

Kooperative Tourenplanung - Eine quantitative Analyse

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Wirtschaftswissenschaft (Dr. rer. pol.)

der Juristischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Dipl.-Kffr. Susanne Berger

Halle (Saale),
Mai 2009

Erstgutachter: Prof. Dr. Christian Bierwirth
Zweitgutachter: Prof. Dr. Dirk Chr. Mattfeld

Verteidigungstermin: 02. November 2009

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Symbolverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Gegenstand und Vorgehensweise	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen der Transportwirtschaft	7
2.1 Logistik und Logistikprozesse	8
2.2 Transport als spezieller Logistikprozess	8
2.2.1 Transportleistungen	9
2.2.2 Transportdienstleister	11
2.2.3 Transportkette	12
2.2.4 Planungsprobleme in der Transportwirtschaft	14
2.3 Märkte für Transport- und andere logistische Leistungen	15
2.4 Rahmenbedingungen für die Transportwirtschaft	20
2.4.1 Transportnachfrage	20
2.4.1.1 Logistikeffekt	20
2.4.1.2 Güterstruktureffekt	21
2.4.1.3 Bedeutung des Straßengüterverkehrs	21
2.4.2 Politische Rahmenbedingungen	21
2.5 Erschließung von Rationalisierungspotenzialen bei der Leistungserstellung	23
2.5.1 Auswahl einer geeigneten Unternehmensstrategie	24
2.5.2 Einsatz moderner IuK-Technologie	25
2.5.3 Ausnutzung von Rationalisierungspotenzialen	26

2.5.4	Elektronische Transportmärkte	28
2.5.5	Konzentration und Kooperation	30
3	Kooperationen in der Transportwirtschaft	31
3.1	Begriff, Merkmale und Ziele von Kooperationen	32
3.2	Eine Übersicht zu Kooperationsformen in der Transportwirtschaft . .	34
3.2.1	Überbetriebliche Kooperation	35
3.2.2	Zwischenbetriebliche Kooperation	36
3.2.2.1	Horizontale Kooperation	36
3.2.2.2	Vertikale Kooperation	38
3.2.2.3	Diagonale Kooperation	40
3.3	Klassifikation von Ansätzen zur horizontalen Kooperation von TDL .	40
3.3.1	Zentrale und dezentrale Koordination	40
3.3.2	Übersicht zu dezentralen horizontalen Kooperationsansätzen .	41
3.3.3	Klassifikation dezentraler Kooperationsansätze	43
3.3.4	Ein neuer Ansatz für die Kooperation zwischen TDL	48
4	Grundlagen der Tourenplanung	53
4.1	Klassifikation von Tourenplanungsproblemen	54
4.2	Ausgewählte Tourenplanungsprobleme	57
4.2.1	Sammelverkehr	57
4.2.1.1	Geschäftsmodell und Planungsaufgabe	57
4.2.1.2	Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten	58
4.2.1.3	Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten	59
4.2.2	Kurierdienst	61
4.2.2.1	Geschäftsmodell und Planungsaufgabe	61
4.2.2.2	Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery .	62
4.2.2.3	Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Vorrangbeziehungen	64
4.3	Lösungsverfahren	67
4.3.1	Heuristiken	67
4.3.2	Metaheuristiken	69
4.3.3	Exakte Verfahren	69
5	Das Kooperative Tourenplanungsproblem	73
5.1	Problembeschreibung	74
5.2	Kosten- und Erlösfunktion	75
5.3	Fremdvergabe von Transportaufträgen	78

5.4	Optimierungsmodell	82
5.5	Verteilung von Kooperationsgewinnen	84
5.5.1	Übersicht zu Gewinnverteilungsmethoden	85
5.5.2	Beispiel zum Vergleich der Gewinnverteilungsmethoden	86
5.5.3	Gleichverteilung	87
5.5.4	Pricing Per Column	88
5.5.5	Verallgemeinerte Vickrey Auktion	90
5.5.6	Shapley Value	93
5.5.7	Collaboration Advantage Index	95
5.5.8	Vergleich der Gewinnverteilungsansätze	101
6	Dezentrale Lösungsverfahren	103
6.1	Framework zur kooperativen Tourenplanung	103
6.1.1	Voraussetzungen und Ziele	103
6.1.2	Aufbau	104
6.1.3	Ablauf	105
6.1.4	Freiheitsgrade	106
6.2	Auftragsweises Reallokationsverfahren	107
6.2.1	Übersicht zu einfachen Auktionsformen	108
6.2.2	Auswahl einer geeigneten Auktionsform	110
6.2.3	Ablauf des auftragsweisen Reallokationsverfahrens	113
6.3	Bündelweises Reallokationsverfahren	117
6.3.1	Kombinatorische Auktion	117
6.3.2	Ablauf des bündelweisen Reallokationsverfahrens	119
6.4	Vergleich der beiden Reallokationsverfahren	121
7	Quantitative Untersuchungen	125
7.1	Ausgewählte Fragestellungen	125
7.2	Generierung von Testinstanzen	127
7.3	Variation der Fahrzeugkapazitäten	129
7.3.1	Versuchsaufbau	129
7.3.2	Rechenergebnisse für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren	130
7.4	Geografische Anordnung der Kundengebiete	134
7.4.1	Versuchsaufbau	135
7.4.2	Rechenergebnisse für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren	137
7.5	Einfluss von strategischem Verhalten auf die dezentrale Planung	144
7.5.1	Versuchsaufbau	145

7.5.2	Analytische Betrachtungen zur Deckungsbeitragsänderung bei strategischem Verhalten	146
7.5.3	Einfluss von strategischem Verhalten im auftragsweisen Reallokationsverfahren	152
7.5.4	Einfluss von strategischem Verhalten im bündelweisen Reallokationsverfahren	156
7.6	Vergleich des auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahrens . .	160
7.6.1	Kosten der Dezentralisierung	160
7.6.2	Einfluss von strategischem Verhalten	161
7.6.3	Lösungsaufwand	162
7.6.4	Zur Aussagekraft der Ergebnisse	164
7.7	Weitere Fragestellungen	165
8	Zusammenfassung	167
	Anhang	185
	Testinstanzen für die Untersuchungen in Kapitel 7.3	185
	Testinstanzen für die Untersuchungen in Kapitel 7.4	187

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufteilung der Logistikkosten	9
2.2	Organisatorisches Kuppelprodukt bei der Erstellung von Transportleistungen	10
2.3	Aufbau der ein- und mehrgliedrigen Transportkette	13
2.4	Binnenländische Güterverkehrsleistung 1950 bis 2008	22
2.5	Anteile der Verkehrsbereiche an der Verkehrsleistung 1950 bis 2008	23
3.1	Übersicht zu Kooperationen in der Transportwirtschaft	34
4.1	Übersicht zu knotenorientierten Tourenplanungsproblemen	56
4.2	Lösung des MTSP mit zwei Touren und einer Giant-Route	59
4.3	Modifizierte Entfernungsmatrix für das MDTSP-c	60
4.4	Entfernungsmatrix für das MDTSPPD	65
4.5	Knotenorientierte Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme	68
5.1	Koordinaten der akquirierten Transportaufträge und geplante Tour für TDL 1	77
5.2	Grenzkosten in Abhängigkeit von der Anzahl durchgeführter Transportaufträge	79
5.3	Zahlungsflüsse für die Fremdvergabe mit Kompensationspreisen und Ausgleichszahlungen	80
5.4	Zahlungsflüsse für die Selbsterstellung, Fremdvergabe an TDL k und für die Übernahme eines Transportauftrags von TDL k	81
5.5	Übersicht zu Ansätzen für die Verteilung der Gewinne bzw. Kosten in einer Kooperation	85
5.6	Zahlungsströme in der Gewinnverteilungsphase für den Ansatz von Krajewska und Kopfer (2006)	96
5.7	Beispiel für Anstieg der Kosten bei gebündelter Auftragsdurchführung	99
6.1	Framework für den Austausch von Transportaufträgen	104
6.2	Kommunikations- und Informationsaufwand	113

6.3	Ablauf des auftragsweisen Reallokationsverfahrens anhand eines Beispiels	116
7.1	Geografische Aufteilung der 101 Orte aus der TSP-Instanz $R101$. . .	128
7.2	Konstruktion von Testinstanzen für verschiedene geografische Szenarien	136
7.3	Beispiele für Tourenpläne im Szenario A, O und I	142
7.4	Verlauf des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 1	147
7.5	Verlauf des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 2a und 2b . . .	149
7.6	Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 2a und 2b	149
7.7	Verläufe des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 3a und 3b . .	150
7.8	Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 3a und 3b, wenn $GB^2 \neq GB^3$	150
7.9	Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 3a und 3b, wenn $GB^2 = GB^3$	151
7.10	Veränderung des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Instanz $p72$, $p82$ und $p74$	151
7.11	Häufigkeitsverteilung für die Muster 1, 2a, 2b, 3a und 3b über alle 30 Instanzen bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens	153
7.12	Durchschnittliche relative Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} in Muster 2a, 2b, 3a und 3b bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens	154
7.13	Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über alle Muster bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens	155
7.14	Häufigkeitsverteilung für die Muster 1, 2a, 2b, 3a und 3b über alle 30 Instanzen bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens .	157
7.15	Verläufe des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 2a und 2b bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens	158
7.16	Durchschnittliche relative Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} in Muster 2a und 2b bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens	158
7.17	Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über alle Muster bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens .	159

Tabellenverzeichnis

2.1	Kriterien zur Strukturierung und Abgrenzung von Transportmärkten	16
2.2	Größen- und Verbundeffekte auf Anbieter- und Nachfragerseite	27
3.1	Klassifikation ausgewählter dezentraler Kooperationsansätze Teil 1 . .	51
3.2	Klassifikation ausgewählter dezentraler Kooperationsansätze Teil 2 . .	52
5.1	Koordinaten des Depots und der Pickup- und Deliveryorte für TDL1	77
5.2	Ermittlung des Deckungsbeitrags für TDL 1: $N_1 = \{1, 2, 3\}$ (in GE) .	78
5.3	Transportaufträge von TDL 1, 2 und 3 und deren Erlöse, Selbstkosten und Grenzgewinne	87
5.4	Matrix für die Gebote von TDL 1, 2 und 3 auf die sieben Auftrags- kombinationen	87
5.5	Ermittlung der Ausgleichszahlungen für das PPC	89
5.6	Ermittlung der Gesamtauszahlung ohne Teilnahme von TDL 2 in der GVA	91
5.7	Variation der Gebote durch TDL 2 in der GVA	92
5.8	Ermittlung der Gesamtauszahlung ohne Teilnahme von TDL 3 in der GVA	93
5.9	Gesamtwerte der Koalitionen zur Berechnung des Shapley Values . .	94
5.10	Matrix für die Gebote von TDL 1 und 2 auf drei Auftragskombina- tionen zur Berechnung des Shapley Values	95
5.11	Potenzielle Durchführungskosten aller Auftragsbündel für TDL 1, 2 und 3 zur Berechnung des CAI	97
5.12	Gebotsmatrix für TDL 1 und 2 bei nicht vorhandener Subadditivität	99
5.13	Gewinnauszahlung für TDL 1, 2 und 3 im Rahmen der Kooperation .	101
5.14	Vergleich der Gewinnverteilungsansätze anhand des Beispiels und der drei Kriterien	102
6.1	Zwei mögliche Konfigurationen des Frameworks	107
6.2	Vergleich der vier einfachen Auktionsformen	114

6.3	Ermittlung der Deckungsbeiträge für TDL $i = 1, 2, 3$ (in GE)	115
6.4	Ablauftechnischer Vergleich der Reallokationsverfahren	122
7.1	Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung bei einer Kapazität von 7 VE (in %) . .	131
7.2	Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung bei einer Kapazität von 11 VE (in %) .	132
7.3	Durchschnittliche <i>impr</i> , <i>gap</i> und Iterationszahl <i>iter</i> für die zentrale und dezentrale Planung bei Fahrzeugkapazitäten von 7 VE und 11 VE (in %)	133
7.4	Durchschnittliche Rechenzeiten für die zentrale und dezentrale Planung bei Fahrzeugkapazität von 7 und 11 VE (in Sekunden)	134
7.5	Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario <i>A</i> (in %)	138
7.6	Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario <i>O</i> (in %)	139
7.7	Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario <i>I</i> (in %)	140
7.8	Durchschnittliche <i>impr</i> , <i>gap</i> und Iterationszahl <i>iter</i> für die zentrale und dezentrale Planung bei im Szenario <i>A</i> , <i>O</i> und <i>I</i> (in %)	141
7.9	Durchschnittliche Rechenzeiten für Szenario <i>A</i> , <i>O</i> und <i>I</i> (in Sekunden)	144
7.10	Kosten der Dezentralisierung für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren (in %)	161
7.11	Einfluss von strategischem Verhalten auf das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren	162
7.12	Anzahl zu lösender Tourenplanungsprobleme und durchzuführender Auktionen für beide Reallokationsverfahren	163

Symbolverzeichnis

Notation für das Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten (Kapitel 4.2.1.2):

G	Graph
V	Menge an Knoten im Netzwerk, $V = V_d \cup V_r$
V_d	Menge an Depotknoten im Netzwerk, $V_d = \{0\}$
V_r	Menge an Serviceknoten im Netzwerk, $V_r = \{1, \dots, n\}$
E	Menge an Kanten im Graph
TL	insgesamt zurückgelegte Wegstrecke für den Besuch aller Knoten im Netzwerk
e_{ij}	Entfernung zwischen Knoten $i \in V$ Knoten $j \in V$
x_{ij}	Binärvariable, nimmt Wert 1 an, wenn die Kante zwischen Knoten i und j besucht wird
d_i	aufzunehmende Ladung an Knoten $i \in V_r$
Y_i	aktuelle Ladung vor Knoten $i \in V_r$
D	Fahrzeugkapazität

Notation für das Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten (Kapitel 4.2.1.3):

V_d	Menge an Depotknoten im Netzwerk, $V_d = \{n + 1, \dots, n + m + 1\}$
-------	---

Notation für das Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery (Kapitel 4.2.2.2):

V	Menge an Knoten im Netzwerk, $V = V_r^+ \cup V_r^- \cup V_d$
-----	--

V_d	Menge an Depotknoten im Netzwerk, $V_d = \{0, 2n + 1\}$
V_r^+	Menge an Pickupknoten im Netzwerk, $V_r^+ = \{1, \dots, n\}$
V_r^-	Menge an Deliveryknoten im Netzwerk, $V_r^- = \{n + 1, \dots, 2n\}$
b_{ij}	Binärvariable, nimmt Wert 1 an, wenn der Knoten i vor dem Knoten j in der Tour angefahren wird

Notation für das Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery (Kapitel 4.2.2.3):

V_d	Menge an Depotknoten im Netzwerk, $V_d = \{2n + 1, \dots, 2n + m + 1\}$
-------	---

Notation für die Problembeschreibung (Kapitel 5.1):

M	Menge an TDL im Netzwerk, $M = \{1, 2, \dots, m\}$
N_i^t	Menge von Transportaufträgen des TDL $i \in M$ in der Iteration t
N_i	Menge von Transportaufträgen des TDL $i \in M$ in einer beliebigen Iteration
N	Menge von Transportaufträgen im Netzwerk, $N = \cup N_i = \{1, 2, \dots, n\}$

Notation für die Ermittlung der Kosten- und Erlösfunktion (Kapitel 5.2):

r_j	Erlös pro Transportauftrag $j \in N$, von Verlager zu zahlen
c_{ij}	Grenzkosten für TDL $i \in M$, wenn er Transportauftrag $j \in N$ ausführt
p_{ij}	Grenzwinn den TDL $i \in M$ für Transportauftrag $j \in N$ erwirtschaftet
d_j	direkte Distanz zwischen den Kundenorten für Transportauftrag $j \in N$
br	Grundpreis
tr	Entfernungsabhängige Transportrate pro Kilometer
l_{ij}	Grenztourlänge von Transportauftrag $j \in N$, wenn er von TDL $i \in M$ ausgeführt wird
c_S	Stoppkosten pro Transportauftrag
c_F	Fahrtkosten pro Kilometer
$L(N')$	benötigte minimale Tourlänge für die Durchführung von $N' \subset N$

R_i	erwirtschafteter Deckungsbeitrag von TDL $i \in M$ bei Durchführung von N_i
C_i	entstandene Kosten von TDL $i \in M$ bei Durchführung von N_i
P_i	Deckungsbeitrag von TDL $i \in M$ bei Durchführung von N_i
P	Gesamtdeckungsbeitrag des Netzwerks bei Durchführung von N

Notation für die Fremdvergabe von Transportaufträgen (Kapitel 5.3):

u_j	Kompensationszahlung für Transportauftrag $j \in N$ in einer Rückwärtsauktion
v_j	Ausgleichszahlung für Transportauftrag $j \in N$ in einer Vorwärtsauktion
x_{ij}	Binärvariable, nimmt Wert 1 an, wenn TDL $i \in M$ Transportauftrag $j \in N$ ausführt
N_i^e	Menge von Transportaufträgen des TDL $i \in M$ nach der Reallokation

Notation für das Kooperative Tourenplanungsproblem (Kapitel 5.4):

P_i^0	Deckungsbeitrag von TDL $i \in M$ bei Ausführung von N_i^0
---------	--

Notation für die Berechnung des Shapley Value (Kapitel 5.5.6):

M	Menge an Spielern, $M = \{1, 2, \dots, m\}$
K	Koalition $K \subseteq M$ aus Spielern $i \in M$
y_i	Shapley Value für Spieler $i \in M$
$v(K \cup \{i\})$	Gesamtwert der Koalition $K \subseteq M$ mit Spieler $i \in M$
$v(K)$	Gesamtwert der Koalition ohne Spieler $i \in M$

Notation für die Berechnung des Collaboration Advantage Index (Kapitel 5.5.7):

M	Menge an TDL im Netzwerk, $M = \{1, 2, \dots, m\}$
G_{S_k}	restlicher Gewinn der Kooperation G_{S_k}
S_k	Auftragsbündel
CAI_{iS_k}	Collaboration Advantage Index für Auftragsbündel S_k und TDL $i \in M$

RG_{iS_k} resultierender Gewinn der Koalition für Auftragsbündel S_k und TDL
 $i \in M$

Notation für die Auswahl einer geeigneten Auktionsform (Kapitel 6.2.2):

v_i Tatsächliche Zahlungsbereitschaft von Bieter i für ein Gut

b_i Gebot von Bieter i für ein Gut

p Aktueller Preis für ein Gut

m Maximum der Gebote der anderen Bieter

Notation für das Combinatorial Auction Problem (Kapitel 6.3.1):

M Menge an Bietern in der Auktion, $M = \{1, 2, \dots, m\}$

S Menge an m verschiedenen Objekten (ein Auftrag von jedem der m TDL), $S = \cup S_k = \{1, 2, \dots, k\}$

$b_i(S_k)$ Gebot, das Bieter $i \in M$ bereit ist für die Auftragskombination $S_k \subseteq S$ zu zahlen

$y(S_k, i)$ Binärvariable, die ausdrückt, ob S_k dem Bieter $i \in M$ zugeordnet wird oder nicht

Z Gesamtauszahlung der Auktion

Abkürzungsverzeichnis

BGL	Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung
BRRA	Bündelweises Reallokationsverfahren
CAI	Collaboration Advantage Index
CAP	Combinatorial Auction Problem
COREM	Cooperative Resource Management for the Transport of Unit Loads
DARP	Dial-a-Ride Problem
DB	Deckungsbeitrag
DPD	Deutscher Paket Dienst
EDI	Electronic Data Interchange
gap	relative Verschlechterung gegenüber der zentralen Lösung
GB	Gebot
GE	Geldeinheit
GVA	Verallgemeinerte Vickrey Auktion
GVZ	Güterverkehrszentrum
KEP	Kurier-Express-Paket-Dienst
KN	Kooperatives Netzwerk
impr	relative Verbesserung gegenüber der nicht kooperativen Lösung
iter	Iteration
IuK-Technologie	Informations- und Kommunikations-Technologie
MAS	Multi-Agenten-System
MDB	Mittelwert der relativen Deckungsbeitragsänderung

MDTSP-c	Mult-Depot Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten
MDTSPPD	Mult-Depot Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery
MEWA	Modifizierte Vickrey Auktion
MVPDP	Multiple-Vehicle Pickup und Delivery Problem
PDP	Pickup und Delivery Problem
PDPTW	Pickup und Delivery Problem mit Zeitfenstern
PPC	Pricing per Column
SRRA	Auftragsweises Reallokationsverfahren
SVG	Straßenverkehrsgenossenschaft
TDL	Transportdienstleister
TSP	Traveling Salesman Problem
TSP-c	Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten
TSPPD	Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery
VE	Volumeneinheit
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern
XML	Extensible Markup Language

Kapitel 1

Gegenstand und Vorgehensweise

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Gütertransportgewerbe unterlag in den letzten Jahrzehnten vielfältigen Veränderungen, die Bedingungen der Geschäftstätigkeit von Transportdienstleistern (TDL) nachhaltig prägen. Vor allem die Aufhebung der Preisregulierung und die Lockerung der Marktzugangsbeschränkungen bewirken einen offenen Preis- und Qualitätswettbewerb. Durch die veränderten Wettbewerbsbedingungen ist eine deutliche Konzentrationstendenz auf dem Güterverkehrsmarkt zu erkennen. Großen Speditionsunternehmen gelingt es Ineffizienzen, wie eine geringe Auslastung der Transportkapazitäten von durchschnittlich nur 74 % und einen hohen Leerfahrtenanteil von 15-31 % (Sänger, 2004, S. 70f.), durch eine Konsolidierung ihrer Transportaufträge zu beseitigen. Kleine und mittlere Transportunternehmen sind oft nur durch die Teilnahme an Kooperationen in der Lage, die gestiegenen Verladeranforderungen zu erfüllen und die Leistungen zusätzlich effizient zu erbringen.

Kooperations- und Konzentrationstendenzen finden sich in der Transportwirtschaft besonders in Märkten, in denen vom Kunden ein flächendeckender Service gefordert wird. Dazu zählen vor allem Märkte für Stückgut und Kurier-Express-Paket-Dienste (KEP). Von den Top 10 Unternehmen des nationalen allgemeinen Stückgutmarktes befinden sich sechs Kooperationsverbände großer regionaler mittelständischer Transportunternehmen und vier Konzerne (Klaus, 2003). Das Geschäftsmodell der KEP-Dienste besteht darin, Güter beim Versender abzuholen, gegebenenfalls zu konsolidieren und dem Empfänger zuzustellen. Die Einsatzplanung der Ressource Fahrzeug soll dabei möglichst effizient gestaltet werden. Dies ist Aufgabe der Tourenplanung.

Bestrebungen zur Kooperation treten jedoch nicht nur im Bereich der Transportwirtschaft auf, sondern auch im Rahmen des Supply Chain Management, welches

sich mit der Planung und Steuerung der Güter-, Informations- und Geldflüsse der gesamten Wertschöpfungskette auseinandersetzt (Kuhn und Hellingrath, 2002). Um eine effiziente Leistungserstellung innerhalb der Supply Chain sicherzustellen, ist die Koordination der Planungsaktivitäten der beteiligten Unternehmen notwendig. In der Literatur wird dies als kollaborative Planung bezeichnet (Stadtler, 2009).

Eine Möglichkeit diese Art der Planungsabstimmung zwischen Transportunternehmen vorzunehmen, ist die Bildung von elektronischen Marktplätzen (Alt (1997); Bierwirth et al. (2002); Erdmann (1999)). Sie ermöglichen den Anbietern und Nachfragern von Transportleistungen, diese Leistungen zu spezifizieren, zu verhandeln und auszutauschen (Bakos, 1991). TDL nutzen diese Märkte vorwiegend als zwischenbetriebliches Ausgleichssystem von Fracht- und Laderaum. Für Verlader stellt es eher ein Beschaffungsinstrument für Transportleistungen dar.

In der Praxis treten auf elektronischen Marktplätzen hauptsächlich folgende Probleme auf (Sänger, 2004, S. 110ff.):

- **Fehlende Unterstützung aller Marktphasen:** Häufig besteht nur ein öffentlicher Verzeichnisdienst oder es werden lediglich auf Basis von Angeboten und Gesuchen Partner vermittelt. Von den 93 von Sänger (2004) untersuchten elektronischen Transportmärkten unterstützen 74 % lediglich die Informationsphase. Die Vereinbarungsphase in Form einer Preisermittlung wird dagegen eher selten unterstützt. Dienste zur Bewertung der Marktteilnehmer und eine Bonitätsprüfung (Abwicklungsphase) werden wiederum häufiger angeboten.
- **Mangelnde Kompatibilität:** Schwachstellen bei der Implementierung dieser Systeme entstehen durch die mangelnde Kompatibilität mit bestehenden Primärsystemen der Teilnehmer.
- **Akzeptanzprobleme:** Aus Sicht der Teilnehmer elektronischer Transportmärkte bestehen darüber hinaus Akzeptanzprobleme, besonders die Angst vor dem Verlust von Kunden oder einer zu großen Transparenz. Deshalb wird angestrebt, dass die TDL möglichst wenige wettbewerbsrelevante Informationen offen legen müssen. Dies wird durch dezentrale Kooperationsansätze erreicht, weshalb zentrale Ansätze nicht anwendbar sind.
- **Weitere Probleme:** Hier sind die mangelnde Aktualität und Qualität der Angebote sowie die mangelnde Qualität der Dienstleister zu nennen.

In der Praxis und in der wissenschaftlichen Literatur existieren Bestrebungen, alle Marktphasen unterstützende Ladungsaustauschsysteme zu entwickeln (Krajewska und Kopfer (2006); Gujo et al. (2007)). Diese Ansätze versuchen die Planungsaktivitäten der TDL aufeinander abzustimmen und damit beispielsweise die Transportkosten im Vergleich zum individuellen Vorgehen zu senken. Die Verknüpfung der

Planungssysteme von TDL setzt eine Kooperation voraus, auch wenn dies Bretzke (2000) in seiner Fragestellung nicht direkt formuliert:

“Lassen sich zukünftig die Tourenplanungssysteme von TDL untereinander zu einer interaktiven Ladungstauschbörse verknüpfen, bei der unter der Berücksichtigung aller Kapazitäten und Zeitrestriktionen ein überbetriebliches Optimum, einschließlich der zugehörigen Verrechnungspreise, ohne den Eingriff von Disponenten automatisch gefunden wird?“

Um eine solche Fragestellung zu beantworten, muss den diskutierten Problemen von elektronischen Marktplätzen in der Praxis begegnet werden. Dabei lege ich in meiner Arbeit besonderes Augenmerk auf die Unterstützung aller drei Marktphasen bei der dezentralen Kooperation von TDL bezüglich der Tourenplanung. Ziel ist es, die beteiligten TDL durch die Kooperation besser, keinesfalls jedoch schlechter zu stellen, als im nicht-kooperativen Fall. Für die TDL soll somit ein Anreiz zur Teilnahme an der Kooperation bestehen. Um die Akzeptanz der TDL sicherzustellen soll der Informationsaustausch dabei minimiert werden.

Um dies zu erreichen, wird eine Simulationsumgebung entwickelt, die verschiedene Geschäftsmodelle und Koordinationsmechanismen integriert. Die Simulationsumgebung ermöglicht es, bestehende Kooperationen zu bewerten, Rationalisierungspotenziale von Kooperationen zu quantifizieren und Situationen zu identifizieren, in denen Kooperationen vorteilhaft sind. Konkrete Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden, sind:

1. Wie wirkt sich die Knappheit von Kapazitäten auf den erreichbaren Nutzen eines kooperativen Netzwerks aus?
2. Hat die geografische Anordnung der Kundengebiete der TDL eine Auswirkung auf den Nutzen einer Kooperation?
3. Kann ein TDL des kooperativen Netzwerkes seinen Deckungsbeitrag durch strategisches Verhalten erhöhen?

1.2 Aufbau der Arbeit

Der erste Teil der Arbeit dient der Erörterung von theoretischen Grundlagen der Logistik und Transportwirtschaft. Da die Hauptaufgabe von TDL in der Organisation und Durchführung von Transporten zwischen Versendern und Empfängern besteht, werden in Kapitel 2 die Besonderheiten von Transportleistungen und die

Planungsaufgaben der TDL beschrieben. Auf Basis der Darstellung von grundlegenden Rahmenbedingungen der Geschäftstätigkeit von TDL, erfolgt eine Auflistung von Möglichkeiten für TDL Rationalisierungspotenziale zu erschließen.

Besonders kleine und mittlere Transportunternehmen können Rationalisierungspotenziale durch die Bildung von Kooperationen nutzen. Kooperationen in der Transportwirtschaft treten in vielfältigen Ausprägungen auf. Das Kapitel 3 bietet eine Übersicht zu Kooperationsformen in der Transportwirtschaft. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf horizontalen Kooperationen von TDL. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden deshalb verschiedene, in der wissenschaftlichen Literatur diskutierte, horizontale Kooperationsansätze vorgestellt und nach ausgewählten Kriterien klassifiziert. Im Anschluss wird der eigene Forschungsansatz von den vorgestellten Kooperationsansätzen abgegrenzt.

Die Tourenplanung stellt die wesentliche Planungsaufgabe von TDL dar. Sie besteht aus der Zuordnung von zu besuchenden Kundenorten zu Fahrzeugen und der Bestimmung der Besuchsreihenfolge. In Kapitel 4 werden Tourenplanungsprobleme zunächst allgemein klassifiziert. Das von den TDL zu lösende Tourenplanungsproblem hängt vom jeweiligen Geschäftsfeld. Es werden zwei Geschäftsfelder vorgestellt, die häufig innerhalb von Kooperationsinitiativen anzutreffen sind. Darüber hinaus erfolgen die Beschreibung der aus den Geschäftsfeldern ableitbaren Planungsaufgaben und die Formulierung als Tourenplanungsproblem. Im letzten Teil des Kapitels werden Algorithmen zur Lösung von Tourenplanungsproblemen vorgestellt, wobei der Hauptfokus auf den später verwendeten exakten Verfahren liegt.

Das Kapitel 5 führt die Kapitel 3 und 4 zusammen, indem ein neuartiges kooperatives Tourenplanungsproblem beschrieben und formuliert wird. Ein Kalkulationschema für die Ermittlung der Erlöse, Kosten und Deckungsbeiträge der TDL und ein Cashflow-Modell für die Transaktionen in einer Kooperation von TDL werden ebenfalls vorgestellt. Die Verteilung der durch eine Kooperation zusätzlich generierten Gewinne stellt einen wesentlichen Anreiz für TDL dar, an Kooperationen teilzunehmen. Diese Arbeit verfolgt nicht das Ziel, neue Gewinnverteilungsansätze oder Anreizsysteme zu entwickeln. Allerdings sollen die in der wissenschaftlichen Literatur diskutierten Gewinnverteilungsansätze erstmals klassifiziert und verglichen werden.

Das kooperative Tourenplanungsproblem kann zentral und dezentral gelöst werden. Standardisierte Tourenplanungsverfahren ermöglichen eine zentrale Lösung des Problems. Für die dezentrale Lösung des Problems wird in Kapitel 6 ein Framework entwickelt, mit dem der generellen Ablauf der dezentralen Reallokation von Transportaufträgen zu TDL abgebildet werden kann. Auf Basis der verschiedenen Freiheitsgrade des Frameworks werden in den Kapiteln 6.2 und 6.3 zwei verschiedene Lösungsverfahren konkretisiert.

In Kapitel 7 erfolgt die Validierung des Frameworks und die quantitative Bewertung der dezentralen Lösungsverfahren. Zu diesem Zweck werden die bereits genannten Fragestellungen beschrieben und anschließend anhand von Testszenarien experimentell ausgewertet. Durch den Vergleich von drei Strategien, in denen die TDL 1) nicht kooperieren, 2) auf Basis einer dezentralen Planung kooperieren und 3) auf Basis einer zentralen Planung kooperieren, können zum einen die Rationalisierungspotenziale von Kooperationen für verschiedene Geschäftsfelder und Wettbewerbssituationen und zum anderen die Kosten einer dezentralen Lösung ermittelt werden.

Kapitel 8 fasst den Gang der Arbeit und die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Kapitel 2

Grundlagen der Transportwirtschaft

Wirtschaften ist durch eine zunehmende Arbeitsteilung und Globalisierung gekennzeichnet. Resultat dieser Entwicklung sind vielfältige Güteraustauschbeziehungen, die die elementaren Transformationsprozesse der Produktion und des Konsums miteinander verknüpfen (Ihde (2001, S. 1); Vahrenkamp (2005, S. 3f.)). Der Logistik kommt dabei die Aufgabe zu, die Verfügbarkeit von Gütern und somit die Versorgung der Produktions- und Konsumtionsprozesse sicherzustellen (Bloech und Ihde (1997, S. 549); Ballou (1992, S. 3ff.)).

Früher wurde das Hauptaugenmerk auf Einsparungen im kostenintensiven Bereich der Produktion gelegt. Die Logistik nahm eher eine Hilfsfunktion ein. Dies änderte sich erst, als die Potenziale in der Produktion schon weitestgehend ausgeschöpft waren. Kosteneinsparungen sind nun eher durch strukturelle Veränderungen bezüglich der Logistik erreichbar. Das gilt insbesondere für die Beschaffung und den Vertrieb. Dazu gehören Standortveränderungen, Arbeitsteilung in der Wertschöpfungskette oder Restrukturierungen der Distribution. Die Logistik ist demzufolge für die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen von großer Bedeutung (Ihde, 2001, S. 26ff.).

Ziel dieses Kapitels ist es, notwendige Rationalisierungspotenziale zur Leistungserstellung für TDL zu identifizieren. Dazu werden in diesem Kapitel zunächst die grundlegenden Aufgaben der Logistik erläutert. Im Anschluss wird der Transport als spezieller Logistikprozess identifiziert und spezifiziert. Es erfolgt zudem eine Beschreibung der Planungsaufgaben von TDL und der Märkte für Transportleistungen, in denen sie agieren. Ausgehend von Rahmenbedingungen, die das Wirtschaften der TDL maßgeblich beeinflussen, werden im letzten Teil dieses Kapitels Möglichkeiten zur Erschließung von Rationalisierungspotenzialen vorgeschlagen.

2.1 Logistik und Logistikprozesse

Im wirtschaftlichen Bereich befasst sich die Logistik mit der Steuerung von Güterflüssen. Ziel der Logistik ist es nach Pfohl (1972, S. 28) über die richtige Ware in der richtigen Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort verfügen zu können. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Definitionen von Logistik. Nach Baumgarten (2004, S. 2) umfasst die Logistik in Unternehmen die „ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und -übergreifenden Güter- und Informationsflüsse“.

Laut Pfohl (2004b, S. 8f.) sind die Kernprozesse der Logistik der Transport, der Umschlag und die Lagerung. Während die Lagerung auf eine Zeitänderung der Güter abzielt, erfolgt beim Transport eine Raumveränderung und beim Umschlag eine Mengen- und Sortenänderung. Zur Transformation der Güter sind aber auch noch Unterstützungsprozesse wie die Verpackung und Signierung notwendig. Sie machen die Kernprozesse erst möglich und geben wichtige Hinweise für die Art des Transports, des Umschlags und der Lagerung. Zu den Logistikprozessen gehört darüber hinaus ebenfalls die Informationsfunktion, die durch Auftragsübermittlungs- und Auftragsbearbeitungsprozesse erfüllt wird.

Die Höhe der Logistikkosten wird in Unternehmen leicht unterschätzt. Dies liegt vor allem daran, dass die Definition von Logistikkosten in den Branchen und Ländern variiert und häufig unterschiedliche Kostenrechnungssysteme zum Einsatz kommen. Die durch logistische Prozesse verursachten Kosten werden oft nicht als solche identifiziert und verbergen sich somit meistens in Gemeinkostenzuschlägen. Zusätzlich sind die Logistikkosten den logistischen Leistungen nur schwer verursachungsgerecht zuordenbar, wobei der eigentliche Preis der logistischen Leistung unbekannt bleibt (Pfohl, 2004b, S. 51ff.). Die Logistikkosten nehmen laut einer 1999 veröffentlichten Studie einen Anteil von 4-13 % vom Umsatz ein. Bei der Aufteilung der Logistikkosten auf die verschiedenen Kernprozesse der Logistik, entsteht nach Klaus (2003, S. 66) die in Abbildung 2.1 dargestellte Kostenverteilung. Aus den Daten ist ersichtlich, dass der Transportbereich als logistische Leistung einen erheblichen Anteil an den Logistikkosten einnimmt.

2.2 Transport als spezieller Logistikprozess

Nach Pfohl (2004b, S. 162) beinhaltet Transport die Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mit Hilfe von Transportmitteln. Ein Transportauftrag ist demnach gekennzeichnet durch die Anforderungen eines Auftraggebers, ein bestimmtes Gut von einem Ort zu einem anderen zu transportieren. Der Transportauftrag lässt sich weiter spezifizieren durch seinen Kapazitätsbedarf. Nimmt

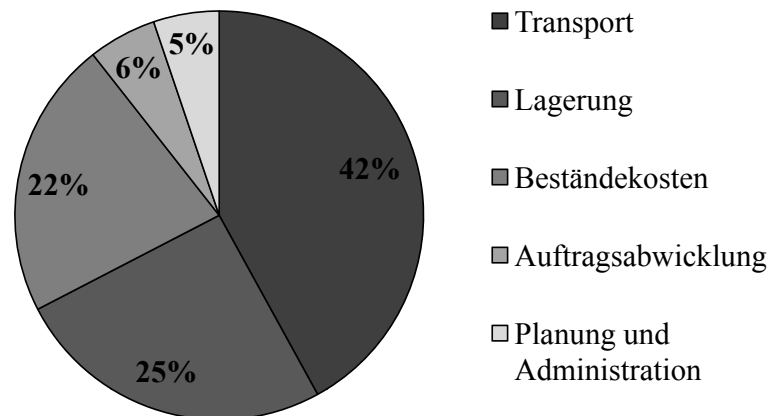


Abbildung 2.1: Aufteilung der Logistikkosten

ein Auftrag die gesamte Kapazität des Transportmittels ein, so handelt es sich um eine Komplettladung. Beansprucht die Durchführung nur ein Teil der Kapazität des Fahrzeugs, so handelt es sich um eine Teilladung. Ein Transportmittel ist dabei ein Hilfsmittel zur Durchführung der Raumüberbrückung von Transportgütern. Transportmittel lassen sich unterteilen in Fahrzeuge (Lastkraftwagen, Schiff, Flugzeug) und Fördermittel (Brückenkran, Förderband). Demgegenüber bezeichnet der Begriff Verkehrsträger die Gesamtheit aller Unternehmen, die sich einer bestimmten Verkehrsinfrastruktur bedienen (Bloech und Ihde, 1997, S. 1095). Darunter fällt der Rohrleitungs-, Schienengüter-, Straßengüter- und Luftfrachtverkehr sowie die Binnen- und Seeschifffahrt.

2.2.1 Transportleistungen

Während die Produktion von Gütern, deren physischen, räumlichen und zeitlichen Merkmale festlegt, verändern Transportleistungen lediglich die räumlichen und zeitlichen Merkmale von Gütern (Ihde, 2001, S. 3ff.). Die Produktion von logistischen und insbesondere von Transportleistungen weist typische Besonderheiten auf (Stabenau (1994, S. 51ff.); Aberle (2003, S. 230ff.); Sängler (2004, S. 64ff.); Pfohl (2004b, S. 162 und 288ff.)), die im Folgenden diskutiert werden.

Fehlende Lagerfähigkeit

Ein wesentliches Merkmal von Transportleistungen ist die fehlende Lagerfähigkeit, d. h. die Produktion und der Absatz fallen unmittelbar zusammen. Diese Eigenschaft zeigt sich besonders bei der Planung von Kapazitäten. Gerade die Nachfrage nach Transportleistung unterliegt starken Schwankungen, die auch in Spitzenzeiten

bedient werden muss. Allerdings stellen die notwendigen hohen Kapazitäten zusätzliche Fixkosten dar, die auch bei einer niedrigen Nachfrage gedeckt werden müssen. Sind die Kapazitäten jedoch zu gering, so entgehen dem TDL Gewinne aufgrund der Nichterfüllung von Transportaufträgen oder er muss Kapazitäten von Wettbewerbern zu höheren variablen Kosten einkaufen.

Abgeleitete Nachfrage

Nachfrage nach Transportleistungen ist eine von der eigentlichen Leistungserstellung abgeleitete Nachfrage. Sie ist somit abhängig von transportfremden Bereichen und deren Entwicklung. Isolierte verkehrspolitische Maßnahmen, besonders im Bereich der Preispolitik, haben nur begrenzte Wirkung auf die Nachfrage nach Transportleistungen.

Kuppelproduktion und Auslastung

Bei der Erstellung von Transportleistungen fallen weitere Verkehre als Kuppelprodukt an (Stabenau, 1994, S. 53), siehe (Abbildung 2.2). Dies liegt daran, dass es für die Erbringung dieser Leistungen keine festen Standorte gibt. Wird ein Trans-

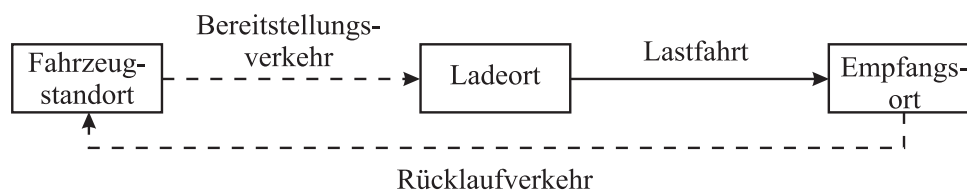


Abbildung 2.2: Organisatorisches Kuppelprodukt bei der Erstellung von Transportleistungen

port von einem Lade- zu einem Empfangsort nachgefragt und das Fahrzeug hat seinen Standort nicht im Ladeort, so muss erst ein Bereitstellungsverkehr zu diesem stattfinden. Nach der Beladung erfolgt der Transport der Güter zum Empfangsort. Aus organisatorischen Gründen muss das Fahrzeug anschließend wieder zurück zum Fahrzeugstandort kehren. Diese Fahrt wird Rücklaufverkehr genannt. Die Bereitstellungs- und Rücklaufverkehre sind neben der Nachfrage eine Ursache für einen hohen Leerfahrtenanteil im Straßengütertransport. Dieser führt zu einer geringen Auslastung der Fahrzeuge und somit zu geringen Deckungsbeiträgen. Durch eine effiziente Planung ist es möglich, den Anteil an Leerfahrten zu verringern. Weitere Auslastungsverbesserungen sind darüber hinaus durch die Akquirierung von Teilladungen realisierbar.

Erreichbarkeitslösungen

Besonders die Eisenbahn, Binnen- und Seeschifffahrt sowie der Luftverkehr benötigen Be- und Entladestationen sowie Umschlagsstationen zur Erbringung von Transportleistungen. Auch beim gebrochenen und kombinierten Verkehr sind solche Lösungen erforderlich. Demgegenüber kommt der ungebrochene Straßengüterverkehr (Haus-zu-Haus-Verkehr) ohne diese aus.

Differenzierte Produktionsverfahren

Transportleistungen werden bei Eisenbahn, Straßengüterverkehr, Schifffahrt oder Rohrleitungsverkehr mit sehr unterschiedlichen Produktionsverfahren erstellt, was zu unterschiedlichen Kostenstrukturen führt. So ist zum Beispiel der Fixkostenanteil bei Eisenbahn oder Schifffahrt deutlich höher als beim Straßengüterverkehr.

2.2.2 Transportdienstleister

An der Erbringung von Transportleistungen können eine Vielzahl von logistischen Dienstleistern beteiligt sein (Alt, 1997, S. 147). Die für die weiteren Betrachtungen relevanten Beteiligten in der Transportkette sind Verlader, Frachtführer und Spediteure.

- **Verlader:** Unter dem Begriff Verlader lassen sich jegliche Nachfrager von Transportleistungen zusammenfassen. In der Regel sind es Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen, die entweder Lieferanten oder Empfänger eines bestimmten Gutes sind. In Form von Werkverkehren sind auch sie in der Lage den Transport ihrer Güter selbst vorzunehmen.
- **Frachtführer:** Ein Frachtführer übernimmt gewerbsmäßig die Beförderung von Gütern zu Lande, in der Luft, auf Flüssen oder sonstigen Binnengewässern (§ 425 HGB). Die Aufgabe der Frachtführer ist es den reinen physischen Transport durchzuführen.
- **Spediteure:** „Durch den Speditionsvertrag wird der Spediteur verpflichtet, die Versendung des Gutes zu besorgen“ (§ 453 HGB). Der Spediteur nimmt dabei hauptsächlich die Rolle eines Vermittlers von Transportleistungen ein. Er hat aber auch die Möglichkeit, den Transport selbst durchzuführen (Selbsteintritt).

In der Regel initiiert der Verlader den Transportprozess, indem er seine Anforderungen (Rahmenbedingungen) an den Transport seiner Güter definiert. Danach wählt er einen geeigneten Spediteur aus, der die Planung und Durchführung des Transports übernimmt. Dieser Spediteur organisiert den Transport, beauftragt die benötigten

Frachtführer und andere logistische Dienstleister oder er erbringt die Transportleistung selbst. Dann erfolgt der Transport und die Bezahlung der erbrachten Leistung (Sänger, 2004, S. 64).

Werden die Dienstleister anhand ihres Leistungsspektrums differenziert, so zählen Frachtführer und Spediteure zu den Einzeldienstleistern. Diese übernehmen nur abgegrenzte Logistikleistungen, spezialisieren sich auf bestimmte Güter, Ladeeinheiten oder Branchen und nutzen eigene Transportmittel. Greift ein Spediteur neben eigenen Ressourcen auf die anderer Einzeldienstleister zurück, so gehört er zu den Verbunddienstleistern.

Verbunddienstleister verknüpfen mehrere einzelne Leistungen, um ihren Kunden größere und aufeinander abgestimmte Gesamtleistungspakete anbieten zu können. Ein klassisches Beispiel für Verbunddienstleister sind Paketdienste oder Stückgutspeditionen. Sie generieren Wettbewerbsvorteile vor allem durch die gezielte Bündelung der Güterströme, sind aber nicht in der Lage ihr Leistungsspektrum ausschließlich auf individuelle Kundenwünsche abzustimmen (Toonen, 2008, S. 585f.).

Systemdienstleister stimmen ihr Leistungsangebot genau auf die individuellen Bedarfe ihre Kunden ab. Sie bieten ganze Leistungspakete von der Übernahme von Transporten und Lagerdiensten, bis hin zur Organisation des gesamten Netzwerkes an, die in langfristigen Verträgen spezifiziert sind. Klassische Beispiele sind in der Konsumgüterdistribution zu finden. Hier übernehmen die Systemdienstleister die artikelbezogene Etikettierung, Lagerung und den Transport von Stück- und Ladungsgütern (Toonen, 2008, S. 586f.).

In dieser Arbeit werden Speditionsunternehmen betrachtet, die Vermittler von Transportleistungen sind, diese aber auch selbst durchführen. Im Folgenden werden sie als Transportdienstleister (TDL) bezeichnet.

2.2.3 Transportkette

Alle Vorgänge, die mit der Erstellung einer Transportleistung verbunden sind, werden als Transportkette bezeichnet. Nach DIN 30781, Teil 1, wird der Begriff der Transportkette definiert als „Folge von technisch und organisatorisch verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden“ (Deutsches Institut für Normung e.V., 1989). Transportketten lassen sich, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, in ein- und mehrgliedrige unterscheiden (Jünemann und Schmidt (2000, S. 327ff.); Ihde (2001, S. 49ff.)). Bei einer eingliedrigen Transportkette sind die Liefer- und Empfangspunkte im ungebrochenen oder Direktverkehr ohne den Wechsel des Transportmittels unmittelbar miteinander verbunden. Hierbei wird von Ladungsverkehr gesprochen. Bei einer mehrgliedrigen Transportkette (Transportnetz) findet demgegenüber ein Wechsel des Transportmittels

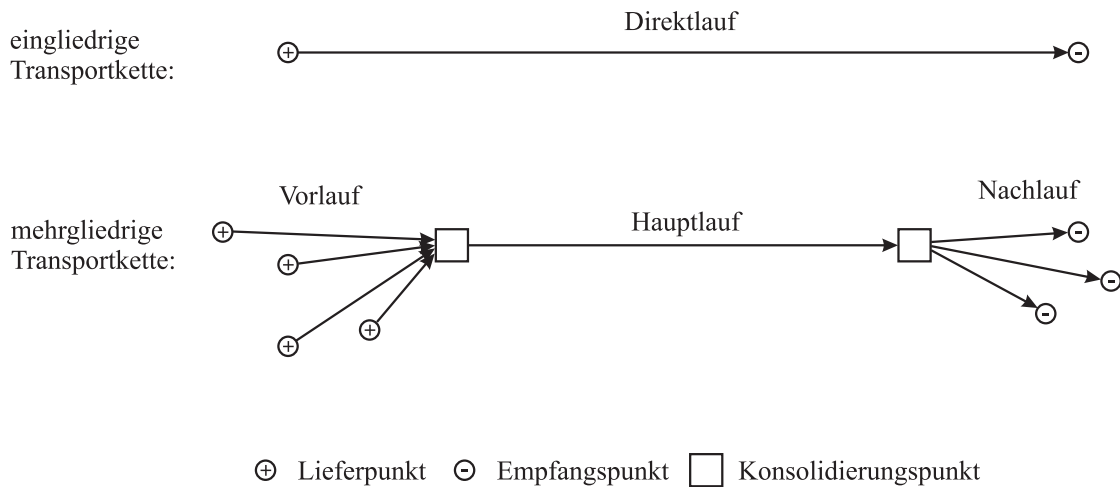


Abbildung 2.3: Aufbau der ein- und mehrgliedrigen Transportkette

statt. Stückgüter und Pakete, die die Transportmittel nicht vollständig ausfüllen (Teilladungen), werden zur Senkung der Transportkosten in einem Transportnetz gebündelt. Dieses Netz besteht aus untereinander verbundenen Depots und Umschlagseinrichtungen, die eine große Anzahl von potenziellen Empfangs- und Versandorten miteinander verbinden (Gomm und Hofmann, 2003, S. 132). Dieser Verkehr wird als Sammelladungsverkehr bezeichnet.

Die mehrgliedrige Transportkette lässt sich grundsätzlich in 3 Phasen unterteilen. Im Vorlauf (Flächenverkehr) werden die Güter von mehreren Lieferpunkten zu einem Sammelpunkt befördert. Danach erfolgt der Hauptlauf (Streckenverkehr) vom Sammelpunkt zu einem Verteilpunkt. Vom Sammelpunkt aus werden die Güter durch den Nachlauf (Flächenverkehr) zu den Empfangspunkten befördert. Der Vor- und Nachlauf findet aufgrund der guten Erreichbarkeit meist auf der Straße statt. Der Hauptlauf kann demgegenüber auf der Straße, der Schiene, Binnengewässern oder Übersee stattfinden.

Zu den mehrgliedrigen Transportketten lassen sich die gebrochenen Verkehre oder die kombinierten Verkehre i.w.S. zählen. Beim gebrochenen oder multimodalen Verkehr wird neben dem Transportmittel auch das Transportgefäß gewechselt. Es erfolgt also eine Umladung. Beim kombinierten Verkehr i.e.S. oder auch intermodalen Verkehr werden Güter mit zwei oder mehr Verkehrsträgern transportiert, ohne dabei das Transportgefäß zu wechseln. Die Voraussetzung dafür sind allerdings normierte Ladeeinheiten (z. B. Container). Das Ziel des kombinierten Verkehrs ist die bessere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten der Schiene und Binnenschiffverkehrswege und somit die Entlastung der Straße (Jünemann und Schmidt, 2000, S. 328). Der kombinierte Verkehr wird weiter in Behälter- und Huckepackverkehr unterschieden.

Der Behälterverkehr erfolgt mit Klein- oder Großbehältern (Container) und ist am häufigsten als Kombination Straße-Schiene oder Straße-Schiene-Hochsee anzutreffen. Beim Huckepackverkehr werden Straßenverkehrsmittel (LKW) über lange Strecken auf der Schiene befördert.

2.2.4 Planungsprobleme in der Transportwirtschaft

Laut Schneeweiß (1991, S. 1f.) und Fleischmann (2002a, S. A1-9) beinhaltet betriebswirtschaftliche Planung die Ermittlung und Festlegung zukünftiger Aktivitäten, die der Zielsetzung des Unternehmens dienen. Im Rahmen der Planung fallen Informationen an, die mit Unsicherheit behaftet sind. Je größer die zeitliche Reichweite dieser Planung ist, desto geringer ist die Verlässlichkeit der Datenbestände und die Genauigkeit der zu erstellenden Pläne. Aus diesem Grund und um die Komplexität der Planung zu reduzieren, werden in der Betriebswirtschaftslehre die strategische, taktische und operative Planungsebene unterschieden (Fleischmann (2002a, S. A1-9); Aberle (2003, S. 433ff.); Bock (2004, S. 5ff. und 47ff.)). Diese Ebenen sind hierarchisch aufgebaut und stellen die immer konkreter werdende Ausgestaltung der vorliegenden Entscheidungssituation dar.

Die Transportplanung beinhaltet alle wesentlichen Planungsaufgaben eines TDL. Zu den Aufgaben zählen die Gestaltung von Transportnetzen auf der strategischen Ebene, die Entscheidung über die Fahrzeugflotte und die Rahmentouren auf einer taktischen Ebene, die Planung des Fahrzeugeinsatzes oder die Beladeplanung auf der operativen Ebene (Fleischmann (2002c, S. A3-45); Crainic (2003); Wieberneit (2008)). In der Literatur wird zusätzlich zu den eben vorgestellten drei Planungsebenen noch die dispositive Ebene betrachtet. Sie stellt eine Echtzeitsteuerung, z. B. bei veränderten Verkehrsweginformationen, dar und ist für eine effiziente Realisierung der geplanten Abläufe zuständig.

Zwischen und innerhalb der Planungsebenen herrschen Interdependenzen. Die zu treffenden Entscheidungen auf allen Ebenen sind somit nicht unabhängig voneinander. So erfolgt in der Transportwirtschaft zum Beispiel die Fahrzeugeinsatzplanung auf der operativen Ebene auf Grundlage der Entscheidungen über die Fahrzeugflotte und die Rahmentouren auf der taktischen Ebene. Auch die Entscheidungen innerhalb der Ebenen sind interdependent. So erfolgt die Beladeplanung für Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Tourenplanung. Eine detaillierte Übersicht zu Planungsproblemen in der Transportwirtschaft findet sich in Crainic und Laporte (1997), Diruf (1999), Bock (2004, S. 47ff.) und Wieberneit (2008).

Da der Fuhrpark die Hauptressource eines TDL darstellt, besteht seine wesentliche Planungsaufgabe darin, einen effizienten Fahrzeugeinsatz zu gewährleisten. Die Fahrzeugeinsatzplanung findet auf der operativen Ebene statt und basiert auf den

durch die strategische und taktische Planung vorgegebenen Strukturen. Resultat dieser Planungsebene sind zeit- und mengen genaue Vorgaben für die Ausführung der Prozesse. Für einen TDL lassen sich folgende operative Planungsaufgaben unterscheiden.

- **Entscheidungen über Fremdvergabe oder Selbsterstellung:** In einem dynamischen Umfeld muss entschieden werden, ob eintreffende Transportaufträge selbst erstellt oder an externe Frachtführer fremd vergeben werden. Überlegungen zur Fremdvergabe von Transportaufträgen finden sich in Pankratz (2002).
- **Tourenplanung:** Die Tourenplanung ist ein wichtiger Spezialfall der Transportsteuerung. Sie umfasst die Zuweisung von Transportaufträgen zu Fahrzeugen und die Reihenfolgeplanung. Eine Übersicht zu Tourenplanungsproblemen findet sich Assad und Golden (1988), Dethloff (1994), Fisher (1995) und Toth und Vigo (2002).
- **Personaleinsatzplanung:** Gegenstand ist die Zuordnung von Personal zu den jeweiligen Arbeitsplätzen (Fahrzeugen) entsprechend den quantitativen, zeitlichen und örtlichen Erfordernissen. Ernst et al. (2004) stellen eine Übersicht zu verschiedenen Anwendungsfeldern der Personaleinsatzplanung zur Verfügung.
- **Beladeplanung für Ladungsträger und Fahrzeuge:** Hier werden die zu transportierenden Ladungsstücke auf Ladungsträgern oder Fahrzeugen unter der Zielstellung der Minimierung der ungenutzten Packfläche angeordnet. Eine Übersicht solcher Packprobleme findet sich in Dyckhoff (1990).

Im Rahmen eines Netzwerks von TDL, in denen Transportaufträge ausgetauscht werden, ist besonders die Tourenplanung und die Entscheidung über die Fremdvergabe oder Selbsterstellung von Bedeutung. Aus diesem Grund stehen diese operativen Planungsaufgaben im Vordergrund der weiteren Ausführungen.

2.3 Märkte für Transport- und andere logistische Leistungen

In der Literatur finden sich verschiedene Kriterien nach denen sich Märkte für logistische und insbesondere Transportleistungen systematisieren lassen. Mithilfe dieser Systematisierung sind Logistikdienstleister in der Lage, ihre aktuellen und potenziellen Wettbewerber zu lokalisieren und sich gegebenenfalls mit dem Wissen über deren

Leistungserstellungsmerkmale von ihnen abzugrenzen. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Kriterien zur Abgrenzung von Logistikdienstleistungsmärkten findet sich in Isermann (2002, S. D2-7) und ist in der Tabelle 2.1 dargestellt. Die einzelnen Kriterien wurden aus den Veröffentlichungen von Bjelicic (1990, S. 44ff.), Thaler (1990, S. 166ff.), Zöllner (1990, S. 44ff.) und Steffen (1995, S. 116ff.) zusammengetragen. Die Märkte für logistische und insbesondere Transportleistungen lassen sich beispielsweise nach der Art der Güter unterscheiden. Mögliche Ausprägungen sind Märkte für Stück-, Schüttgut, flüssige oder gasförmige Güter oder auch für Gefahrgut.

Tabelle 2.1: Kriterien zur Strukturierung und Abgrenzung von Transportmärkten

Merkmale	Ausprägungen
Art der angebotenen Leistung	Einzel- und Verbunddienstleistung, Systemkomponenten, Teilsystem-, Systemdienstleistungen
Art der Güter	Stück-, Schüttgut, flüssige oder gasförmige Güter; Gefährlichkeit, Temperatur
Gewicht und Volumen	Gewichtsklassen, Volumenklassen, Teilladung, Ladung, Sammelladung
Zeit	Linien-, oder Gelegenheitsverkehr; Zeitdauer; Overnight, Sameday; Zeitfenster, Fixtermine, Termingarantie
Raum	Transportentfernung; Punkt-Punkt, Flächenverkehr
Kunden	Einzelkunde, Branchensegment, Branche, Branchengruppe
Absatzgebiet	Relationsbezogen, regional, national, europaweit, weltweit
Verkehrsträger	Straßen-, Schienen-, Luft-, Binnenschiff-, Seeschiffverkehr; intermodaler bzw. kombinierter Verkehr
Spezialisierungsgrad	Spezialisierte oder unspezialisierte Transportmittel-, Ladehilfsmittel-, Lager-, Umschlag-, Sortier-, Förder-technologie etc.
Leistungstiefe	Geringe, mittlere, hohe; virtuelle Spedition
Rolle bei der Leistungserstellung	Haupt-, Zwischenspedition, Versand-, Empfangsspedition, Modulspedition, Komponentenspedition

Eine praxisübliche Abgrenzung des Gesamt-Logistikdienstleistungsmarktes nimmt Klaus (2003, S. 90 und 109) vor. In seinem Bericht aus dem Jahr 2001/2002 wird dieser Markt, wie nachfolgend zu sehen, in 16 Teilmärkte unterteilt. Hierbei werden besonders die Kriterien Art der Güter, Absatzgebiet, Verkehrsträger sowie Spezialisierungsgrad berücksichtigt. Die Auflistung der 16 Teilmärkte beginnt bei massenhaften eher nationalen Transportleistungen hin zu höher differenzierten logistischen und eher internationalen Leistungen. Eine eindeutige Abgrenzung zwischen diesen Teilmärkten ist oft nicht möglich. So kommt es zum Beispiel zu Überschneidungen zwischen den Teilmärkten (1) nationale Massengutlogistik und (4) nationale Tank- und Silotransporte. Das gesamte Marktvolumen der Teilmärkte 1-15 beträgt in 2005/2006 in Deutschland 175 Mrd. €.

Gegenstand der Teilmärkte 1-5 sind die Beförderung und die logistischen Mehrwertleistungen für Massengüter und größere Gütermengen mit dem geografischen Schwerpunkt innerhalb Deutschlands. Die Transporte in den fünf Teilmärkten werden in „Punkt-zu-Punkt“-Linienverkehren oder in Standort ungebundenen „Tramp“-Verkehren in eingliedrigen Transportketten und nicht in netzwerkartigen Systemen abgewickelt.

1. Die *nationale Massengutlogistik* beinhaltet Transporte von Gütern der Grundstoffindustrie in Mengen größer als eine Lkw-Ladung.
2. Der *nationale allgemeine Ladungsverkehr* beinhaltet Haus-zu-Haus oder Rampe-zu-Rampe Ladungstransporte von Trocken- und Stapelgütern mit nicht spezialisierten LKW oder Waggons in Deutschland.
3. *Schwertransporte und Krandienste* sind eher ein Nischenmarkt in dem Dienstleistungen, vor allem für die Bau- und Investitionsgüterindustrie, durchgeführt werden.
4. Bei den *nationalen Tank- und Silotransporten* werden flüssige oder staubförmige Güter mit speziellem Equipment als Ladungstransporte durchgeführt.
5. Der *nationale sonstige Ladungsverkehr mit spezialisiertem Equipment* beinhaltet sonstige mit speziellem Equipment durchgeführte Ladungstransporte.

Unter den Teilmärkten 6-12 sind alle Segmente des Logistikmarktes zusammengefasst, in denen Stückgüter und sonstige handlingsbedürftige Güter innerhalb von Deutschland transportiert, gelagert und umgeschlagen werden. Diese Logistikleistungen werden in komplexeren, jeweils mehrere Wertschöpfungsstufen umfassenden, Systemen erstellt. Die Teilmärkte 7-8 für Systemlogistikdienstleistungen, als Kontraktlogistik bezeichnet, beinhalten individuelle Leistungsbündel zur Lösung

komplexer Verladerprobleme. Die Herausbildung dieser Leistungen basiert auf dem Bestreben, dass umfassende logistische und vermehrt auch komplementäre nicht logistische Funktionen an Logistikunternehmen ausgelagert werden. Charakteristisch für Kontrakte ist die gegenseitige Abhängigkeit aufgrund hoher Investitionskosten, sowie enge und langfristige Beziehungen (Ihde und Wolf, 2002, S. D2-37).

6. Der Teilmarkt *nationaler allgemeiner Stückgutverkehr* ist ein traditioneller Kernbereich der Logistikdienstleistung. Es werden individuell etikettierte Trocken- und Stapelgüter im Gewichtsbereich oberhalb von 30 kg bis zu 2,5 Tonnen zu Sendungen gebündelt und dann als Sammelgut mit LKW oder Container über Niederlassungen bzw. Umschlagspunkte der Stückgutsysteme befördert. Aufgrund der Forderung eines flächendeckenden und lückenlosen Service ist in diesem Teilmarkt eine starke Konzentrationsbewegung hin zu Konzern-Logistik-Dienstleistern und Kooperationsystemen entstanden. Neben den großen Organisationen stellen sechs Unternehmen der Top 10 dieses Stückgutmarktes Kooperationsverbände großer regionaler mittelständischer Unternehmen dar.
7. Der Teilmarkt *Konsumgüterdistribution und -kontraktlogistik* beinhaltet spezialisierte Systeme für die Konsumgüterindustrie und den Einzelhandel in Deutschland, wobei Stückgüter und Ladungsgüter artikelbezogen, also nicht an bestimmte Empfänger etikettiert, gelagert und transportiert werden.
8. Demgegenüber werden im Teilmarkt *industrielle Kontraktlogistik* Stück- oder Ladungsgüter transportiert und als Materialien für die industrielle Produktion, meist bedarfssynchron, bereitgestellt.
9. Der Teilmarkt *hängende Kleider-Logistik* umfasst spezialisierte Transporte von Herstellern und Importeuren an den Bekleidungs-Einzelhandel.
10. Im Teilmarkt *Hightech-Güter, Messelogistik, Neumöbel- und Umzugstransporte* erfolgen die Transporte von empfindlichen und hochwertigen Großteilen mit hohen Anforderungen an den Transport selbst, die Be- und Entladung, die Aufstellung und weitere Zusatzleistungen. In diesem Markt sind eine Reihe von Kooperationsverbänden für Umzugsservices erfolgreich tätig. Sie bestehen aus mehr als 200 einzelnen, lokal und regional operierenden Unternehmen.
11. Der Teilmarkt *Terminaldienste* umfasst alle Terminal-, Lagerhaus-, Umschlags- und sonstige Zusatzleistungen, die nicht in Kontrakt-Dienstleistungspaketen oder anderen Logistikprozessen integriert sind. Dies betrifft vor allem See- und Binnenhäfen, Güterverkehrszentren und Aircargo-Zentren.

12. Der Teilmarkt *Kurier-Express-Paket-Dienste (KEP)* erfasst Transportleistungen im Gewichtsbereich unterhalb von 30 kg. Beim Kurierdienst werden kleine Sendungen ohne wesentliche Konsolidierung direkt zwischen Versender und Empfänger abgewickelt, während beim Paketdienst standardisierte Sendungen über Konsolidierungszentren zum Empfänger befördert werden. In diesem Markt ist ein hoher Konzentrationsgrad in Form größerer Kooperationsverbände festzustellen, wobei hier besonders die Flächendeckung ein Wettbewerbsfaktor ist. Das Angebot von branchenspezifischen KEP-Dienstleistungen stellt vor allem für kleinere Unternehmen eine Differenzierungsmöglichkeit gegenüber den großen Konzernen dar.

Die Teilmärkte 13-15 fassen alle über den nationalen Verkehr hinaus gehenden Land-, See- und Lufttransporte zusammen. Eine weitere Untergliederung in Massen-, Ladungs- oder Stückgut ist nicht vorgesehen.

13. Der Teilmarkt *grenzüberschreitende Landtransporte und Dienstleistungen der internationalen Spedition* umfasst Transport- und Speditionsleistungen mit dem Schwerpunkt Straße und Schiene innerhalb Europas.
14. Der Teilmarkt *Seehafenspedition und Seeschifffahrt* beinhaltet grenzüberschreitende Transport- und Speditionsleistungen mit Schwerpunkt Seeschifffahrt und Seehafenspedition weltweit.
15. Im Teilmarkt *Luftfrachtagentur- und Luftfrachttransport-Leistungen* erfolgen grenzüberschreitende Aircargo-Transporte und Leistungen der Luftfrachtspedition weltweit.
16. Der Teilmarkt *Postdienste der Drucksachen- und Briefbeförderung* umfasst den Transport von Briefen und Postsendungen unter 1 kg sowie die dazu gehörenden Logistikdienstleistungen (Einsammeln, Sortieren, Feindistribution, ...)

Besonders in den Teilmärkten in denen vom Kunden ein flächendeckender Service gefordert wird, sind Konzentrationsbestrebungen zu finden. Während große Konzerne die Flächendeckung selbst realisieren, erreichen dies kleine und mittlere Unternehmen nur durch die Gründung von kooperativen Netzwerken. Vor allem die Teilmärkte 6, 10 und 12 bieten Möglichkeiten logistische Leistungen in Netzwerken zu erbringen. Hier haben sich neben den großen Logistikdienstleistern auch Kooperationsverbände regionaler mittelständischer Unternehmen etabliert und erreichen hohe Anteile des Umsatzes in diesen Teilmärkten. Für die Untersuchungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit eignen sich somit besonders diese drei Teilmärkte, wobei Kooperationen durchaus auch in anderen Teilmärkten anzutreffen sind.

2.4 Rahmenbedingungen für die Transportwirtschaft

In den letzten Jahrzehnten unterlag der Transportsektor einem tief greifendem Strukturwandel. Veränderungen des Angebots- und Nachfrageverhaltens haben den Umfang der Leistungserstellung wie auch die Anteile der Verkehrsbereiche an den Verkehrsleistungen wesentlich beeinflusst. Transportunternehmen müssen sich an diese Veränderungen anpassen und um wettbewerbsfähig zu bleiben, Rationalisierungspotenziale erschließen. Dieses Kapitel soll einen Überblick zur derzeitigen Situation in der Transportwirtschaft geben. Neben Veränderungen der Transportnachfrage werden ebenfalls politische Rahmenbedingungen und ihre Folgen für die Transportwirtschaft diskutiert. Ausführliche Erläuterungen finden sich in Pankratz (2002, S. 7ff.), Isermann (2002, S. (D2-33ff.)), Aberle (2003, S. 91ff.), Bock (2004, S. 29ff.) sowie Pfohl (2004b, S. 336ff.).

2.4.1 Transportnachfrage

Die Nachfrage nach Verkehrsleistungen ist eine abgeleitete Nachfrage und wird bestimmt von den Beschaffungs- und Absatzaktivitäten der Unternehmen der verladenden Wirtschaft. Veränderte Produktionsstrategien wirken sich durch eine quantitativ und qualitativ veränderte Transportnachfrage unmittelbar auf die Transportunternehmen aus. Der Logistikeffekt und der Güterstruktureffekt gelten als wesentliche Ursachen der Veränderungen (Alt (1997, S. 22); Aberle (2003, S. 6)). Diese Effekte wirken sich vor allem auf den Straßengüterverkehr aus, sind also nicht verkehrsträgerneutral.

2.4.1.1 Logistikeffekt

Der Logistikeffekt beschreibt die transportbezogenen Wirkungen, die durch die gestiegenen Anforderungen der verladenden Industrie gegenüber Logistikdienstleistern entstanden sind. Die Logistikkosten nehmen derzeit 4-13 % vom Umsatz ein. Die Verlader sind bemüht, Kostensenkungspotenziale in diesem Bereich zu erschließen. Außerdem liegen positive Wettbewerbswirkungen aufgrund eines hohen logistischen Services im Interesse der Verlader (Pfohl, 2004b, S. 339). Weiterhin spielen Beschaffungsstrategien, wie z. B. Outsourcing, zunehmend eine große Rolle, da Kostenvorteile aufgrund von Spezialisierung der Dienstleister entstehen. Die Konsequenzen dieser Entwicklung sind der zahlenmäßige Anstieg der Transportrelationen, der Anstieg der Sendungsfrequenz und ein erhöhter Abstimmungsbedarf aufgrund von bestandsarmen Versorgungskonzepten.

2.4.1.2 Güterstruktureffekt

Der Güterstruktureffekt bezeichnet die Verschiebung der Anteile einzelner Güterarten am gesamten Güteraufkommen (Alt (1997, S. 22ff.); Ihde (2001, S. 125)). Massengüter verlieren zugunsten kleinerer, hochwertiger Stückgüter an Bedeutung. Aufgrund der zunehmenden Bedarfsdifferenzierung und somit größere Variantenvielfalt reduzieren sich die Losgrößen und als Folge auch die Sendungsgrößen. Ein weiterer Grund für die Erhöhung der Transportmengen kleinteiliger, hochwertiger Sendungen ist das Wachstum des tertiären Sektors mit seinen Handels- und Auslieferungsverkehren (Stabenau, 1994, S. 17ff.). Die Ausbreitung des E-Commerce verstärkt diese Tendenz noch.

2.4.1.3 Bedeutung des Straßengüterverkehrs

In den vergangenen 50 Jahren unterlag der deutsche Binnengüterverkehr einem positiven Wachstum. Die zunehmende internationale Arbeitsteilung im EG-Binnenmarkt, die EU-Osterweiterung und vor allem das Zusammenwirken von Logistik- und Güterstruktureffekt führten zu einem steigenden Verkehrsaufkommen. Infolgedessen, ist die Verkehrsleistung (Tonnenkilometer), als Produkt aus dem Verkehrsaufkommen (Tonnen) und der dafür notwendigen Fahrstrecke (Kilometer), in den vergangenen 50 Jahren ebenfalls gestiegen. Der Trend des wachsenden Verkehrsaufkommens und demzufolge der steigenden Verkehrsleistung (Abbildung 2.4) wird laut Ickert et al. (2007) auch in Zukunft anhalten. Sieht man sich die Entwicklung des Anteils der Verkehrsbereiche an der Verkehrsleistung (Modal Split) in Abbildung 2.5 an, so zeigt sich deutlich, dass sie sich über die letzten 58 Jahre zugunsten des Straßengüterverkehrs verschoben haben. Ein Grund dafür liegt in den erhöhten qualitativen Anforderungen an die Güterverkehrsleistungen. Es werden individualisierbare Transporte mit hoher zeitlicher und räumlicher Flexibilität verlangt. Dabei weist der Straßengüterverkehr erhebliche Systemvorteile auf. Schnelligkeit im Kurz- und Mittelstreckenbereich, die Fähigkeit ohne Umladen auch in entlegene Gebiete Haus-zu-Haus-Verkehre durchführen zu können, eine stete Betriebsbereitschaft (ohne Fahrplan) sowie Anpassungsfähigkeit an die zu befördernden Gütermengen sind Beispiele dafür.

2.4.2 Politische Rahmenbedingungen

Politische Veränderungen haben Auswirkungen auf das Transportgewerbe. Im Einzelnen sind das die Infrastrukturpolitik, die Ordnungspolitik und die Umweltpolitik.

Aufgrund der Ausweitung des Straßengüterverkehrs wird das Straßenverkehrsnetz zunehmend belastet. Die Investitionen in den Ausbau von Verkehrsinfrastruktur

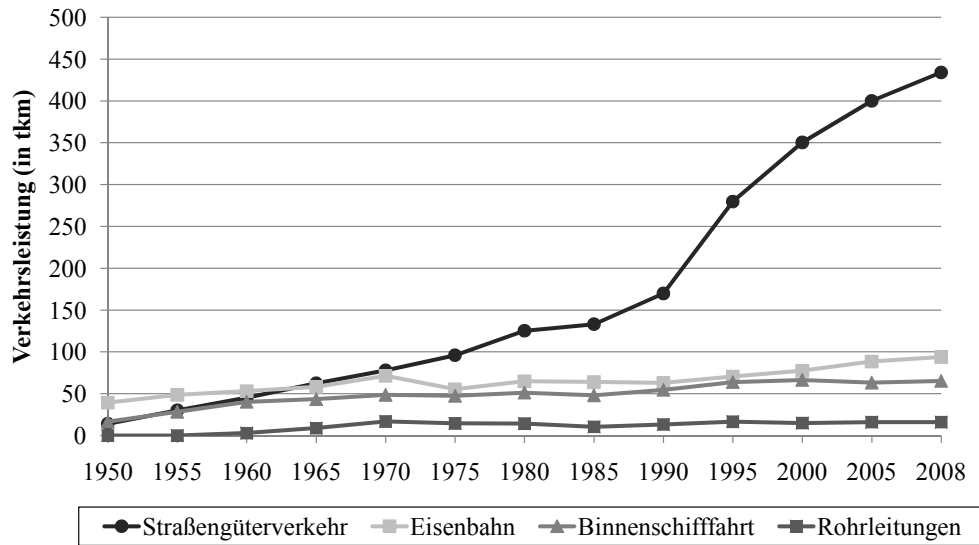


Abbildung 2.4: Binnenländische Güterverkehrsleistung 1950 bis 2008
 Quelle: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (2007)

(Infrastrukturpolitik) reichen nicht aus, um diese Mehrbelastung zu kompensieren. Da ein Ausweichen auf andere Verkehrsträger, z. B. den Schienenverkehr, nur teilweise möglich ist und auch der Ausbau des Verkehrsnetzes aufgrund fehlender Finanzierung und vieler Anspruchsgruppen scheitert, müssen Effizienzsteigerungen bei der Leistungserstellung genutzt werden (Aberle, 1998, S. 121).

Das staatliche Regulierungssystem (Ordnungspolitik) wurde aufgrund der Liberalisierung der Verkehrsmärkte im Zuge der europäischen Integration fast vollständig abgebaut. Hierzu gehörten Beschränkungen des Marktzugangs und die Regulierung der Transportpreise. Mit Inkrafttreten des Gesetzes zur Reform des Güterkraftverkehrs (01.07.1998) wurde die Kabotagefreiheit eingeführt. Gewerbliche Straßen Transporte können seitdem innerhalb der Grenzen eines anderen Zulassungslandes, unabhängig von bestimmten Konzessionen durchgeführt werden. Das Tarifaufhebungsgesetz (01.01.1994) machte darüber hinaus die freie Preisbildung im Straßengüterverkehr möglich. Als Konsequenz dieser Deregulierungsmaßnahmen entstand ein offener Preis- und Qualitätswettbewerb der Transportunternehmen. Wettbewerbsverstärkend wirkten dabei besonders die aufgebauten Überkapazitäten und die Ausweitung des Angebots durch ausländische Transporteure auf dem Binnenmarkt (Althoff und Schneider, 1995, S. 18).

Bei der Beförderung von Gütern entstehen externen Kosten sowohl aus der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Flächenversiegelung, Trennungswirkungen aufgrund der

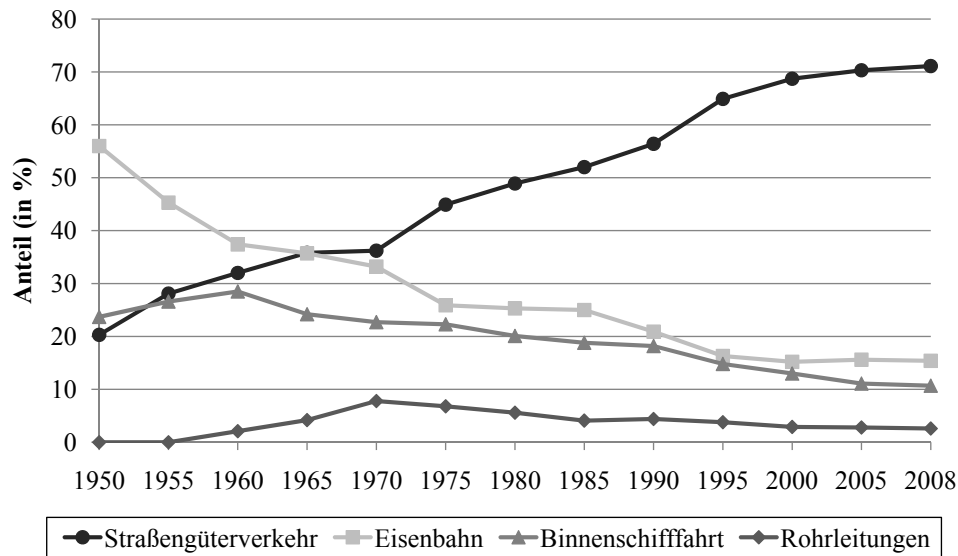


Abbildung 2.5: Modal Split im Güterverkehr 1950-2008 nach Tonnenkilometern
Quelle: Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (2007)

Zerschneidung von Kultur- und Siedlungsflächen) als auch aus dem Verkehrsmittelbetrieb (z.B. Verkehrsunfall- und Unfallfolgekosten, Schadstoff- und Kohlendioxid-Ausstoß, Lärmemissionen) (Aberle, 2003, S. 100). Um Verkehr zu Vermeiden oder auf andere umweltschonendere Verkehrsträger zu verlagern, wird die Internalisierung der externen Umweltkosten des Verkehrs vorgeschlagen (Umweltpolitik). Dabei werden die Preis- und Kostenverhältnisse der tatsächlichen Ressourceninanspruchnahme angepasst (Pfohl, 2004b, S. 342ff.). Eine Möglichkeit dafür bieten die Mineralöl- und Kraftfahrzeugsteuer.

2.5 Erschließung von Rationalisierungspotenzialen bei der Leistungserstellung

Die aus den veränderten Rahmenbedingungen entstandenen Anforderungen stellen besonders für die kleinen und mittleren Transportunternehmen eine große Herausforderung dar. Um im Wettbewerb zu bestehen, müssen sie ihren Leistungserstellungsprozess effizienter gestalten und auf die gestiegenen Anforderungen der Kunden abstimmen. Möglichkeiten für die Umsetzung dieser Veränderungen sind:

- Auswahl einer geeigneten Unternehmensstrategie

- Moderne IuK-Technologie
- Ausnutzung von Rationalisierungspotenzialen
- Elektronische Transportmärkte
- Konzentration oder Kooperation

2.5.1 Auswahl einer geeigneten Unternehmensstrategie

Für die Auswahl einer geeigneten Unternehmensstrategie ist eine Analyse des externen Umfeldes (Chancen und Risiken) und der internen Fähigkeiten und Ressourcen (Stärken und Schwächen) des TDL unverzichtbar. Ziel ist es, Wettbewerbsvorteile zu identifizieren und mit geeigneten Maßnahmen abzusichern. Dabei muss besonders die logistische Leistungsfähigkeit der Wettbewerber berücksichtigt werden (Pfohl, 2004a, S. 90ff.). Die zu wählenden Strategien beinhalten zum einen Entscheidungen über die markt- bzw. branchenspezifische Positionierung des TDL (externe Dimension) und zum anderen die Entwicklung von neuen wettbewerbskritischen Ressourcenpotenzialen oder Kompetenzen (interne Dimension) (Grant, 2002, S. 4ff.).

Porter (1995, S. 62ff.) unterscheidet drei verschiedene Strategietypen,

- die Kostenführerschaft,
- die branchenweite Differenzierung und
- die Konzentration auf Schwerpunkte (Marktnischen).

Bei der Strategie der umfassenden Kostenführerschaft realisiert ein Unternehmen durch die Ausnutzung von Erfahrungskurveneffekten zur Senkung der Stückkosten äquivalente Leistungen kostengünstiger als dessen Wettbewerber. Die Logistiksysteme sind demzufolge darauf ausgerichtet, große Gütermengen in räumlich ausgedehnten Märkten zu möglichst geringen Kosten zu bewältigen (Porter (1995, S. 63ff.); Pfohl (2004a, S. 88)). Bei Transportunternehmen wird eine solche Strategie zum Beispiel über die Konsolidierung von Gütern, Auswahl eines geeigneten Transportmodus oder eine Senkung der Transportfrequenz erreicht (Delfmann und Reihlen, 2002, S. D1-22).

Mit der Strategie der Differenzierung wird versucht, ein in den Augen des Kunden einzigartiges Produkt anzubieten. Dies kann durch die Schaffung eines Markenimages oder über die Produktqualität (zusätzliche Dienstleistungen) geschehen. Im Bereich der logistischen Qualität wird meist das Kriterium des Lieferservice herangezogen. Der Lieferservice besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Lieferzeit, Lieferzuverlässigkeit, Lieferbereitschaft, Liefergenauigkeit, Lieferbeschaffenheit und

Lieferflexibilität (Pfohl, 2004b, S. 36ff.). Transportunternehmen nehmen eine Differenzierung gegenüber den Wettbewerbern zum Beispiel durch einen Mix aus Teilladungsverkehr zur Abnehmerbelieferung und Komplettladungsverkehr zur Depotbelieferung, das Angebot von Eilsendungen oder einen Zustellservice vor (Delfmann und Reihlen, 2002, S. D1-22).

Für die Strategie der Konzentration ist es notwendig, dass sich die Unternehmen auf eine bestimmte Abnehmergruppe, einen geografischen Markt oder einen bestimmten Teil des Produktionsprogramms spezialisieren. Solch ein eng begrenztes strategisches Ziel wird von dem Unternehmen effizienter erreicht, als von einem Konkurrenten, der sich im breiteren Wettbewerb der gesamten Branche befindet. Der Wettbewerbsvorteil stellt sich entweder durch eine Anpassung an spezifische Bedürfnisse des Marktsegments (einzelkundenorientiert) oder durch Kostenvorteile (indem einige Kosten gar nicht anfallen) in diesem Segment ein (Porter (1995, S. 67ff.); Pfohl (2004a, S. 89)). Transportunternehmen konzentrieren sich beispielsweise auf bestimmte Branchen, wie die Textil-, Getränke Logistik oder Schwertransporte.

2.5.2 Einsatz moderner IuK-Technologie

Der Einsatz von moderner IuK-Technologie trägt wesentlich zur Ausschöpfung von Rationalisierungspotenzialen bei (Pankratz, 2002, S. 21ff.). Das betrifft

- die Verbesserung der Informationssituation,
- die Automatisierung von Abläufen und
- die Entscheidungsunterstützung.

Informationen haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Tourenplanung. Stehen sie zu spät oder nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung, so resultiert dies in einer geringen Auslastung der Fahrzeuge und unnötig zurückgelegten Entfernungen. Im Rahmen von modernen IuK-Technologien ist es möglich, die Informationssituation für die TDL zu verbessern, indem Telematik-Systeme eingesetzt werden. Zu den Telematik-Systemen gehören die Fahrzeugortung und Fahrzeugnavigation, Informationsdienste sowie die Mobilkommunikation zwischen Fahrer und Disponent.

Die TDL sind in der Lage, durch diese Systeme besser auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren und somit rechtzeitig Anpassungen der Transportablaufplanung vorzunehmen sowie diese ohne Verzögerung an die Fahrer zu kommunizieren (Lublow, 1998, S. 224ff.). Telematik-Systeme ermöglichen eine lückenlose Sendungsverfolgung (Tracking and Tracing). Systeme zur interorganisatorischen Informationsintegration benötigen einen standardisierten Datenaustausch. Der EDI-Standard

(Electronic Data Interchange) oder XML-basierte Standards (Extensible Markup Language) eignen sich für die einheitliche Gestaltung der Kommunikationsschnittstellen zwischen den Unternehmen der Transportkette. Im Gegensatz zu papiergebundenen Begleitdokumenten eines Auftrags, werden die Daten hier vor dem Güterfluss weitergeleitet. Die nachfolgenden Unternehmen haben so die Möglichkeit, ihre Abläufe mit zeitlichem Vorlauf effizient zu planen.

Die Beseitigung von Medienbrüchen und die Reduktion des Umfangs an manuellen Tätigkeiten ist ein Effekt der Automatisierung von Abläufen durch entsprechende Speditionsoftware. Teilprozesse wie die Auftragsbearbeitung, die Frachtbrieferstellung und das Rechnungswesen lassen sich so elektronisch unterstützen oder sogar vollständig automatisieren. Ziel ist es, die Prozesse zu beschleunigen und die Fehlerhäufigkeit bei der Prozessausführung zu verringern (Pankratz, 2002, S. 23).

Die Planung der Transportprozesse erfolgt in Transportunternehmen häufig nicht mit Hilfe von geeigneter Software, sondern basiert eher auf Erfahrungen, wobei oft Verbesserungspotenziale übersehen werden. Für die zeitkritischen Entscheidungen werden elektronische Entfernungswerke und digitale Straßenkarten hinzugezogen. Entscheidungsunterstützungssysteme entlasten den Disponenten indem sie ihm Dispositionsvorschläge mit hoher Qualität zur Verfügung stellen.

2.5.3 Ausnutzung von Rationalisierungspotenzialen

Rationalisierungspotenziale lassen sich durch eine Schwachstellenanalyse der Unternehmensprozesse identifizieren. Sie treten innerbetrieblich, z. B. in der Disposition, oder außerbetrieblich, z.B. im Informationsfluss zwischen den Beteiligten in der Transportkette, auf. Diese Schwachstellen sind die Ursache für vermeidbare Umwege, Leer- und Sonderfahrten, Zeitverzögerungen und unnötige Personalkosten bei den TDL (Pankratz, 2002, S. 20).

Die Nutzung der so identifizierten Rationalisierungspotenziale zielt darauf ab, die Effizienz der Transportunternehmen zu steigern. Die Produktivität wird als Verhältnis zwischen der Transportleistung (Output) und dem Ressourceneinsatz (Input) ermittelt (Pfohl, 2004b, S. 41f.). Vor allem Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugauslastung oder zur Verringerung des Leerfahrtenanteils steigern die Effizienz.

Die Akquirierung zusätzlicher Transportaufträge, das Fuhrparkmanagement sowie die Touren- und Fahrzeugeinsatzplanung bieten Möglichkeiten für Transportunternehmen dieses Ziel umzusetzen. Im Rahmen des Fuhrparkmanagements werden die Größe des Fuhrparks und dessen Zusammensetzung an die langfristige Beschäftigungssituation angepasst. Auch der Einsatz von Subunternehmern zur Variabilisierung fixer Kosten und zur Flexibilisierung ist möglich. Zur Touren- und Fahrzeugeinsatzplanung gehört die Planung der Tourgebiete und der Linienverkehre sowie die

tägliche Planung des Fahrzeug- und Fahrereinsatzes (Pankratz, 2002, S. 20f.).

Ein weiterer Ansatzpunkt für Rationalisierungsmaßnahmen sind laut Ihde (2001, S. 32ff.) und Ballou (1992, S. 159ff.) Synergiepotenziale, die durch die Integration von Aufgaben in Form von Größen- oder Verbundeffekten erwirtschaftet werden können. Diese Effekte stellen sich in Form von Kosten- und Servicevorteilen auf Seite der Anbieter von Transportleistungen und auf Seite der Nachfrager ein (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Größen- und Verbundeffekte auf Anbieter- und Nachfragerseite

Effekt	Anbieterseite	Nachfrageseite
Economies of Scale	x	-
Economies of Scope	x	-
Economies of Size	x	x
Economies of Density	x	x
Economies of Massed Reserves	x	-

Kostendegressionseffekte aufgrund großer Stückzahlen bei identischen Produkten werden als *Economies of Scale* bezeichnet (Kimms, 2006). Aufgrund der Durchführung zusätzlicher Transportaufträge lassen sich die Auslastung der Fahrzeuge erhöhen und die Kosten pro transportierte Transporteinheit senken.

Durch die Bildung von Netzwerken lassen sich Synergiepotenziale in Form von *Economies of Scope* (Verbundeffekten) erschließen. Bei diesen Effekten treten Ersparnisse aufgrund der gemeinsamen, nicht rivalisierenden Nutzung von Ressourcen auf. Zu nennen sind vor allem die kooperative Entwicklung von Zwischensystemen (Ladungs- und die Laderaumpoolung) und die gemeinsame Nutzung eines Dienstleistungskonzeptes durch Franchising (Ihde, 2001, S. 33).

Bei *Economies of Size* (Betriebs- bzw. Netzgrößeneffekt) werden Kostenvorteile durch den Einsatz kostengünstiger Verkehrsmittel (größerer LKW) erwirtschaftet. Dabei steigt die angebotene Kapazität des Dienstleisters und die Kosten pro Leistungseinheit sinken. Dem Nachfrager von Transportleistungen werden demgegenüber größere Netze attraktiver erscheinen als kleinere. Dieser Effekt lässt sich damit begründen, dass dem Nachfrager in einem größeren Netz zukünftig mehr Transportrelationen zur Verfügung stehen und er diesem somit einen höheren potenziellen Nutzen zuschreibt.

Bündelungseffekte aufgrund der räumlichen Dichte werden als *Economies of Density* (Betriebs- bzw. Netzdichteeffekt) bezeichnet. Erhöht sich die Anzahl durchzuführender Transportaufträge, lassen sich effizientere Touren bilden. Solche Dich-

teeffekte können besonders im Paketdienst realisiert werden. Auf Seiten des Nachfrager bewirken die Dichteeffekte eine verbesserte Abstimmung von Fahrplänen, eine Verkürzung der Umschlagszeiten und eine Erhöhung der Frequenz der Bedienung der Transportrelationen. Es lassen sich ebenfalls die Bereitstellungs- und Rücklaufverkehre reduzieren. Der Netzdichteeffekt führt also insgesamt zu einer Verbesserung des Lieferservices und somit der Dienstleistungsqualität (Gomm und Hofmann, 2003, S. 139f.).

In einem Transportnetz können geringere Reservekapazitäten vorgehalten werden, da sich die stochastisch auftretenden Nachfragespitzen der einzelnen Verkehrsrelationen in solch einem Netz glätten lassen. Dieser Effekt wird als *Economies of Massed Reserves* (Durchmischungseffekt) bezeichnet (Ihde (2001, S. 33); Gomm und Hofmann (2003, S. 138f.)).

2.5.4 Elektronische Transportmärkte

Elektronische Transportmärkte sind zwischenbetriebliche Transaktionssysteme. Sie ermöglichen den Anbietern und Nachfragern von Transportleistungen, diese Leistungen zu spezifizieren, zu verhandeln und auszutauschen (Bakos, 1991). Die Kommunikation der Marktteilnehmer wird durch Internettechnologien- und -standards sichergestellt. Zu den Marktteilnehmern gehören Verlader, Frachtführer, Spediteure sowie elektronische Zwischenhändler. Sie nehmen die Funktion von Anbietern bzw. Nachfragern von Transportleistungen bzw. Transportaufträgen ein. Es lassen sich drei Einsatzfelder für elektronische Transportmärkte unterscheiden (Bierwirth et al., 2002).

- **Industrielles Beschaffungsinstrument:** Verlader sind aufgrund der hohen Standardisierung von Transportleistungen in der Lage, ihre Einkaufsmacht in einem elektronischen Beschaffungsmarkt zu bündeln und somit die Wettbewerbsintensität auf der Frachtführerseite zu erhöhen.
- **Zwischenbetriebliches Kapazitätsausgleichssystem:** Hauptaufgabe von elektronischen Transportmärkten ist der Fracht- und Laderaumausgleich zwischen Speditionen und Frachtführern. Besonders kleine und mittlere Transportunternehmen gleichen so Wettbewerbsnachteile gegenüber großen Konzernen aus.
- **Sekundäre Wertschöpfung:** Verlader und Handel haben durch das Internet neue Absatzkanäle erschlossen. Die dadurch gestiegene Anzahl an Sendungen kann entweder durch bestehende Logistiksysteme oder eine integrierte Versandabwicklung bewältigt werden. Solch eine Versandabwicklung ermittelt den jeweils günstigsten Dienstleistern über einen elektronischen Markt.

Nach Schmid (1993) besteht die Architektur eines elektronischen Marktes aus vier aufeinander aufbauenden Schichten. Die erste Schicht stellt die Infrastruktur bereit. In den 80er Jahren wurde auf Technologien, wie das Telefon, Fax und Btx zurückgegriffen, während nun zunehmend über das Internet kommuniziert wird. Darüber hinaus werden Zusatzkomponenten wie Telematik (Navigation, Verkehrslenkung) und Sendungsverfolgung (Tracking und Tracing) eingesetzt. Die zweite Schicht beinhaltet die Marktunterstützungsdienste für die Transaktionsphasen. Dazu gehören Informations-, Vereinbarungs- und Abwicklungsphase. In der Praxis werden meist nur die Dienste der Informationsphase unterstützt. Das Aushandeln von Transportpreisen in der Vereinbarungsphase wird jedoch meist nicht berücksichtigt. Das ist auch der Grund, warum diese Märkte in der Praxis häufig scheitern. Die dritte Schicht (Prozessmodelle) realisiert die Tauschprozesse mittels der verfügbaren Marktdienste. Dazu werden die Befugnisse der Marktteilnehmer durch Kommunikationsprotokolle festgelegt. In der vierten Schicht (Marktgemeinschaftssicht) wird festgelegt, welche Rolle die Marktteilnehmer einnehmen. Dadurch ergeben sich verschiedene, von den individuellen Zielen geprägte, Teilnehmermodelle.

Bierwirth et al. (2002) nutzen dieses Rahmenmodell, um eine Klassifikation bekannter elektronischer Transportmärkte vorzunehmen. Sie leiten anhand der Kriterien Marktdienst und Teilnehmermodell sieben Klassen von Marktsystemen ab.

- **Transportportale:** Sie stellen nur einen öffentlichen Verzeichnisdienst dar und unterstützen so nur die Informationsphase.
- **Schwarze Bretter:** Der zentrale Dienst besteht in der Partnervermittlung auf Basis von eingestellten Angeboten und Gesuchen.
- **Frachtbörsen:** Hier werden über schwarze Bretter hinaus weitere Marktdienste integriert. Durch Marktzugangskontrollen lassen sich Marktgemeinschaften für Spediteure und Frachtführer bilden. Eine Preisbildung findet jedoch nicht statt.
- **Verkaufssysteme für Transportleistung:** Sie bieten eine Vermittlung von Ladungsaufträgen an. Große Speditionsunternehmen nutzen diese Systeme zur Auftragsakquirierung.
- **Verkaufssysteme für Transportorganisation:** Anbieter von KEP-Diensten nutzen diese Systeme zur sekundären Wertschöpfung, um sich auf einer gemeinsamen Plattform zu präsentieren. Die Nachfrager können Angebote einholen, Zuschlüsse erteilen und auch den Sendungsverlauf nachvollziehen.
- **Einkaufssysteme für Transportleistung und Rahmenkontrakte:** Für Verlager und Spediteure dienen solche Systeme als Beschaffungsinstrument.

Frachtführer bewerben sich um Transportaufträge und es erfolgt eine Zuordnung auf Basis von Auktionen.

- **Zwischenhandelssysteme:** Der Marktbetreiber stellt Angebote von Verladern und Frachtführern gegenüber und stimmt sie anhand von Preisober- und untergrenzen miteinander ab.

2.5.5 Konzentration und Kooperation

Durch die veränderten Wettbewerbsbedingungen ist eine deutliche Konzentrations-tendenz auf dem Güterverkehrsmarkt zu erkennen. Kleine und mittlere Transport-unternehmen sind oft nur durch die Teilnahme an Kooperationen in der Lage, die gestiegenen Verladeranforderungen bezüglich des Lieferservices und der Transportkosten zu erfüllen und Synergiepotenziale in Form von *Economies of Scope* und *Economies of Density* zu erschließen. Größere Transportunternehmen greifen demgegenüber auf bereits bestehende Strukturen zurück und haben so die Möglichkeit, besser auf die Verladeranforderungen zu reagieren (Bock, 2004, S. 44f.).

Unter Kooperation ist die Zusammenarbeit von Unternehmen der gleichen Wertschöpfungsstufe oder Branche (horizontal) oder die Zusammenarbeit von Unternehmen unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen (vertikal) zu verstehen, wobei die rechtliche Selbstständigkeit der Unternehmen und das gemeinsame zielgerichtete Wirken im Vordergrund stehen. Horizontale Kooperation zielen darauf ab, Effizienzsteigerungen durch einen zwischenbetrieblichen Ausgleich von freiem Laderaum und die Bündelung von Transporten zu realisieren (Baum et al., 1995, S. 42). Ein weiterer positiver Effekt dieser Zusammenarbeit zwischen TDL ist die räumliche und inhaltliche Erweiterung des Serviceangebots. Die vertikale Kooperation beschreibt eine Zusammenarbeit zwischen Verladern und TDL. Aus Sicht des Verladers führt die Auslagerung von Logistikaufgaben bzw. die Konzentration auf Kernaufgaben zu einer Senkung der Logistikkosten und einer Steigerung der Servicequalität (Pankratz, 2002, S. 18). Solch komplexe Kooperationen, die individuelle Lösungen für den Verlader beinhalten und langfristig orientiert sind, werden als Systemdienstleistungen bezeichnet (Ihde und Wolf, 2002, S. D2-37). Zu den vertikalen Kooperationen gehört allerdings auch die langfristige Zusammenarbeit zwischen Spediteuren und Frachtführern, wobei die Frachtführer die physische Durchführung der Transporte für die Speditionen übernehmen (Pfohl, 1996, S. 307f.).

Besonders für kleine und mittlere TDL stellen Kooperationen ein geeignetes Mittel zur Ausschöpfung von Rationalisierungspotenzialen dar. Diese Arbeit setzt sich mit der Erschließung von Rationalisierungspotenzialen im Rahmen von Netzwerken auseinander, was einen vielversprechenden Forschungsansatz darstellt.

Kapitel 3

Kooperationen in der Transportwirtschaft

In Kapitel 2.5.5 wurde darauf eingegangen, dass besonders kleine und mittlere TDL nur durch die Teilnahme an Kooperationen in der Lage sind, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und zu verbessern. Dies gelingt ihnen, indem sie dem Kunden zum Beispiel ein umfassenderes Leistungsangebot oder eine höhere Flächendeckung anbieten und so ihre Erlöse erhöhen. Die Wettbewerbsfähigkeit lässt sich aber auch sichern und verbessern, indem sie ihre vorhandenen Kapazitäten besser ausnutzen und so ihre Transportkosten senken.

Ziel dieses Kapitels ist es zunächst eine Definition für den Begriff Kooperation einzuführen und die wesentlichen Merkmale und Voraussetzungen für Kooperationen zu formulieren. Wie vielfältig Kooperationen in der Transportwirtschaft sind, zeigt die Übersicht in Kapitel 3.2. Neben vertikalen Kooperationen finden sich in dieser Übersicht horizontale Kooperationen zwischen TDL wieder. Da auf diesen der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt, werden im dritten Teil dieses Kapitels spezielle horizontale Kooperationsansätze aus der Literatur vorgestellt und anhand verschiedener Kriterien klassifiziert. Den Abschluss bildet die Vorstellung eines neuen dezentralen Kooperationsansatzes. Dieser Ansatz betrachtet die Zusammenarbeit von TDL, der durch den Austausch von Transportaufträgen in einem geschlossenen Netzwerk charakterisiert ist. Ziel ist es, ein Gesamtoptimum für das kooperative Netzwerk zu finden, ohne die beteiligten TDL schlechter zu stellen. Der dafür notwendige Informationsaustausch zwischen den TDL soll minimiert werden, da die TDL nur bedingt bereit sind wettbewerbsrelevante Informationen zur Verfügung zu stellen. Im Gegensatz zu bekannten Kooperationsansätzen dienen hier die tatsächlichen Transportkosten als Bewertungsgrundlage für den Austausch der Transportaufträge. Dies ermöglicht genaue Aussagen über die durch die Kooperation generierbaren Rationalisierungspotenziale.

3.1 Begriff, Merkmale und Ziele von Kooperationen

Der Begriff Kooperation stammt aus der lateinischen Sprache und bedeutet soviel wie „Zusammenarbeit“ oder auch „gemeinsame Erfüllung von Aufgaben“ (Rothe-ring, 1993, S. 6). Genauer lässt sich der Begriff aus betriebswirtschaftlicher Sicht definieren als „freiwillige Zusammenarbeit von rechtlich selbstständigen Unternehmen mit der Absicht, einen gegenüber dem jeweils individuellen Vorgehen höheren Grad der Zielerfüllung zu erreichen“ (Pfohl, 1996, S. 302). Friese (1998, S. 62) fügt dieser Definition noch hinzu, dass ebenfalls die Koordination des Verhaltens der Kooperationssteilnehmer notwendig ist. Zusammenfassend sind Kooperationen durch

- die freiwillige Teilnahme,
- die rechtliche und wirtschaftliche Unabhängigkeit der beteiligten Unternehmen,
- die Koordination des Verhaltens und
- den Anreiz einer besseren Zielerreichung als bei individuellem Vorgehen

gekennzeichnet.

Kooperationen in der Transportwirtschaft zielen darauf ab, effiziente Transportketten zwischen Versendern und Empfängern zu gestalten, um einen vorgegebenen Servicegrad sicherzustellen. Grundsätzlich ist zwischen den Zielen der Verlader und denen der ausführenden TDL zu unterscheiden.

Mit einer Zusammenarbeit verfolgen die Verlader das Ziel, Preisvorteile durch eine Bündelung ihrer Nachfrage zu generieren. Die TDL sind dadurch in der Lage, ihre Kapazitäten besser auszulasten. Die somit entstandenen Kostenvorteile (Economies of Scale) können zum Teil an die Verlader weitergegeben werden. Mit Hilfe von Kooperationen zwischen Verladern und TDL zielen die Verlader aber auch auf eine Erhöhung des Servicegrades ab.

Bei einer Kooperation zwischen TDL wird hingegen vorwiegend das Ziel verfolgt, Verbundeffekte (Economies of Scope) durch die gemeinsame Nutzung von Ressourcen zu generieren. Weitere Ziele der TDL sind die Realisierung von Economies of Size, Economies of Density und Economies of Massed Reserves (siehe Kapitel 2.5.3). Die TDL versuchen jedoch, nicht nur ihre Kosten zu senken und Nachfragespitzen zu bedienen. Ein weiteres Ziel besteht in der Erweiterung des Leistungsangebots, wodurch auch die langfristige Wettbewerbsfähigkeit verbessert wird. Dies kann zum einen durch die Vergrößerung des Transportnetzwerks erfolgen, wobei dem Nachfrager nach Transportleistungen mehr Transportrelationen zur Verfügung stehen. Eine

Nutzenerhöhung beim Nachfrager ist ebenfalls realisierbar, indem eine verbesserte Taktung und somit höhere Zuverlässigkeit in den Fahrplänen realisiert wird (Pfohl, 2003, S. 140).

Grundsätzlich werden mit Hilfe von Kooperationen Bedingungen geschaffen, die auch größere Organisationen zur Verfügung stellen. Allerdings bleiben die Unternehmen in Kooperationen rechtlich und wirtschaftlich selbstständig (Blohm, 1980, S. 1114).

Nachteile von Kooperationen werden laut Benisch (1972, S. 160ff.) im Verlust an Entscheidungsautonomie und an Wettbewerb gesehen. Das Ausmaß des Autonomieverlustes hängt von der Art und Anzahl der ausgelagerten logistischen Leistungen ab. Erfolgt die Auslagerung von komplexen Leistungsbündeln aus dem unmittelbaren Geschäftsfeld des Verladers, so ist der Verlust höher, als wenn nur einzelne logistische Leistungen ausgelagert werden. Entscheidender für den Verloader ist allerdings der Verlust an Marktnähe. Hierbei geht der Kontakt zum Kunden besonders dann verloren, wenn logistische Funktionen wie Warenanlieferung oder Auftragsannahme fremd vergeben werden.

Eine wichtige Voraussetzung für die Initiierung von Kooperationen ist es, einen geeigneten Teilnehmerkreis zu finden (Blohm, 1980, S. 1114ff.). Die Kooperationspartner müssen ihre Leistung qualitativ hochwertig und zuverlässig erbringen, um eine erfolgreiche Kooperation zu gewährleisten. Friese (1998, S. 91) und Pfohl (2004b, S. 360f.) weisen darüber hinaus noch auf die Notwendigkeit von Koordination und Transparenz hin. Im Rahmen der Koordination wird das Verhalten der Unternehmen in der Kooperation durch bestimmte, von allen anerkannten, Regeln aufeinander abgestimmt. Die Regeln legen beispielsweise die durch die Vernetzung betroffenen Abläufe und die Aufteilung der Erträge fest und schaffen somit Transparenz für die Kooperationspartner.

Um die Koordination der Kooperationspartner abzusichern, werden häufig Verträge genutzt. Diese Verträge können den Umfang der Kooperation, den Zeitrahmen, die Leistungen und Entgelte aber auch Strafzahlungen festlegen. Bei sich verändernden Marktsituationen ist die Anbahnung, Vereinbarung, Kontrolle und Anpassung solcher Verträge jedoch sehr kostenintensiv. Vertrauen, dass sich der Transaktionspartner entsprechend den eigenen Vorstellungen verhalten wird, kann Informationen und Vereinbarungen teilweise ersetzen. Aus ökonomischer Sicht ist es dann sinnvoll zu vertrauen, wenn der Erwartungswert der Kooperationsgewinne den Erwartungswert der potenziellen Verluste durch strategisches Handeln des Kooperationspartners übersteigt (Wallenburg und Weber, 2005, S. 760f.). Strategisches Verhalten liegt nach Peters (2002, S. 47) dann vor, wenn die Akteure anstelle von wahren Präferenzen verfälschte Präferenzen offenbaren.

3.2 Eine Übersicht zu Kooperationsformen in der Transportwirtschaft

Kooperationsformen in der Transportwirtschaft werden nach Pfohl (2004b, S. 313ff.) grundlegend in zwischenbetrieblich und überbetrieblich unterschieden (siehe Abbildung 3.1). Während bei einer zwischenbetrieblichen Kooperation eine direkte Zusammenarbeit zwischen einzelnen Unternehmen der Transportwirtschaft stattfindet, werden die Aufgaben in einer überbetrieblichen Kooperation in einer gemeinsam getragenen Institution abgestimmt oder dahin ausgegliedert (Wohlgemuth, 2002, S. 13f.). Diese Kooperationsform zielt auf die Deckung spezieller Bedarfe der Mitglieder (gewerbewirtschaftliche Zusammenarbeit) oder die Bündelung der Interessen der Partner (gewerbepolitische Zusammenarbeit) ab.

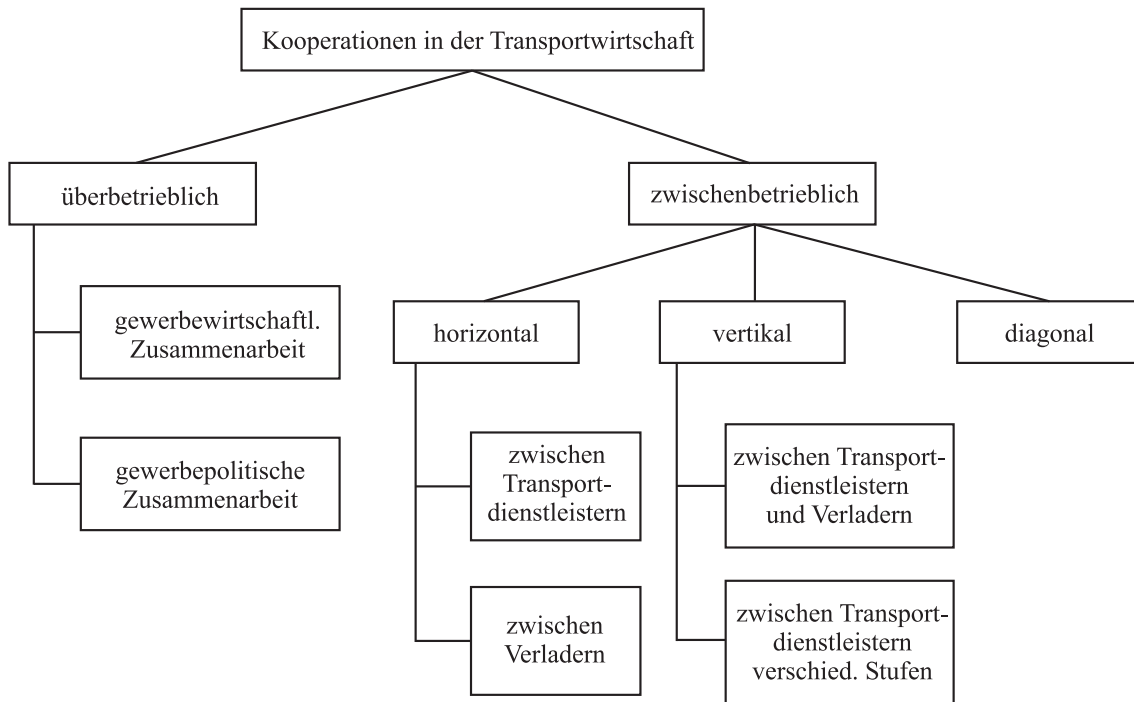


Abbildung 3.1: Übersicht zu Kooperationen in der Transportwirtschaft

Für zwischenbetriebliche Kooperationen in der Transportwirtschaft gibt es eine Vielzahl von Ausprägungsformen. Mithilfe des am häufigsten verwendeten Kriteriums, der Kooperationsrichtung, lässt sich die zwischenbetriebliche Kooperation weiter in horizontale, vertikale und diagonale Kooperationen einteilen. Weitere Kriterien zur Abgrenzung von Kooperationen finden sich in Knoblich (1969, S. 505ff.), Friese (1998, S. 151) und Zentes et al. (2005, S. 22). Bei einer horizontalen Koope-

ration findet eine Zusammenarbeit entweder nur zwischen TDL oder nur zwischen Verladern statt, während bei einer vertikalen Kooperation die Zusammenarbeit zwischen TDL und Verladern oder TDL verschiedener Stufen der Transportkette erfolgt. Im Rahmen einer diagonalen Kooperation arbeiten demgegenüber Unternehmen verschiedener Verkehrszweige, wie zum Beispiel dem Schienenverkehr und dem Straßenverkehr, zusammen.

3.2.1 Überbetriebliche Kooperation

Bei der überbetrieblichen Kooperation werden Logistikaufgaben in einer gemeinsam getragenen Institution abgestimmt oder in diese ausgegliedert. Dazu wird die Institution entweder neu gegründet oder es erfolgt eine Beteiligung an einer bereits bestehenden überbetrieblichen Institution. Die speziellen Formen der überbetrieblichen Kooperationen in der Transportwirtschaft sind die Folgenden.

- gewerbewirtschaftliche Zusammenarbeit:
 - Straßenverkehrsgenossenschaften
 - Fördereinrichtungen der Verkehrswirtschaft
- gewerbepolitische Zusammenarbeit:
 - Fachvereinigungen und Verbände der Verkehrswirtschaft
 - Fachausschüsse anderer Wirtschaftszweige

Zur gewerbewirtschaftlichen Zusammenarbeit gehören *Straßenverkehrsgenossenschaften (SVG)*, die Versorgungseinrichtungen für das Personal und die Fahrzeuge in Form von Autohöfen unterhalten sowie Ladegut und Laderaum (z. B. für Rückfahrten) in Laderaumverteilungsstellen vermitteln. Weiterhin gehören zur gewerbewirtschaftlichen Zusammenarbeit *Fördereinrichtungen der Verkehrswirtschaft*, die zum Beispiel die Buchhaltung von TDL übernehmen aber auch Beratungsdienste wahrnehmen.

Fachvereinigungen und Verbände der Verkehrswirtschaft, aber auch andere Wirtschaftszweige sowie deren Fachausschüsse arbeiten auf gewerbepolitischer Ebene zusammen. Sie stellen eine Interessenvertretung der Speditions- und Logistikunternehmen gegenüber dem Staat, den Behörden aber auch anderen Wirtschaftsverbänden und einzelwirtschaftlichen Organisationen dar. Ein Beispiel ist der Verband Verkehrswirtschaft und Logistik Nordrhein-Westfalen e.V. In den *Fachausschüssen* wird zum Beispiel bei der Standardisierung von Transportmitteln und Dokumenten oder bei der Verknüpfung logistischer Informationssysteme kooperiert. Als Beispiel sei der Fachausschuss für Verkehrswirtschaft genannt.

3.2.2 Zwischenbetriebliche Kooperation

3.2.2.1 Horizontale Kooperation

Eine horizontale zwischenbetriebliche Kooperation zeichnet sich durch aus die Zusammenarbeit von Konkurrenten mit ähnlichen Tätigkeitsbereichen aus. Dies können verschiedene Verlader aber auch verschiedene TDL sein. Die speziellen Formen der horizontalen Kooperationen in der Transportwirtschaft sind die Folgenden.

- Kooperationen zwischen TDL:
 - Einkaufsgemeinschaften für Betriebsmittel
 - Logistikservice-Netzwerke
 - City-Logistik-Konzept
 - Fracht- und Laderaumausgleichssysteme
- Kooperationen zwischen Verladern:
 - Einkaufsgemeinschaften für Logistikdienstleistungen
 - Bündelung der Nachfrage

Kooperationen zwischen TDL

Einkaufsgemeinschaften bieten die Möglichkeit, Rationalisierungspotenziale durch Kooperationen zwischen TDL zu realisieren. Dabei schließen sich TDL zusammen, um bei der Beschaffung von Ersatzteilen oder Betriebsmitteln (Fahrzeuge, Reifen, Kraftstoff u. ä.) günstigere Einkaufspreise zu erzielen (Egler, 1969, S. 117ff.).

Große Bedeutung in dieser Art der Zusammenarbeit haben bestimmte Typen von *Logistikservice-Netzwerken* erlangt. Hierbei schließen sich mehrere Speditionsunternehmen durch die Bildung eines Gemeinschaftsunternehmens, welches ein einheitliches Auftreten gegenüber den Verladern ermöglicht, zusammen (oft auf Basis von Franchiseverträgen). Beispiele für diese Kooperationen sind im Bereich des Stückguts CargoLine und im Bereich des Paketdienstes DPD (Deutscher Paket Dienst GmbH & Co. KG). Diese Kooperationen bieten dem Kunden einen flächendeckenden, deutschland- oder europaweiten Service an.

Im Rahmen von *City-Logistik-Projekten* werden die Ver- und Entsorgungsverkehre der Innenstädte von Spediteuren gebündelt und koordiniert. Ziel ist es, Rationalisierungspotenziale auszuschöpfen und eine Verminderung der LKW-Verkehre zu erzielen (Wittenbrink (1995, S. 36ff.); Zentes und Janz (2002, S. D 3-33)). Für den dazu notwendigen Austausch von Waren zwischen den TDL ist ein gemeinsamer

Umschlagspunkt vorteilhaft. Dazu eignet sich ein Güterverkehrszentrum besonders gut. Ein Güterverkehrszentrum ist ein großer Umschlagspunkt in der Nähe eines Ballungsgebiets, der Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern bzw. zwischen Fern- und Nahverkehr hat und die nötigen Umschlagsanlagen aufweist (Fleischmann, 2002b, S. A 1-18). Weltweit existieren eine Reihe unterschiedlicher City-Logistik-Projekte (Visser et al., 1999). In Deutschland schließen sich die TDL in privaten kooperativen Initiativen zusammen und führen eine gemeinsame oder abwechselnde Disposition und Tourenplanung für die Belieferung der Innenstädte durch. Regulierungen bezüglich der gestatteten Anzahl von Fahrzeugen oder Fahrzeuggrößen sind selten anzutreffen. Dies ist, neben dem meist geringen bündelfähigen Volumen ein Hauptgrund dafür, dass diese Projekte nach der Förderungsphase der EU meist nicht weitergeführt werden. In den Niederlanden sind die City-Logistik-Projekte erfolgreicher, da eine starke Regulierung der Einfahrtgenehmigungen in Innenstädte vorherrscht. Hier schließen sich die TDL mit dem Ziel zusammen, die Anzahl der Fahrzeuge zu verringern. Einen nicht-kooperativen Ansatz verfolgt Monaco. Die Güterströme laufen an einem GVZ zusammen und ein einziger TDL ist für die Versorgung der Innenstadt zuständig. Bei den City-Logistik-Projekten in Deutschland, den Niederlanden und in Monaco werden die Innenstädte direkt von einem GVZ aus versorgt. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich neuere City-Logistik-Projekte in Nordamerika auf zweistufige Systeme. Hier erfolgt zunächst eine Bündelung der Güterströme in außerhalb der Stadt liegenden GVZ. Im Anschluss werden die Güter zu sogenannten *satellites* in die Innenstadt transportiert und nochmals für spezielle Fahrzeuge konsolidiert, die stark besiedelte Stadtzonen versorgen (Crainic et al., 2004; Gragnani et al., 2004). Somit entfallen, im Vergleich zu einstufigen Systemen, die teilweise sehr langen Wege zwischen dem GVZ und den Empfängern.

Ein Problem für TDL im Straßengüterbereich ist oft die geringe Auslastung der Fahrzeuge und der hohe Leerfahrtenanteil, der im Jahr 2007 19,5 % betrug (Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V., 2007). Durch *Laderaumausgleichssysteme* sollen die TDL in die Lage versetzt werden, ihre Ladung im Teilladungsverkehr zu komplettieren oder zusätzliche Relationen im Ladungsverkehr zu akquirieren (Kopfer und Pankratz, 1998; Erdmann, 1999). Diese Systeme bieten die Möglichkeit, unprofitable Ladung an andere TDL fremd zu vergeben. Unter Nutzung von elektronischen Marktplätzen (siehe Kapitel 2.5.4) lässt sich der Austausch von Ladungen effizient gestalten. Um TDL eine Kooperation zu ermöglichen, sind die elektronischen Märkte auf eine geschlossene Benutzergruppe beschränkbar (Sänger, 2004, S. 80). Die elektronische Frachtbörse TimoCom Truck & Cargo bietet zum Beispiel die Einrichtung einer geschlossenen Benutzergruppe an, innerhalb derer ein Austausch von Angeboten zwischen TDL stattfindet.

Kooperationen zwischen Verladern

Verlader finden sich zu *Einkaufskooperationen* zusammen, um gemeinsam Logistikdienstleistungen einzukaufen. Dabei sind sie aufgrund der Bündelung ihrer Nachfrage in der Lage, Preisvorteile bei den TDL zu erlösen (Eßig, 2008, S. 993). Als Beispiel sei die Herstellerkooperation der Unternehmen Coppenrath & Wiese, Apetito und R&R Ice Cream genannt. Sie beauftragen gemeinsam Logistikdienstleister mit der Direktbelieferung ihrer Kunden mit tiefgekühlten und heißen Menüs in Deutschland. Dadurch konnten die Transportkosten aller beteiligten Partner gesenkt und die Auslastung der eingesetzten Transportmittel erhöht werden.

In einer Kooperation zwischen Verladern können Effizienzsteigerungen durch eine *Bündelung von Transportaufträgen* realisiert werden. Zum einen lassen sich dabei die Logistikkosten für die Verlader senken und zum anderen sind die ausführenden TDL in der Lage ihre Kapazitäten besser auszulasten und Transportkosten einzusparen. Ergun et al. (2007) haben dazu einen Ansatz formuliert, das Shipper Collaboration Problem, bei dem die Verlader ihre Transportaufträge für die TDL zu Touren bündeln. Die TDL integrieren die Aufträge in ihre Touren und erreichen somit Einsparungen, die sie durch die eigene Akquisition aufgrund des Wettbewerbs nicht realisieren könnten. Diese Form der Bündelung und Fremdvergabe ist entweder kurzfristig, für einzelne Transportaufträge, oder langfristig, bei der Vergabe von Linienverkehren, angelegt.

3.2.2.2 Vertikale Kooperation

Eine vertikale zwischenbetriebliche Kooperation zeichnet sich dadurch aus, dass Unternehmen unterschiedlicher Stufen der Transportkette mit unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen zusammenarbeiten. Dabei werden schon bestehende Geschäftsbeziehungen im Rahmen einer längerfristigen vertraglichen Bindung und eines umfassenderen Leistungsangebots vertieft. Die speziellen Formen der vertikalen Kooperationen in der Transportwirtschaft sind die Folgenden.

- Kooperationen zwischen Verladern und TDL:
 - Logistik-Outsourcing
 - Logistikparks
- Kooperationen zwischen TDL unterschiedlicher Stufen der Transportkette:

Kooperationen zwischen Verladern und TDL

Die Anforderungen an Logistikdienstleister seitens der Verlader sind gestiegen (siehe

Kapitel 2.4.1.1). Die Verlagerer konzentrieren sich verstärkt auf ihre Kernkompetenzen und beauftragen Logistikdienstleister mit den nicht zu den Kernkompetenzen gehörenden Aufgaben wie Lagerung, Transport, Kommissionierung, usw. Es werden aber nicht mehr nur einzelne Leistungen, wie die Sammlung und Bündelung von Sendungen durch einen Gebietsspediteur (Stölzle und Gareis, 2002, S. 413ff.), sondern zunehmend ganze Leistungsbündel im Rahmen langfristiger Kontrakte an Logistikdienstleister ausgelagert (Giesa und Kopfer, 2000). Dies wird unter dem Begriff der Kontaktlogistik zusammengefasst. Ein Beispiel für das *Logistik-Outsourcing* ist die Übernahme der KarstadtQuelle-Konzernlogistik durch die Deutsche Post/DHL.

Das Konzept der *Logistikparks* beinhaltet die Errichtung von Distributionszentren der Verlagerer in der Nähe von Systemknoten der zur Distribution beauftragten KEP-Dienstleister (Vahrenkamp, 2005, S. 419ff.). Es ähnelt dem der Zulieferparks in der Automobilindustrie, bei dem es darum geht, die Wege zwischen Zulieferer und Produktionsunternehmen zu verkürzen. Aufgrund der räumlichen Nähe im Logistikpark sind die Verlagerer in der Lage, den Lieferservice gegenüber ihren Kunden zu verbessern und somit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Das EUROPA-CENTER Bremerhaven ist ein solcher Logistikpark. Dieser etwa 33 Hektar große Logistikpark verfügt über Anbindungen an die Verkehrsträger Straße, Schiene und Seeschiff. Unternehmen aus der Branche Automobil, Flugzeugbau und Handel sowie diverse Logistikdienstleister haben sich dort angesiedelt.

Kooperationen von TDL unterschiedlicher Stufen der Transportkette

In Stufen übergreifenden Logistikdienstleistungskooperationen stimmen mehrere Logistikdienstleister auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette ihre Leistungen aufeinander ab. Ein Beispiel für diese Kooperationsform ist die Übernahme der Steuerung einer Wertschöpfungskette durch einen Logistikdienstleister (Pfohl, 2004b, S. 27), der über keine eigenen Ressourcen wie Fuhrpark oder Lagerhäuser verfügt. Aus diesem Grund muss er für die Steuerung der Wertschöpfungskette mit entsprechenden Dienstleistern zusammenarbeiten (Nissen und Bothe, 2002). Durch die Nutzung von Frachtbörsen ist der Logistikdienstleister in der Lage, diese Ressourcen effizient zu beschaffen. Die Frachtbörse Cargoclix bietet zum Beispiel die Einrichtung eines individuellen Logistikmarktplatzes an. Im Rahmen dieses CargoMarket legt der Auftraggeber zum einen fest, welche kurz- und langfristigen Transport- und Logistikaufträge vergeben werden sollen und zum anderen, welche Logistikdienstleister er zum Markt zulässt. Der Auftraggeber erstellt sich somit ein auf seine spezifischen Anforderungen maßgeschneidertes logistisches Netzwerk und die Logistikdienstleister erhalten Einladungen zu allen kurz- und langfristigen Transport- und Logistikaufträgen des Auftraggebers (Cargoclix, 2009).

3.2.2.3 Diagonale Kooperation

Die diagonale Kooperation umfasst die Zusammenarbeit unterschiedlicher Verkehrstechniken und die Kooperation zwischen unterschiedlichen Verkehrsgebieten (Pfohl, 2004b, S. 318f.). Die Zusammenarbeit der Verkehrstechniken wird bei der Betrachtung des kombinierten Verkehrs deutlich. Dabei werden die Güter in der Transportkette auf mehreren Verkehrsträgern (z. B. Schiene und Straße) transportiert. Die Zusammenarbeit zwischen mehreren Verkehrsgebieten besteht zum Beispiel zwischen einer Hafengesellschaft und dem angebundenen Straßen- oder Schienenverkehr.

Als Beispiel für eine diagonale Kooperation ist die Zusammenarbeit eines Frachtführers mit einem Hafenumschlagsunternehmen an der Schnittstelle zwischen Land und See im Rahmen des Projektes COREM (Cooperative Resource Management for the Transport of Unit Loads) in Bremerhaven zu nennen (Arendt, 1999, S. 57ff.). Hier erfolgte eine kooperative Abstimmung der LKW-Transporte von und zum Containerterminal mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien.

3.3 Klassifikation von Ansätzen zur horizontalen Kooperation von TDL

In der wissenschaftlichen Literatur existiert bisher keine umfassende Übersicht zu den wissenschaftlichen Ansätzen in der horizontalen Kooperation von TDL. Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Kooperationsansätze deshalb nach der Form der Koordination in zentrale und dezentrale unterschieden. Im Anschluss erfolgt eine Übersicht von dezentralen Kooperationsformen gemäß ihrer Zielstellungen. Darauf aufbauend wird ein Kriterienkatalog erstellt, der eine Klassifikation der bestehenden Ansätze ermöglicht. Einen ähnlichen Kriterienkatalog hat Stadtler (2009) für die kooperative Planung im Supply Chain Management erstellt. Im Anschluss an die Klassifikation und den Vergleich der bestehenden wissenschaftlichen Ansätze erfolgt die Einordnung und Abgrenzung des in dieser Arbeit vorzustellenden Forschungsansatzes.

3.3.1 Zentrale und dezentrale Koordination

Eine Kooperation zwischen TDL zielt darauf ab, Rationalisierungspotenziale zu erschließen, die bei individuellem Vorgehen nicht erreichbar sind. Dies wird beispielsweise durch einen Austausch von Transportaufträgen realisiert. Die notwendige Koordination der beteiligten TDL erfolgt dabei entweder zentral oder dezentral.

Bei der zentralen Koordination wird die Planung und Entscheidung aller Kooperationspartner kollektiv umgesetzt. Zu diesem Zweck müssen die Beteiligten

bereit sein, Informationen über ihre Kunden zur Verfügung zu stellen und einen Teil ihrer Planungsautonomie abzugeben. Eine zentrale Abstimmung mehrerer TDL erfolgt zum Beispiel durch die Neuordnung aller Transportaufträge. Diese neue Zuordnung ergibt sich im Rahmen der, von einer zentralen Planungsinstanz durchgeführten, Tourenplanung. Es gibt nur wenige Autoren, die zentrale Koordinationsansätze für Kooperationen zwischen TDL behandeln. In Bürckert und Vierke (1998) wird ein Simulated Trading Mechanismus vorgestellt, mit dessen Hilfe eine kostenminimale Zuteilung von Transportaufträgen zu TDL erfolgt. Audy et al. (2007a) und Audy et al. (2007b) zeigen anhand eines Beispiels aus der Forstwirtschaft, wie sich die Gesamtkosten reduzieren lassen, wenn zwei TDL ihre Touren zusammen planen. Agarwal (2007) wendet das gleiche Prinzip auf das Beispiel der Linienschifffahrt an.

Da die TDL in der Regel nicht bereit sind, ihre Autonomie aufzugeben und Informationen über ihre Kunden und Kostenstruktur zur Verfügung zu stellen, beschäftigen sich diese Arbeit wie auch die meisten Koordinationsansätze für Kooperationen von TDL mit der dezentralen Abstimmung der Beteiligten. Hierbei plant und entscheidet jeder Kooperationspartner autonom, d. h. er verfolgt seine eigene Zielsetzung und nimmt eine eigenständige Bewertung seiner Aufträge vor. Die TDL entscheiden selbstständig, welche Transportaufträge sie annehmen, ablehnen oder fremd vergeben. Eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL ergibt sich durch die Anwendung von marktbasierenden Austauschmechanismen. Zu diesem Zweck ist die wiederholte Bewertung der Transportaufträge durch die TDL notwendig. Ein Vorteil der dezentralen Koordination liegt in der Nutzung von individuellen Marktkennntnissen der TDL, indem diese ihre eigenen Kundenbeziehungen unterhalten. Ein weiterer Vorteil der dezentralen Koordination ist die Komplexitätsreduktion, die durch die Zerlegung der Planungsaufgabe, in die individuelle Auftragsbewertung einerseits und die Zuordnungsentscheidung andererseits, entsteht. Wichtig bei dieser Form der Koordination ist allerdings, dass die Kommunikation zwischen den TDL sichergestellt wird und ein geeigneter Koordinationsmechanismus zur Zuordnung der Transportaufträge existiert.

3.3.2 Übersicht zu dezentralen horizontalen Kooperationsansätzen

Die dezentralen Ansätze zu Kooperationen von TDL konzentrieren sich auf

1. die Identifizierung von Rationalisierungspotenzialen,
2. die Gestaltung von effizienten Koordinationsmechanismen,
3. die Analyse von Kooperationen in dynamischen Umgebungen und

4. die Schaffung von Anreizen zur Teilnahme an Kooperationen.

So identifiziert Sandholm (1993) zum Beispiel für eine Kooperation von selbstständigen TDL, die die Auslieferung für verschiedene Hersteller übernehmen, eine theoretische Kosteneinsparung von durchschnittlich 17 %. Krajewska (2007) schätzt die Kosteneinsparung einer Kooperation von Profitcentern innerhalb eines großen Speditionsunternehmens, das seine Leistungen im Teilladungsverkehr erbringt, auf 3-24 %. Ein Profitcenter stellt einen organisatorischen Teil eines Unternehmens dar, für den ein eigener Periodenerfolg ermittelt wird und der selbst für die Geschäftstätigkeit verantwortlich ist (Eisenführ, 1985; Schweitzer, 1992). Bei der empirischen Untersuchung von Praxisbeispielen ergeben sich laut Falk (1995), Krajewska (2007) und Clifton et al. (2008) Kosteneinsparungen von 5-30 %, je nach untersuchtem Anwendungsfall. Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass sich die theoretisch geschätzten Einsparungspotenziale für Kooperationen im Rahmen empirischer Tests bestätigen lassen.

Ein Großteil der kooperativen Ansätze beschäftigt sich darüber hinaus mit der Gestaltung effizienter Koordinationsmechanismen. Neben Ausschreibungen (Sandholm, 1993; Falk, 1995) und bilateralen Verhandlungen (Fischer et al., 1996) werden häufig Ein-Gut-Auktionen (Gomber et al., 1999; Song und Regan, 2004) für die Abstimmung der Kooperationspartner verwendet. In der Transportwirtschaft bestehen häufig subadditive Beziehungen (Komplementaritäten) zwischen mehreren Transportaufträgen. Die Kosten einer gebündelten Erfüllung der Transportaufträge sind demzufolge geringer, als bei einer getrennten Ausführung. Eine Möglichkeit diese Komplementaritäten auszunutzen, stellt die Durchführung von kombinatorischen Auktionen dar (Gomber et al., 1999; Schönberger, 2005; Krajewska und Kopfer, 2006; Gujo et al., 2007). In kombinatorischen Auktionen werden nicht nur einzelne Güter, sondern Güterbündel versteigert. Die TDL können also ihre Wertschätzung für die gebündelte Durchführung von Transportaufträgen durch komplexe Gebote ausdrücken. Die Zuordnung der Auftragsbündel zu TDL genau wie die Preisermittlung erfolgt unter der Zielstellung der Maximierung der Gesamtauszahlungen.

Im Vergleich zu Kooperationsansätzen, die von einem initialen deterministischen Auftragsbestand der TDL ausgehen, setzen sich einige wenige Ansätze mit stochastisch eintreffenden Transportaufträgen in einer dynamischen Umgebung auseinander (Fischer et al., 1996; Song und Regan, 2004; Figliozzi, 2006). Hier muss für jeden ankommenden Auftrag kurzfristig entschieden werden, ob er selbst durchgeführt oder innerhalb der Kooperation fremd vergeben wird. Tauschen TDL nun innerhalb einer Kooperation Transportaufträge aus, so entsteht daraus eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL. Diese neue Zuordnung beeinflusst nicht nur den aktuellen Gewinn der TDL und der ganzen Kooperation, sondern hat auch Auswir-

kungen auf die Wertschätzung zukünftig eintreffender Transportaufträge. Um diesen Sachverhalt berücksichtigen zu können, führen Figliozzi et al. (2006) Opportunitätskosten ein und weisen nach, dass sich damit die Wirtschaftlichkeit der TDL erhöhen lässt. Opportunitätskosten entsprechen dem entgangenen Erlös, der durch die Entscheidung für eine aus mehreren Alternativen entsteht (McConnell und Brue, 2004, S. 27). Das Konzept der Opportunitätskosten wird bei Mes et al. (2006) auch für die Fahrzeugsteuerung eingesetzt. Fahrzeuge, die zurzeit keine Aufträge abarbeiten, werden dazu über attraktive Orte umgeleitet. Attraktive Orte sind in diesem Zusammenhang Orte, an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Transportauftrag initiiert wird. Im Gegensatz zur aufwendigen exakten Berechnung werden die Opportunitätskosten von Mes et al. (2006), zum Zwecke der Lösung größerer Probleminstanzen, nur geschätzt.

Ein wesentlicher Aspekt einer dauerhaften Zusammenarbeit zwischen TDL ist die Schaffung von Kooperationsanreizen. Diese stellen nicht nur eine gerechte Aufteilung der Gewinne zwischen den Kooperationspartnern sicher, sondern sind bei geeigneter Ausgestaltung auch in der Lage das strategische Verhalten einzelner TDL zu unterbinden. Strategisches Verhalten ist in diesem Zusammenhang als Bekanntgabe von falschen Bewertungen oder Geboten durch die Kooperationspartner zu verstehen, um zusätzliche Gewinne abzuschöpfen. In Figliozzi (2006) ist der Kooperationsmechanismus so gestaltet, dass für jeden TDL ein Anreiz besteht, seine eintreffenden Transportaufträge in den Kooperationsmechanismus einzustellen. Der Anreiz an der Kooperation teilzunehmen wird bei Sandholm (1993), Song und Regan (2004) und Gujo et al. (2007) durch die Gewinnverteilung sichergestellt. Bei Gomber et al. (1999) ist darüber hinaus durch den Auktionsmechanismus sichergestellt, dass die TDL ihre wahren Zahlungsbereitschaften angeben.

3.3.3 Klassifikation dezentraler Kooperationsansätze

In der Literatur existieren acht Kooperationsansätze, die darauf abzielen, eine effiziente Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL zu finden. Dies sind die Ansätze von Sandholm (1993), Falk (1995), Fischer et al. (1996), Gomber et al. (1999), Song und Regan (2004), Schönberger (2005), Krajewska und Kopfer (2006) und Gujo et al. (2007). Zur Unterscheidung dieser Ansätze dienen die folgenden Kriterien.

1. Organisationsform der Kooperation
2. Geschäftsfeld der TDL
3. Zielstellung
4. Modellierungsansatz

5. Fremdvergabe von Transportaufträgen
6. Koordinationsform
7. Informationsaustausch
8. Gewinnverteilung

In den Tabellen 3.1 und 3.2 ist die Klassifikation der acht Kooperationsansätze gemäß den Kriterien zusammengefasst, wobei die Ansätze nach ihrem Erscheinungsjahr geordnet sind. Im Folgenden wird auf die einzelnen Kriterien und deren Ausgestaltung in den speziellen horizontalen Kooperationsansätzen näher eingegangen.

Organisationsform der Kooperation

Die Organisationsform gibt an, aus welchen organisatorischen Einheiten sich die Kooperation im jeweiligen Ansatz zusammensetzt. Während Sandholm (1993), Fischer et al. (1996), Song und Regan (2004) und Schönberger (2005) von einer Kooperation aus selbstständigen unabhängigen TDL ausgehen, betrachten Falk (1995), Gomber et al. (1999), Krajewska und Kopfer (2006) und Gujo et al. (2007) eine Großpedition mit verschiedenen Niederlassungen, die teilweise in einer Profitcenter-Struktur organisiert sind.

Geschäftsfeld

Die Geschäftsfelder der TDL in den verschiedenen Kooperationsansätzen unterscheiden sich stark. Sie reichen von der Auslieferung von Gütern für Produktionsunternehmen bei Sandholm (1993) über den Trampverkehr (Bedarfsverkehr) bei Falk (1995) bis hin zum simultanen Einsammeln und Ausliefern im Teilladungsverkehr bei Schönberger (2005) und Krajewska und Kopfer (2006). Modelliert werden diese Geschäftsfelder als Tourenplanungsprobleme.

Zielsetzung

Gomber et al. (1999) und Schönberger (2005) zielen darauf ab, den Gesamtdeckungsbeitrag im gesamten System zu maximieren. Da die Erlöse der Transportaufträge auch bei einem Austausch von Transportaufträgen konstant sind, stellt die Minimierung der Kosten der Transportdurchführung, die von anderen Ansätzen verfolgt wird, eine gleichläufige Zielstellung dar.

Modellierungsansatz

Hinsichtlich des Modellierungsansatzes gibt es bei den Kooperationsansätzen verschiedene Herangehensweisen. Sandholm (1993), Falk (1995), Fischer et al. (1996) und Gomber et al. (1999) nutzen Multi-Agenten-Systeme, um die Verhaltensweisen der TDL bzw. Profitcenter abzubilden. Ein Agent ist ein Softwaresystem, das autonom ist, mit anderen Agenten kommuniziert und interagiert, auf Veränderungen in seiner Umgebung reagiert und zielgerichtet und eigeninitiativ handelt (Brenner et al. (1998, S. 21ff.); Ferber (1999, S. 9f.)). Ein Multi-Agenten-System besteht demnach aus mehreren Agenten, die an der Lösung eines Problems arbeiten. In den Kooperationsansätzen wird jedem selbstständig disponierten Fuhrpark ein Agent zugewiesen, der je nach Organisationsform einer Niederlassung oder einem TDL entspricht, für die ihm zugeordneten Fahrzeuge die Tourenplanung vornimmt und mit den Agenten der anderen TDL bzw. Profitcenter kooperiert. Fischer et al. (1996) fügt darüber hinaus jedem Fahrzeug einen Agenten hinzu, der die Planung seiner Tour selbstständig umsetzt. Der Fuhrpark-Agent muss die Pläne seiner Fahrzeuge nur noch koordinieren und eventuell eine zentrale Nachoptimierung vornehmen.

Eine Alternative zur Modellierung von Systemen kooperierender TDL oder Profitcenter bieten Schönberger (2005) und Krajewska und Kopfer (2006). Sie wählen eine Vorgehensweise, bei der die Verhaltensweisen der TDL bzw. Profitcenter durch Annahmen und mathematische Formulierungen beschrieben werden. Sie nehmen zum Beispiel an, dass sich die TDL rational verhalten und versuchen ihre Gewinne zu maximieren. Die Funktionen bilden zum Beispiel die Berechnung der Transportkosten oder Erlöse ab.

Schönberger (2005) beschreibt dazu einen heuristischen zweistufigen Ansatz, bei dem die Auftragsbestände aller TDL bekannt sind. Jeder TDL stellt sich aus diesem Gesamtbestand ein Auftragsbündel zusammen, das seinen Deckungsbeitrag maximiert. Im zweiten Schritt werden die Transportaufträge den TDL zugeordnet. Für Transportaufträge, die keinem TDL zugeordnet werden können, beauftragt ein Mediator einen externen Subunternehmer mit der Ausführung.

Krajewska und Kopfer (2006) dagegen schlagen ein 3-Phasen-Modell für den Austausch der Transportaufträge vor. In der ersten Phase ermitteln die Profitcenter die Transportkosten für die Erfüllung ihrer Transportaufträge und entscheiden, welche sie selbst durchführen. Danach berechnen sie Gebote für die Auftragsbündel, die sie erwerben wollen. In der zweiten Phase werden die Auftragsbündel den Profitcentern zugeordnet, die dafür die geringsten Selbsterstellungskosten angegeben haben. Die Aufteilung der durch die Kooperation erwirtschafteten Gewinne findet in der letzten Phase statt.

Die von Gujo et al. (2007) beschriebene ComEx System-Architektur führt im

Gegensatz zu den anderen Ansätzen einen automatischen Austausch von Logistikdienstleistungen durch. Der Kooperationsprozess ist in vier Hauptphasen eingeteilt. In der Initialisierungsphase werden zunächst die Einstellungen, wie das Auktionsformat, Anmeldungs- und Zulassungsdaten der Teilnehmer übermittelt. In der Outsourcingphase wird für jedes Profitcenter auf Basis der geografischen Nähe zum Profitcenter entschieden, welche Kunden weiterhin beliefert werden sollen. Die restlichen Kunden werden nach geografischer Lage und Lieferzeiten zu Clustern zusammengeführt. Mithilfe der Tourenplanungssoftware DynaRoute erfolgt im Anschluss die Berechnung der Kosteneinsparungen, für den Fall, dass der Cluster nicht vom Profitcenter bedient wird. Jedes Profitcenter ermittelt in der Insourcingphase Gebote für die Cluster. Auf deren Basis findet dann die Zuordnung von Kunden zu Profitcentern statt. Die Endbewertungsphase dient dann der Berechnung und Verteilung der erwirtschafteten Gewinne.

Song und Regan (2004) entwickeln, im Vergleich zu den anderen Ansätzen, kein lauffähiges System, sondern stellen nur theoretische Überlegungen zu Kooperationen zwischen TDL an. Auch sie bilden die Verhaltensweisen der TDL in Form von Annahmen und mathematischen Formulierungen ab. Nach der Bewertung der eintreffenden Transportaufträge, entscheiden die TDL, welche Transportaufträge fremd vergeben werden sollen. Im Anschluss wird mittels einer Auktion ermittelt, welcher TDL diesen Transportauftrag durchführen soll.

Fremdvergabe von Transportaufträgen

Mit der Fremdvergabe von Transportaufträgen zielen die TDL darauf ab, ihren Gesamtdeckungsbeitrag zu erhöhen. Die Transportaufträge werden dabei von einem anderen TDL durchgeführt, der dafür eine Ausgleichszahlung erwartet. Um zu entscheiden, welche Transportaufträge fremd vergeben werden sollen, wird eine geeignete Bewertungsgrundlage benötigt. In Krajewska und Kopfer (2006) wählen die Profitcenter Transportaufträge aus, die sie nicht fremd vergeben wollen. Sie geben allerdings keinen Hinweis darauf, anhand welcher Bewertungsgrundlage dies geschieht. Bei Sandholm (1993) und Gujo et al. (2007) werden nur Aufträge fremd vergeben, die im Überlappungsgebiet mit einem anderen Profitcenter oder nicht im Hauptkundenbereich der Profitcenter liegen. Im Gegensatz dazu wählen Fischer et al. (1996) und Song und Regan (2004) diejenigen Transportaufträge mit den höchsten Transportkosten für die Fremdvergabe aus. In ähnlicher Weise gehen Falk (1995) und Gomber et al. (1999) vor. Sie ermitteln jedoch den Deckungsbeitrag der Transportaufträge. Lediglich bei Schönberger (2005) werden alle von den TDL akquirierten Transportaufträge zur Fremdvergabe ausgewählt. Jeder TDL entscheidet dann selbst, welche Transportaufträge er durchführt, egal welchem Auftragsbestand

die Transportaufträge angehören. Bei Konflikten wird ein Mediator eingeschaltet.

Um die Bewertung der Transportaufträge anhand der Transportkosten vorzunehmen, greifen alle Kooperationsansätze auf heuristische Verfahren zur Tourenplanung zurück. Sie schätzen damit also die Transportkosten, anstatt diese genau zu ermitteln. Somit lassen sich nur Aussagen über die erzielbaren Rationalisierungspotenziale dieser Kooperationsmodelle treffen, die von der Güte der eingesetzten Heuristiken abhängen.

Koordinationsansatz

Nach der Entscheidung über die Selbsterstellung oder Fremdvergabe, findet die Zuordnung der Transportaufträge zu TDL bzw. Profitcentern statt. Alle Kooperationsansätze verwenden dafür marktliche Koordinationsmechanismen. Während Sandholm (1993), Falk (1995) und Fischer et al. (1996) Ausschreibungen oder bilaterale Verhandlungen zur Allokation der fremd zu vergebenden Transportaufträge nutzen, werden in den anderen Arbeiten einfache oder kombinatorische Auktionen verwendet. In Sandholm (1993), Falk (1995), Fischer et al. (1996), Song und Regan (2004) und Gujo et al. (2007) finden diese Verhandlungen nicht nur einmalig, sondern wiederholt statt.

Grundsätzlich läuft die Verhandlung in drei Schritten ab. Zunächst schreibt ein Kooperationspartner einen Transportauftrag an seine Partner aus. Die Kooperationspartner führen im zweiten Schritt eine heuristische Bewertung dieses Auftrags durch und geben auf dieser Grundlage ein Gebot ab. Im letzten Schritt erhält der Bieter mit dem höchsten Gebot den Zuschlag.

Der Teilnehmerkreis der Verhandlungen bestimmt sich in Sandholm (1993) und Falk (1995) durch das Überschneidungsgebiet der Kundengebiete der TDL, d. h. es nehmen nur die TDL teil, in deren Überschneidungsgebiet sich die jeweiligen Transportaufträge befinden. Bei allen anderen Ansätzen können alle TDL an den Verhandlungen teilnehmen. Während bei Falk (1995), Fischer et al. (1996) und Song und Regan (2004) nur einzelne Transportaufträge zu TDL bzw. Profitcentern zugeordnet werden, erfolgt bei Sandholm (1993), Gomber et al. (1999), Schönberger (2005), Krajewska und Kopfer (2006) und (Gujo et al., 2007) eine gleichzeitige Zuordnung von Auftragsbündeln.

Als Kriterium für die Zuordnung der Transportaufträge zu TDL verwenden die meisten Kooperationsansätze die geringsten Transportkosten. Lediglich Falk (1995) und Gomber et al. (1999) nutzen als Kriterium den höchsten Deckungsbeitrag. Bei Schönberger (2005) reicht schon ein freistehendes Gebot für die Zuordnung. Ansonsten bestimmt ein Mediator anhand der geringsten Transportkosten, welchem TDL oder Subunternehmer die Aufträge zugeordnet werden.

Informationsaustausch

Während der Verhandlungen müssen zwischen den TDL, Informationen über die fremd zu vergebenden Transportaufträge ausgetauscht werden. Hierzu gehören die Koordinaten der Kundenorte, das Volumen der Transportaufträge, Frachtraten, Zeitfenster usw. Für die meisten Kooperationsansätze umfassen diese Informationen nur Daten bezüglich der Transportaufträge, die zur Fremdvergabe ausgewählt wurden. Nur bei Schönberger (2005) sind die Daten aller, von den TDL akquirierten, Transportaufträge bekannt.

Gewinnverteilung

Nachdem die Zuordnung der Transportaufträge abgeschlossen ist, muss entschieden werden, wie die im Rahmen der Kooperation erwirtschafteten Gewinne unter den Teilnehmern zu verteilen sind. Sandholm (1993) schlägt vor, den Mittelwert zwischen dem Höchstpreis der Übernahme und dem Mindestpreis der Abgabe zu ermitteln und diesen gleichmäßig zwischen dem anbietenden und dem ausführenden TDL aufzuteilen. Gomber et al. (1999) und Song und Regan (2004) nutzen spezielle Auktionsverfahren (z. B. Vickrey Auktion), die die Aufteilung der Gewinne explizit berücksichtigen. Dagegen sieht Schönberger (2005) eine gleichmäßige Verteilung der Kosten für die externen Subunternehmer vor. Übernimmt ein anderer TDL die Ausführung eines Transportauftrags, so wird die Frachtrate an ihn weitergeleitet. Gujo et al. (2007) nehmen die Aufteilung der entstandenen Kostenersparnis nach einem vorher festgelegten Schlüssel auf die Profitcenter vor. Den komplexesten Gewinnverteilungsansatz schlagen Krajewska und Kopfer (2006) vor. Hier werden die durch die Fremdvergabe eingesparten Ausführungskosten in einen Kooperationsertrag überführt. Dieser wird dann zwischen den betroffenen TDL, gemäß ihres jeweiligen Beitrags zum, durch den Austausch von Auftragsbündeln, generierten Gewinn (Collaboration Advantage Index), aufgeteilt. Für weitere Ausführungen sei auf das Kapitel 5.5 verwiesen.

3.3.4 Ein neuer Ansatz für die Kooperation zwischen TDL

In dieser Arbeit wird ein neuer dezentraler zweistufiger Planungsansatz vorgestellt, bei dem ein iterationsbasierter Austausch von Transportaufträgen auf Basis der tatsächlichen Transportkosten erfolgt. Auf der *ersten Stufe* legen die TDL durch eine optimale *individuelle Tourenplanung* fest, welche Transportaufträge sie selbst erstellen oder fremd vergeben wollen. In einem *zweiten Schritt* erfolgt die *Reallokation* der Transportaufträge mithilfe von Auktionsmechanismen. Der Kooperationsansatz stellt sicher, dass sich die beteiligten TDL durch die Kooperation nicht schlechter

stellen und dabei möglichst wenige Informationen preisgeben.

Im Unterschied zu den genannten Arbeiten eine mathematische Formulierung für die Tourenplanung des kooperativen Netzwerks erstellt, welche unabhängig vom jeweiligen Geschäftsfeld ist. Die Zielstellung ist dabei, ein Gesamtoptimum für das kooperative Netzwerk zu finden, ohne dass sich die beteiligten TDL dabei schlechter stellen. Für die dezentrale Lösung dieses kooperativen Tourenplanungsproblems wird ein zweistufiges Framework entwickelt, welches 1) die individuelle Tourenplanung eines jeden TDL mit 2) auktionsbasierten Austauschmechanismen verbindet. Mithilfe von Reallokationsverfahren, die dem Ablauf des Frameworks folgen, können nicht nur die Rationalisierungspotenziale für derartige Kooperationen quantifiziert, sondern ebenfalls die Kosten einer dezentralen Lösung ermittelt werden.

Das Ziel der Kooperation ist die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags des kooperativen Netzwerks. Die TDL sind allerdings nur bereit an der Kooperation teilzunehmen, wenn sich ihr aktueller Deckungsbeitrag dadurch nicht verschlechtert. Um dies sicherzustellen, werden in diesem Kooperationsansatz ebenfalls Methoden der Gewinnverteilung angewendet. Eine weitere Zielstellung des Ansatzes ist die Minimierung der zwischen den Unternehmen auszutauschenden Informationen. Die Informationen, die für die Koordination der beteiligten TDL allerdings unbedingt ausgetauscht werden müssen, hängen vom Geschäftsfeld ab. Ob die beteiligten TDL selbstständig organisiert sind oder ob es sich um einen TDL mit Profitcenter-Struktur handelt, ist für den Ansatz unerheblich, da vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die selbstständig organisierten TDL gegenüber den Verladern als geschlossene Einheit auftreten.

Ein wesentlicher Unterschied zu den bekannten dezentralen Kooperationsansätzen ist die Bestimmung der tatsächlichen Transportkosten im Rahmen der jeweiligen lokalen Tourenplanung der TDL. Somit lassen sich, im Gegensatz zur Schätzung der Transportkosten, genaue Aussagen über die Rationalisierungspotenziale treffen. Das Framework liefert eine klare Schnittstelle zu den einzusetzenden Tourenplanungssystemen. Von welcher Gestalt diese in der Realität sind ist für die Anwendbarkeit des Koordinationsansatzes unerheblich.

Die Koordination der an der Kooperation beteiligten TDL findet, wie bei der Mehrzahl der vorgestellten Ansätze, mit Hilfe von Auktionsmechanismen statt. Auch hier bietet das Framework eine Schnittstelle, die eine Ausgestaltung mit unterschiedlichen Auktionsmechanismen ermöglicht. Als Bewertungsgrundlage für den Austausch der Transportaufträge dient jedoch immer der entsprechende Mindestpreis, der dem Grenzgewinn des jeweiligen Transportauftrags entspricht.

Im Rahmen der Analyse im Kapitel 7 werden die Rationalisierungspotenziale von Kooperationen zwischen TDL für verschiedene Geschäftsfelder und Auktionsmechanismen quantitativ untersucht. Dazu wird ein Vergleich der erzielten Gesamt-

deckungsbeiträge ohne Kooperation, sowie mit Kooperation unter dezentraler und unter zentraler Koordination vorgenommen. Zusammenfassend lässt sich der neue dezentrale Kooperationsansatz durch drei Unterschiede von der aktuellen Literatur abgrenzen.

1. Unabhängigkeit von speziellen Geschäftsfeldern.
2. Verwendung der tatsächlichen Transportkosten.
3. Unabhängigkeit von speziellen Auktionsmechanismen.

Tabelle 3.1: Klassifikation ausgewählter dezentraler Kooperationsansätze Teil 1

Ansätze	Sandholm (1993)	Falk (1995)	Fischer et al. (1996)	Gomber et al. (1999)
1. Organisationsform	selbständige Dispatching-Center mit mehreren Filialen	TDL mit Niederlassungen	selbständige TDL (geographisch verteilt)	TDL mit Profitcenter-Struktur
2. Geschäftsfeld	heterogenous fleet MD-VRP	DARP	VRPTW	k.A.
3. Zielstellung	Kostenminimierung	Kostenminimierung	Kostenminimierung	Deckungsbeitragsmaximierung
4. Modellierungsansatz	MAS	MAS	MAS	MAS
5. Fremdvergabe				
(a) Auswahlkriterium	liegt Auftrag im Überlappungsgebiet der Filialen	geringster Deckungsbeitrag	höchste Kosten	geringster Deckungsbeitrag
(b) Anzahl Aufträge	mehrere	einzelnen	einzelnen	einzelnen, mehrere
(c) lokale Planung	heuristisch	heuristisch	heuristisch	k.A.
6. Koordinationsform	Ausschreibung	Ausschreibung	Ausschreibung, bilaterale Verhandlungen	Vickrey Auktion, kombinatorische Auktion
(a) Teilnehmerkreis	NL im Überlappungsgebiet	NL im Umkreis des Auftrags	alle	alle
(b) Auftragsbündel	x	-	-	x
(c) wiederholt	x	x	x	-
(d) Zuordnungskriterium	geringste Kosten	Erfolgswert (DB)	geringste Kosten	höchster Deckungsbeitrag
7. Informationsaustausch	Aufträge im Überlappungsgebiet	Aufträge für Fremdvergabe an NL in der Nähe	Auftrag für Fremdvergabe	Aufträge für Fremdvergabe
8. Gewinnverteilung	Mittelwert zwischen Höchstpreis der Übernahme und Mindestpreis der Abgabe	k.A.	k.A.	Vickrey, GVA, PPC, MEVA

Tabelle 3.2: Klassifikation ausgewählter dezentraler Kooperationsansätze Teil 2

Ansätze	Song und Regan (2004)	Schönberger (2005)	Krajewska und Kopfer (2006)	Gujo et al. (2007)
1. Organisationsform	selbständige TDL (geographisch verteilt)	selbständige TDL, Subunternehmen	TDL mit Profitcenter-Struktur, Subunternehmen	TDL mit Profitcenter-Struktur
2. Geschäftsfeld	PDP, Ganzladungsverkehr	PDPTW	PDPTW	TD-VRPTW, Ganzladungsverkehr
3. Zielstellung	Kostenminimierung	Kostenminimierung Subunternehmen, Deckungsbeitragsmaximierung TDL	Kostenminimierung	Kostenminimierung
4. Modellierungsansatz	theoret. Überlegungen	Recomposition Problem	3-Phasen-Modell	ComEx System-Architektur
5. Fremdvergabe				
(a) Auswahlkriterium	höchste Kosten	gesamter Auftragsbestand	k.A.	geograph. Nähe zu PC
(b) Anzahl Aufträge	einzel	alle	einzel, mehrere	einzel, mehrere
(c) lokale Planung	Annahme einer opt. Lösung ohne Beweis	heuristisch	heuristisch	heuristisch
6. Koordinationsform	Vickrey Auktion, kombinatorische Auktion	Mediator (kombinatorische Auktion)	kombinatorische Auktion	kombinatorische Auktion
(a) Teilnehmerkreis	alle	alle	alle	alle
(b) Auftragsbündel	-	x	x	x
(c) wiederholt	x	-	-	x
(d) Zuordnungskriterium	geringste Kosten	freistehendes Gebot, Mediator	geringste Kosten	Kostensparnis
7. Informationsaustausch	Aufträge für Fremdvergabe	alle Aufträge	Aufträge für Fremdvergabe	Aufträge für Fremdvergabe
8. Gewinnverteilung	Vickrey Auktion	Gleichverteilung der Subunternehmerkosten	Collaborative Advantage Index	Beteiligung an Kostensparnis

Kapitel 4

Grundlagen der Tourenplanung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Kooperationen zwischen TDL, in denen Transportaufträge ausgetauscht werden. Grundlage für den Austausch der Transportaufträge bildet die Ermittlung der individuellen Transportkosten im Rahmen der lokalen Tourenplanung jedes TDL.

Gegenstand der Tourenplanung ist es, innerhalb einer Planungsperiode, eine Menge von zu erfüllenden Transportaufträgen, unter Beachtung einer Zielstellung, zu den Fahrzeugen eines Fuhrparks zuzuordnen und eine Bedienreihenfolge für jedes Fahrzeug zu finden. Mögliche Zielstellungen sind dabei die Minimierung der Fahrzeit, der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke oder der Anzahl benötigter Fahrzeuge. Für ein Tourenplanungsproblem sind die Touren so zu planen, dass jeder Kunde von genau einem Fahrzeug bedient wird, jede Tour im Fahrzeugdepot beginnt und endet und die Kapazität des Fahrzeugs sowie die vorgegebenen Zeitfenster des Kunden eingehalten werden.

Für die Tourenplanung gibt es eine Vielzahl von Anwendungsgebieten. Dazu zählen die Einsammlung und/oder Auslieferung von Gütern, der innerbetriebliche Transport (z. B. innerhalb eines Umschlagszentrums), Schüler- und Krankentransporte oder die Auslieferung von Briefen durch Briefträger (Schmitting, 1999).

Dantzig und Ramser (1959) waren die ersten, die sich mit einem Tourenplanungsproblem auseinander gesetzt haben. Sie betrachteten die Distribution von Treibstoff und entwickelten eine erste mathematische Formulierung sowie einen algorithmischen Lösungsansatz. Seither wurden eine Vielzahl von Modellen und Algorithmen zur Lösung verschiedenster Tourenplanungsprobleme vorgestellt. Überblicksarbeiten haben u. a. Assad und Golden (1988), Dethloff (1994), Fisher (1995) und Toth und Vigo (2002) verfasst.

Für jeden an der Kooperation beteiligten TDL hängt das zu lösende Tourenplanungsproblem von seinem Geschäftsmodell ab. Aus diesem Grund wird im ersten Teil dieses Kapitels eine Klassifikation verschiedener Tourenplanungsprobleme an-

hand von Kriterien erstellt, die das Geschäftsmodell eines TDL näher beschreiben. An diese Klassifikation schließt sich die Beschreibung und Modellierung von vier, aus speziellen Geschäftsmodellen abgeleiteten, Problemstellungen in Kapitel 4.2 an. In Kapitel 4.3 werden abschließend bekannte Lösungsverfahren und schwerpunktmäßig die zur Lösung eingesetzten exakten Verfahren beschrieben.

4.1 Klassifikation von Tourenplanungsproblemen

Tourenplanungsprobleme unterscheiden sich je nach Geschäftsmodell der TDL. Sie lassen sich dementsprechend nach zahlreichen Kriterien unterteilen. Die grundlegende Einteilung der Tourenplanungsprobleme erfolgt in knoten- und kantenorientierten Probleme. Bei einem knotenorientierten Tourenplanungsproblem stellen die Kunden diskrete Punkte in der Ebene dar, die in einer bestimmten Reihenfolge besucht werden. Das Geschäftsmodell entspricht hier zum Beispiel einem Getränkehändler, der verschiedene Handelsfilialen mit Getränken versorgt. Bei einem kantenorientierten Tourenplanungsproblem hingegen sind die Kunden auf die zu versorgenden Straßen verteilt. Das Geschäftsmodell entspricht hier zum Beispiel einem Müllentsorgungsunternehmen, welches entlang bestimmter Straßen den Hausmüll entsorgt. Die im Folgenden betrachteten Tourenplanungsprobleme gehören alle den knotenorientierten Problemen an.

Weitere Kriterien zur Einteilung von Tourenplanungsproblemen finden sich in den Übersichten von Bodin und Golden (1981), Dethloff (1994, S. 5ff.), Domschke (1997, S. 207ff.) und Fleischmann und Gietz (2008, S. 145). Ohne Anspruch auf Vollständigkeit stellen die folgenden Kriterien die gängigsten Unterscheidungsmerkmale dar.

- **Kundencharakteristik:** Zeitliche Vorgaben für die Kundenbedienung resultieren aus Öffnungszeiten, organisatorischen Arbeitsabläufen bei den Kunden, Halte- und Durchfahrtberechtigungen sowie vorgegebenen Fahrplänen. Sie können sehr weit definiert, auf einen festen Zeitpunkt reduziert oder offen sein. Bei einem offenen Zeitfenster ist nur der früheste oder späteste Beginn der Bedienung gegeben. Weiterhin relevant ist der Servicetyp, d. h. ob nur die Abholung von Gütern bei den Kunden, eine Belieferung des Kunden oder sogar eine simultane Abholung und Lieferung erfolgen soll. Letzteres tritt vor allem bei Kurier- und Paketdienstleistern auf. Dabei sind Reihenfolgebedingungen (Pickup und Delivery) zu beachten, bei denen für einen Transportauftrag der Ladeort vor dem zugehörigen Entladeort besucht werden muss. Umfasst der Transportauftrag nur eine Ladeinheit (z. B. Transport von Personen), dann

wird das als Dial-A-Ride bezeichnet. Eine weitere Charakteristik der Kundenaufträge ist das Volumen und ob sie teilbar sind oder nicht.

- **Datengrundlage:** In deterministischen Tourenplanungsproblemen sind alle Eingangsgrößen bekannt. Bei einem stochastischen Tourenplanungsproblem stehen demgegenüber nicht alle Informationen zum Planungszeitpunkt zur Verfügung, sie sind also mit Unsicherheit behaftet. Es können lediglich Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der nicht bekannten Daten getroffen werden. Bei einer statischen Tourenplanung sind die Eingangsgrößen nicht nur vor dem Planungszeitpunkt bekannt, sie ändern sich auch nach der Tourenplanung nicht. Die Daten sind somit sicher und die Tourenplanung muss nur einmal durchgeführt werden. Bei dynamischen Tourenplanungsproblemen verändern sich die Informationen jedoch im Zeitverlauf. Die Ergebnisse der Tourenplanung müssen hier unter Einbeziehung von aktuellen und veränderten Informationen ständig modifiziert werden.
- **Fuhrpark:** Ein Fuhrpark ist gekennzeichnet durch die Anzahl an Fahrzeugen, deren Kapazität oder Zeitbeschränkungen, ob der Fuhrpark homogen oder heterogen ist und die Anzahl an Depots, von denen aus die Fahrzeuge agieren. Überschreitet das Volumen der Transportaufträge die Kapazität der eingesetzten Fahrzeuge, so ist eine Tourenplanung mit Teillieferungen (Split Delivery) notwendig. Hierbei werden Kunden mehrfach in einer Planungsperiode besucht, um ihren Bedarf zu befriedigen.
- **Zielsetzung:** Die Zielsetzungen der Tourenplanung unterscheiden sich je nach Planungssituation und betriebswirtschaftlichen Gegebenheiten. So ist die Minimierung der zurückgelegten Entfernung bzw. der Fahrtkosten, die Minimierung der Fahrzeiten oder die Minimierung der Anzahl der Fahrzeuge bzw. Touren möglich. Ein weiteres Ziel ist die Servicemaximierung für den Kunden.
- **Planungshorizont:** Bei statischen Tourenplanungsproblemen handelt es sich immer um eine einperiodige Planung. In periodischen Tourenplanungsproblemen werden demgegenüber mehrere Perioden (z. B. Tage) simultan betrachtet. Für die Kunden gibt es einen Besuchsrythmus, d. h. die Kunden werden wöchentlich oder täglich von den Lieferanten oder Entsorgern angefahren. Als Beispiele sind regelmäßige Wartungsarbeiten oder die Entsorgung von Sperrmüll zu nennen.

Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der in der Literatur behandelten knotenorientierten Tourenplanungsprobleme. Als Einteilungskriterien werden Kapazitäten, Anzahl der Fahrzeuge, Anzahl der Depots und Reihenfolgebedingungen herangezogen.

Es wird aber davon ausgegangen, dass alle vorgestellten Tourenplanungsprobleme deterministisch und einperiodig sind. Auf die Betrachtung von Zeitfenstern wurde in der Abbildung verzichtet, da die vorgestellten Tourenplanungsprobleme alle um diese Art von Restriktionen erweitert werden können.

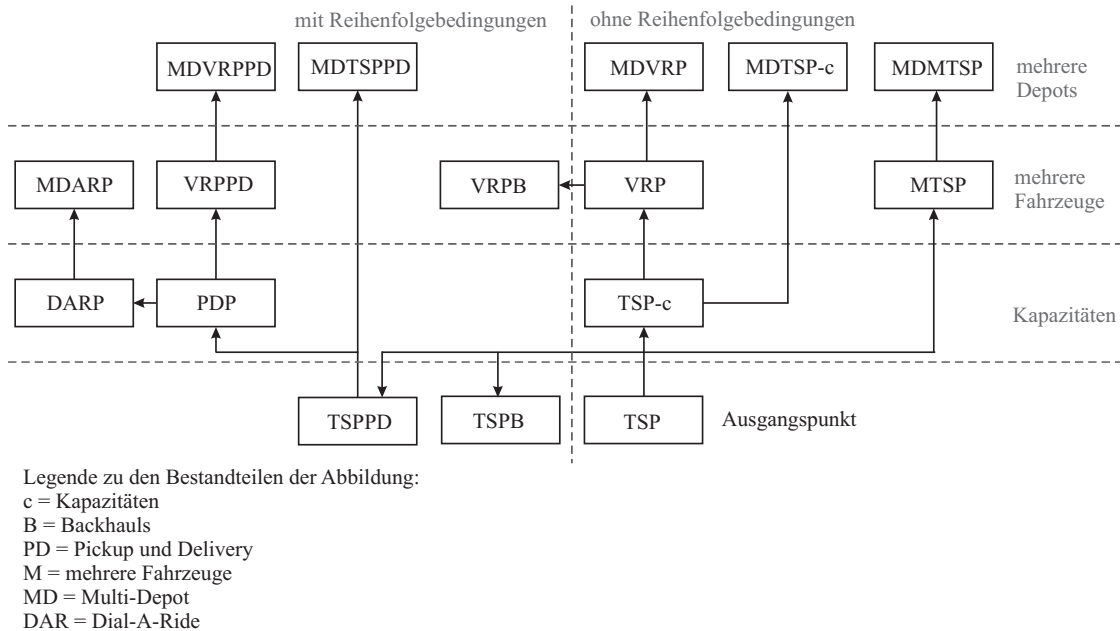


Abbildung 4.1: Übersicht zu knotenorientierten Tourenplanungsproblemen

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist das Traveling Salesman Problem (TSP), als Problem des Handlungsreisenden bekannt. Ziel des TSP ist es, eine bestimmte Anzahl von Orten innerhalb einer Rundreise einmalig zu besuchen und dabei die insgesamt zurückgelegte Wegstrecke zu minimieren. Anschließend wird zum Ausgangsort zurückgekehrt (Feige und Klaus, 2008, S. 345). Es geht also nur darum, eine Reihenfolgeentscheidung zu treffen. Bei Erweiterung dieses Grundproblems, mit den vier Kriterien, ergeben sich alle anderen in der Abbildung dargestellten Tourenplanungsprobleme.

Das TSP ist in der Literatur ausgiebig auf seine Komplexität hin untersucht worden. Dabei hat sich herausgestellt, dass es sich um ein \mathcal{NP} -schweres Problem handelt (Johnson und Papadimitriou, 1985). Bei der Klasse der \mathcal{NP} -schweren Probleme wird vermutet, dass für kein Problem dieser Klasse ein exaktes Lösungsverfahren existiert, dessen Zeitbedarf nicht exponentiell zur Problemgröße wächst (Garey und Johnson, 1979, S. 7). Alle in der Abbildung 4.1 dargestellten Tourenplanungsprobleme stellen Verallgemeinerungen des TSP dar und gehören deshalb ebenfalls zur Klasse der \mathcal{NP} -schweren Probleme.

Hervorzuheben ist das in der Literatur als Standardproblem der Tourenplanung bezeichnete Vehicle Routing Problem (VRP). Unter Beachtung der Kapazitätsrestriktionen werden Kunden, ausgehend von einem Depot, von mehreren Fahrzeugen beliefert (Feige und Klaus, 2008, S. 393). Bei der Planung, wird jedem Fahrzeug eine bestimmte Anzahl von Kunden zugeordnet und es erfolgt die Festlegung der Reihenfolge. Im Gegensatz zum TSP erfolgt also nicht nur die Reihenfolgeplanung, sondern auch die Zuordnung der Kunden.

4.2 Ausgewählte Tourenplanungsprobleme

TDL sind in der Praxis mit unterschiedlichen Planungsproblemen konfrontiert. Dazu gehören der Sammel- und Verteilverkehr, wie in Teilmarkt 6. *nationaler allgemeiner Stückgutverkehr* anzutreffen oder auch der Teilladungsverkehr, wie er bei Kurier- und Expressdiensten in Teilmarkt 12. *KEP* vorherrscht. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Geschäftsmodelle vorgestellt, wie sie im Rahmen einer Kooperation zwischen TDL auftauchen können. Aus jedem Geschäftsmodell lassen sich jeweils für die dezentrale und die zentrale Koordination der an der Kooperation beteiligten TDL Planungsaufgaben ableiten. Abschließend werden die zugehörigen Tourenplanungsprobleme mathematisch formuliert.

4.2.1 Sammelverkehr

4.2.1.1 Geschäftsmodell und Planungsaufgabe

Werden Güter, wie zum Beispiel Leergut, von einer bestimmten Anzahl von Kunden abgeholt und zu einem zentralen Depot befördert, so führt ein TDL einen Sammelverkehr durch. Ein Transportauftrag ist durch die Koordinaten des Kundenorts und ein Volumen gegeben. Verfügt der TDL nur über ein Fahrzeug mit beschränkter Kapazität, so besteht das Problem für den TDL darin, ausgehend von seinem Depot, eine Besuchsreihenfolge der Kunden zu ermitteln und danach zum Depot zurückzukehren. Dabei dürfen die Fahrzeugkapazitäten nicht überschritten werden. Das Ziel des TDL ist es, seine Transportkosten bzw. die zurückgelegte Entfernung zu minimieren.

Kooperieren mehrere TDL die einen Sammelgutverkehr durchführen und erfolgt die Koordination der Beteiligten dezentral, so löst jeder TDL dieses Planungsproblem eigenständig und gibt dann seine Bewertung für die Transportaufträge bekannt. Bei einer zentralen Koordination werden die TDL insgesamt wie ein Unternehmen behandelt und es erfolgt die Lösung eines übergeordneten Planungsproblems. Dieses besteht darin, einerseits die zu besuchenden Kunden den TDL bzw. deren Fahrzeu-

gen zuzuordnen und andererseits die Besuchsreihenfolge festzulegen. Das Ziel ist es, die Transportkosten bzw. die zurückgelegten Entfernungen zu minimieren. Die Fahrzeugkapazitäten dürfen wiederum nicht überschritten werden.

Das bei der dezentralen Koordination von jedem TDL zu lösende Planungsproblem wird als kapazitiertes Traveling Salesman Problem (TSP-c) formuliert. Das bei der zentralen Koordination für alle TDL zu lösende Planungsproblem wird als Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten (MDTSP-c) formuliert.

4.2.1.2 Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten

Die räumliche Struktur eines Tourenplanungsproblems wird durch einen ungerichteten zusammenhängenden Graphen $G = (V, E)$ repräsentiert. Die Knotenmenge $V = V_d \cup V_r$ des TSP-c besteht aus n Knoten, wobei $V_d = \{0\}$ dem Depot entspricht und $V_r = \{1, \dots, n\}$ die Menge der Serviceknoten darstellt. Jede Kante $(i, j) \in E$ ist mit ihrer positiven Entfernung e_{ij} vom Knoten i zum Knoten j bewertet. Die Binärvariable $x_{ij} \in \{0, 1\}$ gibt an, ob die Kante zwischen Knoten i und j besucht wird oder nicht. Die aufzunehmende Ladung am Knoten i wird mit d_i bezeichnet. Die aktuelle Ladung des Fahrzeugs vor Knoten i entspricht Y_i und die Fahrzeugkapazität ist mit D gegeben. Die Traveling Salesman Tour wird unter der Zielstellung der Minimierung der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke TL optimiert.

$$\min TL = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ij} \cdot e_{ij} \quad (4.1)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad i \in V \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad j \in V \quad (4.3)$$

$$Y_i \leq Y_j + d_i - D(1 - x_{ij}) \quad i \in V, j \in V_r \quad (4.4)$$

$$d_i \leq Y_i \leq D \quad i \in V_r \quad (4.5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.6)$$

Die Restriktionen (4.2) und (4.3) stellen sicher, dass jeder Knoten i genau einmal verlassen und jeder Knoten j genau einmal angefahren wird. Die Restriktionen (4.4) und (4.5) sorgen für die Einhaltung der Fahrzeugkapazität. Die Restriktion (4.4) gibt, wie die von Miller et al. (1960) formulierten Kurzzyklenbedingungen, eine Reihenfolge für den Besuch der Kunden in einer Tour vor. Damit ist schon gewährleistet, dass keine Kurzzyklen gebildet werden, die das Depot nicht enthalten.

Sofern die Fahrzeugkapazität immer ausreicht, um alle akquirierten Transportaufträge auszuführen, degeneriert das TSP-c zum TSP. Da für die Erweiterung des

Modells im Falle einer zentralen Koordination der TDL jedoch Kapazitäten eine wesentliche Rolle spielen, wurden sie in die Formulierung des TSP aufgenommen.

4.2.1.3 Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Kapazitäten

Die folgende Beschreibung des MDTSP-c basiert auf der Formulierung des TSP-c. Da es sich beim MDTSP-c um ein Multi-Depot Tourenplanungsproblem handelt, ist zusätzlich eine Anzahl von m Depots gegeben, die der Anzahl an Fahrzeugen entspricht. Um die Touren für das MDTSP-c zu planen, erfolgt eine Zuordnung von Kundenorten zu Fahrzeugen und die Festlegung der Bedienreihenfolgen. Im mathematischen Modell für das TSP-c ist somit ein zusätzlicher Index für die Fahrzeuge und eine Zuordnungsvariable, für die Zuordnung von Aufträgen zu Fahrzeugen, aufzunehmen.

Das Giant-Route-Modell kommt ohne diese beiden Erweiterungen aus. Dieses Modell wurde von Christofides und Eilon (1969) angewendet, um über eine Graphen-Transformation aus einem MTSP mit n Kundenorten ein äquivalentes TSP mit $n+m$ Knoten zu generieren. Dazu werden $m - 1$ Kopien des Depotknotens erstellt. Diese weisen die gleiche Position und Entfernung zu allen anderen Knoten auf. Die Kopien des Depotknotens dienen jeweils gleichzeitig als Endknoten einer Tour und Anfangsknoten der nächsten Tour. Statt mehrerer einzelner Touren ergibt sich eine große Tour (Giant-Route), die ebenfalls alle Kundenorte enthält und die Betrachtung der Fahrzeuge implizit berücksichtigt. Die mathematische Modellierung des MDTSP-c entspricht demnach der des TSP-c. In der Abbildung 4.2 ist die Lösung des MTSP mit zwei einzelnen Touren (links) und einer Giant-Route (rechts) dargestellt.

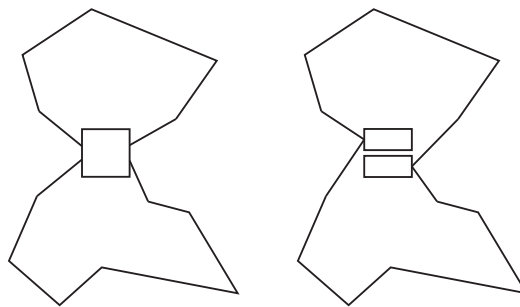


Abbildung 4.2: Lösung des MTSP mit zwei Touren und einer Giant-Route

Durch die Anwendung des Giant-Route-Modells entstehen keine zusätzlichen Kosten (zusätzlich zurückgelegte Wegstrecke), da das Depot und seine Kopien denselben Standort aufweisen. Für die Übertragung des Giant-Route-Modells auf den echten Mehrdepotfall, bei dem tatsächlich mehrere Depots existieren, müssen Mo-

difikationen an der Entfernungsmatrix vorgenommen werden. Die modifizierte Entfernungsmatrix für das MDTSP-c ist in der Abbildung 4.3 dargestellt. Die Start-

		j							
		Serviceort			Depot				
		1	...	n	(n + 1)	(n + 2)	...	(n + m + 1)	
-	Serviceort	1	∞	e_{ij}	e_{ij}	∞	$e_{i,j-1}$		
		\vdots	∞	∞					
n		e_{ij}	e_{ij}	∞					
-	Depot	(n + 1)	e_{ij}			∞	0	∞	∞
		(n + 2)				∞	∞	0	∞
		\vdots				∞	∞	0	∞
		(n + m + 1)				0	∞	∞	∞

Abbildung 4.3: Modifizierte Entfernungsmatrix für das MDTSP-c

und Enddepots für alle Fahrzeuge werden durch $m + 1$ Knoten repräsentiert und ergeben die Knotenmenge $V_d = \{n + 1, \dots, n + m + 1\}$. Der Stellplatz $n + 1$ stellt das Startdepot eines Fahrzeugs dar und weist die gleiche Position wie das Depot $n + m + 1$ auf. Für ein Fahrzeug v mit $v = \{1, \dots, m\}$ ist $n + v$ das Startdepot und $n + v + 1$ das Enddepot. Das Startdepot eines Fahrzeuges ist dabei Beginn seiner Tour, das Enddepot ist das Ende seiner Tour und gleichzeitig das Startdepot des nächsten Fahrzeuges. Die e_{ij} stellen, wie im TSP, die Entfernung für jede direkte Fahrt zwischen zwei Knoten $i \in V$ und $j \in V$ dar. Die Touren werden ebenfalls unter der Zielstellung der Minimierung der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke TL optimiert.

Die Elemente e_{ij} für $i, j \in V_r$ mit $i \neq j$ sowie für $i \in V_d / \{n + m + 1\}$ und $j \in V_r$ werden in der modifizierten Entfernungsmatrix mit den tatsächlichen Entfernungen zwischen den Knoten bewertet.

Die Elemente e_{ij} in der modifizierten Entfernungsmatrix werden sehr großen Werten bewertet für:

- die Kanten von einem Serviceknoten zu sich selbst $i, j \in V_r$ mit $i = j$, um diese auszuschließen
- $i \in V_r$ und $j = n + 1$, um eine Rückfahrt von einem Serviceknoten i zum ersten Startdepot $n + 1$ zu verhindern, da das Ende einer Tour ein vom Startdepot abweichendes Depot sein muss

- $i = n + m + 1$ und $j \in V_r$, um die direkte Fahrt vom letzten Enddepot zu den Serviceorten zu verhindern, da das letzte Depot nur das Ende der letzten Fahrt anzeigen soll
- $i, j \in V_d$, die nicht $i \in V_d/\{n + m + 1\}$ und $j = 1 + i$ bzw. $i = n + m + 1$ und $j = n + 1$ entsprechen, um zu verhindern, dass von einem Startdepot direkt zu einem Depot gefahren wird, welches nicht das Enddepot des Fahrzeuges darstellt

Aufgrund der Modellierung entspricht die Position des Startdepots eines Fahrzeuges nicht der Position seines Enddepots. Damit die für jedes Fahrzeug zurückgelegte Entfernung trotzdem richtig ermittelt wird, muss die Entfernung zwischen dem letzten Serviceort und dem Enddepot durch die Entfernung zwischen dem letzten Serviceort und dem Startdepot des Fahrzeuges e_{ij-1} für $i \in V_r$ und $j \in V_d/\{n + 1\}$ ersetzt werden.

Die e_{ij} für $i \in V_d/\{n + m + 1\}$ und $j = 1 + i$ bzw. $i = n + m + 1$ und $j = n + 1$ werden mit Null bewertet. So wird der direkte Fahrzeugwechsel, ohne den Besuch von Serviceorten, nur an den Enddepots erlaubt und ansonsten verhindert.

4.2.2 Kurierdienst

4.2.2.1 Geschäftsmodell und Planungsaufgabe

Werden Briefe oder kleine Pakete (Teilladung) in einer urbanen Region von einem Absender zu einem Empfänger transportiert, so führt ein TDL einen Kurierdienst durch (Shen et al. (1995); Gendreau und Potvin (1998, S. 117ff.); Dumitrescu et al. (2007)). Ein Transportauftrag besteht darin, eine Sendung an einem Pickuport einzusammeln und zu einem Deliveryort zu befördern. Aufgrund des geringen Volumens der Sendungen, die nur einen Bruchteil der Fahrzeugkapazität einnehmen, entfällt die Betrachtung von Kapazitäten (Mitrovic-Minic et al., 2004). Steht dem TDL dann nur ein Fahrzeug mit unbegrenzter Kapazität zur Verfügung, so besteht das Problem für den TDL darin, ausgehend von seinem Depot, eine Besuchsreihenfolge der Pickup- und Deliveryorte zu ermitteln und danach zum Depot zurückzukehren. Dabei dürfen die Deliveryorte nicht vor den Pickuorten besucht werden. Das Ziel des TDL ist es, seine Transportkosten bzw. zurückgelegte Entfernung zu minimieren.

Kooperieren mehrere TDL, die einen Kurierdienst durchführen, und erfolgt die Koordination der Beteiligten dezentral, so löst jeder TDL dieses Planungsproblem eigenständig und gibt dann seine Bewertung für die Transportaufträge bekannt. Bei einer zentralen Koordination werden die TDL insgesamt wie ein Unternehmen behandelt und es erfolgt die Lösung eines übergeordneten Planungsproblems. Dieses

besteht darin, die zu besuchenden Pickup- und Deliveryorte zu TDL bzw. deren Fahrzeugen zuzuordnen und die Besuchsreihenfolge festzulegen. Dabei ist zu beachten, dass die Pickup- und Deliveryorte vom gleichen Fahrzeug besucht werden und die Deliveryorte nicht vor den Pickuporten besucht werden. Das Ziel ist es wiederum, die Transportkosten bzw. die zurückgelegte Entfernung zu minimieren.

Das bei der dezentralen Koordination von jedem TDL zu lösende Planungsproblem wird als Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery (TSPPD) formuliert. Das bei der zentralen Koordination für alle TDL zu lösende Planungsproblem wird als Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery (MDTSPPD) formuliert.

4.2.2.2 Traveling Salesman Problem mit Pickup und Delivery

Ausgangspunkt für die Modellierung des TSPPD ist die Beschreibung des Multiple-Vehicle Pickup und Delivery Problem (MVPDP) von Lu und Dessouky (2004). Beim MVPDP existieren mehrere Depots, die als Start- und Enddepots für m kapazitierte Fahrzeuge dienen. Ziel des MVPDP besteht darin, eine Zuordnung von Serviceknoten zu Fahrzeugen vorzunehmen, sodass die kürzesten Touren der Fahrzeuge durch verschiedene Serviceknoten bestimmt werden. Die Touren beginnen und enden im zugehörigen Depot. Jeder Serviceknoten muss genau einmal besucht werden und die Vorrangbeziehungen zwischen den Serviceknoten sind einzuhalten.

Für die Modellierung des TSPPD wird das MVPDP wie folgt vereinfacht. Die Knotenmenge ergibt sich aus $V = V_d \cup V_r^+ \cup V_r^-$. Das Depot wird in ein Startdepot 0 und ein Enddepot $2n + 1$ aufgespalten. Die Menge der Depots ergibt sich somit als $V_d = \{0, 2n + 1\}$. Weiterhin stellt $V_r^+ = \{1, \dots, n\}$ die Menge an Pickuporten und $V_r^- = \{n + 1, \dots, 2n\}$ die Menge an Deliveryorten dar. Auf die Betrachtung von Fahrzeugkapazitäten wird verzichtet. Die Touren werden unter der Zielstellung der Minimierung der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke TL optimiert. Die Binärvariable $x_{ij} = \{0, 1\}$ gibt an, ob die Kante zwischen Knoten i und j besucht wird oder nicht. Die Präzedenzvariable $b_{ij} = \{0, 1\}$ gibt an, ob der Knoten i vor dem Knoten j in der Tour angefahren wird. Durch diese Variable wird die Paarung von Pickup- und Deliveryorten ausgedrückt bzw. implizit deren Reihenfolgebeziehung gefordert.

$$\min TL = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} e_{ij} \cdot x_{ij} \quad (4.7)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad i \in V \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad j \in V \quad (4.9)$$

$$b_{ki} \leq b_{kj} + (1 - x_{ij}) \quad (i, j) \in V \times V \setminus (2n + 1, 0), k \in V \setminus \{i\} \quad (4.10)$$

$$b_{kj} \leq b_{ki} + (1 - x_{ij}) \quad (i, j) \in V \times V \setminus (2n + 1, 0), k \in V \setminus \{i\} \quad (4.11)$$

$$x_{ij} \leq b_{ij} \quad i, j \in V \quad (4.12)$$

$$b_{ii} = 0 \quad i \in V \quad (4.13)$$

$$b_{n+i,i} = 0 \quad i \in V_r^+ \quad (4.14)$$

$$b_{i,n+i} = 1 \quad i \in V_r^+ \quad (4.15)$$

$$b_{i,0} = 0 \quad i \in V \quad (4.16)$$

$$b_{i,2n+1} = 1 \quad i \in V \setminus \{2n + 1\} \quad (4.17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.18)$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.19)$$

Die Restriktionen (4.8) und (4.9) stellen sicher, dass jeder Knoten i genau einmal verlassen und jeder Knoten j genau einmal angefahren wird.

Die Restriktionen (4.10) und (4.11) kopieren alle Ausprägungen von b_{ki} nach b_{kj} , für die $k \in V$ und $k \neq i$ gilt. Sie bilden die Reihenfolge der Orte auf Basis des Transitivitätsprinzips ab. Das heißt, wenn $x_{ij} = 1$ ist, also i vor j besucht wird, dann wird $b_{ki} = b_{kj}$ gesetzt. Ist i also direkter Vorgänger von j , dann sind, wegen der Transitivität der Präzedenzrestriktion, die Vorgänger k von i auch Vorgänger von j .

Die Restriktion (4.12) setzt $b_{ij} = 1$, wenn i vor j besucht wird ($x_{ij} = 1$). Ist i nicht direkter Vorgänger von j , dann folgt $x_{ij} = 0$ und die Restriktionen (4.10) bis (4.12) sind redundant. Gilt $x_{ij} = 0$, dann enthalten diese beiden Ungleichungen für alle Werte von b_{ki} und b_{kj} wahre Aussagen.

Die Restriktion (4.13) setzt $b_{ii} = 0$, da i nie direkter Vorgänger von i sein kann. Da keine Kurzzyklen erlaubt sind, also immer $x_{ii} = 0$ gilt, wird dies in der Präzedenzmatrix mit Null bewertet.

Die Präzedenzrestriktionen (4.14) und (4.15) stellen sicher, dass die Pickuporte vor den zugehörigen Deliveryorten besucht werden. Der Deliveryort $n+i$ wird nie vor dem Pickuport i besucht, $b_{n+i,i} = 0$. Der Pickuport i wird immer vor dem Deliveryort $n+i$ besucht und deshalb ist $b_{i,n+i} = 1$.

Restriktion (4.16) legt den Knoten 0 als Startknoten fest, er soll keine Vorgänger

besitzen. Restriktion (4.17) legt den Knoten $2n + 1$ als letzten in der Tour fest, der alle Knoten i als Vorgänger hat.

Hervorzuheben ist, dass die Kurzzyklusbedingungen implizit in der mathematischen Formulierung des TSPPD enthalten sind. Gegeben sei eine Subtour $(i, i + 1, \dots, i + z, j, i)$, die nicht alle Knoten des Netzwerks beinhaltet ($z < 2n + 1$). Die Knoten i und j sind adjazent. Da $x_{ji} = 1$, setzt die Restriktion (4.12) $b_{ji} = 1$. Da für die Subtour $x_{i,i+1} = x_{i+1,i+2} = \dots = x_{i+z,j} = 1$ gilt, wobei $j \neq i, j \neq i + 1, \dots, j \neq i + z$, stellen die Restriktionen (4.10) und (4.11) sicher, dass die Knoten $(i, i + 1, \dots, i + z, j)$ Nachfolger von Knoten j sind, d. h. $b_{ji} = b_{j,i+1} = b_{j,i+2} = \dots = b_{j,i+z} = b_{jj} = 1$. Da der Knoten j nicht dem Depotknoten entspricht, kann er nicht Vorgänger von sich selbst sein und $b_{jj} = 1$ verletzt die Restriktion (4.13). Diese Subtour ist somit nicht zulässig.

4.2.2.3 Multi-Depot Traveling Salesman Problem mit Vorrangbeziehungen

Die Modellierung des MDTSPPD basiert auf der Formulierung des TSPPD. Diese wird nun um die Betrachtung mehrerer Fahrzeuge und Depots erweitert. Die Anzahl der Fahrzeuge m entspricht der Anzahl an Depots. Die Start- und Enddepots für alle Fahrzeuge werden durch $m + 1$ Knoten repräsentiert und ergeben die Knotenmenge $V_d = \{2n + 1, \dots, 2n + m + 1\}$. Der Stellplatz $n + 1$ stellt das Startdepot eines Fahrzeugs dar und ist mit dem Depot $2n + m + 1$ identisch. Für ein Fahrzeug v , mit $v = \{1, \dots, m\}$, ist $2n + v$ das Startdepot und $2n + v + 1$ das Enddepot. Das Startdepot eines Fahrzeuges ist Beginn seiner Tour, das Enddepot ist das Ende seiner Tour und gleichzeitig das Startdepot des nächsten Fahrzeuges. Die Touren werden ebenfalls unter der Zielstellung der Minimierung der insgesamt zurückgelegten Wegstrecke TL optimiert.

Die Lösung des MDTSPPD basiert ebenfalls auf dem Giant-Route-Modell und somit muss für das MDTSPPD ebenfalls eine modifizierte Entfernungsmatrix erstellt werden, die darüber hinaus um die Beachtung von Vorrangbeziehungen (Pickup und Delivery) zu erweitern ist. Die Entfernungsmatrix ist in der Abbildung 4.4 dargestellt.

Die Elemente e_{ij} werden in der modifizierten Entfernungsmatrix mit den tatsächlichen Entfernungen zwischen den Knoten bewertet für:

- $i, j \in V_r^+$ mit $i \neq j$
- $i \in V_r^+$ und $j \in V_r^-$
- $i \in V_r^-$ und $j \in V_r^+$ mit $i \neq n + j$

		j									
		Pickup			Delivery			Depot			
		1	...	n	(n + 1)	...	(2n)	(2n + 1)	(2n + 2)	...	(2n + m + 1)
i	Pickup	1	∞	e_{ij}	e_{ij}	e_{ij}			∞		
		\vdots	e_{ij}	∞	e_{ij}						
		n	e_{ij}	e_{ij}	∞						
	Delivery	(n+1)	∞	e_{ij}	e_{ij}	∞	e_{ij}	e_{ij}	∞	$e_{i,j-1}$	
		\vdots	e_{ij}	∞	e_{ij}	∞	e_{ij}	∞			
		(2n)	e_{ij}	e_{ij}	∞	e_{ij}	e_{ij}	∞			
	Depot	(2n + 1)	e_{ij}			∞			0	∞	∞
		(2n + 2)							∞	0	∞
		\vdots							∞	∞	0
		(2n + m + 1)							∞	0	∞

Abbildung 4.4: Entfernungsmatrix für das MDTSPPD

- $i, j \in V_r^-$ mit $i \neq j$
- $i \in V_d / \{2n + m + 1\}$ und $j \in V_r^+$

Die Elemente e_{ij} in der modifizierten Entfernungsmatrix werden mit sehr großen Werten bewertet für:

- die Kanten von einem Knoten zu sich selbst $i, j \in V$ mit $i = j$, um diese auszuschließen
- $i \in V_r^+$ und $j \in V_d$, um eine Rückfahrt zum Depot direkt nach der Abholung zu verhindern
- $i \in V_r^-$ und $j = i - n$, um zu verhindern, dass von einem Deliveryort zum zugehörigen Pickuport zurückgekehrt wird
- $i \in V_r^-$ und $j = 2n + 1$, um die Fahrt zu einem Deliveryort zu verhindern, bevor der korrespondierende Pickuport besucht wurde
- $i = 2n + m + 1$ und $j \in V_r^+$, um den Besuch von Pickuporten nach dem letzten Depot zu verhindern
- $i \in V_d$ und $j \in V_r^-$, um die Hinfahrt vom Depot direkt zu einem Deliveryort zu verhindern

- $i, j \in V_d$, die nicht $i \in V_d/\{2n+m+1\}$ und $j = 1+i$ bzw. $i = 2n+m+1$ und $j = 2n+1$ entsprechen, um zu verhindern, dass von einem Startdepot direkt zu einem Depot gefahren wird, welches nicht das Enddepot des Fahrzeuges darstellt

Die Elemente e_{ij} , für $i \in V_r^-$ und $j \in V_d/\{2n+1\}$, werden mit den Rückfahrdistanzen $e_{i,j-1}$ des Vorgängerdepots $j-1$ bewertet. Auch hier entspricht das Enddepot j eines Fahrzeuges nicht seinem Startdepot $j-1$. Deshalb muss die Entfernung zwischen dem letzten Serviceort i und dem Startdepot $j-1$ auf die, durch das Giant-Route-Modell gewählte, Kante (i, j) übertragen werden, um für das Fahrzeug eine geschlossene Tour zu generieren.

Die e_{ij} für $i \in V_d/\{2n+m+1\}$ und $j = 1+i$ bzw. $i = 2n+m+1$ und $j = 2n+1$ werden mit Null bewertet. So wird der direkte Fahrzeugwechsel, ohne den Besuch von Serviceorten, nur an den Enddepots erlaubt und ansonsten verhindert.

Für die Erweiterung des TSPPD zum MDTSPPD müssen einige Nebenbedingungen verändert und einige hinzugefügt werden. Es ist hervorzuheben, dass die Formulierung genau wie die des MDTSP-c keine zusätzlichen Variablen zur Zuordnung von Kunden zu einem Fahrzeug und keinen zusätzlichen Index in der Entscheidungsvariable x_{ij} für die Fahrzeugnummer benötigt, um die Paarung von Lade- und Deliveryort vorzunehmen, wie etwa in Domschke (1997, S. 215).

$$b_{ki} \leq b_{kj} + (1 - x_{ij}) \quad (i, j) \in V \times V \setminus (2n+m+1, 2n+1), k \in V \setminus \{i\} \quad (4.20)$$

$$b_{kj} \leq b_{ki} + (1 - x_{ij}) \quad (i, j) \in V \times V \setminus (2n+m+1, 2n+1), k \in V \setminus \{i\} \quad (4.21)$$

$$b_{i,2n+j} = b_{n+i,2n+j} \quad i \in V_r^+, 2n+j \in V_d \quad (4.22)$$

$$b_{i,2n+1} = 0 \quad i \in V \quad (4.23)$$

$$b_{2n+k,2n+j} = 1 \quad k < j, 2n+k \in V_d, 2n+j \in V_d \quad (4.24)$$

$$b_{2n+j,2n+k} = 0 \quad k < j, 2n+k \in V_d, 2n+j \in V_d \quad (4.25)$$

$$b_{i,2n+m+1} = 1 \quad i \in V \setminus \{2n+m+1\} \quad (4.26)$$

Die Restriktionen (4.20) und (4.21) kopieren alle Ausprägungen von b_{ki} nach b_{kj} , für die $k \in V$ und $k \notin i$ gilt. Sie bilden die Reihenfolge der Orte auf Basis des Transitivitätsprinzips ab.

Die Restriktion (4.22) ist eine Paarungsrestriktion. Sie garantiert, dass die Pickup- und Deliveryorte der Kunden vom selben Fahrzeug erfüllt werden. Der Pickuport i

und der zugehörige Deliveryort $n + i$ haben dazu dasselbe Zieldepot $2n + j$. Aufgrund der Transitivität der Präzedenzrestriktion liegt der Pickup- und Deliveryort auf derselben Route, wird also vom selben Fahrzeug bedient.

Restriktion (4.23) legt den Knoten $2n + 1$ als Ersten der Tour fest, er soll keine Vorgänger haben.

Die Restriktionen (4.24) und (4.25) stellen sicher, dass die Startdepots der m Fahrzeuge in der richtigen Reihenfolge besucht werden. Es ist zu beachten, dass die Knoten $\{2n+v|v=2,3,\dots,m\}$ sowohl die Zielknoten für das $(v-1)$ -te Fahrzeug als auch die Startknoten für das v -te Fahrzeug sind. Der Knoten $2n+k$ ist Vorgänger des Knotens $2n+j$, $b_{2n+k,2n+j}$ ist 1 und $b_{2n+j,2n+k}$ ist Null.

Restriktion (4.26) legt den Knoten $2n+m+1$ als Letzten in der Tour fest, er soll der Knoten sein, der alle Knoten i als Vorgänger hat.

4.3 Lösungsverfahren

Tourenplanungsprobleme gehören zur Klasse der kombinatorischen Optimierungsprobleme. Als kombinatorische Optimierung wird die mathematische Untersuchung zum Auffinden einer optimalen Anordnung, Gruppierung, Reihenfolge oder Auswahl von diskreten, in der Anzahl beschränkten Objekten bezeichnet (Lawler, 1976, S. 1). In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Verfahren zur Lösung von Tourenplanungsproblemen. Um prinzipielle Lösungsstrategien und für diese Arbeit wichtige Lösungsverfahren übersichtsartig vorzustellen, wird auf die Klassifikation von Aberle (2003, S. 541) zurückgegriffen (Abbildung 4.5). Sie können prinzipiell in exakte und heuristische Verfahren eingeteilt werden.

4.3.1 Heuristiken

Heuristische Verfahren ermöglichen in akzeptabler Zeit gültige Lösungen zu ermitteln. Allerdings kann dabei nicht garantiert werden, dass eine optimale Lösung gefunden wird. Auch Abschätzungen darüber, wie weit die beste gefundene Lösung vom Optimum entfernt ist, sind meist nicht möglich.

Heuristiken lassen sich einteilen in Konstruktions- und Verbesserungsverfahren (Domschke, 1997, S. 21). Konstruktionsverfahren generieren zulässige Lösungen durch einen iterativen Prozess. Sie können meist relativ einfach angepasst werden, um der Vielfalt an praxisrelevanten Restriktionen zu begegnen. Weiterhin können die Konstruktionsverfahren in einstufig und mehrstufig unterschieden werden. Während mehrstufige Verfahren die zwei Fragestellungen bei der Tourenplanung (Zuordnung von Aufträgen zu Fahrzeugen und Reihenfolgebildung) sequenziell bearbeiten, erfolgt bei einstufigen Verfahren ein simultanes Vorgehen. Eine der bekanntesten ein-

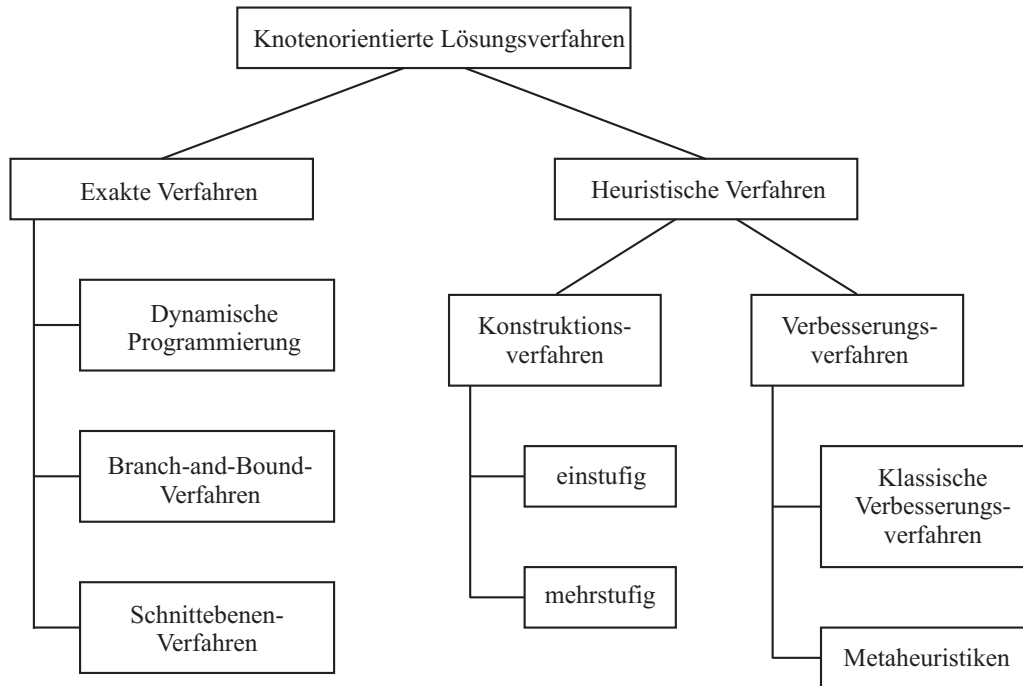


Abbildung 4.5: Knotenorientierte Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme

stufigen Konstruktionsheuristiken zur Lösung von Tourenplanungsproblemen ist die von Clarke und Wright (1964) vorgestellte Savings-Heuristik. Dieses Verfahren erzeugt zu Beginn Pendeltouren vom Depotknoten zu allen anderen Knoten. Die erzeugten Pendeltouren werden dann nach und nach miteinander verbunden, um unter Beachtung der Restriktionen, die größtmögliche Einsparung (Savings) der Wegstrecke zu realisieren (Ohrt, 2008, S. 64ff.).

Verbesserungsverfahren gehen von einer Startlösung (generiert durch Konstruktionsverfahren) aus und versuchen, diese durch bestimmte Regeln in neue zulässige Lösungen mit höherer Lösungsqualität zu transformieren, bis das Stopp-Kriterium erfüllt ist. Typische Stopp-Kriterien sind nach Grünert und Irnich (2005a, S. 187ff.) das Auffinden eines lokalen Minimums und die Durchführung einer vorgegebenen Anzahl an Iterationen. Möglichkeiten der Verbesserung ergeben sich laut Nanry und Barnes (2000) durch eine Veränderung der Reihenfolge der Kunden innerhalb einer Tour oder durch eine veränderte Zuordnung von Kunden zu Touren, bei der Kunden oder Teiltouren zwischen benachbarten Touren getauscht werden.

Klassische Verbesserungsverfahren wie das 2-opt-Verfahren (Croes, 1958) versuchen zwei Kanten $(i, i + 1)$ und $(j, j + 1)$ aus der aktuellen Tour gegen die Kanten (i, j) und $(i + 1, j + 1)$ auszutauschen, sofern hierdurch eine Verbesserung erreicht werden kann. Profitabel ist der Tausch, wenn die Tour verkürzt wird und trotzdem

zulässig bleibt. Dieses Verfahren lässt sich für eine beliebige Anzahl von Kanten erweitern. Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie in der Regel ein lokales Optimum erreichen, dieses jedoch nicht mehr verlassen können.

Übersichten zu Heuristiken finden sich in Grünert und Irnich (2005a, S. 182ff.), für das VRP in Laporte et al. (2000) und Cordeau et al. (2002), für das TSP in Grünert und Irnich (2005b, S. 335ff.) und für das PDP in Psaraftis (1983), Desrosiers et al. (1988) und Madsen et al. (1995).

4.3.2 Metaheuristiken

Im Gegensatz zu problemspezifischen Heuristiken sind Metaheuristiken allgemeine Verfahren, die unabhängig vom zugrundeliegenden Optimierungsproblem eingesetzt werden können. Viele Metaheuristiken gehören zu den naturanalogen Verfahren, weil sie physikalische, biologische oder evolutionäre Prozesse nachbilden. Der Begriff Metaheuristik wurde von Glover (1986) eingeführt und bezeichnet eine Strategie, die untergeordnete Heuristiken leitet oder modifiziert, um im Verlauf der Lösungsfindung lokale Optima zu überwinden und somit eine robuste Durchsuchung des Lösungsraumes zu gewährleisten. Diese Verfahren akzeptieren eine kurzfristige Verschlechterung des Zielwertes, um aus einem erreichten lokalen Optimum wieder herauszufinden. Der Lösungsaufwand von Metaheuristiken steigt im Vergleich zu einfachen Heuristiken erheblich. Als zurzeit bestes Verfahren zur Lösung stark beschränkter Tourenplanungsprobleme gilt die Large Neighborhood Search (LNS). Von Ropke und Pisinger (2006) wurde sie auf PDP mit Zeitfenstern angewendet. Die LNS basiert auf dem Konzept des Simulated Annealing (Kirkpatrick et al., 1983). Beim Simulated Annealing wird die Verschlechterung einer Lösung in einem iterativen Prozess mit fortschreitender Zeit nur noch mit geringerer Wahrscheinlichkeit zugelassen. Somit nimmt die Begrenzung der Nachbarschaft schrittweise zu und das Verfahren konvergiert. Über diese Metastrategie hinaus nutzt die LNS eine größere Nachbarschaft und komplexere Operatoren. Weitere Beispiele für Metaheuristiken sind Genetische Algorithmen, Tabusuche und Guided Local Search.

Übersichten zu Metaheuristiken allgemein finden sich in Reeves (1993, S. 20ff.), für das VRP in Golden et al. (2000), Laporte et al. (2000) und Cordeau et al. (2002), für das TSP in Grünert und Irnich (2005b, S. 384ff.) und für das PDP in Rego und Roucairol (1995), Nanry und Barnes (2000) und Ropke und Pisinger (2006).

4.3.3 Exakte Verfahren

Exakte Verfahren ermitteln für eine gegebene Problemstellung ein mathematisch exaktes Optimum. Eine Möglichkeit das Optimum zu finden, besteht darin, eine

vollständige Enumeration durchzuführen. Dabei wird das Optimum durch den Vergleich der Zielfunktionswerte aller gültigen Lösungen ermittelt. Implizite Enumerationsverfahren reduzieren den Lösungsaufwand, indem sie Teilmengen des Lösungsraums ausschließen, die die optimale Lösung nicht enthalten können. Zu den impliziten Enumerationsverfahren zählen Verfahren der dynamischen Programmierung, Branch-and-Bound-Verfahren und Schnittebenenverfahren (Aberle, 2003, S. 541).

Die dynamische Programmierung beginnt mit einem Ausschnitt des zu lösenden Problems und ermittelt für dieses die optimale Lösung. Anschließend wird das Problem schrittweise erweitert, wobei die jeweilige optimale Lösung aus der vorhergehenden gefunden wird. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis das Originalproblem in seiner Gesamtheit gelöst ist (Hillier und Liebermann, 2002, S. 316ff.).

Demgegenüber wird das zu lösende Gesamtproblem beim Branch-and-Bound-Verfahren nach und nach, durch Weglassen einer Variablen oder einer Restriktion (Zimmermann, 2005, S. 231), in mehrere Teilprobleme aufgespalten (Branching). Es entsteht somit ein Entscheidungsbaum, bei dem jedes Teilproblem einen Knoten darstellt. Mittels geeigneter oberer und unterer Schranken (Bounds) sollen suboptimale Teilprobleme frühzeitig erkannt und ausgesondert werden, sodass der Entscheidungsbaum beschnitten und weitere Lösungen in diesem Ast nicht weiter untersucht werden müssen. Bei Minimierungsproblemen entspricht die obere Schranke dem Zielfunktionswert für die beste zulässige Lösung, die bis dato ermittelt wurde. Eine untere Schranke des Zielfunktionswertes ergibt sich aus der Lösung des relaxierten Problems. Um die suboptimalen Lösungen zu erkennen, werden die obere und die untere Schranke miteinander verglichen. Ist die untere Schranke größer als die obere, muss das Teilproblem nicht weiter betrachtet werden, es ist also ausgelotet. Danach wird eine der verbleibenden Teilprobleme in weitere Teilprobleme aufgespalten (Branching) und das Bounding wird für die neuen Teilprobleme wieder ausgeführt. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis eine zulässige Lösung für ein Teilproblem gefunden wird, dessen Zielfunktionswert nicht größer als die untere Schranke jedes verbleibenden Teilproblems ist. Sie stellt somit die optimale Lösung des Gesamtproblems dar. Detailliertere Erläuterungen zum Branch-and-Bound-Verfahren finden sich in Domschke (1997, S. 6f.) und Hillier und Liebermann (2002, S. 388ff.).

Das Schnittebenenverfahren, entwickelt von Gomory (1958), ist ein Algorithmus zur Lösung ganzzahliger linearer Optimierungsprobleme. Die Grundidee besteht darin, statt eines ganzzahligen linearen Programms seine LP-Relaxierung (ohne Ganzzahligkeitsbedingungen) zu betrachten und diese durch Hinzufügung weiterer Ungleichungen schrittweise zu verschärfen, bis eine ganzzahlige Lösung gefunden wird. Als alleiniges Lösungsverfahren ist es meist nicht ausreichend, da es immer kleinere Teile des Suchraums abschneidet und somit ein schlechtes Konvergenzverhalten aufweist. Die Schnittebenen erlauben allerdings oftmals die Berechnung einer sehr guten

unteren Schranke für die optimale Lösung. Aus diesem Grund wird es oft mit dem Branch-and-Bound-Verfahren zum sogenannten Branch-and-Cut-Verfahren kombiniert.

Branch-and-Cut-Verfahren stellen eine Erweiterung des Branch-and-Bound-Verfahrens dar, bei denen in jedem Knoten des Entscheidungsbaums (Teilproblem) ein Schnittebenenverfahren angewendet wird (Grünert und Irnich, 2005a, S. 139). Als Ergebnis können einzelne Knoten eher als ausgelotet bezeichnet werden. Üblicherweise werden die dabei gefundenen Schnittebenen im Cut-Pool zwischengespeichert. Dann kann vor Beginn des Schnittebenenverfahrens in einem Knoten überprüft werden, ob Ungleichungen aus dem Cut-Pool verletzt sind und wenn, dann können sie der Relaxation des Problems hinzugefügt werden. Danach wird das Teilproblem reoptimiert.

Für einen weiterführenden Überblick über exakte Verfahren zur Tourenplanung wird verwiesen auf Psaraftis (1980), Papadimitriou und Steiglitz (1982, S. 433ff.), Psaraftis (1983), Desrosiers et al. (1986), Dumas et al. (1991), Laporte (1992), Domschke (1997, S. 6ff.), Savelsbergh und Sol (1998), Blasum (2000, S. 80ff.), Toth und Vigo (2002, S. 29ff.) und Ropke et al. (2007).

Das TSP-c wird mithilfe des CPLEX 10.0 MIP-Solvers exakt gelöst. Dieser basiert auf dem Branch-and-Bound-Verfahren. Das MDTSP-c wird genau wie das MDTSPPD mithilfe des CPLEX 10.0 MIP-Solvers exakt gelöst. Für die Lösung des TSPPD wird später das von Dumitrescu et al. (2007) entwickelte Branch-and-Cut-Verfahren verwendet. Dabei werden die von CPLEX zur Verfügung gestellten generischen Schnittebenen und die von ihrem Algorithmus speziell für das TSPPD erstellten Schnittebenen genutzt. Zur Bestimmung der oberen Schranke wird eine LNS verwendet. Für weitergehende Erläuterungen sei auf die Ausführungen von Dumitrescu et al. (2007) verwiesen.

Kapitel 5

Das Kooperative Tourenplanungsproblem

In diesem Kapitel wird ein neuartiges allgemeines Tourenplanungsproblem nach Berger und Bierwirth (2007) vorgestellt. Dieses kooperative Tourenplanungsproblem zielt auf die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrages eines kooperativen Netzwerks von unabhängigen TDL ab, ohne dass die individuellen Deckungsbeiträge der Beteiligten TDL sinken. Dazu ist der Austausch von Informationen zwischen den TDL notwendig. Dieser Informationstransfer kann sich im geringsten Fall auf einzelne Auftragsdaten, wie zum Beispiel Koordinaten der Kundenorte oder das Volumen beziehen, er kann sich jedoch auch auf Daten zum Kundenstamm oder auf Daten zu Frachtkosten und Frachterlöse ausweiten. Da sich die TDL jedoch grundsätzlich in Konkurrenz zueinander befinden, sind sie nur bedingt bereit wettbewerbsrelevante Informationen zur Verfügung zu stellen. So birgt die Bekanntgabe von Deckungsbeiträgen eines Transportauftrags beispielsweise das Risiko, dass die anderen TDL Rückschlüsse auf die Kostenstruktur des anbietenden TDL ziehen können. Eine Bedingung des kooperativen Tourenplanungsproblems ist es somit, den Austausch von relevanten Informationen so gering wie möglich zu halten.

In Kapitel 5.1 erfolgt zunächst eine Beschreibung des kooperativen Tourenplanungsproblems. Danach wird ein Kalkulationsschema für die Ermittlung der Erlöse, Kosten und Deckungsbeiträge der TDL und ein Cashflow-Modell für die Transaktionen in einer Kooperation von TDL vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt die mathematische Formulierung des kooperativen Tourenplanungsproblems. Der letzte Teil des Kapitels ist dem Problem der Verteilung der zusätzlichen Gewinne einer Kooperation unter den beteiligten TDL gewidmet. Da von solch einem Instrument eine wesentliche Anreizwirkung für TDL ausgeht, an einer Kooperation teilzunehmen, werden hier fünf Gewinnverteilungsansätze vorgestellt und dann anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen.

5.1 Problembeschreibung

Im Gegensatz zu klassischen Tourenplanungsproblemen (z. B. VRP), die sich nur mit der Zuordnung von Kundenorten zu Fahrzeugen und der anschließenden Festlegung der Besuchsreihenfolge beschäftigen, erfolgt beim kooperativen Tourenplanungsproblem zusätzlich die Neuordnung von Transportaufträgen zu TDL. Es entspricht also einem Multi-Depot Tourenplanungsproblem, wobei jeder TDL ein individuelles Depot besitzt und von einer initialen Auftragsverteilung ausgegangen wird. Bei der Formulierung des kooperativen Tourenplanungsproblems wird jedoch deutlich, dass es sich um ein vereinfachtes Modell handelt. Die Nebenbedingungen des Modells spiegeln die Neuordnung von Transportaufträgen zu TDL anhand der individuellen Transportkosten dar. Diese werden von den TDL berechnet, indem sie eine Tourenplanung für ihre akquirierten Transportaufträge durchführen.

Für das kooperative Tourenplanungsproblem sei eine Menge unabhängiger TDL $M = \{1, 2, \dots, m\}$, die Verladern eine Transportleistung anbieten. Die Transportleistung kann je nach Anforderung des Verladers das Einsammeln oder Ausliefern von Gütern durch die TDL oder beides beinhalten. Jeder TDL $i \in M$ akquiriert in einer Periode selbstständig eine Menge von Transportaufträgen N_i^0 , die seinen initialen Auftragsbestand darstellen, und plant sie mit Hilfe von Verfahren der Tourenplanung ein. Jeder Transportauftrag $j \in N_i^0$ ist gekennzeichnet durch die Koordinaten der zu besuchenden Orte und gegebenenfalls durch ein Volumen. Zeitfenster werden in diesem Modell vernachlässigt. Die Anfangsallokation von Transportaufträgen ergibt sich für TDL i somit als $N = N_1^0 \cup N_2^0 \cup \dots \cup N_m^0$, $N_i^0 \cap N_k^0 = \emptyset$, wobei N der Gesamtmenge an Transportaufträgen aller TDL entspricht. Die Menge von Transportaufträgen N_i^t eines TDL verändert sich aufgrund des Austauschprozesses im Zeitablauf t . Mit N_i wird die Menge von Transportaufträgen des TDL $i \in M$ zu einer beliebigen Zeit bezeichnet.

Für eine Beschreibung des kooperativen Tourenplanungsproblems werden weiterhin folgende Annahmen getroffen.

- Es werden Transporte im Teilladungsverkehr erbracht.
- Die TDL verfügen über eine identische Kosten- und Erlösstruktur.
- Die TDL besitzen einen identischen homogenen Fuhrpark.
- Die TDL operieren jeweils von einem Depot aus, welches Start- und Endpunkt jeder Tour ist.
- Die TDL führen eine statische, deterministische und einperiodische Tourenplanung durch.

Die TDL formen gemeinsam ein kooperatives Netzwerk (KN), indem sie ihre akquirierten Transportaufträge untereinander austauschen. Dies geschieht auf Basis der individuell berechneten Transportkosten. Sind die Transportkosten hoch, wird der TDL bestrebt sein, den Auftrag an einen anderen TDL fremd zu vergeben. Die Transportkosten eines Auftrags hängen aber nicht nur von der Kostenstruktur des TDL ab, sondern auch von den anderen Transportaufträgen, die die TDL akquiriert haben. So können zwei oder mehrere Aufträge komplementär zueinander sein und somit gemeinsam geringere Transportkosten aufweisen als wenn sie individuell realisiert werden. Ein TDL wird demnach bestrebt sein, zu seinen Transportaufträgen komplementäre Aufträge von anderen TDL zu übernehmen.

5.2 Kosten- und Erlösfunktion

Im Modell verwenden die TDL ein zweistufiges Preissystem, um ihre Frachtraten zu ermitteln. Die Frachtrate oder Erlös r_j eines Transportauftrags setzt sich dabei aus einem Grundpreis br , der eine Verwaltungspauschale enthält sowie einen Anteil der durchschnittlichen Leerfahrtkosten pro Periode abdeckt, und einer entfernungsabhängigen Transportrate tr zusammen

$$r_j = br + d_j \cdot tr. \quad (5.1)$$

Hier stellt d_j die direkte Fahrdistanz zwischen den Kundenorten (bei Teilladungsverkehr mit Reihenfolgebedingungen) bzw. zwischen dem Kundenort und dem Depot (bei Sammel- oder Verteilverkehren) dar. Kapazitäten können berücksichtigt werden, indem die entfernungsabhängige Transportrate zusätzlich mit dem Volumen des Transportauftrags multipliziert wird. Aus Sicht des Kunden stellt die Frachtrate eine angemessene Schätzung des Wertes der Transportleistung dar. Der Erlös von TDL i ergibt sich mit

$$R_i = \sum_{j \in N_i} r_j. \quad (5.2)$$

Die Kosten der Erstellung von Transportleistungen lassen sich allerdings nicht direkt an den zu zahlenden Frachtraten erkennen. Als c_{ij} werden die Selbsterstellungskosten oder Grenzkosten eines TDL i für die Durchführung von Transportauftrag j bezeichnet. Die direkten Kosten eines Auftrags bestehen aus den Stoppkosten c_S für Warte-, Lade- und Entladezeiten an den Kundenorten und den Fahrtkosten pro Kilometer c_F . Dies führt zu

$$c_{ij} = c_S + l_{ij} \cdot c_F, \quad (5.3)$$

wobei l_{ij} die Grenztourlänge eines TDL i für den Transportauftrag j darstellt. Sie ist definiert als die innerhalb einer Tour zusätzlich benötigte Wegstrecke zur Durchführung von Auftrag j . Die Grenztourlänge wird berechnet als Differenz aus den Gesamttourlängen mit Auftrag j und der Gesamttourlänge ohne diesen Transportauftrag

$$l_{ij} = L(N_i) - L(N_i \setminus \{j\}). \quad (5.4)$$

Die Funktion $L(\cdot)$ gibt die Tourlänge zurück, die durch die optimale Lösung des zugehörigen Tourenplanungsproblems generiert wurde. Die Transportkosten für den TDL i ergeben sich als

$$C_i = \sum_{j \in N_i} c_S + L(N_i) \cdot c_F. \quad (5.5)$$

Die Nebenbedingungen (5.3) und (5.4) lassen erkennen, dass die Kalkulation der Transportkosten unabhängig vom speziellen Tourenplanungsproblems ist. Die Art des Tourenplanungsproblems, welches die Funktion $L(\cdot)$ wiedergibt, hängt nur von der Art der Transportleistung ab, die von den TDL im KN angeboten wird.

Der Grenzgewinn eines Transportauftrags ist gegeben durch

$$p_{ij} = r_j - c_{ij}. \quad (5.6)$$

Der Deckungsbeitrag eines TDL pro Periode ergibt sich dann als

$$P_i = R_i - C_i. \quad (5.7)$$

Der Gesamtdeckungsbeitrag des KN ergibt sich aus der Summe der individuellen Deckungsbeiträge

$$P = \sum_{i \in M} (R_i - C_i) = \left(\sum_{j \in N_i} r_j \right) - \left(\sum_{j \in N_i} c_S + L(N_i) \cdot c_F \right). \quad (5.8)$$

Die TDL können im Rahmen des KN keinen Einfluss auf die Erlöse der Transportaufträge (r_j), die Stoppkosten (c_S) oder die Fahrtkosten pro Kilometer (c_F) nehmen. Jedoch ist es möglich, durch Kooperation die Länge der Touren ($L(N_i)$) jedes TDL im Rahmen einer neuen Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL zu verringern.

Die Ermittlung der Transportkosten und Deckungsbeiträge für einen TDL soll nun beispielhaft durchgeführt werden. In der betrachteten Periode hat TDL 1, der Transportleistungen im Teilladungsverkehr mit Reihenfolgebedingungen anbietet, drei Aufträge akquiriert. Die Koordinaten des Depots und die der Pickup- und Deliveryorte der Transportaufträge wurden zufällig aus der Instanz *R101* von Solomom

Tabelle 5.1: Koordinaten des Depots und der Pickup- und Deliveryorte für TDL1

Transportauftrag	Koordinaten		
	j	x	y
Depot		57	29
P1		25	21
D1		15	19
P2		56	39
D2		65	55
P3		44	17
D3		41	49

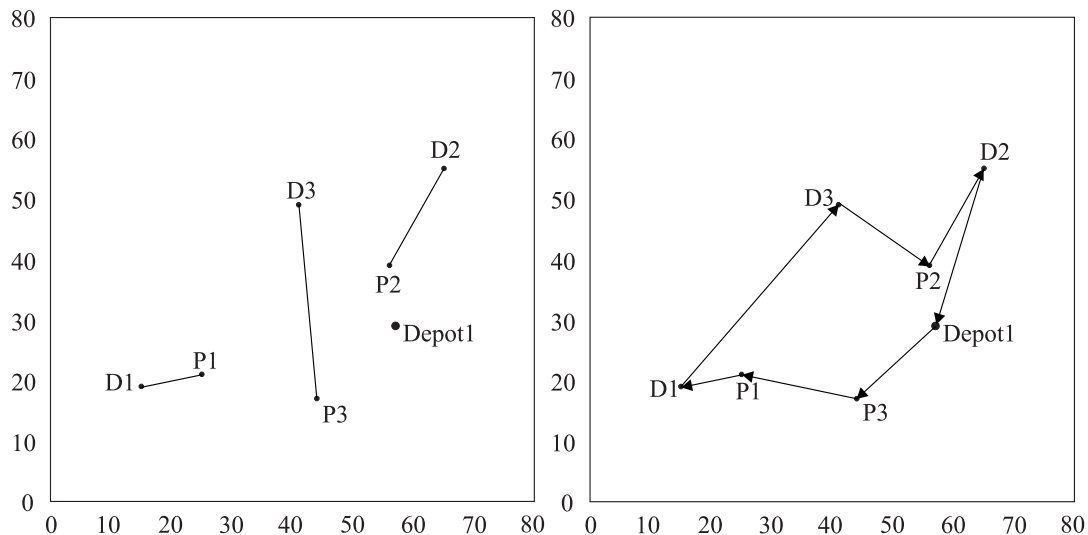


Abbildung 5.1: Koordinaten der akquirierten Transportaufträge und geplante Tour für TDL 1

(2005) entnommen. Die Koordinaten des Depots und der Pickup- und Deliveryorte für TDL 1 sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet und zusammen mit der von TDL 1 geplanten Tour in der Abbildung 5.1 dargestellt.

Die direkten Fahrdistanzen d_j werden als gerundete euklidische Distanzen ermittelt. Die Basisrate pro Auftrag beträgt $br = 20$ GE und die Transportrate pro Kilometer $tr = 2$ GE. Der Erlös des TDL ergibt sich somit als $R_1 = 180$ GE. Die minimale Tourlänge beträgt $L(N_1) = 150$ GE. Die Stoppkosten pro Auftrag werden mit $c_S = 10$ GE festgelegt und die Fahrkosten pro Kilometer mit $c_F = 1$ GE. Dies

führt zu den Kosten für den TDL 1 von $C_1 = 180$ GE. Der TDL erwirtschaftet insgesamt einen Deckungsbeitrag von $P_1 = 0$ GE, obwohl zwei von seinen Aufträgen einen positiven Grenzgewinn aufweisen. Tabelle 5.2 zeigt die Grenzgewinne der drei Aufträge und den Deckungsbeitrag von TDL 1.

Tabelle 5.2: Ermittlung des Deckungsbeitrags für TDL 1: $N_1 = \{1, 2, 3\}$ (in GE)

Transportauftrag	Erlöse		Kosten		Deckungsbeitrag
	d_j	r_j	l_{1j}	c_{1j}	
j					p_{1j}
1	10	40	38	48	-8
2	18	56	37	47	9
3	32	84	17	27	57
	$\sum d_j$	R_1	$L(N_1)$	C_1	P_1
N_1	60	180	150	180	0

Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Kostenfunktion $C_i = \sum_{j \in N_i} c_{sj} + L(N_i) \cdot c_F$ aufgrund von $L(N_i) \neq \sum_{j \in N_i} l_{ij}$ nicht additiv ist. Die Summe aus den Grenzkosten der einzelnen Aufträge $c_{i1} + c_{i2} + c_{i3} = 48 + 47 + 27 = 122$ GE entspricht also nicht den Gesamtkosten $C_i = 180$ GE. Die Übernahme weiterer Transportaufträge ist für TDL in der Regel mit der Realisierung von Economies of Density verbunden, da sie in eine bestehende Tour integriert werden können. Die Transportkostenfunktion ist somit für gewöhnlich konvex, d. h. die Grenzkosten für die Erfüllung zusätzlicher Transportaufträge sinken. Die Abbildung 5.2 zeigt diesen konvexen Verlauf für das eingeführte Beispiel. Wird nur der Auftrag 1 realisiert, so ergeben sich Transportkosten von 96 GE. Bei der Erfüllung von Auftrag 1 und 2 ergeben sich Transportkosten von 153 GE. Das entspricht Grenzkosten für Auftrag 2 von 57 GE. Werden nun alle drei Aufträge von TDL1 ausgeführt, so ergeben sich Transportkosten von 180 GE und die Grenzkosten für die zusätzliche Erfüllung von Auftrag 3 betragen 27 GE.

5.3 Fremdvergabe von Transportaufträgen

In einem KN entscheidet jeder TDL $i \in M$ ob er seine akquirierten Aufträge $j \in N_i^0$ selbst erfüllt, oder versucht sie an andere TDL im KN fremd zu vergeben. Die Fremdvergabe von Transportaufträgen erweist sich besonders dann als vorteilhaft, wenn die Grenzkosten für die Durchführung von Aufträgen sehr hoch sind. Angenommen ein TDL i hat einen Transportauftrag j mit einer Frachtrate r_j von einem Verlager akquiriert. Es wird weiterhin angenommen, dass es einem anderen TDL $k \in M$

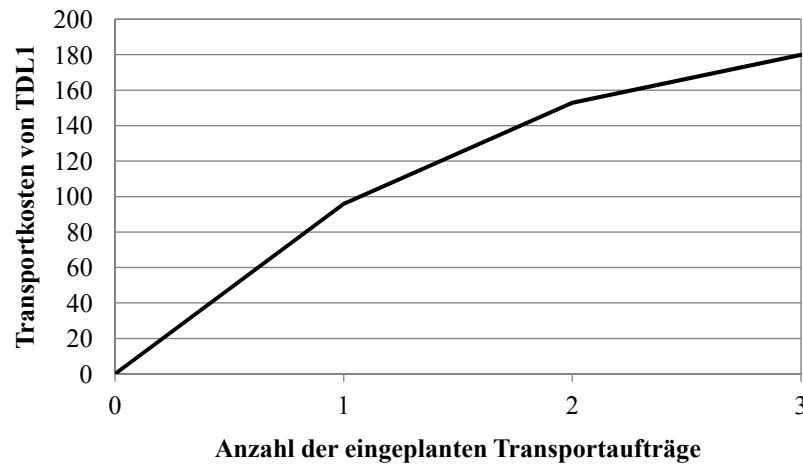


Abbildung 5.2: Grenzkosten in Abhängigkeit von der Anzahl durchgeführter Transportaufträge

möglich ist, den Transportauftrag j zu Grenzkosten von $c_{kj} < c_{ij}$ auszuführen. In dieser Situation kann TDL i

1. den TDL k damit beauftragen den Transportauftrag j durchzuführen und einen Kompensationspreis u_j an TDL k zahlen oder
2. den Auftrag an TDL k verkaufen und eine Ausgleichszahlung v_j dafür von TDL k erhalten.

Im ersten Fall erhält der TDL i die Frachtrate vom Verloader und im zweiten Fall wird sie an den TDL k weitergeleitet. Kompensationspreise werden typischerweise in einer Rückwärtsauktion genutzt, während Ausgleichszahlungen in einer Vorwärtsauktion ausgehandelt werden. Die Zahlungsflussmodelle der beiden Transaktionen sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

In einer Rückwärtsauktion wird die maximale Zahlungsbereitschaft des TDL i als Reservationspreis bezeichnet. Dieser Reservationspreis wird determiniert durch seine Grenzkosten für die Durchführung des Transportauftrags j , d. h. $u_j \leq c_{ij}$. Folglich entspricht der Mindestpreis in einer Vorwärtsauktion der Ausgleichszahlung, die dem TDL i mindestens für den Verkauf des Auftrags j gezahlt werden muss. Dieser Mindestpreis wird determiniert durch den Grenzgewinn j , d. h. $v_j \geq p_{ij}$. Die Fremdvergabe über Kompensationspreise zielt auf die Minimierung der Gesamtkosten ab, während die Fremdvergabe über Ausgleichszahlungen auf die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags abzielt. Aus Sicht des KN dienen beide, Kompensationspreise und Ausgleichszahlungen, nur als interne Verrechnungspreise. Somit unterstützen

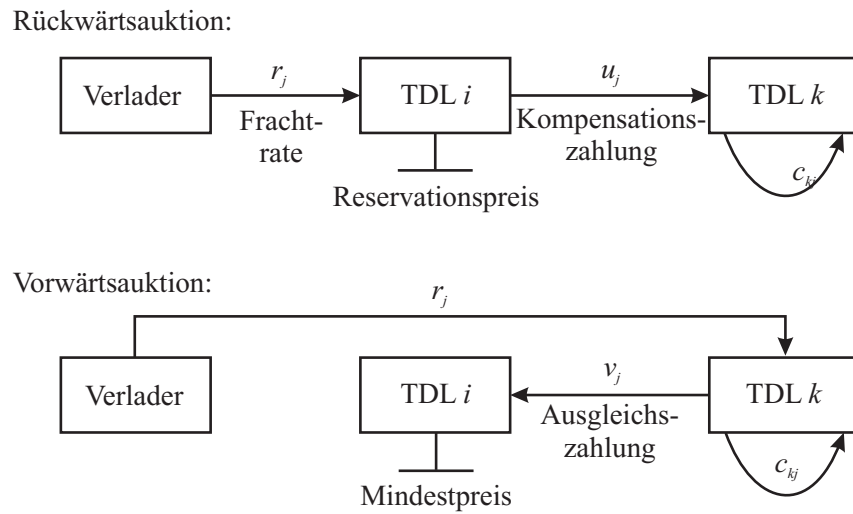


Abbildung 5.3: Zahlungsflüsse für die Fremdvergabe mit Kompensationspreisen und Ausgleichszahlungen

die beiden Zahlungsflussmodelle die Allokation der Netzwerkressourcen in derselben Art und Weise. Der wesentliche organisatorische Unterschied besteht darin, dass die Verantwortung für einen Transportauftrag bei der Vorwärtsauktion komplett auf den ausführenden TDL übergeht. Da das KN als eine geschlossene Unternehmung mit einem gemeinsamen Auftreten nach außen betrachtet werden kann, ist die Verantwortung nur von zweitrangiger Bedeutung. Dementsprechend ist es ausreichend sich auf die Reallokation von Transportaufträgen zu TDL mithilfe einer Vorwärtsauktion zu konzentrieren, wobei die Maximierung der Gesamtdeckungsbeiträge im Vordergrund steht.

Die Abbildung 5.4 zeigt die drei möglichen Entscheidungen die TDL im Rahmen der Erfüllung von Transportaufträgen in einem KN treffen können. Gehören die Transportaufträge zu ihrem Auftragsbestand, so besteht die Möglichkeit sie entweder selbst auszuführen oder sie an die anderen TDL fremd zu vergeben. Sind die TDL in der Lage einen Transportauftrag, der nicht zu ihrem Auftragsbestand gehört, zu geringeren Grenzkosten auszuführen, so können sie den Transportauftrag von einem anderen TDL übernehmen.

Formal können diese drei Fälle unterschieden werden, indem eine Entscheidungsvariable x_{ij} eingeführt wird, die angibt, ob der Transportauftrag j vom TDL i ausgeführt wird ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$). Nach der Entscheidung über die Selbsterstellung oder Fremdvergabe entsteht eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL und somit verändern sich die Auftragsbestände der TDL. Die aktualisierte

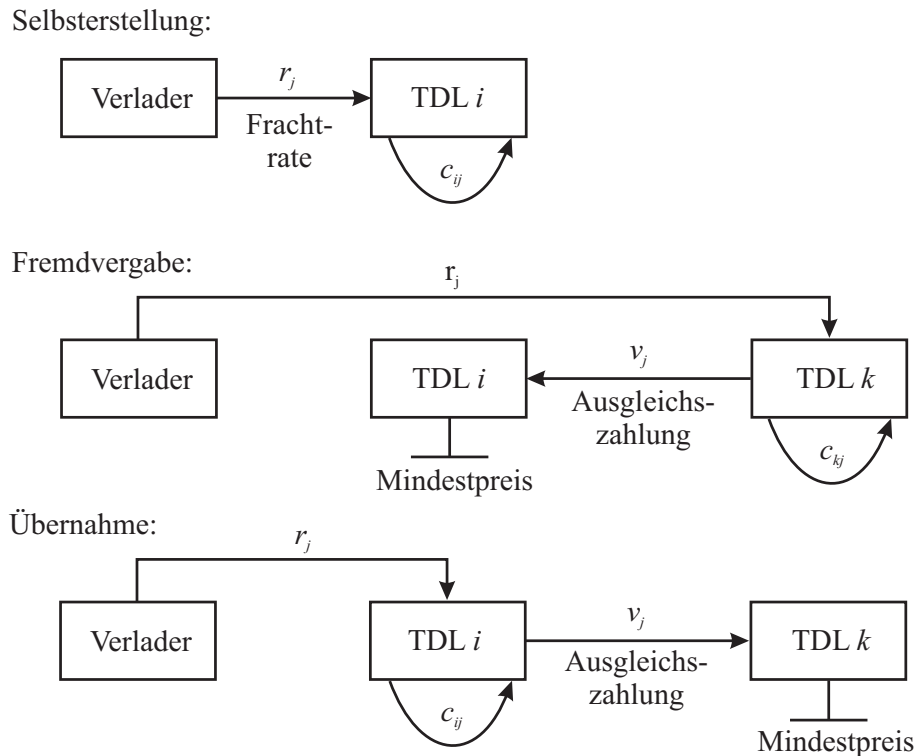


Abbildung 5.4: Zahlungsflüsse für die Selbsterstellung, Fremdvergabe an TDL k und für die Übernahme eines Transportauftrags von TDL k

Menge von Transportaufträgen des TDL i wird aus diesem Grund nachfolgend als N_i^e bezeichnet.

- Im Fall der Selbsterstellung gehört der Transportauftrag j zum Auftragsbestand von TDL i , d. h. $j \in N_i^0$, und der Auftrag wird vom TDL i ausgeführt. Die Entscheidungsvariable x_{ij} nimmt also den Wert 1 an und der Auftrag j ist auch im aktualisierten Auftragsbestand N_i^e von TDL i enthalten.
- Im Fall der Fremdvergabe gehört der Transportauftrag j zum Auftragsbestand von TDL i , d. h. $j \in N_i^0$, er wird allerdings von einem anderen TDL k ausgeführt. Die Entscheidungsvariable x_{ij} nimmt den Wert 0 an, während x_{kj} den Wert 1 annimmt. Der Transportauftrag j gehört nach der Neuordnung dem Auftragsbestand N_k^e von TDL k an.
- Im Fall der Übernahme gehört der Transportauftrag j zunächst dem Auftragsbestand von TDL k an, d. h. $j \in N_k^0$. Übernimmt der TDL i nun diesen Transportauftrag von TDL k , so nimmt die Entscheidungsvariable x_{ij} den Wert 1 an, während x_{kj} den Wert 0 annimmt. Der Transportauftrag j gehört nun dem Auftragsbestand N_i^e von TDL i an.

Auf Basis der vorgestellten drei Fälle ermittelt sich der Grenzgewinn für den Transportauftrag $j \in N_i^e$ aus dem aktualisierten Auftragsbestand von TDL i als

$$p_{ij} = \begin{cases} (r_j - c_{ij}) \cdot x_{ij} + v_j \cdot (1 - x_{ij}), & \text{wenn } j \in N_i^e, \\ (r_j - c_{kj} - v_j) \cdot x_{ij}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.9)$$

Hierbei werden die Frachtrate r_j und die Transportkosten c_{ij} gemäß (5.1) und (5.3) berechnet. Im Falle der Selbsterstellung, d. h. $j \in N_i^e$ und $x_{ij} = 1$, entspricht die Formel der ursprünglichen Deckungsbeitragsermittlung ($p_{ij} = r_j - c_{ij}$). Wenn der TDL den Transportauftrag $j \in N_i^0$ jedoch fremd vergibt, d. h. $j \in N \setminus N_i^0$ und $x_{ij} = 0$, wird der Grenzgewinn auf die Ausgleichszahlung v_j reduziert, die der TDL k für j an ihn zahlt ($p_{ij} = v_j$). Übernimmt der TDL i einen Transportauftrag $j \in N_k^0$ von TDL k , d. h. $j \in N_i^e$ und $x_{ij} = 1$, so ergibt sich sein Grenzgewinn für den Auftrag aus der Differenz des Erlöses und den Grenzkosten sowie dem Kompensationspreis ($p_{ij} = r_j - c_{kj} - v_j$).

5.4 Optimierungsmodell

Das Ziel des folgenden Optimierungsmodells ist es, eine Allokation von Transportaufträgen zu TDL zu finden, sodass der Gesamtdeckungsbeitrag des KN maximal wird. Die individuellen Deckungsbeiträge der TDL dürfen sich bei dieser Allokation nicht verringern und die Informationsweitergabe an andere TDL soll möglichst gering gehalten werden. Vorausgesetzt wird dabei, dass jeder einzelne TDL eine optimale Tourenplanung durchführt.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass sich die TDL rational verhalten, d. h. die TDL sind bereit ihre Kundenaufträge an einen anderen TDL fremd zu vergeben, wenn sie dafür eine angemessene Ausgleichszahlung erhalten. Die Fremdvergabe eines Auftrags $j \in N_i^0$ von TDL $i \in M$ zu TDL $k \in M$ wird im Framework dadurch repräsentiert, dass j die Menge an Transportaufträgen von TDL i verlässt und in die aktualisierte Menge an Transportaufträgen N_k^e von TDL k aufgenommen wird. Die Entscheidungsvariable x_{ij} nimmt den Wert 1 an, wenn der TDL i den Transportauftrag j durchführt. Das nicht-lineare Optimierungsmodell wird formal wie folgt beschrieben.

$$\max P = \sum_{j \in N} r_j - \sum_{i \in M} C_i \quad (5.10)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$1 = \sum_{i \in M} x_{ij} \quad (\forall j \in N) \quad (5.11)$$

$$C_i = \sum_{j \in N} c_{Sj} x_{ij} + L(\{j \in N \mid x_{ij} = 1\}) c_F \quad (\forall i \in M) \quad (5.12)$$

$$P_i^0 \leq \sum_{j \in N} r_j x_{ij} + \sum_{j \in N_i^0} v_j (1 - x_{ij}) - \sum_{j \in N \setminus N_i^0} v_j x_{ij} - C_i \quad (\forall i \in M) \quad (5.13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \text{ und } v_j \in \mathbb{R} \quad (\forall i \in M, \forall j \in N) \quad (5.14)$$

Die Zielfunktion (5.10) maximiert den Gesamtdeckungsbeitrag des KN in einer Periode als Differenz aus dem Gesamterlös für alle Transportaufträge und den Gesamtkosten für alle TDL. Da die Gesamterlöse nicht veränderbar sind, kann alternativ eine Minimierung der Gesamtkosten vorgenommen werden.

Die erste Nebenbedingung (5.11) stellt sicher, dass jeder Transportauftrag genau einem TDL zugeordnet wird. Die Kosten eines TDL werden in der Nebenbedingung (5.12) ermittelt, wobei die Allokation der Transportaufträge zu TDL zu berücksichtigen ist. Die Tourenplanung wird somit für alle Transportaufträge durchgeführt, die der TDL i durchführt, d. h. für die $x_{ij} = 1$. Anzumerken ist, dass die Nebenbedingungen des Tourenplanungsproblems in der Nebenbedingung (5.12) enthalten sind. Die Anfangsallokation von Transportaufträgen ist in diesem Modell durch die Mengen N_i^0 repräsentiert. Die Nebenbedingung (5.13) stellt sicher, dass sich der Deckungsbeitrag der TDL nicht verringert, wenn Transportaufträge anderen TDL zugeordnet werden. Für jeden TDL erfolgt dementsprechend eine Aktualisierung des ursprünglichen Deckungsbeitrags P_i^0 aufgrund der neuen Allokation N_i^e . Der neue Deckungsbeitrag ergibt sich aus den Erlösen und Ausgleichszahlungen, die ein TDL für die Fremdvergabe seiner Aufträge $i \in N_i^0$ erhält, reduziert um die Ausgleichszahlungen, die der TDL für die Übernahme von Aufträgen $i \in N \setminus N_i^0$ zahlen muss und ebenfalls reduziert um die Kosten, die für die neue Allokation entstehen. Durch diese Nebenbedingung wird das Optimierungsmodell nicht-linear. Eine Linearisierung ist jedoch möglich (Berger und Bierwirth, 2009). Die Ausgleichszahlungen v_j stellen im Rahmen dieses Modells Entscheidungsvariablen dar. Sie werden nicht in die Zielfunktion aufgenommen, da sie nur zur internen Verrechnung als Transferpreise im KN dienen. Sie können auch negative Werte annehmen.

Sind alle wettbewerbsrelevanten Informationen, wie die gesamten Transportaufträge des KN sowie Kosten- und Erlösinformationen, bekannt, entspricht dieses Optimierungsproblem einem Multi-Depot Tourenplanungsproblem (siehe Kapitel 4.2.1.3 und 4.2.2.3), und kann somit zentral gelöst werden. Bei einem zentralen Lösungsverfahren lässt sich, unabhängig von einer bestimmten Anfangsallokation, die beste Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL finden. Die rechtliche und wirtschaftliche

Unabhängigkeit der TDL wird dabei allerdings vernachlässigt. Ein anderer Nachteil ist ein hoher Zeit- und Datenbeschaffungsaufwand für die Generierung der Lösung. Die zentrale Planung erweist sich besonders in einer dynamischen Umgebung als problematisch, da sie eine geringe Flexibilität bei Veränderungen aufweist. Die Ergebnisse einer zentralen Planung können jedoch als Benchmark für eine quantitative Untersuchung von Kooperationen herangezogen werden.

Demgegenüber ist ein dezentrales Lösungsverfahren in der Lage eine hohe Flexibilität in einem dynamischen Umfeld zu gewährleisten und ermöglicht es den TDL eine eigenständige Ressourcenplanung auf Basis ihrer lokalen Informationen durchzuführen, ohne alle wettbewerbsrelevanten Daten preiszugeben. Die Lösung des kooperativen Tourenplanungsproblems stellt demzufolge andere Anforderungen an die verwendeten Methoden als klassische Tourenplanungsprobleme. Dazu werden ausgehend von der Anfangsallokation einzelne Transportaufträge sukzessive an andere TDL fremd vergeben. Der Vorteil im Vergleich zur zentralen Lösung ist, dass den TDL nur Informationen zum aktuell zuzuordnenden Auftrag (z. B. Koordinaten der Kundenorte und Volumen) zur Verfügung stehen müssen und dass die rechtliche und wirtschaftliche Unabhängigkeit der TDL berücksichtigt wird. Wichtig für die Umsetzung einer dezentralen Planung ist allerdings, dass die TDL miteinander kommunizieren und ein geeigneter Koordinationsmechanismus für die Zuordnung der Transportaufträge verwendet wird. Ein wesentlicher Nachteil der dezentralen Planung ist, dass sie meist nicht die Qualität der zentralen Lösung erreicht. Der Gesamtdeckungsbeitrag des KN kann in der zentralen Lösung demnach mehr gesteigert werden als in der dezentralen Lösung.

In der obigen Formulierung des kooperativen Tourenplanungsproblems wird lediglich sichergestellt, dass durch die Ausgleichszahlungen die Bedingung einer Win-win-Situation erfüllt ist. Üblicherweise gibt es viele verschiedene Konstellationen von Ausgleichszahlungen. Die Frage nach der Aufteilung der Gewinne aus der Kooperation zwischen den TDL kann in einer nachgeschalteten Phase geklärt werden und ist somit unabhängig vom kooperativen Tourenplanungsproblem.

5.5 Verteilung von Kooperationsgewinnen

Durch die Initiierung von Kooperationen sind Unternehmen in der Lage, Rationalisierungspotenziale auszuschöpfen, die bei einem individuellen Vorgehen nicht realisiert werden können. Um den Kooperationspartnern langfristig Anreize zur Teilnahme an der Kooperation zu geben, müssen die zusätzlich erwirtschafteten Gewinne oder eingesparten Kosten unter ihnen aufgeteilt werden.

Die Aufteilung der Gewinne hängt in der Praxis oft von der Marktmacht der

Kooperationspartner, ihrer wirtschaftlich und rechtlichen Unabhängigkeit, ihrer Bereitschaft Kompromisse einzugehen und der umgebenden Marktsituation ab. Das Hauptproblem ist es, eine von allen Beteiligten als gerecht empfundene Aufteilung der Gewinne zu finden und die Interessen der Kooperationspartner dabei zu wahren.

Diese Arbeit zielt auf die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags eines KN ab. Aus diesem Grund, zählt die Verteilung der Kooperationsgewinne nicht zur zentralen Fragestellung dieser Arbeit. Da dieser Aspekt jedoch trotzdem von Bedeutung für die langfristige Teilnahme an Kooperationen ist, wird in diesem Kapitel eine Übersicht zu den bisher entwickelten Gewinnverteilungsmethoden erstellt.

5.5.1 Übersicht zu Gewinnverteilungsmethoden

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Gewinn- bzw. Kostenverteilung in Kooperationen von TDL (Shapley (1953); Vickrey (1961); Gomber et al. (1999); Corsten und Gössinger (2001, S. 67ff.); Schönsleben und Hieber (2002); Krajewska und Kopfer (2006)). Eine Übersicht dazu ist in der Abbildung 5.5 dargestellt. Die gezeigten Gewinn- bzw. Kostenverteilungsansätze gehen alle davon aus, dass die Kooperationspartner die gleiche Marktmacht besitzen und konzentrieren sich auf die kurzfristige Planung.

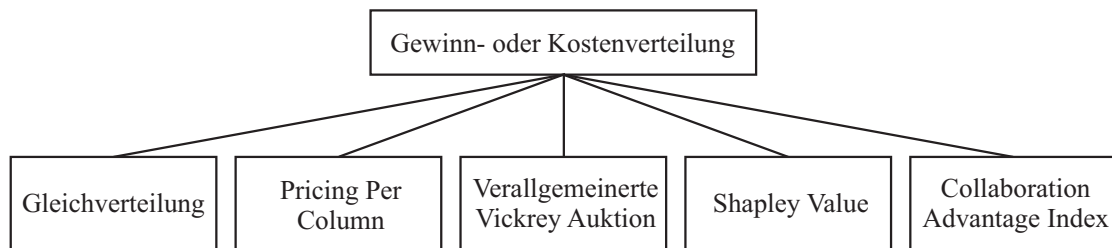


Abbildung 5.5: Übersicht zu Ansätzen für die Verteilung der Gewinne bzw. Kosten in einer Kooperation

Diese Gewinnverteilungsmethoden werden nun vorgestellt und nach folgenden drei Kriterien verglichen. Sie lassen sich aus den Anforderungen an die Gewinnverteilungsansätze und anhand deren Unterschiede ableiten.

1. Kooperationsanreiz
2. leistungsgerechte Aufteilung der Gewinne
3. Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung

Jeder Ansatz wird daraufhin geprüft, ob er einen Anreiz für die Unternehmen bietet, an einer Kooperation teilzunehmen. Ein Anreiz besteht immer dann, wenn der erwartete Gewinn eines Unternehmens aus der Beteiligung an einer Kooperation mindestens dem erwarteten Gewinn bei Nicht-Beteiligung entspricht (Corsten und Gössinger, 2001, S. 74).

Demgegenüber ist es wesentlich schwieriger, eine Definition des Begriffs einer gerechten Aufteilung von Kooperationsgewinnen zu finden. In der Volkswirtschaftslehre existieren eine Vielzahl von Ausprägungen des Gerechtigkeitsbegriffs. Behrens und Kirspel (2001, S. 187ff.) stellen dazu eine Übersicht zur Verfügung. Die Verteilung ist dann gerecht, wenn jeder Kooperationspartner den gleichen Anteil am Kooperationsgewinn erhält. Eine gerechte Verteilung kann allerdings auch nach dem Bedürfnis oder der Leistung erfolgen. Diese Unterscheidung in Bedarfs- oder Leistungsgerechtigkeit greift auch Czesanne (1994, S. 13ff.) auf. Bedarfsgerechtigkeit bezeichnet die Verteilung von Kooperationsgewinnen nach den Bedürfnissen der Kooperationspartner. Da jeder Kooperationspartner so den gesamten Gewinn beanspruchen würde, ist dieser Gerechtigkeitsbegriff ungeeignet. Leistungsgerechtigkeit bezeichnet demgegenüber die Verteilung der Kooperationsgewinne nach der aufgebrachten Leistung der Kooperationspartner. Bei einer leistungsgerechten Gewinnverteilung erhält also jeder Kooperationspartner den zusätzlichen Gewinn, den er durch seine Teilnahme zur Kooperation beiträgt. Das Problem der Gewinnverteilung wird somit auf die Messung der eingebrachten Leistung der Kooperationspartner verlagert.

Durch das dritte Kriterium wird geprüft, wie hoch der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung für jeden Ansatz ist.

5.5.2 Beispiel zum Vergleich der Gewinnverteilungsmethoden

Die verschiedenen Gewinnverteilungsansätze werden anhand eines Beispiels vorgestellt und verglichen. Gegeben sei eine Kooperation aus drei TDL 1, 2 und 3, wobei jeder von ihnen einen initialen Bestand an Transportaufträgen akquiriert hat. Jeder TDL wählt nun einen Transportauftrag aus seinem Auftragsbestand, den er im Rahmen der Kooperation fremd vergeben möchte. Für TDL 1 ist dies Auftrag 1, für TDL 2 Auftrag 2 und für TDL 3 Auftrag 3. Die drei Transportaufträge und die zugehörigen Erlöse, Selbstkosten und Deckungsbeiträge sind in der Tabelle 5.3 aufgelistet.

Wird die Reallokation der Transportaufträge auf Basis einer kombinatorischen Auktion durchgeführt, so ist zum einen die Zusammenstellung von Auftragskombinationen (Auftragsbündeln) und zum anderen die Erstellung von Geboten für die erstellten Auftragsbündel durch die TDL notwendig. In einer kombinatorischen

Tabelle 5.3: Transportaufträge von TDL 1, 2 und 3 und deren Erlöse, Selbstkosten und Grenzgewinne

TDL	Auftrag	Erlös	Selbstkosten	Grenzgewinn
1	1	40	48	-8
2	2	96	35	61
3	3	56	22	34

Auktionen werden gleich mehrere Transportaufträge gleichzeitig versteigert unter der Zielstellung den Gesamtgewinn zu maximieren, siehe Kapitel 6.3.1.

In der Tabelle 5.4 sind alle Auftragskombinationen der Transportaufträge 1, 2 und 3 dargestellt. Für jeden TDL sind in der Tabelle darüber hinaus die Gebote gegeben, die die TDL bereit sind, für die Durchführung der jeweiligen Auftragsbündel zu zahlen.

Tabelle 5.4: Matrix für die Gebote von TDL 1, 2 und 3 auf die sieben Auftragskombinationen

Bieter	Auftragsbündel						
	{1}	{2}	{3}	{1, 2}	{1, 3}	{2, 3}	{1, 2, 3}
1	-8	45	8	38	14	61	72
2	18	61	44	75	58	95	106
3	25	64	34	89	59	100	125

Nach der Durchführung der kombinatorischen Auktion ergibt sich für dieses Beispiel ein Gesamtgewinn von $44+89=133$ GE, wenn das Auftragsbündel {3} von TDL 2 und das Auftragsbündel {1, 2} von TDL 3 durchgeführt wird. Kooperieren die TDL nicht miteinander, d. h. es führt jeder TDL seinen eigenen Transportauftrag durch, so ergibt sich ein Gesamtgewinn von $-8+61+34=87$ GE. Der zusätzliche Gewinn, der mithilfe der Kooperation erreicht werden kann, beträgt $133-87=46$ GE. Bei der Beschreibung der verschiedenen Gewinnverteilungsansätze anhand dieses Beispiels wird sich zeigen, dass sich die Aufteilung der zusätzlichen Gewinne unter den TDL grundlegend unterscheidet.

5.5.3 Gleichverteilung

Schönsleben und Hieber (2002) schlagen vor, den Gewinn, der durch eine Koope-

ration entsteht, gleichmäßig unter den Teilnehmern zu verteilen. Ihrer Auffassung nach ist es die Kooperation, die diese Gewinne hervorbringt und nicht der Beitrag des einzelnen. Für das in Kapitel 5.5.2 eingeführte Beispiel werden demnach die Auszahlungen von 46 GE gleichmäßig auf die drei TDL verteilt. Jeder TDL erhält somit $46/3=15,33$ GE.

Bei einer Gleichverteilung der Gewinne besteht für die TDL ein Anreiz an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich durch die Teilnahme an der Kooperation nicht schlechter stellen. Die Aufteilung der zusätzlichen Gewinne ist jedoch nicht leistungsgerecht, da der Anteil, den jeder Kooperationspartner erhält, unabhängig vom Beitrag zum Kooperationsgewinn ist. Der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung ist für diesen Ansatz gering, da der Gewinn der Kooperation nur von dem ohne Kooperation abgezogen und dann durch die Anzahl der Kooperationspartner geteilt werden muss.

Eine andere Idee der Gleichverteilung verfolgt der Ansatz von Schönberger (2005). Er geht davon aus, dass die TDL externe Frachtführer mit der Durchführung von Transportaufträgen beauftragen müssen, wenn die vorhandenen Kapazitäten dazu nicht mehr ausreichen. Die dabei entstehenden zusätzlichen Kosten werden gleichmäßig unter den Kooperationspartnern verteilt.

5.5.4 Pricing Per Column

In Gomber et al. (1997) wird ein Gewinnverteilungsansatz auf Basis der Vickrey Auktion (Milgrom und Weber, 1982) eingeführt. In einer Vickrey Auktion wird der Gewinner der Auktion anhand des höchsten Gebotes festgelegt. Der Preis den er an den Anbieter zu zahlen hat entspricht allerdings dem zweithöchsten Gebot. Der zusätzliche Gewinn für den Gewinner der Auktion entspricht somit der Differenz aus seinem Gebot und dem zweithöchsten Gebot. Der Gewinn des Anbieters entspricht der Differenz aus dem vom Gewinner der Auktion zu zahlenden Preis und dem Gewinn den er ohne Kooperation realisieren würde. Die Gewinnverteilung ist dadurch in die Auktion integriert. Auf die Vickrey Auktion wird in Kapitel 6.2.2 nochmals eingegangen.

Wird die Vickrey Auktion auf eine Kooperation übertragen, so entspricht der TDL dem Anbieter, der bereit ist, einen seiner Transportaufträge im Rahmen einer Kooperation an einen anderen TDL fremd zu vergeben. Der Gewinn, den der Anbieter bei Selbsterstellung des Auftrags generiert, dient im Auktionsprozess als Mindestpreis. Die anderen TDL geben für den angebotenen Transportauftrag ein Gebot ab. Der TDL mit dem höchsten Gebot erhält den Auftrag zur Durchführung. Er erhält dafür den Erlös des Auftrags und muss eine Ausgleichszahlung in Höhe des zweithöchsten Gebots an den Anbieter leisten. Liegt das zweithöchste Gebot un-

terhalb des Mindestpreises des Anbieters, so entspricht die Ausgleichszahlung dem Mindestpreis und der Gewinn des Anbieters ist gleich null. Die Gewinne der Kooperationspartner ergeben sich analog.

Das Vickrey Prinzip kann nach Gomber et al. (1999) ebenfalls angewendet werden, wenn nicht nur einzelne Aufträge, sondern Bündel von Aufträgen versteigert werden. Ausgehend von dem in Kapitel 5.5.2 eingeführten Beispiel werden beim Pricing per Column für jedes zugeordnete Auftragsbündel einzeln (pro Spalte) die Ausgleichszahlungen der ausführenden TDL bestimmt.

TDL 2 muss für das Auftragsbündel $\{3\}$ eine Ausgleichszahlung in Höhe des zweit höchsten Gebots 34 GE leisten, TDL 3 zahlt 75 GE für das Auftragsbündel $\{1, 2\}$. In der Tabelle 5.5 sind die zu leistenden Ausgleichszahlungen unterstrichen.

Tabelle 5.5: Ermittlung der Ausgleichszahlungen für das PPC

Bieter	Auftragsbündel						
	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1, 2\}$	$\{1, 3\}$	$\{2, 3\}$	$\{1, 2, 3\}$
1	-8	45	8	38	14	61	72
2	18	61	<u>44</u>	<u>75</u>	58	95	106
3	25	64	<u>34</u>	89	59	100	125

Für TDL 2 und das Auftragsbündel $\{3\}$ ergibt sich so ein zusätzlicher Gewinn von $44-34=10$ GE, für TDL 3 und das Auftragsbündel $\{1, 2\}$ analog $89-75=14$ GE. In der Einführung des Beispiels wurde allerdings ein zusätzlicher Gesamtgewinn durch die Kooperation von 46 GE ermittelt. Der fehlende Gewinn muss noch auf die TDL aufgeteilt werden, die die Transportaufträge angeboten haben. Das Auftragsbündel $\{3\}$ wurde von TDL 3 angeboten. Die von TDL 2 zu leistende Ausgleichszahlung entspricht dem Gebot von TDL 3, der somit keine zusätzlichen Gewinne für diesen Auftrag realisiert. Anders verhält es sich für das Auftragsbündel $\{1, 2\}$, welches TDL 3 gewonnen hat. Dieser leistet eine Ausgleichszahlung von 75 GE an TDL 1 und 2, die die Aufträge 1 und 2 angeboten haben. Führen TDL 1 und 2 ihre Aufträge selbst aus, so realisieren sie einen Gewinn bzw. Verlust von -8 GE und 61 GE, zusammen 53 GE. Es verbleibt durch die Kooperation ein restlicher zusätzlicher Gewinn von $75-53=22$ GE.

Liegt jedoch die Ausgleichszahlung, die TDL 3 zu leisten hat, unterhalb der Summe der Mindestpreise, d. h. unterhalb von 53 GE, so stellt sich für TDL 1 und 2 sogar ein Verlust ein. In diesem Fall haben die beiden TDL keinen Anreiz an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich durch die Kooperation schlechter stellen. Diese Gewinnverteilungsmethode kann somit nicht ohne weitere Anpassungen auf den Fall

angewendet werden, bei dem die TDL gleichzeitig die Rollen von Anbieter und Bieter in der Kooperation einnehmen, sondern nur auf den Fall, dass der Anbieter von Transportaufträgen nicht zur Menge der Bieter gehört. Dieser Nachteil kann allerdings dadurch behoben werden, dass die Ausgleichszahlungen immer mindestens der Summe der Mindestpreise, der im Auftragsbündel enthaltenen Transportaufträge, entsprechen. Für das Beispiel also mindestens in Höhe von 53 GE geleistet werden.

Ein weiteres Problem, welches dadurch entsteht, dass die TDL gleichzeitig die Rollen von Anbietern und Bieter in der Kooperation einnehmen ist, dass das PPC keinen Aufschluss darüber gibt, wie der im Beispiel ermittelte verbleibende Gewinn von 22 GE auf TDL 1 und 2 aufzuteilen ist. Diese Vorgehensweise muss der Gewinnverteilungsmethode ebenfalls hinzugefügt werden. Wird eine Gleichverteilung der verbleibenden Gewinne vorgenommen, so erhalten TDL 1 und 2 jeweils $22/2=11$ GE. Insgesamt würde TDL 1 dann einen zusätzlichen Gewinn von 11 GE, TDL 2 von $10+11=21$ GE und TDL 3 von 14 GE erhalten. In der Summe ergeben sich wieder die 46 GE Gesamtgewinnzuwachs.

Beim PPC ist nicht unbedingt ein Anreiz für die TDL vorhanden an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich im Vergleich zur nicht-kooperativen Lösung verschlechtern können. Der Kooperationsanreiz lässt sich jedoch mit den von mir vorgeschlagenen Erweiterungen sicherstellen.

1. Summe der Ausgleichszahlungen muss mindestens der Summe der Mindestpreise entsprechen.
2. Gleichverteilung der verbleibenden Gewinne auf die Anbieter eines Auftragsbündels.

Eine leistungsgerechte Aufteilung der Gewinne wird bei dieser Gewinnverteilungsmethode nicht gefunden, da sie nicht dem tatsächlichen Beitrag zur Kooperation entspricht. Der Aufwand zur Berechnung der Gewinnverteilung ist gering, da die Ausgleichszahlungen nur in der Gebotsmatrix abgelesen werden müssen.

5.5.5 Verallgemeinerte Vickrey Auktion

Die Verallgemeinerte Vickrey Auktion (GVA) wurde von Varian und Mackie-Mason (1994) entwickelt, um als Erweiterung der Vickrey Auktion eine effiziente Allokation von Güterbündeln zu erreichen, bei der die Bieter ihre tatsächliche Zahlungsbereitschaft offenbaren.

Um die Ausgleichszahlung zu bestimmen, die die Auktionsgewinner in dieser Auktion zu leisten haben, muss die Allokation von Auftragsbündeln zu TDL jedoch mehrfach vorgenommen werden. Die zu leistende Ausgleichszahlung wird für jeden

Auktionsteilnehmer einzeln bestimmt. Zunächst wird eine kombinatorische Auktion durchgeführt, an der alle TDL teilnehmen. Im Anschluss wird für jeden Auktionsteilnehmer, der ein Auftragsbündel gewonnen hat, eine weitere kombinatorische Auktion durchgeführt, an der er nicht mehr teilnimmt. Wird der ohne ihn erreichbare Gesamtgewinn vom Gesamtgewinn mit allen Auktionsteilnehmern abgezogen, so ergibt sich der Anteil am Gesamtgewinn, den der Auktionsgewinner durch sein Gebot zur Kooperation beiträgt. Seine zu leistende Ausgleichszahlung entspricht nun der Differenz aus seinem Gebot und seinem Anteil am Gesamtgewinn.

Für das vorgestellte Beispiel ergibt sich die Ausgleichszahlung die TDL 2 als Gewinner des Auftragsbündels $\{3\}$ an den Anbieter 3 zu leisten hat, indem die kombinatorische Auktion noch einmal ohne ihn durchgeführt wird. Die Tabelle 5.6 zeigt, dass nun der TDL 3 das Auftragsbündel $\{1, 2, 3\}$ gewinnt, wobei der Gesamtgewinn 125 GE beträgt.

Tabelle 5.6: Ermittlung der Gesamtauszahlung ohne Teilnahme von TDL 2 in der GVA

Bieter	Auftragsbündel						
	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1, 2\}$	$\{1, 3\}$	$\{2, 3\}$	$\{1, 2, 3\}$
1	-8	45	8	38	14	61	72
3	25	64	34	89	59	100	125

Wird der Gesamtgewinn ohne TDL 2 vom Gesamtgewinn in der Ausgangslösung (Tabelle 5.4) abgezogen, so ergibt sich der Anteil von TDL 2 am Gesamtgewinn, als $133-125=8$ GE. Die zu leistende Ausgleichszahlung entspricht abschließend der Differenz zwischen dem Gebot von TDL 2 in der Ausgangslösung (Tabelle 5.4) und seinem Anteil am Gesamtgewinn ($44-8=36$ GE). Der zusätzliche Gewinn für den Anbieter 3 ergibt sich als $36-34=2$ GE, wobei 36 GE die erhaltene Ausgleichszahlung und 34 GE seinen Mindestpreis darstellt.

Wie schon beschrieben, stellt die Verallgemeinerte Vickrey Auktion eine effiziente Allokation der Güterbündel sicher, bei der die Bieter einen Anreiz zur Offenbarung ihrer tatsächlichen Zahlungsbereitschaft haben. Dies lässt sich nachweisen, indem die Auswirkungen von Geboten untersucht werden, die nicht der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft entsprechen. In der ersten Zeile der Tabelle 5.7 ist dazu die Ausgangslösung dargestellt, in der der TDL 2 seine tatsächliche Zahlungsbereitschaft als Gebot offenbart. Aus dem Gesamtgewinn mit und ohne seinem Gebot ermittelt sich sein Gewinn von 8 GE und seine zu leistende Ausgleichszahlung von 36 GE. TDL 2 hat nun zwei Möglichkeiten.

1. Er gibt ein Gebot ab (Zeile 2), welches unterhalb seiner Zahlungsbereitschaft liegt, zum Beispiel in Höhe von 40 GE. Dadurch verringert sich der Gesamtgewinn des KN auf 129 GE und sein Gewinn auf 4 GE. Die Ausgleichszahlung bleibt jedoch gleich. Dazu kommt das Risiko, bei einem noch niedrigeren Gebot das Auftragsbündel nicht zu gewinnen.
2. Er gibt ein Gebot ab (Zeile 3), welches oberhalb seiner Zahlungsbereitschaft liegt, zum Beispiel in Höhe von 48 GE. Dadurch ergibt sich ein Gesamtgewinn für das KN von 137 GE und sein Gewinn wird mit 12 GE berechnet. Die Ausgleichszahlung bleibt gleich. Da jedoch seine tatsächliche Zahlungsbereitschaft nur bei 44 GE liegt, beträgt sein tatsächlicher Gewinn ebenfalls nur 8 GE, er hat sich also durch das höhere Gebot nicht verändert.

Tabelle 5.7: Variation der Gebote durch TDL 2 in der GVA

Gebot	Gesamtgewinn mit TDL 2	Gesamtgewinn ohne TDL 2	ermittelter Gewinn für TDL 2	Ausgleichszahlung
44	133	125	8	36
40	129	125	4	36
48	137	125	12	36

Der TDL 2 hat demzufolge keinen Anreiz ein Gebot abzugeben, welches höher als seine Zahlungsbereitschaft ist, da sein Gewinn dabei unverändert bleibt. Der TDL 2 hat ebenfalls keinen Anreiz ein Gebot abzugeben, welches niedriger als seine Zahlungsbereitschaft ist, da sein Gewinn hierbei sinkt und sich gleichzeitig das Risiko einstellt, die Auftragsbündel nicht mehr zu gewinnen. Er wird also bei der Verallgemeinerten Vickrey Auktion, wie schon in der einfachen Vickrey Auktion, seine tatsächliche Zahlungsbereitschaft offenbaren.

Die Ausgleichszahlung die TDL 3 als Gewinner des Auftragsbündels $\{1, 2\}$ an die Anbieter 1 und 2 zu zahlen hat, ergibt sich analog zur Ausgleichszahlung für TDL 2. In der Tabelle 5.8 ist das Ergebnis dieser Auktion dargestellt, wobei der Gesamtgewinn diesmal 106 GE beträgt. Der Anteil von TDL 3 am Gewinn entspricht $133 - 106 = 27$ GE. Seine zu leistende Ausgleichszahlung beträgt demnach $89 - 27 = 62$ GE. Der zusätzliche Gewinn für die Anbieter 1 und 2 ergibt sich als $62 - (-8 + 61) = 9$ GE, wobei -8 GE und 61 GE die Mindestpreise darstellen.

Leider gibt dieser Gewinnverteilungsansatz ebenfalls keinen Aufschluss darüber, wie der restliche Gewinn von 9 GE auf TDL 1 und 2 aufzuteilen ist. Er kann wieder

Tabelle 5.8: Ermittlung der Gesamtauszahlung ohne Teilnahme von TDL 3 in der GVA

Bieter	Auftragsbündel						
	{1}	{2}	{3}	{1, 2}	{1, 3}	{2, 3}	{1, 2, 3}
1	-8	45	8	38	14	61	72
2	18	61	44	75	58	95	106

nicht ohne weiteres auf den Fall angewendet werden, bei dem die TDL gleichzeitig die Rollen von Anbieter und Bieter in der Kooperation einnehmen, sondern nur auf den Fall, dass der Anbieter von Transportaufträgen nicht zur Menge der Bieter gehört. Um dieses Verfahren auf den ersten Fall anwenden zu können, muss diese Verteilung also ebenfalls vorher festgelegt werden. Wird auch hier eine Gleichverteilung der verbleibenden Gewinne vorgenommen, so erhalten TDL 1 und 2 jeweils $9/2=4,5$ GE. Insgesamt würde TDL 1 einen zusätzlichen Gewinn von 4,5 GE, TDL 2 von $8+4,5=12,5$ GE und TDL 3 von $2+27=29$ GE erhalten. In der Summe entsteht wieder ein Gesamtgewinnzuwachs von 46 GE.

Auch für diesen Gewinnverteilungsansatz besteht für die TDL ein Anreiz an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich dadurch nicht schlechter stellen. Die Aufteilung der Gewinne ist jedoch nicht leistungsgerecht. Der Auktionsgewinner erhält zwar den zusätzlichen Gewinn, den er durch sein Gebot zur Kooperation beiträgt, jedoch müsste zur Bestimmung seines tatsächlichen Beitrags zum Gesamtgewinn auch der Transportauftrag berücksichtigt werden, den der Auktionsgewinner im Rahmen der Kooperation anbietet. Statt nur die Zeile des Auktionsgewinners aus der Gebotsmatrix der zweiten kombinatorischen Auktion zu eliminieren, müssten ebenfalls die Auftragsbündel, die den vom Auktionsgewinner angebotenen Transportauftrag enthalten, eliminiert werden. Aufgrund der wiederholten Ermittlung der Allokation von Auftragsbündeln zu TDL ist der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung für diesen Ansatz hoch.

5.5.6 Shapley Value

Der Shapley Value (Shapley, 1953) ist ein Lösungskonzept aus der kooperativen Spieltheorie. Er gibt an, welche Auszahlungen (Gewinne) ein Spieler $i \in M$ in Abhängigkeit vom Eintritt in die Koalitionen $K \subseteq M$ von anderen Spielern erhalten soll. Diese Auszahlungen orientieren sich an der durchschnittlichen marginalen Beteiligung des Spielers i am Gesamtwert der Koalition $v(K)$ und zusätzlich am

Beitrittszeitpunkt zu einer Koalition K . Die marginale Beteiligung eines Spielers i berechnet sich als Differenz zwischen dem Gesamtwert der Koalition mit dem Teilnehmer $v(K \cup \{i\})$ und dem Gesamtwert ohne den Teilnehmer $v(K)$. Der Shapley Value y_i ergibt sich als

$$y_i = \sum_{K:i \notin K} \frac{|K|!(|M| - |K| - 1)!}{|M|!} (v(K \cup \{i\}) - v(K)) \quad \forall i \in M. \quad (5.1)$$

Der Zähler im Bruch entspricht der Anzahl an Permutationen, in denen Spieler i zu einer in beliebiger Reihenfolge entstandenen Koalition von Spielern aus K beitrifft. Der Nenner $|M|!$ hingegen stellt die Anzahl aller möglichen Permutationen dar. Somit wird der Shapley Value als durchschnittlicher marginaler Beitrag eines Teilnehmers i zu allen seinen Koalitionen zu allen möglichen Beitrittszeitpunkten berechnet.

Der Shapley Value soll nun exemplarisch anhand des in Kapitel 5.5 eingeführten Beispiels berechnet werden, wobei die TDL den Spielern entsprechen und $|M| = 3$ ist. Zunächst erfolgt die Berechnung der Gesamtwerte der $2^{|M|} = 8$ Koalitionen, dargestellt in Tabelle 5.9.

Tabelle 5.9: Gesamtwerte der Koalitionen zur Berechnung des Shapley Values

$2^{ M }$	$\{0\}$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1, 2\}$	$\{1, 3\}$	$\{2, 3\}$	$\{1, 2, 3\}$
$v(S)$	0	87	87	87	109	120	100	133

Für die Koalitionen $\{1\}$, $\{2\}$ und $\{3\}$ herrscht keine Kooperation zwischen den TDL. Der Gesamtwert jeder dieser Koalitionen berechnet sich aus der Summe der von den TDL für die Selbsterstellung realisierten Gewinne, als $-8+61+34=87$ GE. In der Koalition $\{1, 2\}$ kooperieren nur TDL 1 und TDL 2. Sie ermitteln die Zuordnung von Auftragsbündeln zu TDL nur für ihre beiden eingebrachten Aufträge 1 und 2. In der optimalen Zuordnung, dargestellt in Tabelle 5.10, gewinnt TDL 2 das Auftragsbündel $\{1, 2\}$ und der Gesamtgewinn beträgt dabei 75 GE. TDL 3 führt in diesem Fall seinen Auftrag selbst durch und realisiert einen Gewinn von 34 GE. Insgesamt ergibt sich somit ein Gesamtwert für die Koalition $\{1, 2\}$ von $75+34=109$ GE.

Mithilfe der Tabelle 5.9 kann nun anhand der Formel 5.1 für jeden Spieler der Shapley Value ermittelt werden. Die Spieler können nur zu Koalitionen beitreten, in denen sich schon andere Spieler befinden. TDL 1 tritt somit nur zu drei Koalitionen,

Tabelle 5.10: Matrix für die Gebote von TDL 1 und 2 auf drei Auftragskombinationen zur Berechnung des Shapley Values

Bieter	Auftragsbündel		
	{1}	{2}	{1, 2}
1	-8	45	38
2	18	61	75

{2}, {3} und {2, 3} bei. Der Shapley Value für TDL 1 ergibt sich zu

$$y_1 = \left(\frac{1!(3-1-1)!}{3!}(109-87)\right) + \left(\frac{1!(3-1-1)!}{3!}(120-87)\right) + \left(\frac{2!(3-2-1)!}{3!}(133-100)\right) = 20,1\bar{6} \text{ GE}$$

Für TDL 2 entspricht der Shapley Value $10,1\bar{6}$ GE und für TDL 3 entspricht er $15,6$ GE. Werden die Shapley Values aller drei TDL aufaddiert, so ergibt sich ein zusätzlicher Gesamtgewinn von 46 GE. Dieser entspricht genau der Differenz zwischen der kooperativen Lösung, in der alle drei Spieler zusammenarbeiten (133 GE) und der nicht kooperativen Lösung, in der jeder Spieler unabhängig von den anderen agiert (87 GE).

Für diesen Gewinnverteilungsansatz besteht für die TDL ein Anreiz an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich dadurch nicht schlechter stellen. Die Aufteilung der Gewinne für diesen Ansatz ist leistungsgerecht, da jeder Kooperationssteilnehmer den zusätzlichen Gewinn erhält, den er zur Kooperation beiträgt. Aufgrund der Berechnung der optimalen Allokation von Auftragsbündeln zu TDL für alle $2^{|M|}$ möglichen Koalitionen ist der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung für diesen Ansatz hoch.

5.5.7 Collaboration Advantage Index

Krajewska und Kopfer (2006) stellen die komplexeste Methode zur Gewinnverteilung vor. Die Gewinnverteilung ist dabei in einen dreistufigen Kooperationsansatz integriert.

- In der Vorbereitungsphase ermittelt jeder TDL die Selbsterstellungskosten für jeden von ihm akquirierten Transportauftrag.
- In der Optimierungsphase findet eine kombinatorische Auktion unter der Zielstellung der Minimierung der Gesamtkosten statt. Dazu ermitteln die TDL

die potenziellen Kosten der Durchführung von für sie interessanten Auftragsbündeln und für die Durchführung jedes einzelnen Auftrags aus solch einem Auftragsbündel.

- In der Gewinnverteilungsphase wird der Kooperationsgewinn so unter den TDL verteilt, dass ihre finanzielle Situation mindestens erhalten bleibt.

Die Zahlungsströme der Gewinnverteilung sind in der Abbildung 5.6 dargestellt.

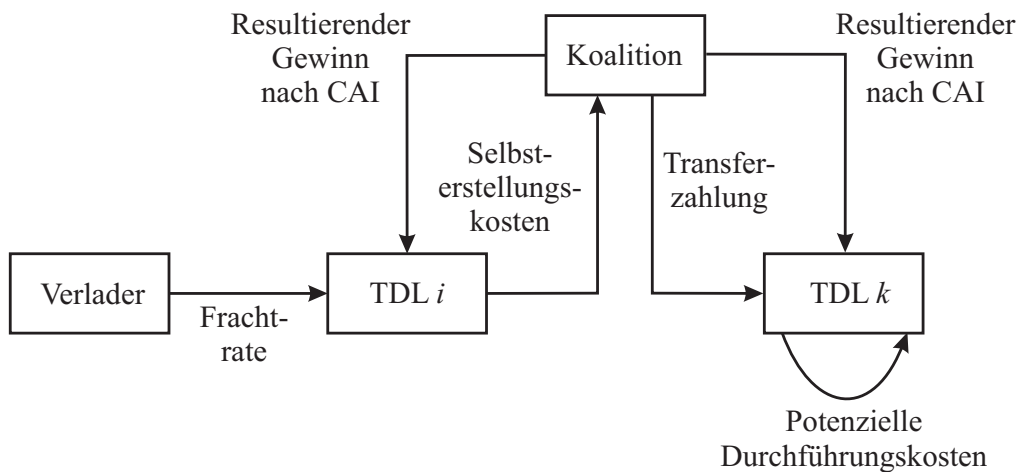


Abbildung 5.6: Zahlungsströme in der Gewinnverteilungsphase für den Ansatz von Krajewska und Kopfer (2006)

Der Anbieter des Transportauftrags, in der Abbildung $TDL\ i \in M$, erhält die vom Verleger gezahlte Frachtrate und leistet eine Zahlung in Höhe der Selbsterstellungskosten an die Koalition. Es ist somit sichergestellt, dass sich die finanzielle Situation des Anbieters nicht verschlechtert. Der ausführende TDL, in der Abbildung $TDL\ k \in M$, erhält eine Transferzahlung von der Koalition, die der Summe aus den minimalen Durchführungskosten, d. h. der niedrigsten potenziellen Durchführungskosten für alle Einzelaufträge des Auftragsbündels, entspricht. Der exklusive Gewinn des ausführenden TDL ergibt sich dann als Differenz zwischen der Transferzahlung und seinen potenziellen Durchführungskosten für das Auftragsbündel. Der restliche Gewinn der Kooperation G_{S_k} für Auftragsbündel $S_k \subseteq S$ ergibt sich aus der Differenz zwischen den Zahlungen der Anbieter an die Koalition und den Transferpreisen, den die Koalition an die ausführenden TDL zahlt. Er wird unter den Kooperationsmitgliedern unter Berechnung des Collaboration Advantage Index (CAI) verteilt.

Der CAI_{iS_k} wird für jedes Auftragsbündel S_k und jeden TDL i einzeln berechnet. Dabei ist zu unterscheiden, ob der TDL die Aufträge des betrachteten Bündels anbietet oder durchführt. Ist der TDL ein Anbieter von Aufträgen, so entspricht sein

CAI_{iS_k} der Differenz zwischen seinen Selbsterstellungskosten und den minimalen Durchführungskosten für alle von ihm angebotenen Aufträge. Führt ein TDL das Bündel durch, so entspricht sein CAI_{iS_k} der Differenz aus der Summe aller Selbsterstellungskosten der Aufträge im betrachteten Bündel und dem Transferpreis. Die resultierenden Gewinne der Koalition RG_{iS_k} werden für jedes Auftragsbündel S_k und für jeden TDL i proportional zum CAI_{iS_k} verrechnet:

$$RG_{ik} = \frac{CAI_{iS_k} \cdot G_{S_k}}{\sum_{i \in M, k \in S} CAI_{iS_k}}. \quad (5.2)$$

Die Berechnung der RG_{iS_k} soll nun anhand des in Kapitel 5.5.2 eingeführten Beispiels erfolgen. In der Vorbereitungsphase ermitteln die drei TDL die Selbsterstellungskosten für ihre akquirierten Transportaufträge. Für Auftrag 1 von TDL 1 betragen diese 48 GE. Für Auftrag 2 von TDL 2 entsprechend 35 GE und für Auftrag 3 von TDL 3 22 GE. Die Werte sind in der Tabelle 5.3 ablesbar.

In der Optimierungsphase ermitteln die drei TDL ihre potenziellen Durchführungskosten, zusammengefasst in Tabelle 5.11. Die potenziellen Durchführungskosten für die Auftragsbündel ergeben sich, indem von den Geboten der TDL in Tabelle 5.4 die Erlöse der enthaltenen Transportaufträge abgezogen werden. Zusätzlich sind in der Spalte Min die niedrigsten potenziellen Durchführungskosten für die Einzelaufträge über alle TDL aufgeführt, die zur Berechnung der Transferpreise benötigt werden.

Tabelle 5.11: Potenzielle Durchführungskosten aller Auftragsbündel für TDL 1, 2 und 3 zur Berechnung des CAI

	TDL 1	TDL 2	TDL 3	Min
{1}	48	22	15	15
{2}	51	35	32	32
{3}	48	12	22	12
{1, 2}	98	61	47	-
{1, 3}	82	38	37	-
{2, 3}	91	57	52	-
{1, 2, 3}	120	86	67	-

In der von Krajewska und Kopfer (2006) verwendeten kombinatorischen Auktion wird eine Zuordnung von Auftragsbündeln zu TDL ermittelt, die die Gesamtkosten der Kooperation minimiert. Da die Minimierung der Gesamtkosten und die Maximierung des Gesamtgewinns gleichläufige Ziele sind, unterscheidet sich die Lösung

nicht von der, die bei Maximierung des Gesamtgewinns der Kooperation entsteht, d. h. Auftragsbündel $\{3\}$ wird immer noch TDL 2 und Auftragsbündel $\{1, 2\}$ immer noch TDL 3 zugeordnet. Der durch die neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL entstandene Kooperationsgewinn von 46 GE wird nun für jedes Auftragsbündel einzeln unter den TDL verteilt.

Das TDL 2 zugeordnete Auftragsbündel $\{3\}$ wurde von TDL 3 angeboten. TDL 3 erhält demzufolge die Erlöse aus dem Auftragsbündel (56 GE) und leistet eine Zahlung in Höhe seiner Selbsterstellungskosten (22 GE) an die Kooperation. Sein Gewinn hat sich im Vergleich zur Selbsterstellung also nicht verändert. TDL 2 erhält für die Durchführung von Auftragsbündel $\{3\}$ gemäß Tabelle 5.11 eine Transferzahlung in Höhe der minimalen potenziellen Durchführungskosten von 12 GE. Sein Gewinn ergibt sich als Differenz zwischen der Transferzahlung und seinen potenziellen Durchführungskosten $12-12=0$ GE, bleibt also ebenfalls unverändert.

Krajewska und Kopfer (2006) gehen davon aus, dass der Gewinn des ausführenden TDL immer größer oder gleich null ist. Besteht das Auftragsbündel jedoch nur aus einem Transportauftrag, können die Transferzahlungen die potenziellen Durchführungskosten nicht übersteigen und demnach ist der Gewinn des ausführenden TDL in diesem Fall nie größer als null. Ein Verlust für den ausführenden TDL ist demgegenüber nur ausgeschlossen, wenn für die Transportaufträge Subadditivität gilt. Die Subadditivität sagt aus, dass die separate Durchführung von zwei Transportaufträgen mit höheren Kosten verbunden ist, als die gebündelte Durchführung. Da sich Krajewska und Kopfer (2006) jedoch mit dem simultanen Einsammeln und Ausliefern von Gütern beschäftigen, kann nach Pankratz (2003) die Subadditivität nicht unterstellt werden. Dies verdeutlicht die Abbildung 5.7.

Das linke Diagramm zeigt drei Transportaufträge mit jeweils einem Pickuport und einem Deliveryort und die im Rahmen der Tourenplanung ermittelte Tour. Das rechte Diagramm zeigt die veränderte Tour, wenn ein vierter Transportauftrag durchzuführen ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die zusätzliche Durchführung des vierten Auftrags die zurückzulegende Wegstrecke, im Vergleich zur separaten Durchführung, größer und nicht kleiner wird und somit die Gesamtkosten der Durchführung steigen.

Die Annahme der Subadditivität muss also fallen gelassen werden. Dann zeigt sich, dass der Transferpreis durchaus kleiner als die Selbsterstellungskosten des ausführenden TDL sein kann und sich ein Verlust einstellt. Im Beispiel in Tabelle 5.12 gewinnt TDL 1 den Transportauftrag 2 und der TDL 2 den Transportauftrag 1. Da die Selbsterstellungskosten von TDL 2 für die getrennte Durchführung der Aufträge 1 und 2 kleiner sind als für die gebündelte Durchführung, ist die Subadditivität nicht gegeben. Für TDL 1 ergibt sich ein Transferpreis (minimale potenzielle Durchführungskosten) von 15 GE, wobei seine Selbsterstellungskosten 17 GE betra-

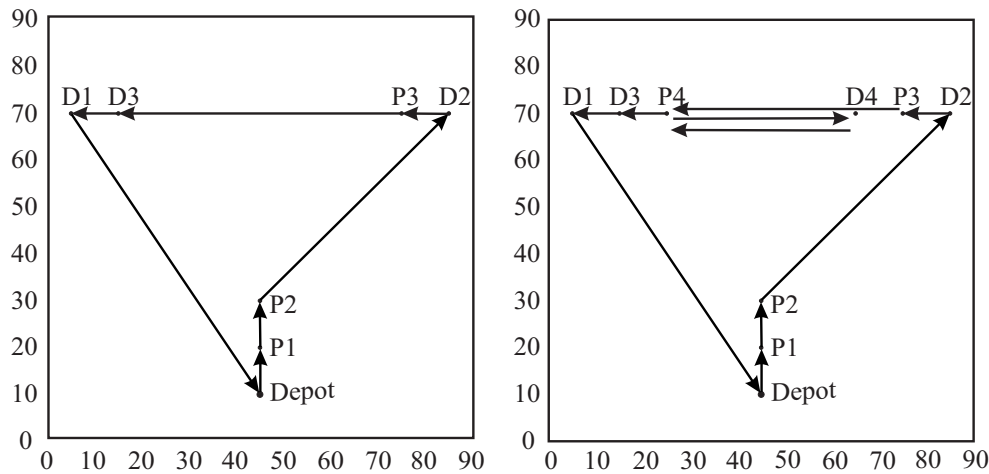


Abbildung 5.7: Beispiel für Anstieg der Kosten bei gebündelter Auftragsdurchführung

gen. Sein Verlust beträgt demnach $17-15=-2$ GE. In diesem Fall hat TDL 1 keinen Anreiz Transportauftrag 2 durchzuführen und der Tausch wird nicht vorgenommen.

Tabelle 5.12: Gebotsmatrix für TDL 1 und 2 bei nicht vorhandener Subadditivität

TDL	Auftragsbündel		
	{1}	{2}	{1, 2}
1	19	17	34
2	16	15	37

Der restliche Gewinn der Kooperation für das Auftragsbündel G_{S_k} ergibt sich nun aus der Differenz zwischen den vom TDL 3 gezahlten Selbsterstellungskosten und dem von der Kooperation gezahlten Transferpreis $G_{S_k}=22-12=10$ GE. Um diesen auf die beteiligten TDL zu verteilen, wird der CAI_{iS_k} für jeden TDL ermittelt. Da TDL 3 Anbieter des Auftrags 3 ist, ermittelt sich der $CAI_{3\{3\}}$ als Differenz zwischen seinen Selbsterstellungskosten und den minimalen potenziellen Durchführungskosten $CAI_{3\{3\}}=22-12=10$ GE. Der TDL 2 ist der ausführende TDL und der $CAI_{2\{3\}}$ ergibt sich aus der Differenz zwischen den Selbsterstellungskosten und der Transferzahlung $CAI_{2\{3\}}=12-12=0$ GE.

Der resultierende Gewinn der Koalition RG_{iS_k} für das Auftragsbündel {3} wird nun für jeden TDL nach der Formel 5.2 proportional zum CAI_{iS_k} verrechnet. Da die

minimalen potenziellen Ausführungskosten der Transferzahlung entsprechen, betragen

$$\begin{aligned} RG_{2\{3\}} &= \frac{0 \cdot 10}{10} = 0 \text{ GE} \text{ und} \\ RG_{3\{3\}} &= \frac{10 \cdot 10}{10} = 10 \text{ GE}. \end{aligned}$$

Für das Auftragsbündel $\{1, 2\}$ erfolgt die Berechnung, mit den in Tabelle 5.11 ermittelten Durchführungskosten, analog. TDL 1 und 2 sind Anbieter und TDL 3 führt das Auftragsbündel durch. TDL 1 erhält einen Erlös von 40 GE für Auftrag 1 und zahlt 48 GE an die Kooperation. TDL 2 erhält einen Erlös von 96 GE für Auftrag 2 und zahlt 35 GE an die Kooperation. Die Transferzahlung, die TDL 3 für das Auftragsbündel erhält, entspricht der Summe der niedrigsten Durchführungskosten $15+32=47$ GE. Sein exklusiver Gewinn beträgt $47-47=0$ GE. Für Auftragsbündel, die aus mehr als einem Transportauftrag bestehen, ist im Gegensatz zu Auftragsbündeln mit nur einem Transportauftrag ein Gewinn größer null möglich, da die Summe der potenziellen Durchführungskosten durchaus kleiner als die Selbsterstellungskosten für das Bündel sein können. Da hier ebenfalls für die Transportaufträge keine Subadditivität gilt, kann der ausführenden TDL aber wiederum einen Verlust erleiden. Der G_{S_k} für die Koalition beträgt $(48+35)-47=36$ GE. Die CAI_{iS_k} der drei TDL für das Auftragsbündel $\{1, 2\}$ betragen

$$\begin{aligned} CAI_{1\{1,2\}} &= 48 - 15 = 33 \text{ GE}, \\ CAI_{2\{1,2\}} &= 35 - 32 = 3 \text{ GE} \text{ und} \\ CAI_{3\{1,2\}} &= 47 - 47 = 0 \text{ GE}. \end{aligned}$$

Die RG_{iS_k} der drei TDL für das Auftragsbündel $\{1, 2\}$ ergeben sich zu

$$\begin{aligned} RG_{1\{1,2\}} &= \frac{33 \cdot 36}{33 + 3} = 33 \text{ GE}, \\ RG_{2\{1,2\}} &= \frac{3 \cdot 36}{33 + 3} = 3 \text{ GE} \text{ und} \\ RG_{3\{1,2\}} &= \frac{0 \cdot 36}{33 + 3} = 0 \text{ GE}. \end{aligned}$$

Insgesamt erhalten die TDL für alle Auftragsbündel die in der Tabelle 5.13 aufgelisteten Gewinnauszahlungen durch die Kooperation. Diese entsprechen in der Summe genau dem im Beispiel berechneten zusätzlichen Gewinn der Kooperation von 46 GE.

Die Anbieter der Transportaufträge, die in versteigerten Auftragsbündeln enthalten sind, erhalten den gesamten zusätzlichen Gewinn, der durch den Unterschied

Tabelle 5.13: Gewinnauszahlung für TDL 1, 2 und 3 im Rahmen der Kooperation

	TDL 1	TDL 2	TDL 3
{3}	0	0	10
{1, 2}	33	3	0
Σ	33	3	10

zwischen ihren Selbsterstellungskosten und denen des Auktionsgewinners entsteht. Die ausführenden TDL profitieren nur von den Bündelungseffekten, die sie bei einer Durchführung mehrerer Transportaufträge realisieren können. Da diese Bündelung nicht immer vorteilhaft ist, können dabei auch Verluste entstehen. Dieser Gewinnverteilungsansatz bieten den TDL also nicht unbedingt einen Anreiz an der Kooperation teilzunehmen. Aufgrund dessen, dass die resultierenden Gewinne der TDL für jedes Auftragsbündel einzeln proportional zum CAI verrechnet werden, ist die Aufteilung der Gewinne nicht leistungsgerecht. Jeder TDL erhält jeweils nur die Gewinnauszahlung, die seinem Beitrag aus der Neuordnung des Auftragsbündels entspricht, aber nicht dem Beitrag zur gesamten Kooperation. Der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung ist gering, da zu deren Berechnung die Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL nur einmal erfolgen muss.

5.5.8 Vergleich der Gewinnverteilungsansätze

Für einen Vergleich der fünf Gewinnverteilungsansätze sind die Ergebnisse des in Kapitel 5.5.2 eingeführten Beispiels und die drei Kriterien in der Tabelle 5.14 zusammengefasst.

Die Gewinnverteilungen der fünf Methoden unterscheiden sich teilweise sehr deutlich. Dies lässt sich zum einen auf die Struktur des untersuchten Beispiels und zum anderen auf die Vorgehensweise der Methoden zurückführen. Bei der Gleichverteilung der Gewinne wird weder der Anbieter von Transportaufträgen noch der ausführende TDL bevorzugt. Alle erhalten den gleichen Anteil am Gewinn. Demgegenüber erhalten die ausführenden TDL beim PPC für das untersuchte Beispiel einen größeren Anteil am Gewinn als die Anbieter. Der Wirkungszusammenhang lässt sich folgendermaßen beschreiben. Liegt das zweithöchste Gebot für das versteigerte Auftragsbündel nahe den Mindestpreisen der Einzelaufträge, so erhält der ausführende TDL einen größeren Anteil am Gewinn als der Anbieter und umgekehrt. Auch beim GVA erhalten die ausführenden TDL im Beispiel einen größeren Anteil am Gewinn als die Anbieter. Hier ist der Anteil am Gewinn für die ausführenden

Tabelle 5.14: Vergleich der Gewinnverteilungsansätze anhand des Beispiels und der drei Kriterien

Ansätze	Gewinnverteilung in GE			Anreiz	leistungs- gerecht	Aufwand
	TDL 1	TDL 2	TDL 3			
gleiche Gewinne	15,33	15,33	15,33	ja	nein	gering
PPC	11,00	21,00	14,00	ja	nein	gering
GVA	4,50	12,50	29,00	ja	nein	hoch
Shapley Value	22,83	8,83	14,33	ja	ja	hoch
CAI	33,00	3,00	10,00	nein	nein	gering

TDL höher, je mehr ihr Gebot für ein versteigertes Auftragsbündel zum Gesamtgewinn der Kooperation beiträgt. Der Shapley Value ordnet jedem beteiligten TDL den Anteil am Gesamtgewinn zu, den er zur Kooperation beigetragen hat. Hier wird weder der Anbieter noch der ausführende TDL explizit bevorzugt. Beim CAI erhalten im untersuchten Beispiel nur die Anbieter der Transportaufträge einen Anteil am zusätzlichen Gewinn. Die ausführenden TDL profitieren nur von den Bündelungseffekten, die sie bei einer Durchführung mehrerer Transportaufträge realisieren können. Da diese Bündelung nicht immer vorteilhaft ist, können dabei auch Verluste entstehen.

Alle Gewinnverteilungsansätze bieten den TDL einen Anreiz an einer Kooperation teilzunehmen, bei der die beteiligten TDL gleichzeitig als Anbieter und Bieter auftreten. Lediglich für den CAI wird ein Kooperationsanreiz nur dann sichergestellt, wenn die Kostensubadditivität gilt.

Die finanzielle Situation der TDL verschlechtert sich bei fast allen Ansätzen nicht. Eine leistungsgerechte Aufteilung der zusätzlichen Gewinne, d. h. nach dem individuellen Beitrag der TDL zur Kooperation, liegt nur für den Shapley Wert vor. Allerdings sehen die GVA und der CAI eine Verteilung der zusätzlichen Gewinne nach dem Beitrag der TDL für jedes Auftragsbündel vor. Der Aufwand zur Ermittlung der Gewinnverteilung hängt davon ab, ob die optimale Allokation von Auftragsbündeln zu TDL häufig vorgenommen werden muss, oder nicht. Erfolgt sie wie im Fall der GVA und des Shapley Werts mehrfach, so entsteht ein hoher Aufwand für die Gewinnverteilung. Für alle anderen Ansätze ist der Aufwand gering.

Kapitel 6

Dezentrale Verfahren zur Lösung kooperativer Tourenplanungsprobleme

Wie schon im Kapitel 5 beschrieben, kann das kooperative Tourenplanungsproblem zentral und dezentral gelöst werden. Standardisierte Tourenplanungsmodelle, wie das MDTSP-c oder MDTSPPD ermöglichen eine zentrale Lösung des Problems. Für die dezentrale Lösung muss ein geeignetes Verfahren jedoch neu entwickelt werden. Ein in Berger und Bierwirth (2008) entwickeltes Framework schafft zunächst einen allgemeinen Rahmen für den Ablauf der dezentralen Reallokation von Transportaufträgen zu TDL (Kapitel 6.1). Auf Basis der verschiedenen Freiheitsgrade des Frameworks werden nach Berger und Bierwirth (2007) im Kapitel 6.2 und 6.3 zwei verschiedene Lösungsverfahren konkretisiert.

6.1 Framework zur kooperativen Tourenplanung

6.1.1 Voraussetzungen und Ziele

Das Framework für die kooperative Tourenplanung bietet ein Grundgerüst für die Koordination des Auftragsaustauschs im kooperativen Netzwerk (KN). Wie schon in Kapitel 5 beschrieben, wird angenommen, dass ein KN aus m unabhängigen TDL besteht. Zusätzlich wird angenommen, dass jeder TDL $i \in M = \{1, 2, \dots, m\}$ eine bestimmte Menge an Transportaufträgen N_i^0 für eine Periode akquiriert hat. Innerhalb des KN erfolgt ein Austausch von Transportaufträgen unter den TDL, mit dem Ziel, den Gesamtgewinn im KN zu erhöhen, aber möglichst wenig Informationen untereinander preiszugeben. Um einen Anreiz für die Teilnahme an dem Verfahren

zu geben, muss gewährleistet werden, dass sich die Beteiligten dabei nicht schlechter stellen.

Die Transaktionen innerhalb dieses KN, entsprechen Markttransaktionen in einem geschlossenen Transportmarkt. Jeder TDL kann auf diesem Markt als Anbieter und Nachfrager agieren. Das folgende Framework bildet diesen Markt für Transportaufträge ab und bietet die Möglichkeit unterschiedliche Koordinationsmechanismen zu untersuchen. Hierzu werden einige Annahmen getroffen:

1. Die TDL sind Gewinnmaximierer.
2. Die TDL halten die Regeln des Verfahrens ein, d. h. sie geben für alle Transportaufträge ihre tatsächliche Zahlungsbereitschaft an.
3. Es existiert eine zentrale Instanz, die von allen TDL akzeptiert wird.

6.1.2 Aufbau

Das Framework für den Austausch von Transportaufträgen besteht aus einer oberen und einer unteren Ebene. Auf der oberen Ebene findet die Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL statt, während auf der unteren Ebene jeder TDL seine individuellen Touren plant. Der Aufbau des Frameworks ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

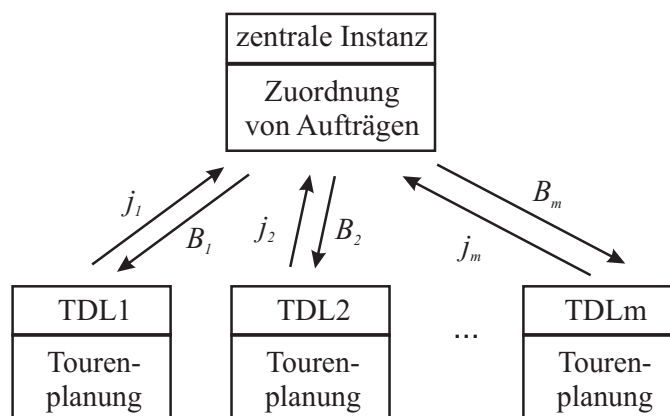


Abbildung 6.1: Framework für den Austausch von Transportaufträgen

Ausgehend von einer Anfangszuordnung der Transportaufträge zu den TDL, legt jeder TDL auf der unteren Ebene des Frameworks fest, welche Aufträge er selbst durchführt und welche er fremd vergeben möchte. Dies geschieht auf Basis seiner individuellen Tourenplanung, wobei die bei der Durchführung eines Transportauftrags

entstehenden Transportkosten für jeden Transportauftrag individuell ermittelt werden. Anschließend gibt er der oberen Ebene einen Transportauftrag j_i , den er fremd vergeben möchte, zusammen mit den dazugehörigen Transportkosten bekannt. Auf der oberen Ebene erfolgt die Reallokation der von allen TDL zur Fremdvergabe freigegebenen Transportaufträge mit Hilfe von Koordinationsmechanismen. Dabei sind weitere Kommunikationsschritte zwischen oberer und unterer Ebene notwendig. Jeder TDL erhält im Anschluss an die Zuordnung ein Bündel B_i von Transportaufträgen zurück.

Im einfachen Fall enthält das Bündel genau den Transportauftrag, den der TDL fremd vergeben wollte, d. h. es erfolgt keine Reallokation. In einem anderen Fall enthält das Bündel gar keinen Transportauftrag, was bedeutet, dass der vom TDL freigegebene Transportauftrag an einen anderen TDL fremd vergeben wird. Darüber hinaus kann ein Bündel ebenfalls mehrere Transportaufträge enthalten.

6.1.3 Ablauf

Ausgehend von der Beschreibung des Frameworks erfolgt nun eine detaillierte Darstellung des Ablaufs der Reallokation von Aufträgen in fünf Schritten. Die Basis bildet hierbei wiederum die Anfangszuordnung der Transportaufträge im KN. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verteilung der in einer Periode akquirierten Auftragsmenge N auf alle TDL vorliegt $N = N_1^0 \cup N_2^0 \cup \dots \cup N_m^0$. Jeder TDL bewertet zunächst jeden seiner selbst akquirierten Transportaufträge danach, wie viel Grenzgewinn durch ihn realisiert werden kann.

Schritt 1: Ausgehend von den Grenzgewinnen, wählt jeder TDL i den Auftrag j_i mit dem geringsten Grenzgewinn für die Fremdvergabe aus. Der ermittelte Grenzgewinn dient dem TDL im Ablauf des Reallokationsverfahrens als Mindestpreis, unterhalb dessen er den Transportauftrag nicht abgibt.

Schritt 2: Die von den TDL zur Fremdvergabe ausgewählten Transportaufträge bilden den Auftragspool $S = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$. Aus diesem Auftragspool erstellt die zentrale Instanz Auftragsbündel $S_k \subseteq S$ ($k = 1, 2, \dots, s$) für den Reallokationsprozess nach einem vorgegebenen Schema. Nach der Bildung der Auftragsbündel werden diese allen TDL bekannt gegeben.

Schritt 3: Jeder TDL ermittelt den Grenzgewinn für jedes angebotene Auftragsbündel ohne dabei Ausgleichszahlungen zu berücksichtigen, indem er eine neue Tourenplanung durchführt.

Schritt 4: Jedes Auftragsbündel wird, nach einem vorgegebenen Austauschmechanismus im KN, dem TDL zugeteilt, der hierfür den höchsten Grenzgewinn

erwirtschaften kann. Ist ein Auftrag in mehreren Bündeln enthalten, kann nur eines dieser Bündel einem TDL zugewiesen werden.

Schritt 5: Ist die Summe der in Schritt 3 ermittelten Grenzgewinne unter der in Schritt 4 vorgenommenen Reallokation größer als die Mindestpreise aller angebotenen Aufträge, so hat sich der Gesamtdeckungsbeitrag im KN erhöht. In diesem Fall werden Ausgleichszahlungen ermittelt und der zusätzliche Gewinn wird unter den teilnehmenden TDL aufgeteilt.

Diese fünf Schritte werden solange wiederholt, bis im Schritt 5 der Gesamtdeckungsbeitrag stagniert. Dass der Gesamtdeckungsbeitrag im Schritt 5 sinkt, kann aufgrund des Ablaufs im Framework ausgeschlossen werden, da eine Reallokation der Transportaufträge zu anderen TDL nur dann stattfindet, wenn sie dafür höhere Deckungsbeiträge erwirtschaften können. Die Schritte 1 und 3 werden dezentral von den TDL auf der unteren Ebene des Frameworks ausgeführt. Demgegenüber werden die Schritte 2, 4 und 5 zentral durch eine unabhängige Instanz auf der oberen Ebene des Frameworks ausgeführt.

6.1.4 Freiheitsgrade

Wie im Aufbau und Ablauf ersichtlich, besitzt das Framework vier Freiheitsgrade.

1. Das Schema zur Bildung der Auftragsbündel.
2. Der verwendete Mechanismus zum Austausch von Transportaufträgen.
3. Das zugrundeliegende Modell der Transportprozessplanung.
4. Das Schema zur Aufteilung der generierten Gewinne.

Um ein dezentrales Lösungsverfahren für ein kooperatives Tourenplanungsproblem zu erhalten, müssen die genannten Freiheitsgrade ausgestaltet werden. In Kapitel 5.5 wurden Möglichkeiten zur Verteilung kooperativ erzielter Gewinne vorgestellt. Die Behandlung unterschiedlicher Tourenplanungsprobleme erfolgt in Kapitel 7. Die Bildung der Auftragsbündel und mögliche Austauschmechanismen werden in den nächsten beiden Kapiteln behandelt.

Im Folgenden wird das Framework in zwei Weisen konfiguriert.

1. Die Transportaufträge werden einzeln reallokiert. Für diese Markttransaktionen wird ein einfaches Auktionsverfahren eingesetzt. Der TDL, dessen Auftrag zur Auktion steht, nimmt die Rolle des Anbieters ein und alle anderen TDL

sind die Bieter. Die Verteilung des erzielten Kooperationsgewinns zwischen dem Anbieter und dem gewinnenden Bieter findet unter direkter Verwendung des abgegebenen Gebots statt. Die Gewinnverteilung hängt somit von der zu wählenden Auktionsform ab.

2. Die Transportaufträge werden in Bündeln realloziert. Die Bündel ergeben sich durch die Kombination von Aufträgen im Auftragspool. Dabei können prinzipiell alle möglichen Auftragskombinationen als Bündel vorkommen, d. h. entweder alle Teilmengen des Auftragspools bilden Bündel, oder es wird eine Beschränkung auf bestimmte Kombinationen vorgenommen. Die Markttransaktionen werden als kombinatorische Auktionen durchgeführt. Die TDL übernehmen hier beide Rollen, die des Anbieters und des Bieters. Die Verteilung des Kooperationsgewinns unter den TDL ist der Auktion nachgeschaltet und wird gemäß der Gleichverteilung aus Kapitel 5.5.3 vorgenommen.

In der Tabelle 6.1 sind die wesentlichen Elemente der beiden Konfigurationen gegenübergestellt. Die erste Konfiguration entspricht einem auftragsweisen Reallokationsverfahren und die zweite Konfiguration einem bündelweisen Reallokationsverfahren.

Tabelle 6.1: Zwei mögliche Konfigurationen des Frameworks

	auftragsweises Reallokationsverfahren	bündelweises Reallokationsverfahren
Transportaufträge	einzel	Bündel
Rollen	1 Anbieter, mehrere Bieter	alle TDL sind Anbieter und Bieter
Auktionsform	einfache Auktion	kombinatorische Auktion
Gewinnverteilung	integriert	nachgeschaltet

6.2 Auftragsweises Reallokationsverfahren

Mit dem auftragsweisen Reallokationsverfahren soll ein einfaches und transparentes Verfahren vorgestellt werden, welches eine iterative Reallokation von einzelnen Transportaufträgen anhand des Grenzgewinns vorsieht. Die Koordination der Beteiligten TDL wird mithilfe einfacher Auktionsmechanismen durchgeführt. Dazu agiert einer der TDL als Anbieter und die anderen TDL bieten auf den fremd zu vergebenden Transportauftrag. Die Rollen der Beteiligten können im iterativen Ablauf des

Verfahrens jedoch wechseln. Die verschiedenen einsetzbaren Auktionsformen werden beschrieben und auf ihre Anwendbarkeit hin evaluiert.

6.2.1 Übersicht zu einfachen Auktionsformen

Auf Märkten erfolgt die Koordination von Angebot und Nachfrage über Preise. Diese lassen sich in Anlehnung an existierende Marktpreise ermitteln. Besitzt das zu veräußernde Gut jedoch keine einheitliche Bewertung, d. h. jeder Nachfrager hat eine individuelle Zahlungsbereitschaft, so muss der Preis durch Verhandlungen ermittelt werden (Kräkel, 1992, S. 8).

Eine Form von Verhandlungen stellen Auktionen dar. Nach McAfee und McMillan (1987) sind Auktionen Mechanismen mit einem festgelegten Regelwerk, die eine Verteilung von Gütern und deren Preise auf der Basis von Geboten der Teilnehmer festlegen. Ziel einer solchen Auktion ist es, den wahren Wert eines Gutes herauszufinden und es dem Nachfrager mit der höchsten Bewertung zuzuordnen.

Es gibt eine Vielzahl von Auktionsformen (McAfee und McMillan, 1987), die nach bestimmten Kriterien klassifiziert werden können. Die folgenden Kriterien schlagen Peters (2002, S. 78ff.) und Berninghaus et al. (2006, S. 226f.) vor:

- **Wertschätzung der Bieter:** Die Bieter in einer Auktion messen dem zu versteigernden Gut entweder einen individuellen Wert bei (private value) oder der Wert des Guts ist für jeden Bieter gleich (common value).
- **Gebotsabgabeform:** Die Gebote in Auktionen sind entweder allgemein sichtbar (offene Auktion) oder geheim (verdeckte Auktion). In einer offenen Auktion können die Bieter auf die bisherigen Gebote reagieren, während bei der verdeckten Auktion maximal ein Gebot pro Bieter abgegeben wird.
- **Preisbildung:** Hinsichtlich der Preisfestlegung gibt es verschiedene Varianten. Bei einer Erstpreisauktion entspricht das höchste Gebot dem des Auktionsgewinners und der Kaufpreis entspricht dem höchsten Gebot. Bei einer Zweitpreisauktion entspricht das höchste Gebot ebenfalls dem des Auktionsgewinners, allerdings entspricht der Kaufpreis dem zweithöchsten Gebot. Bei dieser Art der Preisbildung ist ein Anreiz zur Offenbarung der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft für den Bieter gegeben.
- **Bietrichtung:** Die Bietrichtung einer Auktion ist entweder absteigend oder aufsteigend. Werden die Gebote schrittweise erhöht, so handelt es sich um eine aufsteigende Auktion. Werden die Preise jedoch schrittweise gesenkt bis ein Bieter den Preis akzeptiert, so handelt es sich um eine absteigende Auktion.

- **Anzahl der Güter:** Auktionen können nach der Anzahl der Güter differenziert werden. Bei der Versteigerung eines einzelnen Gutes spricht man von einer Eingutauktion, während der Verkauf von mehreren Gütern eine Mehrgüterauktion darstellt.
- **Anzahl der Auktionen bei mehreren zu versteigernden Gütern:** Mehrere Güter können entweder nacheinander (sequenziell) oder gleichzeitig (simultan) versteigert werden. Die sequenzielle Auktion ist bei homogenen und heterogenen Gütern anwendbar, während die simultane Auktion nur für homogene Güter konzipiert wurde.
- **Anzahl Anbieter und Bieter:** Bei einer einseitigen Auktion stehen einem Anbieter eines Gutes mehrere Bieter gegenüber, wobei nur die Seite der Bieter ihre Gebote verändern können. Ist die Auktion zweiseitig (doppelte Auktion), so können beide Seiten ihre Angebote verändern und über die Annahme bzw. Ablehnung von Verkäufen entscheiden.
- **Kauf oder Verkauf von Gütern:** Bietet ein Verkäufer ein oder mehrere Güter an, so handelt es sich um eine Verkaufsauktion. Dabei geht üblicherweise das Eigentumsrecht an den Käufer mit dem höchsten Gebot über, weshalb diese Vorgehensweise als Vorwärtsauktion bezeichnet wird (Turban et al., 2006, S. 145f.). Eine Kaufauktion liegt demgegenüber vor, wenn ein Käufer ein oder mehrere Güter erwerben oder Dienstleistungen erbracht haben möchte, für die mehrere Anbieter Angebote unterbreiten können. Diese Auktionsform wird aufgrund der Vertauschung der Rollen von Anbieter und Bieter als Rückwärtsauktion bezeichnet (Turban et al., 2006, S. G-9). Den Zuschlag erhält hier derjenige Anbieter mit dem niedrigsten Gebot.

Im Folgenden sollen vier Auktionsformen für die einseitige Versteigerung einzelner Güter vorgestellt werden, wobei die Bieter den Gütern private values beimessen. In der Praxis haben diese Auktionsformen große Bedeutung erlangt und in der Theorie werden sie intensiv behandelt. Das sind die Englische, die Holländische, die Höchstpreis- und die Vickrey Auktion (McAfee und McMillan (1987); Kräkel (1992, S. 8ff.)). Diese Auktionsformen weisen unterschiedliche Ausprägungen der oben genannten Kriterien auf und bieten somit eine ausreichende Vielfalt, um für das auftragsweise Reallokationsverfahren eine geeignete Auktionsform auszuwählen. Es existiert darüber hinaus jedoch eine Vielzahl anderer Auktionsformen, wie zum Beispiel die Amerikanische Auktion, Calcutta Auktion, All-Pay Auktion, usw.

- Bei der **Englischen Auktion** werden ausgehend von einem Mindestpreis freie offene Gebote so lange auf ein Gut abgegeben, bis keiner der Nachfrager mehr

bietet. Der Bieter mit dem höchsten Gebot erhält das Gut zum Preis seines Gebots.

- Bei der **Holländischen Auktion** geht der Anbieter von einem Höchstpreis aus und senkt diesen solange, bis ein Bieter bereit ist, den aktuellen Preis für das Gut zu bezahlen. Ein Bieter kann also maximal ein Gebot abgeben.
- Die **Höchstpreisauktion** lässt von jedem Bieter maximal ein Gebot zu. Derjenige Bieter, der das höchste Gebot abgegeben hat, erhält das zu versteigernde Gut zum Preis seines Gebots.
- Die **Vickrey Auktion** läuft ähnlich wie die Höchstpreisauktion ab. Allerdings erhält der Höchstbietende das Gut zum Preis des zweithöchsten Gebots.

6.2.2 Auswahl einer geeigneten Auktionsform

Um die Koordination der am KN beteiligten TDL im Rahmen des auftragsweisen Reallokationsverfahrens vornehmen zu können, ist die Auswahl einer geeigneten einfachen Auktionsform auf Basis verschiedener Kriterien notwendig.

Aus Sicht der Auktionstheorie stellen die Sicherstellung einer effizienten Allokation von Gütern und die Anreizkompatibilität des Auktionsmechanismus angemessene Kriterien dar (Berninghaus et al. (2006, S. 232f.); Kräkel (1992, S. 8ff.)). Eine effiziente Allokation liegt dann vor, wenn der Bieter mit der höchsten Zahlungsbereitschaft das zur Auktion stehende Gut ersteigert. Ein Auktionsmechanismus ist darüber hinaus anreizkompatibel, wenn er den Teilnehmern einen Anreiz zur Offenbarung ihrer wahren Zahlungsbereitschaft bietet. Diese beiden Kriterien sind abhängig voneinander, d. h. eine effiziente Allokation von Gütern entsteht nur dann, wenn die Teilnehmer ihre wahre Zahlungsbereitschaft als Gebote bekannt geben.

Weitere Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Auktionsform bietet die Transaktionskostentheorie. Transaktionskosten sind laut Picot (2003, S. 27) „Kosten der Information und Kommunikation, die zur Vereinbarung, Durchführung und Überwachung des Leistungsaustauschs zwischen Aufgabenträgern entstehen.“ Im Fokus der Betrachtungen steht somit zum einen der Kommunikationsaufwand im System und zum anderen der Informationsaufwand für jeden Bieter. Um die Transaktionskosten möglichst gering zu halten, sollte der Aufwand für die Kommunikation und die Informationsbereitstellung bei einer geeigneten Auktionsform möglichst gering sein.

Zusammenfassend ergeben sich vier Kriterien.

1. Sicherstellung einer effizienten Allokation

2. Anreizkompatibilität
3. Informationsaufwand der Bieter
4. Kommunikationsaufwand im System

Beim Vergleich der vier Auktionsformen bezüglich der Kriterien 1 und 2 ist festzuhalten, dass nur die Englische Auktion und die Vickrey Auktion eine effiziente Allokation und die Anreizkompatibilität sicherstellen. Bei beiden Auktionsformen ist es die dominante Strategie die tatsächliche Zahlungsbereitschaft für ein Gut als Gebote zu offenbaren (Berninghaus et al., 2006, S. 232f.).

Für eine detailliertere Beschreibung der dominanten Strategie gibt v_i die tatsächliche Zahlungsbereitschaft von Bieter i für ein Gut, b_i das dazugehörige Gebot und p den aktuellen Preis für das Gut in der Auktion an.

In der *Englischen Auktion* bietet ein Bieter solange für ein Gut, bis der aktuelle Preis seiner tatsächliche Zahlungsbereitschaft entspricht, also $p = v_i$ ist. Dabei schöpft der Bieter im Falle des Zuschlags (Gewinn der Auktion) alle positiven Gewinne ab und schließt negative Gewinne aus. Bietet er einen Preis unterhalb von v_i , d. h. steigt er vorzeitig aus der Auktion aus, so vergibt er die Chance auf einen positiven Gewinn und bietet er einen Preis oberhalb von v_i , so entsteht für ihn das Risiko eines negativen Gewinns. Die dominante Strategie eines Bieters in der Englischen Auktion ist es also die Bietsgrenze von $b_i = v_i$ einzuhalten.

In der *Vickrey Auktion* bietet ein Bieter genau in Höhe seiner tatsächlichen Zahlungsbereitschaft, also bei $b_i = v_i$. Es sei m das Maximum der Gebote der anderen Bieter.

- Der Bieter i erhält genau dann den Zuschlag, wenn seine Zahlungsbereitschaft größer als m ist ($v_i > m$). Der Preis, den der Bieter an den Anbieter des Gutes zu zahlen hat, entspricht dem zweithöchsten Gebot, in diesem Fall m . Sein Gewinn ergibt sich somit als $v_i - m > 0$. Liegt seine Zahlungsbereitschaft unterhalb von m ($v_i < m$), so ist sein Gewinn 0. Dieser entspricht dem Gewinn im Fall $v_i = m$, unabhängig davon, ob er den Zuschlag erhält oder nicht.
- Gibt der Bieter ein Gebot unterhalb seiner Zahlungsbereitschaft ab ($b_i < v_i$), so gewinnt er die Auktion nur, wenn $b_i > m$. In diesem Fall erzielt er einen positiven Gewinn von $v_i - m > 0$. Liegt sein Gebot jedoch unterhalb von m ($b_i < m$), erhält er nicht den Zuschlag und erzielt somit einen Gewinn von 0. Bei Abgabe seiner tatsächlichen Zahlungsbereitschaft als Gebot hätte der Bieter hier noch einen positiven Gewinn realisiert.
- Gibt der Bieter demgegenüber ein Gebot oberhalb seiner Zahlungsbereitschaft ab, d. h. $b_i > v_i$, so erzielt er wiederum einen Gewinn von $v_i - m > 0$, falls

er den Zuschlag erhält. Liegt sein Gebot jedoch über dem maximalen Gebot der anderen Bieter, also $b_i > m > v_i$, so erleidet er sogar einen Verlust. Dieser kann nur dadurch ausgeschlossen werden, indem der Bieter nicht mehr als v_i bietet.

In der Vickrey Auktion ist es die dominante Strategie des Bieters genau die eigene Zahlungsbereitschaft als Gebot abzugeben, da dadurch zum einen alle Ausgänge der Auktion mit positiven Gewinnen gesichert werden und zum anderen ein negativer Gewinn für den Bieter ausgeschlossen ist. Die Ursache der Dominanz der Strategie liegt darin, dass der Bieter zwar die Wahrscheinlichkeit beeinflussen kann, eine Auktion zu gewinnen, aber nicht den Kaufpreis für das zu versteigernde Gut.

Bei der *Holländischen und Höchstpreisauktion* hingegen besitzen die Bieter keine dominante Strategie ihre tatsächliche Zahlungsbereitschaft als Gebote abzugeben, da bei beiden Auktionsformen der Kaufpreis dem Gebot im Zuschlagsfall entspricht. Bietet ein Bieter in der Höchstpreisauktion genau in Höhe seiner Zahlungsbereitschaft ($b_i = v_i$), so realisiert er einen Gewinn gleich null. Er besitzt also einen Anreiz weniger als seine Zahlungsbereitschaft zu bieten ($b_i < v_i$). Je größer der Abstand zwischen Gebot und eigener Zahlungsbereitschaft, desto größer ist sein Gewinn. Für die Holländische Auktion gilt der gleiche Zusammenhang. Beide Auktionsformen stellen somit weder eine effiziente Allokation der Güter sicher, noch sind sie anreizkompatibel.

Der Kommunikations- und Informationsaufwand für die vier Auktionsformen lässt sich nach Weinhardt und Gomber (1996) anhand der Abbildung 6.2 einfach nachvollziehen. Die Pfeile geben die Kommunikationsbeziehungen zwischen den n Bietern und dem Anbieter an. Demgegenüber stellen die Gedankenblasen den Informationsaufwand der Bieter für die Ermittlung der Zahlungsbereitschaft ihrer Konkurrenten dar.

Bei der Holländischen- und der Höchstpreisauktion müssen die Bieter die Zahlungsbereitschaften der Mitbieter schätzen, um die Höhe ihres eigenen Gebots zu ermitteln. Da bei der Höchstpreisauktion jeder Bieter verdeckt nur ein Gebot abgibt und bei der Holländischen Auktion die Auktion beendet ist, sobald ein Bieter bereit ist den vom Auktionator schrittweise gesenkten Preis zu bezahlen, erhalten die Bieter während des Auktionsverlaufs keine relevanten Informationen zum Verhalten der anderen Bieter. Aus diesem Grund ist der Informationsaufwand bei beiden Auktionsformen sehr hoch.

Bei der Englischen Auktion entsteht kein Informationsaufwand für die Bieter, da die Zahlungsbereitschaften aller Bieter im Auktionsablauf bekannt gegeben werden.

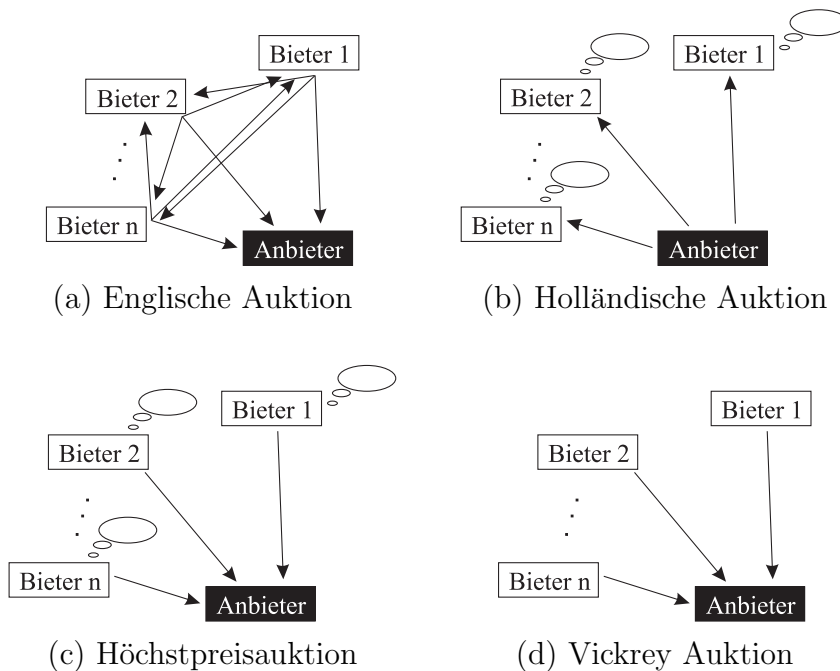


Abbildung 6.2: Kommunikations- und Informationsaufwand

Für die Vickrey Auktion hängt die eigene Zahlungsbereitschaft ebenfalls nicht von der der anderen Bieter ab, da es bei dieser Auktionsform die dominante Strategie ist, seine eigenen Bewertungen als Gebote abzugeben. Deshalb ist für diese Auktionsform der Informationsaufwand gering.

Der Kommunikationsaufwand ist aufgrund des ständigen Abgleichs aller Gebote bei der Englischen Auktion sehr hoch. Bei allen anderen Auktionsformen wird nur einmal ein Gebot abgegeben, somit ist der Aufwand für die Kommunikation hier vergleichsweise niedrig.

Tabelle 6.2 fasst die Wertungen für die vier Auktionsformen bezüglich der verschiedenen Kriterien zusammen. Es zeigt sich, dass nur die Vickrey Auktion eine effiziente Allokation sicherstellt, den Bietern einen Anreiz zur Abgabe ihrer wahren Zahlungsbereitschaft bietet und einen geringen Informations- und Kommunikationsaufwand aufweist. Somit ist die Vickrey Auktion am besten geeignet, um als Austauschmechanismus im einfachen Reallokationsverfahren eingesetzt zu werden.

6.2.3 Ablauf des auftragsweisen Reallokationsverfahrens

Der Ablauf des auftragsweisen Reallokationsverfahrens wird anhand eines Beispiels vorgestellt. Gegeben ist ein KN, das aus drei TDL besteht. Jeder TDL verfügt über ein Depot, ein Fahrzeug und hat drei Transportaufträge in einer Periode akquiriert. Die Kalkulation der Grenzgewinne p_{ij} , die entstehen, wenn TDL i den Transport-

Tabelle 6.2: Vergleich der vier einfachen Auktionsformen

Auktionsform	Englische Auktion	Holländische Auktion	Höchstpreis-Auktion	Vickrey Auktion
effiziente Allokation	ja	nein	nein	ja
anreizkompatibel	ja	nein	nein	ja
Informationsaufwand	niedrig	hoch	hoch	niedrig
Kommunikationsaufwand	hoch	niedrig	niedrig	niedrig

auftrag j ausführt, erfolgt analog zu Kapitel 5.2. Die zur Berechnung notwendigen Kosten- und Preissätze sind gegeben als:

- Fahrtkostensatz = 1 GE/km,
- Stoppkostensatz = 10 GE/Auftrag,
- Grundpreis pro Auftrag = 20 GE und
- Transportrate = 2 GE/km.

Die Ausgangsverteilung der Transportaufträge sowie die Berechnung der Grenzgewinne erfolgt in Tabelle 6.3.

In Abbildung 6.3 ist der Verlauf des Reallokationsverfahrens für die Ausgangsverteilung der Transportaufträge dargestellt. Die Zuordnung der Transportaufträge erfolgt für dieses Verfahren durch Anwendung einer Vorwärtsauktion, für die in Kapitel 5.3 die Zahlungsflüsse grafisch dargestellt wurden. Der Anbieter des Auftrags verkauft diesen an den Gewinner der Auktion. Im Falle der Reallokation eines Transportauftrags wird sein Erlös an den ausführenden TDL weitergeleitet. Dieser wiederum hat eine Ausgleichszahlung an den Anbieter des Auftrags zu leisten, die höher als sein Mindestpreis ist.

In *Schritt 1* evaluiert jeder TDL i seine akquirierten Transportaufträge j und legt einen Auftrag zur Fremdvergabe fest. Hierbei wird der Transportauftrag mit dem geringsten Grenzgewinn ausgewählt, da die Aussicht am größten ist, dass ihn ein anderer TDL zu geringeren Transportkosten durchführen kann. Im Beispiel wählt TDL 1 den Auftrag 1 ($p_{11} = -8$ GE), TDL 2 den Auftrag 6 ($p_{26} = 61$ GE) und TDL 3 den Auftrag 8 ($p_{38} = 34$ GE) aus. Die individuellen Grenzgewinne der fremd zu vergebenden Aufträge aller m TDL und die zugehörigen Koordinaten der Kundenorte sowie das Auftragsvolumen werden an die zentrale Instanz weitergeleitet.

Tabelle 6.3: Ermittlung der Deckungsbeiträge für TDL $i = 1, 2, 3$ (in GE)

TDL	Aufträge	Erlös		Kosten		Grenzwinn
		d_j	r_j	l_{ij}	c_{ij}	
1	1	10	40	38	48	-8
	2	32	84	17	27	57
	3	18	56	37	47	9
2	4	38	96	11	21	75
	5	39	98	5	15	83
	6	38	96	25	35	61
3	7	50	120	15	25	95
	8	18	56	12	22	34
	9	38	96	14	24	72
		$\sum d_j$	R_i	$L(N_i)$	C_i	P_i
N_1		60	180	150	180	0
N_2		115	290	154	184	106
N_3		106	272	126	156	116

Die Grenzgewinne der Transportaufträge dienen in den nachfolgenden Schritten als Mindestpreise. Der Mindestpreis stellt den Betrag dar, den der TDL bei Fremdvergabe als Ausgleichszahlung erwartet. Ein Mindestpreis gleich null impliziert, dass der Anbieter bereit ist, den Auftrag ohne Ausgleichszahlung abzugeben. Ist der Mindestpreis negativ, ist der Anbieter sogar bereit, einen Betrag von 8 GE an den Gewinner der Auktion zu zahlen. Dies ist im Beispiel für TDL 1 und Auftrag 1 der Fall.

Die zentrale Instanz sammelt die Aufträge im Auftragspool $S = \{1, 6, 8\}$ und wählt im *Schritt 2* aus diesem Auftragspool den Auftrag mit dem geringsten Mindestpreis für den Reallokationsprozess aus. Auch hier ist die Aussicht am größten, dass ein anderer TDL diesen Auftrag zu geringeren Transportkosten erfüllen kann und sich somit der Gesamtdeckungsbeitrag im KN erhöht. Im Beispiel ist dies der Transportauftrag 1 von TDL 1. Die zentrale Instanz gibt anschließend die Auftragsdaten, d. h. die Koordinaten der Kundenorte und das Auftragsvolumen innerhalb des KN bekannt. Diese Informationen sind für die anderen TDL notwendig, um ihre individuelle Bewertung für den ausgewählten Transportauftrag zu ermitteln. Aus ablauftechnischer Sicht ist die Bekanntgabe der Mindestpreis nicht notwendig. Auch

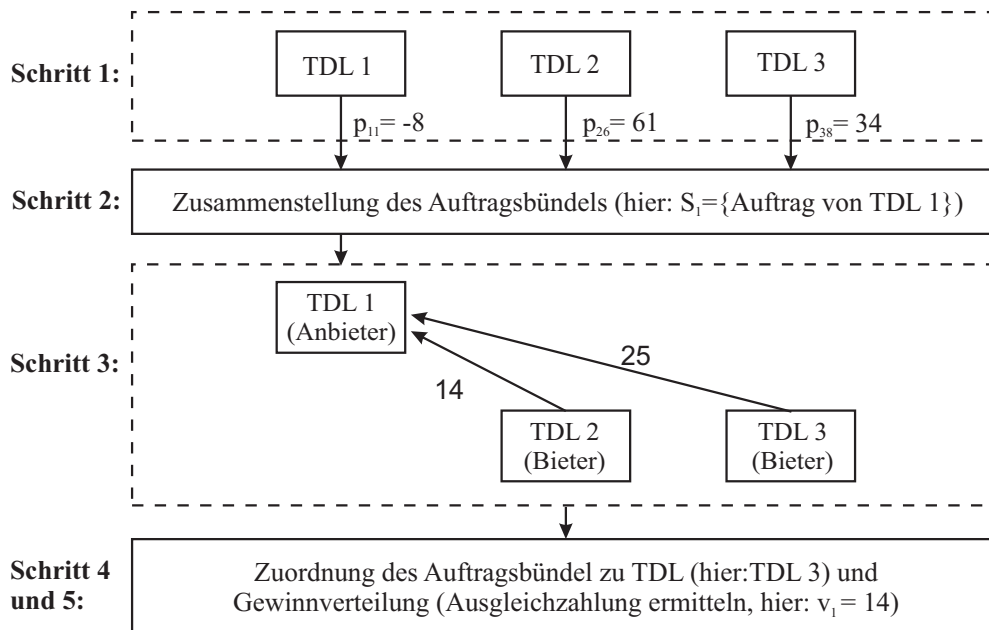


Abbildung 6.3: Ablauf des auftragsweisen Reallokationsverfahrens anhand eines Beispiels

aus der Sicht der TDL ist die Bekanntgabe des Mindestpreises nicht wünschenswert, da dies es ermöglicht, Rückschlüsse auf die Kostenstruktur des Anbieters zu ziehen.

In der folgenden Auktion übernimmt die zentrale Instanz die Rolle des Auktionators. TDL 1, der den Auftrag 1 akquiriert hat, ist der Anbieter und alle anderen TDL agieren als Bieter. Die Bieter berechnen im *Schritt 3* ihr Gebot für den zur Auktion ausgewählten Auftrag und leiten es an den Auktionator weiter. Die Gebote können auch negativ sein, was bedeutet, dass der Bieter für die Übernahme eines Auftrags seinerseits eine Ausgleichszahlung erwartet. Im Beispiel bietet TDL 2 14 GE und TDL 3 25 GE.

Die zentrale Instanz ermittelt im *Schritt 4* nach den Regeln der Vickrey Auktion (unter Beachtung des Mindestpreises) den Gewinner der Auktion und zugleich wird damit die Ausgleichszahlung vom Gewinner zum Anbieter festgelegt. Der TDL mit dem höchsten Gebot, im Beispiel TDL 3, gewinnt die Auktion mit einem Gebot von 25 GE. Der Transportauftrag wird dem Gewinner der Auktion (TDL 3) zugeordnet, der diesen in seinen Auftragsbestand aufnimmt. Der Anbieter (TDL 1) erhält eine Ausgleichszahlung in Höhe des zweithöchsten Gebots (14 GE) vom Gewinner der Auktion (TDL 3). TDL 2 erhält weder eine Ausgleichszahlung noch muss er sie leisten, da er am Ausgang der Auktion nicht beteiligt ist, d. h. weder Anbieter noch Gewinner ist.

Entspricht das zweithöchste Gebot dem vom Anbieter geforderten Mindestpreis oder liegt das zweithöchste Gebot sogar unterhalb des Mindestpreises, so findet die Auktion wie beschrieben statt, nur dass der Anbieter nun eine Ausgleichszahlung in Höhe des Mindestpreises erhält. Liegen alle Gebote unterhalb des Mindestpreises, so war die Auktion erfolglos. Der zur Auktion ausgewählte Auftrag verbleibt im Auftragsbestand des Anbieters und es erfolgt eine Nachnominierung von Aufträgen aus dem Auftragspool, solange bis dieser leer ist.

Die Gewinnverteilung im *Schritt 5* ist bereits durch die Vickrey Auktion erfolgt und somit in Schritt 4 integriert. Im Beispiel beträgt der zusätzliche Gewinn für TDL 1 (Anbieter) $\Delta P_1 = 14 - (-8) = 22 \text{ GE}$ und für TDL 3 (Gewinner) $\Delta P_3 = 25 - 14 = 11 \text{ GE}$. Insgesamt wurde ein zusätzlicher Gewinn im KN von $\Delta P = 33 \text{ GE}$ unter den beteiligten TDL verteilt.

Abschließend vergleicht die zentrale Instanz den aktuellen Gesamtdeckungsbeitrag des KN mit dem neuen Gesamtdeckungsbeitrag, der aus der Reallokation resultiert. Da der Gesamtdeckungsbeitrag durch die neue Allokation gestiegen ist, beginnt die nächste Iteration des Verfahrens wieder mit Schritt 1. Da das einfache Reallokationsverfahren aus dem Framework des KN abgeleitet wurde, ist sichergestellt, dass sich der Gesamtdeckungsbeitrag im Verfahrensablauf nicht verschlechtert. Die Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis der Gesamtdeckungsbeitrag nicht mehr gesteigert werden kann.

6.3 Bündelweises Reallokationsverfahren

Mit dem bündelweisen Reallokationsverfahren wird ein komplexeres Verfahren vorgestellt, welches eine iterative Reallokation von mehreren Transportaufträgen anhand des Grenzgewinns ermöglicht. Das Ziel dieses Verfahrens ist es wiederum, den Gesamtdeckungsbeitrag des KN zu steigern ohne die einzelnen TDL dabei schlechter zu stellen. Hierzu kommt (wie in Kapitel 5.5 beschrieben) ein Gewinnverteilungsansatz zum Einsatz. Die Koordination der Beteiligten TDL wird mithilfe kombinatorischer Auktionsmechanismen durchgeführt. Alle TDL übernehmen hierbei gleichzeitig die Rollen von Anbietern und Bieter.

6.3.1 Kombinatorische Auktion

In kombinatorischen Auktionen werden nicht nur einzelne Güter, sondern Güterbündel versteigert. Die ökonomische Effizienz von Austauschmärkten kann durch die Auktion von Güterbündeln maßgeblich gesteigert werden, da Komplementaritäten zwischen den Gütern berücksichtigt werden können (de Vries und Vohra, 2003). In

einem Transportmarkt können sich zum Beispiel verschiedene Transportaufträge gegenseitig ergänzen (Hin- und Rückfahrt) und somit den Leerfahrtenanteil verringern. Um die verschiedenen Präferenzen ausdrücken zu können, werden üblicherweise Gebotssprachen verwendet.

Im Falle der Auktion von Transportaufträgen ist die XOR-Sprache anwendbar (Nisan, 2000). Hier ist es dem TDL möglich, Gebote für verschiedene Kombinationen von Transportaufträgen gleichzeitig abzugeben, wobei die Kombinationen nicht disjunkt sein müssen. Um sicherzustellen, dass kein Transportauftrag mehrfach versteigert wird, darf jeder Auftrag maximal in einem versteigerten Bündel enthalten sein. Außerdem darf jeder Bieter maximal eines seiner Gebote gewinnen.

Für die kombinatorische Auktion können ausgehend von m Aufträgen, maximal $2^m - 1$ Auftragskombinationen erstellt werden. Hierzu werden alle Teilmengen der gesamten Auftragsmenge betrachtet, wobei die leere Menge vernachlässigt wird. Mit der Anzahl zur Fremdvergabe ausgewählter Transportaufträge entsteht somit eine exponentiell wachsende Anzahl an Auftragskombinationen. Um die Gewinner in einer kombinatorischen Auktion zu ermitteln, muss ein sogenanntes Combinatorial Auction Problem (CAP) gelöst werden (de Vries und Vohra, 2003).

Das CAP kann wie folgend formuliert werden: Für m Bieter der Menge M und m Objekte der Menge S , d. h. jeder Bieter stellt ein Objekt zur Verfügung, bezeichnet $b_i(S_k)$ das Gebot, das Bieter $i \in M$ bereit ist für das Objektbündel $S_k \subseteq S$ zu zahlen. Weiterhin ist $y(S_k, i)$ eine Binärvariable, die ausdrückt, ob S_k dem Bieter i zugeordnet wird oder nicht. Ziel des CAP ist es, die Gesamtauszahlung Z der Auktion zu maximieren.

$$\max Z = \sum_{i \in M} \sum_{S_k \subseteq S} b_i(S_k) \cdot y(S_k, i) \quad (6.1)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$1 \geq \sum_{i \in M} \sum_{S_k \ni j} y(S_k, i) \quad (\forall j \in S) \quad (6.2)$$

$$1 \geq \sum_{S_k \subseteq S} y(S_k, i) \quad (\forall i \in M) \quad (6.3)$$

$$y(S_k, i) \in \{0, 1\} \quad (\forall S_k \subseteq S, i \in M) \quad (6.4)$$

Die Restriktion (6.2) stellt sicher, dass jeder Transportauftrag maximal in einer versteigerten Auftragskombination enthalten ist und Restriktion (6.3) stellt sicher, dass kein Bieter mehr als eines seiner Gebote gewinnt.

Das hier formulierte CAP stellt eine Verallgemeinerung des Set-Packing-Problems (SPP) dar (de Vries und Vohra, 2003). Das SPP fragt, ob zu einer Menge S und

n Teilmengen S_k von S eine Anzahl von mindestens $k \leq n$ disjunkter Teilmengen S_k existieren. Vorausgesetzt den Teilmengen kann S_k eine Bewertung b_k zugeordnet werden, wird das Optimierungsproblem unter der Zielstellung formuliert, dass eine Kombination aus Teilmengen mit maximaler Bewertung entsteht. Dieses Problem gehört zur Klasse der \mathcal{NP} -schweren Optimierungsprobleme (Garey und Johnson, 1979, S. 187ff.). Da für das CAP lediglich eine weitere Restriktion zum SPP hinzugefügt wird, ist es ebenfalls ein \mathcal{NP} -schweres Problem und bei einer entsprechenden Anzahl an Bietern bzw. Objekten nur mit sehr hohem Aufwand optimal zu lösen.

6.3.2 Ablauf des bündelweisen Reallokationsverfahrens

Der Ablauf des bündelweisen Reallokationsverfahrens soll ebenfalls anhand des in Kapitel 6.2.3 eingeführten Beispiels erläutert werden. Die Vorgehensweise für das bündelweise Reallokationsverfahren in *Schritt 1* stimmt mit der des auftragsweisen Reallokationsverfahrens überein.

Im *Schritt 2* werden von der zentralen Instanz alle Kombinationen von Aufträgen aus dem Auftragspool erstellt. Im Beispiel sind es sieben Auftragsbündel $S_1 = \{1\}$, $S_2 = \{6\}$, $S_3 = \{8\}$, $S_4 = \{1, 6\}$, $S_5 = \{1, 8\}$, $S_6 = \{6, 8\}$, und $S_7 = \{1, 6, 8\}$. Die Auftragsdaten, d. h. die Koordinaten der Kundenorte und das Auftragsvolumen aller Transportaufträge des Auftragspools werden innerhalb des KN bekannt gegeben, während die Mindestpreise geheim bleiben.

Im *Schritt 3* ermitteln die TDL unabhängig voneinander Gebote für alle sieben Auftragskombinationen. Negative Gebote sind möglich. Jeder TDL ist Anbieter und Bieter zugleich. Die Gesamtheit der Gebote kann in einer $m \times m^2 - 1 = 3 \times 7$ Bietmatrix dargestellt werden. Jede Spalte repräsentiert hierbei eine Auftragskombination und jede Zeile die zugehörigen Gebote eines TDL.

$$[b_i(S_k)] = \begin{bmatrix} b_1(S_1) & \dots & b_1(S_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_m(S_1) & \dots & b_m(S_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8 & 45 & 8 & 38 & 14 & 61 & 72 \\ 18 & 61 & 44 & 75 & 58 & 95 & 106 \\ 25 & 64 & 34 & 89 & 59 & 100 & 125 \end{bmatrix}.$$

Das Gebot von TDL 2 für das Auftragsbündel S_5 lautet zum Beispiel $b_2(S_5) = 58$ GE. Die Grenzgewinne der Aufträge aus dem Auftragspool (-8, 61 und 34) sind in den Zellen $b_1(S_1)$ für TDL 1, $b_2(S_2)$ für TDL 2 und $b_3(S_3)$ für TDL 3 abgetragen und dienen in diesem Verfahren als Mindestpreis in der Auktion. Die Vielzahl an unterschiedlichen Auftragskombinationen, auf die geboten werden kann, ermöglicht es den TDL ihre Präferenzen präzise zu formulieren. Allerdings entsteht für den Auktionator das Problem die Gewinner der Auktion zu ermitteln.

Die zentrale Instanz ermittelt im *Schritt 4* den Gewinner der Auktion indem sie das zugehörige CAP löst. Bei der Lösung des CAP werden die Transportaufträge

vollständig auf die TDL verteilt. Im Beispiel gewinnt TDL 2 das Auftragsbündel S_3 mit einem Gebot von $b_2(S_3) = 44 \text{ GE}$ und TDL 3 gewinnt das Auftragsbündel S_4 mit einem Gebot von $b_3(S_4) = 89 \text{ GE}$, wobei sich eine Gesamtauszahlung von $Z = 133$ ergibt. TDL 2 wird somit Auftrag 8 von TDL 3 und der zugehörige Erlös zugeordnet. TDL 3 erhält den Auftrag 1 und 6 von TDL 1 und TDL 2 sowie deren Erlöse. Sollte jeder TDL seinen eigenen Auftrag gewinnen, entsteht kein zusätzlicher Gewinn durch die Auktion und das Verfahren bricht ab.

Für die bündelweise Reallokation von Aufträgen ist die Aufteilung der Gewinne aus dem KN, anders als bei der auftragsweisen Reallokation, noch nicht in Schritt 4 erfolgt. Wie in Kapitel 5.5 diskutiert, existieren verschiedene Ansätze die Gewinne aus einer Kooperation unter den Beteiligten aufzuteilen. Im Folgenden wird die Methode der Gleichverteilung verwendet. Allerdings können auch komplexere Methoden der Gewinnaufteilung in das Reallokationsverfahren integriert werden.

Zunächst wird im *Schritt 5* für jeden Transportauftrag individuell eine Ausgleichszahlung in Höhe des Mindestpreises vom Gewinner der Auktion an den Anbieter des Auftrags geleistet.

- TDL 1 zahlt 8 GE an TDL 3, da er vorher durch den Auftrag einen Verlust erwirtschaftet hat,
- TDL 2 erhält seinen Mindestpreis in Höhe von 61 GE von TDL 3 und
- TDL 3 erhält 34 GE von TDL 2, was ebenfalls seinem Mindestpreis entspricht.

Der durch die Kooperation der TDL zusätzlich entstandene Gesamtdeckungsbeitrag wird anschließend, für jedes versteigerte Auftragsbündel einzeln, gleichmäßig unter den beteiligten TDL verteilt. Dieser ergibt sich als Differenz zwischen dem Gebot für das Auftragsbündel und dem Mindestpreis für die Aufträge, die in diesem Bündel enthalten sind. Im Beispiel sind das eine Deckungsbeitragsänderung von $44 - 34 = 10 \text{ GE}$ für das Auftragsbündel S_3 und $89 - (-8) + 61 = 36 \text{ GE}$ für das Auftragsbündel S_4 . Das führt zu einem Deckungsbeitragsanstieg von insgesamt $\Delta P = 10 + 36 = 46 \text{ GE}$. Der zusätzliche Deckungsbeitrag für jedes Auftragsbündel wird separat auf die Beteiligten TDL verteilt. Um eine ganzzahlige Aufteilung zu gewährleisten, erfolgt eine Abrundung der Werte für den anbietenden TDL und der Gewinner der Auktion erhält den Rest. Für unser Beispiel wird der Beitrag des Auftragsbündels S_3 am Deckungsbeitragsanstieg zwischen TDL 2 und TDL 3 gleichmäßig verteilt. TDL 2 kann somit seinen Deckungsbeitrag um $\Delta P_2 = 5 \text{ GE}$ und TDL 3 ebenfalls um $\Delta P_3 = 5 \text{ GE}$ erhöhen. Der zusätzliche Deckungsbeitrag von 36 GE für Auftragsbündel S_4 wird ebenfalls zu gleichen Teilen (12 GE) zwischen TDL 1, TDL 2 und TDL 3 aufgeteilt. Für die TDL ergibt sich so insgesamt

eine individuelle Deckungsbeitragserhöhung von $\Delta P_1 = 12$ GE, $\Delta P_2 = 17$ GE, und $\Delta P_3 = 17$ GE.

Ist der Gesamtdeckungsbeitrag des KN nach der Durchführung der Schritte 1-5 gestiegen, so beginnt das Verfahren mit der neuen Allokation in Schritt 1. Nimmt der Gesamtdeckungsbeitrag nicht weiter zu, so bricht das Verfahren ab. Anzumerken ist, dass die Veränderung des Gesamtdeckungsbeitrags des KN durch die Reallokation der Aufträge nicht negativ sein kann, da die TDL auf ihre eigenen Aufträge bieten müssen. Somit ist eine vollständige Allokation von Aufträgen zu TDL zu jeder Zeit gewährleistet.

6.4 Vergleich der beiden Reallokationsverfahren

Die grundlegenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Reallokationsverfahren werden abschließend anhand von ablauftechnischen und anwendungsbezogenen Kriterien gegenübergestellt. Die ablauftechnischen Kriterien betreffen die fünf Schritte, in denen die Verfahren vorgehen und das Abbruchkriterium. Demgegenüber beziehen sich die anwendungsbezogenen Kriterien darauf, ob die Verfahren einen Anreiz zur Kooperation bieten, Komplementaritäten zwischen Transportaufträgen berücksichtigen und auf die Komplexität der Verfahren.

Die Tabelle 6.4 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der beiden Reallokationsverfahren anhand der ablauftechnischen Kriterien. Es zeigt sich, dass sich die Reallokationsverfahren hinsichtlich des ersten Ablaufschritts und des Abbruchkriteriums nicht unterscheiden. Bei beiden Reallokationsverfahren wählen die Beteiligten TDL die Transportaufträge mit dem geringsten Grenzgewinn zur Fremdvergabe aus und die Verfahren brechen ab, sobald der Gesamtdeckungsbeitrag des KN stagniert.

Unterschiede ergeben sich für die beiden Verfahren in Bezug auf die Auswahl der Transportaufträge für die Auktion (Schritt 2), die Gebotsermittlung (Schritt 3), die Auktionsform (Schritt 4) und bezüglich der Gewinnverteilung (Schritt 5). Während für das auftragsbezogene Reallokationsverfahren nur ein Transportauftrag zur Auktion ausgewählt wird und jeder Bieter genau ein Gebot für diesen Auftrag erstellt, werden für das bündelweise Reallokationsverfahren $2^n - 1$ Auftragskombinationen erstellt und jeder Bieter gibt dementsprechend viele Gebote ab. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl abgegebener Gebote pro TDL werden bei beiden Reallokationsverfahren unterschiedliche Auktionsformen angewendet. Das auftragsweise Reallokationsverfahren verwendet eine Vickrey Auktion, in die die Gewinnverteilung schon integriert ist. Im Rahmen des bündelweisen Reallokationsverfahrens erfolgt die Anwendung einer kombinatorischen Auktion, wobei eine gleichmäßige Gewinnverteilung für jedes verauktionierte Auftragsbündel nachgeschaltet ist.

Tabelle 6.4: Ablauftechnischer Vergleich der Reallokationsverfahren

	SRRA	BRRA
Schritt 1: Auswahl der Auftrag zur Fremdvergabe durch TDL	Auftrag mit geringstem Grenzgewinn	Auftrag mit geringstem Grenzgewinn
Schritt 2: Auswahl der Auftrag zur Auktion	Auftrag mit geringstem Grenzgewinn	alle $(2^n - 1)$ Auftragskombinationen der n Auftrag
Schritt 3: Gebotsermittlung	je TDL ein Gebot	je TDL $(2^n - 1)$ Gebote
Schritt 4: verwendete Auktionsform	Vickrey Auktion	kombinatorische Auktion
Schritt 5: Gewinnverteilung	in Vickrey Auktion integriert	nachgeschaltete gleichmäßige Verteilung pro Auftragsbündel
Abbruchkriterium	stagnierender P	stagnierender P

Hinsichtlich der anwendungsbezogenen Kriterien ergeben sich ebenfalls Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

- **Kooperationsanreiz:** Beide Reallokationsverfahren bieten den am KN teilnehmenden TDL einen Anreiz an der Kooperation teilzunehmen, da sie sich dadurch bezüglich ihres Deckungsbeitrags besser, jedoch auf keinen Fall schlechter stellen. Der Anbieter und die Gewinner der Auktion erhalten beide einen positiven Anteil am zusätzlich durch die Kooperation generierten Gewinn.
- **Berücksichtigung von Komplementaritäten:** Beim bündelweisen Reallokationsverfahren werden im Gegensatz zum auftragsweisen Reallokationsverfahren Komplementaritäten zwischen den Transportaufträgen berücksichtigt. So kann die gemeinsame Durchführung mehrerer Transportaufträge zu größeren Einsparungen führen, als eine isolierte Durchführung.
- **Komplexität:** Der Aufwand zur Durchführung der beiden Reallokationsverfahren ergibt sich zum einen aus der wiederholten Lösung von Tourenplanungsproblemen, die die TDL zur Bewertung ihrer Transportaufträge und zur

Ermittlung ihrer Gebote vornehmen. Während beim auftragsweisen Reallokationsverfahren jeder Bieter zur Berechnung seines Gebots nur zwei Tourenplanungsprobleme lösen muss, erfolgt beim bündelweisen Reallokationsverfahren für jeden Bieter die Lösung von 2^n Tourenplanungsproblemen, wobei n der Anzahl an Bietern entspricht. Zum anderen ergibt sich der Aufwand zur Durchführung der beiden Reallokationsverfahren aus der Lösung der Optimierungsprobleme, die im Rahmen der Auktionen entstehen. Zur Ermittlung des Auktionsgewinners beim auftragsweisen Reallokationsverfahren ist nur ein polynomialer Rechenaufwand nötig. Beim bündelweisen Reallokationsverfahren ist es demgegenüber notwendig zur Ermittlung des Auktionsgewinners ein CAP zu lösen, welches zu den \mathcal{NP} -vollständigen Optimierungsproblemen zählt. Der Aufwand zu dessen Lösung steigt demnach exponentiell mit der Anzahl TDL und Auftragsbündel.

Zusammenfassend berücksichtigt das bündelweise Reallokationsverfahren aufgrund seiner kombinatorischen Vorgehensweise zwar Komplementaritäten unter den Transportaufträgen, allerdings lässt die Komplexität seiner Teilprobleme nur die Lösung von Probleminstanzen mit geringer Anzahl an TDL und Auftragsbündel in vertretbarer Rechenzeit zu. Demgegenüber zeichnet sich das auftragsweise Reallokationsverfahren durch ein sehr einfaches Vorgehen und eine geringere Komplexität aus, welche die Berechnung größerer Probleminstanzen zulässt. Inwieweit diese beiden Reallokationsverfahren Einfluss auf die Lösungsgüte haben, beantwortet die quantitative Untersuchung im nächsten Kapitel.

Kapitel 7

Quantitative Untersuchungen

Ziel dieses Kapitels ist die Validierung des in Kapitel 6.1 vorgestellten Frameworks und die quantitative Bewertung der Qualität der Planungsansätze auf Basis verschiedener Wettbewerbssituationen und der in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 vorgestellten Geschäftsfelder. In der Beschreibung zum auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahren wurde das Schema zur Bildung der Auftragsbündel, die Mechanismen für den Austausch von Transportaufträgen und das Schema zur Aufteilung der generierten Gewinne (Freiheitsgrade 1, 2 und 4) spezifiziert. Die Ausgestaltung des dritten Freiheitsgrades, die Auswahl von geeigneten Modellen der Transportprozessplanung erfolgt demgegenüber in diesem Kapitel. Dazu wird auf die in Kapitel 4.2 beschriebenen Tourenplanungsprobleme zurückgegriffen.

Im Folgenden werden drei Fragestellungen formuliert und anhand von Testszenarien experimentell ausgewertet. Durch den Vergleich von drei Strategien, in denen die TDL (1) nicht kooperieren, (2) auf Basis einer dezentralen Planung kooperieren und (3) auf Basis einer zentralen Planung kooperieren, können die Rationalisierungspotenziale und die Kosten einer dezentralen Lösung ermittelt werden. Im Anschluss werden die beiden entwickelten Reallokationsverfahren miteinander verglichen und weitere Fragestellungen diskutiert.

7.1 Ausgewählte Fragestellungen

Die im Folgenden durchgeführten quantitativen Untersuchungen beschäftigen sich mit Fragestellungen, die für TDL in einem KN von Relevanz sind. Dazu gehört zum Beispiel die Messung des Nutzens einer Kooperation in Abhängigkeit von vorhandenen Kapazitäten oder der Wettbewerbssituation. Auf Basis dieser Informationen sind die TDL in der Lage zu entscheiden, wann eine Kooperation vorteilhaft ist oder welche TDL geeignete Kooperationspartner darstellen.

Die Fragestellungen lauten:

1. Wie wirkt sich die Knappheit von Kapazitäten auf den erreichbaren Nutzen eines kooperativen Netzwerks aus?
2. Hat die geografische Anordnung der Kundengebiete der TDL eine Auswirkung auf den Nutzen einer Kooperation?
3. Kann ein TDL des kooperativen Netzwerkes seinen Deckungsbeitrag durch strategisches Verhalten erhöhen?

In der ersten Fragestellung wird überprüft, ob die Erhöhung der Fahrzeugkapazität, wie anzunehmen, den Gesamtdeckungsbeitrag des KN steigert. Gegeben ist dabei ein KN, welches eine Menge von Transportaufträgen akquiriert hat. Das Geschäftsfeld der beteiligten TDL umfasst den Sammelverkehr. Ausgehend von einer Anfangsallokation löst jeder TDL für die Planung seiner Tour ein TSP (3. Freiheitsgrad des Frameworks) und überprüft bei jeder Reallokation der Aufträge, ob die Kapazitäten zu deren Erfüllung noch ausreichen.

Mit der zweiten Fragestellung werden die Auswirkungen der geografischen Lage der Kundengebiete auf den Nutzen der Kooperation untersucht (Berger und Bierwirth, 2009). Gegeben ist hier ein KN, welches eine Menge von Transportaufträgen akquiriert hat, die aus dem Abholen von Gütern bei einem Versender und dem Entladen der Güter beim Empfänger bestehen. Das Geschäftsfeld der beteiligten TDL umfasst den Kurierdienst. Ausgehend von der Anfangsallokation löst jeder der Beteiligten TDL für die Planung seiner Tour ein TSPPD (3. Freiheitsgrad des Frameworks).

Die dritte Fragestellung knüpft an die zweite Fragestellung an. Die TDL lösen weiterhin ein TSPPD, versuchen aber diesmal auf Kosten der anderen TDL ihren Deckungsbeitrag zu erhöhen. Zu untersuchen ist, ob die Reallokationsverfahren (2. Freiheitsgrad des Frameworks) ein strategisches Verhalten zulassen, oder ob eine solche Verhaltensweise keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf die Reallokation der Transportaufträge und die Verteilung der generierten Kooperationsgewinne im KN haben (Berger und Bierwirth, 2008).

Für alle Fragestellungen werden zunächst die zentralen Lösungen auf Basis von Multi-Depot Tourenplanungsproblemen ermittelt. Im Anschluss daran werden das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren, siehe Kapitel 6.2 und 6.3, getestet. Beim Vergleich der zentralen Lösung mit der einer initialen Auftragsverteilung lassen sich die maximalen Einsparpotenziale für eine gemeinsame Tourenplanung unter vollständiger Information ableiten. Durch einen Vergleich der Lösungen der dezentralen Reallokationsverfahren mit der initialen und der zentralen Lösung (Bench-

mark) kann darüber hinaus ein geeignetes dezentrales Planungsverfahren identifiziert werden.

7.2 Generierung von Testinstanzen

Für die quantitativen Untersuchungen ist ein KN, bestehend aus drei TDL, gegeben. Die TDL verfügen jeweils über ein Depot, ein Fahrzeug und akquirieren Transportaufträge innerhalb ihrer Kundengebiete eigenständig. Es gelten weiterhin die folgenden Annahmen.

- Die TDL verfügen über eine identische Kosten- und Erlösstruktur.
- Die TDL besitzen einen identischen homogenen Fuhrpark.
- Die TDL operieren jeweils von einem Depot aus, welches Start- und Endpunkt jeder Tour ist.
- Die TDL führen eine statische, deterministische und einperiodische Tourenplanung durch.

Die Testinstanzen für die drei Fragestellungen werden aus der TSP-Instanz *R101* von Solomon (2005) generiert. Die geografische Aufteilung der 101 Orte ist in der Abbildung 7.1 dargestellt.

Die Orte 10, 54, und 93 (Depot 1 entspricht TDL1 usw.) fungieren als Depots der TDL und sind als Kundenorte ausgeschlossen. Für jede der drei Fragestellungen wird, nach einem vorgegebenen Schema, für jeden TDL eine bestimmte Anzahl von Kundenorten aus den 101 Orten ausgewählt. In der TSP-Instanz *R101* sind die Koordinaten der Orte angegeben. Die Distanzen zwischen den Orten werden auf Basis der euklidischen Entfernungsmessung ermittelt.

Die Kalkulation der Deckungsbeiträge erfolgt analog zu Kapitel 5.2. Die zur Berechnung notwendigen Kosten- und Preissätze sind gegeben als:

- Fahrtkostensatz = 1 GE/km,
- Stoppkostensatz = 10 GE/Auftrag,
- Grundpreis pro Auftrag = 20 GE und
- Transportrate = 2 GE/km.

Die Berechnungen in den nachfolgenden Kapiteln werden alle auf einem PC P4 2800 MHz durchgeführt. Das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren wird

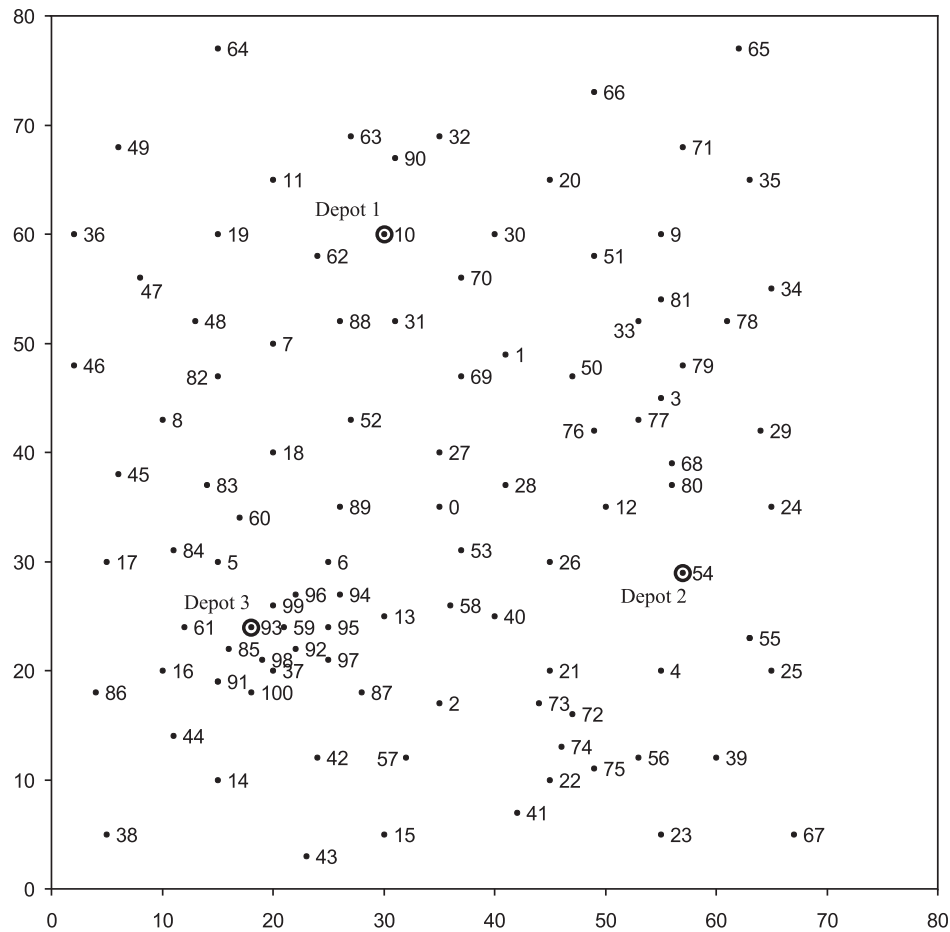


Abbildung 7.1: Geografische Aufteilung der 101 Orte aus der TSP-Instanz *R101*

jeweils in JAVA 1.6 implementiert und die individuelle optimale Tourenplanung der einzelnen TDL erfolgt mithilfe des CPLEX 10.0 MIP-Solvers. Lediglich die Lösung des TSPPD erfolgt unter Verwendung des von Dumitrescu et al. (2007) entwickelten Branch-and-Cut-Verfahrens. Dieses Verfahren ist speziell für diese Problemklasse entwickelt worden und somit besser zur Lösung des TSPPD geeignet als der CPLEX MIP-Solver, der unabhängig von der Problemklasse eingesetzt werden kann. Mithilfe dieser Implementierung ist es möglich, Probleme mit 35 Transportaufträgen zu lösen. Die Lösung des CAP beim bündelweisen Reallokationsverfahren und die Bestimmung der zentralen Lösung der Multi-Depot-Tourenplanungsprobleme erfolgen ebenfalls mithilfe des CPLEX 10.0 MIP-Solvers.

7.3 Variation der Fahrzeugkapazitäten

Im Folgenden werden zwei verschiedene Szenarien untersucht, in denen die Fahrzeugkapazitäten bzw. die Fahrzeugauslastung der TDL variiert werden, um die Auswirkungen auf den Nutzen des KN zu quantifizieren. Die vermutete Abhängigkeit des Nutzens einer Kooperation von der Fahrzeugauslastung lässt sich in der Folgenden Hypothese formulieren:

“Kooperation zwischen TDL ist vorteilhafter, je geringer die Fahrzeugauslastung ist.“

Die Überlegung zu dieser Hypothese ist die Folgende: Die Möglichkeiten für iterative Reallokationsverfahren Transportaufträge auszutauschen, wird dadurch eingeschränkt, dass nicht ausreichend Kapazitäten auf den Fahrzeugen der TDL zur Verfügung stehen. So ist beispielsweise bei einem initialen Auftragsbestand von 6 Aufträgen und einer Fahrzeugkapazität von 7 Einheiten der Gewinn zwei weiterer Transportaufträge in zwei aufeinanderfolgenden Austauschschritten nicht möglich. Der betreffende TDL müsste zwischenzeitlich Kapazität freimachen, indem er mindestens einen seiner Aufträge versteigert. Dieser Effekt wird im Weiteren als eine Einschränkung der Nachbarschaft bezeichnet.

Um diese Hypothese zu bestätigen, werden zwei Szenarien konstruiert. Im Szenario 1 liegt die zur Durchführung der akquirierten Transportaufträge benötigte Transportkapazität nur geringfügig unterhalb der verfügbaren Transportkapazität, d. h. die Fahrzeugauslastung ist hoch. Es ist anzunehmen, dass die Kooperation durch den Austausch von Transportaufträgen nur einen geringen zusätzlichen Gewinn für die Beteiligten generiert. Reicht die Kapazität der Fahrzeuge jedoch aus, um deutlich mehr als die akquirierte Auftragszahl durchzuführen (Szenario 2), d. h. die Fahrzeugauslastung ist gering, kann möglicherweise der zusätzliche Gewinn einer Kooperation von TDL gesteigert werden.

Ziel dieser Untersuchung ist es, die formulierte Hypothese zu überprüfen, indem das kooperative Tourenplanungsproblem mit dem auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahren und mit dem zentralen Lösungsverfahren für die beiden Szenarios gelöst wird. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Eignung der Reallokationsverfahren, indem die Ergebnisse mit denen der initialen Lösung und mit denen der zentral ermittelten optimalen Lösung verglichen werden.

7.3.1 Versuchsaufbau

Um die Auswirkungen verschiedener Fahrzeugkapazitäten auf den Gesamtdeckungsbeitrag des KN zu quantifizieren, werden 20 Testinstanzen $t_1 - t_{20}$ erstellt. Die Auswahl der Kundenorte für Transportaufträge erfolgt zufällig aus der Menge aller Orte

der TSP-Instanz $R101$. Für jede Instanz werden jedem TDL sechs Transportaufträge zugeordnet. Die Koordinaten der Kundenorte und der Depots für die Testinstanzen $t1 - t20$ sind im Anhang aufgeführt.

Transportaufträge bestehen darin, ein Gut, mit einem normierten Volumen (1 VE), an einem Kundenort einzusammeln und zum Depot des TDL zu transportieren. Jeder TDL verfügt weiterhin über ein Fahrzeug dessen Kapazität ein Vielfaches des Volumens der Transportaufträge beträgt. Für die 20 Instanzen werden die Fahrzeugkapazitäten im Szenario 1 als 7 VE und im Szenario 2 als 11 VE angenommen.

Die Berechnungen für die 20 Testinstanzen erfolgen für jedes Szenario zunächst mithilfe des auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahrens. Die individuelle Tourenplanung der einzelnen TDL erfordert dabei die optimale Lösung von unabhängigen TSP-c Instanzen. Um die Leistungsfähigkeit der dezentralen Lösungsverfahren zu ermitteln, wird darüber hinaus die zentrale Lösung für das Gesamtproblem erstellt. Die zentrale Lösung basiert auf dem in Kapitel 4.2.1.3 vorgestellten MDTSP-c.

7.3.2 Rechenergebnisse für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren

Die Ergebnisse der beiden dezentralen Reallokationsverfahren sind für die Testinstanzen $t1 - t20$ in den Tabellen 7.1 und 7.2 zusammen mit denen der zentralen Lösung P_z für das Gesamtproblem (MDTSP-c) aufgelistet. Die zentrale Lösung stellt eine obere Schranke für den erreichbaren Gesamtdeckungsbeitrag der dezentralen Reallokationsverfahren dar. P_{init} bezeichnet den Gesamtdeckungsbeitrag für die initiale Allokation der Transportaufträge. Die Tabellen zeigen weiterhin die erreichten Gesamtdeckungsbeiträge P für das auftragsweise Reallokationsverfahren (SR-RA) und das bündelweise Reallokationsverfahren (BRRA), die relative Verbesserung $impr$ gegenüber der nicht kooperativen Lösung und die relative Verschlechterung gap gegenüber der zentralen Lösung, im Folgenden als Kosten der Dezentralisierung bezeichnet. Die Kosten der Dezentralisierung entsprechen demnach dem relativen entgangenen Nutzen (Gesamtdeckungsbeitrag) des KN aufgrund der Verwendung von dezentralen anstatt von zentralen Planungsverfahren. Die Verbesserung $impr$ misst den relativen Abstand des Gesamtdeckungsbeitrags P von der initialen Lösung P_{init} , berechnet als $\frac{P - P_{init}}{P_{init}} \cdot 100$. Die Kosten der Dezentralisierung gap messen den relativen Abstand des Gesamtdeckungsbeitrags P von der zentralen Lösung P_z , berechnet als $\frac{P_z - P}{P_z} \cdot 100$.

Für die 20 untersuchten Instanzen wird bei einer verfügbaren Fahrzeugkapazität von 7 VE pro TDL (Szenario 1) eine durchschnittliche relative Verbesserung der zentralen Lösung P_z gegenüber der initialen Lösung in Höhe von 27,30 % erreicht.

Tabelle 7.1: Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung bei einer Kapazität von 7 VE (in %)

Instanz	P_{init}	MDTSP-c		SRRA			BRRA		
		P_z	impr	P	impr	gap	P	impr	gap
$t01$	896	1122	25,22	925	3,24	17,56	926	3,35	17,47
$t02$	997	1203	20,66	1002	0,50	16,71	1016	1,91	15,54
$t03$	916	1144	24,89	930	1,53	18,71	924	0,87	19,23
$t04$	918	1186	29,19	923	0,54	22,18	923	0,54	22,18
$t05$	1022	1234	20,74	1033	1,08	16,29	1066	4,31	13,61
$t06$	761	976	28,25	769	1,05	21,21	792	4,07	18,85
$t07$	1168	1417	21,32	1199	2,65	15,38	1209	3,51	14,68
$t08$	659	860	30,50	661	0,30	23,14	673	2,12	21,74
$t09$	1064	1268	19,17	1064	0,00	16,09	1064	0,00	16,09
$t10$	1065	1361	27,79	1089	2,25	19,99	1090	2,35	19,91
$t11$	781	1036	32,65	812	3,97	21,62	810	3,71	21,81
$t12$	910	1144	25,71	920	1,10	19,58	943	3,63	17,57
$t13$	984	1219	23,88	1000	1,63	17,97	1010	2,64	17,15
$t14$	615	840	36,59	624	1,46	25,71	628	2,11	25,24
$t15$	947	1165	23,02	962	1,58	17,42	961	1,48	17,51
$t16$	724	981	35,50	732	1,10	25,38	732	1,10	25,38
$t17$	740	967	30,68	742	0,27	23,27	743	0,41	23,16
$t18$	766	955	24,67	782	2,09	18,12	791	3,26	17,17
$t19$	729	1000	37,17	759	4,12	24,10	785	7,68	21,50
$t20$	714	917	28,43	718	0,56	21,70	718	0,56	21,70
\emptyset			27,30		1,55	20,11		2,48	19,38

Es zeigt sich, dass sich durch eine gemeinsame Tourenplanung unter vollständiger Information erhebliche Einsparpotenziale ergeben. Für das auftrags- bzw. bündelweise Reallokationsverfahren ergibt sich demgegenüber nur eine relative Verbesserung von 1,55 % bzw. 2,48 %. Für die Instanz $t09$ brechen beide Reallokationsverfahren nach einer Iteration ab, d. h. die Anfangsallokation und der Gesamtdeckungsbeitrag werden hier nicht verändert. Die Kosten der Dezentralisierung betragen für das auftrags- bzw. bündelweise Reallokationsverfahren 20,11 % bzw. 19,38 %. Das vorhandene Einsparpotenzial wurde durch die dezentrale Planung also nur bedingt ausgeschöpft.

Für die 20 untersuchten Instanzen wird bei einer verfügbaren Fahrzeugkapazität von 11 VE pro TDL (Szenario 2) eine durchschnittliche relative Verbesserung der zentralen Lösung P_z gegenüber der initialen Lösung in Höhe von 28,33 % erreicht. Bei Erhöhung der Fahrzeugkapazität auf 11 VE ergeben sich somit unter vollständi-

Tabelle 7.2: Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung bei einer Kapazität von 11 VE (in %)

Instanz	P_{init}	MDTSP-c		SRRA			BRRA		
		P_z	impr	P	impr	gap	P	impr	gap
$t01$	896	1147	28,01	925	3,24	19,35	926	3,35	19,27
$t02$	997	1212	21,56	1002	0,50	17,33	1016	1,91	16,17
$t03$	916	1148	25,33	960	4,80	16,38	924	0,87	19,51
$t04$	918	1194	30,07	976	6,32	18,26	976	6,32	18,26
$t05$	1022	1255	22,80	1045	2,25	16,73	1118	9,39	10,92
$t06$	761	988	29,83	790	3,81	20,04	792	4,07	19,84
$t07$	1168	1421	21,66	1243	6,42	12,53	1308	11,99	7,95
$t08$	659	863	30,96	678	2,88	21,44	678	2,88	21,44
$t09$	1064	1294	21,62	1064	0,00	17,77	1064	0,00	17,77
$t10$	1065	1361	27,79	1089	2,25	19,99	1237	16,15	9,11
$t11$	781	1043	33,55	812	3,97	22,15	825	5,63	20,90
$t12$	910	1158	27,25	951	4,51	17,88	1037	13,96	10,45
$t13$	984	1225	24,49	1000	1,63	18,37	1010	2,64	17,55
$t14$	615	840	36,59	624	1,46	25,71	628	2,11	25,24
$t15$	947	1167	23,23	995	5,07	14,74	1064	12,35	8,83
$t16$	724	995	37,43	732	1,10	26,43	732	1,10	26,43
$t17$	740	981	32,57	742	0,27	24,36	743	0,41	24,26
$t18$	766	955	24,67	792	3,39	17,07	846	10,44	11,41
$t19$	729	1003	37,59	773	6,04	22,93	785	7,68	21,73
$t20$	714	926	29,69	750	5,04	19,01	764	7,00	17,49
\emptyset			28,33		3,25	19,42		6,01	17,23

ger Information noch größere Einsparpotenziale. Für das auftrags- bzw. bündelweise Reallokationsverfahren ergibt sich eine relative Verbesserung von 3,25 % bzw. 6,01 %. Für die Instanz $t09$ brechen beide Reallokationsverfahren ebenfalls nach einer Iteration ab. Die Kosten der Dezentralisierung betragen für das auftrags- bzw. bündelweise Reallokationsverfahren 19,42 % bzw. 17,23 %. Das vorhandene Einsparpotenzial kann hier durch die dezentrale Planung deutlicher ausgeschöpft werden als bei einer Fahrzeugkapazität von 7 VE.

Der Vergleich der Ergebnisse für beide Szenarien in Tabelle 7.3 macht deutlich, dass bei einer Fahrzeugkapazität von 11 VE die initiale Lösung durch eine gemeinsame zentrale Tourenplanung deutlicher verbessert werden konnte als bei einer Fahrzeugkapazität von 7 VE. Begründen lässt sich dieser Effekt damit, dass aufgrund der größeren Fahrzeugkapazität im zweiten Szenario der Lösungsraum des MDTSP-c nicht so stark eingeschränkt ist. Somit sind Lösungen zulässig, in denen

ein TDL mehr als sieben Transportaufträge durchführt, wodurch gegebenenfalls die zurückzulegende Wegstrecke weiter reduziert werden kann.

Tabelle 7.3: Durchschnittliche *impr*, *gap* und Iterationszahl *iter* für die zentrale und dezentrale Planung bei Fahrzeugkapazitäten von 7 VE und 11 VE (in %)

Kapazität	MDTSP-c	SRRA			BRRA		
	impr	impr	gap	iter	impr	gap	iter
7	27,30	1,55	20,11	2,80	2,48	19,38	2,35
11	28,33	3,25	19,42	4,15	6,01	17,23	4,00

Beim auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahren ist im Szenario 1 nur eine geringe durchschnittliche relative Verbesserung gegenüber der initialen Lösung möglich. Grund dafür ist, dass die Fahrzeugkapazität der TDL in diesem Szenario nur ausreicht, um einen Auftrag mehr durchzuführen als ursprünglich akquiriert. Schon nach wenigen Iterationen (durchschnittlich 2,8 bzw. 2,35) brechen die Verfahren daher durch Erreichen der Kapazitätsgrenze ab. Für das bündelweise Reallokationsverfahren zeigt sich zusätzlich, dass nur bestimmte Auftragsbündel für die Reallokation infrage kommen. Von der Reallokation sind in der ersten Iteration Bündel ausgeschlossen, die neben dem eigenen Auftrag noch zwei weitere Transportaufträge enthalten. Wird die Kapazitätsgrenze wie in Szenario 2 auf 11 VE ausgeweitet, so sind schon in den ersten Iterationen alle generierten Bündel zur Reallokation zugelassen. Für beide Reallokationsverfahren ermöglicht eine Ausweitung der Fahrzeugkapazitäten mehr Iterationen (durchschnittlich 4,15 bzw. 4,00) für die Reallokation der Transportaufträge. Somit wird eine größere durchschnittliche relative Verbesserung gegenüber der initialen Lösung erreicht. Dieser Effekt bestätigt die Überlegung zur eingangs getroffenen Hypothese, dass iterative Reallokationsverfahren aufgrund einer größeren Nachbarschaft bessere Ergebnisse liefern.

Insgesamt ist bei einer geringen Fahrzeugauslastung (Kapazität = 11 VE) die Teilnahme an einem KN für TDL mit einer größeren Gewinnsteigerung verbunden. Die formulierte Hypothese, “Kooperation zwischen TDL ist vorteilhafter, je geringer die Fahrzeugauslastung ist.“, kann somit für die untersuchten Testinstanzen und Reallokationsverfahren bestätigt werden.

Beim Vergleich der durchschnittlichen relativen Verbesserung *impr* und der Kosten der Dezentralisierung *gap* für die beiden Reallokationsverfahren ist das bündelweise Reallokationsverfahren dem auftragsweisen bei einer Fahrzeugkapazität von 7 VE nur leicht, bei einer Fahrzeugkapazität von 11 VE hingegen deutlich überlegen. Das bündelweise Reallokationsverfahren weist für beide Szenarien eine größere

durchschnittliche relative Verbesserung und geringere Kosten der Dezentralisierung auf und ist somit besser als dezentrales Planungsverfahren für ein KN geeignet, bei dem das Geschäftsfeld der TDL den Sammelverkehr umfasst.

Die durchschnittlichen Rechenzeiten der beiden Reallokationsverfahren und des MDTSP-c für die zwei verschiedenen Szenarien sind in der Tabelle 7.4 aufgeführt. Der Rechenaufwand zur Lösung des MDTSP-c beträgt für eine Fahrzeugkapazität von 7 VE im Durchschnitt sechs Stunden und für eine Fahrzeugkapazität von 11 VE durchschnittlich eine Stunde. Begründen lässt sich dieser Effekt damit, dass aufgrund der geringeren Fahrzeugkapazität im ersten Szenario der Lösungsraum des MDTSP-c stärker eingeschränkt ist und somit der Aufwand zur Berechnung der optimalen Lösung ansteigt.

Die benötigte Zeit zur Berechnung der dezentralen Lösung mit den beiden Reallokationsverfahren beträgt demgegenüber nur wenige Sekunden. Die Unterschiede in den Rechenzeiten zwischen den beiden Reallokationsverfahren sind vernachlässigbar. Der größte Rechenaufwand bei den Reallokationsverfahren entsteht für unsere Problemgrößen durch die wiederholte Lösung von TSP-c Instanzen. Der Aufwand zur Berechnung des CAP im bündelweisen Reallokationsverfahren kann für unsere Problemgrößen (drei TDL, drei Aufträge) vernachlässigt werden. Steigt jedoch die Anzahl der TDL oder die Anzahl der zu versteigernden Aufträge an, dann steigen die Anzahl der in der Auktion zu berücksichtigenden Gebote und somit die Rechenzeit exponentiell an.

Tabelle 7.4: Durchschnittliche Rechenzeiten für die zentrale und dezentrale Planung bei Fahrzeugkapazität von 7 und 11 VE (in Sekunden)

Kapazität	MDTSP-c	SRRA	BRRA
7	23431,85	7,10	4,97
11	3625,30	10,45	8,63

7.4 Geografische Anordnung der Kundengebiete

Im Folgenden werden drei verschiedene geografische Szenarien untersucht, in denen die Kundengebiete der TDL vollständig getrennt sind, sich überlagern bzw. identisch sind. Dabei akquirieren die TDL zwar Kundenaufträge nur innerhalb ihrer Kundengebiete, sind aber in der Lage Aufträge aus den Gebieten anderer TDL auszuführen. Ziel ist es, die Auswirkungen von Überschneidungen der Kundengebiete auf den Nutzen des KN zu quantifizieren. Die vermutete Abhängigkeit des Nutzens einer

Kooperation von der Lage der Kundengebiete lässt sich in der folgenden Hypothese formulieren:

“Kooperation zwischen TDL ist vorteilhafter, je mehr sich ihre Kundengebiete überlagern.“

Um diese Hypothese zu bestätigen, werden drei Szenarien konstruiert. In Szenario *A* unterscheiden sich die Kundengebiete der TDL vollständig und es herrscht nur wenig Wettbewerb zwischen den TDL. Es ist anzunehmen, dass eine Kooperation zwischen den Beteiligten TDL nur einen geringen zusätzlichen Nutzen für die Beteiligten generiert. Überlagern sich die Kundengebiete jedoch (Szenario *O*), so steigt der Wettbewerb zwischen den TDL und eine Kooperation ist vorteilhafter. Sind die Kundengebiete aller TDL identisch (Szenario *I*), so konkurrieren die TDL um jeden Transportauftrag und eine Kooperation sollte den größten Nutzen für die Beteiligten generieren.

Ziel dieser Untersuchung ist es, die formulierte Hypothese zu überprüfen, indem das kooperative Tourenplanungsproblem mit dem auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahren und mit dem zentralen Lösungsverfahren für die beiden Szenarios gelöst wird. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Eignung der Reallokationsverfahren, indem die Ergebnisse mit denen der initialen Lösung und mit denen der zentral ermittelten Lösung verglichen werden.

7.4.1 Versuchsaufbau

Um die Auswirkungen verschiedener geografischer Szenarien auf den Nutzen des KN zu quantifizieren, werden für jedes der drei Szenarien 30 Testinstanzen aus der TSP-Instanz *R101* von Solomom (2005) erzeugt. Für jede Testinstanz werden jedem TDL initial drei Transportaufträge zugeordnet.

Transportaufträge bestehen im Unterschied zur vorher betrachteten Situation darin, ein Gut (Briefe oder kleine Pakete), an einem Pickuport einzusammeln und zu einem Deliveryort zu transportieren. Aufgrund des geringen Volumens der Sendungen, die nur einen Bruchteil der Fahrzeugkapazität einnehmen, entfällt die Betrachtung von Kapazitäten (siehe Kapitel 4.2).

Die Festlegung der geografischen Lage der Kundengebiete für jedes Szenario erfolgt, indem zunächst die gesamte Fläche in Teilgebiete mit etwa gleicher Kundennachfrage aufgeteilt wird, wie es die durchgezogenen Linien (Abbildung 7.2) anzeigen. Diese Teilgebiete definieren die disjunkten Kundengebiete X_1 , X_2 und X_3 im Szenario *A*. Für die 30 Testinstanzen des Szenarios *A* ($p1 - p30$) werden die zugehörigen Pickup- und Deliveryorte für TDL i zufällig aus den disjunkten Kunden-

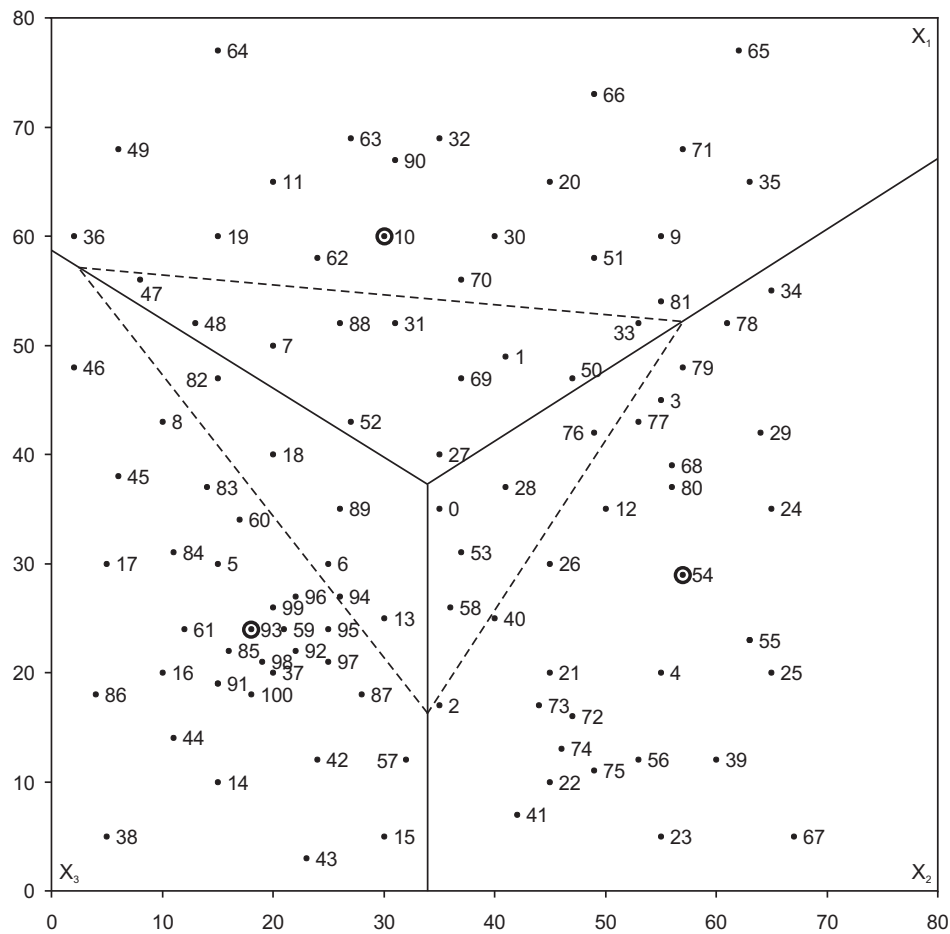


Abbildung 7.2: Konstruktion von Testinstanzen für verschiedene geografische Szenarien

gebieten X_i ausgewählt, d. h. jedem TDL werden nur Transportaufträge zugeordnet, die in seinem Kundengebiet liegen.

Für das Szenario O ergeben sich die Kundengebiete der TDL aus den Teilgebieten X_1 , X_2 und X_3 und dem Überlappungsgebiet Δ , welches in der Abbildung 7.2 durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet ist. Das Kundengebiet von TDL 1 ergibt sich zum Beispiel als $X_1 \cup \Delta$. Für jede der 30 Testinstanzen des Szenarios O ($p_{31} - p_{60}$) werden die Pickup- und Deliveryorte der Transportaufträge ebenfalls zufällig aus den entstandenen Kundengebieten ausgewählt.

In Szenario I sind die Kundengebiete aller TDL identisch. Für die 30 Testinstanzen des Szenarios I ($p_{61} - p_{90}$) werden die Pickup- und Deliveryorte der Transportaufträge somit zufällig aus der zusammengesetzten Menge $\cup X_i$ aller Kundengebiete

ausgewählt. Die Koordinaten der Pickup- und Deliveryorte und der Depots für die Testinstanzen $p1 - p90$ sind im Anhang aufgeführt.

Die Berechnungen für die 90 Testinstanzen der drei Szenarien erfolgen zunächst mithilfe des auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahrens. Die individuelle Tourenplanung der einzelnen TDL erfordert dabei die optimale Lösung von unabhängigen TSPPD Instanzen. Dieses Tourenplanungsproblem wird im Gegensatz zu den bereits vorgestellten mit einem, von Dumitrescu et al. (2007) speziell zur Lösung des TSPPD entwickelten, Branch-and-Cut-Algorithmus optimal gelöst. Um die Leistungsfähigkeit der dezentralen Lösungsverfahren zu ermitteln, wird darüber hinaus die zentrale Lösung für das Gesamtproblem erstellt. Die zentrale Lösung basiert auf dem in Kapitel 4.2.2.3 vorgestellten MDTSPD.

7.4.2 Rechenergebnisse für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren

Die Ergebnisse der beiden dezentralen Reallokationsverfahren sind für die Testinstanzen $p1 - p90$ in den Tabellen 7.5, 7.6 und 7.7 zusammen mit denen der zentralen Lösung P_z für das Gesamtproblem (MDTSPD) aufgelistet. Die zentrale Lösung stellt eine obere Schranke für den erreichbaren Gesamtdeckungsbeitrag der dezentralen Verfahren dar. P_{init} bezeichnet den Gesamtdeckungsbeitrag für die initiale Allokation der Transportaufträge. Die Tabellen zeigen die erreichten Gesamtdeckungsbeiträge P für das auftragsweise Reallokationsverfahren (SRRA) und das bündelweise Reallokationsverfahren (BRRA), die relative Verbesserung $impr$ gegenüber der nicht kooperativen Lösung und die Kosten der Dezentralisierung gap . Die Verbesserung $impr$ misst den relativen Abstand des Gesamtdeckungsbeitrags P von der initialen Lösung P_{init} , berechnet als $\frac{P - P_{init}}{P_{init}} \cdot 100$. Die Kosten der Dezentralisierung gap messen den relativen Abstand des Gesamtdeckungsbeitrags P von der zentralen Lösung P_z , berechnet als $\frac{P_z - P}{P_z} \cdot 100$.

Für die 30 untersuchten Instanzen im Szenario A wird bei vollständig getrennten Kundengebieten eine durchschnittliche relative Verbesserung der zentralen Lösung P_z gegenüber der initialen Lösung in Höhe von 19,07 % erreicht. Es zeigt sich, dass sich durch eine gemeinsame Tourenplanung unter vollständiger Information für vollständig getrennte Kundengebiete bzw. wenig Wettbewerb zwischen den TDL Einsparpotenziale ergeben. Für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren ergibt sich demgegenüber nur eine relative Verbesserung gegenüber der initialen Lösung von 3,47 %. Für 22 der 30 Instanzen brechen beide Reallokationsverfahren schon nach einer Iteration ab, d. h. die Anfangsallokation und der Gesamtdeckungsbeitrag werden hier nicht verändert. Bei drei Instanzen ist die Ausgangslösung P_{init} gleichzeitig die beste Allokation P_z und somit optimal. Für Instanz $p05$ entspricht die

Tabelle 7.5: Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario *A* (in %)

Instanz	P_{init}	MDTSPPD		SRRA			BBRA		
		P_z	impr	P	impr	gap	P	impr	gap
<i>p01</i>	21	25	19,05	21	0,00	16,00	21	0,00	16,00
<i>p02</i>	164	216	31,71	164	0,00	24,07	164	0,00	24,07
<i>p03</i>	210	253	20,48	210	0,00	17,00	210	0,00	17,00
<i>p04</i>	187	187	0,00	187	0,00	0,00	187	0,00	0,00
<i>p05</i>	112	149	33,04	149	33,04	0,00	149	33,04	0,00
<i>p06</i>	141	209	48,23	190	34,75	9,09	190	34,75	9,09
<i>p07</i>	237	300	26,58	237	0,00	21,00	237	0,00	21,00
<i>p08</i>	218	229	5,05	218	0,00	4,80	218	0,00	4,80
<i>p09</i>	119	159	33,61	142	19,33	10,69	142	19,33	10,69
<i>p10</i>	230	289	25,65	230	0,00	20,42	230	0,00	20,42
<i>p11</i>	182	201	10,44	182	0,00	9,45	182	0,00	9,45
<i>p12</i>	141	184	30,50	141	0,00	23,37	141	0,00	23,37
<i>p13</i>	156	172	10,26	156	0,00	9,30	156	0,00	9,30
<i>p14</i>	105	105	0,00	105	0,00	0,00	105	0,00	0,00
<i>p15</i>	203	203	0,00	203	0,00	0,00	203	0,00	0,00
<i>p16</i>	208	243	16,83	208	0,00	14,40	208	0,00	14,40
<i>p17</i>	156	176	12,82	156	0,00	11,36	156	0,00	11,36
<i>p18</i>	109	117	7,34	109	0,00	6,84	109	0,00	6,84
<i>p19</i>	171	202	18,13	182	6,43	9,90	182	6,43	9,90
<i>p20</i>	164	191	16,46	164	0,00	14,14	164	0,00	14,14
<i>p21</i>	118	141	19,49	119	0,85	15,60	119	0,85	15,60
<i>p22</i>	167	209	25,15	178	6,59	14,83	178	6,59	14,83
<i>p23</i>	140	143	2,14	140	0,00	2,10	140	0,00	2,10
<i>p24</i>	119	131	10,08	121	1,68	7,63	121	1,68	7,63
<i>p25</i>	182	220	20,88	182	0,00	17,27	182	0,00	17,27
<i>p26</i>	176	255	44,89	176	0,00	30,98	176	0,00	30,98
<i>p27</i>	155	201	29,68	157	1,29	21,89	157	1,29	21,89
<i>p28</i>	203	225	10,84	203	0,00	9,78	203	0,00	9,78
<i>p29</i>	162	193	19,14	162	0,00	16,06	162	0,00	16,06
<i>p30</i>	169	209	23,67	169	0,00	19,14	169	0,00	19,14
\emptyset			19,07		3,47	12,57		3,47	12,57

Lösung der beiden Reallokationsverfahren der der zentralen Lösung. Die Kosten der Dezentralisierung betragen für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren 12,57 %. Das vorhandene Einsparpotenzial wurde durch die dezentrale Planung somit nur zum Teil ausgeschöpft. Aufgrund der separaten Kundengebiete ist hier

Tabelle 7.6: Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario O (in %)

Instanz	P_{init}	MDTSPPD		SRRA			BBRA		
		P_z	impr	P	impr	gap	P	impr	gap
$p31$	273	328	20,15	273	0,00	16,77	273	0,00	16,77
$p32$	121	236	95,04	187	54,55	20,76	187	54,55	20,76
$p33$	107	231	115,89	164	53,27	29,00	164	53,27	29,00
$p34$	138	303	119,57	247	78,99	18,48	294	113,04	2,97
$p35$	167	282	68,86	226	35,33	19,86	231	38,32	18,09
$p36$	198	280	41,41	198	0,00	29,29	198	0,00	29,29
$p37$	176	240	36,36	176	0,00	26,67	176	0,00	26,67
$p38$	213	340	59,62	213	0,00	37,35	213	0,00	37,35
$p39$	66	183	177,27	137	107,58	25,14	169	156,06	7,65
$p40$	139	286	105,76	184	32,37	35,66	184	32,37	35,66
$p41$	209	269	28,71	211	0,96	21,56	211	0,96	21,56
$p42$	253	385	52,17	282	11,46	26,75	282	11,46	26,75
$p43$	201	236	17,41	222	10,45	5,93	222	10,45	5,93
$p44$	215	360	67,44	257	19,53	28,61	257	19,53	28,61
$p45$	160	244	52,50	212	32,50	13,11	212	32,50	13,11
$p46$	186	325	74,73	241	29,57	25,85	241	29,57	25,85
$p47$	161	294	82,61	228	41,61	22,45	228	41,61	22,45
$p48$	162	230	41,98	173	6,79	24,78	199	22,84	13,48
$p49$	123	211	71,54	155	26,02	26,54	172	39,84	18,48
$p50$	241	311	29,05	241	0,00	22,51	241	0,00	22,51
$p51$	160	319	99,38	255	59,38	20,06	212	32,50	33,54
$p52$	219	300	36,99	280	27,85	6,67	280	27,85	6,67
$p53$	87	143	64,37	114	31,03	20,28	114	31,03	20,28
$p54$	165	307	86,06	237	43,64	22,80	237	43,64	22,80
$p55$	158	286	81,01	210	32,91	26,57	205	29,75	28,32
$p56$	155	286	84,52	229	47,74	19,93	229	47,74	19,93
$p57$	303	452	49,17	349	15,18	22,79	349	15,18	22,79
$p58$	232	385	65,95	303	30,60	21,30	255	9,91	33,77
$p59$	344	465	35,17	344	0,00	26,02	344	0,00	26,02
$p60$	288	463	60,76	378	31,25	18,36	378	31,25	18,36
\emptyset			67,38		28,69	22,73		30,84	21,85

die Wahrscheinlichkeit gering, dass ein TDL einen Transportauftrag eines anderen TDL zu geringeren Kosten erbringen kann.

Der Vorteil einer Kooperation von TDL wird bei sich überlagernden Kunden- gebieten deutlicher. Für die 30 untersuchten Instanzen im Szenario O wird eine

Tabelle 7.7: Relative Verbesserung und Kosten der Dezentralisierung für die zentrale und dezentrale Planung im Szenario *I* (in %)

Instanz	P_{init}	MDTSPPD		SRRA			BBRA		
		P_z	impr	P	impr	gap	P	impr	gap
<i>p61</i>	139	320	130,22	268	92,81	16,25	320	130,22	0,00
<i>p62</i>	102	373	265,69	272	166,67	27,08	187	83,33	49,87
<i>p63</i>	142	367	158,45	265	86,62	27,79	265	86,62	27,79
<i>p64</i>	91	227	149,45	158	73,63	30,40	158	73,63	30,40
<i>p65</i>	176	403	128,98	189	7,39	53,10	189	7,39	53,10
<i>p66</i>	141	439	211,35	307	117,73	30,07	378	168,09	13,90
<i>p67</i>	283	491	73,50	283	0,00	42,36	283	0,00	42,36
<i>p68</i>	234	483	106,41	288	23,08	40,37	417	78,21	13,66
<i>p69</i>	170	355	108,82	259	52,35	27,04	258	51,76	27,32
<i>p70</i>	202	398	97,03	314	55,45	21,11	237	17,33	40,45
<i>p71</i>	158	478	202,53	332	110,13	30,54	382	141,77	20,08
<i>p72</i>	84	346	311,90	128	52,38	63,01	168	100,00	51,45
<i>p73</i>	171	430	151,46	228	33,33	46,98	228	33,33	46,98
<i>p74</i>	303	553	82,51	303	0,00	45,21	327	7,92	40,87
<i>p75</i>	163	464	184,66	464	184,66	0,00	366	124,54	21,12
<i>p76</i>	343	573	67,06	573	67,06	0,00	458	33,53	20,07
<i>p77</i>	210	427	103,33	338	60,95	20,84	338	60,95	20,84
<i>p78</i>	224	440	96,43	363	62,05	17,50	289	29,02	34,32
<i>p79</i>	164	413	151,83	307	87,20	25,67	408	148,78	1,21
<i>p80</i>	239	533	123,01	414	73,22	22,33	418	74,90	21,58
<i>p81</i>	61	302	395,08	61	0,00	79,80	302	395,08	0,00
<i>p82</i>	52	314	503,85	185	255,77	41,08	293	463,46	6,69
<i>p83</i>	253	582	130,04	559	120,95	3,95	582	130,04	0,00
<i>p84</i>	203	453	123,15	358	76,35	20,97	403	98,52	11,04
<i>p85</i>	237	520	119,41	492	107,59	5,38	492	107,59	5,38
<i>p86</i>	281	500	77,94	465	65,48	7,00	465	65,48	7,00
<i>p87</i>	185	487	163,24	406	119,46	16,63	406	119,46	16,63
<i>p88</i>	312	585	87,50	331	6,09	43,42	482	54,49	17,61
<i>p89</i>	340	541	59,12	459	35,00	15,16	459	35,00	15,16
<i>p90</i>	256	527	105,86	527	105,86	0,00	527	105,86	0,00
\emptyset			155,66		76,64	27,37		100,88	21,90

durchschnittliche relative Verbesserung der zentralen Lösung P_z gegenüber der initialen Lösung in Höhe von 67,38 % erreicht. Bei sich überlagernden Kundengebieten bzw. einem höheren Wettbewerb zwischen den TDL ergeben sich somit durch eine gemeinsame Tourenplanung unter vollständiger Information wesentlich größere Ein-

sparpotenziale. Dies ist dadurch zu begründen, dass hier die Wahrscheinlichkeit, dass ein TDL einen Transportauftrag eines anderen TDL zu geringeren Kosten erbringen kann, größer ist. Für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren ergibt sich eine relative Verbesserung gegenüber der initialen Lösung von 28,69 % bzw. 30,84 %. Für 6 der 30 Instanzen brechen beide Reallokationsverfahren schon nach einer Iteration ab. Die Kosten der Dezentralisierung betragen für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren 22,73 % bzw. 21,85 %. Das vorhandene Einsparpotenzial kann durch die dezentrale Planung deutlicher ausgeschöpft werden als im Szenario A.

Für die 30 untersuchten Instanzen im Szenario *I* wird bei identischen Kundengebieten eine durchschnittliche relative Verbesserung der zentralen Lösung P_z gegenüber der initialen Lösung in Höhe von 155,66 % erreicht. Das durch eine gemeinsame Tourenplanung unter vollständiger Information realisierbare Einsparpotenzial ist demnach am größten, wenn alle TDL um jeden Transportauftrag konkurrieren. Für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren ergibt sich eine relative Verbesserung von 76,64 % bzw. 100,88 %. Für die Instanz *p67* brechen beide Reallokationsverfahren nach einer Iteration ab. Für die Instanzen *p74* und *p81* bricht nur das auftragsweise Reallokationsverfahren nach einer Iteration ab. Die Kosten der Dezentralisierung betragen für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren 27,37 % bzw. 21,90 %. Das vorhandene Einsparpotenzial kann durch die dezentrale Planung in großem Maße ausgeschöpft werden.

In der Tabelle 7.8 sind die Ergebnisse für alle drei Szenarien zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die initiale Lösung durch eine gemeinsame zentrale Tourenplanung im Szenario *I* deutlicher verbessert wird als im Szenario *O* und Szenario *A*. Auch für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren wird die initiale Lösung im Szenario *I* deutlicher verbessert als im Szenario *O* und Szenario *A*, wobei ebenfalls die Kosten der Dezentralisierung abnehmen.

Tabelle 7.8: Durchschnittliche *impr*, *gap* und Iterationszahl *iter* für die zentrale und dezentrale Planung bei im Szenario *A*, *O* und *I* (in %)

Szenario	MDTSPPD	SRRA			BRRA		
	impr	impr	gap	iter	impr	gap	iter
A	19,07	3,47	12,57	1,33	3,47	12,57	1,33
O	67,38	28,69	22,73	2,83	30,84	21,99	2,40
I	155,66	76,64	27,37	4,87	100,88	21,90	3,97

Nachvollziehen lassen sich diese Beobachtungen anhand von Beispieltouren für

die drei Szenarien, dargestellt in Abbildung 7.3. Akquirieren die TDL ihre Transportaufträge in voneinander getrennten Kundengebieten, so liegen die von den TDL geplanten Touren meist in der Nähe ihrer Depots. Ein Austausch von Transportaufträgen führt meist nur dann zu einer Verbesserung der Ausgangslösung, wenn die Aufträge nahe der Grenzen von Kundengebieten liegen. Die Reallokationsverfahren brechen deshalb häufig schon nach wenigen Iterationen ab. In Szenario *O* ist eine Verbesserung der Ausgangslösung durch Kooperation wahrscheinlicher. Hier überlagern sich die Touren der TDL teilweise und ein Austausch von Transportaufträgen führt häufiger zu einer Erhöhung des Gesamtdeckungsbeitrags, d. h. Transportaufträge eines TDL können eher von einem anderen TDL zu geringeren Kosten durchgeführt werden. Die durchschnittliche Anzahl der Iterationen für die Reallokationsverfahren steigt somit an. In Szenario *I* akquirieren die TDL Transportaufträge in identischen Kundengebieten und somit überlagern sich ihre Touren dort stärker. Ein Austausch von Transportaufträgen führt hier am häufigsten zu einer Verbesserung der Ausgangslösung und die durchschnittliche Anzahl der Iterationen für die Reallokationsverfahren ist am größten.

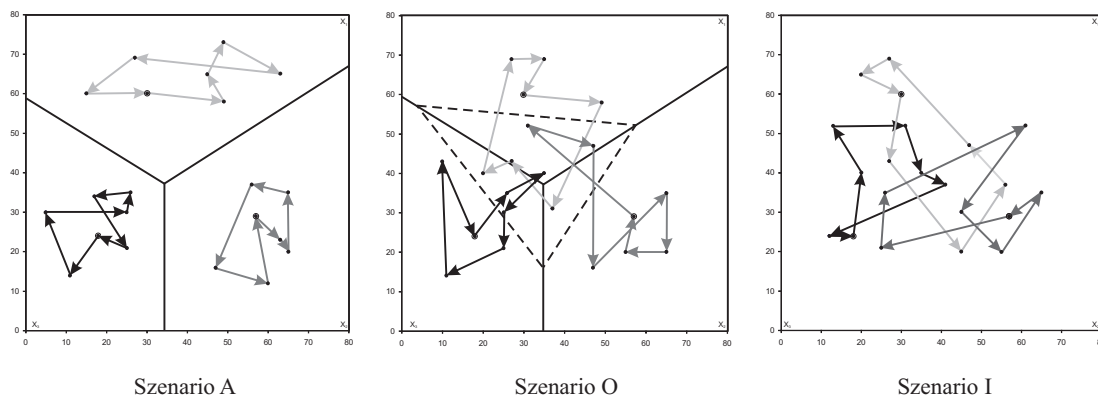


Abbildung 7.3: Beispiele für Tourenpläne im Szenario A, O und I

Insgesamt ist der Nutzen einer Kooperation bei identischen Kundengebieten größer als bei sich überlagernden und bei sich überlagernden Kundengebieten wiederum größer als bei vollständig getrennten Kundengebieten. Die formulierte Hypothese, „Kooperation zwischen TDL ist vorteilhafter, je mehr sich ihre Kundengebiete überlagern.“, kann somit für die untersuchten Testinstanzen und Reallokationsverfahren bestätigt werden.

Beim Vergleich der durchschnittlichen relativen Verbesserung *impr* und der Kosten der Dezentralisierung *gap* für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren zeigt sich, dass das bündelweise Reallokationsverfahren dem auftragsweisen

Reallokationsverfahren im Szenario O nur leicht, im Szenario I hingegen deutlich überlegen ist. Das bündelweise Reallokationsverfahren weist für beide Szenarien eine größere durchschnittliche relative Verbesserung und geringere Kosten der Dezentralisierung auf und ist somit besser als dezentrales Planungsverfahren für ein KN geeignet, bei dem das Geschäftsfeld der TDL den Kurierdienst umfasst. In Szenario A erweist sich keines der beiden Reallokationsverfahren vorteilhafter als das andere. Da in diesem Szenario durch eine dezentrale kooperative Tourenplanung nur geringe Einsparpotenziale realisiert werden können, ist die Bildung von komplementären Auftragsbündeln im bündelweisen Reallokationsverfahren nur bedingt vorteilhaft.

Die durchschnittlichen Rechenzeiten der beiden Reallokationsverfahren und des MDTSPPD für die drei Szenarien A , O und I sind in der Tabelle 7.9 aufgeführt. Der Rechenaufwand für das MDTSPPD beträgt im Durchschnitt 13 Minuten beim Szenario A , $1\frac{1}{2}$ Stunden beim Szenario O und beim Szenario I durchschnittlich zwei Stunden. Begründen lässt sich dieser Effekt damit, dass im Szenario A die Pickup- und Deliveryorte der Transportaufträge für einen TDL zufällig aus seinem von den anderen TDL separierten Kundengebieten ausgewählt werden. Die Pickup- und Deliveryorte liegen somit nur in der Nähe des Depots eines TDL. Die Zuordnung der Transportaufträge zu TDL und die Erstellung einer optimalen Tour für jeden TDL verursacht demnach wenig Rechenaufwand. Dies ist zurückzuführen auf das Vorgehen des zugrunde liegenden Branch-and-Bound-Verfahrens. Bei Instanzen des Szenarios A können frühzeitig gute Schranken gebildet und anschließend zahlreiche Teilprobleme vorzeitig als ausgelotet betrachtet werden. Wird beispielsweise ein Transportauftrag von TDL 1 an TDL 2 vergeben, so befindet sich dieser bei Instanzen vom Typ A typischerweise weit vom Depot von TDL 2 entfernt. Die Güte der Teillösung und damit die untere Schranke an diesem Knoten im Entscheidungsbaum wird entsprechend schlecht sein und eine bereits gefundene obere Schranke mit größerer Wahrscheinlichkeit zum beschneiden dieses Astes führen. Im Falle von sich überlagernden oder identischen Kundengebieten im Szenario O und I werden die Pickup- und Deliveryorte der Transportaufträge für jeden TDL zufällig aus einem identischen oder sich überlagernden Kundengebieten ausgewählt. Die Pickup- und Deliveryorte liegen demnach in der Nähe der Depots mehrerer TDL. Somit steigt der Aufwand zur Berechnung der optimalen Lösung an.

Die benötigte Zeit zur Berechnung der dezentralen Lösungen mit den beiden Reallokationsverfahren betragen demgegenüber nur wenige Sekunden. Die Unterschiede in den Rechenzeiten zwischen den beiden Reallokationsverfahren sind dabei vernachlässigbar. Der größte Rechenaufwand bei den Reallokationsverfahren entsteht für unsere Problemgrößen durch die oft wiederholte Lösung der TSPPD-Instanzen. Der Aufwand zur Berechnung des CAP im bündelweisen Reallokationsverfahren kann für unsere Problemgrößen (drei TDL, drei Aufträge) vernachlässigt werden.

Steigt jedoch die Anzahl an TDL oder die Anzahl der zu versteigernden Aufträge an, dann steigen die Anzahl der in der Auktion zu berücksichtigenden Gebote und somit die Rechenzeit exponentiell an.

Tabelle 7.9: Durchschnittliche Rechenzeiten für Szenario *A*, *O* und *I* (in Sekunden)

Szenario	MDTSPPD	SRRA	BRRRA
A	487,39	0,41	0,60
O	5003,01	11,64	2,59
I	6467,57	3,72	4,81

7.5 Einfluss von strategischem Verhalten auf die dezentrale Planung

Aufbauend auf den bisherigen Untersuchungen zu den Potenzialen kooperativer Transportnetzwerke, wird nun analysiert, inwieweit die dezentrale Planung durch strategisches Verhalten der TDL beeinflussbar ist. Strategisches Verhalten liegt nach Peters (2002, S. 47) dann vor, wenn die Akteure anstelle von wahren Präferenzen verfälschte Präferenzen offenbaren. Sie nutzen dazu Informationsasymmetrien aus, die ohne die Annahme vollständiger Informationen entstehen. In diesem Fall verfügt jeder TDL nur über private Informationen, d. h. der TDL kennt beispielsweise nur seine eigene Kostenstruktur. Um auf die Kostenstruktur seines Konkurrenten schließen zu können, müsste er Erwartungen über dessen Kostenstruktur bilden. Kommuniziert der Konkurrent verfälschte Kosten, so führt dies unter Umständen zu falschen Erwartungen beim TDL. Eine Erhöhung des Gewinns des Konkurrenten ist jedoch möglich, wenn dieser zu hoher Kosten kommuniziert, der TDL sein eigenes Angebot für einen Transportauftrag dadurch falsch kalkuliert und ihn an den Konkurrenten verliert.

Im vorgestellten Planungsansatz haben die TDL zwei Möglichkeiten sich strategisch zu verhalten.

- Fall 1: Angabe von Geboten in der Auktion, die nicht der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft des Bieters entsprechen.
- Fall 2: Angabe eines Mindestpreises, der nicht der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft des TDL entspricht.

In Fall 1 werden die Gebote für die Transportaufträge über- oder unterbewertet. Wird die Vickrey Auktion für die Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL verwendet, dann tritt dieser Fall nicht auf. In einer Vickrey Auktion kann der Bieter zwar die Wahrscheinlichkeit beeinflussen kann, eine Auktion zu gewinnen, aber nicht den Kaufpreis für das zu versteigernde Gut. Daher ist es die dominante Strategie des Bieters in einer Vickrey Auktion ist, seine wahre Zahlungsbereitschaft als Gebot zu offenbaren (siehe Kapitel 6.2.2). Aus diesem Grund wird auf eine Untersuchung von Fall 1 verzichtet.

In Fall 2 über- oder unterbewertet ein TDL den Mindestpreis eines von ihm angebotenen Auftrags. Ziel einer Überbewertung des Mindestpreises ist es, eine höhere Ausgleichszahlung zu erhalten und somit mehr Gewinn abzuschöpfen. Dabei entsteht für den TDL jedoch das Risiko, dass der Transportauftrag aufgrund eines zu hohen Mindestpreises nicht mehr ersteigert wird. Mit einer Unterbewertung des Auftrags verfolgt ein TDL das Ziel, dass sein Auftrag mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zur Auktion ausgewählt wird. Daraus ergibt sich die Möglichkeit zusätzliche Gewinne zu realisieren. Jedoch entsteht zugleich das Risiko, dass die Ausgleichszahlungen geringer ausfallen als der Mindestpreis, den der TDL selbst erwirtschaften könnte. Damit stellt sich der TDL schlechter, als ohne Kooperation.

Ziel der folgenden Untersuchung ist es, herauszufinden, inwieweit es den TDL beim auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahren möglich ist, ihren Deckungsbeitrag durch strategisches Verhalten gemäß Fall 2 zu erhöhen. Hierzu werden die Auswirkungen von strategischem Verhalten auf den Deckungsbeitrag eines TDL für verschiedene Testinstanzen analysiert. Darüber hinaus soll ermittelt werden, wann bei der Über- bzw. Unterbewertung des Mindestpreises für einen TDL die Chance einer Erhöhung seines Deckungsbeitrags das Risiko eines Verlustes übersteigt.

7.5.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchung verschiedener geografischer Szenarien machte deutlich, dass eine Kooperation zwischen TDL umso vorteilhafter ist, je stärker sich die Kundengebiete der beteiligten TDL überlagern. Für die Untersuchung der Auswirkungen von strategischem Verhalten auf die dezentrale Lösung wird auf die in Szenario *I* erstellten 30 Instanzen $p61 - p90$ zurückgegriffen, bei denen sich die Kundengebiete zwischen den beteiligten TDL vollständig überlagern und somit eine Kooperation den größten Nutzen bringt, zugleich jedoch der Wettbewerb am stärksten ist.

In Kapitel 7.4 wurden die 30 Instanzen mit den beiden vorgestellten Reallokationsverfahren gelöst. Für die Untersuchung des strategischen Verhaltens dienen diese Ergebnisse als Referenzlösungen. Um die Effekte von strategischem Verhalten identifizieren zu können, wird für jede Instanz die erste Iteration der Reallokations-

verfahren herangezogen, d. h. es erfolgt nur ein einmaliger Austausch von Transportaufträgen. Im Anschluss daran erfolgt für jede Instanz die Berechnung der Lösungen für die Über- und Unterbewertung der Mindestpreise eines am KN beteiligten TDL. Auch hier wird nur die erste Iteration betrachtet.

Da die Instanzen gleich aufgebaut sind (gleiche Anzahl Orte und gleiche Depots) und sich nur durch die jeweils gewählten Koordinaten der Kundenorte unterscheiden, ist es nicht entscheidend, welcher der beteiligten TDL sich strategisch verhält. Für diese Untersuchung wird davon ausgegangen, dass nur ein TDL verfälschte Mindestpreise kommuniziert. Dieser wird im Folgenden mit TDL^{strat} bezeichnet. Die Über- und Unterbewertung des Mindestpreises erfolgt für TDL^{strat} in absoluten Geldeinheiten, d. h. es wird bei jeder Berechnung der verlangte Mindestpreis um eine Einheit über- bzw. unterbewertet. Insgesamt wird jede Instanz einmal ohne (Referenzlösung) und durch Parametervariation bezüglich der Höhe der Über- bzw. Unterbewertung 60mal mit strategischem Verhalten berechnet. Für jede Instanz erfolgt somit eine Überbewertung des Mindestpreises für TDL^{strat} um 1 GE bis 30 GE und eine Unterbewertung um ebenfalls 1 GE bis 30 GE.

7.5.2 Analytische Betrachtungen zur Deckungsbeitragsänderung bei strategischem Verhalten

Bei der Über- und Unterbewertung des Mindestpreises durch TDL^{strat} können grundsätzlich drei verschiedene Effekte auftreten.

1. Durch das strategische Verhalten verändert sich die Verteilung der Kooperationsgewinne unter den TDL nicht und der Gesamtdeckungsbeitrag des KN sowie der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} bleiben gleich.
2. Durch das strategische Verhalten verändert sich die Verteilung der Kooperationsgewinne unter den TDL. Dabei steigt der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} , während der Gesamtdeckungsbeitrag des KN gleich bleibt.
3. Bedingt durch das strategische Verhalten wird eine strukturell andersartige Lösung ermittelt, d. h. es entsteht eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL im Vergleich zur Referenzlösung. Hierbei kann sich die Verteilung der Kooperationsgewinne unter den TDL und der Gesamtdeckungsbeitrag des KN verändern. Ob der Gesamtdeckungsbeitrag des KN und von TDL^{strat} durch die strukturell andersartige Lösung sinkt oder sich steigern lässt, hängt von der Qualität der neuen Zuordnung ab.

Wird die Referenzlösung mit den Lösungen des strategischen Verhaltens für eine Instanz verglichen, so tritt je nach Höhe der Über- und Unterbewertung des Min-

destpreises durch TDL^{strat} einer der drei Effekte auf. Im Rahmen der Untersuchung einer Instanz kann aber nicht nur ein Effekt einzeln, sondern durchaus mehrere Effekte nacheinander auftreten. Bei der Darstellung des Vergleichs der Lösungen anhand eines Diagramms werden die Abfolge der Effekte und die Veränderung des Deckungsbeitrags für TDL^{strat} bei strategischem Verhalten deutlich. Im Folgenden werden die fünf analytisch ermittelten Muster vorgestellt, die die möglichen Abfolgen von Effekten und die Veränderung des Deckungsbeitrags prototypisch abbilden.

Für die Beschreibung der fünf Muster sind drei TDL 1, TDL 2 und TDL 3 gegeben. Jeder der drei TDL hat einen Transportauftrag für die Fremdvergabe innerhalb des KN ausgewählt. Der Mindestpreis für den Auftrag von TDL^{strat} wird mit MP^{strat} , der von TDL 2 mit MP^2 und der von TDL 3 mit MP^3 bezeichnet. Die Gebote, die die TDL für die Transportaufträge der jeweils anderen TDL abgeben, werden als GB^{strat} , GB^2 und GB^3 bezeichnet.

Muster 1

In Muster 1 bleibt die Verteilung der Kooperationsgewinne unter den TDL durch strategisches Verhalten und der Gesamtdeckungsbeitrag des KN unverändert. Dem entsprechend bleibt der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} gleich. Es tritt somit nur der Effekt 1 auf. In Abbildung 7.4 ist die Veränderung des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für das Muster 1 skizziert.

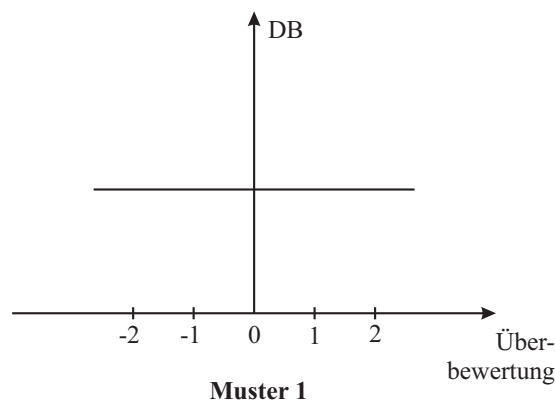


Abbildung 7.4: Verlauf des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 1

Dieses Muster tritt auf, wenn der Transportauftrag von TDL^{strat} im Reallokationsverfahren keinem anderen TDL zugeordnet wird, da sich der Gesamtdeckungsbeitrag des KN dadurch nicht verbessern lässt. Somit kann der TDL^{strat} in diesem Fall

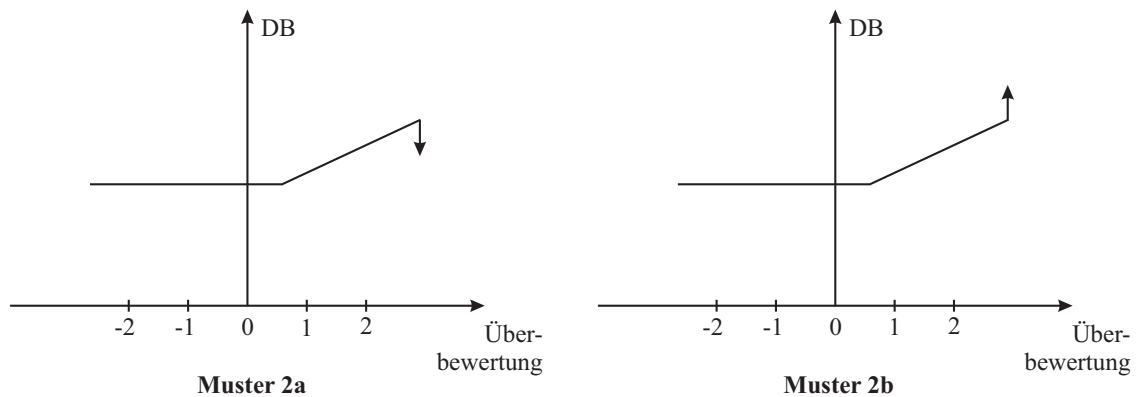
durch eine Über- oder Unterbewertung seines Mindestpreises weder die Zuordnung der Transportaufträge noch seinen Deckungsbeitrag beeinflussen.

Muster 2a und 2b

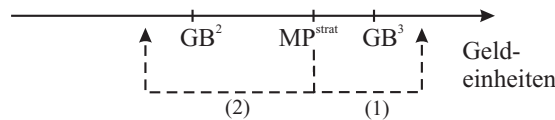
In Muster 2 bleibt die Verteilung der Gewinne unter den TDL bei strategischem Verhalten, ausgehend von einer Unterbewertung des Mindestpreises, zunächst gleich (Effekt 1). Bei weiterer Erhöhung des Mindestpreises verändert sich die Verteilung der Gewinne unter den TDL (Effekt 2) und der TDL^{strat} kann seinen Deckungsbeitrag auf Kosten der anderen TDL steigern, ohne dass der Gesamtdeckungsbeitrag des KN sinkt. Führt TDL^{strat} dieses Verhalten weiter fort, stellt sich eine strukturell andersartige Lösung ein (Effekt 3), d. h. es entsteht eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL, die sich von der ohne strategisches Verhalten unterscheidet. Durch eine weitere Erhöhung des Mindestpreises ist dann keine Änderung im Deckungsbeitragsverlauf von TDL^{strat} mehr möglich, es tritt somit wieder der Effekt 1 ein. Da sich der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} nach Auftreten von Effekt 3 nicht mehr verändert, wird auf die Betrachtung dieses Sachverhalts verzichtet.

In Muster 2 treten somit alle drei vorgestellten Effekte auf. Da es für den Effekt 3 zwei Möglichkeiten für die Entwicklung des Gesamtdeckungsbeitrags des KN und für TDL^{strat} gibt, wird das Muster 2 weiter in die Muster 2a und 2b untergliedert. Für das Muster 2a sinkt der Gesamtdeckungsbeitrag des KN und der von TDL^{strat} durch die neue Zuordnung und für das Muster 2b steigt der Gesamtdeckungsbeitrag des KN und der von TDL^{strat} . Die Abbildung 7.5 zeigt die Kurvenverläufe für die Veränderungen des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 2a und 2b. Im Gegensatz zum dargestellten Verlauf, können die Effekte 2 und 3 durchaus schon im Bereich der Unterbewertung des Mindestpreises, links von der Y-Achse, beginnen. Dies würde bedeuten, dass eine Unterbewertung des Mindestpreises durch TDL^{strat} zu einer Senkung seines Deckungsbeitrags führt.

Die Muster 2a und 2b treten auf, wenn der von TDL^{strat} gewählte MP^{strat} zu einem beliebigen Zeitpunkt zwischen den Geboten der anderen TDL GB^2 und GB^3 liegt und somit direkt die zu leistende Ausgleichszahlung bestimmt, siehe Abbildung 7.6. Wird der Mindestpreis also um eine weitere Einheit angehoben, so realisiert TDL^{strat} eine Einheit zusätzlichen Gewinn. Ist die Überbewertung des Mindestpreises MP^{strat} jedoch so hoch, dass er beide Gebote übersteigt (1), so tritt der Effekt 3 auf und die ursprüngliche Auftragszuordnung verändert sich. In diesem Fall kann die neue Auftragszuordnung zu einer Verbesserung oder einer Verschlechterung der Gesamtlösung führen. Senkt der TDL^{strat} demgegenüber MP^{strat} , so erhält er eine geringere Ausgleichszahlung und realisiert weniger Gewinn. Variiert der TDL^{strat} MP^{strat} unterhalb beider Gebote (2), so verändert sich weder die Aufteilung der

Abbildung 7.5: Verlauf des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 2a und 2b

Gewinne noch die Gesamtlösung.

Abbildung 7.6: Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 2a und 2b

Muster 3a und 3b

In Muster 3 bleibt die Verteilung der Gewinne unter den TDL bei strategischem Verhalten zunächst gleich (Effekt 1). Danach stellt sich eine strukturell andersartige Lösung ein (Effekt 3), d. h. es entsteht eine neue Zuordnung von Transportaufträgen zu TDL, die sich von der ohne strategisches Verhalten unterscheidet. Durch eine weitere Erhöhung des Mindestpreises ist wiederum keine Änderung im Deckungsbeitragsverlauf von TDL^{strat} mehr möglich, es tritt somit wieder der Effekt 1 ein. Auch hier wird auf die Betrachtung dieses Sachverhalts verzichtet. In diesem Muster treten nur zwei der vorgestellten Effekte auf. Da es hier für den Effekt 3 ebenfalls zwei Möglichkeiten für die Entwicklung des Gesamtdeckungsbeitrags des KN und für TDL^{strat} gibt, wird es ebenfalls weiter in die Muster 3a und 3b untergliedert. Bei Muster 3a sinkt der Gesamtdeckungsbeitrag des KN und der von TDL^{strat} durch die neue Zuordnung. Demgegenüber steigt der Gesamtdeckungsbeitrag des KN und der von TDL^{strat} bei Muster 3b. Die Abbildung 7.7 zeigt schematisch die Kurvenverläufe für die Veränderungen des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 3a und 3b. Der

Beginn des jeweiligen Effekts ist wie für die Muster 2a und 2b nicht auf die in der Abbildung dargestellten Positionen festgelegt.

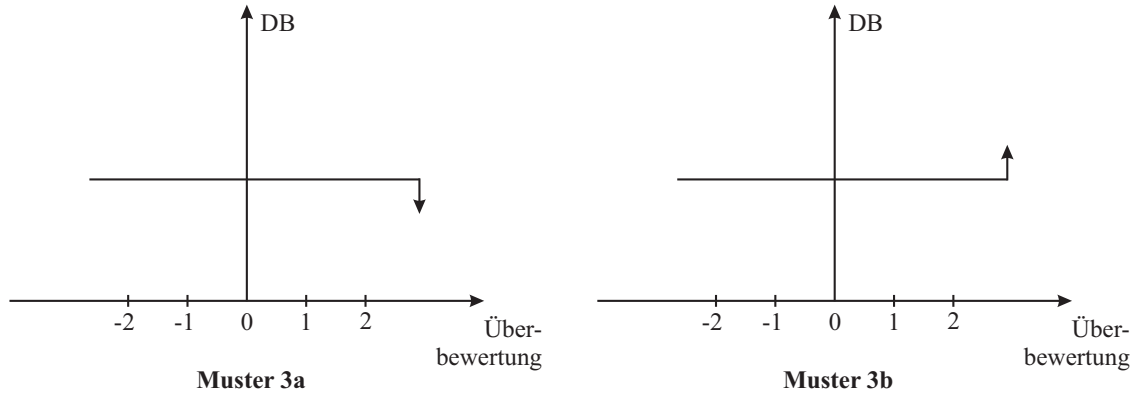


Abbildung 7.7: Verläufe des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 3a und 3b

Der erste Grund für das Auftreten dieser Muster ist, dass der von TDL^{strat} gewählte MP^{strat} zu einem beliebigen Zeitpunkt unterhalb des Mindestpreises für einen anderen Transportauftrag, in diesem Fall unterhalb von MP^2 , liegt (siehe Abbildung 7.8). Wird MP^{strat} also angehoben und liegt er dann oberhalb von MP^2 (1), so wird der Transportauftrag von TDL^{strat} nicht mehr zur Reallokation ausgewählt und es ergibt sich eine strukturell andersartige Lösung. Senkt der TDL^{strat} demgegenüber MP^{strat} , so verändert sich weder die Aufteilung der Gewinne noch die Gesamtlösung.

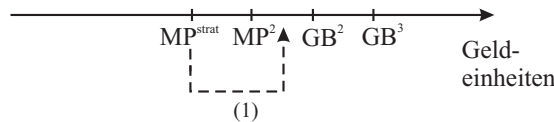


Abbildung 7.8: Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 3a und 3b, wenn $GB^2 \neq GB^3$

Der zweite wesentlich seltenere Grund für das Auftreten dieses Musters ist, dass die Gebote der anderen TDL gleich sind (siehe Abbildung 7.9). Solange der Mindestpreis nicht über den Geboten liegt, verändert sich nichts an der Aufteilung der Gewinne und der Gesamtlösung, da die Ausgleichszahlung durch das zweite Gebot bestimmt wird. Liegt der Mindestpreis demgegenüber oberhalb der beiden Gebote $GB^2=GB^3$ (1), so wird der Transportauftrag von TDL^{strat} nicht mehr zur Reallokation ausgewählt und es ergibt sich eine strukturell andersartige Lösung.

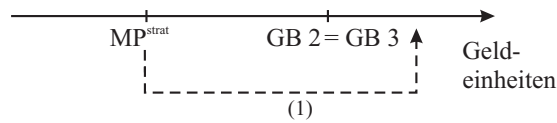


Abbildung 7.9: Auswirkungen der Variation des Mindestpreises durch TDL^{strat} für Muster 3a und 3b, wenn $GB^2 = GB^3$

Die Instanzen $p72$, $p74$ und $p82$ entsprechen jeweils einem der fünf beschriebenen Muster. Die absolute Veränderung des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} bei strategischem Verhalten ist für diese Instanzen in Abbildung 7.10 dargestellt.

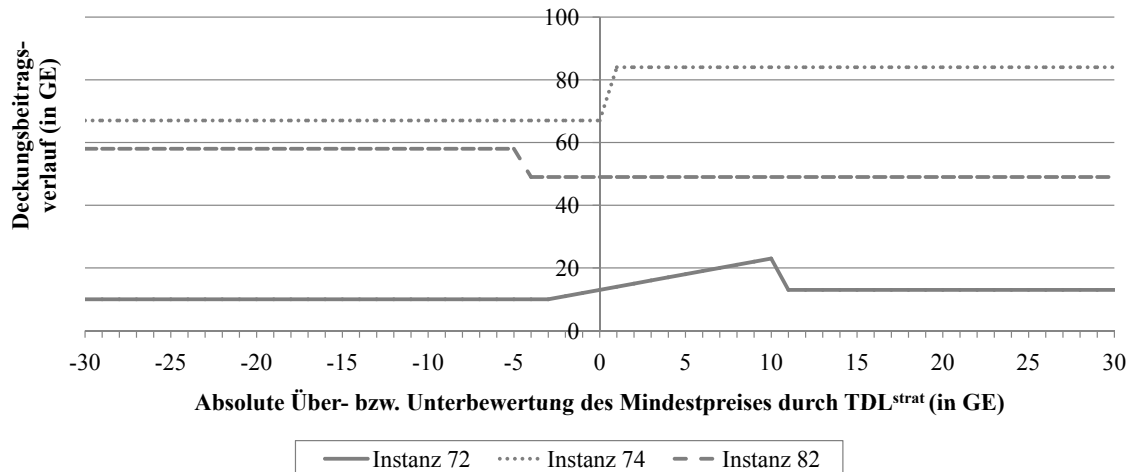


Abbildung 7.10: Veränderung des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Instanz $p72$, $p82$ und $p74$

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Instanz $p72$ das Muster 2a aufweist, wobei sich der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} bei strategischem Verhalten erst nicht ändert, dann ansteigt und zum Schluss sinkt. Die Instanz $p82$ weist das Muster 3a auf. Hier verändert sich der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} zunächst nicht bevor eine strukturell andersartige Lösung entsteht und sein Deckungsbeitrag sinkt. Bei Instanz $p74$, die das Muster 3b aufweist, erhöht sich der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} beim Auftreten der strukturell andersartigen Lösung.

7.5.3 Einfluss von strategischem Verhalten im auftragsweisen Reallokationsverfahren

Nachdem die grundlegenden Muster für die Veränderung der Gesamtdeckungsbeiträge vorgestellt wurden, soll nun untersucht werden, inwieweit sich strategisches Verhalten auf den Gesamtdeckungsbeitrag des KN und des TDL^{strat} in den 30 untersuchten Testinstanzen auswirkt, d. h. ob das auftragsweise Reallokationsverfahren durch strategisches Verhalten eines TDL beeinflussbar ist. Außerdem wird ermittelt, wann bei der Über- bzw. Unterbewertung des Mindestpreises für einen TDL die Chance einer Erhöhung seines Deckungsbeitrags das Risiko eines Verlustes übersteigt. Dazu wird für jede Instanz nur die erste Iteration der Reallokationsverfahren herangezogen.

Es wird zunächst ermittelt, welches Muster jede der 30 Testinstanzen bei strategischem Verhalten aufweist. Weiterhin erfolgt für jede Instanz die Berechnung der relativen Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} , die sich bei strategischem Verhalten im Vergleich zur Referenzlösung ergibt. Am Mittelwert der relativen Deckungsbeitragsänderung für alle Instanzen eines Musters kann TDL^{strat} ablesen, wie sich sein Deckungsbeitrag bei strategischem Verhalten für das betrachtete Muster im Durchschnitt verändert.

Da dem TDL^{strat} jedoch a priori das Muster nicht bekannt ist, erfolgt zusätzlich die Bestimmung der Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung über alle Muster. Er berechnet sich, indem die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Muster mit der jeweiligen relativen Deckungsbeitragsänderung multipliziert und anschließend aufsummiert werden. Der Erwartungswert zeigt an, wann eine Chance zur Erhöhung des Deckungsbeitrags für TDL^{strat} das Risiko eines Verlustes übersteigt. Ist er positiv, so überwiegt die Chance einer Erhöhung des Deckungsbeitrags und ist er negativ, so überwiegt das Risiko eines Verlustes.

Die Häufigkeitsverteilung der Muster für die 30 untersuchten Instanzen ist in Abbildung 7.11 dargestellt. Das Muster 1 tritt in sieben von 30 Instanzen, Muster 2a in acht von 30 Instanzen, Muster 2b in einer von 30 Instanzen, Muster 3a in neun von 30 Instanzen und Muster 3b in fünf von 30 Instanzen auf.

Da das Ziel von TDL^{strat} eine Besserstellung durch die Über- oder Unterbewertung (in jedem Fall keine Schlechterstellung) ist, gilt es für ihn eine Verringerung seines Deckungsbeitrags durch eine strukturell andersartige Lösung zu verhindern. Für Muster 2a, 2b, 3a und 3b kann für den TDL^{strat} sowie für das KN entweder eine Erhöhung oder eine Verringerung des Gesamtdeckungsbeitrags bei Eintreten der strukturell andersartigen Lösung resultieren. Da die absolute Höhe der Deckungsbeitragsänderung von der jeweils untersuchten Instanz abhängt, ist der TDL^{strat} nur

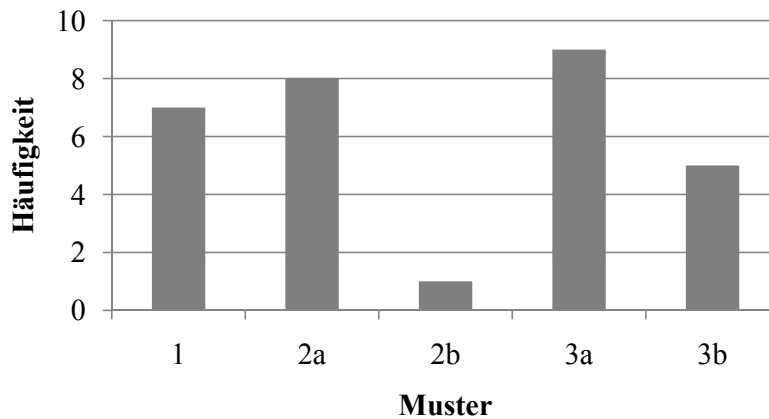


Abbildung 7.11: Häufigkeitsverteilung für die Muster 1, 2a, 2b, 3a und 3b über alle 30 Instanzen bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens

daran interessiert, welchen zusätzlichen relativen Gewinn oder Verlust er durch strategisches Verhalten realisieren kann. Es ist also ausreichend, die relative Abweichung des Deckungsbeitrags bei strategischem Verhalten vom Deckungsbeitrag in der Referenzlösung zu ermitteln. Werden nun die relativen Abweichungen des Deckungsbeitrags für alle Instanzen eines Musters überlagert, so entsteht ein Verlauf für den Mittelwert der relativen Deckungsbeitragsänderung (MDB) von TDL^{strat} für das jeweils betrachtete Muster. Da sich für Muster 1 keine Veränderung des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} einstellt, ist die Bestimmung des MDB nicht notwendig.

In Abbildung 7.12 sind die MDB für TDL^{strat} für die Muster 2a, 2b, 3a und 3b bei einer Über- und Unterbewertung des Mindestpreises von 1-30 Geldeinheiten dargestellt.

Die Verläufe der MDB für die vier dargestellten Muster unterscheiden sich von denen im Kapitel 7.5.2 vorgestellten prototypischen Verläufen. Dies ist auf die Überlagerung der dem jeweiligen Muster angehörenden Testinstanzen zurückzuführen, die bei unterschiedlich hoher Über- bzw. Unterbewertung einen Anstieg oder eine Senkung des Deckungsbeitrags aufweisen. Für das Muster 2a ist die Instanz *p77* beispielsweise für den Anstieg des MDB bei einer Unterbewertung des Deckungsbeitrags um 10 GE verantwortlich, die Instanzen *p72* und *p76* für den Anstieg des MDB bei einer Unterbewertung um 2 GE und die Instanz *76* für die Senkung des MDB bei einer Überbewertung von 15 GE. Ähnlich verhält es sich für die anderen drei Muster.

Insgesamt ist für die 30 untersuchten Instanzen zu erkennen, dass der MDB für TDL^{strat} vom jeweils auftretenden Muster abhängt. Nimmt TDL^{strat} eine Unterbe-

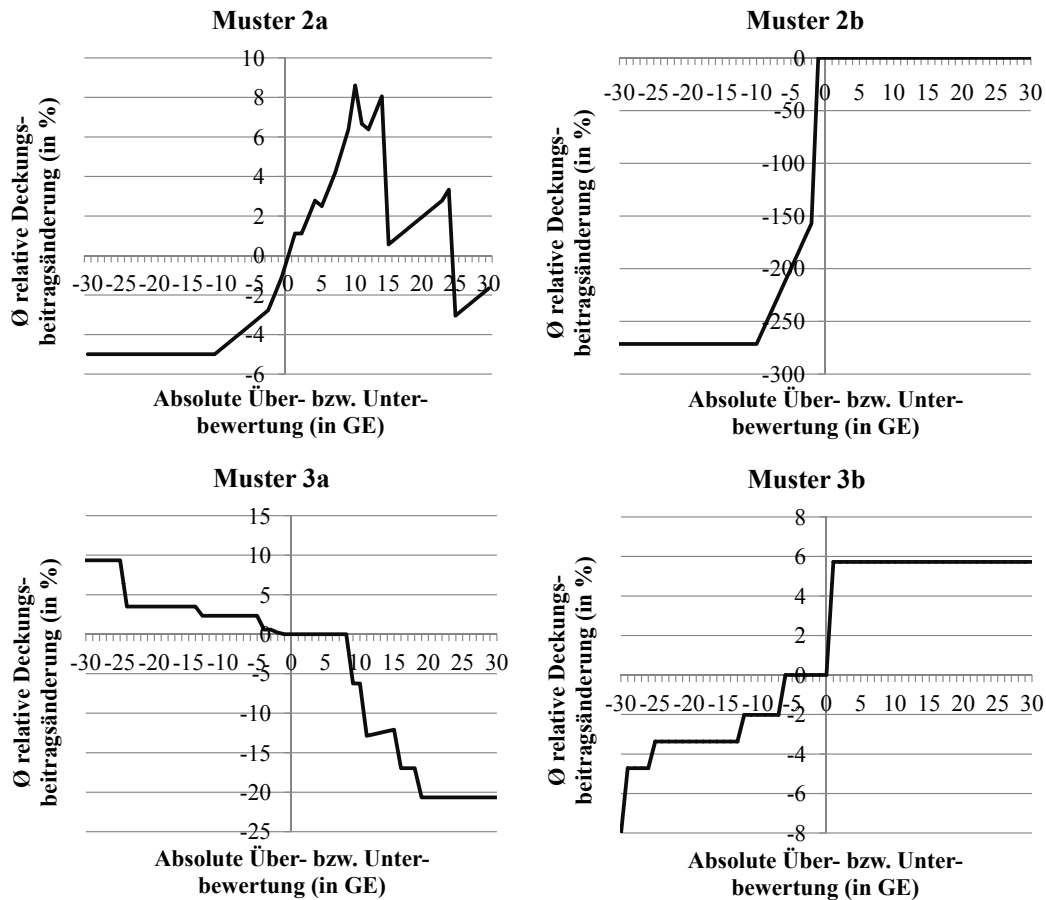


Abbildung 7.12: Durchschnittliche relative Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} in Muster 2a, 2b, 3a und 3b bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens

wertung seines Mindestpreises vor, so ergibt sich für Muster 3a ein MDB größer null. Demgegenüber ist der MDB bei Unterbewertung für Muster 2a, 2b und 3b kleiner als null. Auch im Bereich der Überbewertung des Mindestpreises gibt es Muster, die einen negativen MDB aufweisen und Muster, bei denen er positiv ist. Wäre TDL^{strat} das auftretende Muster vorher bekannt, so könnte er anhand des MDB ablesen, wie sich sein Deckungsbeitrag im Durchschnitt bei strategischem Verhalten verändert und gegebenenfalls sein zukünftiges Handeln daran ausrichten. Ist der MDB für TDL^{strat} größer als null, so ist die Chance seinen Deckungsbeitrag zu erhöhen, größer als das Risiko einer Schlechterstellung und er wird sich strategisch verhalten. Ist der MDB hingegen negativ, so überwiegt das Risiko, seinen Deckungsbeitrag zu verschlechtern. Der TDL wird sich dann nicht strategisch verhalten.

Da TDL^{strat} jedoch a priori das Muster nicht bekannt ist, müssen zusätzlich die Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung über alle Muster bestimmen werden. Um diese zu ermitteln, werden die relativen Häufigkeiten für das Eintreten der verschiedenen Muster als Eintrittswahrscheinlichkeiten interpretiert. Für das Muster 1 beträgt sie $23,3\%$, für das Muster 2a $26,6\%$, für das Muster 2b $0,03\%$, für das Muster 3a 30% und für das Muster 3b $16,6\%$. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Muster werden anschließend mit den jeweils ermittelten MDB multipliziert und ergeben über alle Muster aufsummiert den gesuchten Erwartungswert der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} bei strategischem Verhalten. In Abbildung 7.13 sind die Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über alle Muster bei einer Über- und Unterbewertung des Mindestpreises von 1-30 Geldeinheiten dargestellt.

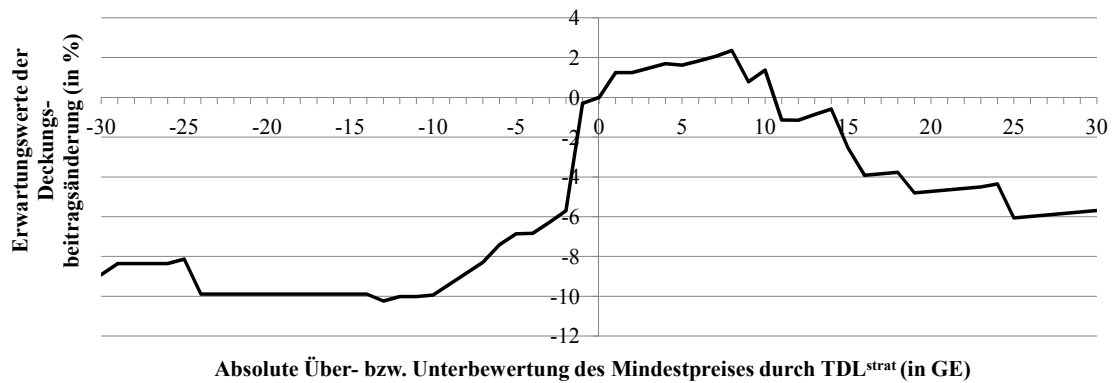


Abbildung 7.13: Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über alle Muster bei Anwendung des auftragsweisen Reallokationsverfahrens

Für die 30 Testinstanzen ergeben sich lediglich zwischen einer Überbewertung von 1 GE und einer Überbewertung von 10 GE nicht-negative Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung. In diesem Bereich ist also die Chance für TDL^{strat} seinen Deckungsbeitrag zu erhöhen, größer als das Risiko einer Schlechterstellung. In allen anderen Fällen überwiegt das Risiko, seinen Deckungsbeitrag zu verschlechtern. Bei einer Überbewertung des Mindestpreises um 8 GE ist die erwartete relative Verbesserung seines Deckungsbeitrags mit 2,9 % am größten.

Diese Ergebnisse sind stark davon abhängig, welche Auftragskonstellationen im KN vorliegen bzw. welche Testinstanzen für die Untersuchungen herangezogen werden. So können bei einem veränderten Instanzenset andere relative Veränderungen des Deckungsbeitrags pro Instanz und demzufolge andere Kurvenverläufe für den MDB pro Muster entstehen. Da sich die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Mu-

ster verändern kann, ist ebenfalls ein anderer Verlauf der Erwartungswerte über alle Muster denkbar.

Insgesamt lässt sich ableiten, dass das auftragsweise Reallokationsverfahren durch strategisches Verhalten beeinflussbar ist. Gibt also ein TDL einen Mindestpreis an, der sich von seiner tatsächlichen Zahlungsbereitschaft unterscheidet, so ist er bei bestimmten Auftragskonstellationen in der Lage seinen Deckungsbeitrag zu erhöhen. Es besteht für TDL somit ein gewisser Anreiz sich strategisch zu verhalten. Dieser Anreiz ist allerdings nur bei der Überbewertung seines Mindestpreises gegeben, da nur dort die Chance einer Deckungsbeitragserrhöhung das Risiko einer Schlechterstellung überwiegt.

7.5.4 Einfluss von strategischem Verhalten im bündelweisen Reallokationsverfahren

Im Vergleich zum Austausch von einzelnen Transportaufträgen im auftragsweisen Reallokationsverfahren erfolgt beim bündelweisen Reallokationsverfahren ein Austausch von mehreren Transportaufträgen gleichzeitig. Die Vielzahl an Auftragskombinationen in denen ein Transportauftrag dabei enthalten sein kann, erschwert eine Analyse von strategischem Verhalten. Besonders die Bestimmung der Ausgleichszahlungen mit und ohne Manipulation der Mindestpreise ist sehr komplex.

Es soll nun ebenfalls untersucht werden, inwieweit sich strategisches Verhalten auf den Gesamtdeckungsbeitrag des KN und des TDL^{strat} in den 30 untersuchten Testinstanzen auswirkt, d. h. ob das bündelweise Reallokationsverfahren durch strategisches Verhalten eines TDL beeinflussbar ist. Außerdem wird ermittelt, wann bei der Über- bzw. Unterbewertung des Mindestpreises für einen TDL die Chance einer Erhöhung seines Deckungsbeitrags das Risiko eines Verlustes übersteigt. Um die Effekte von strategischem Verhalten identifizieren zu können, wird für dieses Reallokationsverfahren ebenfalls nur die erste Iteration herangezogen.

Genau wie für das auftragsweise Reallokationsverfahren wird zunächst ermittelt, welches Muster jede der 30 Testinstanzen bei strategischem Verhalten aufweist und wie hoch die relative Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} in jeder Testinstanz ist. Da dem TDL^{strat} bei diesem Reallokationsverfahren a priori das Muster nicht bekannt ist, erfolgt zusätzlich die Bestimmung der Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung über alle Muster.

Die Häufigkeitsverteilung der Muster für die 30 untersuchten Instanzen ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

Die Muster 1, 3a und 3b treten bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens nicht auf. Demgegenüber tritt Muster 2a in 27 von 30 Instanzen und Muster 2b in drei von 30 Instanzen auf. Die von den TDL zur Auktion ausgewähl-

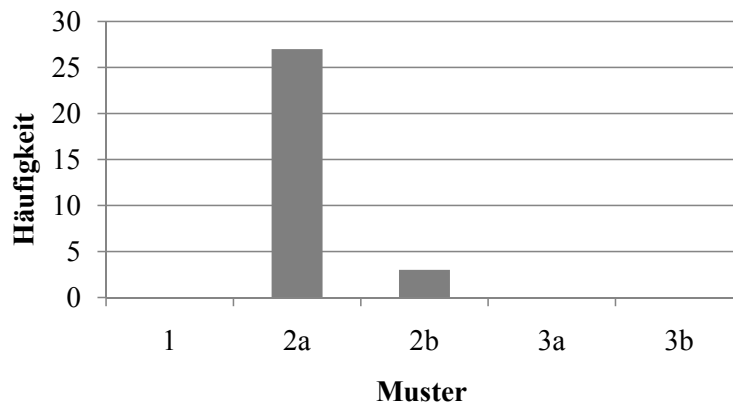


Abbildung 7.14: Häufigkeitsverteilung für die Muster 1, 2a, 2b, 3a und 3b über alle 30 Instanzen bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens

ten Transportaufträge werden hier durch eine kombinatorische Auktion neu auf die TDL verteilt. Die jeweiligen Auktionsgewinner müssen eine Ausgleichszahlung an die Anbieter in Höhe der Mindestpreise leisten. Die Anbieter können somit durch die Angabe eines Mindestpreises, der nicht ihrer tatsächlichen Zahlungsbereitschaft entspricht, immer direkt die Ausgleichszahlung und die Höhe ihres Deckungsbeitrags beeinflussen. Aus diesem Grund treten bei diesem Reallokationsverfahren nur Muster 2a und 2b, jedoch nicht Muster 1, 3a und 3b auf. Der Verlauf dieser beiden Muster unterscheidet sich jedoch zum Teil von denen im auftragsweisen Reallokationsverfahren. Durch die direkte Beeinflussung der Ausgleichszahlungen steigt in den Mustern 2a und 2b der Deckungsbeitrag von TDL^{strat} bis sich eine strukturell andersartige Lösung (Effekt 3) ergibt. Danach tritt der Effekt 1 auf und der Deckungsbeitrag ändert sich nicht mehr. Auch hier wird, wie für Muster 3a und 3b auf die Betrachtung dieses Sachverhalts verzichtet. Die beiden Verläufe sind in Abbildung 7.15 dargestellt.

Analog zum auftragsweisen Reallokationsverfahren ist der TDL^{strat} nur daran interessiert, welchen zusätzlichen relativen Gewinn oder Verlust er durch strategisches Verhalten realisieren kann. Über alle Testinstanzen jedes Musters wird deshalb ebenfalls der MDB von TDL^{strat} bestimmt. In Abbildung 7.16 sind die MDB für TDL^{strat} für das Muster 2a und 2b bei einer Über- und Unterbewertung des Mindestpreises von 1-30 Geldeinheiten dargestellt.

Die Verläufe der MDB für die zwei dargestellten Muster unterscheiden sich von denen in Abbildung 7.15 dargestellten prototypischen Verläufen. Dies ist wie bei den Auswertungen zum auftragsweisen Reallokationsverfahren auf die Überlagerung der dem jeweiligen Muster angehörenden Testinstanzen zurückzuführen, die bei unter-

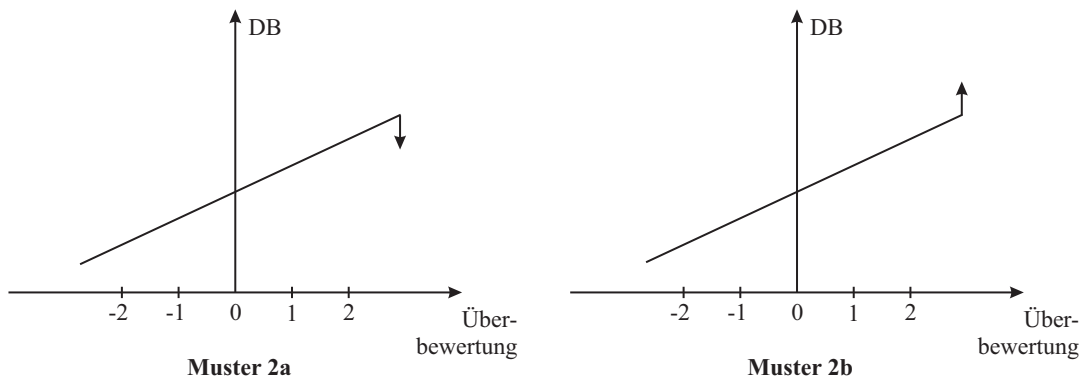


Abbildung 7.15: Verläufe des Deckungsbeitrags von TDL^{strat} für Muster 2a und 2b bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens

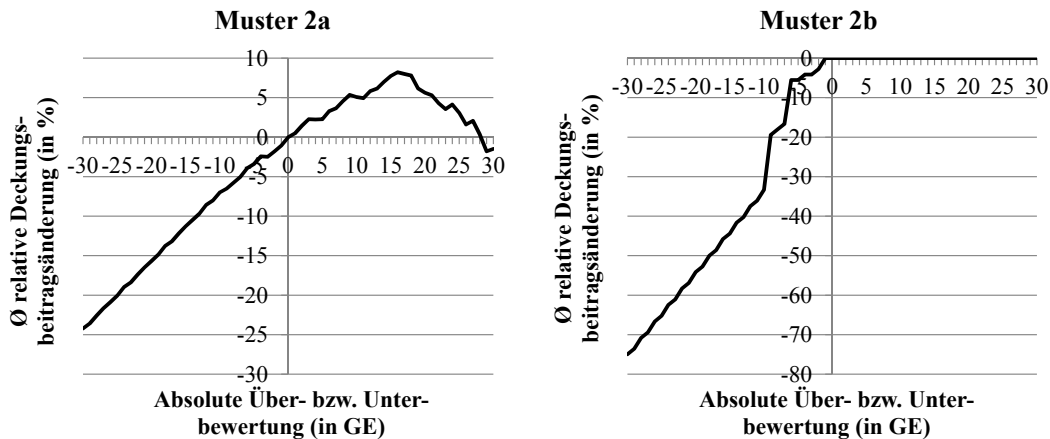


Abbildung 7.16: Durchschnittliche relative Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} in Muster 2a und 2b bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens

schiedlich hoher Über- bzw. Unterbewertung einen Anstieg oder eine Senkung des Deckungsbeitrags aufweisen.

Insgesamt ist für die 30 untersuchten Instanzen zu erkennen, dass der MDB für TDL^{strat} bei Unterbewertung immer negativ ist. Das Risiko seinen Deckungsbeitrag zu senken ist hier größer, als die Chance einer Besserstellung. Im Bereich der Überbewertung des Mindestpreises weist das Muster 2a positive und negative MDB auf, wohingegen Muster 2b für die Überbewertung immer einen MDB von 0 % aufweisen. Wäre TDL^{strat} das auftretende Muster vorher bekannt, so könnte er anhand des MDB ablesen, wie sich sein Deckungsbeitrag im Durchschnitt bei strategischem Verhalten verändert und gegebenenfalls sein zukünftiges Handeln daran ausrichten.

Da TDL^{strat} das auftretende Muster hier ebenfalls nicht bekannt ist, werden nun analog zum auftragsweisen Reallokationsverfahren die Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung über alle Muster auf Basis der durchgeführten Experimente vorgenommen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für Muster 2a beträgt 90 % und für Muster 2b 10 %. In Abbildung 7.17 sind die Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über beide Muster bei einer Über- und Unterbewertung des Mindestpreises von 1-30 Geldeinheiten dargestellt.

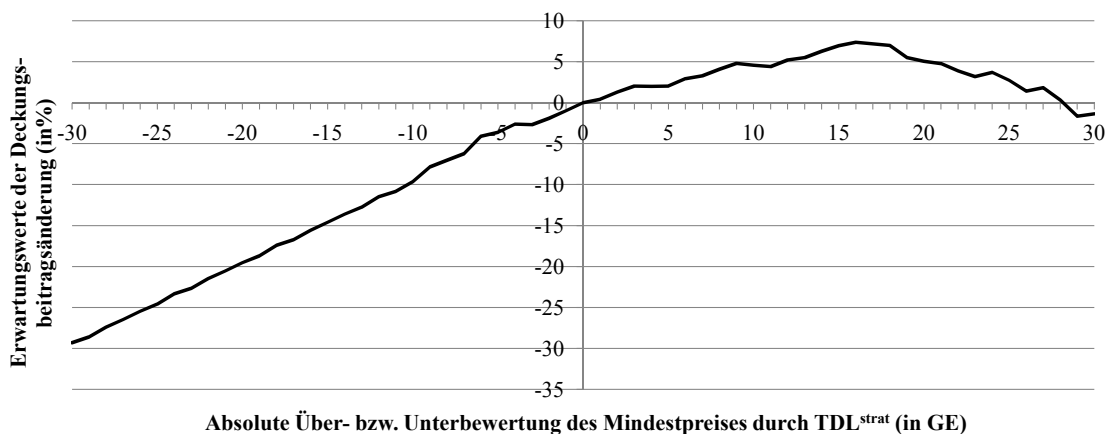


Abbildung 7.17: Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung für TDL^{strat} über alle Muster bei Anwendung des bündelweisen Reallokationsverfahrens

Für die 30 Testinstanzen ergeben sich zwischen einer Überbewertung von 1 und 27 GE nicht-negative Erwartungswerte der Deckungsbeitragsänderung. In diesem Bereich ist also die Chance für TDL^{strat} seinen Deckungsbeitrag zu erhöhen größer als das Risiko einer Schlechterstellung. In allen anderen Fällen überwiegt das Risiko, seinen Deckungsbeitrag zu verschlechtern. Bei einer Überbewertung des Mindestpreises um 16 GE ist die erwartete Verbesserung seines Deckungsbeitrags mit 8,1 % am größten, was für TDL^{strat} einer deutlichen absoluten Erhöhung seines Deckungsbeitrags entspricht.

Diese Ergebnisse sind ebenfalls stark davon abhängig, welche Auftragskonstellationen im KN vorliegen bzw. welche Testinstanzen für die Untersuchungen herangezogen werden. So können bei einem veränderten Instanzenset andere relative Veränderungen des Deckungsbeitrags pro Instanz und demzufolge auch andere Kurvenverläufe für den MDB pro Muster entstehen. Da sich die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Muster verändern kann, ist ebenfalls ein anderer Verlauf der Erwartungswerte über alle Muster denkbar.

Insgesamt lässt sich ableiten, dass das bündelweise Reallokationsverfahren durch

strategisches Verhalten beeinflussbar ist. Gibt ein TDL einen von seiner tatsächlichen Zahlungsbereitschaft abweichenden Mindestpreis an, so ist er bei bestimmten Auftragskonstellationen in der Lage seinen Deckungsbeitrag zu erhöhen. Es besteht für TDL für dieses Reallokationsverfahren somit ebenfalls ein Anreiz sich strategisch zu verhalten. Da nur bei der Überbewertung die Chance einer Deckungsbeitrags-erhöhung größer ist als das Risiko einer Schlechterstellung, wird TDL^{strat} jedoch die Überbewertung seines Mindestpreises präferieren.

7.6 Vergleich des auftrags- und bündelweisen Reallokationsverfahrens

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Vorteilhaftigkeit von Kooperationen bei Variation der Fahrzeugkapazität und bei verschiedenen Wettbewerbssituationen untersucht. Darüber hinaus erfolgte eine Analyse des Einflusses von strategischem Verhalten auf die vorgestellten Reallokationsverfahren. Diese Ergebnisse sollen nun zusammengeführt werden, um die beiden Reallokationsverfahren abschließend zu bewerten und zu vergleichen.

Als Bewertungsgrundlage dienen drei Kriterien, die teilweise schon in der Beschreibung zu diesen Verfahren und den quantitativen Untersuchungen näher betrachtet wurden. Dazu gehören

1. die Kosten der Dezentralisierung,
2. der Einfluss von strategischem Verhalten und
3. der Lösungsaufwand.

7.6.1 Kosten der Dezentralisierung

Die Kosten der Dezentralisierung geben die relative Verschlechterung der dezentralen Lösung gegenüber der zentralen Lösung an. Daraus kann abgeleitet werden, wie leistungsfähig die beiden Reallokationsverfahren bei bestimmten Rahmenbedingungen sind. Die Tabelle 7.10 zeigt die Kosten der Dezentralisierung für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren bei Variation der Fahrzeugkapazitäten und der Intensität des Wettbewerbs.

Insgesamt weist das bündelweise Reallokationsverfahren geringere Kosten der Dezentralisierung auf als das auftragsweise Reallokationsverfahren. Dabei ist unerheblich, ob die Fahrzeugkapazitäten variiert oder unterschiedliche Wettbewerbssituationen unterstellt werden. Die Stärke des bündelweisen Reallokationsverfahrens liegt

Tabelle 7.10: Kosten der Dezentralisierung für das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren (in %)

	Kosten der Dezentralisierung	
	SRRA	BRRA
Fahrzeugkapazität		
- gering	20,11	19,38
- hoch	19,42	17,23
Wettbewerbsintensität		
- gering	12,57	12,57
- mittel	22,73	21,99
- hoch	27,37	21,90

somit vor allem in der geringeren Verschlechterung gegenüber der zentralen Lösung, welche auf die Berücksichtigung von Komplementaritäten zwischen verschiedenen Transportaufträgen zurückzuführen ist. Am stärksten ist diese Eigenschaft bei hohen Fahrzeugkapazitäten und einer hohen Intensität des Wettbewerbs ausgeprägt. Die Stärke des bündelweisen Reallokationsverfahrens ist gleichzeitig die Schwäche des auftragsweisen Reallokationsverfahrens. Es weist also eine größere Verschlechterung gegenüber der zentralen Lösung, besonders bei hohen Fahrzeugkapazitäten und einer hohen Intensität des Wettbewerbs auf.

7.6.2 Einfluss von strategischem Verhalten

Strategisches Verhalten der TDL im KN beeinflusst die Reallokationsverfahren zum einen durch eine Veränderung der Allokation von Aufträgen und zum anderen durch eine veränderte Verteilung der Kooperationsgewinne unter den TDL des KN. In der quantitativen Analyse wurde strategisches Verhalten im Hinblick auf die Angabe von Mindestpreisen, die nicht der tatsächlichen Zahlungsbereitschaft entsprechen, durch die TDL untersucht. Die TDL nehmen dabei entweder eine Über- oder Unterbewertung ihrer Mindestpreise vor, um ihre Gewinne auf Kosten der anderen TDL des KN zu erhöhen. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der Reallokationsverfahren mit und ohne strategisches Verhalten wird abgeleitet, inwieweit die Allokation der Aufträge und die Verteilung der Kooperationsgewinne beeinflussbar sind. Die Tabelle 7.11 zeigt den Einfluss von strategischem Verhalten auf das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren.

Für jedes der beiden Reallokationsverfahren sind die Allokation von Aufträgen

Tabelle 7.11: Einfluss von strategischem Verhalten auf das auftrags- und bündelweise Reallokationsverfahren

	Einfluss von strategischem Verhalten	
	SRRA	BRRRA
Überbewertung MP	mittel	hoch
Unterbewertung MP	gering	gering

und die Aufteilung der Kooperationsgewinne durch strategisches Verhalten der TDL beeinflussbar. Jedoch unterscheidet sich dieser Einfluss für die Über- und Unterbewertung des Mindestpreises. Das auftragsweise Reallokationsverfahren wird durch eine Überbewertung des Mindestpreises weniger beeinflusst, als das bündelweise Reallokationsverfahren. Eine Unterbewertung des Mindestpreises beeinflusst die Ergebnisse beider Reallokationsverfahren demgegenüber nur gering.

Insgesamt weisen beide Reallokationsverfahren eine Schwäche bezüglich des Ausschließens von strategischem Verhalten auf, auch wenn der Einfluss einer Unterbewertung des Mindestpreises deutlich geringer ist. Ein TDL hat bei beiden Reallokationsverfahren somit eine Möglichkeit, die Aufteilung der Kooperationsgewinne zu seinen Gunsten zu beeinflussen. Um strategisches Verhalten für das bündelweise Reallokationsverfahren zu verhindern, wäre es naheliegend, statt der einfachen Gleichverteilung, komplexere Gewinnverteilungsmethoden zu verwenden. Jedoch ist keiner der in Kapitel 5.5 vorgestellten Ansätze in der Lage, die Angabe verfälschter Mindestpreise zu verhindern.

7.6.3 Lösungsaufwand

Der Lösungsaufwand für beide Reallokationsverfahren setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen erfolgt die wiederholte Lösung von Tourenplanungsproblemen im Rahmen der Bewertung von Transportaufträgen und bei der Berechnung der Gebote für die durchzuführende Auktion. Zum anderen entsteht ein Aufwand bei der Reallokation der Transportaufträge im Rahmen der Auktion. Die Tourenplanungsprobleme und das im Rahmen des bündelweisen Reallokationsverfahrens zu lösende CAP zählen zu den \mathcal{NP} -schweren Optimierungsproblemen. Demgegenüber ist die vom auftragsweisen Reallokationsverfahren verwendete Vickrey Auktion mit polynomialem Rechenaufwand lösbar.

Die Anzahl der Tourenplanungsprobleme, die in einer Iteration der Reallokations-

verfahren zu lösen sind, hängt von der Anzahl der Transportaufträge m und von der Anzahl der am KN beteiligten TDL n ab. Da für die generierten Testinstanzen die Anzahl der Transportaufträge in der initialen Allokation der Anzahl kooperierender TDL entspricht, kann der Lösungsaufwand allein in Abhängigkeit von n beschrieben werden. In der Tabelle 7.12 ist die zu lösende Anzahl von Tourenplanungsproblemen für die Auftragsbewertung und die Erstellung der Gebote sowie die Anzahl der durchzuführenden Auktionen für beide Reallokationsverfahren dargestellt.

Tabelle 7.12: Anzahl zu lösender Tourenplanungsprobleme und durchzuführender Auktionen für beide Reallokationsverfahren

Teilprobleme	SRRA	BRRRA
Tourenplanung (Auftragsbewertung)	$n^2 + n$	$n^2 + n$
Tourenplanung (Gebote)	$n - 1$	$n \cdot (2^n - 1)$
Vickrey Auktion	1	-
CAP	-	1

Es ist zu erkennen, dass sich die Reallokationsverfahren durch die Anzahl der Tourenplanungsprobleme unterscheiden, die zur Erstellung der Gebote gelöst werden müssen. Beim bündelweisen Reallokationsverfahren müssen deutlich mehr Gebote erstellt werden als beim auftragsweisen Reallokationsverfahren und somit werden mehr Tourenplanungsprobleme gelöst. Darüber hinaus unterscheiden sich beide Verfahren durch den Rechenaufwand innerhalb der Auktion. Beim auftragsweisen Reallokationsverfahren ist der Rechenaufwand aufgrund der Vickrey Auktion deutlich geringer.

Die Untersuchungen wurden mit kleinen Testinstanzen und für nur drei TDL durchgeführt. Erhöht sich die Zahl der TDL im KN, wächst die Zahl der Tourenplanungsprobleme, die zur Bestimmung der Gebote gelöst werden müssen, und der Rechenaufwand zur Lösung des CAP bei der kombinatorischen Auktion beim bündelweisen Reallokationsverfahren exponentiell an. Beim auftragsweisen Reallokationsverfahren hingegen wächst der Lösungsaufwand für die Ermittlung der Gebote und der Rechenaufwand zur Ermittlung der Gewinner der Auktion linear.

Insgesamt weist das bündelweise Reallokationsverfahren einen größeren Rechenaufwand als das auftragsweise Reallokationsverfahren auf. Darüber hinaus steigt der Rechenaufwand beim bündelweisen Reallokationsverfahren mit zunehmender Anzahl an TDL und Transportaufträge stärker an.

Insgesamt ist das auftragsweise Reallokationsverfahren vorteilhaft, da 1) es einen geringeren Rechenaufwand besitzt (Bestimmung des Auktionsgewinners) und 2) es durch strategisches Verhalten weniger beeinflussbar ist. Das auftragsweise Reallokationsverfahren ist demgegenüber vorteilhaft, wenn 1) eine hohe Wettbewerbsintensität vorliegt und damit geringere Kosten der Dezentralisierung auftreten und 2) hohe Fahrzeugkapazitäten vorhanden sind.

7.6.4 Zur Aussagekraft der Ergebnisse

Die im Kapitel 7 erhobenen Zahlenwerte zu den einzelnen Untersuchungen und Reallokationsverfahren sind nur für die behandelten Planungsprobleme gültig. Um eindeutige und statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können, ist die Berechnung von weiteren Testinstanzen notwendig. Jedoch war das Ziel dieser quantitativen Untersuchungen nicht statistisch gesicherte Aussagen zu treffen, sondern die Voraussetzungen und Verhaltensweisen von Kooperationen zu analysieren, sowie die Eignung der Reallokationsverfahren zur Koordination einer Kooperation von TDL zu bestimmen. Dazu wurden die Ergebnisse einer dezentralen Planung, im Rahmen der Reallokationsverfahren ermittelt, die Ergebnisse der zentralen Planung, bei Berechnung der optimalen Lösung, gegenübergestellt. Dies erhöht zwar den Lösungsaufwand, allerdings werden Einflüsse, die von heuristischen Lösungsverfahren ausgehen, ausgeschlossen. Dadurch sind zuverlässige und unverfälschte Aussagen möglich.

Die vorgenommenen Untersuchungen geben den TDL eine allgemeine Handlungsempfehlung, in welchen Wettbewerbssituationen und bei welchen Fahrzeugkapazitäten eine Kooperation vorteilhafter ist. Weiterhin ist der TDL in der Lage, einzuschätzen, ob für die konkrete Kooperationssituation die Chance einer Deckungsbeitragsserhöhung größer ist, als das Risiko einer Schlechterstellung und ob demzufolge strategisches Verhalten für den TDL lohnenswert ist. Aber besonders der Vergleich der beiden Reallokationsverfahren gibt Aufschluss darüber, welches dezentrale Planungsverfahren in welcher Situation zu bevorzugen ist.

Die vorgenommenen Untersuchungen sind grundsätzlich geeignet, um Aussagen zu den Kooperationen und den Reallokationsverfahren treffen zu können. Allerdings müssen die Berechnungen auf die jeweilige Kooperationssituation und Auftragslage angewendet werden.

Die Simulationsumgebung ermöglicht es, die Vorteilhaftigkeit von Kooperationen allgemein zu bewerten, d. h. Aussagen zur Vorteilhaftigkeit von Kooperationen lassen sich so verallgemeinern.

7.7 Weitere Fragestellungen

Aufbauend auf der Ausgestaltung des Frameworks und den bisherigen quantitativen Untersuchungen ergeben sich weitere interessante Forschungsfragen. Beispiele dafür sind.

- Veränderte Nutzung der Freiheitsgrade
 - Schema zur Bildung von Auftragsbündeln
 - Mechanismus zum Austausch von Transportaufträgen
 - Transportprozessplanung
 - Gewinnverteilungsschema
- Variation der Fahrzeugkapazität einzelner TDL im KN
- Strategisches Verhalten von mehreren TDL im KN
- Unterschiedliche Kostenstrukturen im KN

Die Belegungen der Freiheitsgrade im Rahmen der Reallokationsverfahren und quantitativen Untersuchungen stellen nur einige Möglichkeiten dar. Statt nur einen Transportauftrag pro TDL für die Fremdvergabe auszuwählen, ist es eventuell vorteilhaft für das Ergebnis der Kooperation pro TDL mehrere Transportaufträge auszuwählen. Hierbei könnten die Komplementaritäten zwischen den Transportaufträgen schon auf Ebene eines TDL berücksichtigt werden. Allerdings wäre nur die kombinatorische Auktion für die Reallokation der Aufträge geeignet. Bezüglich des zweiten Freiheitsgrads sind neben der Vickrey Auktion und der verwendeten kombinatorischen Auktion weitere Auktionsformen denkbar. Einige davon wurden im 5.5 und Kapitel 6.2.2 erörtert. In der Transportprozessplanung wurden nur zwei Tourenplanungsprobleme, des TSP-c und das TSPPD, behandelt. Diese stellen starke Vereinfachungen der Realität dar, da sie teilweise ohne Kapazitäten, nur mit einem Fahrzeug pro TDL oder ohne Zeitfenster auskommen. Für die untersuchten Testinstanzen würde die Betrachtung von Zeitfenstern wahrscheinlich dazu führen, dass die TDL seltener Transportaufträge austauschen, da die Zeitfenster miteinander kollidieren. Der letzte Freiheitsgrad, das Gewinnverteilungsschema, wurde im Kapitel 5.5 ausführlich diskutiert, mit dem Resultat, dass nur der Shapley Value eine gerechte Verteilung der Gewinne unter den TDL sicherstellt. Unglücklicherweise steigt dabei der Rechenaufwand für die Ermittlung der Gewinner der Auktion im Vergleich zur verwendeten Gleichverteilung stark an, da das CAP (\mathcal{NP} -schwer) dafür mehrfach gelöst werden muss.

Werden die Fahrzeugkapazitäten nur für einzelne TDL des KN erhöht, ist anzunehmen, dass es diesen TDL gelingt mehr Transportaufträge für andere TDL auszuführen und so ihren Deckungsbeitrag zu verbessern. Von dieser Konzentration der Transportaufträge profitieren die Anbieter aufgrund der von den Gewinnern zu leistenden Ausgleichszahlungen. Im Extremfall übernehmen die Anbieter nur noch die Transportorganisation ohne selbst Transportaufträge durchzuführen.

Die Untersuchung von strategischem Verhalten konzentrierte sich auf einen TDL, der versucht seinen Deckungsbeitrag auf Kosten der anderen TDL im KN zu erhöhen. Es ist allerdings denkbar, dass sich nicht nur einer der Beteiligten, sondern gleich mehrere TDL strategisch verhalten oder sich sogar eine Koalition von TDL bildet. Der genaue Ausgang einer solchen Untersuchung ist offen.

Eine weitere offensichtliche Fragestellung könnte sich mit der Einbeziehung unterschiedlicher Kostenstrukturen beschäftigen (Daganzo, 1996, S. 18ff.). So können sich die variablen Kostensätze der TDL aufgrund verschiedener Netzwerkgrößen oder die Fixkosten der TDL aufgrund verschiedener Fuhrparks unterscheiden. Auch hier ist der Ausgang der Untersuchungen offen.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Aspekten kooperativer Netzwerke von Transportdienstleistern (TDL), die sich in Marktplätzen bilden und über diese zusammenarbeiten. In Kapitel 2 werden zunächst die Besonderheiten von Transportleistungen und die Planungsaufgaben von TDL beschrieben. Auf Basis der Darstellung von grundlegenden Rahmenbedingungen der Geschäftstätigkeit von TDL, erfolgt eine Auflistung von Möglichkeiten für TDL Rationalisierungspotenziale zu erschließen. Aus der Analyse in Kapitel 2 lässt sich ableiten, dass Kooperationen besonders für kleine und mittlere Transportunternehmen eine geeignete Maßnahme darstellen und somit einen viel versprechenden Forschungsgegenstand darstellen.

Der erste Teil des Kapitels 3 bietet eine Übersicht zu Kooperationsformen in der Transportwirtschaft. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden verschiedene, in der wissenschaftlichen Literatur diskutierte dezentrale Kooperationsansätze vorgestellt und nach ausgewählten Kriterien klassifiziert. Geeignete Kriterien für die Klassifikation stellen das Geschäftsfeld der TDL, der Modellierungsansatz, die Bewertungsgrundlage für die Fremdvergabe, die Koordinationsform und der Informationsaustausch dar. In dieser Arbeit wird ein dezentraler zweistufiger Kooperationsansatz vorgestellt, der im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen einen iterationsbasierten Austausch von Transportaufträgen auf Basis der tatsächlichen Transportkosten vorsieht. Auf der ersten Stufe legen die TDL durch eine optimale individuelle Tourenplanung fest, welche Transportaufträge sie selbst erstellen oder fremd vergeben wollen. In einem zweiten Schritt erfolgt die Reallokation der Transportaufträge mithilfe von Auktionsmechanismen. Dieser Kooperationsansatz ist unabhängig von den speziellen Tourenplanungsproblemen (Geschäftsfeld) und Koordinationsmechanismen. Die Akzeptanz der TDL wird sichergestellt, weil sich TDL durch die Kooperation besser, jedoch nicht schlechter stellen können. Diese Arbeit greift ein weiteres Akzeptanzkriterium auf, möglichst wenige Informationen preisgeben zu müssen, welches nur von wenigen Autoren thematisiert wird.

Auf dieser Basis wird in Kapitel 5 ein kooperatives Tourenplanungsproblem formuliert und zu dessen Lösung in Kapitel 6.1 ein Framework entwickelt, über das sich die Abläufe innerhalb eines kooperativen Netzwerks simulieren lassen. Das Framework verbindet auf generische Weise die lokale Tourenplanung der TDL mit auktionenbasierten Koordinationsmechanismen. Somit lassen sich verschiedenste Geschäftsmodelle und Koordinationsmechanismen integrieren. Aussagen zur Vorteilhaftigkeit von Kooperationen lassen sich so verallgemeinern. Dies steht im Gegensatz zu sehr speziellen Implementierungen anderer Autoren. Die Simulationsumgebung ermöglicht es, bestehende Kooperationen zu bewerten, Situationen zu identifizieren, in denen Kooperationen vorteilhaft sind und Rationalisierungspotenziale von Kooperationen zu quantifizieren. Letzteres erfolgt durch den Vergleich von drei Strategien, in denen die TDL 1) nicht kooperieren (Initiallösung), 2) auf Basis einer zentralen Planung kooperieren (Benchmark) und 3) auf Basis einer dezentralen Planung kooperieren.

Anhand der identifizierten Freiheitsgrade des Frameworks werden in Kapitel 6.2 und 6.3 zwei verschiedene Lösungsverfahren für das kooperative Tourenplanungsproblem konkretisiert. Das auftragsweise Reallokationsverfahren basiert auf einer Vickrey Auktion als Austauschmechanismus und das bündelweise Reallokationsverfahren auf einer kombinatorischen Auktion, wie sie von der Literatur vorgeschlagen werden. Nach einem konzeptionellen Vergleich der Reallokationsverfahren in Kapitel 6.4 erfolgt in Kapitel 7 die quantitative Untersuchung ausgewählter Fragestellungen. Die Tourenplanung als weiterer Freiheitsgrad des Frameworks, mit den Ausprägungen Sammelverkehr und Kurierdienst, wird für jedes Reallokationsverfahren variiert.

1. Kapitel 7.3: Bei der Variation der Fahrzeugkapazität im Sammelverkehr ist zu erwarten, dass Kooperationen von geringer Fahrzeugauslastung profitieren. Dies konnte bestätigt werden und ist darauf zurückzuführen, dass den Reallokationsverfahren aufgrund größerer Fahrzeugkapazitäten mehr Austauschmöglichkeiten zur Verfügung stehen.
2. Kapitel 7.4: Die Wettbewerbsintensität kann durch überlappende Kundengebiete im Kurierdienst abgebildet werden. Es ist zu erwarten, dass Kooperationen von der Überlappung der Kundengebiete der TDL profitieren. In Szenarien die diese Eigenschaft aufweisen können Aufträge mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ausgetauscht werden. Auch diese These konnte bestätigt werden.
3. Kapitel 7.5: Strategisches Verhalten tritt auf, wenn der Anbieter seinem Auftrag absichtlich einen falschen Wert (Mindestpreis) beimisst. Sich strategisch verhaltende TDL im Kurierdienst können sich gegenüber den anderen TDL im

kooperativen Netzwerk für die untersuchten Reallokationsverfahren besser stellen. Jedoch ist die Auswirkung von strategischem Verhalten auf seinen Gewinn aus der Kooperation a-priori nicht bekannt. Als Anhaltspunkt für verfälschte Mindestpreise können daher nur Erwartungswerte der erzielbaren Kooperationsgewinne über zahlreiche Testinstanzen dienen. Es stellt sich heraus, dass dies nur im Bereich geringer Überschätzung des Mindestpreises möglich ist.

Insgesamt ist das auftragsweise Reallokationsverfahren vorteilhaft, da 1) es einen geringeren Rechenaufwand besitzt (Bestimmung des Auktionsgewinners) und 2) es durch strategisches Verhalten weniger beeinflussbar ist. Das auftragsweise Reallokationsverfahren ist demgegenüber vorteilhaft, wenn 1) eine hohe Wettbewerbsintensität vorliegt und damit geringere Kosten der Dezentralisierung auftreten und 2) hohe Fahrzeugkapazitäten vorhanden sind.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Untersuchungen sind lediglich für die jeweiligen Planungsprobleme gültig. Um eindeutige und statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können, ist die Berechnung von weiteren Testinstanzen notwendig. Für die Erklärung der beobachteten Effekte zur Wettbewerbssituation, Fahrzeugauslastung und zum strategischen Verhalten hat sich die Vorgehensweise als prinzipiell geeignet erwiesen. Auf weitere betriebswirtschaftliche Fragestellungen und Möglichkeiten der Ausgestaltung des Frameworks geht Kapitel 7.7 näher ein.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Beantwortung der Frage von Bretzke (2000) nach einer automatisierten Tauschbörse für Transportaufträge. Zusammenfassend lässt sich zur Akzeptanz und Implementierung solcher Tauschbörsen in der Praxis folgendes festhalten:

- Die vorgestellte Simulationsumgebung unterstützt die Kooperationen in allen Marktphasen. Darüber hinaus verbindet das Framework die Tourenplanungssysteme der TDL über auktionenbasierte Koordinationsmechanismen (Entkopplung durch einen zweistufigen Ansatz überwindet Kompatibilitätsprobleme).
- Mit der Minimierung des Informationsaustauschs und der Schaffung von Kooperationsanreizen (Überblick zu Gewinnverteilungsansätzen) wurden zwei weitere Akzeptanzprobleme für elektronische Transportmärkte thematisiert.
- Die Übertragbarkeit auf die Praxis ist mit wenigen Einschränkungen gegeben: Für die \mathcal{NP} -schweren Planungsprobleme müssen bei entsprechender Problemgröße Heuristiken eingesetzt werden. Inwieweit diese Abkehr von der optimalen Lösung der Tourenplanungsprobleme das Gesamtproblem positiv oder negativ beeinflusst ist unklar.

- Weiterhin muss bei der Übertragung in die Praxis jedoch beachtet werden, dass die lokale Tourenplanung der TDL für eine Reallokation von Transportaufträgen automatisch durchgeführt wird und zeitnah vorliegen muss. Sehr unterschiedliche Hardwareressourcen bei den TDL würden eine Abstimmung der beteiligten TDL innerhalb des Frameworks erschweren.

Literaturverzeichnis

- Aberle, G. (1998). Verkehrsinfrastrukturpolitik und deren Auswirkungen auf die Unternehmenslogistik. In: H. Isermann (Hrsg.), *Logistik. Gestaltung von Logistiksystemen* (S. 109–124). Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2. Auflage.
- Aberle, G. (2003). *Transportwirtschaft*. Oldenbourg, 4. Auflage.
- Agarwal, R. (2007). *Network design and alliance formation for liner shipping*. Dissertation, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Alt, R. (1997). *Interorganisationssysteme in der Logistik*. DUV.
- Althoff, A. und Schneider, J. (1995). Marktregulierung und Liberalisierungswirkungen im Straßengüterverkehr. *IFO Schnelldienst*, 48(22-23), 13–24.
- Arendt, F. (1999). Kooperative Disposition im intermodalen Containertransport. In: C. Marcus und D. Schoppmeyer (Hrsg.), *200 Jahre Seefahrtschule Bremen*. Bremen: H. M. Hauschild.
- Assad, A. A. und Golden, B. L. (1988). *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Amsterdam: North Holland.
- Audy, J.-F., D'Amours, S., und Rönnqvist, M. (2007a). Business models for collaborative planning in transportation: An application to wood products. In: L. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, P. Novais, und C. Analide (Hrsg.), *Establishing The Foundation Of Collaborative Networks*, Volume 243 of *IFIP International Federation for Information Processing* (S. 667–676). Boston: Springer.
- Audy, J.-F., D'Amours, S., und Rousseau, L.-M. (2007b). Collaborative planning in a log truck pickup and delivery problem. 6th Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN 2007). Phuket, Thailand.
- Bakos, Y. (1991). A strategic analysis of electronic marketplaces. *MIS Quarterly*, 15(3), 295–310. Submitted for Publication.

- Ballou, R. (1992). *Business Logistics Management*. Prentice Hall, 3 Auflage.
- Baum, H., Kling, T., Sarikaya, M. H., und Thiele, P. (1995). *Verringerung von Leerfahrten im Straßengüterverkehr - Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen*. Verkehrs-Verlag J. Fischer.
- Baumgarten, H. (2004). Trends in der Logistik. In: H. Baumgarten, I.-L. Darkow, und H. Zadek (Hrsg.), *Supply Chain Steuerung und Services* (S. 1–12). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Behrens, C.-U. und Kirspel, M. (2001). *Grundlagen der Volkswirtschaftslehre*. Oldenbourg.
- Benisch, W. (1972). Kooperative Formen der Unternehmenszusammenfassung. In: A. Sölter und C. Zimmerer (Hrsg.), *Handbuch der Unternehmenszusammenschlüsse* (S. 151–168). München: Verlag Moderne Industrie.
- Berger, S. und Bierwirth, C. (2007). The collaborative carrier vehicle routing problem. *Betriebswirtschaftliche Diskussionsbeiträge der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg*, (63).
- Berger, S. und Bierwirth, C. (2008). Ein Framework für die Koordination unabhängiger Transportdienstleister. In: K. Inderfurth, G. Neumann, M. Schenk, G. Wäscher, und D. Ziem (Hrsg.), *Netzwerklogistik: Logistik aus technischer und ökonomischer Sicht (13. Magdeburger Logistik-Tagung)* (S. 137–151).
- Berger, S. und Bierwirth, C. (2009). Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. Eingereicht zur Veröffentlichung.
- Berninghaus, S. K., Ehrhart, K.-M., und Güth, W. (2006). *Strategische Spiele*. Springer.
- Bierwirth, C., Schneider, S., und Kopfer, H. (2002). Elektronische Transportmärkte Aufgaben, Entwicklungsstand und Gestaltungsoptionen. *Wirtschaftsinformatik*, 44(4), 335–344.
- Bjelcic, B. (1990). *Internationaler Unternehmenswettbewerb im gewerblichen Güterverkehr*. Huss.
- Blasum, U. (2000). *Anwendung des Branch & Cut Verfahrens auf das kapazitierte Vehicle Routing Problem*. Dissertation, Universität Köln.
- Bloech, J. und Ihde, G. B., (Hrsg.) (1997). *Vahlens großes Logistiklexikon*. Vahlen.

- Blohm, H. (1980). Kooperationen. In: E. Grochla (Hrsg.), *Handwörterbuch der Organisation* (S. 1112–1117). Stuttgart: C. E. Poeschel Verlag.
- Bock, S. (2004). *Echtzeitfähige Steuerung von Speditionsnetzwerken*. Gabler.
- Bodin, L. und Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, (11), 97–108.
- Brenner, W., Zarnekow, R., und Wittig, H. (1998). *Intelligente Softwareagenten: Grundlagen und*. Springer.
- Bretzke, W.-R. (2000). Marktplätze für Transport und Logistik: Mögliche Konturen einer neuen Wettbewerbsarena. *Deutsche Verkehrs Zeitung*. September 2000.
- Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V. (2007). Der gewerbliche Güterkraftverkehr - eine Branche in Zahlen. www.bgl-ev.de/web/daten/index.htm. Abgerufen am: 22.04.2009.
- Bürckert, H.-J. und Vierke, G. (1998). *Simulated-trading-Mechanismen für spediti-
onsübergreifende Transportplanung*. DFKI.
- Cargoclix (2009). CargoMarkets. www.cargoclix.de/info/de/services-und-preise/cargomarkets/page.html. Abgerufen am: 22.04.2009.
- Christofides, N. und Eilon, S. (1969). An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Operational Research Quarterly*, 20(3), 309–318.
- Clarke, G. und Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568–581.
- Clifton, C., Iyer, A., Cho, A., Jiang, R., Kantarcioglu, M., und Vaidya, J. (2008). An approach to securely identifying beneficial collaboration in decentralized logistics systems. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(1), 108–125.
- Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y., und Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 512–522.
- Corsten, H. und Gössinger, R. (2001). Strategisches Logistikmanagement. In: H. Corsten (Hrsg.), *Unternehmensnetzwerke* (S. 59–81). München: Oldenbourg.
- Crainic, T. (2003). Long-haul freight transportation. In: R. Hall (Hrsg.), *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers.

- Crainic, T. G. und Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97, 409–438.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., und Storchi, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(2), 119–137.
- Croes, G. (1958). A method for solving traveling-salesman problems. *Operations Research*, 6(6), 791–812.
- Czesanne, W. (1994). *Allgemeine Volkswirtschaftslehre*. Oldenbourg.
- Daganzo, C. (1996). *Logistics Systems Analysis*. Springer, 2 Auflage.
- Dantzig, G. B. und Ramser, J. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6, 80–91.
- de Vries, S. und Vohra, R. V. (2003). Combinatorial auctions: A survey. *INFORMS Journal on Computing*, 15(3), 284–309.
- Delfmann, W. und Reihlen, M. (2002). Strategisches Logistikmanagement. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel D 1.3, (S. D2–17–23). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Desrosiers, J., Dumas, Y., und Soumis, F. (1986). A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. *The American Journal of Mathematical and Management Science*, 6, 301–325.
- Desrosiers, J., Dumas, Y., und Soumis, F. (1988). The multiple vehicle dial-a-ride problem. In: J. R. Daduna und A. Wren (Hrsg.), *Computer-Aided Transit Scheduling: Proceedings of the Fourth International Workshop on Computer-Aided Transit Scheduling of Public Transport* (S. 15–27). Berlin: Springer.
- Dethloff, J. (1994). *Verallgemeinerte Tourenplanungsprobleme*. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht.
- Deutsches Institut für Normung e.V., (Hrsg.) (1989). *Deutsche Normung, DIN 30781, Teil 1 - Transportkette: Grundbegriffe*. Berlin.
- Diruf, P. (1999). Modelle und Methoden der Transportplanung. In: J. Weber und H. Baumgarten (Hrsg.), *Handbuch Logistik* (S. 378–391). Stuttgart: Schaeffer-Poeschel.
- Domschke, W. (1997). *Logistik: Rundreisen und Touren*. Oldenbourg.

- Dumas, Y., Desrosiers, J., und Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 54(1), 7–22.
- Dumitrescu, I., Ropke, S., Cordeau, J.-F., und Laporte, G. (2007). *Traveling Salesman Problem with Pickup and Deliveries: Polyhedral Results and a Branch-and-Cut Algorithm*. Technical report.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44, 145–159.
- Egler, J. (1969). *Konzentration und Kooperation im gewerblichen Güterfernverkehr*. Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster. Vandenhoeck & Rupprecht. Heft 56.
- Eßig, M. (2008). Kooperationen in der Beschaffungslogistik. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, und K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel D 4.4, (S. 990–997). Heidelberg: Springer, 3. Auflage.
- Eisenführ, F. (1985). Profit Center. *Die Betriebswirtschaft*, 45, 99–100.
- Erdmann, M. (1999). *Konsolidierungspotentiale von Speditionskooperationen*. Gabler.
- Ergun, Ö., Kuyzu, G., und Savelsbergh, M. (2007). Shipper collaboration. *Computers & Operations Research*, 34(6), 1551–1560.
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., und Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153, 3–27.
- Falk, J. (1995). *Ein Multi-Agentensystem zur Transportplanung und -steuerung bei Speditionen mit Trampverkehr*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Feige, D. und Klaus, P. (2008). *Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik*. Deutscher Verkehrs Verlag.
- Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley.
- Figliozzi, M. A. (2006). Analysis and evaluation of incentive compatible dynamic mechanisms for carrier collaboration. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, (1966), 34–40.

- Figliozzi, M. A., Mahmassani, H., und Jaillet, P. (2006). Quantifying opportunity costs in sequential transportation auctions for truckload acquisition. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, (1964), 247–252.
- Fischer, K., Müller, J. P., und Pischel, M. (1996). Cooperative transportation scheduling: an application domain for dai. *Applied Artificial Intelligence*, 10(1), 1–33.
- Fisher, M. (1995). Vehicle routing. In: M. O. Ball, T. L. Magnanti, C. L. Monma, und G. L. Nemhauser (Hrsg.), *Handbooks in Operations Research and Management Science 8: Network Routing* Kapitel 1, (S. 1–33). Amsterdam: Elsevier.
- Fleischmann, B. (2002a). Begriffliche Grundlagen. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel A 1.1, (S. A1–3–A1–13). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Fleischmann, B. (2002b). Systeme der Transportlogistik. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel A 1.2, (S. A1–13–A1–19). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Fleischmann, B. (2002c). Transport- und Tourenplanung. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel A 3.3, (S. A3–45–A1–62). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Fleischmann, B. und Gietz, M. (2008). Transport- und Tourenplanung. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, und K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel A 3.3, (S. 137–153). Heidelberg: Springer, 3. Auflage.
- Friese, M. (1998). *Kooperation als Wettbewerbsstrategie für Dienstleistungsunternehmen*. Gabler.
- Garey, M. R. und Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. WH Freeman & Co.
- Gendreau, M. und Potvin, J.-Y. (1998). Dynamic vehicle routing and dispatching. In: T. G. Crainic und G. Laporte (Hrsg.), *Fleet Management and Logistics* Kapitel 5, (S. 115–126). Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers.
- Giesa, F. und Kopfer, H. (2000). Management logistischer Dienstleistungen der Kontraktlogistik. *Logistik Management*, 2(1), 43–53.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13, 533–549.

- Golden, B. L., Wasil, E. A., Kelly, J. P., und Chao, I.-M. (2000). Metaheuristics in vehicle routing. In: T. G. Crainic und G. Laporte (Hrsg.), *Fleet Management and Logistics* Kapitel 2. London: Kluwer, 2. Auflage.
- Gomber, P., Schmidt, C., und Weinhardt, C. (1997). Elektronische Märkte für die dezentrale Transportplanung. *Wirtschaftsinformatik*, (2), 137–145.
- Gomber, P., Schmidt, C., und Weinhardt, C. (1999). Efficiency, incentives, and computational tractability in mas-coordination. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 8(1), 1–14.
- Gomm, M. und Hofmann, E. (2003). Netzwerke und Netzeffekte in der Logistik: Eine Studie über Potenziale zur Bildung von Transportnetzwerken im Güterverkehr. In: H.-C. Pfohl (Hrsg.), *Güterverkehr: Eine Integrationsaufgabe für die Logistik* (S. 123–169). Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Gomory, R. E. (1958). Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 64, 275278.
- Gagnani, S., Valenti, G., und Valentini, M. P. (2004). City logistics in italy: A national project. In: E. Taniguchi und R. G. Thompson (Hrsg.), *Logistics Systems for Sustainable Cities*. Elsevier.
- Grant, R.-M. (2002). *Contemporary strategy analysis: Concepts, techniques, applications*. Blackwell, 4. Auflage.
- Grünert, T. und Irnich, S. (2005a). *Optimierung im Transport Band I: Grundlagen*. Shaker.
- Grünert, T. und Irnich, S. (2005b). *Optimierung im Transport Band II: Wege und Touren*. Shaker.
- Gujo, O., Schwind, M., Vykoukal, J., und Weiß, K. (2007). ComEx: Kombinatorische Auktionen zum innerbetrieblichen Austausch von Logistikleistungen. In: 8. *Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik 2007*.
- Hillier, F. S. und Liebermann, G. J. (2002). *Operations Research*. Oldenbourg, 5. Auflage.
- Ickert, L., Matthes, U., Rommerskirchen, S., Weyand, E., Schlesinger, M., und Limbers, J. (2007). *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. www.bmvbs.de/anlage/original_999441/gueterverkehrsprognose-2050.pdf, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen. Abgerufen am: 22.04.2009.

- Ihde, G. und Wolf, D. (2002). Struktur und Entwicklungstendenzen der Speditionsmärkte. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel D 2.3, (S. D2–30–38). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Ihde, G. B. (2001). *Transport, Verkehr, Logistik*. Vahlen.
- Isermann, H. (2002). Märkte für logistische Leistungen - Grundlagen. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel D 2.1, (S. D2–1–7). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Johnson, D. S. und Papadimitriou, C. H. (1985). Computational complexity. In: E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, und D. B. Shmoys (Hrsg.), *The Traveling Salesman Problem* (S. 37–85). Chichester: John Wiley.
- Jünemann, R. und Schmidt, T. (2000). *Materialflußsysteme: Systemtechnische Grundlagen*. Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen. Springer, 2. Auflage.
- Kimms, A. (2006). Economies of scale in hub & spoke network design models: We have it all wrong. In: M. Morlock, M. Schwindt, N. Trautmann, und J. Zimmermann (Hrsg.), *Perspectives on Operations Research*. DUV.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., und Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Klaus, P. (2003). *Die "TOP 100" der Logistik: Berichtszeitraum 2001/2002*.
- Knoblich, H. (1969). Zwischenbetriebliche Kooperation. *Zeitschrift für Betriebswirtschaftslehre*, 39(8), 497–514.
- Kopfer, H. und Pankratz, G. (1998). Das Groupage-Problem kooperierender Verkehrsträger. In: *Operations Research Proceedings* (S. 453–462).
- Krajewska, M. A. (2007). *Potentials for Efficiency Increase in Modern Freight Forwarding*. Gabler.
- Krajewska, M. A. und Kopfer, H. (2006). Collaborating freight forwarding enterprises. *OR Spectrum*, 28(2), 301–317.
- Kräkel, M. (1992). *Auktionstheorie und interne Organisation*. Gabler.
- Kuhn, A. und Hellingrath, B. (2002). *Supply Chain Management - Optimierte Zusammenarbeit in der Supply Chain*. Springer.

- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345–358.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., und Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 7, 285–300.
- Lawler, E. L. (1976). *Combinatorial Optimization: Networks and Matroids*. Holt, Reinhart and Winston.
- Lu, Q. und Dessouky, M. (2004). An exact algorithm for the multiple vehicle pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 38(4), 503–514.
- Lublow, R. (1998). Basissysteme. In: J. Buchholz, U. Clausen, und A. Vastag (Hrsg.), *Handbuch der Verkehrslogistik* (S. 224–230). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Madsen, O. B. G., Ravn, H. F., und Rygaard, J. M. (1995). A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows. *Annals of Operations Research*, 60, 193–208.
- McAfee, R. P. und McMillan, J. (1987). Auctions and biddings. *Journal of Economic Literature*, 25(2), 699–738.
- McConnell, C. R. und Brue, S. L. (2004). *Microeconomics: Principles, Problems, and Policies*. McGraw-Hill, 16 Auflage.
- Mes, M., van der Heijden, M., und Schuur, P. (2006). *Opportunity costs calculation in agent-based vehicle routing and scheduling*. Beta Working Paper 168, University of Twente.
- Milgrom, P. R. und Weber, R. J. (1982). A theory of auctions and competitive bidding. *Econometrica*, 50(5), 1089–1122.
- Miller, D. L., Tucker, A. W., und Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulations of traveling salesman problems. *Journal of the Association for Computing Machinery (ACM)*, 7, 326–329.
- Mitrovic-Minic, S., Krishnamurti, R., und Laporte, G. (2004). Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Research Part B*, 38, 669–685.

- Nanry, W. P. und Barnes, J. W. (2000). Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. *Transportation Research Part B*, 34, 107–121.
- Nisan, N. (2000). Bidding and allocation in combinatorial auctions. In: *ACM Conference on Electronic Commerce (EC-2000)* (S. 1–12).
- Nissen, V. und Bothe, M. (2002). Fourth Party Logistics. Ein Überblick. *Logistik Management*, 4(1), 16–26.
- Ohrt, C. (2008). *Tourenplanung im Straßengüterverkehr*. Gabler.
- Pankratz, G. (2002). *Speditionelle Transportdisposition*. Gabler.
- Pankratz, G. (2003). *Zweiseitige kombinatorische Auktionen in elektronischen Transportmärkten - Potenziale und Probleme*. Diskussionsbeitrag des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften Nr.351, FernUniversität Hagen.
- Papadimitriou, C. und Steiglitz, J. (1982). *Combinatorial optimization: Algorithms and complexity*. Prentice Hall.
- Peters, R. (2002). *Elektronische Märkte*. Physica-Verlag.
- Pfohl, H.-C. (1972). *Marketing-Logistik: Gestaltung, Steuerung und Kontrolle des Warenflusses im modernen Markt*. Distribution Verlag.
- Pfohl, H.-C. (1996). *Logistiksysteme*. Springer.
- Pfohl, H.-C., (Hrsg.) (2003). *Güterverkehr: Eine Integrationsaufgabe für die Logistik*. Erich Schmidt Verlag.
- Pfohl, H.-C. (2004a). *Logistikmanagement: Konzeption und Funktionen*. Springer, 2. Auflage.
- Pfohl, H.-C. (2004b). *Logistiksysteme*. Springer.
- Picot, A. (2003). *Die grenzenlose Unternehmung*. Wiesbaden: Gabler, 5. Auflage.
- Porter, M. E., (Hrsg.) (1995). *Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*. Campus-Verlag.
- Psaraftis, H. N. (1980). A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. *Transportation Science*, 14(3), 130–154.

- Psaraftis, H. N. (1983). An exact algorithm for the single vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows. *Transportation Science*, 17, 351–357.
- Reeves, C. R., (Hrsg.) (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Blackwell Scientific Publications.
- Rego, C. und Roucairol, C. (1995). Using tabu search for solving a dynamic multi-terminal truck dispatching problem. *European Journal of Operational Research*, 83, 411–429.
- Ropke, S., Cordeau, J.-F., und Laporte, G. (2007). Models and a branch-and-cut algorithm for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*, 49(4), 258–272.
- Ropke, S. und Pisinger, J.-F. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40, 455–472.
- Rothering, J. (1993). *Zwischenbetriebliche Kooperation als alternative Organisationsform: Ein transaktionskostentheoretischer Erklärungsansatz*. Poeschel. Stuttgart.
- Sandholm, T. (1993). An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculation. In: *Proceedings of the 11th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-93)* (S. 256–263). Washington D.C.
- Sänger, F. (2004). *Elektronische Transportmärkte*. Gabler. Wiesbaden.
- Savelsbergh, M. W. und Sol, M. (1998). Drive dynamic routing of independent vehicles. *Operations Research*, 46, 474–490.
- Schmid, B. F. (1993). Elektronische Märkte. *Wirtschaftsinformatik*, 35, 465–480.
- Schmitting, W. (1999). *Das Traveling-Salesman-Problem - Anwendungen und heuristische Nutzung von Voronoi-/Delaunay-Strukturen zur Lösung euklidischer, zweidimensionaler Traveling-Salesman-Probleme*. Dissertation, Universität Düsseldorf.
- Schneeweiß, C. (1991). *Planung Band 1*. Springer.
- Schönberger, J. (2005). *Operational Freight Carrier Planning*. Springer.
- Schönsleben, P. und Hieber, R. (2002). Gestaltung von effizienten Wertschöpfungspartnerschaften im Supply Chain Management. In: A. Busch und W. Dangelmaier (Hrsg.), *Integriertes Supply Chain Management* (S. 45–62). Wiesbaden: Gabler.

- Schweitzer, M. (1992). Profit Center. In: E. Frese (Hrsg.), *Handwörterbuch der Organisation* (S. 2078–89). Stuttgart: C. E. Poeschel Verlag, 3 Auflage.
- Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In: H. Kuhn und A. W. Tucker (Hrsg.), *Contributions to the Theory of Games (Volume II)*, Annals of Mathematics Studies (S. 307–317,). Princeton: Princeton University Press.
- Shen, Y., Potvin, J.-Y., Rousseau, J.-M., und Roy, S. (1995). A computer assistant for vehicle dispatching with learning capabilities. *Annals of Operations Research*, 61, 189–211.
- Solomon, M. M. (2005). w.cba.neu.edu/%7Emsolomon/problems.htm. Abgerufen am: 27.04.2009.
- Song, J. und Regan, A. C. (2004). An auction based collaborative carrier network. *Transportation Research Part E (Submitted for publication)*.
- Stabenau, H. (1994). *Verkehrsbetriebslehre. Betriebswirtschaftliche Grundlagen für eine langfristig orientierte Unternehmenspolitik in strukturell sich ändernden Verkehrsmärkten*. Verkehrs-Verlag J. Fischer, 3. Auflage.
- Stadtler, H. (2009). A framework for collaborative planning and state-of-the-art. *OR Spectrum*, 31(1), 5–30.
- Steffen, S. (1995). *Wettbewerbsstrategien für deutsche Speditionen: Am Beispiel des Marktes für Kühlgut-Logistik*. Gabler.
- Stölzle, W. und Gareis, K. (2002). Konzepte der Beschaffungslogistik: Anforderungen und Gestaltungsalternativen. In: D. Hahn und L. Kaufmann (Hrsg.), *Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement: Internationale Konzepte, innovative Instrumente, aktuelle Praxisbeispiele*. (S. 401–423). Wiesbaden: Gabler, 2. Auflage.
- Thaler, S. P. (1990). *Betriebswirtschaftliche Konsequenzen des EG-Binnenmarktes und der EG-Güterverkehrsliberalisierung für europäische Speditionsunternehmen*. Haupt.
- Toonen, C. (2008). Logistikdienstleistungen. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, und K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel B 9, (S. 581–607). Berlin, Heidelberg: Springer, 3. Auflage.
- Toth, P. und Vigo, D., (Hrsg.) (2002). *The Vehicle Routing Problem*. SIAM Monographs of Discrete Mathematics and Applications.

- Turban, E., Leidner, D., McLean, E., und Wetherbe, J., (Hrsg.) (2006). *Information technology for management : transforming organizations in the digital economy*. Wiley, 5. Auflage.
- Vahrenkamp, R. (2005). *Logistik: Management und Strategien*. Oldenbourg, 5. Auflage.
- Varian, H. R. und Mackie-Mason, J. K. (1994). Generalized vickrey auctions. Verfügbar unter SSRN: ssrn.com/abstract=975873.
- Vickrey, W. (1961). Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *The Journal of Finance*, 16(1), 8–37.
- Visser, J., v. Binsbergen, A., und Nemoto, T. (1999). Urban freight transport policy and planning. Institute of Systems Science Research Kyoto.
- Wallenburg, C. M. und Weber, J. (2005). Kooperationen in Logistik und Supply Chain Management. In: J. Zentes, B. Swoboda, und D. Morschett (Hrsg.), *Kooperationen, Allianzen und Netzwerke* Kapitel 4D, (S. 747–767). Wiesbaden: Gabler, 2. Auflage.
- Weinhardt, C. und Gomber, P. (1996). Domänenunabhängige Koordinationsmechanismen für die dezentrale betriebliche Planung. *Information Management*, 1, 6–16.
- Wieberneit, N. (2008). Service network design for freight transportation: A review. *OR Spectrum*, 30(1), 77–112.
- Wittenbrink, P. (1995). *Bündelungsstrategien der Speditionen im Bereich der City-Logistik*. Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster. Vandenhoeck & Rupprecht. Heft 156.
- Wohlgemuth, O. (2002). *Management netzwerkartiger Kooperationen - Instrumente für die unternehmensübergreifende Steuerung*. Gabler.
- Zentes, J. und Janz, M. (2002). Horizontale Kooperationen in der Distributionslogistik. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, und H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik* Kapitel D 3.5, (S. D3–31–34). Berlin, Heidelberg: Springer, 2. Auflage.
- Zentes, J., Swoboda, B., und Morschett, D. (2005). Kooperationen, Allianzen und Netzwerke - Entwicklung der Forschung und Kurzzabriss. In: J. Zentes, B. Swoboda, und D. Morschett (Hrsg.), *Kooperationen, Allianzen und Netzwerke* (S. 5–32). Wiesbaden: Gabler, 2. Auflage.

Zimmermann, H.-J. (2005). *Operations Research*. Vieweg.

Zöllner, W. (1990). *Strategische Absatzmarktplanung, Kunden- und Wettbewerbsanalyse für Logistikunternehmen*. Springer.

Anhang

Testinstanzen für die Untersuchungen in Kapitel 7.3

Für jede Instanz t1-t20 sind zeilenweise die Koordinaten des Depots und der Kundenorte für TDL1, TDL2 und TDL3 aufgelistet. Die erste Klammer enthält jeweils die x-Koordinaten und die zweite jeweils die y-Koordinaten. Die Koordinaten des Depots tauchen an der ersten Stelle in jeder Klammer die Koordinaten der Kundenorte an zweiter bis siebter Stelle auf.

Instanz t1:

[57 14 31 49 63 14 27]; [29 37 67 58 23 37 43]
[30 36 20 44 15 24 22]; [60 26 50 17 77 58 22]
[18 50 27 65 63 26 55]; [24 35 43 55 23 52 5]

Instanz t2:

[57 37 25 35 8 65 20]; [29 31 30 69 56 55 65]
[30 16 49 47 49 15 5]; [60 22 11 47 42 47 5]
[18 45 62 64 40 20 25]; [24 20 77 42 25 50 24]

Instanz t3:

[57 13 63 6 5 30 45]; [29 52 65 38 30 25 30]
[30 41 55 15 56 56 26]; [60 37 54 19 39 39 35]
[18 47 2 45 15 27 12]; [24 47 60 30 77 43 24]

Instanz t4:

[57 37 20 5 20 47 42]; [29 47 20 30 65 16 7]
[30 45 16 65 31 15 5]; [60 20 22 20 67 10 30]
[18 56 31 26 23 62 5]; [24 39 52 27 3 77 5]

Instanz t5:

[57 17 55 20 26 44 24]; [29 34 60 26 35 17 12]
[30 15 45 5 56 12 11]; [60 10 10 5 37 24 14]
[18 4 2 20 41 37 57]; [24 18 60 26 37 56 68]

Instanz t6:

[57 20 49 47 60 6 40]; [29 26 58 47 12 68 60]
[30 25 20 20 26 67 20]; [60 30 50 20 35 5 26]
[18 20 26 25 37 26 17]; [24 20 35 30 56 35 34]

Instanz t7:

[57 15 55 8 24 15 49]; [29 19 54 56 58 60 73]
[30 30 65 53 49 25 22]; [60 5 20 12 58 24 27]
[18 65 15 53 37 56 49]; [24 20 60 43 31 39 42]

Instanz t8:

[57 36 62 11 46 35 55]; [29 26 77 31 13 17 20]
[30 42 26 8 28 26 35]; [60 7 27 56 18 52 69]

[18 15 50 31 20 37 25]; [24 19 35 52 50 31 30]

Instanz t9:

[57 2 35 15 40 20 22]; [29 48 69 60 25 20 27]
[30 20 53 35 4 47 41]; [60 50 12 17 18 16 37]
[18 63 2 26 53 2 45]; [24 65 60 27 43 48 30]

Instanz t10:

[57 27 16 22 35 15 12]; [29 43 22 22 69 77 24]
[30 10 15 22 25 65 53]; [60 43 19 27 30 55 52]
[18 56 15 49 53 41 15]; [24 39 77 73 52 49 19]

Instanz t11:

[57 65 30 12 49 65 31]; [29 35 5 24 11 35 52]
[30 35 23 26 55 57 57]; [60 69 3 27 54 48 48]
[18 8 35 15 49 65 45]; [24 56 40 10 42 35 65]

Instanz t12:

[57 46 8 25 45 25 60]; [29 13 56 30 65 24 12]
[30 56 42 55 15 25 55]; [60 39 7 20 10 24 5]
[18 30 42 5 37 6 25]; [24 5 7 30 47 38 30]

Instanz t13:

[57 13 61 21 21 20 15]; [29 52 52 24 24 40 19]
[30 67 5 6 13 55 35]; [60 5 5 38 52 5 17]
[18 53 26 26 15 25 10]; [24 52 52 27 77 24 20]

Instanz t14:

[57 50 63 65 46 20 45]; [29 35 23 35 13 50 65]
[30 37 26 64 30 11 20]; [60 47 35 42 25 31 50]
[18 5 46 31 2 41 11]; [24 5 13 67 60 37 31]

Instanz t15:

[57 30 5 24 6 2 45]; [29 5 30 12 38 60 65]
[30 22 20 20 56 14 11]; [60 27 65 40 39 37 14]
[18 49 31 41 56 15 17]; [24 11 52 49 39 30 34]

Instanz t16:

[57 4 20 23 53 11 63]; [29 18 26 3 52 31 23]
[30 56 4 14 47 15 31]; [60 39 18 37 16 77 67]
[18 37 5 15 57 5 22]; [24 31 5 30 48 5 22]

Instanz t17:

[57 56 55 20 56 42 50]; [29 39 5 50 39 7 35]
[30 26 26 5 46 49 5]; [60 27 52 30 13 73 30]
[18 24 56 15 65 35 53]; [24 58 39 10 35 40 12]

Instanz t18:

[57 24 47 64 40 46 37]; [29 12 47 42 60 13 31]
[30 65 40 6 56 30 15]; [60 55 60 38 37 25 10]
[18 55 53 42 10 30 45]; [24 20 12 7 20 25 20]

Instanz t19:

[57 49 63 56 6 37 20]; [29 58 23 39 68 31 20]

[30 55 14 24 55 35 63]; [60 20 37 12 45 40 23]
[18 32 45 8 26 25 20]; [24 12 65 56 35 30 26]

Instanz t20:

[57 55 65 26 15 32 63]; [29 54 35 35 19 12 23]
[30 47 55 25 23 31 26]; [60 47 5 30 3 67 52]
[18 26 6 37 45 20 42]; [24 52 68 31 30 40 7]

Testinstanzen für die Untersuchungen in Kapitel 7.4

Für jede Instanz p1-p90 sind zeilenweise die Koordinaten des Depots und der Pickup- und Deliveryorte für TDL1, TDL2 und TDL3 aufgelistet. Die erste Klammer enthält jeweils die x-Koordinaten und die zweite jeweils die y-Koordinaten. Zu beachten ist, dass die Koordinaten des Depots zweimal in jeder Klammer auftauchen (an der ersten und fünften Stelle). An zweiter bis vierter Stelle tauchen die Koordinaten der Pickuporte auf und an sechster bis achter Stelle die Koordinaten der Deliveryorte.

Instanz p1:

[57 50 50 60 57 57 41 55]; [29 35 35 12 29 48 37 5]
 [30 31 37 41 30 15 41 37]; [60 67 56 49 60 77 49 47]
 [18 25 25 23 18 12 14 24]; [24 24 30 3 24 24 37 12]

Instanz p2:

[57 35 47 64 57 55 57 41]; [29 17 16 42 29 45 48 37]
 [30 63 15 6 30 53 2 49]; [60 65 77 68 60 52 60 73]
 [18 12 15 6 18 16 6 11]; [24 24 47 38 24 22 38 31]

Instanz p3:

[57 35 35 55 57 61 57 61]; [29 17 17 5 29 52 48 52]
 [30 62 49 2 30 57 47 20]; [60 77 73 60 60 68 47 50]
 [18 30 16 23 18 26 25 30]; [24 5 22 3 24 27 21 5]

Instanz p4:

[57 37 36 64 57 55 53 44]; [29 31 26 42 29 5 12 17]
 [30 53 20 35 30 26 15 49]; [60 52 65 69 60 52 60 58]
 [18 4 6 20 18 26 15 22]; [24 18 38 40 24 27 47 27]

Instanz p5:

[57 49 57 47 57 47 41 44]; [29 11 48 16 29 16 37 17]
 [30 20 37 63 30 55 40 35]; [60 65 47 65 60 60 60 40]
 [18 22 22 20 18 26 15 22]; [24 22 22 40 24 27 19 22]

Instanz p6:

[57 45 49 61 57 55 41 35]; [29 10 11 52 29 45 37 17]
 [30 35 47 63 30 41 49 63]; [60 40 47 65 60 49 58 65]
 [18 30 25 22 18 26 2 26]; [24 25 21 22 24 27 48 35]

Instanz p7:

[57 35 45 55 57 61 56 45]; [29 17 20 45 29 52 39 20]
 [30 40 35 53 30 35 8 35]; [60 60 40 52 60 40 56 40]
 [18 6 22 11 18 16 30 30]; [24 38 22 31 24 22 25 25]

Instanz p8:

[57 45 65 67 57 56 36 55]; [29 20 35 5 29 37 26 20]
 [30 15 26 24 30 31 45 35]; [60 60 52 58 60 52 65 40]
 [18 25 2 14 18 5 24 18]; [24 24 48 37 24 30 12 18]

Instanz p9:

[57 47 47 67 57 65 45 42]; [29 16 16 5 29 55 30 7]
 [30 55 27 13 30 57 8 37]; [60 60 43 52 60 68 56 56]
 [18 10 20 6 18 14 17 17]; [24 43 20 38 24 37 34 34]

Instanz p10:

[57 55 35 36 57 67 64 53]; [29 45 17 26 29 5 42 43]
 [30 55 49 37 30 25 15 20]; [60 60 73 56 60 30 60 50]

[18 17 2 15 18 14 25 24]; [24 34 48 19 24 37 24 12]

Instanz p11:

[57 46 46 46 57 49 57 45]; [29 13 13 13 29 42 48 10]
 [30 27 13 15 30 20 27 57]; [60 69 52 77 60 50 69 68]
 [18 11 25 20 18 15 20 14]; [24 14 30 26 24 19 20 37]

Instanz p12:

[57 40 49 50 57 36 36 37]; [29 25 11 35 29 26 26 31]
 [30 2 37 49 30 40 53 55]; [60 60 56 58 60 60 52 60]
 [18 12 22 24 18 30 14 6]; [24 24 27 12 24 5 37 38]

Instanz p13:

[57 63 65 45 57 42 65 40]; [29 23 55 20 29 7 20 25]
 [30 15 15 20 30 8 15 35]; [60 60 60 65 60 56 77 69]
 [18 11 26 5 18 11 15 20]; [24 14 27 5 24 31 47 40]

Instanz p14:

[57 42 45 55 57 64 42 53]; [29 7 20 5 29 42 7 12]
 [30 55 31 24 30 57 47 20]; [60 60 52 58 60 68 47 65]
 [18 26 25 20 18 6 26 22]; [24 27 30 40 24 38 27 22]

Instanz p15:

[57 64 45 36 57 47 65 35]; [29 42 10 26 29 16 35 17]
 [30 24 20 15 30 27 26 27]; [60 58 65 77 60 43 52 43]
 [18 25 15 15 18 5 10 25]; [24 24 30 10 24 30 20 24]

Instanz p16:

[57 53 63 65 57 35 37 55]; [29 12 23 20 29 17 31 5]
 [30 2 6 41 30 55 20 37]; [60 60 68 49 60 54 50 56]
 [18 25 20 2 18 22 6 15]; [24 24 26 48 24 27 38 10]

Instanz p17:

[57 45 65 56 57 53 49 57]; [29 30 55 39 29 12 11 48]
 [30 31 15 41 30 13 13 37]; [60 52 77 49 60 52 52 56]
 [18 32 6 14 18 22 15 11]; [24 12 38 37 24 27 30 14]

Instanz p18:

[57 60 40 37 57 60 37 42]; [29 12 25 31 29 12 31 7]
 [30 26 57 49 30 15 6 63]; [60 52 68 58 60 60 68 65]
 [18 30 28 15 18 22 15 4]; [24 25 18 19 24 22 19 18]

Instanz p19:

[57 65 67 42 57 65 36 56]; [29 35 5 7 29 55 26 37]
 [30 37 62 53 30 6 49 62]; [60 56 77 52 60 68 73 77]
 [18 30 10 30 18 15 6 14]; [24 25 20 25 24 19 38 37]

Instanz p20:

[57 53 42 55 57 42 49 55]; [29 12 7 5 29 7 42 5]
 [30 41 40 37 30 27 35 31]; [60 49 60 47 60 69 69 52]
 [18 18 18 23 18 25 15 15]; [24 18 18 3 24 30 47 30]

Instanz p21:

[57 42 63 36 57 53 47 65]; [29 7 23 26 29 12 16 20]
 [30 49 37 49 30 49 35 6]; [60 58 47 73 60 58 40 68]
 [18 32 30 20 18 25 24 24]; [24 12 25 40 24 21 12 12]

Instanz p22:

[57 36 46 61 57 56 65 64]; [29 26 13 52 29 39 55 42]
 [30 20 40 53 30 8 55 20]; [60 50 60 52 60 56 60 65]
 [18 16 15 23 18 4 5 4]; [24 22 47 3 24 18 30 18]

Instanz p23:

[57 42 44 65 57 55 49 64]; [29 7 17 20 29 20 11 42]
 [30 27 45 35 30 27 15 47]; [60 69 65 69 60 43 77 47]

[18 25 25 12 18 20 20 20]; [24 21 21 24 24 20 26 26]

Instanz p24:

[57 67 65 40 57 45 53 55]; [29 5 35 25 29 10 43 20]
 [30 2 37 13 30 37 53 2]; [60 60 47 52 60 56 52 60]
 [18 15 10 15 18 5 15 15]; [24 10 20 10 24 30 30 19]

Instanz p25:

[57 67 57 46 57 42 40 63]; [29 5 48 13 29 7 25 23]
 [30 63 41 35 30 15 49 40]; [60 65 49 40 60 77 58 60]
 [18 32 11 23 18 17 15 20]; [24 12 31 3 24 34 19 40]

Instanz p26:

[57 44 55 35 57 57 37 56]; [29 17 45 17 29 20 31 39]
 [30 25 15 15 30 55 20 62]; [60 30 77 60 60 65 77]
 [18 2 17 2 18 26 17 5]; [24 48 34 48 24 27 34 30]

Instanz p27:

[57 60 35 57 57 37 46 41]; [29 12 17 48 29 31 13 37]
 [30 27 53 15 30 45 41 55]; [60 43 52 77 60 65 49 60]
 [18 6 4 26 18 15 26 20]; [24 38 18 35 24 30 35 20]

Instanz p28:

[57 44 56 47 57 45 49 55]; [29 17 39 16 29 10 11 45]
 [30 24 40 13 30 37 49 31]; [60 58 60 52 60 56 73 67]
 [18 10 15 22 18 24 32 20]; [24 43 30 22 24 12 12 40]

Instanz p29:

[57 40 56 35 57 64 55 41]; [29 25 39 17 29 42 45 37]
 [30 2 63 13 30 26 47 55]; [60 60 65 52 60 52 47 60]
 [18 18 18 22 18 5 10 11]; [24 18 18 27 24 5 20 31]

Instanz p30:

[57 64 67 45 57 47 65 61]; [29 42 5 20 29 16 20 52]
 [30 27 53 35 30 37 41 55]; [60 43 52 40 60 47 49 54]
 [18 32 25 5 18 11 23 20]; [24 12 24 30 24 31 3 26]

Instanz p31:

[57 53 61 65 57 65 45 67]; [29 43 52 55 29 20 10 5]
 [30 24 36 27 30 41 49 15]; [60 58 26 69 60 37 58 60]
 [18 11 5 31 18 22 20 12]; [24 14 30 52 24 22 50 24]

Instanz p32:

[57 20 64 53 57 25 47 47]; [29 40 42 12 29 30 47 16]
 [30 2 30 26 30 41 24 62]; [60 60 25 52 60 37 58 77]
 [18 37 4 30 18 25 32 35]; [24 47 18 25 24 24 12 40]

Instanz p33:

[57 44 53 47 57 53 42 26]; [29 17 12 16 29 52 7 35]
 [30 8 47 27 30 49 27 20]; [60 56 47 43 60 73 43 40]
 [18 13 15 28 18 31 12 15]; [24 52 30 18 24 52 24 30]

Instanz p34:

[57 50 30 47 57 8 65 56]; [29 35 25 47 29 56 20 39]
 [30 27 26 30 30 27 47 15]; [60 43 52 25 60 43 47 47]
 [18 49 20 5 18 6 30 20]; [24 42 26 30 24 38 5 26]

Instanz p35:

[57 45 50 47 57 26 55 47]; [29 30 35 47 29 35 5 47]
 [30 2 20 35 30 30 26 24]; [60 60 40 40 60 25 27 58]
 [18 20 20 12 18 12 49 36]; [24 50 26 24 24 24 42 26]

Instanz p36:

[57 53 30 35 57 40 56 35]; [29 43 25 17 29 25 37 17]
 [30 37 49 2 30 2 31 49]; [60 56 73 60 60 60 67 42]

[18 4 22 6 18 35 4 15]; [24 18 27 38 24 40 18 30]

Instanz p37:

[57 55 65 45 57 53 31 65]; [29 45 55 30 29 43 52 35]
 [30 57 49 63 30 55 37 27]; [60 68 58 65 60 60 56 69]
 [18 37 6 12 18 20 32 41]; [24 31 38 24 24 26 12 37]

Instanz p38:

[57 56 41 67 57 20 45 61]; [29 37 49 5 29 50 10 52]
 [30 57 53 26 30 2 41 24]; [60 68 52 35 60 60 37 58]
 [18 5 49 25 18 22 16 25]; [24 30 42 21 24 27 22 21]

Instanz p39:

[57 26 27 37 57 26 26 63]; [29 35 43 31 29 27 52 23]
 [30 27 26 24 30 37 26 55]; [60 43 35 58 60 47 52 60]
 [18 5 41 26 18 2 32 11]; [24 30 37 27 24 48 12 31]

Instanz p40:

[57 49 46 37 57 37 27 8]; [29 42 13 31 29 31 43 56]
 [30 31 8 31 30 27 49 53]; [60 67 56 67 60 69 58 52]
 [18 28 25 2 18 26 36 20]; [24 18 21 48 24 35 26 50]

Instanz p41:

[57 37 41 40 57 67 53 31]; [29 47 49 25 29 5 12 52]
 [30 31 49 35 30 15 40 31]; [60 67 58 69 60 60 60 52]
 [18 20 11 15 18 37 23 2]; [24 26 31 30 24 31 3 48]

Instanz p42:

[57 41 55 26 57 45 49 55]; [29 37 20 52 29 10 11 20]
 [30 31 20 47 30 8 15 37]; [60 52 40 47 60 56 77 31]
 [18 2 15 53 18 53 20 15]; [24 48 19 52 24 52 50 47]

Instanz p43:

[57 56 65 45 57 49 47 44]; [29 37 35 10 29 11 16 17]
 [30 31 55 35 30 63 49 31]; [60 52 60 40 60 65 73 52]
 [18 21 41 27 18 6 6 13]; [24 24 49 43 24 38 38 52]

Instanz p44:

[57 61 44 47 57 20 60 47]; [29 52 17 47 29 40 12 16]
 [30 36 31 55 30 31 27 2]; [60 26 52 60 60 52 69 60]
 [18 47 30 28 18 16 30 20]; [24 47 25 18 24 22 5 40]

Instanz p45:

[57 47 46 42 57 8 63 56]; [29 47 13 7 29 56 23 39]
 [30 6 15 27 30 31 49 37]; [60 68 60 69 60 52 73 47]
 [18 22 17 30 18 22 22 4]; [24 27 34 5 24 27 27 18]

Instanz p46:

[57 55 26 64 57 55 65 35]; [29 45 52 42 29 5 55 17]
 [30 55 63 37 30 15 49 31]; [60 60 65 47 60 47 73 52]
 [18 6 32 41 18 27 20 15]; [24 38 12 37 24 43 26 10]

Instanz p47:

[57 50 27 44 57 41 67 30]; [29 35 43 17 29 49 5 25]
 [30 35 2 20 30 20 25 57]; [60 69 60 65 60 65 30 68]
 [18 24 41 26 18 8 24 20]; [24 12 37 27 24 56 12 26]

Instanz p48:

[57 41 57 35 57 55 53 35]; [29 37 48 40 29 5 12 40]
 [30 20 13 37 30 6 40 24]; [60 50 52 56 60 68 60 58]
 [18 15 21 21 18 21 18 53]; [24 19 24 24 24 24 18 52]

Instanz p49:

[57 45 8 67 57 44 41 53]; [29 10 56 5 29 17 49 52]
 [30 62 55 27 30 55 24 20]; [60 77 60 69 60 60 58 40]

[18 26 22 25 18 12 21 22]; [24 52 27 21 24 24 24 27]

Instanz p50:

[57 41 35 55 57 44 45 41]; [29 49 40 20 29 17 20 37]
 [30 35 57 37 30 49 55 55]; [60 69 68 47 60 58 60 60]
 [18 5 20 47 18 41 8 20]; [24 30 26 47 24 49 56 26]

Instanz p51:

[57 53 27 15 57 56 67 25]; [29 52 43 47 29 37 5 30]
 [30 49 20 20 30 35 13 53]; [60 42 65 50 60 40 52 52]
 [18 8 41 41 18 25 20 25]; [24 56 37 37 24 30 20 24]

Instanz p52:

[57 63 56 44 57 26 45 55]; [29 23 39 17 29 35 30 45]
 [30 49 41 8 30 27 15 35]; [60 42 49 56 60 43 47 40]
 [18 11 11 21 18 26 27 14]; [24 31 31 24 24 35 43 37]

Instanz p53:

[57 47 60 37 57 47 67 41]; [29 16 12 31 29 47 5 37]
 [30 37 35 49 30 15 15 55]; [60 47 69 73 60 60 47 60]
 [18 32 35 30 18 26 41 26]; [24 12 40 25 24 27 49 35]

Instanz p54:

[57 40 55 31 57 65 47 15]; [29 25 20 52 29 20 47 47]
 [30 45 45 24 30 37 26 31]; [60 65 65 58 60 31 27 67]
 [18 49 35 17 18 30 10 22]; [24 42 40 34 24 25 43 22]

Instanz p55:

[57 50 13 61 57 26 35 57]; [29 35 52 52 29 52 40 48]
 [30 20 49 49 30 36 24 35]; [60 50 42 58 60 26 58 69]
 [18 37 37 12 18 25 14 27]; [24 47 31 24 24 30 37 43]

Instanz p56:

[57 26 45 65 57 42 53 53]; [29 27 20 20 29 7 43 43]
 [30 31 15 15 30 25 37 15]; [60 52 47 60 60 30 56 47]
 [18 13 10 5 18 14 8 47]; [24 52 43 30 24 37 56 47]

Instanz p57:

[57 53 61 26 57 45 45 45]; [29 43 52 52 29 20 20 10]
 [30 62 37 49 30 15 20 20]; [60 77 47 42 60 47 40 65]
 [18 31 26 18 18 23 53 17]; [24 52 27 18 24 3 52 34]

Instanz p58:

[57 67 49 20 57 47 37 67]; [29 5 11 50 29 47 47 5]
 [30 55 20 35 30 49 15 45]; [60 54 40 69 60 42 77 65]
 [18 41 24 27 18 18 10 20]; [24 49 12 43 24 18 20 20]

Instanz p59:

[57 55 61 61 57 42 56 67]; [29 5 52 52 29 7 37 5]
 [30 36 26 49 30 13 15 26]; [60 26 27 58 60 52 77 27]
 [18 53 23 20 18 6 20 41]; [24 52 3 20 24 38 50 49]

Instanz p60:

[57 8 31 13 57 56 8 56]; [29 56 52 52 29 39 56 39]
 [30 55 37 36 30 37 15 63]; [60 54 56 26 60 31 60 65]
 [18 20 41 13 18 12 4 30]; [24 20 49 52 24 24 18 25]

Instanz p61:

[57 30 20 4 57 67 35 5]; [29 25 40 18 29 5 69 30]
 [30 13 26 26 30 20 24 30]; [60 52 27 27 60 26 58 25]
 [18 40 12 41 18 15 65 65]; [24 25 24 49 24 19 35 55]

Instanz p62:

[57 27 5 41 57 47 20 25]; [29 69 5 49 29 47 20 21]
 [30 65 26 13 30 2 47 20]; [60 20 35 52 60 60 47 40]

[18 13 55 15 18 45 56 5]; [24 52 45 60 24 20 37 30]

Instanz p63:

[57 24 41 44 57 20 8 55]; [29 12 37 17 29 50 56 5]
 [30 57 42 45 30 57 53 26]; [60 48 7 20 60 48 43 52]
 [18 21 55 37 18 65 57 63]; [24 24 54 31 24 35 48 65]

Instanz p64:

[57 41 61 67 57 40 49 67]; [29 37 52 5 29 25 73 5]
 [30 4 49 4 30 49 56 65]; [60 18 42 18 60 42 39 55]
 [18 12 17 20 18 20 15 26]; [24 24 34 50 24 26 30 35]

Instanz p65:

[57 26 15 40 57 31 65 40]; [29 52 30 60 29 67 35 60]
 [30 11 19 15 30 57 31 49]; [60 14 21 60 60 68 52 11]
 [18 55 56 20 18 45 24 20]; [24 20 39 50 24 30 58 50]

Instanz p66:

[57 50 24 15 57 4 15 17]; [29 35 12 77 29 18 47 34]
 [30 37 14 56 30 53 15 8]; [60 31 37 39 60 43 19 56]
 [18 49 41 40 18 31 53 10]; [24 58 37 60 24 67 12 43]

Instanz p67:

[57 30 56 26 57 20 6 31]; [29 5 39 52 29 65 68 67]
 [30 49 47 65 30 64 31 57]; [60 11 16 35 60 42 52 48]
 [18 26 47 35 18 15 10 64]; [24 35 47 17 24 19 20 42]

Instanz p68:

[57 65 56 4 57 32 11 49]; [29 35 39 18 29 12 14 11]
 [30 15 45 8 30 25 49 32]; [60 19 65 56 60 30 42 12]
 [18 27 28 65 18 57 15 20]; [24 69 18 20 24 48 19 26]

Instanz p69:

[57 15 35 25 57 49 55 26]; [29 77 17 30 29 11 20 52]
 [30 40 65 45 30 61 63 40]; [60 60 35 30 60 52 23 25]
 [18 22 49 15 18 27 45 49]; [24 22 58 30 24 69 65 58]

Instanz p70:

[57 14 26 46 57 27 49 10]; [29 37 35 13 29 43 58 43]
 [30 24 67 37 30 30 46 2]; [60 58 5 47 60 5 13 60]
 [18 14 15 22 18 44 10 56]; [24 37 30 27 24 17 43 39]

Instanz p71:

[57 37 49 2 57 5 36 27]; [29 56 11 60 29 30 26 69]
 [30 63 2 65 30 11 36 64]; [60 65 48 55 60 14 26 42]
 [18 50 21 2 18 19 53 10]; [24 35 24 60 24 21 43 20]

Instanz p72:

[57 49 45 55 57 49 55 50]; [29 73 30 5 29 73 60 35]
 [30 55 63 5 30 15 49 19]; [60 54 23 30 60 30 42 21]
 [18 55 37 31 18 53 37 45]; [24 5 31 52 24 43 56 20]

Instanz p73:

[57 49 45 47 57 67 28 55]; [29 73 20 47 29 5 18 45]
 [30 5 12 50 30 26 55 40]; [60 5 24 35 60 35 60 25]
 [18 8 45 35 18 55 15 37]; [24 56 20 69 24 20 47 47]

Instanz p74:

[57 45 30 30 57 53 57 30]; [29 65 5 25 29 12 48 25]
 [30 55 13 53 30 26 53 37]; [60 5 52 12 60 52 52 47]
 [18 53 32 45 18 45 37 20]; [24 12 12 20 24 65 47 20]

Instanz p75:

[57 64 11 13 57 46 15 8]; [29 42 14 52 29 13 77 56]
 [30 31 6 19 30 37 15 50]; [60 67 68 21 60 56 77 35]

[18 67 56 21 18 17 11 57]; [24 5 37 24 24 34 14 68]

Instanz p76:

[57 41 55 62 57 63 30 41]; [29 37 45 77 29 23 25 37]
 [30 35 56 53 30 16 15 55]; [60 69 39 12 60 22 10 60]
 [18 32 53 15 18 37 16 60]; [24 12 43 10 24 47 22 12]

Instanz p77:

[57 6 55 22 57 45 18 20]; [29 38 60 27 29 10 18 40]
 [30 31 35 8 30 65 37 50]; [60 67 40 56 60 55 47 35]
 [18 62 21 5 18 12 26 25]; [24 77 24 5 24 24 35 24]

Instanz p78:

[57 21 55 15 57 50 20 50]; [29 24 45 19 29 35 20 35]
 [30 50 56 6 30 40 20 5]; [60 35 37 68 60 60 65 5]
 [18 55 2 45 18 42 2 35]; [24 45 48 20 24 7 60 17]

Instanz p79:

[57 31 36 60 57 12 35 37]; [29 67 26 12 29 24 17 56]
 [30 13 35 55 30 63 26 49]; [60 52 17 54 60 23 27 58]
 [18 10 40 25 18 64 25 21]; [24 20 60 30 24 42 30 24]

Instanz p80:

[57 15 42 15 57 11 28 40]; [29 47 7 47 29 14 18 60]
 [30 6 20 2 30 65 40 49]; [60 38 40 48 60 55 60 11]
 [18 26 62 55 18 35 16 8]; [24 35 77 5 24 40 22 56]

Instanz p81:

[57 10 45 12 57 25 44 24]; [29 43 10 24 29 30 17 12]
 [30 15 45 57 30 13 45 55]; [60 19 10 48 60 52 10 5]
 [18 32 45 26 18 26 35 64]; [24 12 10 52 24 27 69 42]

Instanz p82:

[57 4 55 15 57 45 20 37]; [29 18 45 47 29 20 50 56]
 [30 25 56 22 30 20 49 40]; [60 21 39 22 60 20 11 25]
 [18 20 24 53 18 63 27 65]; [24 65 58 12 24 65 69 55]

Instanz p83:

[57 47 6 57 57 55 37 11]; [29 47 68 68 29 5 47 14]
 [30 27 12 61 30 30 53 37]; [60 69 24 52 60 5 52 56]
 [18 37 5 55 18 6 15 47]; [24 47 5 54 24 68 47 16]

Instanz p84:

[57 28 27 32 57 19 40 28]; [29 18 43 12 29 21 25 18]
 [30 60 36 31 30 20 26 10]; [60 12 26 67 60 50 52 20]
 [18 53 27 32 18 37 44 17]; [24 12 43 12 24 56 17 34]

Instanz p85:

[57 15 30 60 57 37 17 63]; [29 77 25 12 29 31 34 65]
 [30 20 67 55 30 61 26 20]; [60 65 5 5 60 52 52 26]
 [18 64 14 63 18 55 45 37]; [24 42 37 23 24 20 10 47]

Instanz p86:

[57 25 26 35 57 46 60 60]; [29 30 27 69 29 13 12 12]
 [30 56 19 56 30 40 57 15]; [60 39 21 39 60 60 48 10]
 [18 65 15 15 18 56 19 8]; [24 20 77 30 24 37 21 56]

Instanz p87:

[57 49 67 53 57 53 56 27]; [29 11 5 52 29 12 37 43]
 [30 2 17 2 30 13 28 15]; [60 48 34 48 60 52 18 19]
 [18 27 27 57 18 62 55 5]; [24 69 43 68 24 77 54 5]

Instanz p88:

[57 49 49 64 57 6 61 8]; [29 58 58 42 29 68 52 56]
 [30 15 64 55 30 32 46 20]; [60 77 42 54 60 12 13 40]

[18 41 55 49 18 57 20 55]; [24 37 20 58 24 68 40 5]

Instanz p89:

[57 2 56 4 57 57 15 30]; [29 48 39 18 29 48 47 25]
 [30 44 22 5 30 20 46 55]; [60 17 22 30 60 50 13 5]
 [18 61 55 37 18 15 37 30]; [24 52 60 47 24 10 47 5]

Instanz p90:

[57 35 26 23 57 40 67 6]; [29 69 27 3 29 60 5 68]
 [30 55 22 20 30 26 20 45]; [60 60 22 65 60 35 65 65]
 [18 13 49 27 18 62 47 36]; [24 52 58 69 24 77 16 26]

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die Dissertation wurde bisher an keiner anderen Hochschule oder Universität vorgelegt.

Susanne Berger