximierung und einer realistischen Größe der Vertrauensgruppe. Es scheint unrealistisch, dass Fuhrunternehmen 7 bei einer großen Vertrauensgruppe ohne Ausführung eines Kundenauftrages langfristig an der Kooperation teilnehmen würde. Das liegt daran, dass Fuhrunternehmen 7 keinen Kundenkontakt mehr hätte, jedoch weiterhin entstehende Kosten durch Fahrer und LKW zu tragen hätte, auch wenn diese nicht genutzt würden. Allerdings erscheint es ebenso unrealistisch, dass Fuhrunternehmen 7 eine Lösung bei einer kleinen Vertrauensgruppe (mit Fuhrunternehmen 5 und 6) akzeptieren würde, bei der es durch die Ausführung von Kundenaufträgen einen Verlust erwirtschaftet. Hinzu kommt, dass bei einer größer werdenden Kooperation mit neuen Partnern in der eigenen Vertrauensgruppe, Fuhrunternehmen 7 und potenziell auch andere Fuhrunternehmen die Befürchtung haben könnten, im „vertrauensgruppen-internen Wettbewerb“ keine Kundenaufträge aufgrund schlechterer Kostensätze im Vergleich zu anderen Fuhrunternehmen in der Vertrauensgruppe zugewiesen zu bekommen.

Es ist also festzustellen, dass der Fairnessmechanismus PIT allein keine langfristig stabile Kooperation ermöglicht, sodass Fairnessmechanismus-Kombinationen erforderlich sind.

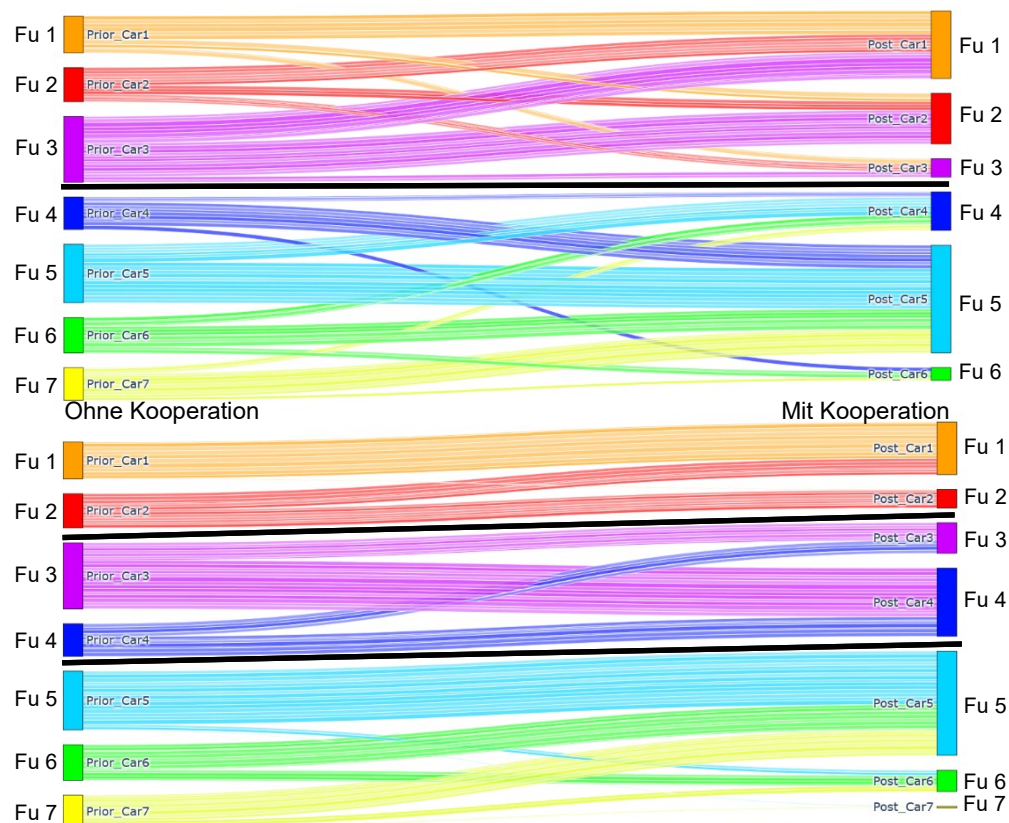


Abbildung 53: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1 2TG (oben) und 3TG (unten)

Eine mögliche Fairnessmechanismus-Kombination ist **PIT 1 mit PIUT 0,5**, bei der zusätzlich zur garantierten Profitsteigerung auch die individuelle absolute Profitsteigerung mindestens 50 % der durchschnittlichen absoluten Profitsteigerung aller Fuhrunternehmen betragen muss. Allerdings zeigt die Kundenauftragsverteilung in Abbildung 54, dass für die Vertrauensgruppeneinteilungen 1TG und 2TG das Fuhrunternehmen 7 wieder keine Kundenaufträge ausführt. Bei 3TG profitiert Fuhrunternehmen 7 mit fünf durchgeführten Kundenaufträgen und einem Profit von 268 € (v.a. durch Kompensationszahlungen). Dieser Profit entspricht exakt 50 % der absoluten individuellen Profitsteigerung im Vergleich zur durchschnittlichen absoluten Profitsteigerung. Auch Fuhrunternehmen 3 profitiert bei 3TG von einer höheren Anzahl ausgeführter Kundenaufträge (15) im Vergleich zu PIT 1 3TG (12) und PIT 1 mit PIUT 0,5 1TG (2).

An diesem Beispiel zeigt sich, dass im Hinblick auf die Kundenauftragsverteilung die Vertrauensgruppeneinteilung ausschlaggebender ist als die Fairnessmechanismus-Kombination PIT mit PIUT 0,5. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Fairnessmechanismus PIT 1 nicht, wie hier geschehen, mit einem profitorientierten Fairnessmechanismus, sondern mit einem kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen zu kombinieren.

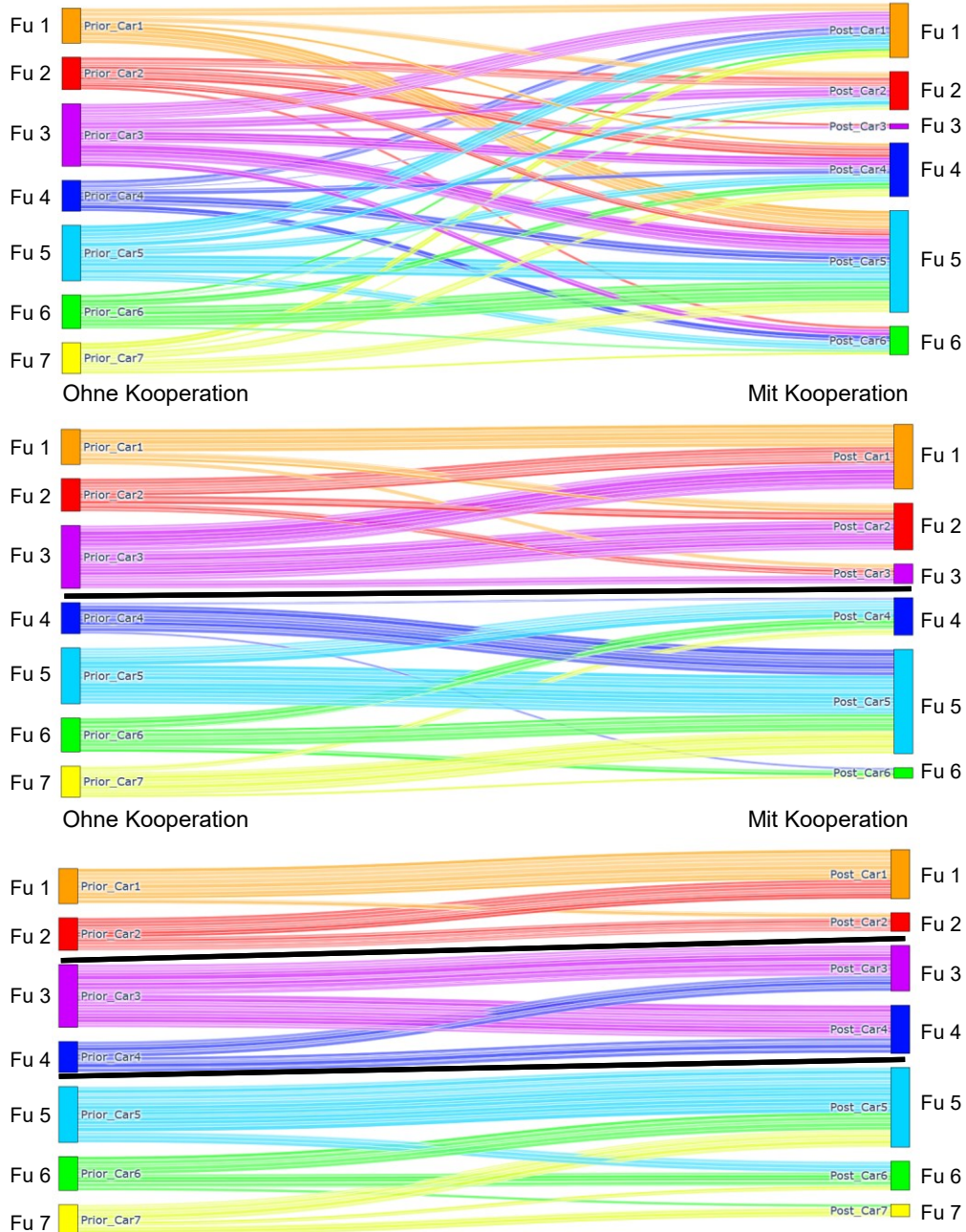


Abbildung 54: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+PIUT 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)

Die Fairnessmechanismus-Kombination **PIT 1 mit ONET** zeigt eine ausgeglichene Kundenauftragsverteilung für alle drei Vertrauensgruppenaufteilungen (vgl. Abbildung 55). So erhalten alle Fuhrunternehmen, auch Fuhrunternehmen 3 und 7, aufgrund von ONET, genauso viele Aufträge wie ohne Kooperation.

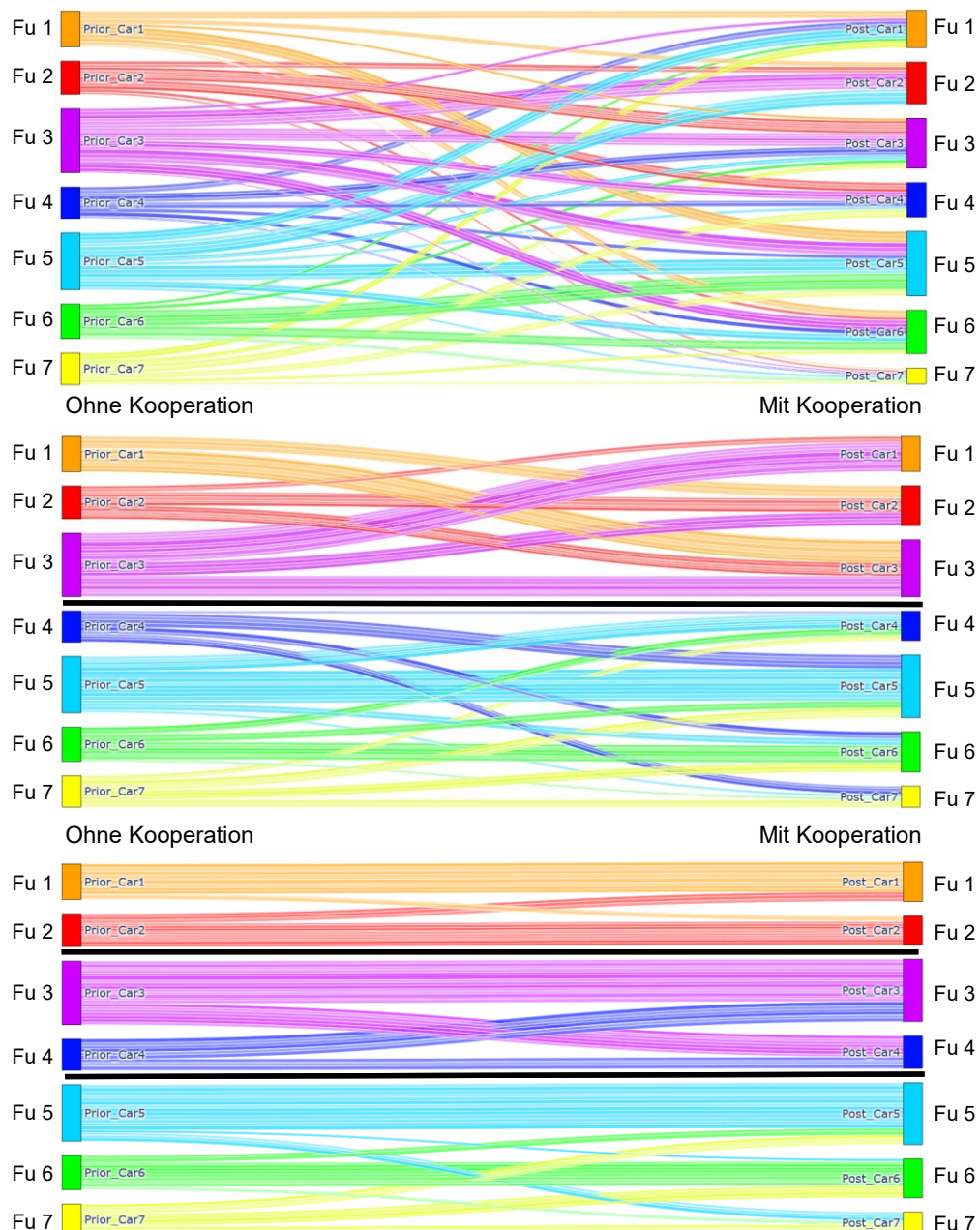


Abbildung 55: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+ONET 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)

Die Fairnessmechanismus-Kombination **PIT 1 mit OCT 0,5** zeigt ebenfalls eine ausgeglichene Kundenauftragsverteilung für alle drei Vertrauensgruppenaufteilungen (vgl. Abbildung 56). Bei 1TG führt Fuhrunternehmen 7 von den zwölf eigenen Kundenaufträgen sechs Kundenaufträge aus, erhält aber keine Kundenaufträge von anderen Fuhrunternehmen. Bei 2TG und 3TG führt Fuhrunternehmen 7 auch jeweils sechs eigene Kundenaufträge und zusätzlich einen erlösgeringen Kundenauftrag von Fuhrunternehmen 6 aus.

Bei 1TG führt Fuhrunternehmen 3 von den 21 eigenen Kundenaufträgen elf Kundenaufträge sowie einen Kundenauftrag von Fuhrunternehmen 2 aus. Bei 2TG führt Fuhrunternehmen 3 dagegen elf eigene Kundenaufträge sowie einen Kundenauftrag von Fuhrunternehmen 4 aus. Bei 3TG führt Fuhrunternehmen 3 außer den elf eigenen Kundenaufträgen einen weiteren

Kundenauftrag von Fuhrunternehmen 4 aus. Die Kundenaufträge sind insgesamt gleichmäßig über die Fuhrunternehmen verteilt. Das gilt auch für die tendenziell aufgrund höherer Kostensätze benachteiligten Fuhrunternehmen 3 und 7.

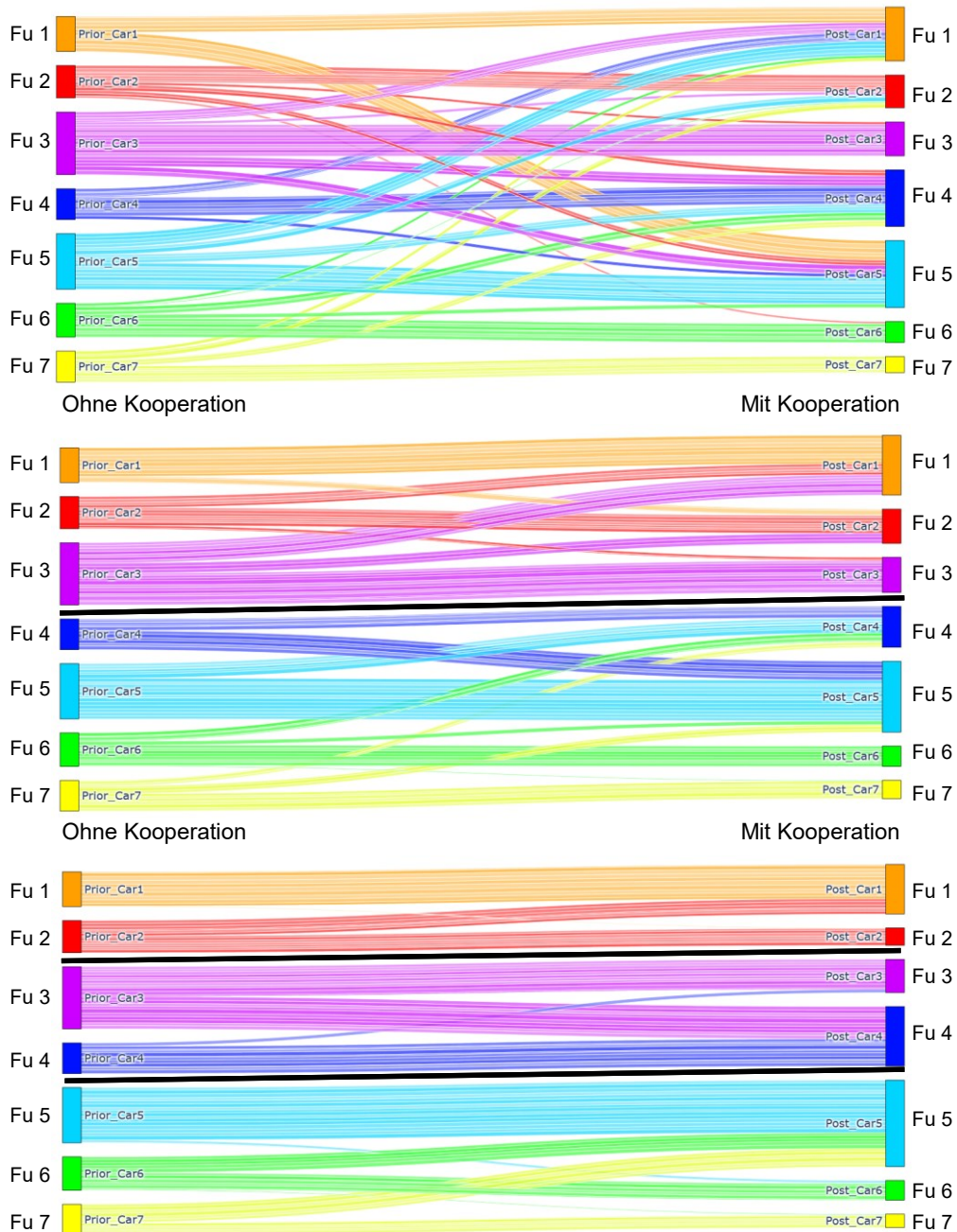


Abbildung 56: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+OCT 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)

Bei der Fairnessmechanismus-Kombination **PIT 1 mit OMD 0,5** erhält Fuhrunternehmen 7 im Vergleich zu oben genannten Fairnessmechanismus-Kombinationen eher weniger Kundenaufträge (vgl. Abbildung 57). Diese Kundenaufträge sind durch OMD 0,5 für alle Fuhrunternehmen gleichmäßiger über den Planungshorizont der Woche verteilt. Dies ist in der

Abbildung aber nicht erkennbar, da die Abbildung den gesamten Planungshorizont aggregiert darstellt.

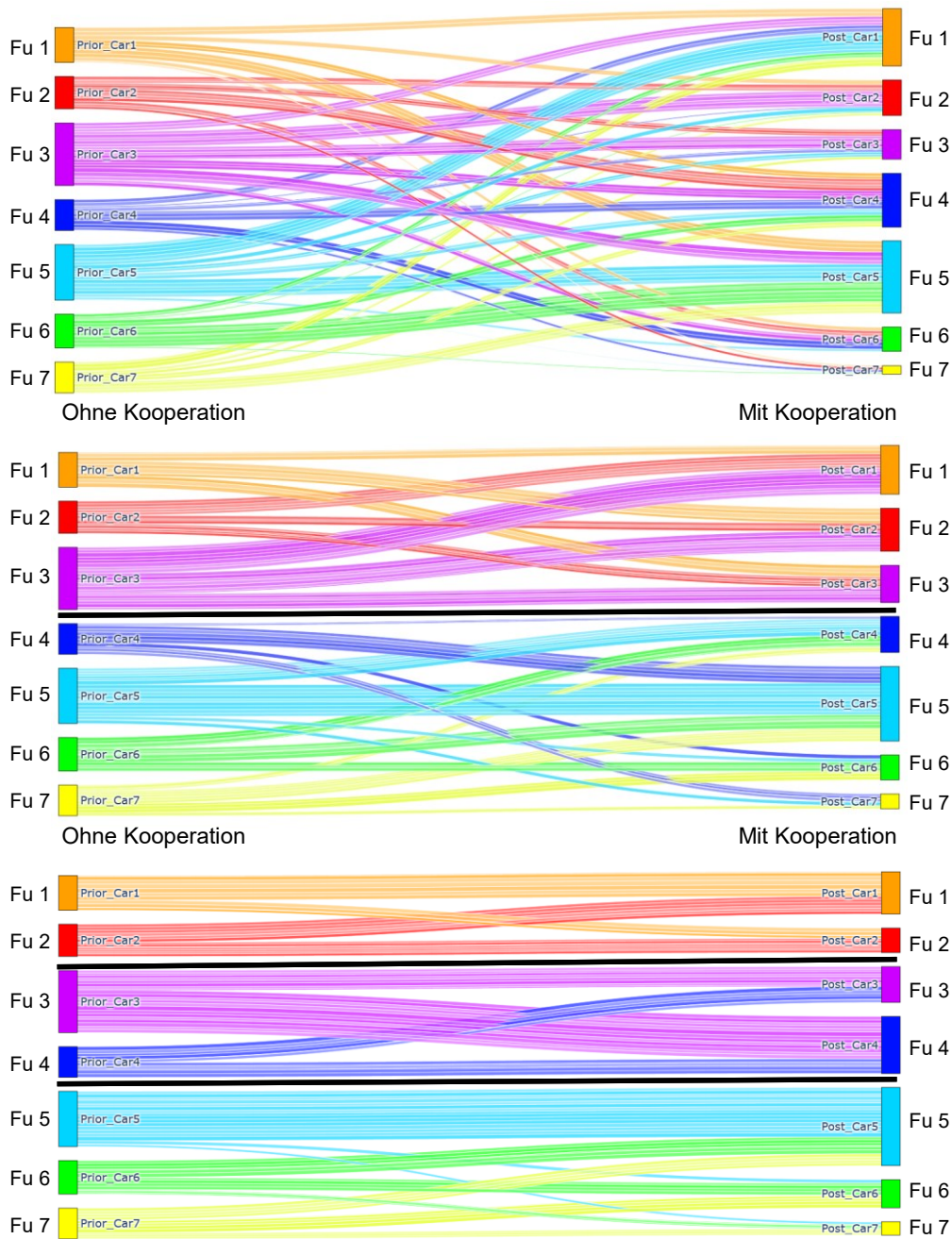


Abbildung 57: Kundenauftragsverteilung Fallstudie 2 Instanz g PIT 1+OMD 0,5 1TG, 2TG und 3TG (von oben nach unten)

8.4.5 Analyse der Fahrtentypen

Bezogen auf die Fahrtentypenverteilung gilt es bei Fallstudie 2 zu analysieren, wie oft Kombinationsfahrten mit Übernachtungen vorkommen und wie sich diese auf die Anzahl der anderen Fahrtentypen auswirken.

Die Möglichkeit für zweitägige Kombinationsfahrten sorgt bereits ohne Kooperation bei rpP T für eine höhere Anzahl an Kombinationsfahrten und dadurch für eine deutliche Steigerung des Profits im rpP T Fall (vgl. Abbildung 25). Es ist festzustellen, dass mit den praxisnahen Daten

und den zweitägigen Kombinationsfahrten in Fallstudie 2 deutlich mehr Kombinationsfahrten durchgeführt werden als in Fallstudie 1 (vgl. Abbildung 41). Dies führt dazu, dass weniger Kundenaufträge mit kostenintensiven Einzelfahrten durchgeführt werden. So werden im Durchschnitt über alle Fairnessmechanismen und none bei 1TG 48, bei 2TG 61 und bei 3TG 69 Kundenaufträge als Einzelfahrten durchgeführt, wohingegen die Anzahl an Einzelfahrten in Fallstudie 1 bei 69 (1TG), 77 (2TG) und 83 (3TG) liegt.

Für die verschiedenen Anteile an Exportkundenaufträgen (Instanzen a bis e 50 % Anteil, Instanzen f bis j 40 % Anteil) lässt sich feststellen, dass die Anzahl an Einzelfahrten bei allen Vertrauensgruppenaufteilungen und Fairnessmechanismen bei 50 Exportkundenaufträgen höher ist als bei 40 Exportkundenaufträgen (vgl. Abbildung 58). Dies lässt sich damit begründen, dass Exportkundenaufträge im Gegensatz zu Importkundenaufträgen nicht tageweise verschoben werden können und damit weniger zeitlich flexibel sind. Folglich finden bei nur 40 Exportkundenaufträgen mehr Kombinationsfahrten mit oder ohne Containerdrehen und mit oder ohne Übernachtung statt. Wie in Fallstudie 1 wird wieder deutlich, dass mit größeren Vertrauensgruppen mehr Kombinationsfahrten möglich sind.

Auch ist zu erkennen, dass deutlich mehr Kombinationsfahrten mit Übernachtung durchgeführt werden als solche ohne Übernachtung. Dies zeigt die wirtschaftliche Attraktivität und auch die Notwendigkeit, bei Kombinationsfahrten im norddeutschen Hinterland Übernachtungen zu ermöglichen.

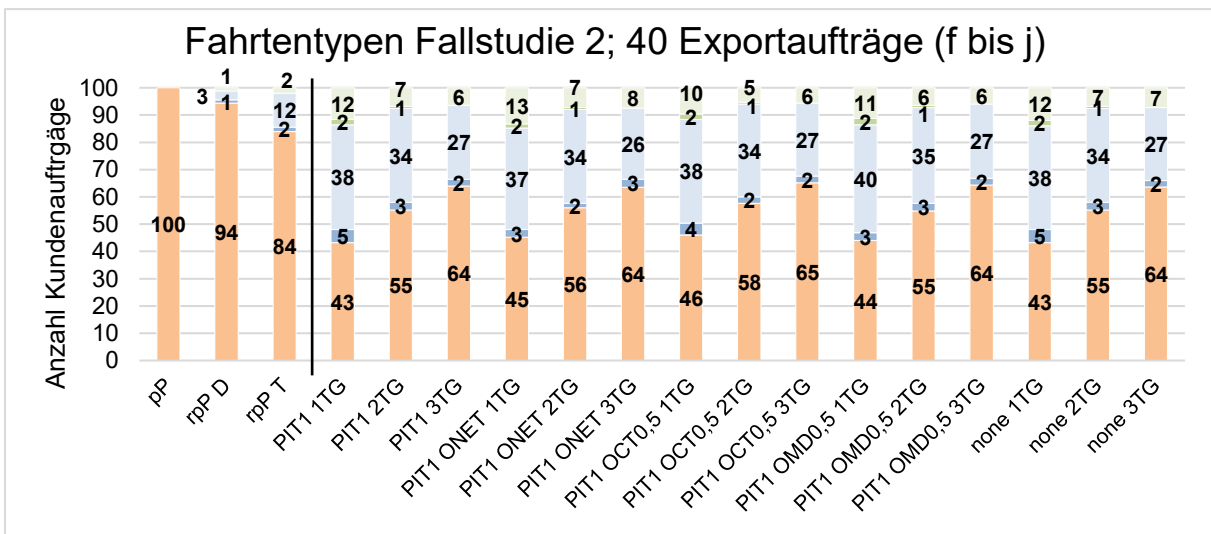
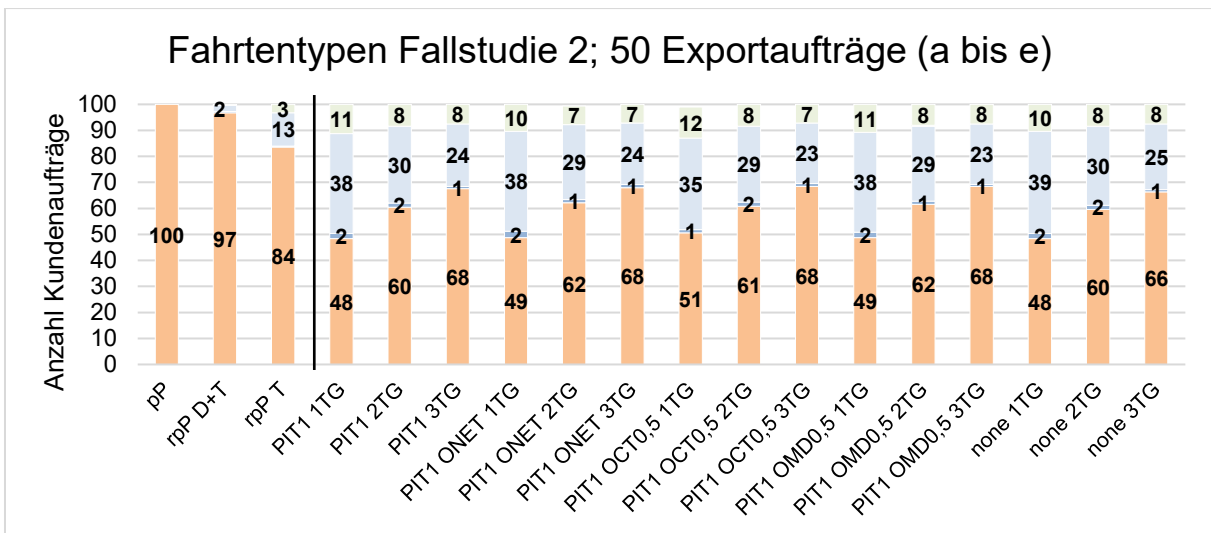
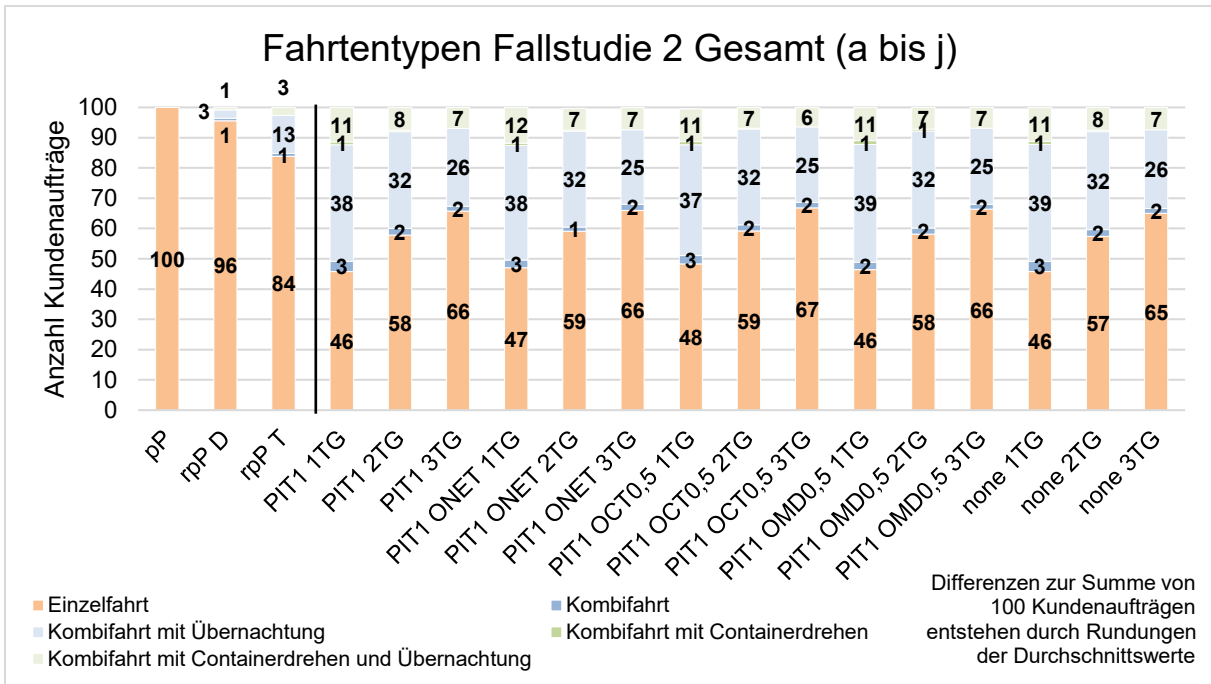


Abbildung 58: Fahrrentypen Fallstudie 2

Die Fahrtentypen haben Auswirkungen auf die Anzahl und die Länge der Leer- und Leercontainerfahrten (vgl. Kapitel 3.4). Die folgenden Abbildungen zeigen die durch horizontale Kooperation herbeigeführte Veränderung der Streckenlänge der Leer- und Leercontainerfahrten der Fuhrunternehmen. Abbildung 59 zeigt die prozentuale Streckenlängenveränderung, relativ bezogen auf den rpP T Fall (=100%). Abbildung 60 zeigt die absoluten Streckenlängen sowie zum Vergleich die durchschnittliche Gesamtlänge aller Vollcontainerfahrten (grün gestrichelt).

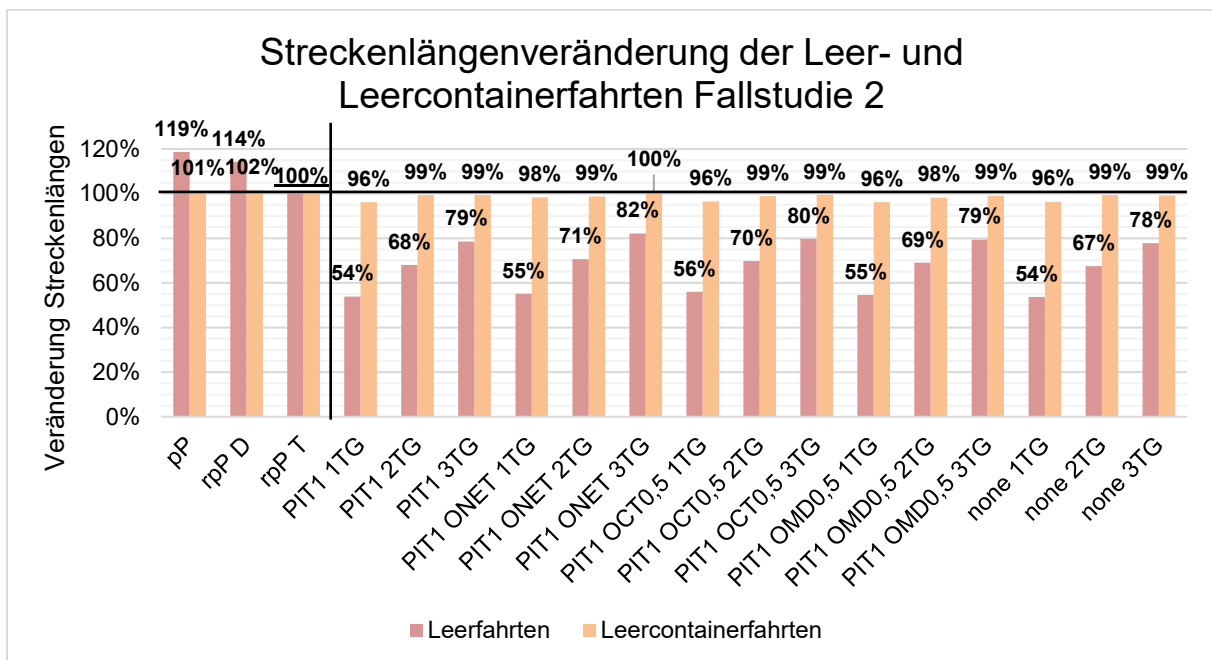


Abbildung 59: Streckenlängenveränderung der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 2

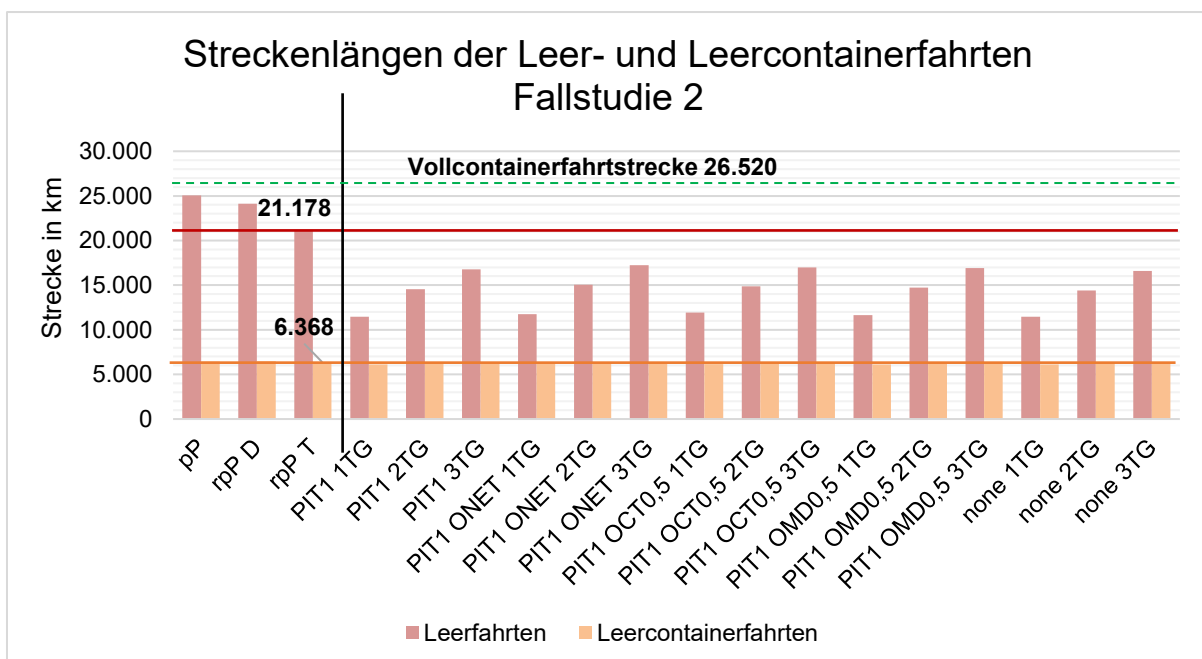


Abbildung 60: Streckenlängen der Leer- und Leercontainerfahrten in Fallstudie 2

Es ist erkennbar, dass bereits durch Kombinationsfahrten ohne Kooperation (rpP T) die Länge der Leerfahrten und im geringeren Maße auch die Länge der Leercontainerfahrten im

Vergleich zum pP Fall sinken. Genauso wie in Fallstudie 1 gilt, je größer die Vertrauensgruppe ist, desto stärker sinken Leer- und – in abgeschwächter Form – auch Leercontainerfahrten. So sinkt die Länge der Leerfahrten bei 1TG um bis zu 46 % und bei 3TG um bis zu 22 %. Die Länge der Leercontainerfahrten sinkt um bis zu 4 % bei 1TG und lediglich um maximal 1 % bei 3TG. Die konkrete Kombination von Fairnessmechanismen hat geringe Auswirkungen auf die Reduktion der Leer- und Leercontainerfahrtenstreckenlänge. Abbildung 60 zeigt, dass die geringe Reduktion der Länge der Leercontainerfahrten absolut auf deutlich geringerem Niveau erfolgt (s. gelbe Säulen), während die absoluten Streckenlängenreduktionen der Leerfahrten sehr deutlich zu erkennen sind (s. rote Säulen). Abbildung 61 vergleicht die über die zehn Instanzen durchschnittlichen Anteile der Streckenlängen für die Fälle rpP T und PIT 1 1TG. Es zeigt sich, dass bei PIT 1 1TG durch die geringere Länge an Leerfahrten vor allem der Streckenanteil der erlösgenerierenden Vollcontainerfahrten steigt. Die Steigerung des relativen Anteils an Leercontainerfahrten resultiert aus der absoluten geringfügigen Reduktion dieser. Insgesamt sinken durch Kooperation die Streckenlängen der Leerfahrten deutlich stärker als die der Leercontainerfahrten.

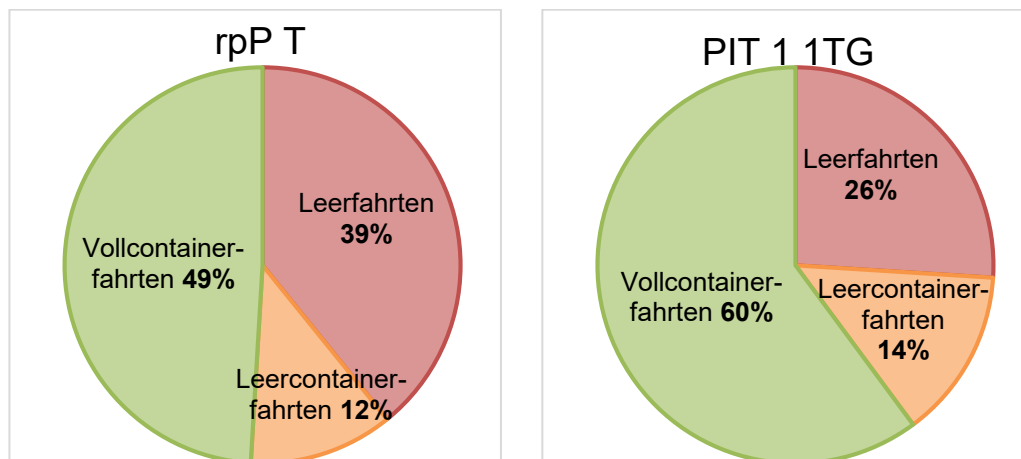


Abbildung 61: Anteil der Streckenlängen für rpP T und PIT1 1TG in Fallstudie 2

Diese Reduzierung der ausschließlich kostengenerierenden Fahrten führt zu Profitsteigerungen, die u. a. in Abbildung 47 dargestellt werden. Am Beispiel der beiden Kombinationsfahrten mit Containerdrehen in Abbildung 26 und Tabelle 12 lässt sich die starke Profitsteigerung aufgrund der Reduzierung der kostengenerierenden Fahrten erklären. Fuhrunternehmen 1 (Car1) führt in diesem Beispiel vier Kundenaufträge aus mit zwei Kombinationsfahrten mit Containerdrehen. Dabei kann die Länge der kostengenerierenden Leer- und Leercontainerfahrten im Vergleich zu vier Einzelfahrten um 70 % reduziert werden, sodass in dem konkreten Beispiel der Anteil der Vollcontainerfahrten an den Streckenlängen von 48 % auf 75 % ansteigt. In der Folge sinken die Kosten für die Ausführung der vier Kundenaufträge bei gleichbleibenden Erlösen um 23 %. Da die Kundendeckungsbeiträge der Fuhrunternehmen gering sind, wirkt sich diese Kostenreduktion erheblich auf den Profit aus. Der Profit steigt in diesem Beispiel der vier Kundenaufträge um 44 %. Dieses Beispiel zeigt, dass – wie erwartet – durch Kombinationsfahrten die kostengenerierenden Leer- und Leercontainerfahrten reduziert werden können und in der Folge der Profit steigt.

Die folgende Abbildung 62 zeigt die Veränderung der Anzahlen von Leer- und Leercontainerfahrten. Es ist festzustellen, dass die Anzahl der Leerfahrten deutlich weniger sinkt als die oben betrachtete Länge der Leerfahrten. Dies liegt daran, dass durch die Kooperation Einzelfahrten vermieden werden, die eine hohe Leerfahrtenlänge haben. Bei Einzelfahrten sind lange Leerfahrten vom LKW-Depot zum Leercontainerdepot im Hinterland oder umgekehrt notwendig (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 13). Dies trifft insbesondere für die Fallstudie 2 mit ihren weiter entfernten Kundenstandorten im Hinterland im Vergleich zu Fallstudie 1 zu.

Durch Kooperation können diese langen Leerfahrten vermieden werden, da nur noch zwischen zwei Leercontainerdepots im Hinterland sowie zwischen den Terminals und dem LKW-Depots Leerfahrten entstehen, sodass die Anzahl, aber vor allem die Länge der Leerfahrten sinkt. Insbesondere bei PIE-Kombinationsfahrten sinkt die Länge der Leerfahrten beträchtlich (vgl. linke Grafik Abbildung 15). Wenn zusätzlich das identische Leercontainerdepot für den Importkundenauftrag und den Exportkundenauftrag genutzt wird (direkte Kombinationsfahrt, vgl. Abbildung 14), ist zwangsläufig die Länge der Leerfahrt im identischen Leercontainerdepot 0. Allerdings wird dennoch die Anzahl der Leerfahrt im identischen Leercontainerdepot mitgezählt. Im Fall von Kombinationsfahrten mit Containerdrehen entsteht keine Leerfahrt zwischen den Kundenaufträgen, was die Anzahl der Leerfahrten reduziert (vgl. Abbildung 16).

Die Leercontainerfahrten können sowohl in ihrer Länge als auch in ihrer Anzahl nicht so stark verringert werden. Das liegt daran, dass es nicht möglich ist, Leercontainerfahrten bei Kombinationsfahrten ohne Containerdrehen einzusparen. Hinzu kommt, dass bei Kombinationsfahrten mit Containerdrehen zwar die Anzahl an Leercontainerfahrten reduziert wird, dafür allerdings meist eine längere Leercontainerfahrt im Hinterland erfolgt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die Reduktion der kostengenerierenden Fahrten – wie erwartet – der Profit gesteigert werden kann.

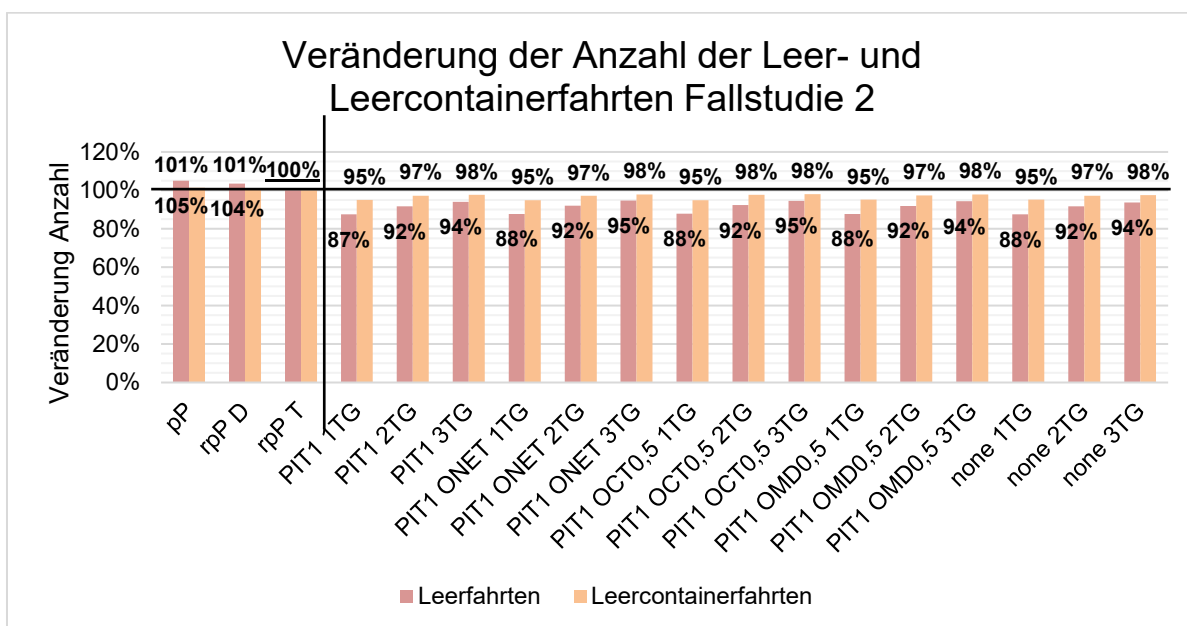


Abbildung 62: Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten Fallstudie 2

8.4.6 Parametervariation der Containerdrehpauschale

Auch für die Instanzen der Fallstudie 2 wird wieder der Parameter der Containerdrehpauschale C_p variiert. Es ist im Vergleich zu Fallstudie 1 (vgl. Abbildung 46) auffallend, dass bei einer Containerdrehpauschale von $C_p = 100$ immer noch eine geringe Anzahl an Kombinationsfahrten mit Containerdrehen durchgeführt wird (vgl. Abbildung 63). Das legt den Schluss nahe, dass Kombinationsfahrten mit Übernachtung und Containerdrehen auch bei einer hohen Containerdrehpauschale teilweise noch attraktiv sind. Hervorzuheben ist, dass, anders als bei Fallstudie 1, im Fall von $C_p = 100$, die geringe Anzahl an Kombinationsfahrten mit Containerdrehen bei 1TG nicht durch Einzelfahrten, sondern durch Kombinationsfahrten mit Übernachtungen ersetzt wird. Im Gegensatz dazu entstehen bei kleineren Vertrauensgruppeneinteilungen, allerdings durch den Wegfall von Kombinationsfahrten mit Containerdrehen, mehr Einzelfahrten.

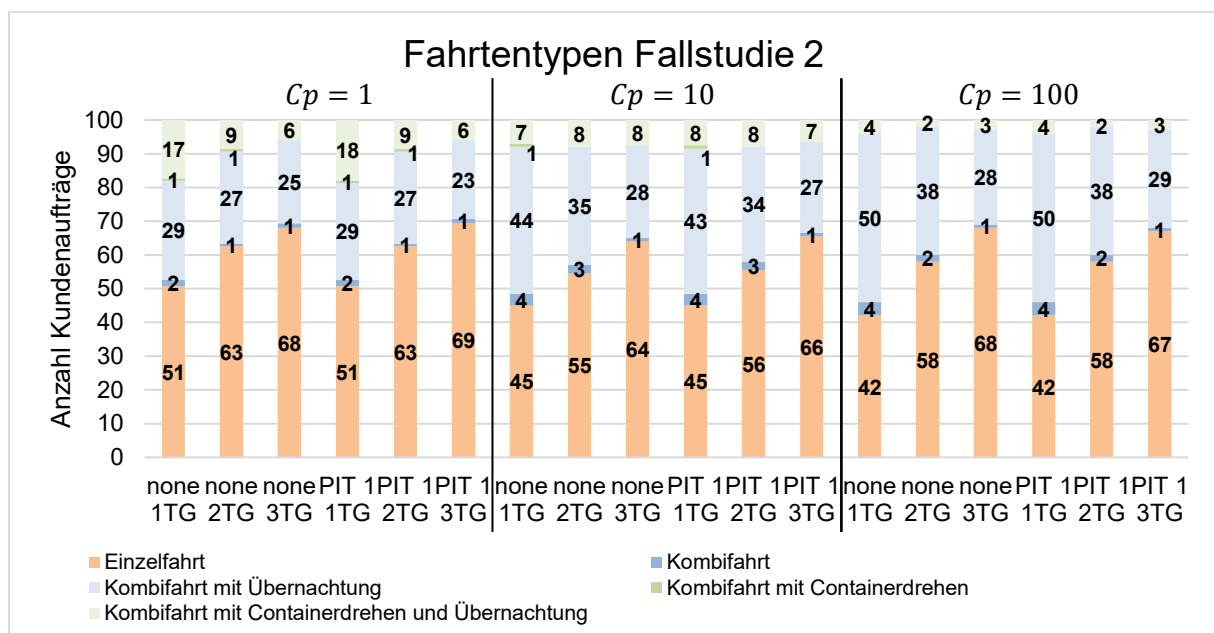


Abbildung 63: Fahrtentypen abhängig von der Containerdrehpauschale Fallstudie 2

8.4.7 Zwischenfazit Fallstudie 2

Die Fallstudie 2 unterscheidet sich von Fallstudie 1 bzgl. der Hinterland- und Leercontainerdepotstandorte, die auf anonymisierten Daten eines Hamburger Fuhrunternehmens basieren. Weitere Unterschiede bestehen bezüglich der zweitägigen Kombinationsfahrten, der fünf Instanzen mit 40 statt 50 Exportkundenaufträgen und des ausschließlich niedrigen Verhandlungsfaktorbereiches. Die Zielsetzung ist in beiden Fallstudien identisch. Es werden folgende Ergebnisse festgestellt:

Die Profitsteigerungen in Fallstudie 2 sind deutlich höher als in Fallstudie 1 aufgrund der Nutzung des ausschließlich niedrigen Verhandlungsfaktorbereiches und der teilweise geringeren Anzahl an Exportkundenaufträgen. Auch hier gilt wieder, je größer die Vertrauensgruppe, desto größer ist die Gesamtprofitsteigerung und die individuelle Profitsteigerung.

Tagesbasierte Fairnessmechanismen (PIDT und PIUDT) erreichen auch in Fallstudie 2 eine geringere Gesamtprofitsteigerung im Vergleich zu den wochenbasierten Fairnessmechanismen (PIT und PIUT), und zwar unabhängig von der Vertrauensgruppenaufteilung und der Anzahl an Exportkundenaufträgen.

Bei wochenbasierten Fairnessmechanismen beträgt die Gesamtprofitsteigerung bei einer großen Vertrauensgruppe (1TG) zwischen 58 % (ONET) und 67 % (PIT 1) und bei drei kleinen Vertrauensgruppen (3TG) zwischen 10 % (PIUT 1) und 30 % (PIT 1). Im Gegensatz dazu erreicht die Gesamtprofitsteigerung ohne Fairnessmechanismus (none) die Werte von 67,3 % (1TG) bzw. 31 % (3TG). Der Unterschied zwischen none und PIT 1 liegt also bei ca. 1 Prozentpunkt. Der Fairnessmechanismus PIT 1 schränkt den maximal möglichen Gesamtprofit also kaum ein. Dieser hat allerdings unabhängig von der Vertrauensgruppenaufteilung den Nachteil, dass er lediglich den Profit und nicht die Anzahl der Kundenaufträge berücksichtigt. Daher ist PIT 1 in Kombination mit kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismen (ONET, OCT und OMD) zu bevorzugen.

Eine individuelle garantierte Profitsteigerung um mindestens 10 % ist trotz der höheren Gesamtprofitsteigerungen in Fallstudie 2 nur bei großen Vertrauensgruppen (1TG) möglich und bei kleinen Vertrauensgruppen (3TG) in der Mehrzahl der Instanzen (7 von 10) nicht erreichbar.

Hervorzuheben ist der Einfluss eines geringeren Anteils an Exportkundenaufträgen in fünf der zehn Instanzen der Fallstudie 2. Es lässt sich erkennen, dass die erhöhte Flexibilität von mehr Importkundenaufträgen, die tageweise verschoben werden können, zu einer höheren Profitsteigerung führt. So liegen bei 50 Exportkundenaufträgen die Gesamtprofitsteigerungen bei wochenbasierten Fairnessmechanismen bei 1TG zwischen 44 % (PIUT 1) und 53 % (PIT 1) und bei 3TG zwischen 7 % (PIUT 1) und 25 % (PIT 1 oder OCT 0,5). Bei 40 Exportkundenaufträgen werden Gesamtprofitsteigerungen bei wochenbasierten Fairnessmechanismen bei 1TG von 70 % (ONET) bis 81 % (PIT 1) und bei 3TG von 14 % (PIUT 1) bis 35 % (PIT 1) erreicht.

Außerdem hat die mögliche Durchführung von zweitägigen Kombinationsfahrten einen großen Einfluss auf die Fahrtentypenverteilung und die Profitsteigerung. Kombinationsfahrten mit Übernachtung werden häufiger durchgeführt als solche ohne Übernachtung und sorgen dafür, dass bei einer Vertrauensgruppe (1TG) der Anteil der Kundenaufträge, der per kostenintensiver Einzelfahrt ausgeführt wird, bei allen wochenbasierten Fairnessmechanismen unter 50 % fällt. Mit Blick auf die gewünschte Reduktion an Leer- und Leercontainerfahrten ist festzustellen, dass vor allem die Länge der Leerfahrten durch Kooperation deutlich reduziert werden kann.

Ein differenzierter Vergleich der Ergebnisse von Fallstudie 1 mit Fallstudie 2 in Bezug auf die Gesamtprofitsteigerung und die Fahrtentypenverteilung folgt im nächsten Kapitel 8.5.

8.5 Vergleich Fallstudie 1 und Fallstudie 2

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Ergebnisse der Fallstudie 1 und Fallstudie 2 analysiert werden, folgt in diesem Abschnitt der Vergleich der Ergebnisse der beiden Fallstudien. Zunächst bedarf es der Klärung, inwieweit ein Vergleich aufgrund von Unterschieden in der Datengrundlage möglich ist. Anschließend werden die Gemeinsamkeiten identifiziert und Unterschiede erläutert.

Ein Vergleich der beiden Fallstudien ist aus folgenden Gründen sinnvoll und möglich: Beide Fallstudien nutzen zehn Instanzen und je sieben Fuhrunternehmen mit ihren Depots im Hamburger Hafen. Fallstudie 1 umfasst auf Recherchebasis ausgewählte Hinterlandstandorte, für die Kundenaufträge generiert werden. Fallstudie 2 beruht auf anonymisierten realen Daten der Hinterlandstandorte. Der Bereich der Kostensätze, innerhalb derer die einzelnen Sätze zufällig zugeteilt werden, ist in beiden Fallstudien gleich. Die Erlössätze sind ebenfalls in beiden Fallstudien identisch. Kosten- und Erlössätze wurden hinsichtlich ihrer Höhe mit einem Experten aus der Praxis validiert. Für die Fallstudien sind zwei Verhandlungsfaktorbereiche, ein hoher und ein niedriger Bereich, zu berücksichtigen. In fünf Instanzen wird in Fallstudie 1 ein hoher Verhandlungsfaktorbereich zugrunde gelegt, der einen Einfluss auf den Erlös des Kundenauftrages hat. Für die übrigen fünf Instanzen der Fallstudie 1 und die zehn Instanzen der Fallstudie 2 wird der niedrige Verhandlungsfaktorbereich genutzt. Fallstudie 2 unterscheidet sich von Fallstudie 1 hinsichtlich der Möglichkeit, zweitägige Kombinationsfahrten mit Übernachtung durchzuführen. Ein weiterer Unterschied besteht im Verhältnis zwischen Import- und Exportkundaufträgen. Dieses beträgt für alle Instanzen in Fallstudie 1 und für fünf Instanzen in Fallstudie 2 50:50. Weitere fünf Instanzen in Fallstudie 2 haben ein I:E Verhältnis von 60:40, also 60 Import- und 40 Exportkundaufträge.

In beiden Fallstudien werden alle Fairnessmechanismen mit allen Vertrauensgruppenaufteilungen berechnet. Angesichts der unterschiedlichen Datengrundlage stellt sich die Frage, welche Auswirkungen auf die Ergebnisse bestehen.

Für beide Fallstudien ergeben sich Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen. Diese Gemeinsamkeiten sprechen für eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Mit wachsender Größe der Vertrauensgruppe steigen der Gesamtprofit und der durchschnittliche individuelle Profit. Bereits eine kleine Vertrauensgruppe von zwei oder drei kooperierenden Fuhrunternehmen (3TG) erzielt aber schon eine erkennbare Profitsteigerung. Bei den Fairnessmechanismen lässt sich feststellen, dass wochenorientierte Fairnessmechanismen einen höheren Profit erzielen als tagesorientierte. Dagegen erzielen Fairnessmechanismen, die die absolute Profitsteigerung der Fuhrunternehmen gleichmäßig auf die Kooperationsteilnehmer verteilen (PIUT und PIUDT), geringere Gesamtprofitsteigerungen. Sie weisen aber im Sinne der gewünschten Fairness weniger Abstand zwischen der maximalen und minimalen individuellen Profitsteigerung der teilnehmenden Fuhrunternehmen auf.

Fairnessmechanismen, die ausschließlich auftragsorientiert sind, vernachlässigen den Profit mit der Folge, dass vor allem in Fallstudie 1 einige Fuhrunternehmen Verluste erwirtschaften. Diese Mechanismen sind, isoliert angewandt, für eine langfristig stabile Kooperation

ungeeignet. Ebenso lässt sich für beide Fallstudien feststellen, dass eine Kooperation ohne Fairnessmechanismus (none), nicht zielführend ist. Das wirtschaftlich stärkste Fuhrunternehmen mit geringen Kostensätzen, vielen eigenen Kundenaufträgen und hoher Kapazität profitiert bei none am stärksten, während es für andere Fuhrunternehmen ungünstig ist. Zudem ist festzuhalten, dass der Gesamtprofit bei der Nutzung des einfachen Fairnessmechanismus PIT marginal geringer ist als bei none. Daher ist die Kooperation als fair zu bezeichnen, weil eine Profitsteigerung für jedes Fuhrunternehmen sichergestellt wird. Fairnessmechanismus-Kombinationen, die sowohl den Profit als auch die Kundenauftragsverteilung berücksichtigen, erzielen die fairsten Ergebnisse und sind somit für eine langfristig stabile Kooperation zu empfehlen. Eine Variation des Alpha-Faktors auf 1,1 für den Fairnessmechanismus PIT (also die Forderung einer individuellen Profitsteigerung von mindestens 10 %) bringt insbesondere für kleine Vertrauensgruppenaufteilungen selten eine Lösung. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Gesamtprofitsteigerung und die individuelle Profitsteigerung stärker von der Vertrauensgruppenaufteilung als von dem Fairnessmechanismus mit den entsprechenden Kombinationen beeinflusst wird.

Die Instanzen der Fallstudie 1 a-e und die Instanzen der Fallstudie 2 a-e sind aufgrund des gleichen Anteils an Exportkundenaufträgen von 50 % und dem gleichen niedrigen VHF-Bereich gut vergleichbar. Es zeigt sich, dass trotz der Unterschiede bezüglich der Hinterlandkundenstandorte und der Möglichkeit der zweitägigen Kombinationsfahrten, die durchschnittliche Gesamtprofitsteigerung je Fairnessmechanismus und Vertrauensgruppenaufteilung in der Mehrzahl der Fälle ähnlich ist (vgl. Abbildung 64). Es ist allerdings nicht möglich, die in Prozentpunkten geringen Abweichungen in den Ergebnissen direkt einem dieser Unterschiede zuzuordnen. Zum Beispiel kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die um vier Prozentpunkte höhere Profitsteigerung bei PIT 1 (1TG) in Fallstudie 2 a-e im Vergleich zur Fallstudie 1 a-e auf die längeren Fahrtstrecken oder auf die Möglichkeit zweitägiger Kombinationsfahrten zurückzuführen ist.

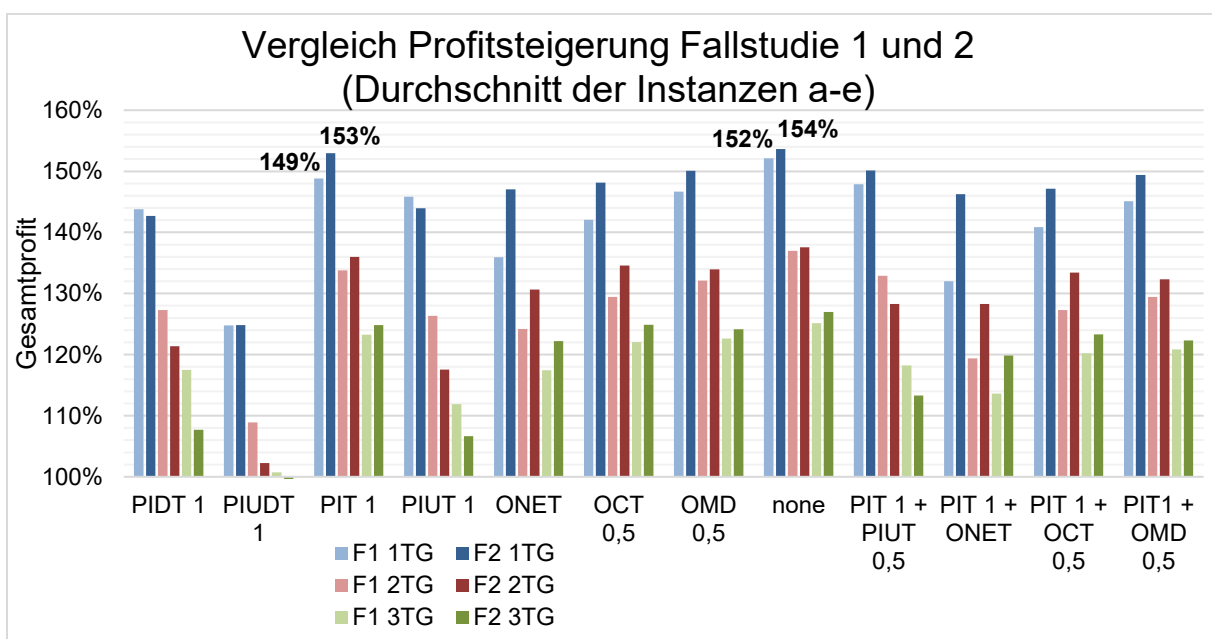


Abbildung 64: Vergleich Fallstudie 1 und 2 Instanzen a-e mit Exportanteil 50 % und niedrigem VHF-Bereich

Neben den o. g. geringfügigen Unterschieden in der Gesamtprofitsteigerung, lassen sich weitere Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Fallstudien aufzeigen. Unterschiede in der Fahrtentypenverteilung sind zurückzuführen auf die Möglichkeit der zweitägigen Kombinationsfahrt in Fallstudie 2. In Abbildung 65 werden neben der Fahrtentypenverteilung der PriorProfits (pP, rpP D, rpP T) auch die durchschnittliche Fahrtentypenverteilung bei Aktivierung einer der zwölf Fairnessmechanismen (bzw. Fairnessmechanismuskombinationen), inklusive none dargestellt. In Fallstudie 2 finden aufgrund der zweitägigen Kombinationsfahrten in Zusammenhang mit den größeren Abständen der Hinterlandstandorte kaum noch eintägige Kombinationsfahrten statt. Insgesamt geht auch die Anzahl der Kundenaufträge zurück, die per kostenintensiver Einzelfahrt durchgeführt werden. Dies gilt für alle Fairnessmechanismen und deren Kombinationen. Im arithmetischen Mittel erfolgen in Fallstudie 1 bei 1TG über alle Fairnessmechanismen 69 Einzelfahrten. Demgegenüber erfolgen bei Fallstudie 2 48 Einzelfahrten. Das zeigt deutlich, dass zweitägige Kombinationsfahrten im geografisch nahen Hinterland des Hamburger Hafens sehr attraktiv sind, um den Profit zu steigern.

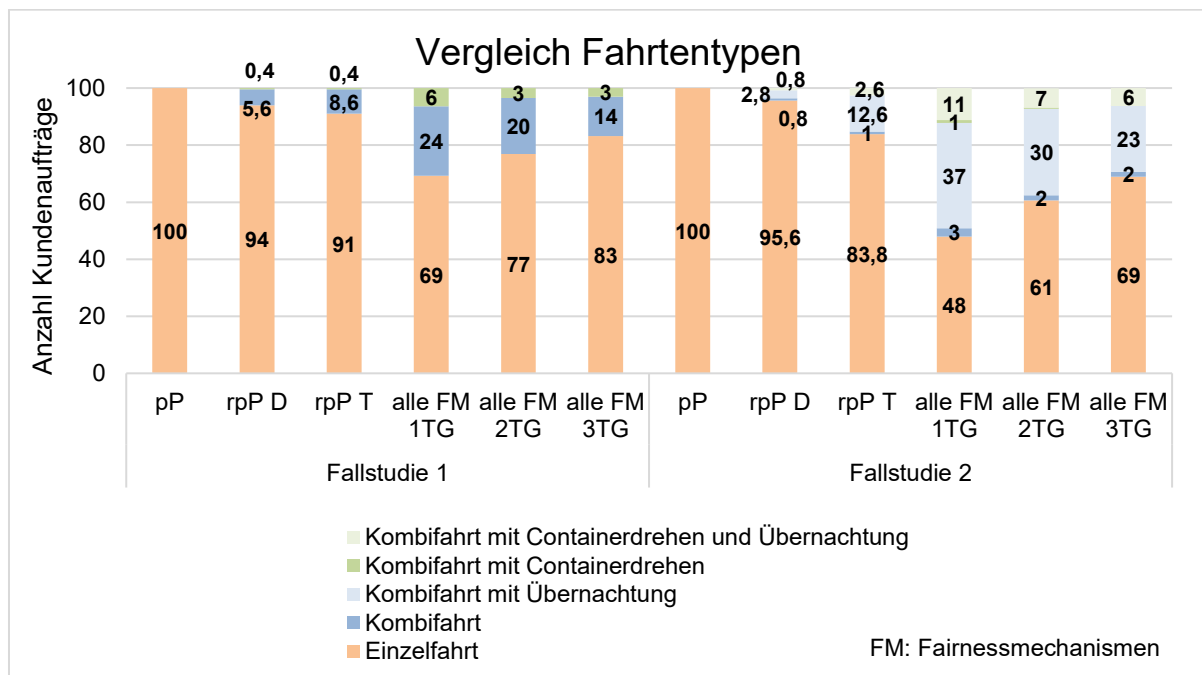


Abbildung 65: Vergleich Fahrtentypen Fallstudie 1 und 2

Die Länge und Anzahl der Leer- und Leercontainerfahrten sinken durch die Kooperation in beiden Fallstudien, wobei die Länge der Leercontainerfahrten in geringerem Maße sinkt. Grundsätzlich gilt, dass je größer die Vertrauensgruppe ist, desto stärker ist der Rückgang. Auffällig ist, dass in Fallstudie 2 der Rückgang der Leerfahrtenstreckenlängen deutlich größer ist. Dies ist erklärbar durch die in Fallstudie 2 zugrundeliegenden längeren Distanzen zwischen dem Hafen und den Hinterlandstandorten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass trotz der Unterschiede zwischen den beiden Fallstudien im Hinblick auf das mathematische Modell und den Datensatz, die Ergebnisse in vielen Aspekten ähnlich sind. Dies betrifft bei den direkt vergleichbaren Instanzen a bis e auch die Gesamtprofitsteigerung. Große Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Studien,

wie dies z. B. bei der Fahrttypenverteilung der Fall ist, lassen sich anhand der Unterschiede im mathematischen Modell und im Datensatz erklären. Es lässt sich für beide Fallstudien feststellen, dass sich Fairnessmechanismen, die ausschließlich profit- oder kundenauftragsorientiert sind, nicht für eine langfristig stabile Kooperation eignen. Von Vorteil sind hingegen Fairnessmechanismus-Kombinationen von PIT 1 zusammen mit einem kundenauftragsorientierten Fairnessmechanismus.

Die Erkenntnisse, die sich aus den o. g. Ergebnissen ableiten lassen, werden im Fazit (Kapitel 10) vorgestellt.

8.6 Mehrfache Zielsetzung

In den vorangegangenen Analysen wurde festgestellt, dass die Kombination von PIT 1 mit OCT 0,5 zu Ergebnissen mit einer gleichmäßigen Verteilung von Profit und Kundenaufträgen führt. Es stellt sich hier die Frage, wie sich die Profitsteigerung verändert, wenn das Alpha bei OCT (in Kombination mit PIT 1), das den Anteil der eigenen ausgeführten Aufträge beeinflusst, variiert wird. Im Folgenden wird der Zielkonflikt aufgezeigt, der zwischen Profitmaximierung und der Maximierung der Ausführung der eigenen Kundenaufträge besteht. Diese Thematik wird für die Fallstudie 2 im folgenden Kapitel 8.6.1 bewertet.

Vor dem Hintergrund des Klimaschutzes ist die Minimierung von Emissionen im Transport von Bedeutung (vgl. Kapitel 2.4.1). Dies wird mit der Minimierung des Kraftstoffverbrauches umgesetzt und zusammen mit der Profitmaximierung unter dem Aspekt einer mehrfachen Zielsetzung analysiert. Die Auswirkungen einer solchen Zielsetzung werden für Fallstudie 1 und für Fallstudie 2 in Kapitel 8.6.2 vorgestellt.

8.6.1 Minimierung der Auftragsweitergabe

Ein wesentliches Risiko von Kooperation ist der Verlust von Kundenaufträgen an andere Fuhrunternehmen. Der Fairnessmechanismus OCT, der für diese Problematik entwickelt wurde, garantiert, dass bei einer Kooperation ein bestimmter Anteil an eigenen Kundenaufträgen (erfasst durch den Alpha-Faktor) beim Kundenauftragseigentümer verbleibt und nicht von einem anderen Fuhrunternehmen ausgeführt wird.

Bei OCT 1 findet keine Kooperation statt, da alle Kundenaufträge beim jeweiligen Kundenauftragseigentümer verbleiben. Das bedeutet, dass die Zielsetzung der Gesamtprofitmaximierung bei Kooperation, die ja den Austausch von Kundenaufträgen erfordert, im Zielkonflikt zu OCT steht. Gansterer und Hartl (2018b) identifizieren diesen Zielkonflikt bei Kooperation zwischen möglichst geringen Kosten (Beispiel Gansterer/Hartl; hier: Profitmaximierung) und möglichst wenig Veränderung für die Fuhrunternehmen im Vergleich zur individuellen Auftragsausführung ohne Kooperation. Die folgenden Ausführungen zu dieser Thematik leisten einen Beitrag, um diesen Zielkonflikt zu analysieren.

Um den beschriebenen Zielkonflikt genauer zu analysieren, wird das Alpha von OCT zwischen 0,1 und 0,9 in Schritten der Länge 0,1 variiert, wobei der Fairnessmechanismus OCT immer

in Kombination mit PIT 1 betrachtet wird. Ein Alpha-Faktor von 0,1 bedeutet, dass jedes Fuhrunternehmen mindestens 10 % seiner eigenen Kundenaufträge bei Kooperation selbst ausführt. Die Lösung von $\alpha = 0$ bei OCT entspricht dem PIT 1 Fall (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 49). Die Lösung von $\alpha = 1$ entspricht dem rpP T Fall (keine Kooperation). Diese Alpha-Variationen werden für alle Vertrauensgruppenaufteilungen und Instanzen der Fallstudie 2 durchgeführt. Die Abbildung 66 zeigt die Entwicklung der Gesamtprofitsteigerung bei steigendem Alpha von OCT, differenziert nach Exportkundenauftragsanteil (E5:15 bzw. E4:16) und Vertrauensgruppenaufteilung (1TG, 2TG, 3TG), also in sechs Fällen. Zur besseren Lesbarkeit werden die Datenpunkte der einzelnen Lösungen je Fall als Trendlinie miteinander verbunden, wenngleich die Werte zwischen zwei dargestellten Werten nicht zwingend auf dieser Linie liegen müssen und nicht bestimmt wurden. Wie bereits die Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen, ist grundsätzlich die Profitsteigerung bei größerer Vertrauensgruppe und bei geringerem Exportkundenauftragsanteil höher. Die Werte von $\alpha = 0$ (entspricht PIT 1), $\alpha = 0,5$ (entspricht PIT 1+OCT 0,5) und $\alpha = 1$ (entspricht rpP T) sind auch in o. g. Abbildungen in den jeweiligen Säulen ablesbar.

Es lässt sich feststellen, dass mit garantierter steigender Anzahl an eigenen durchgeführten Aufträgen die Profitsteigerung geringer ausfällt. Es zeigt sich anhand der Abbildung 66 für alle sechs untersuchten Fälle, dass ein OCT-Anteil von bis zu 50 % ($\alpha = 0,5$) die sechs untersuchten Gesamtprofite im Vergleich zum Fall $\alpha = 0$ (entspricht PIT 1) nur geringfügig reduziert. Ab einem OCT-Anteil von $\alpha = 0,7$ verringern sich die Profitsteigerungen deutlich. Bei größer werdendem Alpha im Bereich 0,5 bis 1 führt jede Erhöhung des Alphas zu zunehmender Reduktion der Profitsteigerung, ablesbar an der negativen Steigung der Trendlinie. Die Opportunitätskosten steigen folglich bei höher werdendem Alpha, d. h., dem Wunsch mehr eigene Kundenaufträge auszuführen, an. Für die Fuhrunternehmen bedeutet dies, dass ein Anteil von 50 % eigener Kundenaufträge in der Ausführung sinnvoll ist. Ein gewünschter Anteil über 70 % sollte sehr gut überlegt werden, da die durch Kooperation erreichbare Profitsteigerung bei über 70% eigener Kundenaufträge deutlich geringer ausfällt.

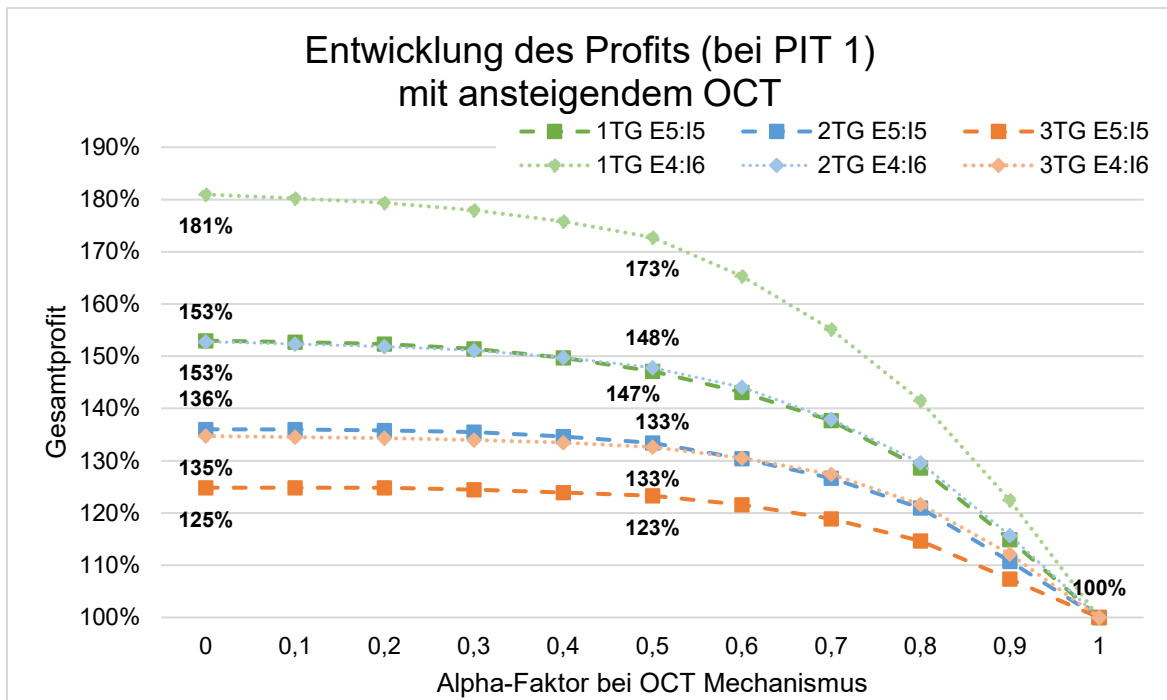


Abbildung 66: Mehrfache Zielsetzung: Entwicklung des Profits bei ansteigendem Alpha bei OCT in Kombination mit PIT 1

8.6.2 Minimierung des Verbrauchs

Die Relevanz für die Minimierung von Emissionen im Transport bzw. in der Logistik wird in der Literatur aufgrund des notwendigen Klimaschutzes intensiv diskutiert (vgl. Kapitel 2.4.1). Das mathematische Modell wird hierzu erweitert (vgl. Kapitel 7.2.6), um den Kraftstoffverbrauch, der unmittelbar mit den Emissionen zusammenhängt, zu berücksichtigen. Dabei ist der Verbrauch je km beim LKW davon abhängig, welcher Containertyp beladen oder leer transportiert wird bzw. ob es sich um eine Leerfahrt handelt (vgl. Kapitel 8.1.3).

Exemplarisch wird für die Beispielinstantz j der Fallstudie 1 (hoher VHF-Bereich) das Ziel der Verbrauchsminimierung bei Aktivierung des Fairnessmechanismus PIT 1 und der Vertrauensgruppeneinteilung 1TG, betrachtet. Die Abbildung 67 zeigt den Zielraum der Ziele *Verbrauchsminimierung* und *Profitmaximierung*. Die jeweiligen individuell optimalen Lösungen bei Verfolgung eines der Ziele sind unterschiedlich. So ist der Verbrauch in der MaxProfit Lösung (blau) höher als in der MinVerbrauch Lösung (rot) und der Profit ist in der MinVerbrauch Lösung geringer als in der MaxProfit Lösung. Der Idealzielpunkt, also die Lösung mit dem maximalen Profit (12.674 €) und dem minimalen Verbrauch (6.598 L) ist nicht realisierbar. Es liegt, wie zu erwarten, ein Zielkonflikt vor.

Um pareto-optimale Zwischenlösungen zu generieren, die dem Idealzielpunkt möglichst nahekommen sollen, wird eine Paretofront entwickelt. Hierzu wird sowohl das Ziel Profitmaximierung durch eine verbrauchsbeschränkende Restriktion ergänzt (zwischen 6.640 bis 6.600 L) und fünfmal gelöst, sowie das Ziel des minimierten Verbrauchs durch eine Mindestprofit Restriktion ergänzt (zwischen 11.000 und 12.500 €) und siebenmal gelöst (vgl. Abbildung 67). Dabei ist festzustellen, dass die verbrauchsminimierende Lösung, die einen

Profit von mindestens 12.500 € erzeugt, nur geringfügig mehr Kraftstoffverbrauch (nämlich weniger als 10 Liter zusätzlich) verursacht als die MinVerbrauchs-Lösung.

Das lässt den Schluss zu, dass in der MinVerbrauchs-Lösung der Profit möglicherweise zu stark reduziert ist. Tatsächlich ist es so, dass die verbrauchsm minimale optimale Lösung hohe Zeitkosten entstehen lassen kann. So führt in dieser Beispielinstantz Fuhrunternehmen 7 am Tag 4 einen einzigen Kundenauftrag als Einzelfahrt pünktlich, d. h. innerhalb des weichen Zeitfensters durch, sodass keine Verspätungs- oder Verfrühungskosten entstehen sollten. Gleichwohl liegt eine Lösung vor, die dem Fuhrunternehmen an diesem Tag ca. 400 € Zeitkosten vom Profit abzieht. Diese unnötigen Zeitkosten entstehen bei der Nutzung der linearisierten Restriktionen 7.21 bis 7.26 im mathematischen Modell. Denn dabei ist es möglich, dass Zeitkosten D_r^t einem Fuhrunternehmen zugeordnet werden, obwohl diese nicht anfallen sollten. Dies ist der Fall, wenn $x_{nr}^t = 0$, $y_{nmr}^t = 0$ oder $\hat{y}_{nmr}^t = 0$ ist. Das geschieht allerdings nur dann, wenn nicht nach maximalem Profit (inkl. minimaler Zeitkosten), sondern nach minimalem Verbrauch optimiert wird. Denn nur in diesem Fall spielt der Profit für die Optimierung eine untergeordnete Rolle.

Die Analyse zeigt, dass der Zielkonflikt allerdings unter Berücksichtigung der Gesamtsumme des Profits bzw. Verbrauches nur gering ausgeprägt ist. Da kurze Transportwege sowohl den Profit maximieren (aufgrund geringer Kosten) als auch den Verbrauch minimieren (aufgrund kürzerer Fahrtstrecken), wirken beide Ziele im Wesentlichen in die gleiche Richtung.

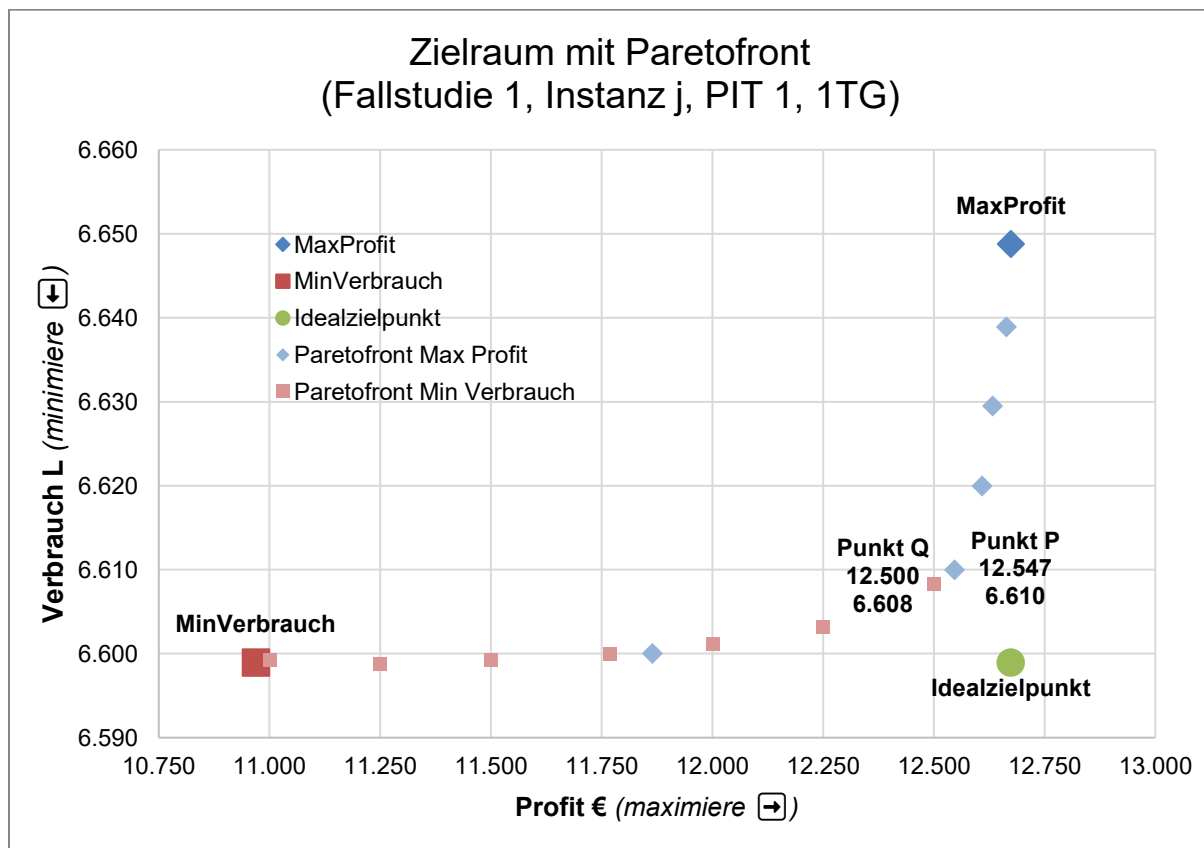


Abbildung 67: Zielraum mit Paretofront zum Verbrauchs- und Profitziel für Fallstudie 1 Instanz j

Innerhalb des gering ausgeprägten Zielkonfliktes bestehen nur wenige attraktive Kompromisslösungen, die dem Idealzielpunkt sehr nahekommen. Für die meisten MinVerbrauch Lösungen wird durch den Profitverzicht der Verbrauch nur geringfügig reduziert, u.a. aufgrund o. g. Problematik. Für die MaxProfit Lösungen steigt der Verbrauch stark an, ohne dass der Profit übermäßig steigt. Zu den Kompromisslösungen, die dicht am Idealzielpunkt liegen, zählen z. B. die Lösungen am Punkt Q (12.500 €; 6.608 L) und Punkt P (12.547 €; 6.610 L). Grundsätzlich gilt, dass sich der Nutzer, also z. B. das Fuhrunternehmen, für eine der möglichen Lösungen entscheiden muss.

Ein Vergleich zwischen der MaxProfit Lösung und der Lösung von Punkt P zeigt, dass die Länge der Leerfahrten um 0,5 % und die Länge der Leercontainerfahrten um 3,3 % sinken, sodass der Kraftstoffverbrauch von 6.649 L um 0,6 % auf 6.610 L fällt. Allerdings sinkt der Gesamtprofit um 1 %. Die Unterschiede zwischen den beiden Lösungen lassen sich vor allem durch Faktoren erklären, die nicht abhängig von den Distanzen sind. So sind die tatsächlich entstehenden Zeitkosten, also Verspätungs- und Verfrühungskosten durch das Überschreiten weicher Zeitfenster und Wartekosten, bei der Lösung von Punkt P um 21 % höher als bei der ausschließlich profitmaximierenden Lösung. Die Summe der Verfrühungsstunden steigt um 32 % und die Summe der Verspätungsstunden um 15 % an. Es werden bei der Lösung im Punkt P also weiche Zeitfenster im stärkeren Umfang unter- oder überschritten, um den Verbrauch unter bzw. auf 6.610 L zu halten.

Die beiden Lösungen unterscheiden sich im Detail deutlich. So werden 48 Kundenaufträge in der Lösung von Punkt P von anderen Fuhrunternehmen oder durch einen anderen Fahrtentyp ausgeführt als in der MaxProfit Lösung. Eine starke Veränderung der individuellen Profitsteigerungen der sieben Fuhrunternehmen ist hingegen nicht festzustellen. Der stärkste Effekt betrifft ein Fuhrunternehmen, das statt einer Profitsteigerung von 36 % (MaxProfit) nur noch eine Profitsteigerung von 29 % (Punkt P) erzielt. Bei anderen Fuhrunternehmen sorgt der Fairnessmechanismus PIT dafür, dass diese sowohl in der MaxProfit als auch in der Punkt P Lösung geringfügig mehr Profit erhalten als ohne Kooperation, sodass sich zwischen den beiden Lösungen kein großer Unterschied der individuellen Profite ergibt.

Anhand einer weiteren Beispielinstanz, nämlich der Instanz g der Fallstudie 2, wird das Ziel der Verbrauchsminimierung bei Aktivierung des Fairnessmechanismus PIT 1 und der Vertrauensgruppenaufteilung 1TG erneut analysiert. Die folgende Abbildung 68 zeigt die Ergebnisse der Lösungen in analoger Darstellung zu o. g. Abbildung. Der höhere Verbrauch lässt sich durch die längeren Fahrtstrecken in der Fallstudie 2 erklären. Der höhere Profit ist, trotz des niedrigen VHF-Bereiches, auf die höheren Erlöse durch die Fallstudie 2, auf die Möglichkeit der Kombinationsfahrt mit Übernachtung und auch auf den höheren Anteil an tageweise verschiebbaren Importkundenaufträgen (60 %) zurückzuführen. Ein Zielkonflikt zwischen maximalem Profit und minimalem Verbrauch besteht auch hier. Der Idealzielpunkt, also die Lösung mit dem maximalen Profit (16.327 €) und dem minimalen Verbrauch (10.877 L), ist nicht realisierbar.

Um pareto-optimale Zwischenlösungen zu generieren, wird wieder eine Paretofront entwickelt. Hierzu werden sowohl das Ziel Profitmaximierung durch eine verbrauchsbeschränkende

Restriktion ergänzt (zwischen 10.880 bis 10.960 L) und fünfmal gelöst als auch das Ziel Verbrauchsminimierung durch eine Mindestprofit Restriktion ergänzt (zwischen 10.000 und 16.000 €) und siebenmal gelöst. Innerhalb des Zielkonfliktes bestehen auch bei dieser Instanz nur wenige attraktive Lösungen, die dem Idealzielpunkt sehr nahekommen. Es zeigt sich, dass der Verbrauch erst dann ansteigt, wenn der Profit größer als 15.000 € sein soll. Die Lösung mit einem Profit von 15.132 € und einem Verbrauch von 10.880 L liegt in diesem Profitbereich und kommt dem Idealzielpunkt sehr nahe (Punkt P). Sie stellt daher einen guten Kompromiss dar.

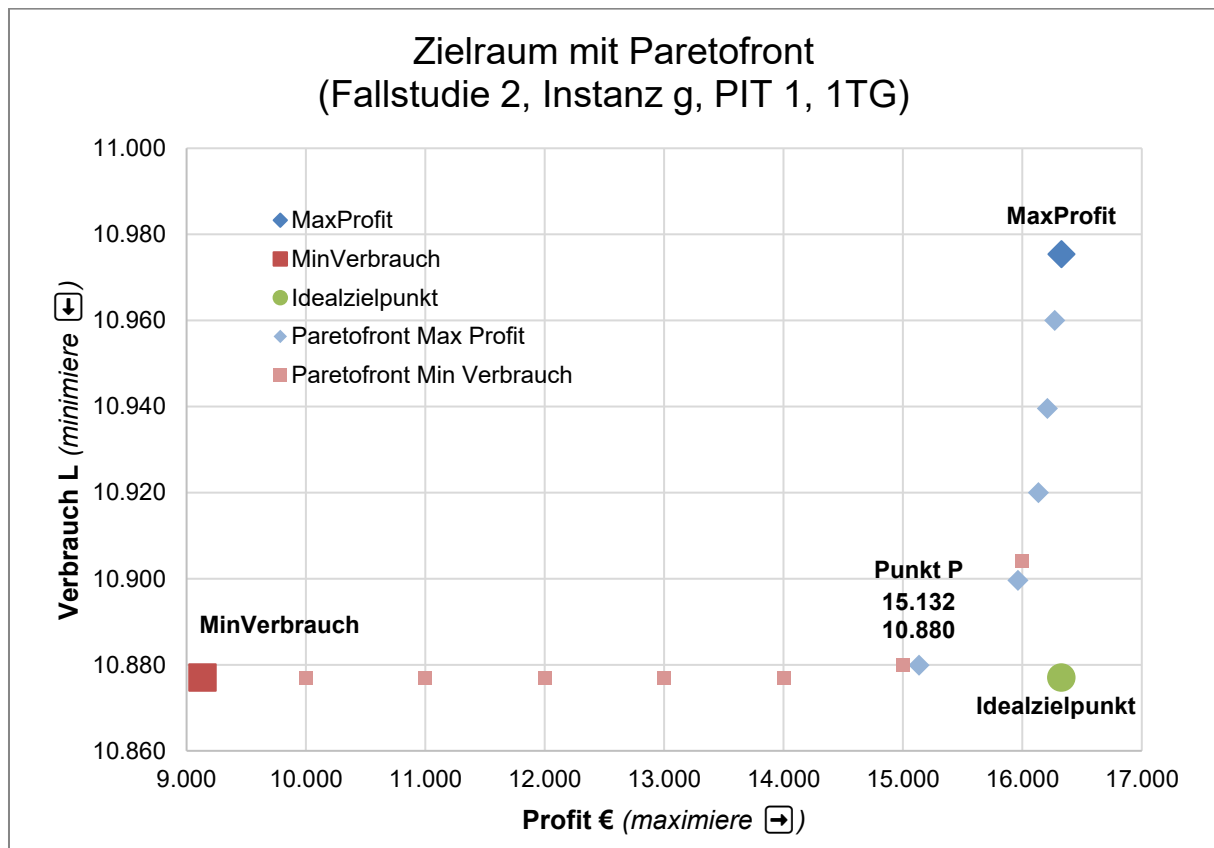


Abbildung 68: Zielraum mit Paretofront zum Verbrauchs- und Profitziel für Fallstudie 2 Instanz g

Um die Auswirkungen eines verbrauchsorientierten Ansatzes zu analysieren, ist es sinnvoll, die MaxProfit Lösung mit einer profitmaximierenden Lösung unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Verbrauches (hier Punkt P: 10.880 L / 15.132 €) zu vergleichen. Diese Lösung verbraucht nur 3 L mehr als die verbrauchsminimale Lösung. Im Vergleich zu der MaxProfit Lösung ist der Kraftstoffverbrauch beim Punkt P um 1 % und der Profit um 7 % geringer. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauches wird durch eine Reduktion der Leerfahrten um 5 % und der Leercontainerfahrten um 3 % ermöglicht. Auch in dieser Lösung hat die Reduktion des Kraftstoffverbrauches höhere Zeitkosten zur Folge. So steigen bei der Ausführung der Kundenaufträge die Verfrühungsstunden um 25 % und die Verspätungsstunden um 75 %, mit der Folge, dass die Zeitkosten der Fuhrunternehmen um 66 % steigen. Es werden im Vergleich zur MaxProfit Lösung 58 Kundenaufträge anders, d. h. durch andere Fuhrunternehmen oder mit einem anderen Fahrtentyp, durchgeführt. In der Punkt P Lösung ergeben sich bei den individuellen Profitsteigerungen der sieben

Fuhrunternehmen deutliche Unterschiede, sodass im Vergleich zur MaxProfit Lösung die individuelle Profitsteigerung um bis zu 60 Prozentpunkte geringer ist bzw. um bis zu 62 Prozentpunkte höher ist. Hier hat eine mögliche Kompromisslösung also einen deutlich stärkeren Effekt auf die Ergebnisse als in der Instanz j der Fallstudie 1. Dieser Effekt hängt mit den unterschiedlichen Fallstudien und dem höheren Anteil an flexiblen Importkundenaufträgen in der hier betrachteten Fallstudie 2 zusammen. Es sollte bei einer Kooperation vermieden werden, dass Fuhrunternehmen durch eine zusätzliche Begrenzung des gesamten Kraftstoffverbrauches einen deutlichen Nachteil (in Form einer Reduktion der Profitsteigerung) im Vergleich zu anderen Fuhrunternehmen erfahren.

Es lässt sich für die beiden dargestellten Instanzen festhalten, dass durch Kooperation, weniger kostengenerierende Leer- und Leercontainerfahrten bei gleichbleibenden Erlösen entstehen, sodass damit auch der Kraftstoffverbrauch zurückgeht. Das Ziel der Profitmaximierung zahlt dadurch bereits auf das Ziel der Verbrauchsminimierung ein. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass auch bei dem Ziel der Verbrauchsminimierung zwingend Fairnessmechanismen für eine langfristig stabile Kooperation berücksichtigt werden müssen. Abschließend lässt sich festhalten, dass die separate Betrachtung der Verbrauchsminimierung zwar einen möglichen Forschungsaspekt bildet; jedoch wird die Verbrauchsminimierung in der Praxis mit dem Ziel der Profitmaximierung bei Kooperation bereits im Wesentlichen erreicht. Die Frage nach einer Verbrauchsminimierung im Containertransport per LKW bietet sich aus o. g. Gründen nicht für eine tiefergehende Forschung an.

9 Kritische Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Analysen sowie das zugrundeliegende mathematische Modell kritisch bewertet. Ferner wird auf Limitationen eingegangen, die Potenzial für zukünftige Forschung bieten. Das Kapitel beginnt mit der Einordnung des in dieser Arbeit entwickelten mathematischen Modells in die Literatur. Daran schließen sich Kritik und Verbesserungsmöglichkeiten des Modells an, bevor die Fallstudien und grundsätzliche Überlegungen behandelt werden.

9.1 Modellvergleich

Ein Vergleich mit anderen mathematischen Modellen zur Optimierung von Transporten ist hinsichtlich der Profitsteigerung nur eingeschränkt möglich. Keines der bisher in der Literatur veröffentlichten Modelle differenziert in der Detailtiefe bezüglich Leerfahrten und Leercontainerfahrten wie das in dieser Arbeit entwickelte Modell. Zudem bezieht kein bisher veröffentlichtes Modell so viele unterschiedliche Fairnessmechanismen und Vertrauensgruppenaufteilungen mit ein.

Hinzu kommt, dass Daten bezüglich der in den Modellen verwendeten Erlös- oder Kostensätze, die für die Quantifizierung der Vorteile relevant sind (siehe Abbildung 30), in den identifizierten Veröffentlichungen des systematischen Literature Reviews (s. Kapitel 4.2.1) oftmals nicht in vollem Umfang angegeben werden. Auch bleibt unklar, auf welcher Basis die Profitsteigerung oder die Kostenreduzierung berechnet wird. Die Möglichkeit, dass ohne Kooperation bereits eine Optimierung innerhalb jedes Fuhrunternehmens, z. B. durch Kombinationsfahrten, möglich ist, wird in der Literatur bisher nicht erwähnt.

Modelle, die quantifizierbare Vorteile (Profitsteigerung oder Kostenreduktion) durch Kooperation im Transport allgemein behandeln, werden in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.4 vorgestellt. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht auf die Transporte im Hafenhinterland übertragbar, da sie andere Transportstrecken, wie z. B. die letzte Meile in urbanen Gebieten, und andere Ladungsträgergrößen verwenden. Auch der Vergleich mit Veröffentlichungen bzgl. Kooperationen, die sich aufs Hinterland beziehen (vgl. Literature Review in Kapitel 4.2.2), ist aufgrund o. g. Gründe nur teilweise möglich.

Ein Vergleich mit dem mathematischen Modell von Calore et al. (2017), das als Ausgangspunkt für das in Kapitel 7 vorgestellte Modell dient, ist nur teilweise möglich. Die

Autoren stellen eine einzige Instanz mit drei Fuhrunternehmen und 30 Kundenaufträgen vor. Es ist erkennbar, dass die individuelle Profitsteigerung bei Kooperation stark von dem absoluten Profit ohne Kooperation abhängt. Dieses Ergebnis wird in der vorliegenden Arbeit bestätigt. Die Profitsteigerung der drei Fuhrunternehmen liegt in dem Modell von Calore et al. (2017) zwischen ca. 20 % und ca. 200 %; allerdings wird nicht erklärt, ob die Steigerung auf Basis eines RealPriorProfit oder eines PriorProfit erfolgt. Die Profitsteigerungen liegen in dem Modell dieser Arbeit bei Anwendung des identischen Fairnessmechanismus (PIDT) und der identischen Vertrauensgruppenaufteilung (1TG) in Fallstudie 1 zwischen 7 % und 216 % und in Fallstudie 2 zwischen 21 % und 450 %. Calore et al. (2017) nutzen ein Exportkundenauftragsverhältnis von 50 %, sodass die Ergebnisse am ehesten mit Fallstudie 1 der vorliegenden Arbeit vergleichbar sind. Die Höhe der Profitsteigerungen in der Fallstudie 1 sind in dem Werte-Bereich ähnlich zu den Ergebnissen von Calore et al. (2017) und das, obwohl sich die Modelle (z. B. Kombinationsfahrten mit Containerdrehen und harte Zeitfenster) und der Datensatz (Anzahl Fuhrunternehmen und Anzahl Kundenaufträge) deutlich unterscheiden.

9.2 Limitationen und Ausblick

Die für eine langfristig stabile Kooperation benötigte Fairness, bei der auf eine gleichmäßige Verteilung von Kooperationsvorteilen und eine ausbalancierte Ressourcennutzung geachtet wird, wird im mathematischen Modell mithilfe von Fairnessmechanismen und Kompensationszahlungen bei Weitergabe von Kundenaufträgen umgesetzt. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell kann durch weitere Fairnessmechanismen ergänzt werden. Denkbar wäre z. B. ein relatives PIUT, welches die relative Profitsteigerung von Fuhrunternehmen zwischen den Fuhrunternehmen gleichsetzt (bei $\alpha = 1$) oder harmonisiert ($\alpha \leq 1$). Ein weiterer Fairnessmechanismus könnte eine Weitergabe von einem Kundenauftrag nur dann zulassen, wenn mit diesem Kundenauftrag eine Kombinationsfahrt durchgeführt wird. Die Durchführung eines fremden Kundenauftrages als Einzelfahrt wäre dann nicht mehr möglich. So würde verhindert, dass Fuhrunternehmen mit geringeren Kosten viele Kundenaufträge übernehmen und diejenigen mit ungünstiger Struktur zu viele Aufträge verlieren.

Die bestehenden Fairnessmechanismen könnten auch in vielen weiteren Variationen miteinander kombiniert werden. So wäre auch eine Triple-Kombination, z. B. PIT 1, PIUT 0,5 und OCT 0,5, möglich, die zu anderen Ergebnissen führen könnte. Denkbar wäre außerdem, dass die Kompensationskosten nicht nur abhängig vom Kundenwert, sondern auch abhängig vom Erlös und damit abhängig von der Fahrtstrecke sind. Dies könnte in folgenden Untersuchungen unterstellt und die Auswirkungen könnten untersucht werden.

Mit den in dieser Arbeit entwickelten Fairnessmechanismen und Kompensationszahlungen wird auch berücksichtigt, dass die Vorteilsverteilung in der Regel abhängig vom Beitrag zur Kooperation erfolgt. Kapitel 3.1 und Kapitel 3.3.3 haben gezeigt, dass auch die Methode des Shapley Wertes zur Profitaufteilung genutzt werden kann. Diese Methode ist allerdings für die Praxis ungeeignet, da umfangreiche Berechnungen erforderlich sind, um aus der Menge aller an einer Kooperation interessierten Fuhrunternehmen die profitabelsten Vertrauensgruppen

zu berechnen. Die Berechnungen werden mit steigender Anzahl an Fuhrunternehmen aufwendiger, da die Anzahl an möglichen Vertrauensgruppen exponentiell ansteigt (Osicka et al. 2019). Diese Berechnungen sind im Vergleich zu Fairnessmechanismen aufwendiger und weniger transparent für die Fuhrunternehmen. Hinzu kommt, dass in der Praxis zuerst eine strategische Auswahl der Vertrauensgruppenpartner erfolgt und anschließend über die operative, kurzfristige Verteilung von Kundenaufträgen entschieden wird.

Im Hinblick auf die Vertrauensgruppen wäre es allerdings denkbar, dass diese nicht wie bisher unterstellt disjunkt, also voneinander abgetrennt, sind, sondern sich überschneiden können. Konkret wäre es denkbar, dass z. B. Fuhrunternehmen 1 jeweils mit Fuhrunternehmen 2 und 3 kooperiert, aber Fuhrunternehmen 2 und 3 jeweils nicht miteinander kooperieren. So wäre Fuhrunternehmen 1 an zwei Vertrauensgruppen beteiligt. Daran schließen sich weitere Fragen für Fuhrunternehmen 1 an, z. B., welche Kundenaufträge an welche Vertrauensgruppe weitergegeben werden dürfen.

Denkbar wäre auch, statt der genutzten Zielfunktion, die den Gesamtprofit aller Fuhrunternehmen maximieren soll, andere monetär orientierte Zielfunktionen zu nutzen, die bereits einen Beitrag zur Fairness leisten. Hier ist es möglich, die durchschnittliche individuelle Profitsteigerung der sieben Fuhrunternehmen zu maximieren (siehe blaue Säulen in Abbildung 29 und Abbildung 51), sodass auch der individuelle Profit ohne Kooperation, und damit auch die Größe der Fuhrunternehmen, stärker berücksichtigt werden. Um besonders die profitsteigerungsschwachen Fuhrunternehmen zu begünstigen, kann alternativ auch die schlechteste individuelle Profitsteigerung maximiert werden (siehe die niedrigste rote Säule in Abbildung 29 und Abbildung 51)

Das Thema der Ökologie (vgl. Kapitel 2.4.1) wird mit dem Ziel der Verbrauchsminimierung (vgl. Kapitel 7.2.6 und 8.6.2) in der vorliegenden Arbeit behandelt. Hier könnte die Berechnung des Verbrauchs um Aspekte der Geschwindigkeit, des tatsächlichen Gewichtes des Vollcontainers oder des Steigungsprofils der Strecke ergänzt werden, um den Verbrauch bzw. die Emissionen genauer zu berechnen.

Um die Ziele Profit und Kraftstoffverbrauch zu verknüpfen, ist es möglich, aus dem Verbrauch in Litern die Emissionen in CO₂-Äquivalenten zu berechnen. Anschließend können die CO₂-Äquivalente mit den tatsächlichen externen Umweltkosten oder mit den Kosten für ein Zertifikat bewertet werden. Damit könnte der Verbrauch bzw. könnten die Emissionen monetär bewertet und als weiterer Einflussfaktor bzw. Summand in der gesamtprofitmaximierenden Zielfunktion berücksichtigt werden. In einem solchen Fall müsste bei Vereinbarung der Kooperation geklärt werden, welches Fuhrunternehmen (der Eigentümer oder der Ausführer) die Zertifikatskosten zahlt oder wie diese aufgeteilt werden. Hier ist auch die Heterogenität der Flotten der unterschiedlichen Fuhrunternehmen im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch relevant. So könnte festgelegt werden, dass ein Fuhrunternehmen nur mit anderen Fuhrunternehmen kooperiert, die eine ähnlich umweltfreundliche bzw. schadstoffarme LKW-Flotte betreiben. Das aufkommende Thema der alternativen Antriebe wie HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, hydriertes Pflanzenöl), E-Fuels, Wasserstoff oder Strom (entweder als Batterie-LKW, Hybrid-

Modell oder mit Pantografen an Oberleitungsstrecken) wird hier nicht weiter behandelt, bietet aber Potenzial für weitere Untersuchungen in zukünftiger Forschung.

Ein weiteres, in der Praxis bedeutendes Thema ist die Unsicherheit (vgl. Kapitel 2.4.2), die in dem vorliegenden mathematischen Modell nicht implementiert wird. Das Thema wird in wenigen Fällen auch bei Veröffentlichungen zu Containertransporten im Hafenhinterland berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2). Zur Erweiterung des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Modells können in einem ersten Schritt die Fahrzeiten zwischen den Standorten bzw. Knoten abhängig von der Tageszeit und dem Wochentag festgelegt werden, sodass in Hauptverkehrszeiten eine längere Fahrtdauer berücksichtigt wird. In einem zweiten Schritt könnten unsichere Fahrzeiten durch Verteilungen erfasst und im Modell ergänzt werden. Diese Ergänzung ist aus Praxissicht bei engen Zeitfenstern wichtig, da der Kunde verlässliche Ankunftszeiten erwartet. Dies ist von besonderer Bedeutung bei Kooperation, wenn der Kundenauftrag nicht vom ursprünglich beauftragten Fuhrunternehmen, sondern von einem anderen Fuhrunternehmen durchgeführt wird. Kommt es zu einer Zeitfensterverletzung, könnte der Kunde sich zukünftig gegen eine Weitergabe seines Kundenauftrages entscheiden. Dies würde die Kooperation in Frage stellen.

Ferner kann Unsicherheit auch auf die Kundennachfrage bezogen werden. Dies beinhaltet sowohl die Fragestellung, ob eine Anfrage für einen Kundenauftrag erwartet wird, als auch die Fragestellung, wann bzw. wie viele Tage vor der gewünschten Ausführung des Kundenauftrages die Kundenanfrage das Fuhrunternehmen erreicht. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn im Laufe der Woche bzw. des Planungshorizontes noch weitere Kundenaufträge mit einer gewissen Unsicherheit erwartet werden. Diese Fragestellungen könnten in auftragsorientierten Fairnessmechanismen berücksichtigt werden. Außerdem besteht besonders bei Importkundenaufträgen das Risiko, dass durch verspätete Ankunft des Seecontainerschiffs der gewünschte Tag zur Ausführung aufgrund des fehlenden Containers nicht möglich ist, bzw. der Kundenauftrag sich um mehrere Tage nach hinten verschiebt. Hier könnte das Modell um eine Vorhersage von Schiffsankünften (vgl. z. B. Kolley et al. 2021; Kolley et al. 2023) erweitert werden, da die Schiffsankunft einen unmittelbaren Einfluss auf die Hinterlandtransporte hat.

Zusätzlich zu den bereits genannten Erweiterungsmöglichkeiten des Modells hinsichtlich Fairness, Ökologie und Unsicherheit kann das Modell hinsichtlich der Praxisnähe weiter verbessert werden. Hierzu zählt, dass die Schichten der LKW-Fahrer genauer geplant werden, sodass die rechtliche Situation genauer abgebildet wird, d. h., auch Pflichtpausen und die exakte Dauer der Ruhezeiten berücksichtigt werden.

Ferner könnte die Flotte der Fuhrunternehmen flexibilisiert werden. Im aktuellen Modell wird die maximale Anzahl der LKW-Fahrten pro Tag je Fuhrunternehmen auf Basis der eigenen Kundenaufträge berechnet (Formel 7.1). Die Restriktion, die aufgrund dieser Anzahl der LKW die Anzahl der Kundenaufträge begrenzt (Formel 7.59), könnte ergänzt werden um einen Summanden, der mehr Fahrten pro Tag aufgrund von zusätzlichen LKW je Fuhrunternehmen ermöglicht.

Das mathematische Modell entscheidet über die Zuordnung von Kundenaufträgen zu Fuhrunternehmen und die Zeitpunkte der Ausführung dieser Kundenaufträge. Die Fahrtrouten der LKW können anschließend daraus berechnet werden (vgl. Abbildung 26). Eine Erweiterung des Modells wäre es, die konkreten Fahrtrouten der LKW bereits im Modell mit berechnen zu lassen. Da es sich dabei um umfangreiche Berechnungen handelt, käme es zu längeren Rechenzeiten bzw. einer geringeren Lösungsgeschwindigkeit. Mit dieser Erweiterung wäre es möglich, dass LKW mathematisch separat von den Kundenaufträgen modelliert werden, sodass Kundenaufträge von mehr als einem LKW ausgeführt werden könnten, damit die LKW nicht auf die Ent-/Beladung des Containers am Hinterlandstandort warten, sondern ein zweiter LKW die Abholung übernimmt. Dies hat jedoch keine Praxisrelevanz, da laut Auskunft von Experten die LKW in der Regel während der Ent-/Beladung am Standort verbleiben und Wartezeiten üblich sind (u. a. Ancotrans GmbH 2022).

Grundsätzlich kann die vorliegende Problemstellung der Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW auch mit anderen Methoden als der Nutzung eines mathematischen Modells gelöst werden. So wäre es denkbar, Methoden der Künstlichen Intelligenz, wie genetische Algorithmen, einzusetzen, um das Lösungsverfahren zu beschleunigen. Auch könnten Machine Learning Verfahren eingesetzt werden, die teilweise bei Problemstellungen in der maritimen Logistik diskutiert werden (Dornemann et al. 2020).

Im Hinblick auf die Fallstudien lassen sich folgende Limitationen feststellen: Grundsätzlich gilt, dass eine größere Anzahl an Fallstudien im Hamburger Hafenhinterland und eine größere Anzahl von Instanzen je Fallstudie die Ergebnisse auf einer größeren Datenbasis validiert hätten. Jedoch lässt sich bereits bei den je zehn Instanzen der zwei Fallstudien feststellen, dass die Ergebnisse, abhängig von dem VHF-Bereich und dem Exportkundenauftragsanteil, im Hinblick auf die wesentlichen Ergebnism Merkmale (z. B. Profitsteigerung) ähnlich sind. Es ist nicht zu erwarten, dass sich diese Ergebnisse bei mehr Instanzen wesentlich ändern.

Weitere Fallstudien könnten die Generalisierbarkeit der Ergebnisse erhöhen. Es wären z. B. Fallstudien möglich, die auch andere deutsche Nordseehäfen (Bremen, Wilhelmshaven) und andere Standorte im Hafenhinterland (z. B. auch Terminals für Kombiverkehre wie DUSS-Terminals) beinhalten.

Die Fallstudien könnten je Instanz mehr als die bislang festgelegten 100 Kundenaufträge und sieben Fuhrunternehmen beinhalten. In Bezug auf die Kundenaufträge der Fuhrunternehmen ist es auch möglich, die geografische Verteilung der Kundenaufträge und die Kundenauftragseigentümer weniger zufällig als bisher festzulegen. So könnten Instanzen generiert werden, bei denen Fuhrunternehmen nur Hinterlandstandorte bedienen, die in einer bestimmten Region liegen, sodass jedes Fuhrunternehmen seine eigene Stammregion hat und diese klar von anderen Regionen abgegrenzt ist. Das Thema der zentralen, dezentralen und überlappenden Kundenauftragsgebiete, welches bereits Gansterer et al. (2018) und Gansterer et al. (2020) beschreiben, könnte somit für den Anwendungsbereich des Hafenhinterlandes untersucht und die aus der geografischen Kundenauftragsverteilung resultierenden Effekte könnten analysiert werden.

Außerdem könnte der Planungshorizont von einer Woche auf z. B. vier Wochen bzw. einen Monat verlängert werden. So könnte eine neue Zeiteinheit bei den Fairnessmechanismen entstehen, die nicht auf Tages- oder Wochenbasis, sondern auf Monatsbasis sicherstellt, dass z. B. der Profit größer ist als ohne Kooperation (PIM, Profit Increase Month). Es ist zu erwarten, dass die Nutzung von Mechanismen, die auf Monatsbasis Fairness berücksichtigen, eine höhere Profitsteigerung erzielen können. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass aus Sicht der Fuhrunternehmen zusätzlich wochenweise Fairnessmechanismen von Bedeutung sind, um regelmäßig Erlöse zu generieren und die LKW-Flotte gleichmäßig auszulasten.

Da sich eine der drei Reederei-Allianzen im Jahr 2025 (vgl. Pressemitteilung A.P. Moller - Maersk 25.01.2023) auflösen wird, stellt sich die Frage, ob die Einschränkung bzgl. der Kombinationsfahrten mit Containerdrehen angepasst werden muss, und zwar hinsichtlich der Betrachtung des tatsächlichen Containereigentümers und nicht mehr nur der Allianz. Außerdem könnten mehr als die bisher vier Containertypen betrachtet werden. Beides würde dazu führen, dass eine Kombinationsfahrt mit Containerdrehen seltener als bisher möglich ist.

Hinsichtlich der Zeitfenster von Hinterlandstandorten könnte auch eine weitere Differenzierung erfolgen. So gibt es große Hinterlandstandorte, die an Werktagen fast durchgängig geöffnet und damit für LKW erreichbar sind und kleine Hinterlandstandorte, die ggf. nur vormittags an bestimmten Werktagen Container empfangen können. Es ist davon auszugehen, dass kleine Hinterlandstandorte mit engen harten Zeitfenstern weiterhin eher mit Einzelfahrten angefahren werden müssen, da für Kombinationsfahrten Flexibilität mit größeren Zeitfenstern benötigt wird. Außerdem sind die Servicezeiten in den aktuellen Fallstudien nur abhängig von der Containergröße. In der Realität könnten diese auch abhängig von den geladenen Gütern sein.

Grundsätzlich ist es aus theoretischer Sicht möglich, abhängig von den Kundenaufträgen, eine Vertrauensgruppenoptimierung durchzuführen. Das bedeutet, dass die Profitsteigerungen für alle möglichen Vertrauensgruppeneinteilungen miteinander verglichen werden, um zu prüfen, welche Fuhrunternehmen aufgrund ihrer Kundenauftragsstruktur am profitabelsten miteinander kooperieren würden und sich abhängig davon die Vertrauensgruppe zusammenfindet. Dies ist jedoch nicht von Relevanz in der Praxis, da die Entscheidung über die vertrauenswürdigen Mitbewerber, mit denen eine Kooperation eingegangen wird, der erste Schritt aus Unternehmenssicht ist.

Die Arbeit fokussiert sich ausschließlich auf den Transport von Containern auf der Straße. Kapitel 2.4.3 hat gezeigt, dass neben dem Transport im Hinterland auf der Straße mittels LKW auch der Transport im Hinterland auf der Schiene per Zug oder auf der Wasserstraße per Binnenschiff möglich ist und durchgeführt wird. Insbesondere der Hamburger Hafen wickelt einen großen Teil seines Verkehrs auf der Schiene ab. Für die weitere Forschung kann es daher sinnvoll sein, die Kooperation zwischen Fuhrunternehmen mit dem hier entwickelten mathematischen Modell auf andere Verkehrsträger wie die Schiene mit ihren Akteuren, z. B. Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), auszuweiten. Andere kooperative intermodale Transporte werden in der Forschung bereits betrachtet (Li et al. 2014a; Zhang et al. 2015).

Bei der o. g. verkehrsträgerübergreifenden Kooperation ergeben sich eine Reihe von weiteren Untersuchungen, z. B., wie sich der Austausch von Kundenaufträgen gestaltet, wenn der Kundenauftrag ursprünglich intermodal, d. h., zuerst per Zug und anschließend per LKW transportiert wird. Hier wären bereits ohne Kooperation zwei Unternehmen, nämlich das EVU und das Fuhrunternehmen, involviert. Die Absprachen und auch die Bedingungen, die eine faire und langfristige Kooperation ermöglichen, würden aufgrund der Vielzahl der Ansprechpartner komplexer. Ferner wäre auch eine Erweiterung um eine vertikale Kooperation denkbar, bspw. mit den Containerterminals im Rahmen des Truck Appointment Scheduling.

Darüber hinaus wird sich der Containertransport per LKW mit der Möglichkeit des autonomen Fahrens verändern. Wenn dies auf Autobahnen möglich wird, können Fahrer entlastet werden. Dadurch wäre eine Kostenreduktion und eine erhöhte Flexibilität für die Fuhrunternehmen, z. B. hinsichtlich der Personaleinsatzplanung, möglich. Eine Vorstufe zum autonomen Fahren ist das sog. Platooning. Beim LKW Platooning kann ein führender LKW mit einem Fahrer eine kleine Gruppe von weiteren LKW anführen. Die hinteren folgenden LKW fahren dann teilautonom und benötigen für die Dauer des Platoonings keinen Fahrer (siehe z. B. You et al. 2020). Da Platooning bisher in Deutschland nicht zugelassen ist, ist diese Thematik noch zu vernachlässigen, könnte aber in einigen Jahren an Relevanz gewinnen.

Es ist festzuhalten, dass der Containertransport per LKW und damit auch die Fuhrunternehmen vor großen Herausforderungen stehen. Die Kosten für Kraftstoff, Maut und Mitarbeiterlöhne sind in den vergangenen Jahren aufgrund geopolitischer, volkswirtschaftlicher und regulatorischer Entwicklungen gestiegen und es werden weitere Kostensteigerungen erwartet. Diese müssen von den Fuhrunternehmen an ihre Kunden weitergegeben werden. Es ist davon auszugehen, dass sich der von den Interviewpartnern negativ hervorgehobene Wettbewerbsdruck weiter verschärft (s. Kapitel 5.3.3). Dies hat auch Auswirkungen auf mögliche horizontale Kooperationen, da die mit Kooperation möglichen Profitsteigerungen an Relevanz gewinnen. Damit bleibt die Thematik der vorliegenden Arbeit im Fokus der Wissenschaft und auch der Praxis im Hafenhinterland.

10 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein Modell für die **Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW** zu entwickeln, anzuwenden und zu evaluieren. Das Modell soll eine **faire und langfristig stabile horizontale Kooperation** ermöglichen sowie den **Nutzen und die Vorteile der Kooperation unter realistischen und praxisnahen Aspekten quantifizieren**.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse, die aus der Anwendung des neu entwickelten mathematischen Modells, das auf einer Literaturrecherche und einer Interviewstudie beruht, ausführlich diskutiert. Das mathematische Modell wird auf zwei praxisnahe Fallstudien, denen das Hamburger Hafenhinterland zugrunde liegt, angewandt.

Eine mit Unternehmen aus dem Hafenhinterland durchgeführte Interviewstudie bestätigt im Wesentlichen die Erkenntnisse der wissenschaftlichen Literatur. LKW-Fuhrunternehmen stehen aufgrund der geringen Marktmacht in der maritimen Supply Chain und der kostenintensiven Leercontainerlogistik unter hohem Wettbewerbsdruck. Die Literatur diskutiert als Lösung eine horizontale Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen mit dem Ziel, die Effizienz und den Profit zu erhöhen. Breiten Raum nimmt hier die Diskussion um den Begriff des Vertrauens ein, als Voraussetzung für die Bereitschaft zur Kooperation mit einem oder mehreren ausgewählten Wettbewerbern. Die Interviewstudie legt hier offen, dass die Fuhrunternehmer den Markt und die Kooperation als Chance, den Kostendruck zu reduzieren, unterschiedlich wahrnehmen. Einige stehen der Kooperation zurückhaltend gegenüber, da das nötige Vertrauen in andere Marktteilnehmer fehlt. Andere Fuhrunternehmer wiederum zeigen sich einem gemeinsamen Austausch gegenüber offen, um die Weitergabe von Kundenaufträgen zu ermöglichen.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnis wird deutlich, dass Fairness, d. h. die gleichmäßige Verteilung von Kooperationsvorteilen, die aus monetären und nicht-monetären Bestandteilen bestehen, eine wesentliche Grundlage für langfristig stabile Kooperation darstellt. Hier zeigt die Forschung, dass transparente Mechanismen nötig sind, um den Vorteilsausgleich bei Kooperation zu steuern.

Aus diesem Grund sind die identifizierten Kriterien für eine faire und langfristig stabile Kooperation im mathematischen Modell in Form von Restriktionsgruppen integriert. Erstmals

findet der Aspekt der Vertrauensgruppen Eingang in ein mathematisches Modell für den Containertransport im Hafenhinterland, und erstmals erfolgt auch die gleichzeitige Anwendung von Vertrauensgruppen mit Kompensationszahlungen und Fairnessmechanismen. Ebenfalls erstmalig werden letztere miteinander kombiniert. Im Vergleich zu bestehenden Modellen weist dieses Modell eine höhere Praxisnähe auf, da es neben den genannten Mechanismen auch weitere neue Aspekte wie z. B. unterschiedliche Typen von Fahrten (Einzel- und Kombinationsfahrten mit/ohne Containerdrehen), verschiedene Transportarten (Container, Leercontainer, leer), Leercontainerdepots, harte und weiche Zeitfenster, CO₂-Emissionen und die Option für zweitägige Kombinationsfahrten berücksichtigt.

Die Anwendung dieses neuen mathematischen Modells auf Daten aus dem Hamburger Hafenhinterland bestätigt bereits veröffentlichte Ergebnisse und führt darüber hinaus zu neuen praxisrelevanten Erkenntnissen. Alle Instanzen wurden für drei unterschiedliche Vertrauensgruppeneinteilungen verschiedener Größe untersucht. Es zeigt sich, wie erwartet, je größer die Vertrauensgruppe ist, desto höher fällt der Profit aus. Mit dem mathematischen Modell wurde gezeigt, dass die Vorteile einer Kooperation bereits ab zwei kooperierenden Fuhrunternehmen zum Tragen kommen. Jedoch konnte in diesem Fall keine individuelle Profitsteigerung von mindestens 10 % garantiert werden, wohingegen dies aber bei großen Vertrauensgruppen möglich war. Weiterhin gilt, dass bei Anwendung von wochenbasierten Fairnessmechanismen eine höhere Gesamtprofitsteigerung im Vergleich zur Anwendung von tagesorientierten Mechanismen erreicht wird. Es bietet sich daher an, wochenorientierte Fairnessmechanismen zu nutzen, da anzunehmen ist, dass die kooperierenden Fuhrunternehmen an einigen Tagen pro Arbeitswoche weniger Profit verkraften können.

Bezüglich der Frage nach der Wirkung der Fairnessmechanismen hat die Anwendung des Modells gezeigt, dass unterschiedliche Fairnessmechanismen zu unterschiedlich starker Profitsteigerung führen. Die Auswertung bezüglich der Fairnessmechanismen erfolgt anhand der Ergebnisse zur Gesamtprofitsteigerung, zur individuellen minimalen, maximalen und durchschnittlichen Profitsteigerung sowie zur Kundenauftragsverteilung.

Eine differenzierte Betrachtung dieser Auswertung zeigt, dass eine Kooperation ohne Fairnessmechanismus zur ungleichmäßigen Verteilung von Profit und Kundenaufträgen führt. Einzelne Fuhrunternehmen erleiden einen starken Verlust und/oder führen keine Kundenaufträge mehr aus. Diesen unerwünschten Effekt verhindert in einem ersten Schritt die Anwendung von Fairnessmechanismen, die ausschließlich den Profit berücksichtigen. Im Hinblick auf die Gesamtprofitsteigerung führt die Anwendung des Fairnessmechanismus PIT 1 bereits zu einer gleichmäßigeren Profitverteilung bei einer noch hohen Gesamtprofitsteigerung im Vergleich zum Fall mit Kooperation aber ohne Fairness. Das heißt, der Nutzen von PIT 1 überwiegt deutlich den Aufwand für diesen doch einfachen Ansatz, dass jedes Fuhrunternehmen mit Kooperation mehr Profit erhält als ohne Kooperation.

Bei ausschließlich profitorientierten Fairnessmechanismen zeigt sich, dass die Kundenaufträge ungleichmäßig verteilt sind. Aus diesem Grund werden Fairnessmechanismen, die die Kundenauftragsverteilung berücksichtigen, entwickelt. Bei deren Anwendung wird zwar eine gute Auslastung der Ressourcen und ausreichender

Kundenkontakt der Fuhrunternehmen erreicht, jedoch wird der Profit nicht gleichmäßig verteilt. Folglich werden in einem nächsten Schritt Fairnessmechanismus-Kombinationen gebildet, die gleichzeitig profit- und kundenauftragsbezogen sind. Bestimmte Fairnessmechanismus-Kombinationen führen zu einer gleichmäßigen Kundenauftragsverteilung bei gleichzeitiger Garantie, dass der individuelle Profit gesteigert wird. Sie stellen also eine faire Kooperation dar, die langfristig stabil sein kann. Hervorzuheben ist hier das Ergebnis für Fallstudie 2, demzufolge bei PIT 1 mit ONET eine durchschnittliche individuelle Profitsteigerung von 37 % (3TG) bis 79 % (1TG) erreicht wird. Bei PIT 1 mit OCT 0,5 liegt diese zwischen 41 % und 81 % und bei PIT 1 mit OMD 0,5 zwischen 41 % und 87 %. Diese drei Fairnessmechanismus-Kombinationen erreichen also ähnlich hohe Profitsteigerungen, die eine Umsetzung in der Praxis anbieten. In Fallstudie 1 liegen diese individuellen Profitsteigerungen für die Fairnessmechanismus-Kombinationen je nach Vertrauensgruppeneinteilung zwischen 15 % und 59 %. Grundsätzlich gilt, dass sich die kooperierenden Fuhrunternehmen untereinander auf eine konkrete Fairnessmechanismus-Kombination einigen müssen.

Zu berücksichtigen gilt die Tatsache, dass Fuhrunternehmen in den Interviews Bedenken äußern (vgl. Kapitel 5.3.3), dass sie in einer Kooperation Aufträge an Wettbewerber verlieren. Sie möchten tendenziell möglichst viele eigene Kundenaufträge ausführen und diese nicht im Rahmen der Kooperation an Wettbewerber weitergeben. Dieser Aspekt wird in einer separaten Analyse der Fairnessmechanismus-Kombination PIT 1 mit OCT 0,5 betrachtet. Das Ergebnis zeigt, dass die Gesamtprofitsteigerung abnimmt, wenn der garantierte Anteil eigener Kundenaufträge steigt. Ab einem eigenen Kundenauftrags-Anteil von 50 % bzw. bei kleinen Vertrauensgruppen ab einem Anteil von 70 % tritt dieser Effekt besonders stark auf (vgl. Kapitel 8.6.1). Daraus folgt, dass im Gegenzug jedes Fuhrunternehmen bereit sein sollte, mindestens 30 % seiner Kundenaufträge bei einer Kooperation abzugeben.

Eine weitere Analyse zeigt, dass eine separate Minimierung der Emissionen zu ähnlichen Ergebnissen wie die Gesamtprofitmaximierung führt (vgl. Kapitel 8.6.2). Lediglich Zeitfensterkosten können die Unterschiede zwischen profitmaximalen und kraftstoffminimalen Lösungen erklären. Dies zeigt, dass Kooperation auch einen Beitrag zur Nachhaltigkeit der Supply Chain leistet.

Die Gesamtübersicht der Ergebnisse macht deutlich, dass die Anwendung der Fairnessmechanismen die Gesamtprofitsteigerung reduziert im Vergleich dazu, wenn kein Fairnessmechanismus genutzt wird. Hier wird der Zielkonflikt zwischen kurzfristigen Vorteilen einer Kooperation und langfristiger Stabilität deutlich. Es ist hervorzuheben, dass bei geringbleibenden Margen in der Logistikbranche, die Profitsteigerungen mit Fairnessmechanismen beträchtlich sind.

Wie erwartet, zeigt die Auswertung, dass kostenintensive Einzelfahrten durch die Kooperation reduziert werden. Es gilt darüber hinaus, dass mit größer werdender Vertrauensgruppe auch die Anzahl der Kombinationsfahrten mit und ohne Containerdrehen steigt. Es wurde gezeigt, dass bei Kooperation Länge und Anzahl an kostengenerierenden Leer- und Leercontainerfahrten reduziert werden konnte. Dabei gilt, je größer die Vertrauensgruppe,

desto stärker die Reduktion. Insbesondere bei Fallstudie 2 zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Länge der Leerfahrten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Ziel der vorliegenden Arbeit erreicht wird. Das mathematische Modell ermöglicht die Optimierung von Containertransporten im Hafenhinterland per LKW und berücksichtigt Aspekte für eine faire und langfristig stabile horizontale Kooperation. Der Nutzen und die Vorteile der Kooperation werden belegt und quantifiziert. Es gilt jedoch zu beachten, dass die konkreten individuellen Profitsteigerungen durch zahlreiche Faktoren beeinflusst werden. Dazu gehören das Verhältnis von Import- zu Exportkundenaufträgen, die Zeitfenster der Aufträge und die Verteilung der Aufträge sowohl in geografischer Hinsicht im Hafenhinterland als auch in temporaler Hinsicht im Planungshorizont. Dabei ist unbedingt zu berücksichtigen, dass das Ergebnis bzgl. der Gesamtprofitsteigerung stets zu betrachten ist im Verhältnis zum Profit ohne Kooperation. Dieser Profit ohne Kooperation ist wiederum von der eigenen Kostenstruktur und den verhandelten Erlösen der Kundenaufträge abhängig.

Das mathematische Modell der vorliegenden Arbeit wird an zwei praxisnahen Fallstudien getestet und zeigt das Potential auf, das mit horizontaler Kooperation erreicht werden kann. Von daher ist das Modell aus Sicht des Autors im Bereich der Containertransporte im Hafenhinterland generalisierbar. Für den Start und die Etablierung einer langfristig stabilen Kooperation ist die Einigung auf transparente Mechanismen bzgl. Auftragsweitergabe, Kompensationszahlungen und Vorteilsverteilung unabdingbar. Bei mehr als zwei kooperierenden Fuhrunternehmen ist zudem eine zentrale unabhängige Stelle zur Koordination von Kundenaufträgen, die weitergegeben werden dürfen, erforderlich. Idealerweise findet der Austausch von Informationen zwischen den Kooperationspartnern standardisiert und digital statt, was gegenwärtig noch nicht flächendeckend auf diese Art und Weise umgesetzt wird.

Die vorliegende Dissertation hat eine Vielzahl an Möglichkeiten aufgezeigt, wie durch faire horizontale Kooperation zwischen den Fuhrunternehmen im Hafenhinterland eine profitsteigernde Zusammenarbeit erreicht werden kann. Gleichzeitig bestehen zahlreiche Möglichkeiten für weitere Forschung (vgl. Kapitel 9.2).

11 Literaturverzeichnis

- A.P. Moller - Maersk (25.01.2023): Maersk and MSC to discontinue 2M alliance in 2025. Linnet, Mikkel; Rasmussen, Povl. D. Online verfügbar unter <https://www.maersk.com/news/articles/2023/01/25/maersk-and-msc-to-discontinue-2m-alliance-in-2025>, zuletzt geprüft am 11.04.2023.
- Aberle, Gerd (2009): Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. 5., überarbeitete und ergänzte Auflage. München: De Gruyter (Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Aloui, Aymen; Hamani, Nadia; Derrouiche, Ridha; Delahoche, Laurent (2021): Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: overview, analysis and perspectives. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 9 (2). DOI: 10.1016/j.trip.2020.100291.
- Ancotrans GmbH (2022): Standardbedingungen Stand 03-2022. Online verfügbar unter https://ancotrans.com/wp-content/uploads/2022/03/ANCOTRANS-GmbH_Standardkonditionen_de_03-2022.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- Audy, Jean-François; D'Amours, Sophie; Rönnqvist, Mikael (2012a): An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. In: *International Journal of Production Economics* 136 (1), S. 13–27. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.08.027.
- Audy, Jean-François; Lehoux, Nadia; D'Amours, Sophie; Rönnqvist, Mikael (2012b): A framework for an efficient implementation of logistics collaborations. In: *International Transactions in Operational Research* 19 (5), S. 633–657. DOI: 10.1111/j.1475-3995.2010.00799.x.
- Basso, Franco; D'Amours, Sophie; Rönnqvist, Mikael; Weintraub, Andrés (2019): A survey on obstacles and difficulties of practical implementation of horizontal collaboration in logistics. In: *International Transactions in Operational Research* 26 (3), S. 775–793. DOI: 10.1111/itor.12577.
- Berger, Susanne; Bierwirth, Christian (2010): Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (5), S. 627–638. DOI: 10.1016/j.tre.2009.12.006.

- BMEnet GmbH (2021): BME-Marktinformationen Frachten 2/2021. Online verfügbar unter <http://assets.bme.de/public/uploads/c9d2bc5de0858bcceaf27999664c256f44fe2745b5fc356ede923eeb95d1>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- BMEnet GmbH (2022): BME-Marktinformationen Frachten 3/2022. Online verfügbar unter https://a.storyblok.com/f/104752/x/baf70f2d3d/bme_marktinformationen_frachten_ausgabe_3_2022_leseprobe.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Boile, Maria (2006): Empty intermodal container management. Hg. v. New Jersey Department of Transportation. Online verfügbar unter <https://cait.rutgers.edu/wp-content/uploads/2018/05/fhwa-nj-2006-005.pdf>, zuletzt geprüft am 01.01.2020.
- Böse, Jürgen W. (Hg.) (2020): Handbook of Terminal Planning. Cham: Springer International Publishing (Operations Research/Computer Science Interfaces Series).
- Braekers, Kris; Caris, An; Janssens, Gerrit K. (2013): Integrated planning of loaded and empty container movements. In: *OR Spectrum* 35 (2), S. 457–478. DOI: 10.1007/s00291-012-0284-5.
- Braekers, Kris; Caris, An; Janssens, Gerrit K. (2014): Bi-objective optimization of drayage operations in the service area of intermodal terminals. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 65, S. 50–69. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.012.
- Branch, Alan Edward; Robarts, Michael (2014): Branch's Elements of Shipping. London: Routledge.
- Brekalo, Lisa; Albers, Sascha (2016): Effective logistics alliance design and management. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 46 (2), S. 212–240. DOI: 10.1108/IJPDLM-08-2014-0201.
- Brito, M.P. de; Konings, Rob (2008): Container management strategies to deal with the East-West flows imbalance. In: *Logistics and Freight Cluster*.
- Bußgeldkatalog (2022): Arbeitszeit für LKW-Fahrer: Was ist gesetzlich vorgeschrieben? Online verfügbar unter https://www.bussgeldkatalog.org/arbeitszeit-lkw-fahrer/#taegliche_und_woechentliche_arbeitszeit_was_lkw-fahrer_duerfen, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Caballini, Claudia; Mar-Ortiz, Julio; Gracia, Maria D.; Sacone, Simona (2018): Optimal truck scheduling in a container terminal by using a Truck Appointment System. In: IEEE (Hg.): Intelligent Transportation Systems Conference. Proceedings. Maui, Hawaii, USA. Piscataway, NJ, S. 2525–2530.
- Caballini, Claudia; Rebecchi, Ilaria; Sacone, Simona (2015): Combining multiple trips in a port environment for empty movements minimization. In: *Transportation Research Procedia* 10, S. 694–703. DOI: 10.1016/j.trpro.2015.09.023.
- Caballini, Claudia; Rebecchi, Ilaria; Sacone, Simona (2017): Maximizing road carriers profit by combining trips and sizing the carrier coalition. In: IEEE (Hg.): International

- Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. Proceedings. Bari, Italien. Piscataway, NJ, S. 102–107.
- Caballini, Claudia; Sacone, Simona; Saeednia, Mahnam (2016): Cooperation among truck carriers in seaport containerized transportation. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 93, S. 38–56. DOI: 10.1016/j.tre.2016.05.007.
- Calore, Giulia; Caballini, Claudia; Sacone, Simona; Siri, Silvia (2017): Multi-period planning of road trips in a cooperative environment. In: IEEE (Hg.): International Conference on Intelligent Transportation Systems. Proceedings. Yokohama, Japan. Piscataway, NJ, S. 1–6.
- Crujssen, Frans (2020): Cross-Chain Collaboration in Logistics. Cham: Springer International Publishing (297).
- Crujssen, Frans; Bräysy, Olli; Dullaert, Wout; Fleuren, Hein; Salomon, Marc (2007a): Joint route planning under varying market conditions. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 37 (4), S. 287–304. DOI: 10.1108/09600030710752514.
- Crujssen, Frans; Dullaert, Wout; Fleuren, Hein A. (2007b): Horizontal cooperation in transport and logistics: a literature review. In: *Transportation Journal*, S. 22–39.
- Crujssen, Frans; Salomon, Marc (2004): Empirical Study: Order Sharing between Transportation Companies May Result in Cost Reductions between 5 to 15 Percent (CentER Discussion Paper). Online verfügbar unter <https://research.tilburguniversity.edu/en/publications/empirical-study-order-sharing-between-transportation-companies-ma>, zuletzt geprüft am 20.03.2023.
- CTD Container-Transport-Dienst GmbH (2021): Transportbedingungen der CTD Container-Transport-Dienst GmbH. Online verfügbar unter https://www.ctd.de/files/ctd/download/Transportbedingungen_2021.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- CTD Container-Transport-Dienst GmbH (2022): Unsere Niederlassungen. Online verfügbar unter <https://www.ctd.de/standorte.html>, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- Daham, Hajem A.; Yang, Xinan; Warnes, Michaela K. (2017): An efficient mixed integer programming model for pairing containers in inland transportation based on the assignment of orders. In: *Journal of the Operational Research Society* 68 (6), S. 678–694. DOI: 10.1057/s41274-016-0132-0.
- DAKOSY Datenkommunikationssystem AG (2018): myboxplace.de Die digitale Tauschplattform für Leercontainer. Online verfügbar unter https://www.dakosy.de/fileadmin/Redakteur/Loesungen/Logistics/Produktblatt1s_MY_BOXPLACE_DEUTSCH_190718I_WEB_A.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- DAKOSY Datenkommunikationssystem AG (2022): Hinterland. Online verfügbar unter <https://www.dakosy.de/cargo-communication/seehafen-hamburg>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

- Defryn, Christof; Sörensen, Kenneth (2018): Multi-objective optimisation models for the travelling salesman problem with horizontal cooperation. In: *European Journal of Operational Research* 267 (3), S. 891–903. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.12.028.
- Defryn, Christof; Sörensen, Kenneth; Dullaert, Wout (2019): Integrating partner objectives in horizontal logistics optimisation models. In: *Omega* 82 (6), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.omega.2017.11.008.
- Defryn, Christof; Vanovermeire, Christine; Sörensen, Kenneth (2016): Gain Sharing in Horizontal Logistic Co-operation: A Case Study in the Fresh Fruit and Vegetables Sector. In: Meng Lu und Joost de Bock (Hg.): *Sustainable Logistics and Supply Chains. Innovations and Integral Approaches*. Cham: Springer (Contributions to Management Science), S. 75–89. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-17419-8_4.
- Dekker, Rommert; van der Heide, Sander; van Asperen, Eelco; Ypsilantis, Panagiotis (2013): A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 25 (4), S. 528–542. DOI: 10.1007/s10696-012-9146-3.
- Demir, Emrah; Bektaş, Tolga; Laporte, Gilbert (2014): A review of recent research on green road freight transportation. In: *European Journal of Operational Research* 237 (3), S. 775–793. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.12.033.
- Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) (2021): Transportpreise auf Europas Straßen steigen. Hg. v. DVV Media Group GmbH. Online verfügbar unter <https://www.dvz.de/rubriken/detail/news/transportpreis-in-europa-steigt.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) (2022): Pünktlichkeit - Fahrpläne bleiben wertlos. Hg. v. DVV Media Group GmbH. Online verfügbar unter <https://e.infogram.com/f05fd47e-335d-4f60-a613-54e26e925366?src=embed>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) (2023): Mautsätze werden nahezu verdoppelt. Unter Mitarbeit von Lutz Lauenroth. Hg. v. DVV Media Group GmbH. Online verfügbar unter <https://www.dvz.de/rubriken/land/strasse/detail/news/mautsaetze-werden-nahezu-verdoppelt.html>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2023, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Di Francesco, Massimo; Crainic, Teodor Gabriel; Zuddas, Paola (2009): The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (5), S. 758–770. DOI: 10.1016/j.tre.2009.03.001.
- Dornemann, Jorin; Rückert, Nicolas; Fischer, Kathrin; Taraz, Anusch (2020): Artificial intelligence and operations research in maritime logistics. In: Christian M. Ringle, Wolfgang Kersten und Carlos Jahn (Hg.): *Digitalization in Maritime and Sustainable Logistics*. 30. Aufl.: epubli (Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)), S. 338–381.

- Drewry Maritime Research (Hg.) (2012): Container market - 2012/13: annual review and forecast; incorporating the Container Forecaster - 3Q12.
- Drewry Maritime Research (Hg.) (2020): Container Forecaster Quarter 2. Online verfügbar unter <https://www.drewry.co.uk/AfcMediaLibrary/Display/SecureDownload.cfm?code=29190>, zuletzt geprüft am 20.04.2022.
- Durach, Christian F.; Kembro, Joakim; Wieland, Andreas (2017): A New Paradigm for Systematic Literature Reviews in Supply Chain Management. In: *Journal of Supply Chain Management* 53 (4), S. 67–85. DOI: 10.1111/jscm.12145.
- Elbtainer Trading GmbH (2022): Container abladen - so wird es gemacht! Online verfügbar unter <https://www.containerbasis.de/container-abladen/>, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- Erdoğan, Kazım; Karabulut, Korhan (2022): Bi-objective green vehicle routing problem. In: *International Transactions in Operational Research* 29 (3), S. 1602–1626. DOI: 10.1111/itor.13044.
- Erera, Alan L.; Morales, Juan C.; Savelsbergh, Martin (2009): Robust Optimization for Empty Repositioning Problems. In: *Operations Research* 57 (2), S. 468–483. DOI: 10.1287/opre.1080.0650.
- Escudero, Alejandro; Muñuzuri, Jesús; Guadix, José; Arango, Carlos (2013): Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty. In: *Computers in Industry* 64 (2), S. 165–175. DOI: 10.1016/j.compind.2012.11.006.
- Europa-LKW.de (2022a): Technisches Datenblatt: Sattelzugmaschine MAN TGX 18.440 (400-480) BLS. Online verfügbar unter <https://www.europa-lkw.de/technische-daten-modell/man-tgx-18-440-4x2-bls-efficient-line>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Europa-LKW.de (2022b): Technisches Datenblatt: Sattelzugmaschine Volvo FH D 13 42 XA. Online verfügbar unter <https://www.europa-lkw.de/technische-daten-modell/volvo-fh-d-13-42-xa-tracteur-bas-suspension-integrale-pneumatique>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Facchinei, Francisco; Kanzow, Christian (2010): Generalized Nash Equilibrium Problems. In: *Annals of Operations Research* 175 (1), S. 177–211. DOI: 10.1007/s10479-009-0653-x.
- freightcourse (2022): Merchant Haulage vs Carrier Haulage: Main Differences Explained. Online verfügbar unter <https://www.freightcourse.com/merchant-haulage-vs-carrier-haulage/>, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Freightfinders GmbH (2022a): 20 Fuß ISO Container. Online verfügbar unter <https://freightfinders.com/de/container-transport/20-ft-iso-container/>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.

- Freightfinders GmbH (2022b): 40 Fuß ISO Container. Online verfügbar unter <https://freightfinders.com/de/container-transport/40-ft-iso-container/>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Frese, Florian (2021): Shipping Alliances: 2M, Ocean Alliance & THE Alliance [2021 Overview]. Hg. v. xChange Solutions GmbH. Online verfügbar unter <https://www.container-xchange.com/blog/shipping-alliances/>, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- Frese, Florian (2022): 11 Common Types of Shipping Containers: Standard and Special Equipment. Hg. v. xChange Solutions GmbH. Online verfügbar unter <https://www.container-xchange.com/blog/container-types-and-dimensions/>, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Funke, Julia; Kopfer, Herbert (2016): A model for a multi-size inland container transportation problem. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 89, S. 70–85. DOI: 10.1016/j.tre.2016.02.010.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F. (2018a): Centralized bundle generation in auction-based collaborative transportation. In: *OR Spectrum* 40 (3), S. 613–635. DOI: 10.1007/s00291-018-0516-4.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F. (2018b): Collaborative vehicle routing: a survey. In: *European Journal of Operational Research* 268 (1), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.10.023.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F. (2020): Shared resources in collaborative vehicle routing. In: *TOP* 28 (1), S. 1–20. DOI: 10.1007/s11750-020-00541-6.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F.; Salzman, Philipp E. H. (2018): Exact solutions for the collaborative pickup and delivery problem. In: *Central European Journal of Operations Research* 26 (2), S. 357–371. DOI: 10.1007/s10100-017-0503-x.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F.; Vetschera, Rudolf (2019): The cost of incentive compatibility in auction-based mechanisms for carrier collaboration. In: *Networks (New York, NY)* 73 (4), S. 490–514. DOI: 10.1002/net.21828.
- Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F.; Wieser, Sarah (2020): Assignment constraints in shared transportation services. In: *Annals of Operations Research* (305), S. 513–539. DOI: 10.1007/s10479-020-03522-x.
- Ghezelsöflu, Ali; Di Francesco, Massimo; Frangioni, Antonio; Zuddas, Paola (2018): A set-covering formulation for a drayage problem with single and double container loads. In: *Journal of Industrial Engineering International* 14 (4), S. 665–676. DOI: 10.1007/s40092-018-0256-8.
- Gioia, Dennis A.; Corley, Kevin G.; Hamilton, Aimee L. (2013): Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research. In: *Organizational Research Methods* 16 (1), S. 15–31. DOI: 10.1177/1094428112452151.

- Giusti, Riccardo; Manerba, Daniele; Bruno, Giorgio; Tadei, Roberto (2019): Sychromodal logistics: An overview of critical success factors, enabling technologies, and open research issues. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 129, S. 92–110. DOI: 10.1016/j.tre.2019.07.009.
- Glassdoor (2023): Gehalt als LKW-Fahrer in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.glassdoor.de/Geh%C3%A4lter/lkw-fahrer-gehalt-SRCH_KO0,10.htm, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Guajardo, Mario; Rönnqvist, Mikael (2016): A review on cost allocation methods in collaborative transportation. In: *International Transactions in Operational Research* 23 (3), S. 371–392. DOI: 10.1111/itor.12205.
- Guajardo, Mario; Rönnqvist, Mikael; Flisberg, Patrik; Frisk, Mikael (2018): Collaborative transportation with overlapping coalitions. In: *European Journal of Operational Research* 271 (1), S. 238–249. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.05.001.
- Gulati, Ranjay; Wohlgezogen, Franz; Zhelyazkov, Pavel (2012): The Two Facets of Collaboration: Cooperation and Coordination in Strategic Alliances. In: *Academy of Management Annals* 6 (1), S. 531–583. DOI: 10.5465/19416520.2012.691646.
- Gurobi Optimization, L. L.C. (2023): Leverage the Power of Python - Rich Python Modeling Environment. Hg. v. L. L.C. Gurobi Optimization. Online verfügbar unter <https://www.gurobi.com/features/gurobi-optimizer-delivers-rich-python-modeling-environment/>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Hacardiaux, Thomas; Defryn, Christof; Tancrez, Jean-Sébastien; Verdonck, Lotte (2021): Balancing partner preferences for logistics costs and carbon footprint in a horizontal cooperation. In: *OR Spectrum* 9 (100), S. 291. DOI: 10.1007/s00291-021-00651-y.
- Hafen Hamburg Marketing e.V. (2019): Neue Containerbrücken erreichen den Hamburger Hafen. Online verfügbar unter <https://www.hafen-hamburg.de/de/presse/news/neue-containerbruecken-erreichen-den-hamburger-hafen-36528/>, zuletzt aktualisiert am 05.11.2019, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Hafen Hamburg Marketing e.V. (2022): Die Fahrrinne ist bereit für tiefergehende Schiffe. Online verfügbar unter <https://www.hafen-hamburg.de/de/special/fahrrinnenanpassung/>, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Hapag-Lloyd AG (2022a): Erkunden Sie unser Container-Angebot. Online verfügbar unter <https://www.hapag-lloyd.com/de/services-information/cargo-fleet/container.html>, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Hapag-Lloyd AG (2022b): Special protection for dry cargo. Guidelines for Non-Operated Reefer (NOR) transports. Online verfügbar unter <https://www.hapag-lloyd.com/content/dam/website/downloads/pdf/NonOperatedReeferTransports.pdf>, zuletzt geprüft am 01.04.2022.

- Harris, Irina; Wang, Yingli; Wang, Haiyang (2015): ICT in multimodal transport and technological trends: Unleashing potential for the future. In: *International Journal of Production Economics* 159, S. 88–103. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.09.005.
- Heilig, Leonard; Lalla-Ruiz, Eduardo; Voß, Stefan (2017): port-IO: an integrative mobile cloud platform for real-time inter-terminal truck routing optimization. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (3-4), S. 504–534. DOI: 10.1007/s10696-017-9280-z.
- HHDR (2019): Containertypen. Hg. v. HHDR SYSTEMS Logistik & Lagerung GmbH. Online verfügbar unter <https://hhdrs.de/containertypen>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- HHLA (2021): Mit Lächeln aus dem Stau. Hg. v. Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter <https://www.ctd.de/nachrichten/mit-laecheln-aus-dem-stau.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- HHLA (2022a): Fragen und Antworten zur Slotbuchung für LKW-Transporte. Hg. v. Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter <https://hhla.de/kunden/trucker-info/slotbuchung/faq-slotbuchung>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- HHLA (2022b): Slotbuchungen für LKW-Transporte. Hg. v. Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter <https://hhla.de/kunden/trucker-info/slotbuchung>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Himstedt, Barbara; Meisel, Frank (2021): A Systematic Evaluation of Extensions for the Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem. In: *Logistics Research* 14 (1), Artikel 4, S. 1–10. DOI: 10.23773/2021_4.
- Hu, Qu; Wiegmans, Bart; Corman, Francesco; Lodewijks, Gabriel (2019): Critical Literature Review into Planning of Inter-Terminal Transport: In Port Areas and the Hinterland. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019 (2062), S. 1–15. DOI: 10.1155/2019/9893615.
- Hüttmann, Barbara Katharina (2013): Empty container logistics in the maritime economy. Evidence from the North Range. Zugl.: Hamburg, Univ., VWL, Dissertation, 2012. Hamburg: Kovač (Schriftenreihe Volkswirtschaftliche Forschungsergebnisse, 188).
- HVCC Hamburg Vessel Coordination Center GmbH (2022): Hamburg Vessel Coordination Center. Online verfügbar unter <https://www.hvcc-hamburg.de/>, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- Iannone, Fedele; Thore, Sten A.; Forte, Ennio (2007): Inland container logistics and interports. Goals and features of an ongoing applied research. In: *SSRN Journal*, S. 1–24. DOI: 10.2139/ssrn.1149723.
- iCON Container Service GmbH (2022): Container-Transport. Online verfügbar unter <https://www.icon-container.de/container-transport>, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- Irannezhad, Elnaz; Prato, Carlo G.; Hickman, Mark (2020): An intelligent decision support system prototype for hinterland port logistics. In: *Decision Support Systems* 130, Artikel 113227. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113227.

- Islam, Samsul (2018): Simulation of truck arrival process at a seaport: evaluating truck-sharing benefits for empty trips reduction. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 21 (1), S. 94–112. DOI: 10.1080/13675567.2017.1353067.
- Islam, Samsul; Olsen, Tava (2014): Truck-sharing challenges for hinterland trucking companies. In: *Business Process Mgmt Journal* 20 (2), S. 290–334. DOI: 10.1108/BPMJ-03-2013-0042.
- Islam, Samsul; Olsen, Tava; Daud Ahmed, M. (2013): Reengineering the seaport container truck hauling process. In: *Business Process Mgmt Journal* 19 (5), S. 752–782. DOI: 10.1108/BPMJ-Jun-2012-0059.
- Islam, Samsul; Shi, Yangyan; Ahmed, Jashim Uddin; Uddin, Mohammad Jasim (2019): Minimization of empty container truck trips: insights into truck-sharing constraints. In: *The International Journal of Logistics Management* 30 (2), S. 641–662. DOI: 10.1108/IJLM-08-2018-0191.
- Islam, Samsul; Uddin, Mohammad Jasim; Shi, Yangyan; Sharif, Taimur; Ahmed, Jashim Uddin (2021): Exploring shippers' motivations to adopt collaborative truck-sharing initiatives. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 51 (5), S. 528–550. DOI: 10.1108/IJPDLM-10-2019-0303.
- ISO 830:1999, 09.1999: ISO Freight containers. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:830:ed-2:v1:en>, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- ISO 668:2020, 01.2020: ISO Freight containers — Classification, dimensions and ratings. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:668:ed-7:v1:en>, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Jahn, Carlos (2010): Efficiency of maritime transport. A system approach from the logistics perspective. Online verfügbar unter https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/03-Jahn_Fraunhofer.pdf, zuletzt geprüft am 08.03.2022.
- Jähn, Thomas (2016): Wie die Welt in die Kiste kam. Hg. v. Norddeutscher Rundfunk. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/geschichte/Wie-die-Welt-in-die-Kiste-kam,container368.html>, zuletzt aktualisiert am 05.05.2016, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Johanning, Ralf (2022): Hamburger Hafen steigert Marktanteil beim Containerumschlag. Hg. v. Hafen Hamburg Marketing e.V. Online verfügbar unter <https://www.hafen-hamburg.de/de/presse/news/hamburger-hafen-steigert-marktanteil-beim-containerumschlag/>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2022, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Kolley, Lorenz; Rückert, Nicolas; Fischer, Kathrin (2021): A Robust Berth Allocation Optimization Procedure Based on Machine Learning. In: Udo Buscher, Rainer Lasch und Jörn Schönberger (Hg.): *Logistics Management*, Bd. 66. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Logistics), S. 107–122.

- Kolley, Lorenz; Rückert, Nicolas; Kastner, Marvin; Jahn, Carlos; Fischer, Kathrin (2023): Robust berth scheduling using machine learning for vessel arrival time prediction. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 35 (1), S. 29–69. DOI: 10.1007/s10696-022-09462-x.
- Konings, Rob (2005): Foldable Containers to Reduce the Costs of Empty Transport? A Cost–Benefit Analysis from a Chain and Multi-Actor Perspective. In: *Maritime Economics & Logistics* 7 (3), S. 223–249. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100139.
- Konings, Rob; Thijs, Remmelt (2001): Foldable Containers: a New Perspective on Reducing Container-Repositioning Costs. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 1 (4), S. 333–352.
- Kopfer, Herbert; Schönberger, Jörn; Sterzik, Sebastian; Zhang, Ruiyou (2010): Optimization of Inland Container Transportation with and without Container Sharing. In: Proceedings of the First International Conference on Logistics and Maritime Systems (LOGMS). Busan, Korea.
- Krafftahrt-Bundesamt (KBA) (2022): Verkehrsaufkommen 2021. Verkehrsaufkommen nach Containergröße und -kombinationen. Exceltabelle, Arbeitsblatt 12a. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_Verkehrsaufkommen/vd_verkehrsaufkommen_node.html, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- Krajewska, Marta A.; Kopfer, Herbert; Laporte, Gilbert; Ropke, Stefan; Zaccour, Georges (2008): Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing. In: *Journal of the Operational Research Society* 59 (11), S. 1483–1491. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2602489.
- Ksciuk, Jana; Kuhlemann, Stefan; Tierney, Kevin; Koberstein, Achim (2023): Uncertainty in Maritime Ship Routing and Scheduling: A Literature Review. In: *European Journal of Operational Research* 308 (2), S. 499–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006.
- KTH Trailer GmbH (2018): Containerchassis 40-Fuß. Online verfügbar unter <https://kth-trailer.de/index.php/produkte/container-chassis/containerchassis-40-fu%C3%9F-detail>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Kuehne + Nagel Management AG (2022): Overview of the different container types and sizes. Online verfügbar unter <https://home.kuehne-nagel.com/-/knowledge/overview-of-the-different-container-types-and-sizes>, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Lai, Michela; Crainic, Teodor Gabriel; Di Francesco, Massimo; Zuddas, Paola (2013): An heuristic search for the routing of heterogeneous trucks with single and double container loads. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 56, S. 108–118. DOI: 10.1016/j.tre.2013.06.001.
- Lam, Jasmine S. L.; Gu, Yimiao (2013): Port hinterland intermodal container flow optimisation with green concerns: a literature review and research agenda. In: *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 5 (3), Artikel 54190, S. 257–281. DOI: 10.1504/IJSTL.2013.054190.

- Lam, Jasmine Siu Lee; Gu, Yimiao (2016): A market-oriented approach for intermodal network optimisation meeting cost, time and environmental requirements. In: *International Journal of Production Economics* 171 (2), S. 266–274. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.09.024.
- Lange, Ann-Kathrin; Schwientek, Anne; Jahn, Carlos (2017): Reducing truck congestion at ports – classification and trends. In: Christian M. Ringle, Wolfgang Kersten und Carlos Jahn (Hg.): *Digitalization in Maritime and Sustainable Logistics*. 24. Aufl.: epubli (Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)), S. 37–58.
- Langen, Peter W. de; Fransoo, Jan C.; van Rooy, Ben (2013): Business Models and Network Design in Hinterland Transport. In: James H. Bookbinder (Hg.): *Handbook of Global Logistics*, Bd. 181. New York, NY: Springer New York (International Series in Operations Research & Management Science), S. 367–389.
- Le Hanh, Dam (2003): The logistics of empty cargo containers in the Southern California region. Final Report. Long Beach, CA, USA. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.202.9211&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 09.03.2022.
- Lei, Ting L.; Church, Richard L. (2011): Locating short-term empty-container storage facilities to support port operations: A user optimal approach. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47 (5), S. 738–754. DOI: 10.1016/j.tre.2011.01.004.
- Lerner, Markus (2017): Fahrleistungserhebung 2014. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter <https://www.bast.de/DE/Publikationen/DaFa/2018-2017/2017-04.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Li, Le; Negenborn, Rudy R.; Schutter, Bart de (2014a): Multi-agent cooperative transport planning of intermodal freight transport. In: IEEE (Hg.): 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China, 08.10.2014 - 11.10.2014: IEEE, S. 2465–2471.
- Li, Le; Negenborn, Rudy R.; Schutter, Bart de (2015): Intermodal freight transport planning – A receding horizon control approach. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60, S. 77–95. DOI: 10.1016/j.trc.2015.08.002.
- Li, Le; Negenborn, Rudy R.; Schutter, Bart de (2017): Distributed model predictive control for cooperative synchromodal freight transport. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105, S. 240–260. DOI: 10.1016/j.tre.2016.08.006.
- Li, Ling; Wang, Bin; Cook, David P. (2014b): Enhancing green supply chain initiatives via empty container reuse. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 70, S. 190–204. DOI: 10.1016/j.tre.2014.06.018.
- Liu, Jiaguo; Wang, Junjin (2019): Carrier alliance incentive analysis and coordination in a maritime transport chain based on service competition. In: *Transportation Research*

- Part E: Logistics and Transportation Review* 128 (1), S. 333–355. DOI: 10.1016/j.tre.2019.06.009.
- Lorenz, Christian (2021): Tollerort wird bevorzugter Hub für COSCO-Verkehre. Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft. Hamburg. Online verfügbar unter <https://hhla.de/medien/pressemitteilungen/detailansicht/tollerort-wird-bevorzugter-hub-fuer-cosco-verkehre>, zuletzt geprüft am 08.03.2022.
- Los, Johan; Schulte, Frederik; Spaan, Matthijs T.J.; Negenborn, Rudy R. (2020): The value of information sharing for platform-based collaborative vehicle routing. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 141, Artikel 102011. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102011.
- Lozano, Sebastián; Moreno, Plácido; Adenso-Díaz, Belarmino; Algaba, Encarnación (2013): Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. In: *European Journal of Operational Research* 229 (2), S. 444–452. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.02.034.
- Luo, Tian; Chang, Daofang; Xu, Zhenyu (2021): Forwarder's empty container ordering and coordination considering option trading in the container transportation service chain. In: *Computers & Industrial Engineering* 156 (3), Artikel 107251. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107251.
- Macharis, Cathy; Bontekoning, Yvonne M. (2004): Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. In: *European Journal of Operational Research* 153 (2), S. 400–416. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00161-9.
- Mancini, Simona; Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F. (2021): The collaborative consistent vehicle routing problem with workload balance. In: *European Journal of Operational Research* 2 (4), S. 955–965. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.12.064.
- Martin, Niels; Verdonck, Lotte; Caris, An; Depaire, Benoît (2018): Horizontal collaboration in logistics: decision framework and typology. In: *Operations Management Research* 11 (1-2), S. 32–50. DOI: 10.1007/s12063-018-0131-1.
- Mello, John Edmund; Manuj, Ila; Flint, Daniel John (2021): Leveraging grounded theory in supply chain research: A researcher and reviewer guide. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 51 (10), S. 1108–1129. DOI: 10.1108/IJPDLM-12-2020-0439.
- Merk, Olaf; Busquet, Bénédicte; Aronietis, Raimonds (2015): The Impact of Mega-Ships. Unter Mitarbeit von Alain Lumbroso, Burkhard Lemper, Sönke Maatsch und Michael Tasto. Hg. v. OECD/ITF. Online verfügbar unter <https://www.itf-oecd.org/impact-mega-ships>, zuletzt geprüft am 08.03.2022.
- Moghdani, Reza; Salimifard, Khodakaram; Demir, Emrah; Benyettou, Abdelkader (2021): The green vehicle routing problem: A systematic literature review. In: *Journal of Cleaner Production* 279 (4), Artikel 123691. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123691.

- Moon, Ilkyeong; Do Ngoc, Anh-Dung; Konings, Rob (2013): Foldable and standard containers in empty container repositioning. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 49 (1), S. 107–124. DOI: 10.1016/j.tre.2012.07.005.
- MT Container GmbH (2022): 45-Fuß-Container. Online verfügbar unter <https://www.mtcontainer.de/container/45-fuss-container>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Nash, John (1951): Non-cooperative Games. In: *Annals of Mathematics* 54 (2), S. 286–296.
- NDR (2023): Hamburger Hafen: Umstrittener Cosco-Deal unter Dach und Fach. Online verfügbar unter <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Hamburger-Hafen-Umstrittener-Cosco-Deal-unter-Dach-und-Fach,cosco146.html>, zuletzt aktualisiert am 19.06.2023, zuletzt geprüft am 01.07.2023.
- Notteboom, Theo (2023): Top-15 container ports in European Union in 2022. Hg. v. PortEconomics. Online verfügbar unter <https://www.porteconomics.eu/top-15-container-ports-in-european-union-in-2022/>, zuletzt aktualisiert am 28.04.2023, zuletzt geprüft am 01.05.2023.
- Notteboom, Theo E.; Rodrigue, Jean-Paul (2005): Port regionalization: Towards a new phase in port development. In: *Maritime Policy & Management* 32 (3), S. 297–313. DOI: 10.1080/03088830500139885.
- Notteboom, Theo E.; Rodrigue, Jean-Paul (2008): Containerisation, Box Logistics and Global Supply Chains: The Integration of Ports and Liner Shipping Networks. In: *Maritime Economics & Logistics* 10 (1-2), S. 152–174. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100196.
- Notteboom, Theo E.; Rodrigue, Jean-Paul (2009): The future of containerization: perspectives from maritime and inland freight distribution. In: *GeoJournal* 74 (1), S. 7–22. DOI: 10.1007/s10708-008-9211-3.
- Olivo, Alessandro; Di Francesco, Massimo; Devoto, Roberto (2003): Intermodal freight transportation. The problem of empty containers in transportation service production. In: *European Transport* 9, S. 49–53.
- Olivo, Alessandro; Zuddas, Paola; Di Francesco, Massimo; Manca, Antonio (2005): An Operational Model for Empty Container Management. In: *Maritime Economics & Logistics* 7 (3), S. 199–222. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100136.
- Osicka, Ondrej; Guajardo, Mario; van Oost, Thibault (2019): Cooperative game-theoretic features of cost sharing in location-routing. In: *International Transactions in Operational Research* 9 (1), S. 1–27. DOI: 10.1111/itor.12698.
- OTC global GmbH (2022): Container Gestellung. Online verfügbar unter <https://www.otc-global.com/internationale-transporte/container/container-gestellung>, zuletzt geprüft am 14.07.2022.
- Ouhader, Hanan; El Kyal, Malika (2017): Combining Facility Location and Routing Decisions in Sustainable Urban Freight Distribution under Horizontal Collaboration: How Can

- Shippers Be Benefited? In: *Mathematical Problems in Engineering* 2017, S. 1–18. DOI: 10.1155/2017/8687515.
- Ouhader, Hanan; El Kyal, Malika (2020): Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery: Performance and scenario analysis. In: *Uncertain Supply Chain Management* 8, S. 303–320. DOI: 10.5267/j.uscm.2019.12.001.
- Palhazi Cuervo, Daniel; Vanovermeire, Christine; Sörensen, Kenneth (2016): Determining collaborative profits in coalitions formed by two partners with varying characteristics. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 70, S. 171–184. DOI: 10.1016/j.trc.2015.12.011.
- Pan, Shenle; Trentesaux, Damien; Ballot, Eric; Huang, George Q. (2019): Horizontal collaborative transport: survey of solutions and practical implementation issues. In: *International Journal of Production Research* 57 (15-16), S. 5340–5361. DOI: 10.1080/00207543.2019.1574040.
- Pangritz, Sinje (2018): Weniger Leerfahrten im Hafen – HPA übergibt Projekt „Virtuelles Depot“ an neuen Betreiber. Hg. v. Hamburg Port Authority. Online verfügbar unter <https://www.hamburg-port-authority.de/de/aktuelles-presse/weniger-leerfahrten-im-hafen-hpa-uebergibt-projekt-virtuelles-depot-an-neuen-betreiber/>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Pawlik, Thomas (1999): Seeverkehrswirtschaft. Internationale Containerlinienschiffahrt eine Betriebswirtschaftliche Einführung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Peng, Zixuan; Wang, Huaizhu; Wang, Wensi; Jiang, Yonglei (2019): Intermodal transportation of full and empty containers in harbor-inland regions based on revenue management. In: *European Transport Research Review* 11 (7), S. 2–18. DOI: 10.1186/s12544-018-0342-4.
- Pomponi, Francesco; Fratocchi, Luciano; Tafuri, Solvia Rossi (2015): Trust development and horizontal collaboration in logistics: a theory based evolutionary framework. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 20 (1), S. 83–97. DOI: 10.1108/SCM-02-2014-0078.
- Portbase (2022): Der zentrale Zugang zu Ihrer digitalen Hafenlogistik. Online verfügbar unter <https://www.portbase.com/de/>, zuletzt geprüft am 30.08.2022.
- Rathmann, Matthias (2020): Debatte um Transportpreise: Instafreight wegen Billigfrachten in der Kritik. Hg. v. EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH. Online verfügbar unter <https://www.eurotransport.de/artikel/debatte-um-transportpreise-instafreight-wegen-billigfrachten-in-der-kritik-11160404.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Reinecke, Pauline C.; Wrona, Thomas; Rückert, Nicolas; Fischer, Kathrin (2023): A typology of the collaboration willingness of carriers in hinterland logistics. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* ahead-of-print. DOI: 10.1108/IJPDLM-07-2022-0216.

- Resat, H. Giray; Turkay, Metin (2019): A discrete-continuous optimization approach for the design and operation of synchromodal transportation networks. In: *Computers & Industrial Engineering* 130, S. 512–525. DOI: 10.1016/j.cie.2019.03.005.
- Rodrigue, Jean-Paul; Notteboom, Theo (2012): Dry ports in European and North American intermodal rail systems: Two of a kind? In: *Research in Transportation Business & Management* 5, S. 4–15. DOI: 10.1016/j.rtbm.2012.10.003.
- Rowbotham, Mark (2014): *Introduction to Marine Cargo Management*. London: Taylor Francis.
- Rückert, Nicolas; Fischer, Kathrin; Reinecke, Pauline; Wrona, Thomas (2023): Collaboration Benefits in Port Hinterland Transportation. In: Udo Buscher, Janis S. Neufeld, Rainer Lasch und Jörn Schönberger (Hg.): *Logistics Management*. Cham: Springer Nature Switzerland (Lecture Notes in Logistics), S. 146–161.
- Sanchez Rodrigues, Vasco; Harris, Irina; Mason, Robert (2015): Horizontal logistics collaboration for enhanced supply chain performance: an international retail perspective. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 20 (6), S. 631–647. DOI: 10.1108/SCM-06-2015-0218.
- Santos, Maria João; Amorim, Pedro; Marques, Alexandra; Carvalho, Ana; Póvoa, Ana (2020): The vehicle routing problem with backhauls towards a sustainability perspective: a review. In: *TOP* 28, S. 358–401. DOI: 10.1007/s11750-019-00534-0.
- Saxe, Sebastian; Jahn, Carlos; Brümmerstedt, Katrin; Fiedler, Ralf (Hg.) (2017): *Digitalization of seaports - visions of the future*. Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen; Fraunhofer IRB-Verlag. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter <http://www.bookshop.fraunhofer.de/buch/digitalization-of-seaports-visions-of-the-future/247608>.
- Schiff&Hafen (2012): Größtes Containerschiff der Welt in Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.schiffundhafen.de/nachrichten/schiffahrt/detail/groesstes-containerschiff-der-welt-in-hamburg.html>, zuletzt aktualisiert am 17.12.2012, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Schiff&Hafen (2022): Größtes Containerschiff der Welt läuft Europa an. Online verfügbar unter <https://www.schiffundhafen.de/nachrichten/schiffbau/detail/neuer-rekordhalter-das-groesste-containerschiff-der-welt.html>, zuletzt aktualisiert am 09.04.2022, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Schlingmeier, Johannes (2016): *Kooperationen in der maritimen Leercontainerlogistik*. Dissertation. Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen; Fraunhofer IRB-Verlag; Technische Universität Hamburg-Harburg. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-452543.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2019.
- Schmidt, Boris (2021): Jedes Jahr ein Zehntel weniger. Hg. v. Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH. Online verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/verbrauch-schwerer-lastwagen-jedes-jahr-ein-zehntel-weniger-17139650.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.

- Schmoltzi, Christina; Wallenburg, Carl M. (2011): Horizontal cooperations between logistics service providers: motives, structure, performance. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 41 (6), S. 552–575. DOI: 10.1108/09600031111147817.
- Schönberger, Jörn; Buer, Tobias; Kopfer, Herbert (2013): A model for the coordination of 20-foot and 40-foot container movements in the hinterland of a container terminal. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): *Computational Logistics*, Bd. 8197. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 113–127.
- Schönknecht, Axel (2009): *Maritime Containerlogistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schulte, Frederik; Lalla-Ruiz, Eduardo; González-Ramírez, Rosa G.; Voß, Stefan (2017): Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105, S. 195–212. DOI: 10.1016/j.tre.2017.03.008.
- sennder Deutschland GmbH (2022a): Digital Freight Forwarder. Online verfügbar unter <https://www.sennder.com/de>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- sennder Deutschland GmbH (2022b): General terms and conditions. Online verfügbar unter <https://www.sennder.com/terms-conditions/shipper>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Seo, Young-Joon; Dinwoodie, John; Roe, Michael (2015): Measures of supply chain collaboration in container logistics. In: *Maritime Economics & Logistics* 17 (3), S. 292–314. DOI: 10.1057/mel.2014.26.
- Serrano-Hernández, Adrián; Juan, Angel A.; Faulin, Javier; Perez-Bernabeu, Elena (2017): Horizontal collaboration in freight transport: concepts, benefits and environmental challenges. Volume. In: *Statistics and Operations Research Transactions* 41 (2), S. 393–414. DOI: 10.2436/20.8080.02.65.
- Shapley, Lloyd Stowell (1953a): 17. A Value for n-Person Games. In: Harold William Kuhn und Albert William Tucker (Hg.): *Contributions to the Theory of Games (AM-28)*, Volume II: Princeton University Press, S. 307–318.
- Shapley, Lloyd Stowell (1953b): Stochastic Games. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 39 (10), S. 1095–1100. DOI: 10.1073/pnas.39.10.1095.
- Sheffi, Yossi; Saenz, Maria Jesus; Rivera, Liliana; Gligor, David (2019): New forms of partnership: the role of logistics clusters in facilitating horizontal collaboration mechanisms. In: *European Planning Studies* 27 (5), S. 905–931. DOI: 10.1080/09654313.2019.1575797.
- Shintani, Koichi; Konings, Rob; Imai, Akio (2010): The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport. In: *Transportation Research*

- Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (5), S. 750–763. DOI: 10.1016/j.tre.2009.12.008.
- Simon, Herbert Alexander (1997): *Administrative behavior. A study of decision-making processes in administrative organizations*. 4. ed. New York: Free Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/simon033/96034148.html>.
- Song, Dongping; Zhang, Jie; Carter, Jonathan; Field, Tony; Marshall, James; Polak, John et al. (2005): On cost-efficiency of the global container shipping network. In: *Maritime Policy & Management* 32 (1), S. 15–30. DOI: 10.1080/0308883042000176640.
- Song, Dong-Ping; Carter, Jonathan (2009): Empty container repositioning in liner shipping. In: *Maritime Policy & Management* 36 (4), S. 291–307. DOI: 10.1080/03088830903056934.
- Song, Dong-Ping; Dong, Jing-Xin (2015): Empty Container Repositioning. In: Chung-Yee Lee und Qiang Meng (Hg.): *Handbook of Ocean Container Transport Logistics*, Bd. 220. Cham: Springer International Publishing (International Series in Operations Research & Management Science, 220), S. 163–208.
- Soosay, Claudine Antoinette; Hyland, Paul (2015): A decade of supply chain collaboration and directions for future research. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 20 (6), S. 613–630. DOI: 10.1108/SCM-06-2015-0217.
- Soriano, Adria; Gansterer, Margaretha; Hartl, Richard F. (2023): The multi-depot vehicle routing problem with profit fairness. In: *International Journal of Production Economics* 255, Artikel 108669. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108669.
- SPD, Grüne, FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/1f422c60505b6a88f8f3b3b5b8720bd4/2021-12-10-koav2021-data.pdf>, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- Speranza, Maria Grazia (2018): Trends in transportation and logistics. In: *European Journal of Operational Research* 264 (3), S. 830–836. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.08.032.
- Statistisches Bundesamt (2021): Seeschifffahrt - Fachserie 8 Reihe 5 - September 2021. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/seeschifffahrt-monat-2080500211124.pdf>, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- StadieSeifi, Maryam; Dellaert, Nico P.; Nuijten, Wim P.M.; van Woensel, Tom; Raoufi, Rasa (2014): Multimodal freight transportation planning: A literature review. In: *European Journal of Operational Research* 233 (1), S. 1–15. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.06.055.
- Sterzik, Sebastian; Kopfer, Herbert; Yun, Won-Young (2015): Reducing hinterland transportation costs through container sharing. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 27 (2-3), S. 382–402. DOI: 10.1007/s10696-012-9167-y.
- Strauss, Anselm L.; Corbin, Juliet M. (2003): *Basics of qualitative research. Techniques and procedures for developing grounded theory*. 2. Aufl. Thousand Oaks: Sage Publ.

- teleroute (2023): Echte Kosten pro Kilometer berechnen. Hg. v. Alpegagroup. Online verfügbar unter <https://teleroute.com/de-de/ressourcen/gewinnrechner/>, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Theofanis, Sotirios; Boile, Maria (2009): Empty marine container logistics: facts, issues and management strategies. In: *GeoJournal* 74 (1), S. 51–65. DOI: 10.1007/s10708-008-9214-0.
- Torkjazi, Mohammad; Huynh, Nathan; Shiri, Samaneh (2018): Truck appointment systems considering impact to drayage truck tours. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 116, S. 208–228. DOI: 10.1016/j.tre.2018.06.003.
- Tran, Nguyen Khoi; Haasis, Hans-Dietrich; Buer, Tobias (2017): Container shipping route design incorporating the costs of shipping, inland/feeder transport, inventory and CO2 emission. In: *Maritime Economics & Logistics* 19 (4), S. 667–694. DOI: 10.1057/mel.2016.11.
- Tranfield, David; Denyer, David; Smart, Palminder (2003): Towards a Methodology for Developing Evidence - Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. In: *British Journal of Management* (14), S. 207–222.
- Uddin, Majbah; Huynh, Nathan (2020): Model for Collaboration among Carriers to Reduce Empty Container Truck Trips. In: *Information* 11 (8), Artikel 377. DOI: 10.3390/info11080377.
- Ulken, Christian (2022a): Hafen Hamburg - Containerumschlag. Online verfügbar unter <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/containerumschlag/>, zuletzt geprüft am 02.08.2022.
- Ulken, Christian (2022b): Anfrage Containerarten. Hamburg, 08.08.2022 an Nicolas Rückert. E-Mail.
- UNCTAD (2022): Review of Maritime Transport 2022. Genf (Review of maritime transport / United Nations Conference on Trade and Development, Geneva). Online verfügbar unter https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2021): Review of Maritime Transport 2021. Genf (Review of maritime transport / United Nations Conference on Trade and Development, Geneva). Online verfügbar unter <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2021>, zuletzt geprüft am 19.02.2022.
- Vairetti, Carla; González-Ramírez, Rosa G.; Maldonado, Sebastián; Álvarez, Claudio; Voß, Stefan (2019): Facilitating conditions for successful adoption of inter-organizational information systems in seaports. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 130, S. 333–350. DOI: 10.1016/j.tra.2019.09.017.

- van der Horst, Martijn R.; Langen, Peter W. de (2008): Coordination in Hinterland Transport Chains: A Major Challenge for the Seaport Community. In: *Maritime Economics & Logistics* 10 (1-2), S. 108–129. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100194.
- Vanovermeire, Christine; Sörensen, Kenneth; van Breedam, Alex; Vannieuwenhuysse, Bart; Verstrepen, Sven (2014): Horizontal logistics collaboration: decreasing costs through flexibility and an adequate cost allocation strategy. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 17 (4), S. 339–355. DOI: 10.1080/13675567.2013.865719.
- Veenstra, Albert W. (2005): Empty container reposition: the port of Rotterdam case. In: Simme Douwe P. Flapper, Jo AEE Nunen und Luk N. Wassenhove (Hg.): *Managing Closed-Loop Supply Chains*. 1. Aufl.: Springer, S. 65–76.
- Verband der Chemischen Industrie e.V. (2021): Ladungssicherungs-Informationen-System L-I-S. Erstellt unter Mitwirkung von VCI, VCH, BGL, DSLV, BAM, Polizei. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/langfassungen/langfassungen-pdf/211207-l-i-s.pdf>, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Verdonck, Lotte; Caris, An; Ramaekers, Katrien; Janssens, Gerrit K. (2013): Collaborative Logistics from the Perspective of Road Transportation Companies. In: *Transport Reviews* 33 (6), S. 700–719. DOI: 10.1080/01441647.2013.853706.
- Verdonck, Lotte; Ramaekers, Katrien; Depaire, Benoît; Caris, An; Janssens, Gerrit K. (2019): Analysing the Effect of Partner Characteristics on the Performance of Horizontal Carrier Collaborations. In: *Networks and Spatial Economics* 19 (2), S. 583–609. DOI: 10.1007/s11067-018-9389-y.
- VisiTrans GmbH (2022): Visimatch. Online verfügbar unter <https://www.visimatch.com/>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Vojdani, Nina; Lootz, Felix; Rösner, René (2013): Optimizing empty container logistics based on a collaborative network approach. In: *Maritime Economics & Logistics* 15 (4), S. 467–493. DOI: 10.1057/mel.2013.16.
- Volvo Trucks (2022): Volvo Trucks senkt Kraftstoffverbrauch bei Testfahrt um 18 %. Online verfügbar unter <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2022/dec/volvo-trucks-senkt-kraftstoffverbrauch-bei-testfahrt-um-18-prozent.html>, zuletzt aktualisiert am 14.12.2022, zuletzt geprüft am 01.06.2023.
- Wallenburg, Carl M.; Schäffler, Thorsten (2014): The Interplay of Relational Governance and Formal Control in Horizontal Alliances: A Social Contract Perspective. In: *Journal of Supply Chain Management* 50 (2), S. 41–58. DOI: 10.1111/jscm.12041.
- Wang, Yong; Ma, Xiaolei; Li, Zhibin; Liu, Yong; Xu, Maozeng; Wang, Yinhai (2017): Profit distribution in collaborative multiple centers vehicle routing problem. In: *Journal of Cleaner Production* 144, S. 203–219. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.001.

- Webfleet (2020): So viel Kraftstoff verbrauchen LKW. Hg. v. Bridgestone Mobility Solutions B.V. Online verfügbar unter https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/, zuletzt geprüft am 19.02.2023.
- Widjanarka, Alain; Wirjodirdjo, Budisantoso; Pujawan, Noyman; Baihaqi, Imam (2018): Coalition in Utilization Capacity in Container Transportation Services. In: *International Journal of Applied Science and Engineering* 15 (2), S. 95–104.
- Wiese, Harald (2005): Kooperative Spieltheorie: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Williamson, Oliver E. (1975): Markets and hierarchies: analysis and antitrust implications. A study in the economics of internal organization. New York, NY, London: Free Press; Collier Macmillan.
- Williamson, Oliver E. (1996): The Mechanisms of Governance. Cary: Oxford University Press Incorporated.
- Williamson, Oliver E. (2008): Transaction Cost Economics. In: Claude Ménard und Mary M. Shirley (Hg.): Handbook of New Institutional Economics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 41–65.
- Wolff, Jutta (2014): Stakeholder management along maritime container transport chains. Development of a framework and exemplified application in empty container logistics. In: *Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik* (11).
- Wong, Eugene Y.C.; Tai, Allen H.; Raman, Mardjuki (2015): A maritime container repositioning yield-based optimization model with uncertain upsurge demand. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 82, S. 147–161. DOI: 10.1016/j.tre.2015.07.007.
- xChange Solutions GmbH (Hg.) (2022): Lease shipper owned containers for one-way shipments on xChange. Online verfügbar unter <https://www.container-xchange.com/container-leasing/>, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- You, Jintao; Miao, Lixin; Zhang, Canrong; Xue, Zhaojie (2020): A generic model for the local container drayage problem using the emerging truck platooning operation mode. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 133, S. 181–209. DOI: 10.1016/j.trb.2019.12.009.
- Zhang, Mo; Janic, Milan; Tavasszy, Lóránt A. (2015): A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 77, S. 61–76. DOI: 10.1016/j.tre.2015.02.013.
- Zhang, Ruiyou; Yun, Won Young; Kopfer, Herbert (2010): Heuristic-based truck scheduling for inland container transportation. In: *OR Spectrum* 32 (3), S. 787–808. DOI: 10.1007/s00291-010-0193-4.

12 Anhang

12.1 Suchstrings des Literature Reviews

Suchstring für die Datenbank Scopus <https://www.scopus.com>

TITLE-ABS-KEY ((maritime* OR port OR container OR hinterland OR drayage) AND ("freight forwarder" OR carrier* OR truck* OR trailer OR chassis OR "Road freight") AND (cooperati* OR collaborati* OR share* OR alliance OR coalition) AND (optimi?ation* OR "Operations Research" OR "Mathematical Programming" OR milp OR mlp OR simulation OR heuristic OR model OR algorithm* OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Artificial Intelligence" OR dss OR "decision support system" OR analytics)) AND PUBYEAR > 2009

Suchstring für die Datenbank IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/>

((("Document Title":maritime OR "Document Title": port OR "Document Title": container OR "Document Title": hinterland OR "Document Title": drayage) OR ("Abstract":maritime OR "Abstract": port OR "Abstract": container OR "Abstract": hinterland OR "Abstract": drayage) OR ("Author Keywords":maritime OR "Author Keywords": port OR "Author Keywords": container OR "Author Keywords": hinterland OR "Author Keywords": drayage)) AND

((("Document Title":freight forwarder" OR "Document Title": carrier OR "Document Title": truck OR "Document Title": trailer OR "Document Title": chassis OR "Document Title": "Road freight") OR ("Abstract":freight forwarder" OR "Abstract": carrier OR "Abstract": truck* OR "Abstract": trailer OR "Abstract": chassis OR "Abstract": "Road freight") OR ("Author Keywords":freight forwarder" OR "Author Keywords": carrier OR "Author Keywords": truck OR "Author Keywords": trailer OR "Author Keywords": chassis OR "Author Keywords": "Road freight")) AND

((("Document Title":cooperati* OR "Document Title": collaborati* OR "Document Title": share* OR "Document Title": alliance OR "Document Title": coalition) OR ("Abstract":cooperati* OR "Abstract": collaborati* OR "Abstract": share* OR "Abstract": alliance OR "Abstract": coalition) OR ("Author Keywords":cooperati OR "Author Keywords": collaborati OR "Author Keywords": share OR "Author Keywords": alliance OR "Author Keywords": coalition)) AND

((("Document Title":optimi?ation OR "Document Title": "Operations Research" OR "Document Title": "Mathematical Programming" OR "Document Title": milp OR "Document Title": mlp OR "Document Title": simulation OR "Document Title": heuristic OR "Document Title": model OR "Document Title": algorithm OR "Document Title": "Machine Learning" OR "Document Title": "Deep Learning" OR "Document Title": "Artificial Intelligence" OR "Document Title": "DSS" OR "Document Title": "Decision Support System" OR "Document Title": "Analytics") OR ("Abstract":optimi?ation OR "Abstract": "Operations Research" OR "Abstract": "Mathematical Programming" OR "Abstract": milp OR "Abstract": mlp OR "Abstract": simulation OR "Abstract": heuristic OR "Abstract": model OR "Abstract": algorithm OR "Abstract": "Machine Learning" OR "Abstract": "Deep Learning" OR "Abstract": "Artificial Intelligence" OR "Abstract": "DSS" OR "Abstract": "Decision Support System" OR "Abstract": "Analytics") OR ("Author Keywords":optimi?ation OR "Author Keywords": "Operations Research" OR "Author Keywords": "Mathematical Programming" OR "Author Keywords": milp OR "Author Keywords": mlp OR "Author Keywords": simulation OR "Author Keywords": heuristic OR "Author Keywords": model OR "Author Keywords": algorithm OR "Author Keywords": "Machine Learning" OR "Author Keywords": "Deep Learning" OR "Author Keywords": "Artificial Intelligence" OR "Author Keywords": "DSS" OR "Author Keywords": "Decision Support System" OR "Author Keywords": "Analytics")))

Der Zeitraum wird separat angegeben.

Suchstring für die Datenbank Web of Science

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search> :

(TI=(maritime* OR port OR container OR hinterland OR drayage) OR AK=(maritime* OR port OR container OR hinterland OR drayage) OR AB=(maritime* OR port OR container OR hinterland OR drayage))

AND (TI=("freight forwarder" OR carrier* OR truck* OR trailer OR chassis OR "Road freight") OR AK=("freight forwarder" OR carrier* OR truck* OR trailer OR chassis OR "Road freight") OR AB=("freight forwarder" OR carrier* OR truck* OR trailer OR chassis OR "Road freight"))

AND (TI=(cooperati* OR collaborati* OR share* OR alliance OR coalition) OR AK=(cooperati* OR collaborati* OR share* OR alliance OR coalition) OR AB=(cooperati* OR collaborati* OR share* OR alliance OR coalition))

AND (TI=(optimi?ation* OR "Operations Research" OR "Mathematical Programming" OR milp OR mlp OR simulation OR heuristic OR model OR algorithm* OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Artificial Intelligence" OR "DSS" OR "Decision Support System" OR "Analytics") OR AK=(optimi?ation* OR "Operations Research" OR "Mathematical Programming" OR milp OR mlp OR simulation OR heuristic OR model OR algorithm* OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Artificial Intelligence" OR "DSS" OR "Decision Support System" OR "Analytics") OR AB=(optimi?ation* OR "Operations Research" OR "Mathematical Programming" OR milp OR mlp OR simulation OR heuristic OR model OR algorithm* OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Artificial Intelligence" OR "DSS" OR "Decision Support System" OR "Analytics")) AND LANGUAGE: (English) Timespan=2010-2021

12.2 Beispiel Datensatz Fallstudie 1 Instanz c

Liste der sieben Fuhrunternehmen

Fuhr- unternehmen	Kosten- satz km	Kosten- satz h	VHF	Max Lkw Stunden pro Tag	LKW- Depot (Knotenr)	Containerdreh- pauschale
Car1	0,5	15	1,13	9	41	100
Car2	0,46	14	1,01	8	42	100
Car3	0,44	15	1,07	8	43	100
Car4	0,41	15	1,12	8	44	100
Car5	0,48	15	1,11	9	45	100
Car6	0,42	14	1,14	8	46	100
Car7	0,47	14	1,3	8	47	100

Liste der 100 Kundenaufträge

Fahrttyp	Fuhrunternehmen	Kunden Erloes	Kunden Wertigkeit	Reederei-Allianz	Containertyp	Kompensationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car3	206	A	THE Alliance	40 HC	150	30	Daimler_Bremen	7	1,8	7	21	101	2	CTB	1	0,25	1	23	10	11		1	1	1	11	3
E	Car4	562	C	Ocean Alliance	40 HC	50	32	Siemens_Berlin	6	1,8	6	20	295	5	CTB	1	0,25	1	23	13	14		2	2	2	14	6
E	Car2	181	B	Ocean Alliance	40 HC	100	30	Daimler_Bremen	7	1,8	7	20	100	2	Eurogate	4	0,25	1	23	18	19		3	3	3	12	8
E	Car4	216	A	THE Alliance	45 HC	150	30	Daimler_Bremen	7	2	7	21	101	2	CTB	1	0,25	1	23	10	11		2	2	2	11	4
E	Car2	186	C	THE Alliance	20 S	50	30	Airbus_Bremen	17	1	6	20	108	2	CTA	2	0,25	1	23	18	19		1	1	1	11	10
E	Car5	376	A	Ocean Alliance	40 S	150	32	DB_Wittenberge	11	1,7	6	22	178	3	Eurogate	4	0,25	1	23	13	14		2	2	2	11	3
E	Car2	369	B	THE Alliance	20 S	100	39	Liebherr_Rostock	21	1	6	22	203	4	Eurogate	4	0,25	1	23	19	20		5	5	5	6	1
E	Car6	352	A	2M Alliance	20 S	150	34	REWE_Lehrte	14	1	6	23	162	3	CTA	2	0,25	1	23	12	13		2	2	2	12	5
E	Car6	221	B	Ocean Alliance	40 S	100	30	Airbus_Bremen	17	1,7	7	23	108	2	Eurogate	4	0,25	1	23	14	15		3	3	3	5	2
E	Car6	499	B	2M Alliance	40 S	100	40	VW_Emden	22	1,7	6	22	243	4	CTA	2	0,25	1	23	16	17		4	4	4	8	2
E	Car4	107	A	2M Alliance	45 HC	150	25	Stade_Buetzfleth	23	2	7	20	50	1	CTA	2	0,25	1	23	10	11		4	4	4	14	6
E	Car7	600	A	Ocean Alliance	40 S	150	40	VW_Emden	22	1,7	7	21	243	4	Eurogate	4	0,25	1	23	14	15		3	3	3	14	1
E	Car4	140	B	THE Alliance	20 S	100	29	Gallin	24	1	7	20	70	1	CTT	3	0,25	1	23	13	14		4	4	4	8	1
E	Car1	214	A	THE Alliance	40 S	150	30	Daimler_Bremen	7	1,7	7	20	100	2	Eurogate	4	0,25	1	23	18	19		1	1	1	6	8
E	Car6	481	C	THE Alliance	45 HC	50	40	VW_Emden	22	2	6	23	248	5	CTT	3	0,25	1	23	12	13		4	4	4	14	2
E	Car2	511	C	2M Alliance	40 S	50	33	Hella_Lippsadt	20	1,7	7	23	298	5	CTT	3	0,25	1	23	14	15		2	2	2	6	8
E	Car1	709	A	THE Alliance	20 S	150	37	Tesla_Gruenheide	8	1	6	23	330	6	CTB	1	0,25	1	23	15	16		4	4	4	9	6
E	Car5	204	C	Ocean Alliance	20 S	50	30	Airbus_Bremen	17	1	6	20	108	2	CTA	2	0,25	1	23	15	16		1	1	1	8	4
E	Car1	695	A	THE Alliance	40 HC	150	37	Tesla_Gruenheide	8	1,8	6	21	324	5	CTT	3	0,25	1	23	13	14		1	1	1	10	6
E	Car5	383	C	THE Alliance	40 HC	50	39	Liebherr_Rostock	21	1,8	7	21	203	4	Eurogate	4	0,25	1	23	13	14		2	2	2	5	7

Fahrttyp	Fuhrunter-nehmen	Kunden Erhoes	Kunden Wertigkeit	Reederei-Allianz	Containertyp	Kompan-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car3	19	B	2M Alliance	45 HC	100	25	Airbus_Fink enwerder	16	2	7	20	10	0	CTA	2	0,25	1	23	13	14		4	4	4	9	1
E	Car2	502	B	THE Alliance	20 S	100	38	Magdeburg	19	1	6	20	276	5	CTA	2	0,25	1	23	14	15		1	1	1	12	10
E	Car2	313	C	THE Alliance	40 HC	50	32	DB_Wittenb erge	11	1,8	7	21	182	3	CTB	1	0,25	1	23	12	13		2	2	2	7	3
E	Car2	154	B	Ocean Alliance	20 S	100	25	DB_Neumu enster	10	1	6	20	84	2	CTT	3	0,25	1	23	15	16		1	1	1	6	3
E	Car3	509	B	2M Alliance	40 S	100	33	Schaeffler_Steinhagen	12	1,7	6	23	264	4	CTA	2	0,25	1	23	18	19		3	3	3	7	6
E	Car3	146	B	Ocean Alliance	45 HC	100	29	Gallin	24	2	6	22	76	2	CTB	1	0,25	1	23	10	11		3	3	3	7	2
E	Car1	232	A	2M Alliance	40 HC	150	30	Airbus_Bre men	17	1,8	7	23	108	2	CTA	2	0,25	1	23	15	16		5	5	5	5	1
E	Car2	199	B	2M Alliance	40 S	100	30	Airbus_Bre men	17	1,7	6	20	109	2	CTB	1	0,25	1	23	11	12		3	3	3	13	5
E	Car5	523	A	2M Alliance	40 S	150	40	VW_Emden	22	1,7	6	21	248	5	CTT	3	0,25	1	23	18	19		3	3	3	5	2
E	Car2	566	A	Ocean Alliance	20 S	150	32	Siemens_B erlin	6	1	7	22	295	5	CTB	1	0,25	1	23	15	16		2	2	2	11	7
E	Car2	525	B	2M Alliance	45 HC	100	32	Siemens_B erlin	6	2	7	21	289	5	CTT	3	0,25	1	23	18	19		4	4	4	8	6
E	Car5	587	B	THE Alliance	40 HC	100	33	Hella_Lipps tadt	20	1,8	6	20	294	5	CTB	1	0,25	1	23	16	17		5	5	5	5	3
E	Car1	628	A	Ocean Alliance	40 HC	150	33	Hella_Lipps tadt	20	1,8	6	23	292	5	Eurogate	4	0,25	1	23	20	21		5	5	5	11	10
E	Car3	387	B	THE Alliance	20 S	100	39	Liebherr_R ostock	21	1	7	23	201	4	CTT	3	0,25	1	23	20	21		3	3	3	8	2
E	Car4	615	A	Ocean Alliance	45 HC	150	32	Siemens_B erlin	6	2	7	21	289	5	CTT	3	0,25	1	23	13	14		3	3	3	9	2
E	Car7	638	C	Ocean Alliance	40 S	50	32	Siemens_B erlin	6	1,7	6	23	289	5	CTT	3	0,25	1	23	20	21		5	5	5	7	5
E	Car4	587	A	THE Alliance	45 HC	150	38	Magdeburg	19	2	6	20	276	5	Eurogate	4	0,25	1	23	12	13		4	4	4	8	10
E	Car1	243	A	Ocean Alliance	20 S	150	30	Airbus_Bre men	17	1	6	23	113	2	CTT	3	0,25	1	23	10	11		2	2	2	8	7
E	Car3	74	C	2M Alliance	20 S	50	35	Amazon_W insen	9	1	7	23	41	1	CTT	3	0,25	1	23	18	19		3	3	3	8	8
E	Car7	112	B	2M Alliance	40 HC	100	25	Stade_Buet zfleth	23	1,8	6	20	48	1	CTB	1	0,25	1	23	9	10		3	3	3	10	2
E	Car6	205	B	Ocean Alliance	40 S	100	30	Daimler_Br emen	7	1,7	6	23	100	2	Eurogate	4	0,25	1	23	9	10		3	3	3	13	3
E	Car5	551	B	2M Alliance	20 S	100	38	Magdeburg	19	1	7	23	276	5	Eurogate	4	0,25	1	23	12	13		1	1	1	6	5
E	Car7	645	B	Ocean Alliance	45 HC	100	38	Magdeburg	19	2	7	23	276	5	Eurogate	4	0,25	1	23	17	18		2	2	2	10	6

Anhang

Fahrttyp	Fuhrunternehmen	Kunden Erfoes	Kunden Wertigkeit	Reederei-Allianz	Containertyp	Kompan-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car7	95	B	Ocean Alliance	20 S	100	35	Amazon_W insen	9	1	7	21	41	1	CTT	3	0,25	1	23	19	20		1	1	1	6	4
E	Car6	633	A	2M Alliance	40 S	150	33	Hella_Lipps tadt	20	1,7	7	20	292	5	Eurogate	4	0,25	1	23	15	16		4	4	4	9	2
E	Car6	217	A	Ocean Alliance	40 HC	150	30	Daimler_Br emen	7	1,8	6	20	100	2	CTA	2	0,25	1	23	15	16		5	5	5	8	10
E	Car4	327	B	2M Alliance	20 S	100	34	REWE_Leh rte	14	1	6	21	162	3	Eurogate	4	0,25	1	23	17	18		3	3	3	6	10
E	Car7	544	A	2M Alliance	40 S	150	38	VW_Wolfsb urg	5	1,7	6	23	220	4	CTA	2	0,25	1	23	14	15		2	2	2	12	4
E	Car2	420	C	Ocean Alliance	40 S	50	40	VW_Emden	22	1,7	6	22	245	4	CTB	1	0,25	1	23	15	16		3	3	3	8	3
E	Car2	559	A	THE Alliance	45 HC	150	32	Siemens_B erlin	6	2	6	20	291	5	CTA	2	0,25	1	23	15	16		2	2	2	8	9
I	Car4	566	B	THE Alliance	45 HC	100		CTT	3	0,25	1	23	281	5	Magdeburg	19	2	7	21	17	18	38	3	5	3	8	1
I	Car2	635	B	THE Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	349	6	Tesla_Grue nheide	8	1,8	7	22	13	14	37	2	4	2	3	1
I	Car1	432	C	Ocean Alliance	40 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	225	4	Liebherr_R ostock	21	1,8	7	20	16	17	39	5	7	5	1	1
I	Car5	82	B	THE Alliance	40 S	100		CTT	3	0,25	1	23	41	1	Norderstedt	15	1,7	6	22	12	13	25	4	6	4	8	2
I	Car2	341	A	THE Alliance	45 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	178	3	DB_Wittenb erge	11	2	7	20	7	8	32	1	3	1	3	1
I	Car5	74	B	Ocean Alliance	20 S	100		CTB	1	0,25	1	23	37	1	Norderstedt	15	1	7	21	18	19	25	3	5	3	2	1
I	Car7	679	B	THE Alliance	40 HC	100		CTT	3	0,25	1	23	290	5	Siemens_B erlin	6	1,8	6	22	20	21	32	1	3	1	2	1
I	Car1	179	A	2M Alliance	45 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	84	2	DB_Neumu enster	10	2	7	23	9	10	25	4	6	4	3	2
I	Car2	61	C	THE Alliance	45 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	35	1	Amazon_W insen	9	2	7	21	21	22	35	4	6	4	2	2
I	Car6	388	C	Ocean Alliance	40 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	200	3	DB_Wittenb erge	11	1,8	6	22	20	21	32	1	3	1	1	2
I	Car1	37	A	2M Alliance	40 S	150		CTA	2	0,25	1	23	17	1	thyssenkru pp_Hambur g	18	1,7	7	21	17	18	26	3	5	3	9	1
I	Car1	333	B	THE Alliance	40 S	100		CTB	1	0,25	1	23	164	3	REWE_Leh rte	14	1,7	7	20	12	13	34	5	7	5	3	1
I	Car7	681	A	2M Alliance	40 S	150		Eurogate	4	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	1,7	6	22	9	10	38	5	7	5	4	1
I	Car5	133	C	2M Alliance	40 HC	50		CTT	3	0,25	1	23	71	1	Gallin	24	1,8	7	23	17	18	29	4	6	4	3	1
I	Car4	617	A	2M Alliance	45 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	290	5	Siemens_B erlin	6	2	6	20	7	8	32	1	3	1	8	2

Fahrttyp	Fuhrunternehmen	Kunden Erhoes	Kunden Wertigkeit	Reederei-allianz	Containertyp	Kompan-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
I	Car6	388	C	Ocean Alliance	40 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	200	3	DB_Wittenberge	11	1,8	7	23	15	16	32	2	4	2	4	2
I	Car2	74	B	Ocean Alliance	20 S	100		CTT	3	0,25	1	23	40	1	Amazon_Winsen	9	1	7	20	14	15	35	1	3	1	3	2
I	Car4	158	B	THE Alliance	40 S	100		Eurogate	4	0,25	1	23	78	1	DB_Neumunster	10	1,7	7	22	19	20	25	1	3	1	3	1
I	Car4	626	C	THE Alliance	20 S	50		Eurogate	4	0,25	1	23	329	5	Tesla_Grueneheide	8	1	6	20	11	12	37	2	4	2	2	1
I	Car1	219	B	2M Alliance	45 HC	100		Eurogate	4	0,25	1	23	107	2	Airbus_Bremen	17	2	6	20	12	13	30	2	4	2	6	1
I	Car1	53	C	2M Alliance	20 S	50		CTA	2	0,25	1	23	28	1	Lufthansa_Technik_Hamburg	13	1	6	22	21	22	25	5	7	5	1	2
I	Car4	98	A	THE Alliance	40 HC	150		Eurogate	4	0,25	1	23	46	1	Stade_Buetzfleth	23	1,8	6	23	18	19	25	5	7	5	7	1
I	Car6	641	B	2M Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	312	5	Siemens_Berlin	6	1,8	6	21	15	16	32	4	6	4	2	1
I	Car3	73	A	Ocean Alliance	40 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	36	1	Amazon_Winsen	9	1,8	6	20	11	12	35	1	3	1	7	1
I	Car3	30	A	THE Alliance	40 S	150		CTT	3	0,25	1	23	15	1	thyssenkrupp_Hamburg	18	1,7	6	22	8	9	26	5	7	5	2	1
I	Car6	90	C	2M Alliance	40 HC	50		CTA	2	0,25	1	23	47	1	Stade_Buetzfleth	23	1,8	7	22	14	15	25	1	3	1	1	2
I	Car3	532	C	Ocean Alliance	40 S	50		Eurogate	4	0,25	1	23	293	5	Hella_Lipps tadt	20	1,7	6	20	12	13	33	5	7	5	2	2
I	Car6	345	C	2M Alliance	45 HC	50		CTT	3	0,25	1	23	178	3	DB_Wittenberge	11	2	6	20	11	12	32	4	6	4	1	2
I	Car5	586	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	293	5	Hella_Lipps tadt	20	1,8	6	21	12	13	33	2	4	2	9	2
I	Car7	82	B	Ocean Alliance	45 HC	100		Eurogate	4	0,25	1	23	35	1	Amazon_Winsen	9	2	6	23	19	20	35	1	3	1	1	1
I	Car4	35	B	THE Alliance	40 S	100		CTA	2	0,25	1	23	17	1	thyssenkrupp_Hamburg	18	1,7	6	22	17	18	26	2	4	2	6	1
I	Car3	66	C	THE Alliance	40 S	50		CTA	2	0,25	1	23	37	1	Norderstedt	15	1,7	6	22	11	12	25	2	4	2	1	1
I	Car1	606	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTT	3	0,25	1	23	298	5	Hella_Lipps tadt	20	1,8	7	22	9	10	33	5	7	5	6	2
I	Car3	629	B	Ocean Alliance	40 S	100		CTT	3	0,25	1	23	327	5	Tesla_Grueneheide	8	1,7	6	20	18	19	37	2	4	2	2	2
I	Car1	242	A	Ocean Alliance	20 S	150		CTT	3	0,25	1	23	113	2	Airbus_Bremen	17	1	7	21	7	8	30	1	3	1	7	2
I	Car1	595	B	Ocean Alliance	20 S	100		CTB	1	0,25	1	23	293	5	Hella_Lipps tadt	20	1	6	21	8	9	33	3	5	3	2	2

Anhang

Fahrtentyp	Fuhrunternehmen	Kunden Erfoes	Kunden Wertigkeit	Reederei-allianz	Containertyp	Kompen-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
I	Car7	175	A	Ocean Alliance	40 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	71	1	Gallin	24	1,8	6	22	9	10	29	1	3	1	6	2
I	Car1	628	C	THE Alliance	20 S	50		CTT	3	0,25	1	23	327	5	Tesla_Grueneheide	8	1	6	22	17	18	37	4	6	4	2	1
I	Car5	31	C	THE Alliance	45 HC	50		Eurogate	4	0,25	1	23	17	1	thyssenkrupp_Hamburg	18	2	6	23	8	9	26	2	4	2	5	1
I	Car1	38	C	Ocean Alliance	40 S	50		CTB	1	0,25	1	23	20	1	thyssenkrupp_Hamburg	18	1,7	7	23	17	18	26	2	4	2	2	2
I	Car1	450	B	2M Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	221	4	VW_Wolfsburg	5	1,8	7	23	10	11	38	1	3	1	8	1
I	Car6	76	B	2M Alliance	45 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	37	1	Norderstedt	15	2	7	21	20	21	25	2	4	2	2	2
I	Car4	559	A	Ocean Alliance	40 S	150		CTB	1	0,25	1	23	263	4	Schaeffler_Steinhagen	12	1,7	6	22	21	22	33	1	3	1	6	2
I	Car1	466	C	THE Alliance	40 HC	50		Eurogate	4	0,25	1	23	243	4	VW_Emden	22	1,8	6	23	8	9	40	4	6	4	7	1
I	Car1	362	B	2M Alliance	40 S	100		CTT	3	0,25	1	23	178	3	DB_Wittenberge	11	1,7	7	20	20	21	32	1	3	1	3	2
I	Car4	99	A	Ocean Alliance	40 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	47	1	Stade_Buetzfleth	23	1,8	7	20	8	9	25	5	7	5	2	1
I	Car6	91	B	THE Alliance	20 S	100		CTB	1	0,25	1	23	45	1	Stade_Buetzfleth	23	1	6	21	8	9	25	3	5	3	8	1
I	Car7	80	A	2M Alliance	40 S	150		CTT	3	0,25	1	23	32	1	Lufthansa_Technik_Hamburg	13	1,7	7	21	21	22	25	4	6	4	8	1
I	Car2	191	B	2M Alliance	20 S	100		CTA	2	0,25	1	23	105	2	Daimler_Bremen	7	1	6	22	19	20	30	5	7	5	7	1
I	Car4	221	B	Ocean Alliance	20 S	100		CTT	3	0,25	1	23	110	2	Daimler_Bremen	7	1	6	23	14	15	30	2	4	2	2	2

12.3 Beispiel Datensatz Fallstudie 2 Instanz g

Liste der sieben Fuhrunternehmen

Fuhr- unter- nehmen	Kosten- satz km	Kosten- satz h	VHF	Max Lkw Stunden pro Tag	LKW- Depot (Knotennr)	Container- dreh- pauschale	Min Ruhe- zeit	Über- nacht- kosten
Car1	0,44	15	1,29	10	41	10	10	60
Car2	0,5	14	1,03	10	42	10	10	60
Car3	0,46	15	1,1	8	43	10	10	60
Car4	0,43	14	1,1	9	44	10	10	60
Car5	0,4	14	1,2	8	45	10	10	60
Car6	0,4	15	1,01	8	46	10	10	60
Car7	0,47	15	1,04	8	47	10	10	60

Liste der 100 Kundenaufträge

Fahrttyp	Fuhrunternehmen	Kunden Erlaos	Kunden Wertigkeit	Reederei-allianz	Containertyp	Kompen-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car3	515	C	Ocean Alliance	20 S	50	38	Magdeburg	19	1	7	16	276	5	Eurogate	4	0,25	1	23	18	19	3	3	3	3	7	2
E	Car7	176	C	2M Alliance	40 S	50	30	Daimler_Bremen	7	1,7	7	16	100	2	Eurogate	4	0,25	1	23	16	17	1	1	1	1	11	4
E	Car5	545	C	Ocean Alliance	45 HC	50	38	Haldensleben_(Hermes)	17	2	7	16	267	5	CTB	1	0,25	1	23	19	20	4	4	4	4	12	8
E	Car2	398	C	2M Alliance	40 S	50	30	Osnabrück (VW)	22	1,7	7	16	227	4	CTT	3	0,25	1	23	10	11	5	5	5	5	5	4
E	Car4	571	B	THE Alliance	40 HC	100	36	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1,8	7	16	288	5	CTB	1	0,25	1	23	11	12	2	2	2	2	14	5
E	Car7	445	A	Ocean Alliance	45 HC	150	38	VW_Wolfsburg	5	2	7	16	225	4	CTT	3	0,25	1	23	18	19	1	1	1	1	6	8
E	Car5	665	A	2M Alliance	20 S	150	36	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1	7	16	292	5	CTT	3	0,25	1	23	17	18	1	1	1	1	14	7
E	Car2	540	B	THE Alliance	40 S	100	39	Berlin_Zentralwest_(Siemens)	6	1,7	7	16	291	5	CTA	2	0,25	1	23	20	21	1	1	1	1	6	2
E	Car3	669	B	Ocean Alliance	40 S	100	37	Berlin_Süd (Lidl)	10	1,7	7	16	338	6	Eurogate	4	0,25	1	23	18	19	4	4	4	4	12	3
E	Car5	453	C	THE Alliance	40 S	50	30	Osnabrück (VW)	22	1,7	7	16	222	4	Eurogate	4	0,25	1	23	9	10	2	2	2	2	10	2
E	Car3	587	A	2M Alliance	20 S	150	39	Berlin_West (BSH)	15	1	7	16	281	5	CTA	2	0,25	1	23	17	18	3	3	3	3	7	9
E	Car6	530	B	THE Alliance	40 S	100	36	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1,7	7	16	292	5	CTT	3	0,25	1	23	16	17	2	2	2	2	7	7
E	Car4	208	B	2M Alliance	20 S	100	30	Daimler_Bremen	7	1	7	16	105	2	CTT	3	0,25	1	23	12	13	3	3	3	3	6	9
E	Car5	713	B	THE Alliance	40 HC	100	37	Berlin_Südost (Tesla)	8	1,8	7	16	330	6	CTB	1	0,25	1	23	7	8	1	1	1	1	7	9
E	Car4	421	C	THE Alliance	40 HC	50	38	VW_Wolfsburg	5	1,8	7	16	225	4	CTT	3	0,25	1	23	13	14	2	2	2	2	5	7
E	Car4	707	A	THE Alliance	20 S	150	37	Berlin_Süd (Lidl)	10	1	7	16	339	6	CTA	2	0,25	1	23	7	8	1	1	1	1	9	1
E	Car3	425	C	2M Alliance	40 HC	50	30	Osnabrück (VW)	22	1,8	7	16	227	4	CTT	3	0,25	1	23	12	13	2	2	2	2	13	8

Fahrttyp	Fuhrunter-nehmen	Kunden Erlöses	Kunden Wertigkeit	Reederei-Allianz	Containertyp	Kompen-sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden-auftrag Voll-container-transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car7	393	C	Ocean Alliance	40 HC	50	30	Osnabrück (VW)	22	1,8	7	16	222	4	CTA	2	0,25	1	23	14	15	5	5	5	5	14	4
E	Car2	604	B	THE Alliance	45 HC	100	37	Berlin_Süd ost (Tesla)	8	2	7	16	326	5	Eurogate	4	0,25	1	23	13	14	5	5	5	5	13	9
E	Car3	506	C	THE Alliance	45 HC	50	38	Haldensleb en_(Hermes)	17	2	7	16	271	5	CTT	3	0,25	1	23	12	13	5	5	5	5	13	10
E	Car1	230	C	Ocean Alliance	45 HC	50	30	Daimler_Bremen	7	2	7	16	105	2	CTT	3	0,25	1	23	10	11	4	4	4	4	11	5
E	Car2	541	B	2M Alliance	20 S	100	36	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1	7	16	292	5	CTT	3	0,25	1	23	16	17	4	4	4	4	8	3
E	Car5	517	C	Ocean Alliance	45 HC	50	36	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	2	7	16	253	5	CTB	1	0,25	1	23	21	22	4	4	4	4	13	4
E	Car1	630	A	THE Alliance	40 S	150	36	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	1,7	7	16	257	5	CTT	3	0,25	1	23	7	8	1	1	1	1	14	6
E	Car4	622	C	Ocean Alliance	40 S	50	36	Soest_(Magnus)	24	1,7	7	16	332	6	CTB	1	0,25	1	23	15	16	2	2	2	2	10	9
E	Car1	737	C	2M Alliance	40 HC	50	36	Soest_(Magnus)	24	1,8	7	16	336	6	CTT	3	0,25	1	23	10	11	5	5	5	5	10	3
E	Car7	349	B	2M Alliance	20 S	100	27	Heiligengra be_(Kronotex)	20	1	7	16	186	3	CTT	3	0,25	1	23	14	15	5	5	5	5	6	8
E	Car5	615	B	THE Alliance	40 S	100	39	Berlin_West (BSH)	15	1,7	7	16	285	5	CTB	1	0,25	1	23	21	22	1	1	1	1	14	10
E	Car2	431	A	2M Alliance	20 S	150	38	VW_Wolfsburg	5	1	7	16	220	4	CTA	2	0,25	1	23	12	13	5	5	5	5	8	9
E	Car5	82	A	THE Alliance	40 S	150	35	Amazon_Winsen	9	1,7	7	16	36	1	CTA	2	0,25	1	23	17	18	1	1	1	1	10	3
E	Car2	589	C	THE Alliance	45 HC	50	37	Berlin_Süd (Lidl)	10	2	7	16	336	6	CTT	3	0,25	1	23	20	21	4	4	4	4	10	4
E	Car3	509	B	2M Alliance	40 S	100	36	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	1,7	7	16	257	5	CTT	3	0,25	1	23	18	19	3	3	3	3	6	2
E	Car6	484	C	2M Alliance	40 HC	50	38	Schönbeck_(Amazon/Edeka)	18	1,8	7	16	282	5	CTA	2	0,25	1	23	7	8	1	1	1	1	8	1
E	Car2	196	A	2M Alliance	45 HC	150	30	Daimler_Bremen	7	2	7	16	100	2	CTA	2	0,25	1	23	17	18	3	3	3	3	7	10
E	Car6	591	A	Ocean Alliance	20 S	150	39	Berlin_Zentralost_(Jacobs)	12	1	7	16	308	5	CTA	2	0,25	1	23	20	21	2	2	2	2	6	10
E	Car6	550	A	2M Alliance	20 S	150	36	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1	7	16	286	5	Eurogate	4	0,25	1	23	21	22	1	1	1	1	12	2

Fahrttyp	Fuhrunter- nehmen	Kunden Erlöses	Kunden Wertigkeit	Reederei- allianz	Containertyp	Kompen- sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
E	Car6	486	A	Ocean Alliance	40 HC	150	36	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	1,8	7	16	253	5	CTB	1	0,25	1	23	17	18	5	5	5	5	8	8
E	Car1	708	C	Ocean Alliance	40 HC	50	37	Berlin_Süd 2 (Aldi)	21	1,8	7	16	323	6	CTT	3	0,25	1	23	18	19	4	4	4	4	7	4
E	Car3	628	C	Ocean Alliance	40 HC	50	36	Soest_(Magnus)	24	1,8	7	16	336	6	CTT	3	0,25	1	23	9	10	3	3	3	3	5	6
E	Car7	526	B	2M Alliance	40 HC	100	39	Berlin_West (BSH)	15	1,8	7	16	281	5	CTA	2	0,25	1	23	21	22	5	5	5	5	11	3
I	Car1	629	B	Ocean Alliance	40 HC	100		Eurogate	4	0,25	1	23	271	4	Berlin_Nord west_(Rewe)	16	1,8	7	16	14	15	3	3	5	3	9	1
I	Car7	390	C	2M Alliance	40 S	50		CTB	1	0,25	1	23	221	4	VW_Wolfsburg	5	1,7	7	16	15	16	3	3	5	3	8	1
I	Car3	439	A	2M Alliance	45 HC	150		CTB	1	0,25	1	23	210	3	Heiligengrabe_(Kronotex)	20	2	7	16	14	15	2	2	4	2	1	2
I	Car1	846	C	THE Alliance	20 S	50		Eurogate	4	0,25	1	23	386	7	Wolfen_(Deichmann)	14	1	7	16	11	12	3	3	5	3	8	1
I	Car1	764	B	THE Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	329	6	Berlin_Zentralost_(Jacobs)	12	1,8	7	16	8	9	2	2	4	2	9	1
I	Car4	208	B	Ocean Alliance	20 S	100		CTA	2	0,25	1	23	105	2	Daimler_Bremen	7	1	7	16	8	9	3	3	5	3	1	2
I	Car7	572	A	Ocean Alliance	45 HC	150		Eurogate	4	0,25	1	23	289	5	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	2	7	16	9	10	4	4	6	4	4	2
I	Car5	655	A	Ocean Alliance	40 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	287	5	Schönbeck_(Amazon/Edeka)	18	1,8	7	16	9	10	3	3	5	3	8	2
I	Car4	447	B	2M Alliance	20 S	100		CTT	3	0,25	1	23	226	4	VW_Wolfsburg	5	1	7	16	15	16	5	5	7	5	3	2
I	Car4	659	B	2M Alliance	40 S	100		CTA	2	0,25	1	23	333	6	Soest_(Magnus)	24	1,7	7	16	12	13	5	5	7	5	3	2
I	Car1	661	C	2M Alliance	40 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	301	5	Berlin_West (BSH)	15	1,8	7	16	14	15	5	5	7	5	4	2
I	Car5	586	C	THE Alliance	40 HC	50		CTT	3	0,25	1	23	287	5	Schönbeck_(Amazon/Edeka)	18	1,8	7	16	11	12	4	4	6	4	5	1
I	Car6	180	C	2M Alliance	45 HC	50		CTA	2	0,25	1	23	105	2	Daimler_Bremen	7	2	7	16	15	16	4	4	6	4	9	1
I	Car1	672	B	THE Alliance	40 HC	100		Eurogate	4	0,25	1	23	289	5	Paderborn_(Lidl/Amazon)	23	1,8	7	16	9	10	5	5	7	5	9	2
I	Car3	807	A	2M Alliance	40 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	386	7	Wolfen_(Deichmann)	14	1,8	7	16	12	13	5	5	7	5	4	2

Fahrttyp	Fuhrunter- nehmen	Kunden Erlöses	Kunden Wertigkeit	Reederei- allianz	Containertyp	Kompen- sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
I	Car6	200	B	THE Alliance	20 S	100		CTT	3	0,25	1	23	110	2	Daimler_Br emen	7	1	7	16	14	15	1	1	3	1	1	1
I	Car5	427	A	Ocean Alliance	20 S	150		CTT	3	0,25	1	23	187	3	Heiligengra be_(Kronot ex)	20	1	7	16	12	13	1	1	3	1	6	2
I	Car5	661	A	THE Alliance	45 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	290	5	Paderborn_ (Lidl/Amazo n)	23	2	7	16	13	14	1	1	3	1	9	2
I	Car3	505	C	THE Alliance	40 S	50		Eurogate	4	0,25	1	23	270	5	Haldensleb en_(Herme s)	17	1,7	7	16	12	13	4	4	6	4	7	2
I	Car2	470	C	THE Alliance	40 S	50		CTB	1	0,25	1	23	269	5	Haldensleb en_(Herme s)	17	1,7	7	16	8	9	4	4	6	4	5	1
I	Car5	405	B	THE Alliance	20 S	100		CTT	3	0,25	1	23	187	3	Heiligengra be_(Kronot ex)	20	1	7	16	9	10	2	2	4	2	1	1
I	Car4	610	A	2M Alliance	20 S	150		Eurogate	4	0,25	1	23	292	5	Berlin_Zent ralwest_(Si emens)	6	1	7	16	11	12	3	3	5	3	1	2
I	Car3	619	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	312	5	Berlin_Zent ralwest_(Si emens)	6	1,8	7	16	15	16	2	2	4	2	6	1
I	Car2	507	C	Ocean Alliance	45 HC	50		Eurogate	4	0,25	1	23	289	5	Paderborn_ (Lidl/Amazo n)	23	2	7	16	15	16	3	3	5	3	4	2
I	Car6	598	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	329	6	Berlin_Zent ralost_(Jac obs)	12	1,8	7	16	8	9	1	1	3	1	1	2
I	Car1	94	B	THE Alliance	45 HC	100		CTT	3	0,25	1	23	40	1	Amazon_W insen	9	2	7	16	15	16	5	5	7	5	3	1
I	Car7	579	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	309	5	Berlin_Zent ralost_(Jac obs)	12	1,8	7	16	13	14	3	3	5	3	7	1
I	Car3	535	B	THE Alliance	40 S	100		Eurogate	4	0,25	1	23	270	5	Haldensleb en_(Herme s)	17	1,7	7	16	14	15	5	5	7	5	6	2
I	Car7	579	C	THE Alliance	45 HC	50		CTA	2	0,25	1	23	328	6	Berlin_Süd (Lidl)	10	2	7	16	12	13	2	2	4	2	3	1
I	Car5	656	A	THE Alliance	20 S	150		CTB	1	0,25	1	23	288	5	Paderborn_ (Lidl/Amazo n)	23	1	7	16	15	16	1	1	3	1	2	2
I	Car7	646	A	THE Alliance	20 S	150		Eurogate	4	0,25	1	23	327	6	Berlin_Süd (Lidl)	10	1	7	16	14	15	3	3	5	3	8	2
I	Car5	630	A	THE Alliance	40 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	1,8	7	16	15	16	5	5	7	5	9	2

Fahrttyp	Fuhrunter- nehmen	Kunden Erlöses	Kunden Wertigkeit	Reederei- allianz	Containertyp	Kompen- sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
I	Car6	632	B	2M Alliance	40 S	100		CTB	1	0,25	1	23	347	6	Berlin_Süd 2 (Aldi)	21	1,7	7	16	7	8	1	1	3	1	3	1
I	Car3	561	A	Ocean Alliance	40 HC	150		CTB	1	0,25	1	23	269	5	Haldensleb en_(Herme s)	17	1,8	7	16	15	16	1	1	3	1	4	1
I	Car5	717	B	2M Alliance	40 HC	100		Eurogate	4	0,25	1	23	332	6	Soest_(Ma gnus)	24	1,8	7	16	15	16	2	2	4	2	3	1
I	Car3	611	A	2M Alliance	40 S	150		CTA	2	0,25	1	23	292	5	Berlin_Zent ralwest_(Si emens)	6	1,7	7	16	10	11	1	1	3	1	4	2
I	Car3	516	C	2M Alliance	45 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	2	7	16	12	13	4	4	6	4	2	2
I	Car3	426	C	Ocean Alliance	20 S	50		CTT	3	0,25	1	23	228	4	Osnabrück (VW)	22	1	7	16	12	13	5	5	7	5	8	1
I	Car7	570	C	2M Alliance	40 S	50		CTT	3	0,25	1	23	322	6	Berlin_Süd ost_(Höfne r)	11	1,7	7	16	8	9	2	2	4	2	2	1
I	Car5	630	B	Ocean Alliance	40 HC	100		CTB	1	0,25	1	23	292	5	Berlin_Nord west_(Rew e)	16	1,8	7	16	12	13	2	2	4	2	1	1
I	Car7	476	B	THE Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	254	5	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	1,8	7	16	12	13	3	3	5	3	9	2
I	Car4	67	C	2M Alliance	45 HC	50		CTA	2	0,25	1	23	36	1	Amazon_W insen	9	2	7	16	15	16	4	4	6	4	3	1
I	Car2	352	B	THE Alliance	20 S	100		CTA	2	0,25	1	23	190	3	Heiligengra be_(Kronot ex)	20	1	7	16	14	15	3	3	5	3	7	2
I	Car6	473	C	2M Alliance	20 S	50		CTB	1	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	1	7	16	15	16	5	5	7	5	9	2
I	Car2	367	C	2M Alliance	20 S	50		CTB	1	0,25	1	23	210	3	Heiligengra be_(Kronot ex)	20	1	7	16	15	16	5	5	7	5	4	2
I	Car3	576	A	THE Alliance	45 HC	150		Eurogate	4	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	2	7	16	8	9	3	3	5	3	5	1
I	Car4	515	C	Ocean Alliance	20 S	50		Eurogate	4	0,25	1	23	276	5	Magdeburg	19	1	7	16	7	8	3	3	5	3	3	2
I	Car2	531	A	THE Alliance	45 HC	150		CTA	2	0,25	1	23	272	4	Berlin_Nord west_(Rew e)	16	2	7	16	13	14	3	3	5	3	3	2
I	Car3	765	B	THE Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	386	7	Wolfen_(De ichmann)	14	1,8	7	16	8	9	5	5	7	5	1	1
I	Car6	702	B	THE Alliance	40 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	386	7	Wolfen_(De ichmann)	14	1,8	7	16	9	10	4	4	6	4	6	1
I	Car4	648	B	THE Alliance	20 S	100		Eurogate	4	0,25	1	23	327	6	Berlin_Süd (Lidl)	10	1	7	16	13	14	4	4	6	4	7	2

Fahrtentyp	Fuhrunter- nehmen	Kunden Erlöses	Kunden Wertigkeit	Reederei- allianz	Containertyp	Kompen- sationskosten	Export Depot Nr	Startort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Startort Nr	Ladezeit Startort	hartes ZF Startort Von	hartes ZF Startort Bis	Strecke [km] Vollcontainer	Fahrzeit [h] Vollcontainer	Zielort Kunden- auftrag Voll- container- transport	Zielort Nr	Ladezeit Zielort	hartes ZF Zielort Von	hartes ZF Zielort Bis	weiches ZF Tag Zielort Von	weiches ZF Tag Zielort Bis	Import Depot Nr	gewünschter Tag	Tag Max	Tag Min	Tardiness Cost	Earliness Cost
I	Car1	459	A	2M Alliance	45 HC	150		CTT	3	0,25	1	23	187	3	Heiligengra- be_(Kronot ex)	20	2	7	16	12	13	1	1	3	1	7	1
I	Car2	446	A	THE Alliance	40 S	150		CTT	3	0,25	1	23	228	4	Osnabrück (VW)	22	1,7	7	16	8	9	2	2	4	2	9	1
I	Car3	475	C	Ocean Alliance	40 S	50		CTA	2	0,25	1	23	254	5	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	1,7	7	16	7	8	2	2	4	2	4	1
I	Car6	598	B	2M Alliance	20 S	100		CTB	1	0,25	1	23	329	6	Berlin_Zent ralost_(Jac obs)	12	1	7	16	15	16	2	2	4	2	7	2
I	Car3	219	A	THE Alliance	40 HC	150		CTB	1	0,25	1	23	105	2	Daimler_Br emen	7	1,8	7	16	11	12	2	2	4	2	3	1
I	Car5	549	B	2M Alliance	45 HC	100		CTA	2	0,25	1	23	254	5	Bielefeld_(Edeka_Non food)	13	2	7	16	7	8	4	4	6	4	7	2
I	Car6	191	B	THE Alliance	40 S	100		CTA	2	0,25	1	23	105	2	Daimler_Br emen	7	1,7	7	16	8	9	3	3	5	3	2	1
I	Car3	644	C	THE Alliance	45 HC	50		CTB	1	0,25	1	23	345	6	Berlin_Süd ost_(Höfne r)	11	2	7	16	15	16	1	1	3	1	8	1
I	Car5	749	A	THE Alliance	45 HC	150		Eurogate	4	0,25	1	23	329	5	Berlin_Süd ost (Tesla)	8	2	7	16	14	15	4	4	6	4	9	1

