

Linienverkehrsplanung in speditionellen Sammelgutnetzen

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der
Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Universität Augsburg

vorgelegt von
Dipl. math. oec. Nicole Wieberneit

Erster Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Fleischmann

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Karl Heinz Borgwardt

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Robert Klein

Tag der mündlichen Prüfung: 10.03.2008

4. August 2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiv
1 Einleitung	1
1.1 Situation und Trends bei logistischen Dienstleistern	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Organisation von Güterverkehrssystemen, insbesondere von Sammelgutsystemen	7
2.1 Logistikdienstleister	9
2.1.1 Transport und Transportkette	10
2.1.2 Transportsystem	11
2.1.3 Speditionelle Dienstleistungen	14
2.2 Dienstleisternetze	15
2.2.1 Arten von Netzstrukturen	16
2.2.2 Organisation der Verkehrsabläufe im Fernverkehr	19
2.2.3 Nationale, europaweite und interkontinentale Sammelgutnetze	24
2.3 Planungsprobleme in Sammelgutsystemen	30
2.3.1 Strategische Planungsprobleme	31
2.3.2 Taktische Planungsprobleme	32
2.3.3 Operative Planungsprobleme	38
3 Service Network Design	41
3.1 Klassifizierung von SNDP	41

3.2	Zeit-Raum-Netzwerke	43
3.3	Service Network Design Problems	45
3.3.1	SNDP in Pfeil-Formulierung	46
3.3.2	SNDP in Pfad-Formulierung	47
3.3.3	SNDP in Baum-Formulierung	48
3.4	Spezielle Varianten von SNDP	50
3.4.1	Mehrgüter-Netzwerkflussprobleme	51
3.4.2	Netzwerkgestaltungsprobleme	52
3.5	Lösungsalgorithmen für SNDP	54
3.5.1	Column-Generation und Dantzig-Wolfe-Dekomposition	55
3.5.2	Cutset-Inequalities und Cut-Generation	57
3.5.3	Branch-and-Price, Branch-and-Cut und Branch-Price-and-Cut	59
4	Probleme aus der Praxis und deren Lösungsansätze in der Literatur	63
4.1	Das Expresslieferproblem	64
4.1.1	Problembeschreibung	64
4.1.2	Ein iterativer Lösungsansatz	66
4.1.3	Composite-Variable-Formulierung	68
4.2	Das Briefflugnetzwerk	69
4.2.1	Problembeschreibung	70
4.2.2	Eine Dantzig-Wolfe-Dekomposition	72
4.3	LTL-Operationen in Nordamerika	74
4.3.1	Problembeschreibung	75
4.3.2	Eine Subgradienten-Lösungsmethode	76
4.4	LTL-Operationen in einem multimodalen Netzwerk in Europa	78
4.4.1	Problembeschreibung	79
4.4.2	Ein iterativer Dekompositionsansatz	80
4.5	LTL-Operationen in einem Straßennetzwerk in Europa	83
4.5.1	Problembeschreibung	84
4.5.2	Ein sequentieller Dekompositionsansatz	84
4.6	Analyse der Problemstellungen und Lösungsvorgehen	86

4.7	Möglichkeiten des Transfers der Lösungsansätze	93
5	Modell und Lösungsvorgehen für ein nationales Sammelgutnetz	97
5.1	Abgrenzung der Planungssituation	97
5.2	Servicerouten	100
5.3	Service-Netzwerk	101
5.3.1	Service-Netzwerk aufgebaut aus Hubrouten	102
5.3.2	Service-Netzwerk aufgebaut aus Pickup- und Delivery-Direktrouten	106
5.3.3	Charakteristika des Service-Netzwerks	109
5.4	Formulierung des Grundmodells	111
5.4.1	Nebenbedingungen	111
5.4.2	SNDP für das Grundproblem	113
5.5	Lösungsvorgehen	113
5.5.1	Bestimmung von Servicerouten	116
5.5.2	Generierung von Auftragsrouten	120
6	Tests	125
6.1	Vorbemerkungen	126
6.1.1	Untersuchungsgegenstand	126
6.1.2	Implementierung und Beschreibung der Hardware	128
6.1.3	ILOG CPLEX	128
6.2	Testdaten und Testinstanzen	129
6.2.1	Analyse der Datengrundlage	130
6.2.2	Aufbau der Testinstanzen	138
6.2.3	Notation zur Beschreibung der Ergebnisse	141
6.3	Tests zur Bestimmung von Servicerouten	143
6.3.1	Analyse der Laufzeiten	144
6.3.2	Parameter-tests	146
6.3.3	Vergleich der heuristischen Lösungen mit optimalen MIP-Lösungen	165
6.3.4	Analyse des Cut-Generation-Verfahrens	170
6.4	Tests zur Generierung von Auftragsrouten	175

6.5	Tests zum SNDP	176
6.5.1	Rechenaufwand	176
6.5.2	Lösungsqualität	180
6.6	Sensitivitätstests	194
6.6.1	Untersuchung der Netzstruktur: Einbindung von mehreren Hubs . .	194
6.6.2	Variation des täglichen Bedarfs anhand der Wochentage	197
6.6.3	Bedarfsvariation	198
7	Zusammenfassung und Ausblick	203
7.1	Zusammenfassung	203
7.2	Ausblick	204
	Literaturverzeichnis	233

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gruppen auf dem deutschen Transport- und Logistikmarkt (mit geringfügigen Änderungen entnommen aus BAG (2005), S. 4)	8
2.2	3-gliedrige Transportkette (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 20)	16
2.3	Rasternetz (a) Single-Hub-and-Spoke-Netz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 32)	17
2.4	Regionalhub-Netz (a) Mehrhub-Netz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 34f.)	18
2.5	Feederhub-Netz (a) gemischtes Transportnetz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 34f.)	19
2.6	Containerkonsolidierung I (in Anlehnung an Stumpf (1998), S. 53)	20
2.7	Containerkonsolidierung II (in Anlehnung an Stumpf (1998), S. 53)	21
2.8	Beiladung (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 41)	22
2.9	Rundlauf (a) Begegnungsverkehr (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 43)	23
2.10	Zwei-Tages-Umlauf (a) One-Way-Fahrt (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 44)	24
2.11	Vergleich der Verkehrsträger im Güterverkehr: Für Deutschland und EU-25 wurde der Anteil der Beförderungsleistung von 2004 hergenommen. Für den Extra-EU-Handel wurde das Beförderungsvolumen von 2002 als Basis herangezogen. Für Deutschland wurden die Daten entnommen aus Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2005); für die EU-25 stammen die Daten aus o. V. (2007b); für den Extra-EU-Handel aus Pongas und Tronet (2004a). Bei Extra-EU-Handel beinhaltet Sonstiges Bahn, Post, Rohrleitungen, Binnenwasserstraßen und unbekannt.	25
2.12	Nationale Transportketten	26
2.13	Zusätzliche nationale Transportketten bei Durchführung von Containerkonsolidierung oder Beiladung	27

2.14	Europaweite Transportkette	28
2.15	Interkontinentale Transportkette	29
2.16	Einteilung der Planungsprobleme von Sammelgutsystemen	30
3.1	Klassifizierung von SNDP	42
3.2	Time-Line-Netzwerk (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))	44
3.3	Connection-Netzwerk (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))	44
3.4	Knotenkonsolidierung eines Time-Line-Netzwerkes (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))	45
3.5	Darstellung eines Pfades im Netzwerk	47
3.6	Darstellung eines Baumes	49
3.7	Flüsse entlang Bäumen	49
3.8	Prinzipielle Vorgehensweise eines Column-Generation-Verfahrens	56
3.9	Prinzip der Dantzig-Wolfe-Dekomposition (in Anlehnung an Grünert und Irnich (2005a))	57
3.10	Synchronisiertes Column- und Cut-Generation (in Anlehnung an Kim und Barnhart (1999))	62
4.1	Beispiel für das Expresslieferproblem (Armacost u. a. (2002))	65
4.2	Überblick über das iterative Lösungsvorgehen für das Expresslieferproblem (Barnhart u. a. (2002))	67
4.3	Beispiel für das Briefflugnetzproblem	71
4.4	Blockstruktur (Irnich (2002))	73
4.5	Überblick über das Lösungsvorgehen für LTL Operationen in Nordamerika	77
4.6	Partitioning-Matrix der Basis	78
4.7	Beispiel für LTL in einem multimodalen Netzwerk	80
4.8	Ein iterativer Dekompositionsansatz für das multitmodale Netzwerk (vgl. Jansen u. a. (2004))	81
4.9	Zwei Phasen der Auftragsplanung	82
4.10	Innere Schleifen der Auftragsplanung	83
4.11	Lösungsvorgehen für das Straßennetzwerk	85

5.1	Darstellung des Grundproblems	98
5.2	Legende für Abbildungen des Zeit-Raumnetzwerkes	102
5.3	Knotenmengen der Hubrouten	102
5.4	Zeiten der Knotenmengen von Hubrouten	104
5.5	Zeiten der Knotenmengen von Pickup-Direktrouten	107
5.6	Zeiten der Knotenmengen von Delivery-Direktrouten	108
5.7	Service-Netzwerk mit Hub- und Direktrouten	110
5.8	Übersicht über die Vorgehensweise zur Lösung des Grundproblems	115
6.1	Lage der Standorte	131
6.2	Regionale Verteilung von Versand- und Empfangsaufkommen	135
6.3	Deutschlandkarte mit den Depotverbänden für die Gruppe mit 20 Depots (Geyer (2007))	140
6.4	Anteile der Laufzeiten für die Bestimmung von Servicerouten mit CPLEX- Defaulteinstellung	145
6.5	Legende für Parametertests	152
6.6	Knotenauswahlstrategie: Zielfunktionswerte der einzelnen Testinstanzen . .	153
6.7	Knotenauswahlstrategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit	153
6.8	Knotenauswahlstrategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP	154
6.9	Variablenauswahlstrategie: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen	155
6.10	Variablenauswahlstrategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Lauf- zeit	155
6.11	Variablenauswahlstrategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiteratio- nen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP	156
6.12	Branching-Richtung: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen . .	157
6.13	Branching-Richtung: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit .	157
6.14	Branching-Richtung: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der gelösten Knoten bei der Lösung der MIP	157
6.15	MIP-Dive-Strategie: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen . .	158
6.16	MIP-Dive-Strategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit . .	158

6.17 MIP-Dive-Strategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP	159
6.18 MIP-Emphasis-Indikator: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen	159
6.19 MIP-Emphasis-Indikator: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit	160
6.20 MIP-Emphasis-Indikator: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP	161
6.21 MIP-Gap-Toleranz: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen . . .	161
6.22 MIP-Gap-Toleranz: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit . .	162
6.23 MIP-Gap-Toleranz: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP	162
6.24 Relative Laufzeiten für die Bestimmung von Servicerouten mit neuer Parametereinstellung	164
6.25 Vergleich der Zielfunktionswerte für die CPLEX-Default Parametereinstellung und die neue Parameterkombination	165
6.26 Vorgehen des exakten Verfahrens zur Bestimmung von Servicerouten . . .	166
6.27 Vergleich der Zielfunktionswerte zwischen einem exakten Lösen des MIP und einem expliziten Column-Generation-Verfahren	167
6.28 Anteile der Routentypen im expliziten Column-Generation	168
6.29 Anteile der Routentypen im exakten Verfahren	168
6.30 Veränderung des Zielfunktionswertes der zweiten bis fünften gelösten MIP im Vergleich zur vorherigen MIP-Lösung	172
6.31 Anteil der verletzten Schnitte, hervorgerufen durch die jeweilige MIP-Lösung relativ zur Summe aller verletzten Schnitte	173
6.32 Anteil der Schnitte nach der 5. MIP-Lösung aufgeteilt nach $ S $ und $ T $. .	173
6.33 Rechenzeit und Anzahl Servicerouten der Testinstanzen	177
6.34 Rechenzeit und Anzahl Iterationen der Testinstanzen	178
6.35 Durchschnittliche Rechenzeit je Iteration und Anzahl Servicerouten der Testinstanzen	179
6.36 Für die Testinstanzen 49Depots_hub25_33_48 und 49Depots_hub25_33 die Ausgangsorte, deren Bedarfe in der ersten Iteration komplett gedeckt werden konnten.	184

6.37 Zielfunktionswert und Anzahl Iterationen für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots	185
6.38 Anzahl Servicerouten und Iterationen für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots	185
6.39 Anteil der verschiedenen Routentypen	186
6.40 Anteil der verschiedenen Servicerouten je Stopp und Routentyp	187
6.41 Zielfunktionswerte und Auslastung der Servicerouten für ausgesuchte Testbeispiele mit 49 Depots	189
6.42 Auslastung der verschiedenen Routen je Stopp und Routentyp	190
6.43 Verteilung der Auslastung der einzelnen Servicerouten des Beispiels 49Depots_hub25_33_48	191
6.44 Anteil an Fahrzeugumläufen und One-Way-Fahrten	192
6.45 Zielfunktionswerte der Testinstanzen bei der Variation der möglichen Hubs	195
6.46 Anteil der Servicerouten je Hub bei drei Hubalternativen	196
6.47 Zielfunktionswert und Anzahl der Sendungen je Wochentag für die Testinstanzen 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33	198
6.48 Anzahl Servicerouten je Routentyp und Wochentag für die Testinstanzen 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33	199
6.49 Zielfunktionswerte für die veränderten Bedarfswerte für die Testinstanzen 49Depots_hub25, 49Depots_hub25_33 und 49Depots_hub25_33_alle	200

Tabellenverzeichnis

2.1	NST/R-Kapitel für die Gütereinteilung	12
4.1	Haupteigenschaften der ausgesuchten Planungsprobleme	88
4.2	Lösungsvorgehen der ausgesuchten Planungsprobleme	91
5.1	Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Hubrouten	105
5.2	Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Pickup-Direktrouten	108
5.3	Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Delivery-Direkt- routen	109
6.1	Verteilung des Sendungsaufkommens über die Wochentage	133
6.2	Verteilung des Sendungsaufkommens nach Sendungsgrößen	134
6.3	Sendungsaufkommen innerhalb und außerhalb der Leitzonen	135
6.4	Detaillierte Verteilung des Empfangsaufkommens zwischen den Leitzonen (in Prozent)	136
6.5	Detaillierte Verteilung des Versandaufkommens zwischen den Leitzonen (in Prozent)	136
6.6	Depots mit Versand- und Empfangsaufkommen kleiner 4.000 TE (in An- lehnung an Geyer (2007))	139
6.7	Problemgröße für typische Testinstanzen	142
6.8	Laufzeiten bei der Bestimmung von Servicerouten mit CPLEX-Defaultein- stellung	145
6.9	Parametereinstellungen für die Knotenauswahl (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))	148
6.10	Parametereinstellungen für die Variablenauswahlstrategie (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))	148

6.11	Parametereinstellungen für die Branching-Richtung (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))	149
6.12	Parametereinstellungen für die MIP-Dive-Strategie (vgl. ILOG (2007c)) . .	149
6.13	Parametereinstellungen für den MIP-Emphasis-Indikator (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))	150
6.14	Grundeinstellung der Parameterwerte	151
6.15	Neue Kombination von Parameterwerten	163
6.16	Laufzeiten mit neuer Parametereinstellung inkl. Vergleich mit Gesamtlaufzeit bei Defaulteinstellung	163
6.17	Vergleich zwischen exaktem Verfahren zur Bestimmung der MIP-Lösung und dem expliziten Column-Generation-Verfahren	167
6.18	Veränderung des Zielfunktionswertes der jeweiligen MIP-Lösung zum Zielfunktionswert der endgültigen Lösung	172
6.19	Laufzeiten zum Lösen der jeweils ersten 5 MIP	174
6.20	Laufzeiten der MIP in Abhängigkeit der Anzahl Zeilen und Spalten je Iteration	175
6.21	Laufzeiten zur Lösung des Modells zur Generierung von Auftragsrouten, inklusive Anzahl Zeilen und Spalten	176
6.22	Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten und Stopps je Typ, Anzahl Umläufe und One-Way-Fahrten, Auslastung der Servicerouten, Anzahl Auftragsrouten, Anzahl Umschläge und Anzahl Iterationen im Verfahren für alle durchgeführten Testbeispiele	181
6.23	Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten je Typ und je Hub für die Instanzen 49Depots_hub25_33 und 40Depots_hub25_33_48	182
6.24	Durchschnittliche Anzahl an Auftragsrouten je Commodity und Anzahl an Umschlägen je Commodity	193
6.25	Häufigkeit der Anzahl Auftragsrouten und Umschläge für das Testbeispiel 49Depots_hub25_33_7_20_37_48	193
6.26	Anteil der Hubrouten, aufgeteilt nach Hub für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots	196
6.27	Anzahl der Hubrouten je Hub für die veränderten Bedarfswerte für die Testinstanz 49Depots_hub25_33_alle	200

1	Auszug aus den Depotkombinationen nach Priorisierung (in Anlehnung an Geyer (2007))	207
2	Depots in den Gruppen der Testprobleme für 20, 30 und 40 Depots (in Anlehnung an Geyer (2007))	208
3	1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Knotenauswahlstrategie	209
4	2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Knotenauswahlstrategie	210
5	1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Variablenauswahlstrategie	211
6	2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Variablenauswahlstrategie	212
7	1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Branching-Richtung	213
8	2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Branching-Richtung	214
9	1. Teil der Ergebnisse der Tests zur MIP-Dive-Strategie	215
10	2. Teil der Ergebnisse der Tests zur MIP-Dive-Strategie	216
11	1. Teil der Ergebnisse der Tests zum MIP-Emphasis-Indikator	217
12	2. Teil der Ergebnisse der Tests zum MIP-Emphasis-Indikator	218
13	1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Relativen MIP-GAP-Toleranz	219
14	2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Relativen MIP-GAP-Toleranz	220
15	Vergleich explizites Column-Generation und exaktes Verfahren	221
16	Zielfunktionswerte, Anzahl verletzter Schnitte und Anzahl gefahrener Servicerouten je MIP	222
17	Anteil der verletzten Schnitte je MIP im Vergleich zu den möglichen Schnitten	223
18	Anzahl verletzter Schnitte im 1. bis 5. MIP	225
19	Rechenaufwand, Zielfunktionswerte, Anzahl Servicerouten und Auftragsrouten in den Lösungen der Testergebnisse	226
20	Ausgangsort-Bestimmungsort-Paar und dazugehörige TE auf den Servicerouten über Hub 28 in Lösung der Testinstanz „49Depots_hub25_33_48“	226
21	Anzahl Stopps je Routentyp	227
22	Auslastung der verschiedenen Servicerouten aufgeteilt nach der Anzahl der Stopps	228
23	Zielfunktionswert, Anzahl Hubrouten und Anzahl Hubrouten je Hub für ausgesuchte Testbeispiele mit 49 Depots	229

24	Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten je Typ, Anzahl Umläufe und One-Way-Fahrten und Auslastung für die Wochentage Montag bis Freitag und den Mittelwert	230
25	Variation des Bedarfs: Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten je Routentyp, Anzahl Umläufe und Auslastung	231

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AG	Aktien Gesellschaft
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BFZ	Brieffrachtzentren
bzw	beziehungsweise
ca.	circa
Comm	Commodities
d. h.	das heißt
DP	Deutsche Post
EDT	Earliest Delivery Time
EPT	Earliest Pickup Time
FCL	Full-Container-Load
f.	folgende
ff.	folgenden
FTL	Full-Truckload
i. d. R.	in der Regel
i. e. S.	im engeren Sinne
inkl.	inklusive
IuK-System	Informations- und Kommunikationssystem
i. w. S.	im weiteren Sinne
kg	Kilogramm
LCL	Less-Container-Load
LDL	Logistik-Dienstleister
LDT	Latest Delivery Time
LEM	Location-Elimination-Modell
LP	Linear-Program
LPT	Latest Pickup Time
LTL	Less-Than-Truckload
MCNF	Multi-Commodity Network Flow
MIP	Mixed-Integer-Program
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MP	Master-Problem
Mrd.	Milliarden
o. V.	ohne Verfasser
PL	Part-Load
PLZ	Postleitzahl
PP	Pricing-Problem

QCP	Quadratically-Constrained-Programming
restl.	restliche
RMP	Restricted-Master-Problem
RP	Relaxed-Problem
Roro-Transporte	Roll-on / Roll-off Transporte
RWTH	Rhein-Westfälische Technische Hochschule
S.	Seite
Sek	Sekunde
SET	Sort End Time
SND	Service-Network-Design
SNDP	Service-Network-Design-Problem
SOCP	Second-Order-Cone-Programming
Sp.	Spalte
TE	Transporteinheiten
TU	Transportunternehmen
u. a.	und andere
UPS	United Parcel Service
vgl.	vergleiche
WB	Wechselbrücke
z. B.	zum Beispiel

Geleitwort

Der stark angewachsene Güterverkehr und der intensive Wettbewerb auf den Transportmärkten haben dazu geführt, dass die größeren Speditionen sowie Verbände von mittelständischen Speditionen dichte Transportnetze aufgebaut haben, in denen beliebige Relationen in ganz Deutschland oder in Europa bedient werden können. Die Transporte in einem solchen Netz laufen in einem festen Takt - in nationalen Netzen in der Regel täglich - nach einem festen Linienfahrplan ab. Dadurch wird einerseits ein zuverlässiger Service für die Kunden geboten, andererseits können kleinere Sendungen gebündelt transportiert werden. Bei der Planung der Linienverkehre verfolgt die Spedition das Ziel, die Kosten der eingesetzten Fahrzeuge zu minimieren. Daher enthält der Linienplan die vollständigen Fahrzeugumläufe, die ebenfalls in einem Ein- oder Zwei-Tagestakt ablaufen sollen.

Die Planung der Linienverkehre, ein äußerst schwieriges Optimierungsproblem, wird derzeit in der Praxis mittelfristig, mehrmals pro Jahr, mit großem Aufwand manuell durchgeführt, wobei nur wenige Alternativen überprüft werden können. Im Gegensatz zur strategischen Standortplanung von Transportnetzen und zur kurzfristigen Tourenplanung gibt es für dieses wichtige taktische Planungsproblem noch keine Standardmodelle und -verfahren.

Die vorliegende Arbeit packt die schwierige Aufgabe an, ein praktikables Planungsverfahren zunächst für ein nationales Straßentransportnetz zu entwickeln. Sie analysiert gründlich das Planungsumfeld in der Praxis und das Instrumentarium neuester mathematischer Optimierungstechniken. Dabei weicht die Autorin nicht von vorn herein auf einfache Heuristiken aus, sondern löst größere Teilprobleme exakt und verbindet sie durch eine heuristische Dekomposition. Die Performance der eingesetzten Methoden wird in intensiven Computertests untersucht und verbessert, so dass große Probleme mit bis zu 50 Depots und Hubs in einer für die mittelfristige Planung akzeptablen Rechenzeit gelöst werden können. Der Ausblick gibt gute Hinweise darauf, wie die Lösungsqualität weiter verbessert werden kann.

Ich wünsche der Arbeit, die einen wertvollen Beitrag zur Forschung in der Transportlogistik leistet, eine weite Verbreitung.

Augsburg, den 24.07.2008

Bernhard Fleischmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Augsburg, und meines Forschungsaufenthaltes am CIRRELT in Montreal, Kanada.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Bernhard Fleischmann, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat und mich auch weiterhin tatkräftig in meinem Vorhaben unterstützte, nachdem ich aus privaten Gründen nach Kanada gezogen war. Hervorheben möchte ich auch die konstruktiven Gespräche mit Herrn Helmut Kick. Schließlich möchte ich Herrn Prof. Dr. Karl Heinz Borgwardt für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Neben dem wissenschaftlichen Umfeld der Universität Augsburg haben auch die wissenschaftlichen Mitarbeiter vom CIRRELT einen wesentlichen Anteil am Erfolg der Arbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gilbert Laporte, der mich herzlichst am CIRRELT und HEC Montreal aufgenommen hat, sowie Herrn Prof. Dr. Stephan Ropke, der mich sehr hilfreich beim Programmieren unterstützt hat.

Schließlich möchte ich auch meinem privaten Umfeld danken. Meinen größten Dank gilt dabei meinen Eltern, die mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnet haben und mich mit Rat und Tat unterstützend zur Seite standen. Ebenfalls möchte ich mich auch bei meinem Mann und meinen Schwiegereltern bedanken, die mich jederzeit tatkräftig unterstützten und einen Anteil am Erfolg der Arbeit haben. Besonders hervorheben möchte ich jedoch meine beiden Kinder, die während meiner Forschungstätigkeit auf die Welt kamen und mir den nötigen Freiraum gelassen haben, die Arbeit zu vollenden.

Montreal, August 2008

Nicole Wieberneit

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Situation und Trends bei logistischen Dienstleistern

Der Gütertransportmarkt war in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten vielen Veränderungen ausgesetzt, die das Transportgewerbe vor einige neue Herausforderungen stellten und auch in Zukunft noch stellen werden.

Mitte der 80er Jahre wurde auf Anstrengung der EU ein Deregulierungsprozess in Gang gesetzt, der zum Ziel hatte, die nationalen Verkehrspolitiken an die Vorgaben der EU anzupassen und einen gemeinsamen Ordnungsrahmen zu schaffen (vgl. Eisenkopf (2004), S. 571). In Deutschland und anderen Ländern wurden dadurch die Preisvorschriften und somit die staatlichen Regulierungen aufgehoben (vgl. Korf (1994), S. 9), und das Beförderungsentgelt für Transportdienstleistungen konnte frei am Markt verhandelt werden. Neben der Preisbildung war auch der Marktzutritt im gewerblichen Straßengüterverkehr staatlichen Regulierungen unterworfen. 1998 trat z. B. in Deutschland das neue Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) in Kraft. Dieses Gesetz bewirkte die Abschaffung von Kontingentierungen, die Freigabe der Kabotageverkehre¹, die Erleichterung der Konzessionierung und gab somit den Marktzugang frei. Ein *Logistik-Dienstleister* (LDL) muss für den Marktzugang seitdem qualitative Eigenschaften in Form von Zuverlässigkeit, finanzieller Leistungsfähigkeit und fachlicher Eignung erfüllen (vgl. Noppe (2003), S. 9).

Diese Kombination von Tariffreigabe, erleichtertem Markteintritt und Freigabe der Kabotageerbringung verstärkte den Wettbewerb in der Transportbranche gewaltig. Der nahezu freie Marktzugang bewirkte, dass eine Vielzahl von neuen Unternehmen in den Markt drängten. Dadurch kam es zu einem ausreichenden bis übermäßigen Angebot an Laderaum, was das Preisniveau absinken ließ (vgl. BAG (2005), S. 1).

Zum 1. Mai 2004 wurde die EU von vorher 15 auf 25 Mitgliedsstaaten und zum 1. Januar 2007 um zwei weitere Staaten erweitert. Für die 12 neuen Staaten gelten mit einigen Ausnahmen die gleichen Bedingungen wie für die bisherige EU-15 (vgl. Otremba und Waibel (2004), S. 328 ff.). Diese EU-Erweiterung bietet mit rund 74 Mio. Bürgern und einer zunehmenden Ansiedlung industrieller Betriebe Chancen, da bedeutendes Potential

¹Unter Kabotage versteht man „Transporte im Straßen-, Binnenschiff-, See- und Luftverkehr, die inklusive Be- und Entladung von ausländischen Unternehmen durchgeführt werden“ (Klaus und Krieger (2004), S. 221).

für Absatz, Beschaffung und Produktion für Industrie- und Handelsunternehmen geschaffen worden ist. Die wachsenden Handelsbeziehungen und der steigende Warenaustausch erhöhen die Nachfrage nach Transport- und Logistikdienstleistungen. Diesem steigenden Frachtvolumen stehen sinkende Sendungsgrößen gegenüber. Durch den Wegfall der Grenzen sind keine hohen administrativen Grenzformalitäten mehr zu verrichten. Dies hat eine Verschiebung von vorwiegend Komplettladungen zu zunehmenden Just-in-Time- und Terminverkehren angestoßen (vgl. Kentner (2004), S. 5). Der LDL sieht sich dadurch veränderten Anforderungen gegenüber. Aspekte der Schnelligkeit, Flexibilität, Termintreue und Zuverlässigkeit stehen im Vordergrund.

Jedoch sind durch die Öffnung der Grenzen nicht nur die Chancen gewachsen, sondern auch Risiken für den LDL vorhanden. Der Wettbewerb, ausgelöst durch Transportunternehmen aus den neuen Mitgliedsstaaten, erhöht den wirtschaftlichen Druck auf LDL aus der ehemaligen EU-15. Die niedrigen Lohn- und Sozialkosten führen für die LDL aus den osteuropäischen Ländern zu einer wesentlich günstigeren Kostenstruktur. Dadurch ist die Ausgangslage dieser Unternehmen beim immer stärker werdenden Preiswettbewerb um einiges positiver zu bewerten (vgl. Kentner (2004), S. 6).

Der Bedarf nach Transport- und Logistikdienstleistungen stellt eine abgeleitete Nachfrage dar, die von den Industrie- und Handelsunternehmen stark beeinflusst wird. Neben den beschriebenen externen Aspekten beeinflussen die Anforderungen der Verlagerer die Leistungserbringung der Transportwirtschaft. Diese Bedürfnisse haben sich jedoch durch die Globalisierung der Wirtschaft verändert (vgl. Lang (2006), S. 8).

Beschaffungs-, Produktions- und Absatzprozesse wurden und werden neu gestaltet. Für die Transportbranche sind vor allem die folgenden Veränderungen von großer Bedeutung (vgl. Wlcek (1998), Stumpf (1998), Pfohl (2000) und Baumgarten (1996)):

- Verringerung der Fertigungstiefe und die damit verbundene zunehmende Arbeitsteilung
- Verringerung der Lieferantenzahl
- Outsourcing logistischer Leistungen von Industrie- und Handelsunternehmen an wenige LDL
- Leichtere Substitution von reinen Sachleistungen
- Wachsende Automatisierung und Spezialisierung des industriellen Fertigungsprozesses
- Konzentration der Fertigungsstätten auf wenige weltweite Standorte
- Erschließung neuer Absatzmärkte

Diese Veränderungen haben weitreichende Konsequenzen in Bezug auf Transportweiten, Transportvolumen und auf die Leistungserbringung für den LDL. Der Transport von Halb- und Fertigerzeugnissen steigt im Vergleich zu Rohstoffen weiter an. Diese Waren müssen weiter und immer mehr grenzüberschreitend befördert werden. Durch die vermehrt nachgefragten Konzepte wie Just-in-Time (JIT) oder Just-in-Sequence (JIS) für diese Produktions- und Handelsgüter, werden die zu transportierenden Einzelsendungen sowie die Transportintervalle kleiner (vgl. Baumgarten (1996), S. 32).

Zusätzlich wird der Anspruch der verladenden Wirtschaft nach qualitativen Produkten und Services, insbesondere bei den *logistischen Leistungen*, größer. Die Erbringung von Einzelleistungen, wie beispielsweise der reine Transport, tritt immer weiter in den Hintergrund. Der LDL soll die Rolle eines Systemdienstleisters übernehmen und die Abwicklung kompletter Aufgabenpakete durchführen sowie logistische Komplettlösungen anbieten. Dabei ist ein klarer Trend in Richtung Aufbau und Betrieb ganzer Transportsysteme im Rahmen von Komplettlösungen feststellbar (Baumgarten (1996), S. 32). Der LDL übernimmt dabei Aufgaben, wie z. B. die Planung des Transportsystems, die früher vom Verloader selber durchgeführt worden sind (vgl. Schmidthöfer (2004), S. 1). Neben den üblichen Standarddienstleistungen Lagerung, Organisation und Vermittlung des Transports sind Aufgaben wie Warenmanipulation, Zollaufgaben und Treuhänderfunktionen zu übernehmen (vgl. Piontek (1994), S. 116).

Aufgrund des hohen Wettbewerbs und der Macht der Verloader ist der LDL gezwungen, seine logistischen Dienstleistungen nicht nur zu erweitern, sondern deren Qualität in Bezug auf den *Lieferservice*, d. h. geringe Lieferzeit, Termintreue, hohe Lieferzuverlässigkeit, gute Lieferungsbeschaffenheit und Lieferflexibilität, immer weiter zu erhöhen. Dabei müssen die Kosten für die Erbringung der Leistungen aufgrund der Öffnung der Grenzen und des Wegfalls der Regulierungen, immer weiter reduziert werden.

Dieser gesteigerte Kosten- und Servicedruck hat zur Folge, dass LDL gezwungen sind, Europa- und weltweite Netzwerke auf- und auszubauen sowie diese zu betreiben. Dies ist für viele Speditionen im Transportgewerbe nur möglich, indem sie sich mit anderen Dienstleistern zu einem großen LDL, über Mergers oder den Verkauf des Unternehmens, zusammenschließen. Durch die Bildung dieser internationalen LDL wird insbesondere der Mittelstand mit seinem Fokus auf den Binnenmarkt in Bedrängnis gebracht, da diese großen LDL oftmals in der Lage sind, durch niedrigpreisige Angebote in bestehende Geschäftsbeziehungen einzubrechen (vgl. BAG (2005), S. 17 ff.). Ein Ausweg aus dem Dilemma für kleinere und mittelständische Firmen ist der Eingang von Kooperationen mit anderen Speditionen (vgl. Dederichs und Mook (2001), S. 22). Diese Kooperationen und größere mittelständische Dienstleister bauen ihre Netze und Leistungsangebote immer weiter aus, um so dem Druck der großen internationalen LDL entgegenzutreten zu können (BAG (2005), S. 13 ff.). Damit ein gewisser Level an Qualität des Lieferservices garantiert, die Ressourcen effizient eingesetzt und die Kosten reduziert oder niedrig gehalten werden können, ist die effiziente Planung solcher Netze von entscheidender Bedeutung.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Bei der *Gestaltung und Organisation von Güterverkehrsnetzen* stehen Überlegungen zur Veränderung oder seltener dem Neuaufbau der Netzstrukturen und die Optimierung der Abläufe in diesen Netzen im Fokus. Diese Planungsaufgaben sind durch eine große Komplexität gekennzeichnet; optimale Ergebnisse können somit nicht einfach oder gar nicht erzielt werden. Durch Verbesserung der Ergebnisse um nur wenige Prozentpunkte können allerdings enorme Kosten eingespart werden. Dafür ist der Einsatz von neuen Modellen und Methoden notwendig. Die Wissenschaft hat sich jedoch mit den Planungsproblemen der LDL zur Netzgestaltung bisher nur sehr wenig beschäftigt (vgl. Schmidthöfer (2004), S. 1, und Wlcek (1998), S. 3).

In den letzten Jahren wurden allerdings vermehrt Arbeiten zu diesem Themenkomplex

veröffentlicht. Dabei handelt es sich um Forschungsprojekte, die sich auf ein spezielles Segment der Transportbranche konzentrieren. Für die Umsetzung der Planungsergebnisse ist diese Fokussierung unabdingbar, da durch die unterschiedlichen Dienstleistungsangebote auch unterschiedliche Anforderungen an die Gestalt des Netzes entstehen. Die meisten der Arbeiten beschäftigen sich mit Teilladungs- und Sammelgutverkehren auf dem nordamerikanischen Markt oder Express- und Postdiensten. Europäische Sammelgutverkehre, die aufgrund der stark betonten Netzlastigkeit besonders interessant sind, wurden unseres Wissens nach nur in den Arbeiten von Wlcek (1998), Stumpf (1998) und Jansen u. a. (2004) untersucht.

Bei der Planung solcher Netze handelt es sich nicht um eine einzige Problemstellung, sondern um Planungsaufgaben die nach ihrer Fristigkeit, nämlich strategisch, taktisch und operativ, zusammengefasst sind. Auf der strategischen Ebene werden vor allem die Strukturen und die langfristig wirksamen, flussbezogenen Koordinationsaufgaben festgelegt. Mit einem Planungshorizont von üblicherweise zwischen 10 und 20 Jahren sind die Entscheidungen langfristig ausgelegt und fordern enorme finanzielle Mittel.

Die Vorgaben aus der strategischen Planungsebene werden in der taktischen Planung konkretisiert. Die durch diese Planung festgelegten strukturveränderten Maßnahmen setzen die Rahmenbedingungen für die operative Ebene fest. In der operativen Planungsebene sollen die bestehenden Erfolgspotentiale freigesetzt werden. In dieser Planungsebene werden die Abläufe einzelner Bestandteile der Logistikketten, d. h. der Verkehre, täglich detailliert geplant.

Ein besonders interessantes Problem im Bereich der taktischen Planung stellt die *Linienplanung* für den Fernverkehr von Sammelgutspeeditionen dar: Zur Vereinfachung der organisatorischen Abwicklung der Gütertransporte und zur Verbesserung der Kundenservicequalität soll die Abwicklung der Transporte zwischen Depotstandorten fahrplanmäßig organisiert werden. Denn nur durch eine standardisierte Abwicklung ist der zuverlässige Transport der Güter bei den oft sehr engen zeitlichen Vorgaben möglich. Dazu werden feste Linien eingerichtet, die täglich oder in mehrtägigem Rhythmus durchgeführt werden, und ein Fahrplan erstellt. Dieser Fahrplan soll eine kostenminimale Abwicklung zulassen. Dazu ist für eine optimale Allokation der Ressourcen, z. B. Fahrzeuge, Fahrer oder Umschlagskapazitäten, zu sorgen, wobei gleichzeitig die Kundenanforderungen nach einer schnellen Lieferzeit erfüllt werden müssen.

In der Literatur findet sich jedoch meistens für diese Art des Problems der Begriff *Service Network Design Problems*. Aus den Transportverbindungen zwischen zwei Standorten, Services genannt, wird ein Netzwerk aufgebaut. Über dieses sogenannte *Service-Netzwerk*, oder die *Linienverkehre*, werden die Güter geleitet. Dafür sind Entscheidungen bezüglich der Wege der zu transportierenden Aufträge, der Konsolidierungsmaßnahmen und der Fahrtrouten der Fahrzeuge zu fällen.

Für dieses Planungsproblem von europäischen Sammelgutspeeditionen sind bis jetzt nur sehr unzulängliche Konzepte entwickelt worden. Dies ist einer der Gründe, weshalb keine kommerzielle Software am Markt vorhanden ist und die Linienverkehrsplanung in der Praxis von Hand durchgeführt wird. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Ansatz entwickelt werden, der diese Lücke schließen kann.

Die Entwicklung eines ersten Lösungskonzeptes für internationale Netzwerke, inklusive aller praxisrelevanten Anforderungen, würde allerdings den Rahmen der Arbeit sprengen. Wir gehen daher von einem Grundproblem aus, das auf einem nationalen Netz mit Depots

und mehreren Hubs basiert. Für dieses Grundproblem soll eine möglichst praxisnahe Modellbildung angestrebt werden, welche die Kernanforderungen und -restriktionen integriert und die Zusammenhänge der Entscheidungsgrößen berücksichtigt. Das Lösungsvorgehen soll so konzipiert sein, dass eine Erweiterung auf ein europäisches oder sogar interkontinentales Netz möglich ist.

Diese Planungsaufgabe gehört zur Klasse der NP-vollständigen Probleme. Aufgrund der Größe realistischer Instanzen wird hierbei auch von *Large-Scale-Problemen* geredet. Für solche Planungsprobleme können mit dem heutigen Lösungsverfahren keine optimalen Lösungen berechnet und garantiert werden. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Bewältigung der Größe solcher Probleme mit dem Einsatz von Column- und Cut-Generation-Techniken, eingebettet in Branch-and-Bound-Verfahren. Damit die Laufzeiten sich nicht über mehrere Tage oder gar Wochen erstrecken, sind diese Verfahren jedoch auf eine heuristische Weise implementiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das **2. Kapitel** der Arbeit beschreibt die grundlegende Organisation von Güterverkehrssystemen und deren Abläufe, wie sie bei typischen europäischen Sammelgutspeditionen auftreten. Dazu werden zuerst begriffliche Grundlagen vorgestellt und die Charakteristika von Dienstleisternetzen diskutiert. Im Anschluss werden typische nationale, europaweite und interkontinentale Sammelgutnetze anhand ihrer Netzstruktur und ihrer Verkehrsabläufe erläutert sowie deren Planungsprobleme, differenziert nach Fristigkeit und Nah- oder Fernverkehr, detailliert ausgeführt.

Das taktische Planungsproblem im Fernverkehr, die Linienplanung, wird klassischerweise mithilfe Netzwerk-Gestaltungstechniken abgebildet. Die resultierenden *Service Network Design Problems* (SNDP) und exakte Lösungsverfahren zur Lösung dieser Probleme werden im **Kapitel 3** behandelt. Zunächst werden die Problemstellungen anhand der Ausrichtung ihrer Fristigkeit und der Komplexität klassifiziert und charakteristische Merkmale der Modelle aufgezeigt. Die den Modellen zugrunde liegende Netzwerkdarstellung kann entweder auf den physischen Orten (Raum) oder auf den physischen Orten zu verschiedenen Zeitperioden (Raum und Zeit) basieren. Insbesondere Problemstellungen, bei denen eine Festlegung eines Fahrplans gefragt ist, benötigen zur Abbildung *Zeit-Raum-Netzwerke*. Diese Netzwerke werden für realistische Instanzen enorm groß, somit sind Techniken zur Reduzierung gefragt. Nach der Darstellung solcher Zeit-Raum-Netzwerke vergleichen wir drei verschiedene Formulierungsarten für SNDP. Diese Modelle lassen sich durch die Fixierung von Variablen bzw. durch das Weglassen von Komplexität in *Mehrgüter-Netzwerkflussprobleme* (MCNF, *Multi-Commodity Network Flow*) und *Netzwerkgestaltungsprobleme* (NDP, *Network Design Problem*) überführen. Diese speziellen Varianten werden detailliert erläutert. Ebenso beschreiben wir exakte Verfahren zum Lösen von SNDP. Wir fokussieren dabei auf Methoden, die *Column-* und *Cut-Generation* sowie *Branch-and-Bound* einsetzen.

Zum Lösen realistischer Probleminstanzen genügt der alleinige Einsatz solcher Verfahren nicht. In der Literatur sind verschiedene Ansätze für SNDP aus der Praxis zu finden. Diese werden im **4. Kapitel** anhand ihrer Problemstellung, ihres Modellierungsvorgehens und ihres Lösungskonzeptes analysiert und miteinander verglichen. Ziel dieser Analyse ist zum einen aufzuzeigen, dass für die spezifische Problemstellung in dieser Arbeit noch kein ad-

äquates Verfahren vorhanden ist, und zum anderen festzustellen, ob Lösungsmethoden von ähnlichen Problemstellungen auf dieses Planungsproblem übertragen werden können. Bei der Untersuchung der Möglichkeiten zum Transfer zeigte sich, dass der generelle Ansatz von Barnhart u. a. (2002) für Expressdienste das einzig sinnvolle Lösungsvorgehen aus der Literatur ist, welches auf das Planungsproblem für Sammelgut-Dienstleister angewendet werden kann.

Die Umsetzung dieses Lösungskonzepts ist Inhalt des **Kapitel 5**. Nach der Abgrenzung der Problemstellung erfolgt die Modellierung. Wir erweitern dazu eine im Kapitel 3 vorgestellte Modellformulierung um praxisrelevante Anforderungen und Restriktionen. Durch den Einsatz von Entscheidungsvariablen, die auf Routen basieren, können wir fixe Kosten in die Zielfunktion integrieren, Anforderungen zu Zeitfenstern an den Standorten und gesetzliche Vorschriften zu Ruhe- und Lenkzeiten abbilden und die Anzahl der Nebenbedingungen reduzieren. Allerdings steigt damit die Anzahl der Variablen an. Dieser Nachteil wird jedoch durch den Einsatz eines Column-Generation-Verfahrens abgeschwächt. Das dem Modell zugrunde liegende Zeit-Raum-Netzwerk würde extrem groß werden, daher wenden wir eine Reihe von Reduzierungsmethoden an. Die Optimalität wird durch das stark geschrumpfte Netzwerk nicht beeinträchtigt. Zur Lösung des Problems führen wir eine Dekomposition anhand der Entscheidungsvariablen durch und erhalten dadurch zwei Modelle: ein Modell zur Bestimmung der Services, abgebildet über Routen, und ein Modell zur Generierung von Auftragsrouten. Diese Modelle sind iterativ miteinander verknüpft, so dass die jeweiligen Entscheidungen des einen Problems Einfluss auf das jeweilige andere Planungsproblem haben. Die Durchführung einer Dekomposition ist notwendig, da das Modell ansonsten eine Komplexität annimmt, mit dem es in annehmbarer Laufzeit nicht gelöst werden kann. Das Verfahren ist weiterhin so angelegt, dass die Problemgröße sich in jeder Iteration verkleinert. Das Modell zur Bestimmung von Servicerouten wird mit einem heuristisch implementierten Branch-Price-and-Cut-Verfahren gelöst. Das Modell zur Generierung von Auftragsrouten wird durch ein Branch-and-Price-Verfahren gelöst.

Die Einsatzmöglichkeit des im vorigen Kapitel beschriebenen Konzeptes wird im **6. Kapitel** untersucht. Dazu haben wir die Modelle und Verfahren mit Echtdateien getestet. Nach der Analyse der Daten und der Beschreibung zur Erzeugung von realistischen Testinstanzen, erfolgt eine Untersuchung der zwei Modelle, jeweils isoliert, ohne Rückschlüsse auf das Gesamtverfahren und das endgültige Lösungsergebnis zu geben. Dabei werden verschiedenste Tests zur Beschleunigung der Verfahren durchgeführt. Im Anschluss wird der gesamte Algorithmus durch eine Anwendung auf ein realistisches SNDP einer Sammelgutspeidition auf Laufzeit und Lösungsqualität getestet. Erfolge und Mißerfolge werden dokumentiert und - falls möglich - erklärt und interpretiert. Ebenso werden die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des implementierten Verfahrens aufgezeigt. Zum Abschluss werden noch drei verschiedene Arten von Sensitivitätstests durchgeführt.

Abschließend werden im **Kapitel 7** die Inhalte der Arbeit zusammengefasst und ein Überblick über die erzielten Ergebnisse gegeben. Weiterhin werden kritische Punkte beschrieben und Ansätze für deren Verbesserung in weiteren Forschungsarbeiten aufgezeigt. Darüber hinaus wird ein Ausblick zu Teilaspekten gegeben, die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden konnten. Diese stellen interessante Punkte für zukünftige Forschungsprojekte dar.

Kapitel 2

Organisation von Güterverkehrssystemen, insbesondere von Sammelgutsystemen

Laut der Studie „Die TOP 100 der Logistik“ (vgl. Klaus (2006)) ist das Marktvolumen des Logistiksektors im Jahre 2004 auf ca. € 170 Mrd. geschätzt worden, wobei rund € 79 Mrd. auf die gewerblichen Logistikdienstleister entfallen. Dabei handelt es sich laut der Marktbeobachtung des Bundesamtes für Güterverkehr (BAG) (vgl. BAG (2005)) zumeist um klein- und mittelständische Transport- und Logistikunternehmen. Weiterhin wurde bei der Betrachtung des Güterverkehrsgewerbes festgestellt, dass der Markt sehr zersplittert ist und die Marktteilnehmer teilweise sehr unterschiedliche Geschäftsmodelle aufweisen. Deswegen wurden Unternehmen mit vergleichbaren Taktiken in Gruppen zusammengefasst.

In nachstehender Abbildung 2.1 sind wichtige Gruppen dargestellt. Die Einteilung der Unternehmen erfolgt anhand zweier Kriterien: der Orientierung der Geschäftstätigkeit und des Umfangs logistischer Dienstleistungen. Bei dem ersten Merkmal wird unterschieden, ob die zusammengefasste Gruppe vorwiegend transportorientiert im Sinne einer selbstständigen Transportdurchführung (Selbsteintritt) arbeitet oder ob die Organisation des Transportes im Vordergrund steht und somit eine überwiegende Speditionsorientierung vorherrscht. Das zweite Unterscheidungsmerkmal gibt den Leistungsumfang des Unternehmens wieder.

Kleine und selbstfahrende Transportunternehmer (TU), traditionelle Fuhrunternehmen, mittelständische Branchenspezialisten und Nischenanbieter führen die Transporte üblicherweise im Selbsteintritt mit eigenen Fahrzeugen durch. *Internationale Logistikkonzerne (Global Player)* und *Mittelständische Speditionen* greifen dafür typischerweise auf externe Unternehmen zurück. Sie fokussieren sich auf die Organisation der Transporte und das Durchführen weiterer logistischer Dienstleistungsangebote.

Wir werden uns in dieser Arbeit auf die speditionsorientierten Unternehmen, also mittelständische Speditionen und Global Player, fokussieren. Die mittelständischen Speditionen sind überwiegend in den Bereichen Stückgut bzw. Sammelladungsverkehr und Teilladungsverkehr tätig und bieten hauptsächlich standardisierte Leistungen, wie Transport und La-

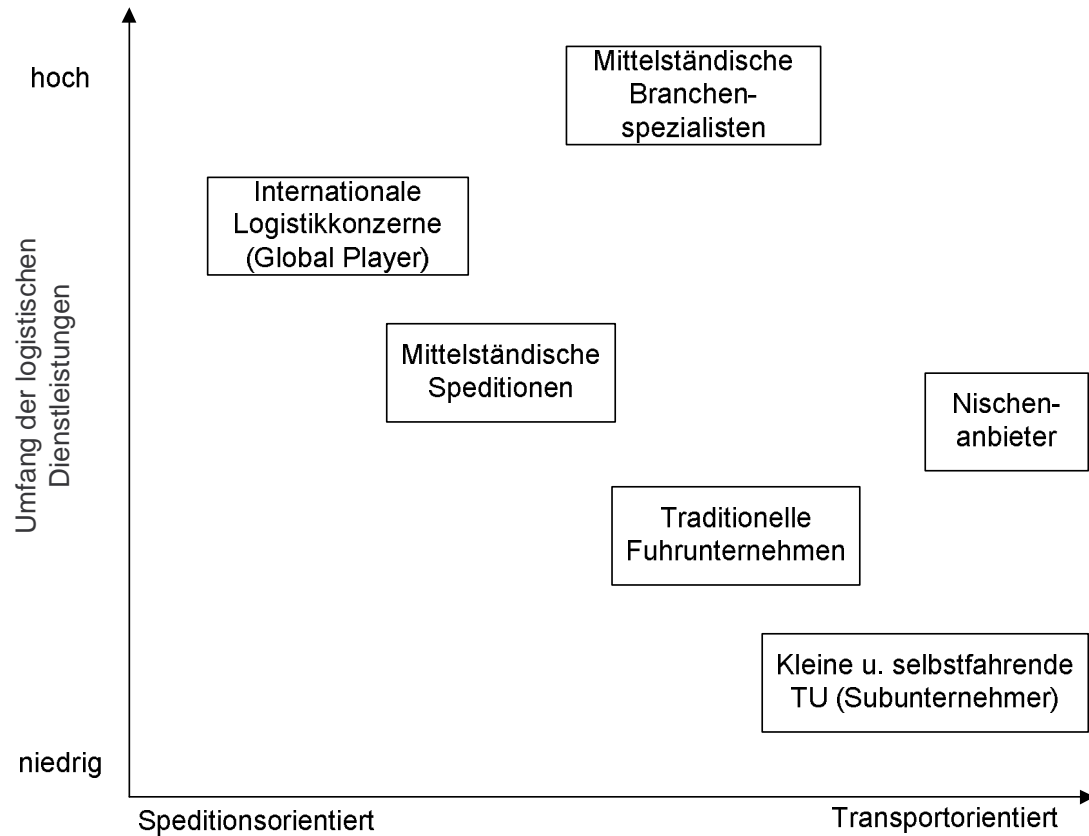


Abbildung 2.1: Gruppen auf dem deutschen Transport- und Logistikmarkt (mit geringfügigen Änderungen entnommen aus BAG (2005), S. 4)

gerung, an. Ihre Netze sind wesentlich schlechter entwickelt als die der Global Player. Um mit den internationalen Netzen der großen Logistikkonzerne mithalten zu können, bilden sie Kooperationen mit anderen mittelständischen Unternehmen. Dadurch können die notwendigen Netzwerke und Leistungsumfänge zur Befriedigung der Kundenansprüche angeboten werden.

Die Global Player haben in den letzten Jahrzehnten engmaschige europa- und weltweite Netzwerke aufgebaut und können mit umfangreichen Dienstleistungen aufwarten. Dadurch können sie den Wünschen und Anforderungen nach integrierten grenzüberschreitenden Logistiklösungen der verladenden Wirtschaft am besten nachkommen.

Diese zwei Gruppen von Unternehmen bezeichnen wir im Folgenden mit dem Namen *Logistik-Dienstleister*. In den nächsten Unterkapiteln wird die Organisation von Güterverkehrssystemen solcher LDL vorgestellt. Dazu gehen wir zunächst in Abschnitt 2.1 genauer auf die Logistikdienstleister und ihr Transportsystem ein. Im Anschluss werden im Unterkapitel 2.2 unterschiedliche Transportnetzwerke und deren Ablauforganisation, insbesondere Sammelgutnetze, beschrieben. Die Planungsaufgaben solcher Transportnetze werden in verschiedene Planungsebenen nach Fristigkeit eingeteilt. Diese werden weiter durch die Länge der Transporte nach „Nahverkehr“ und „Fernverkehr“ differenziert. Abschnitt 2.3 behandelt diese Planungsebenen.

2.1 Logistikdienstleister

In der Literatur sind diverse Definitionen des Begriffs *Logistik* zu finden. Verschiedene Elemente zur Beschreibung des Begriffs tauchen allerdings in nahezu jedem Ansatz auf:

- Die Logistik befasst sich mit Funktionen zur Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle logistischer Prozesse.
- Unter dem Begriff der *logistischen Prozesse* werden alle Transport- und Lagerungsprozesse von logistischen Objekten zusammengefasst. Dazu gehören auch die Be- und Entladung, der Umschlag mit Ein- und Auslagerung sowie das Kommissionieren.
- *Logistische Objekte* sind Personen, Güter, Informationen und Energie.
- Zur Durchführung mehrerer logistischer Prozesse wird ein *logistisches System* aufgebaut, welches die Struktur eines Netzes aufweist.

Neben der Informationstechnologie ist für die Planung, Steuerung, Überwachung sowie die Abwicklung von administrativen Prozessen die Kommunikationstechnologie unabdingbar. Sie stellt das Medium zur Übertragung von Informationen dar (vgl. Stahlknecht und Hasenkamp (1997), S. 113). Laut Wittmann (vgl. Wittmann (1979), Sp. 699) wird Information als zweckorientiertes Wissen verstanden. Aus den Informationen soll der Informationsempfänger Erkenntnisse gewinnen, um am Ende zu einem zielgerichteten Handeln zu gelangen (vgl. Koch (1996), S. 26f. und Bertram (1995), S. 19). Daher sind IuK-Systeme (Informations- und Kommunikations-Systeme) als fester Bestandteil eines jeden logistischen Systems anzusehen.

Logistik kann daher als integrierte Planung, Organisation, Steuerung und Kontrolle des gesamten Material- und Warenflusses mit den damit verbundenen Informationsflüssen definiert werden. „Logistik bedeutet [nach Fleischmann aus dem Handbuch der Logistik (Fleischmann (2002a), S. A1-3)] die Gestaltung logistischer Systeme sowie die Steuerung der darin ablaufenden Prozesse.“

Es ist somit wichtig zwischen logistischen Aufgaben, wie beispielsweise der Durchführung einzelner Transporte, und der Steuerung eines logistischen Systems, im Sinne der Logistik, zu unterscheiden. Wesentlich bei der Logistik ist „die ganzheitliche Sicht aller Prozesse in einem System“ (Fleischmann (2002a), S. A1-4). Die vielseitigen technischen und ökonomischen Aufgaben der Logistik reichen von der technischen Gestaltung eines Systems bis hin zu dessen Optimierung. Mit dieser Begriffsabgrenzung ist die Logistik ein Bestandteil verschiedener Wissenschaften (vgl. Fleischmann (2002a), A1-4).

LDL sind gewerbliche Unternehmen, deren Kernaufgabe die Gestaltung von logistischen Systemen ist und deren Serviceleistungen auf „die bedarfsgerechte Herstellung von Verfügbarkeit“ (Bretzke (1999), S. 220) gerichtet sind. Ihre logistischen Dienstleistungen bieten und erbringen sie für Dritte (vgl. o. V. (2007a)). Diese Dienstleistungen können durch drei Funktionen beschrieben werden (vgl. Pfohl (2000), S 203):

Die *logistische Hauptfunktion* dient der Gütertransformation. Dies sind der Transport, der als die räumliche Veränderung des Gutes definiert wird, und die Lagerung. Bei der Lagerung verändert sich die räumliche Situation der Güter nicht, jedoch findet eine zeitliche Veränderung statt.

Die zweite Funktionsgruppe sind die *Ergänzungs- oder Komplementärfunktionen*. Diese sind indirekt zur Durchführung der Veränderungsprozesse notwendig. Zu diesen Funktionen zählen unter anderem die Disposition für den Einsatz der Betriebsmittel, Sammel- und Umschlagsaufgaben für die Mengenkonsolidierung oder Ein- und Auslagerungsvorgänge. Ebenso werden auch Prozesse zur Auftragsabwicklung und Datenübetragung im Informationsfluss als Ergänzung zur Transportabwicklung gesehen. Kommissionier- und Verpackungsaufgaben werden ebenfalls zu den Komplementärfunktionen bei der Lagerhaltung gezählt und nicht zur dritten Gruppe der Sonder- oder Zusatzfunktionen.

Bei der dritten Gruppe handelt es sich um *Sonderfunktionen oder Zusatzfunktionen*. Diese werden von den Unternehmen angeboten, haben aber weder direkt noch indirekt mit der Durchführung der räumlichen und zeitlichen Veränderung zu tun. Das Spektrum dieser Dienstleistungen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Es werden z. B. Transportversicherungen vermittelt oder Endprodukte montiert.²

Vor allem das Anbieten von Zusatzfunktionen sowie Ergänzungs- und Komplementärfunktionen gewinnen nach Terhorst (1992), Fohrmann (2000) und Von Helldorff (2002) immer mehr an Bedeutung, da sie von der verladenden Wirtschaft vermehrt im Rahmen von Komplettlösungen nachgefragt werden. Dies stellt für Speditionen einen wichtigen Schritt in Richtung Logistikdienstleister dar.

Im Sinne der getroffenen Begriffsabgrenzungen stellt ein *Güterverkehrssystem* ein speditionelles Netz dar, in dem logistische Leistungen erbracht werden. Für den LDL steht dabei die räumliche Veränderung - der Transport - im Vordergrund.

2.1.1 Transport und Transportkette

„Unter *Transport* versteht man die Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mithilfe von Transportmitteln.“ (Pfohl (2000), S. 157)

Zum *Transportprozess* wird nicht nur die eigentliche Beförderung gezählt, sondern auch die unmittelbar dazugehörigen Umschlagsvorgänge. Beides wird als die primäre Funktion des Transportes bezeichnet (vgl. Wlcek (1998), S. 8). Für die Durchführung des Transportes stellt sich für den LDL dabei folgendes Transportproblem: wie soll die Ortsveränderung, unter Zuhilfenahme welcher Transportmittel, bewerkstelligt werden oder welches ist das am besten geeignete Transportsystem? Für eine Entscheidung sind die Fragen nach dem richtigen bzw. günstigsten Transportmittel und der besten Prozessabwicklung zu beantworten. Das Transportgut, welches ein externer Bestandteil des Transportsystems ist, spielt für den Entscheidungsprozess eine wichtige Rolle. Der Aufbau einer Transportkette stellt laut Pfohl (2000) den ersten Schritt zu einer Lösung für dieses Problem dar.

Die *Transportkette* ist „nach DIN 30781 eine Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen (Personen oder) Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden“ (Deutsches Institut für Normierung, 1983 - zitiert in Pfohl (2000), S. 164). Es ist ein System, dessen Transportvorgänge durch eine abgestimmte Organisation und IK-Systeme miteinander verknüpft werden. Für die Gestaltung der Transportkette stehen dem LDL mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Durch die Anzahl der

²Eine ausführliche Liste mit angebotenen Dienstleistungen kann in Fischer (1994), S. 15, nachgelesen werden.

eingesetzten Transportmittel wird die Art des Verkehrs und damit die Anzahl der Glieder in der Transportkette bestimmt.

Die Transportdurchführung kann direkt vom Sender zum Empfänger ohne Wechsel des Transportmittels und ohne die Anfahrt eines weiteren Knotenpunktes im Transportnetz erfolgen. Hierbei wird von einem direkten oder ungebrochenen Verkehr gesprochen. Die Transportkette ist somit *eingliedrig*.

Nach den Ausführungen von Ihde (1991) (S. 98), Stumpf (1998) (S. 8ff.) und Seidelmann (2002) (S. C3-12) spricht man von einer *mehrgliedrigen* Transportkette, wenn während des Transportes vom Sender zum Empfänger ein Wechsel des Transportmittels stattfindet und/oder ein weiterer Knotenpunkt im Transportnetz, z. B. ein Hub oder ein Depot, angefahren wird. Bei einer mehrgliedrigen Transportkette kann entweder ein gebrochener oder ein multimodaler bzw. kombinierter Verkehr stattfinden. Von einem *gebrochenen Verkehr* wird bei einem Wechsel des Transportmittels gesprochen. Der Begriff *kombinierter oder multimodaler Verkehr* wird beim Wechsel eines Verkehrsträgers benutzt, wobei der Umschlag mit dem beladenen Transportbehälter erfolgt.

2.1.2 Transportsystem

Zur Lösung des Transportproblems hat der LDL die Frage nach dem richtigen Transportmittel und Transportprozess, welche zusammen mit dem Transportgut das Transportsystem bilden (vgl. Pfohl (2000), S. 162), zu beantworten. Jedes dieser Elemente weist verschiedene Eigenschaften und somit systemspezifische Vor- und Nachteile auf, die je nach Anforderung an das Transportsystem, die Entscheidung beeinflussen. Im Folgenden werden diese drei Elemente weiter klassifiziert.

Transportgut:

Die Gestaltung des Transportsystems wird ausschlaggebend durch das Transportgut beeinflusst. Zum einen bestimmen die Gütereigenschaften des Transportgutes die Wahl des Transportmittels und ggf. auch die Hilfsmittel für Verladung und Umschlag; zum anderen wirken sich die Sendungseigenschaften auf die Wahl des Transportprozesses aus.

Die Transportgüter können auf verschiedene Arten in Gruppen geteilt werden. Möglich ist eine Klassifizierung nach dem *originären Zustand*, d. h. der Gestalt des Gutes. Es wird dabei zwischen Stück-, Schütt-, Fließ- und gasförmigem Gut unterschieden. Unter Stückgut wird ein „Gut fester Konsistenz, das stückweise gehandhabt“ (Freichel (1992), S. 15) werden kann, verstanden. Diese Güter lasten die Transportmittelkapazität nicht vollständig aus und werden im gebrochenen Verkehr transportiert. Man spricht daher auch von Sammelgut.³ Jedoch können Güter der anderen Kategorien auch zum Stückgut gezählt werden, wenn ähnliche Transporteigenschaften vorliegen. Dies kann z. B. durch Verpacken der Güter erreicht werden (vgl. Wlcek (1998), S. 9).

Ebenso können die Güter nach *verschiedenen Aggregationsebenen* mithilfe von Güterkategorien gruppiert werden. Für Verkehrsstatistiken wird das einheitliche Güterverzeichnis nach den NST/R-Kapiteln (Nomenclature des Statistiques de Transport, revidiert) hergenommen. Die NST/R-Kapitel sind, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, in 10 Kapitel gegliedert (vgl. Pongas und Tronet (2004b), S. 7).

Vor allem Güter der Güterkategorie 9 fallen in den Bereich des Stückguts und sind für

³Die Begriffe Stückgut und Sammelgut werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

0	Land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse und lebende Tiere
1	Andere Nahrungs- und Futtermittel
2	Feste mineralische Brennstoffe
3	Mineralölerzeugnisse
4	Erze und Metallabfälle
5	Eisen, Stahl und NE-Metalle (einschließlich Halbzeug)
6	Steine und Erde und Baustoffe
7	Düngemittel
8	Chemische Erzeugnisse
9	Fahrzeuge, Maschinen, sonstige Halb- und Fertigwaren sowie besondere Transportgüter

Tabelle 2.1: NST/R-Kapitel für die Gütereinteilung

diese Arbeit besonders interessant. Die meisten anderen Kategorien gehören, natürlich mit Ausnahmen, dem Schüttgut zugeordnet. Einzig Kapitel 3 und zum Teil Kapitel 8 kann den Fließgütern zugewiesen werden.

Als letzte Möglichkeit für eine Klassifizierung der Güter gibt es die Einteilung nach *Behandlungs- und Handhabungserfordernissen*. Man unterscheidet nach

- mechanischen, die z. B. bei hängender oder palettisierter Ware vorkommen,
- thermischen, d. h. temperaturempfindliche Waren, wie z. B. Kühlgut oder temperaturunsensiblen Trockengut,
- und chemischen Eigenschaften (vgl. Wlcek (1998), S. 9).

Neben den Eigenschaften des Gutes sind die *Sendungseigenschaften* ein wichtiges Kriterium für die Gestaltung des Transportsystems. Hierbei werden vor allem die Größen der Sendungen unterschieden. Für den Straßengüterverkehr lassen sich in Anlehnung an Wlcek (1998), Fleischmann (2002b) und Otrembra (2004) daraus folgende Verkehre differenzieren:

- *Massengut*:
Die Sendungsgrößen übersteigen die Kapazität des jeweiligen Transportmittels, z. B. eine LKW-Ladung (vgl. Freichel (1992), S. 14).
- *Komplettladungsverkehre oder Full-Truckload (FTL)*:
Komplettladungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Transportmittelkapazität (gewichts- oder volumenmäßig) fast vollständig ausnutzen. Diese werden direkt vom Versender zum Empfänger ohne Konsolidierungsmaßnahmen transportiert.
- *Teilladungsverkehre oder Part-Load (PL)*:
Von Teilladungen spricht man in der Praxis bei Sendungen von ca. 1.000 bis 5.000 kg, welche die Kapazität des Transportmittels nicht adäquat ausnutzen. Im Rahmen einer Konsolidierung werden verschiedene Teilladungen gemeinsam transportiert, ohne jedoch ein Umschlag über ein Depot oder einen Hub durchzuführen.
- *Stückgutverkehre oder Less-Than-Truckload (LTL)*:
Stückgutsendungen sind im Gegensatz zum Kleingut wesentlich inhomogener und

übersteigen zumeist ein Gewicht von 30 kg. Eine klare Abgrenzung nach oben zum Teilladungsverkehr ist in der Praxis nicht vorhanden, es werden jedoch Sendungen bis zu 2.000 kg im Stückgutverkehr transportiert. Diese Sendungen, ebenso wie Kleingut, werden in einem Netz, bestehend aus Depots und eventuell Hubs, gebündelt (siehe Kapitel 2.2).

- *Kleingut oder KEP-Verkehre:*

Unter Kleingut versteht man in der Regel Dokumente, Briefe, Päckchen oder Pakete. Anbieter von Kurier-, Express- und Paket- oder Postdiensten (KEP) transportieren vornehmlich Kleingüter mit relativ wenig Gewicht. Für die Waren sind von den Transportdienstleistern restriktive Größen- und Gewichtsgrenzen vorgegeben. Die Gewichtsobergrenze ist zumeist mit 30 kg angegeben (vgl. auch Wohler und Kille (2004), Pompl (2002) und Mengen (1993)).

Die Sendungseigenschaften bestimmen insbesondere den organisatorischen Ablauf, wie beispielsweise die Art der Konsolidierung oder ob der Transport über eine ein- oder mehrgliedrige Transportkette abgewickelt wird.

Transportmittel:

Bei der Auswahl der Transportmittel sind vor allem die Leistungsfähigkeit und die Eignung für bestimmte Transportgüter entscheidend. Diese werden primär über die *Verkehrsträger* und sekundär über die *technische Ausprägung* kategorisiert. Die Verkehrsträger werden unterschieden nach Straße, Schiene, Binnengewässer, Meere und Ozeane, Luft und Rohrleitungen⁴. Diesen Verkehrsträgern lassen sich dann verschiedene Transportmittel, wie beispielsweise Sprinter oder Wechselbrückenfahrzeug, zuordnen. Für die Auswahl der Transportmittel sind unter anderem die verfügbare Kapazität, die Eignung für das Transportgut in Bezug auf Gewicht, Form und Zustand des Gutes sowie wirtschaftliche Aspekte ausschlaggebend.

Transportprozess:

Nach Wlcek (1998) (S. 10f.) werden die Transportprozesse in *räumliche* und *zeitliche Kriterien* eingeteilt. Bei den räumlichen Kategorien wird zwischen *regionenbezogenen*, *relationsbezogenen* und *flächendeckenden Dienstleistungen* differenziert. Regionenbezogene Transportdienstleistungen erstrecken sich innerhalb eines eng begrenzten Gebietes, in dem sich Versender und Empfänger befinden. Bei relationsbezogenen Dienstleistungen finden die Transporte zwischen bestimmten Versand- und Zielgebieten statt. Von flächendeckenden Transportprozessen spricht man, wenn der LDL Transporte zwischen jedem beliebigen Versender zu jedem beliebigen Empfänger innerhalb eines nationalen, kontinentalen oder sogar interkontinentalen Gebietes anbietet.

Für die Transportdienstleistungen können *Regel-* oder *Garantielaufzeiten*, *Terminverkehre* und *Transportfrequenzen*, im Rahmen von zeitlichen Kriterien, gegeben sein. Regellaufzeiten berechnen sich aus Erfahrungswerten aus der Vergangenheit und geben die Dauer für den Transportprozess an. Bei Überschreitung der Transportdauer können im Gegensatz zu den Garantielaufzeiten von den Versendern keine rechtlichen Schritte unternommen werden. Bei Garantielaufzeiten wird vertraglich eine obere Grenze für die Dauer des Transportes festgelegt. Werden fest vereinbarte Termine zur Abholung und

⁴Rohrleitungen sind hier nur der Vollständigkeit halber angegeben. Diese Art des Transportes steht für das in dieser Arbeit vorliegende Problem nicht zur Auswahl.

Anlieferung der Sendungen festgesetzt, so spricht man von Terminverkehren. Die Dauer des eigentlichen Transportprozesses spielt dabei eine untergeordnete Rolle und wird nicht festgesetzt. In Güterverkehrsnetzen werden üblicherweise Transportfrequenzen, also Häufigkeiten, zwischen Standorten ausgewiesen. In europäischen nationalen Netzen, wie innerhalb Deutschlands, ist eine 24-Stunden-Taktung üblich. In größeren Netzen können die Frequenzen etwas geringer ausfallen.

Für die Gestaltung des Transportsystems hat der LDL nicht nur die Elemente Transportgut, Transportmittel und Transportprozess, sondern laut Ihde (1991) auch Marktgegebenheiten zu beachten: So unterliegen die Transportaufkommen saisonalen Schwankungen, der Anteil der Fixkosten an den Gesamtkosten für die Transportdienstleistungen ist auch bei guter Auslastung sehr hoch und es ist mit Degressionseffekten aufgrund größerer Mengen bei den Kosten zu rechnen. Die hohen Fixkosten und der degressive Verlauf der Kostenkurve zwingen den LDL, die Kapazität der Transportmittel gut auszulasten. Für den LDL stellt dies ein komplexes Planungsproblem dar.

Ferner ist der Wettbewerb innerhalb des Transportgewerbes stark ausgeprägt. Dies zwingt den LDL, neben den reinen Transportdienstleistungen, sein Angebot an expeditionellen Dienstleistungen zu erweitern und zu verbessern.

2.1.3 Expeditionelle Dienstleistungen

Die Hauptaufgabe von *Speditionen*, ob mittelständische Spedition oder internationaler Logistikkonzern, ist immer noch die Vermittlung von Transportleistungen. „Spediteur ist, wer es gewerbsmäßig übernimmt, Güterversendungen durch Frachtführer oder durch Verfrachter von Seeschiffen für Rechnung eines anderen (des Versenders) in eigenem Namen zu besorgen“ (HGB § 407 und Koller u. a. (1999)). Zu diesem Zweck schließen Spediteur und Versender einen Speditionsvertrag ab, mit dem sich „der Spediteur verpflichtet, die Versendung des Gutes zu besorgen“ (HGB § 453 Abs. 1). Grundsätzlich stehen dem Spediteur zwei Möglichkeiten zur Abwicklung der Versendung zur Verfügung: die eigene Erbringung der Leistung oder der Einkauf durch Beauftragung dafür spezialisierter Transportunternehmen und Dienstleister. Im Zuge der Veränderungen im Logistikmarkt (vgl. Kapitel 1.1) rückt die organisatorische Aufgabe aus dem Speditionsvertrag immer mehr in den Mittelpunkt. Diese Aufgabe „umfasst die Organisation der Beförderung, insbesondere

1. die Bestimmung des Beförderungsmittels und des Beförderungsweges,
2. die Auswahl ausführender Unternehmen, den Abschluss der für die Versendung erforderlichen Fracht-, Lager- und Speditionsverträge sowie die Erteilung von Informationen und Weisungen an die ausführenden Unternehmen und
3. die Sicherung von Schadensersatzansprüchen des Versenders“ (HGB § 454 Abs. 1).

Die Verpflichtungen des Speditionsvertrages verlangen somit die Gestaltung einer Transportkette nach logistischen Prinzipien. Durch die Rahmenbedingungen des Logistikmarktes sind ausreichend günstiger Laderaum und preiswerte Frachtführer⁵ vorhanden (vgl. BAG (2005)); die Beförderung im Rahmen einer Transportkette sollte somit möglichst

⁵ „Frachtführer ist, wer es gewerbsmäßig übernimmt, die Beförderung von Gütern zu Lande oder auf Flüssen oder sonstigen Binnengewässern auszuführen“ (HGB § 425).

kostengünstig ausfallen. Eine wirtschaftliche und günstige Beförderung ist allerdings nur schwer durch die Abwicklung von einzelnen Sendungen zu erreichen. Jedoch können kostengünstige, qualitativ hochwertige und umfangreiche Leistungen durch den Aufbau von Netzen zwischen den einzelnen Niederlassungen und deren intelligente Organisation angeboten werden.

So können neben den üblichen expeditionellen Dienstleistungen - wie beispielsweise die Verzollung der Güter, die Vermietung und Vermittlung von Transportbehältern oder die originäre Transportabwicklung, inklusive Lagerung - Verkehrsabläufe im Rahmen der Beschaffungs- und Distributionslogistik von Industrieunternehmen und Handel geplant und durchgeführt werden. Ferner ist der LDL in der Lage, kundenspezifische Dienstleistungen wie Full-Service-Pakete oder Just-in-Time-Belieferungen in sein Leistungsspektrum aufzunehmen und bei der Gestaltung von Transportsystemen beratend tätig zu sein (vgl. Wlcek (1998), S. 12, und Bretzke (1999), S. 221).

Durch diese Wandlung zum *Full-Service-Provider* ist es dem LDL möglich, sich gegenüber seinen Wettbewerbern zu differenzieren und am hart umkämpften Logistikmarkt zu bestehen (vgl. Schmid (2000), S. 31).

Im Folgenden wollen wir Transportnetze systematisieren und uns insbesondere Merkmale und Unterscheidungen von Sammelgutssystemen anschauen.

2.2 Dienstleisternetze

Bei *Transportnetzen*, auch Frachtnetze genannt, handelt es sich um logistische Netze, deren Aufgabe darin besteht, die kostengünstige Transportabwicklung von diversen Ausgangsorten zu verschiedenen Bestimmungsorten bei einem hohen Servicelevel zu ermöglichen. Die Sendungen sollen, wenn möglich, gebündelt transportiert werden, um die Auslastung der verwendeten Ressourcen (Transportmittel und -gefäße) zu erhöhen und die Kosten zu reduzieren (vgl. Feige (2004)). Das Netzwerk ist aus Knoten, die Quellen und Senken von Sendungstransporten repräsentieren, und Verbindungslinien, den Transportrelationen, zwischen diesen Knoten aufgebaut. Zu den Quellen und Senken des Transportnetzes zählen unter anderem Versandorte, Empfangsorte, Depots und Hubs. Flüsse auf den Verbindungslinien stellen Transport- oder Lagervorgänge dar (vgl. Fleischmann (2002a), S. A1-3).

Depots werden als regionale Sammelpunkte eines LDL definiert, welche den Start- bzw. Zielort von Verteil- und Sammeltouren zu den Empfängern bzw. Versendern markieren. Zugleich fungieren sie als regionale Sortier-, Sammel- und Umschlagseinrichtungen für das Sendungsaufkommen. Eine Vorratshaltung erfolgt an Depots normalerweise nicht. Als *Hubs* werden zentrale Umschlags- und Sortiereinrichtungen innerhalb eines Transportnetzes bezeichnet.

Zur Systematisierung von Transportnetzwerken können verschiedene Merkmale hergenommen werden. Zum einen lassen sie sich grundsätzlich in *baumartige Zuliefer- oder Beschaffungs-* und *Distributionsnetze* sowie *flächenartige Speditions- oder Dienstleisternetzwerke* differenzieren.

Zuliefer- und Distributionsnetze sind meistens baumartig, mit gerichteten Güterströmen von wenigen Versendern zu vielen Empfängern oder umgekehrt, aufgebaut. In diesen Fäl-

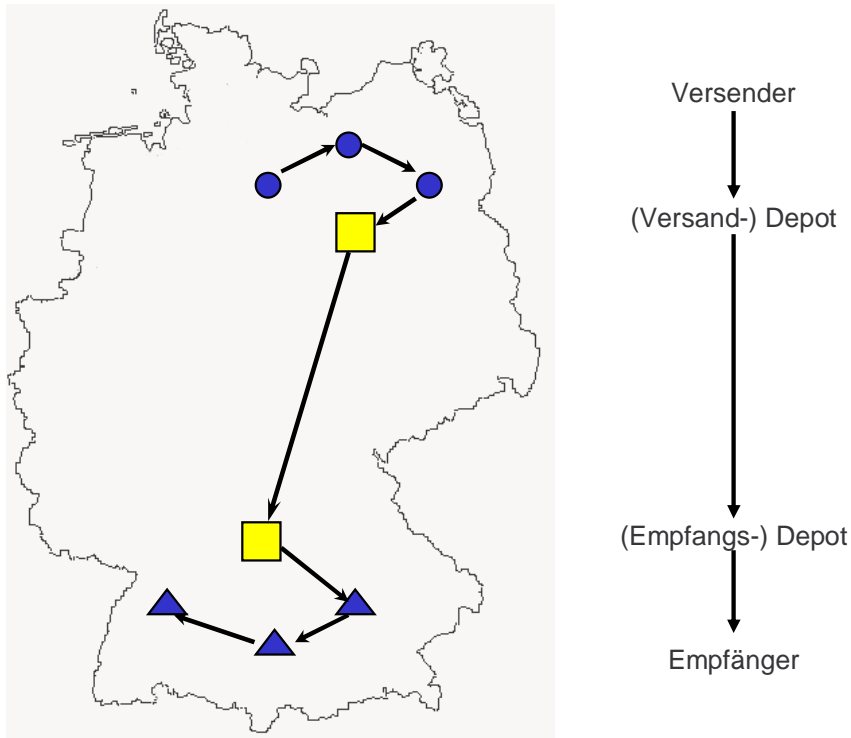


Abbildung 2.2: 3-gliedrige Transportkette (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 20)

len spricht man häufig auch von *few-to-many-* bzw. *many-to-few-Netzwerken*.⁶

Im Gegensatz dazu werden in Dienstleisternetzen Transporte für verschiedene Auftraggeber ausgeführt. Bei Stückguttransporten lasten die Sendungsgrößen die Kapazität eines Transportmittels bei weitem nicht aus, daher ist die Beförderung im gebrochenen Modus über eine *drei-phasige Transportkette* (siehe Abbildung 2.2) notwendig. Zuerst erfolgt am Nachmittag oder bis zum frühen Abend der *Vorlauf* vom Versender zu einem Versanddepot. Von dort geht es über Nacht im *Hauptlauf*, auch Streckenverkehr genannt, zum Empfangsdepot. Den Abschluss bildet der *Nachlauf* vom Empfangsdepot zum Empfänger am Vormittag. Vor- und Nachlauf werden als *Flächenverkehre* bezeichnet. Sie stellen Sammel- oder Verteilverkehre von oder zu einem Sammelpunkt (Depot) dar, welche im Rahmen von einzelnen Touren durchgeführt werden (vgl. Pfohl (2000), S. 164). Die Touren werden anhand von zeitlichen und kapazitiven Möglichkeiten mit dem Ziel, die Sendungen möglichst vieler Kunden einer Tour zuzuordnen, zusammengestellt. Für den Hauptlauf werden die Sendungen zu *Relationen*, d. h. Sendungen mit gleichem Empfangs- und Versanddepot, gruppiert.

2.2.1 Arten von Netzstrukturen

Aus den Depots und eventuell Hubs wird für den Hauptlauf eines Sammelgutsystems ein Transportnetz mit ungerichteten, gegenläufigen Güterflüssen aufgebaut. Nach Wlcek (1998) kann die flächenartige Struktur solcher Dienstleisternetze, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, in zwei Grundtypen, das *Rasternetz* und das *Hub-and-Spoke*, eingeteilt werden.

⁶Eine ausführliche Betrachtung dieser Netze kann in Fleischmann (2002b) und von Distributionsnetzen in Paraschis (1989) nachgelesen werden.

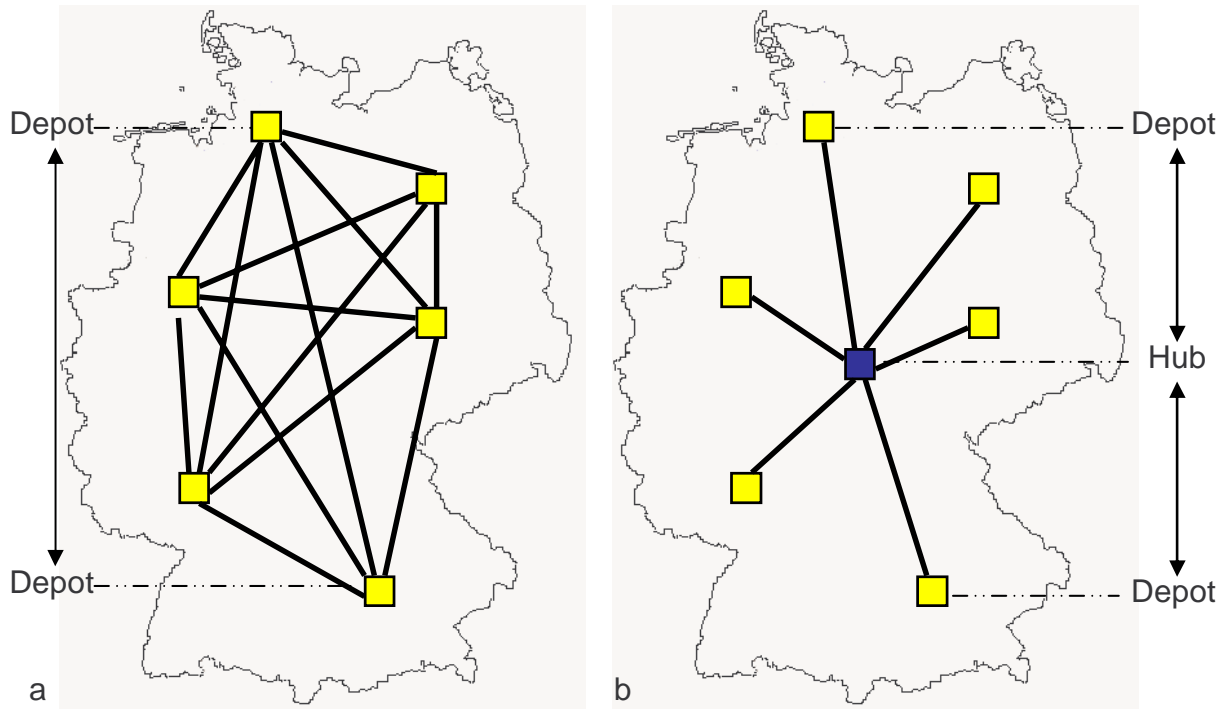


Abbildung 2.3: Rasternetz (a) Single-Hub-and-Spoke-Netz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 32)

Bei einstufigen Rasternetzen (siehe Abbildung 2.3 (a)) werden die Sendungen auf direktem Wege von jedem Versanddepot zu jedem Empfangsdepot befördert. Daraus lässt sich auch der Begriff *einstufig* ableiten. Jede Transportverbindung, die für die Abwicklung einer Relation benötigt wird, wird als Stufe im Transportsystem gezählt. Bei n Depots erhalten wir für das gesamte System $n(n-1)$ Transportverbindungen, welche quadratisch mit der Anzahl an Depots wächst. Aufgrund der geringen Sendungsgrößen werden die Transportkapazitäten auf diesen Verbindungen selten ausgenutzt und der Bedarf an Fernfahrzeugen ist groß.

Mit einem *Single-Hub-and-Spoke-Netz* (siehe Abbildung 2.3 (b)) wird die größte Bündelung von Sendungen und somit Auslastung der Fahrzeuge aufgrund ihrer geringen Anzahl von $2n$ Transportverbindungen erreicht. In diesem zweistufigen Transportnetz oder der einstufigen Hubstruktur⁷ verfügt jedes Depot nur über Transportverbindungen zu diesem einem Hub. Aufgrund dieser sternförmigen Anordnung wird bei dieser Art von Netz auch von einem Sternnetz gesprochen. Alle Sendungen von einem Versanddepot werden gemeinsam zum Hub transportiert. Ausgenommen sind Sendungen mit gleichem Empfangs- und Versandsdepot. Am Hub erfolgt ein Umschlag, die Sortierung der Sendungen nach Empfangsdepot sowie die Einleitung der Beförderung dorthin. Aufgrund dieser Bündelung werden Transportrelationen mit geringen Sendungsmengen wirtschaftlich, was bei den Direktverkehren in den Rasternetzen nicht möglich war. Zusätzlich können Transportschwankungen einzelner Transportrelationen und, aufgrund unpaariger Mengenströme, Transportmittel und -behälter leichter ausgeglichen werden (vgl. Wlcek (1998) und Blunck (2005)).

⁷Es ist auch möglich, für die Berechnung der Anzahl Stufen nur die Anzahl der Hubs, die für die Abwicklung einer Relation benutzt werden, zu zählen. In diesem Fall spricht man von einer *n-stufigen Hubstruktur*.

Nachteilig bei Sternnetzen ist, dass Umwege bei der Beförderung in Kauf genommen werden müssen. Aufgrund von Bündelungseffekten lassen sich bei dieser Art von Netz allerdings die Fahrleistung und somit die Kosten senken, welche die zusätzlichen Fixkosten für den Betrieb des Hubs meist kompensieren. Der Sortierprozess am Hub muss während eines engen Zeitfensters durchgeführt werden. Daher muss die Dimensionierung der Sortier- und Verteilanlagen sich an der erforderlichen Spitzenlast orientieren (vgl. Blunck (2005), S. 17). Blunck (2001) weist in seiner Arbeit nach, dass darunter die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen leidet. Jedoch verringert sich der organisatorische Aufwand in den Depots, da eine Sortierung Richtung Zieldepot entfällt.

Der größte Nachteil von Hub-and-Spoke-Netzen ist allerdings in den längeren Laufzeiten des Hauptlaufes zu sehen. Diese werden durch die längeren Transportstrecken und den Umschlagsvorgang hervorgerufen. Zudem reagieren solche Transportnetze sehr sensibel auf etwaige Verspätungen einzelner Transportverbindungen. Daher ist nach Wlcek (1998) und Blunck (2005) vor der Gestaltung eines solchen Netzes zu prüfen, ob genügend Zeitpuffer für jede Relation und somit für den Sortiervorgang vorhanden ist.

In der Praxis sind diese beiden Strukturen selten anzutreffen. Vielmehr existieren Mischformen oder Erweiterungen dieser beiden Grundformen.

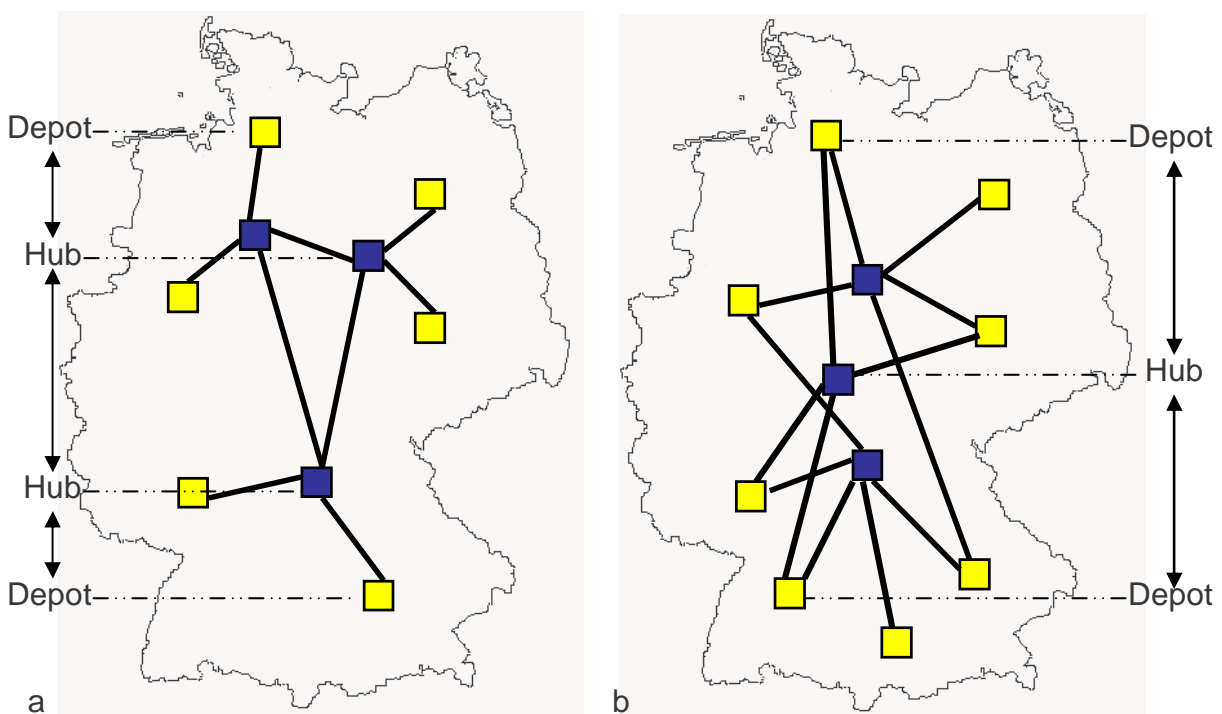


Abbildung 2.4: Regionalhub-Netz (a) Mehrhub-Netz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 34f.)

In einer *Mehrhubs-Struktur* (siehe Abbildung 2.4 (b)) können die Sendungen über unterschiedliche Hubs abgewickelt werden. Direktverkehre sowie Transportverbindungen zwischen den Hubs sind jedoch nicht zugelassen. Somit ist auch hier, wie in der Single-Hub-and-Spoke-Struktur, eine einstufige Hubstruktur vorhanden.

Im Gegensatz dazu ist in einem *Regionalnetz* die Transportabwicklung einer Relation, deren Versand- und Empfangsdepot in unterschiedlichen Regionen liegen, über zwei Hubs organisiert. Jedes Depot ist dabei genau einem Regionalhub zugeordnet. Abbildung 2.4 (a)

verdeutlicht einen typischen Transportablauf: Vom Versanddepot werden die Sendungen zum regionalen Hub befördert. Dort erfolgt ein Umschlag und der Transport zum regionalen Hub des Empfangsdepots, falls dieses unterschiedlich zum Hub des Versanddepots ist. Von diesem regionalen Hub werden die Sendungen zum Schluss zum Empfängerdepot transportiert.

Bei einem *Feederhub-Transportnetz*, dargestellt in Abbildung 2.5, liegt eine dreistufige Hubstruktur vor. Die Transporte von und zu den Regionalhubs, auch Feederhubs genannt, werden wie in einem Single-Hub-and-Spoke-Netz über den zentralen Hub abgewickelt. Daraus kann es bis zu einem dreimaligen Umschlag kommen.

Bei der Gestaltung von gemischten Transportnetzen stehen dem LDL die meisten Möglichkeiten im Rahmen von Transportverbindungen zur Verfügung. Es können z. B. Direktverkehre, Transportverbindungen zwischen zentralen Hubs sowie zwischen regionalen Hubs und zentralen Hubs vorkommen. In Darstellung 2.5 (b) ist exemplarisch eine solche Mischstruktur abgebildet.

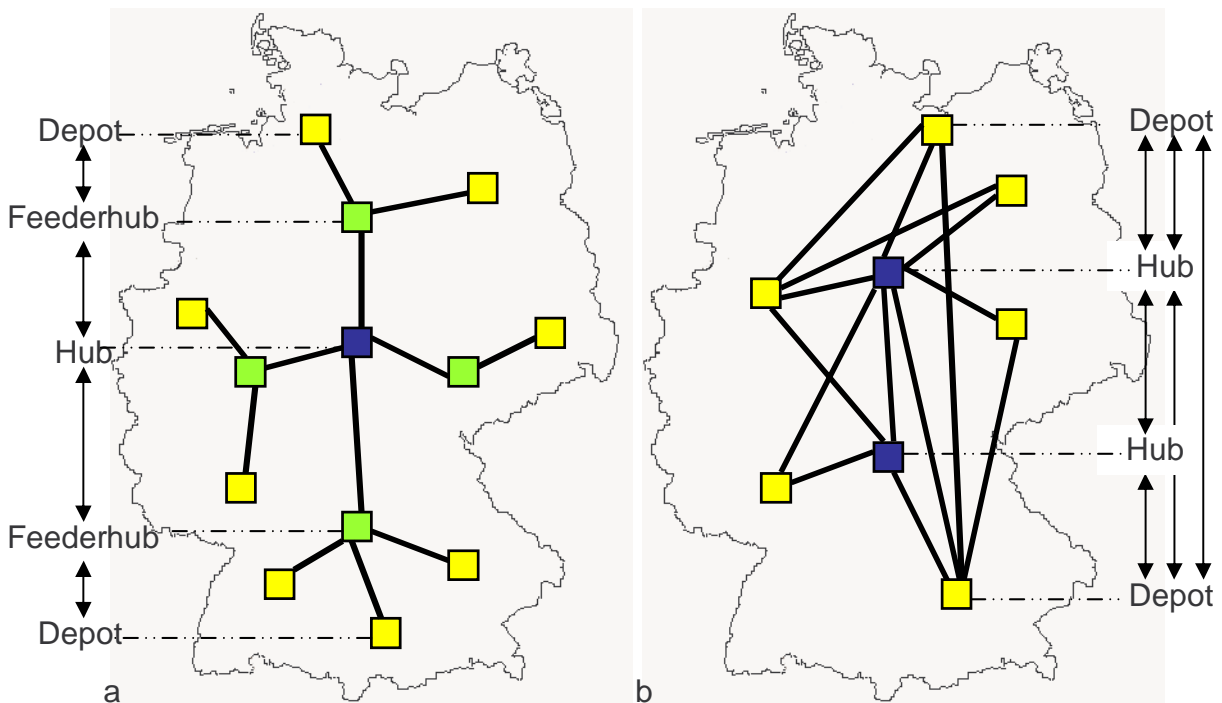


Abbildung 2.5: Feederhub-Netz (a) gemischtes Transportnetz (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 34f.)

2.2.2 Organisation der Verkehrsabläufe im Fernverkehr

Für die Organisation der Verkehrsabläufe im Hauptlauf kann der LDL zwischen verschiedensten Transportmitteln und deren Kombinationen wählen. Eisenbahn-, Fluggesellschaften und Reedereien organisieren und unterhalten diverse Transportverbindungen im Linienverkehr. Ein auf Stückgut spezialisierter LDL kauft sich Kapazitäten auf den benötigten Relationen bei diesen Gesellschaften ein (vgl. Mayer (2005)). Damit fallen für den LDL vor allem die Aufgabe der Organisation der LKW-Transporte unter Berücksichtigung der Fahrpläne der Schifffahrt, Luft- oder Schienenverkehre und deren Umschlagspunkte

zu. Die Transporte über Luft, Schiene oder Straße sowie die Umschlagspunkte für den Verkehrsträgerwechsel müssen für die Gestaltung des Transportsystems in die Netze integriert werden, auch wenn diese Vorgänge nicht selber organisiert und durchgeführt werden.

In der Praxis finden sich für die Organisation dieser LKW-Transporte neben der oben beschriebenen Hubkonsolidierung noch andere Bündelungsmaßnahmen. Diese hängen sehr von der Sendungsgröße ab. Im LKW-Fernverkehr werden hauptsächlich Fahrzeuge mit zwei Wechselbrücken eingesetzt. Der Austausch von diesen Wechselbrücken, auch Wechselkoffer oder seltener Container genannt, zwischen LKW kann somit ohne jegliche technische Hilfe und an jedem beliebigen Ort stattfinden. Diese Umschläge, sogenannte *Umbrückvorgänge*, dauern zwischen 15 und 30 Minuten und sind somit im Gegensatz zu den Umschlägen an Depots und Hubs sehr schnell, einfach und kostengünstig. Eine Konsolidierung der Wechselbrücken, genannt *Containerkonsolidierung*, kann eine weitere sinnvolle Strategie sein, wie im Folgenden beschrieben.

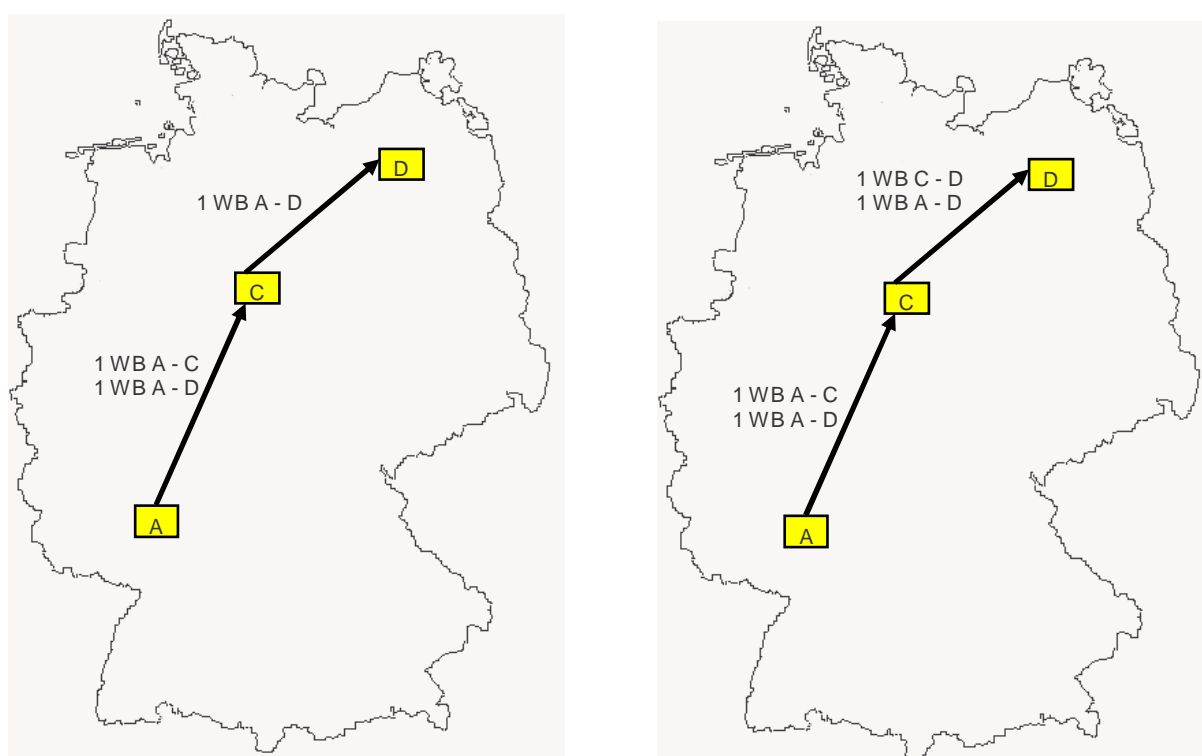


Abbildung 2.6: Containerkonsolidierung I (in Anlehnung an Stumpf (1998), S. 53)

In Abbildung 2.6⁸ sind zwei verschiedene Möglichkeiten einer Containerkonsolidierung dargestellt. Füllt eine Relation, wie Relation A-D in der Abbildung, eine Wechselbrücke nahezu voll aus, dann kann diese Relation mit einer anderen kombiniert werden. Im linken Fall ist eine weitere Relation, nämlich A-C, mit gleichem Versanddepot und in der Nähe liegendem Empfangsdepot vorhanden, welche auch nur eine Wechselbrücke ausfüllt. Die jeweiligen Sendungen werden in jeweils eine Wechselbrücke geladen. Ein LKW fährt dann zuerst von A nach C mit den Wechselbrücken A-C und A-D. Dort wird die Wechselbrücke A-C abgestellt. Danach wird von C nach D nur noch die Wechselbrücke A-D befördert. Um die Kapazität des LKW noch besser auszulasten, kann zusätzlich nach dem Abladen

⁸In der Abbildung ist Wechselbrücke mit WB abgekürzt.

der ersten Wechselbrücke A-C eine weitere Wechselbrücke C-D mit Sendungen von C nach D aufgenommen werden. Diese beiden Wechselbrücken werden dann zum Empfangsort D gemeinsam transportiert (siehe Abbildung 2.6 rechter Fall).

Es existieren auch komplexere Strategien zur Containerkonsolidierung. In Abbildung 2.7 sind zwei Möglichkeiten mit dem Einsatz von zwei Fahrzeugen dargestellt. Die LKW mit unterschiedlichen Versand- bzw. Empfangsdepots treffen sich an einem Zwischenpunkt und tauschen die Wechselbrücken entsprechend aus. Im linken Fall transportiert der eine LKW die Wechselbrücken A-C und A-D von A nach C und der andere die Wechselbrücken B-C und B-D von B nach C. In C werden dann die Wechselbrücken mit den Sendungen für Enddepot C abgestellt und eine Wechselbrücke mit einer Ladung nach Empfangsdepot D, sagen wir die Wechselbrücke B-D, umgebrückt. Somit fährt dann von C nach D nur noch ein LKW mit den Containern A-D und B-D. Der rechte Fall läuft ähnlich ab, nur dass von Versanddepot D nach C nur ein LKW fährt. Dieser hat die Wechselbrücken D-A und D-B geladen. Am Depot C wird dann einer der zwei Wechselbrücken auf ein zweites Fahrzeug umgebrückt sowie jeweils ein weiterer Container mit Ladungen angehängt. Somit transportiert dann ein LKW von C nach A die Wechselbrücken D-A und C-A und der zweite LKW von C nach B die Wechselbrücken D-B und C-B.

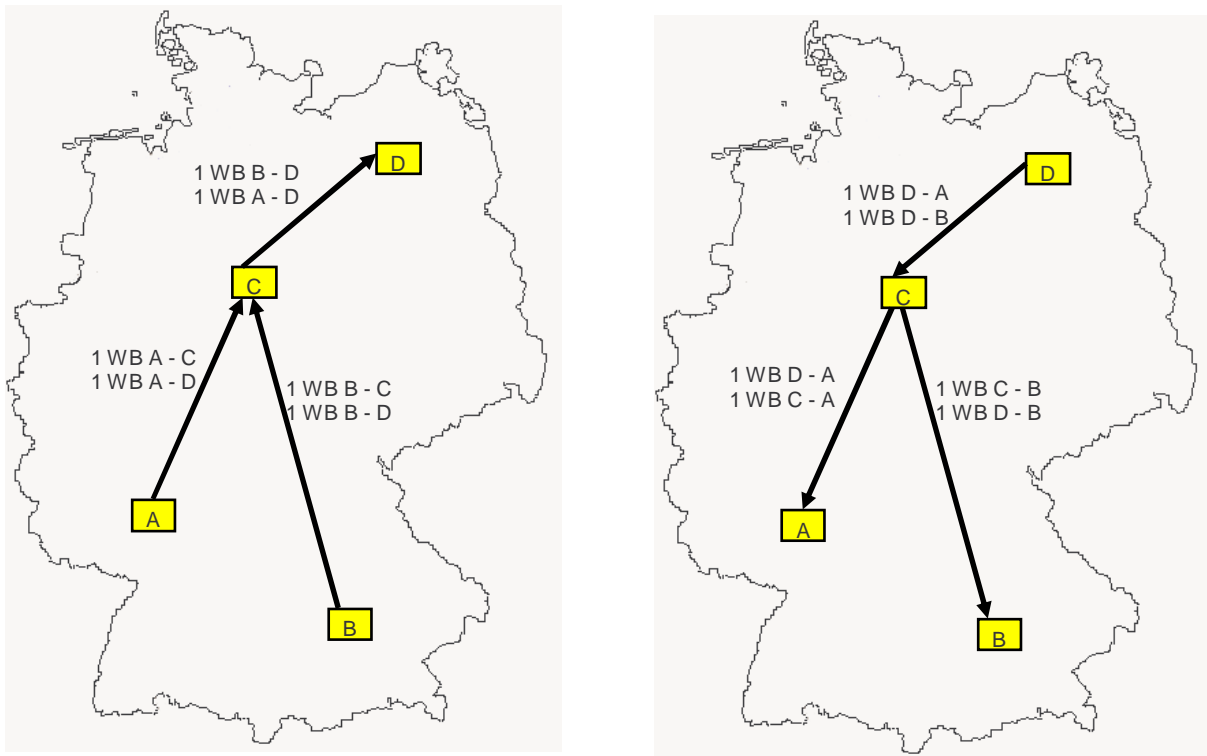


Abbildung 2.7: Containerkonsolidierung II (in Anlehnung an Stumpf (1998), S. 53)

Lasten zwei Relationen mit gleichem Versand- bzw. Empfangsdepot zusammen nicht mehr als eine Wechselbrücke aus, kann die Konsolidierungsstrategie *Beiladung* (siehe Abbildung 2.8) durchgeführt werden. Dabei werden die Bedarfe von den beiden Relationen, in der Abbildung A-C und A-B, in einen gemeinsamen Container verladen. Nach dem Transport der Wechselbrücke zum ersten Depot wird das entsprechende Aufkommen entnommen, nämlich A-C, und der Rest A-B zum zweiten Depot weiterbefördert. Um die Auslastung des LKW zu erhöhen, können weitere Sendungen für die Relation C-B in die Wechsel-

brücke hinzugeladen werden. Die durch die Beiladung erreichte Bündelung ist größer als bei der Containerkonsolidierung, jedoch wird für die Be- und Entladevorgänge mehr Zeit benötigt.

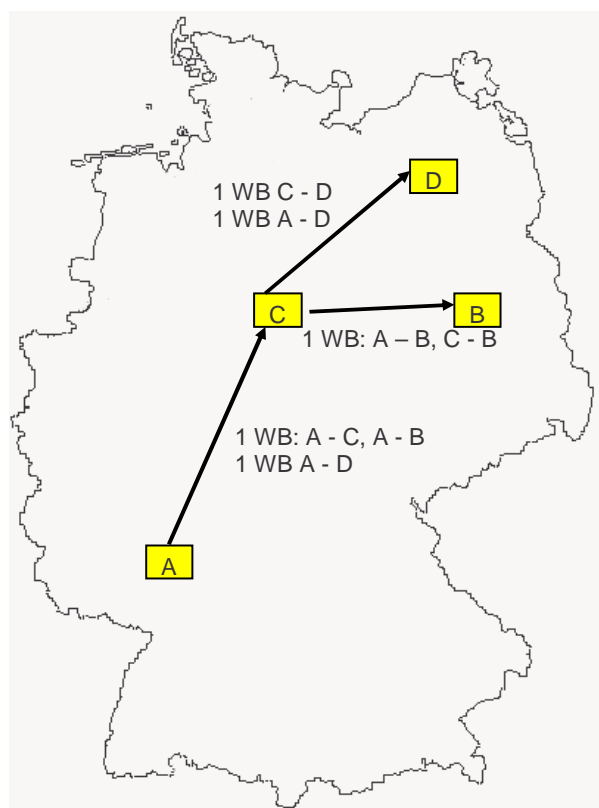


Abbildung 2.8: Beiladung (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 41)

Die Containerkonsolidierung sowie die Beiladung können nicht nur im Rahmen von Direktverkehren ausgeführt werden, sondern stehen dem LDL auch für die Organisation von Transporten vom oder zum Hub bzw. zu intermodalen Umschlagspunkten zur Verfügung. Durch eine Kombination dieser Konsolidierungsmaßnahmen können die Auslastung der Transportmittel weiter erhöht und die Fixkosten, wie Fahrzeughaltungskosten, weiter gesenkt werden. Es sind dadurch jedoch Umwege und Umschlagsvorgänge in Kauf zu nehmen, welche die variablen Kosten ansteigen lassen. Somit haben Konsolidierungsmaßnahmen auf geringere Sendungsmengen je Relation eine höhere Auswirkung. Welche Art von Netz und welche weiteren Konsolidierungsmaßnahmen für welche Relation am besten sind, kann nicht von vornherein festgelegt werden.

Neben der Aufgabe der Organisation der Wege der Sendungen, auch *Auftragsroute* genannt, hat der LDL auch die Einsatzplanung der Fahrzeuge durchzuführen. Um die Kosten für das Sammelgutnetz gering zu halten, sind so wenig wie möglich Fahrzeuge einzuplanen. Eine Transportverbindung zwischen zwei Depots, einem Depot und einem Hub oder zwei Hubs wird als *Service* definiert. Werden in einem Netz Transporte mit verschiedenen Fahrzeugtypen ausgeführt, wird einem Service ein bestimmter Fahrzeugtyp zugewiesen. Es können somit zwischen zwei Knotenpunkten im Netz zwei oder mehr Services vorhanden sein. Nach Wieberneit (2007) wird dann aus einem oder mehreren Services eine *Service*route oder einfach *Route* zusammengestellt, die von genau einem Fahrzeug an normalerweise einem Tag befahren wird. Eine Service

Services mit einem gewissen Fahrzeugtyp.⁹ Servicerouten, welche einen Hub passieren, werden im Folgendem *Hubrouten* genannt, ansonsten heißen sie *Direktrouten*. Eine Kombination von Services mit dem gleichen Fahrzeugtyp, welche am Startdepot enden, wird als *Tour* bezeichnet. Die oben genannten Konsolidierungsmöglichkeiten tangieren somit die Auftragsroute und die Serviceroute.

In der Praxis versucht ein LDL aus Kostengründen so viele Services wie möglich in Touren einzuplanen. Dabei stehen ihm mehrere Möglichkeiten zur Verfügung:

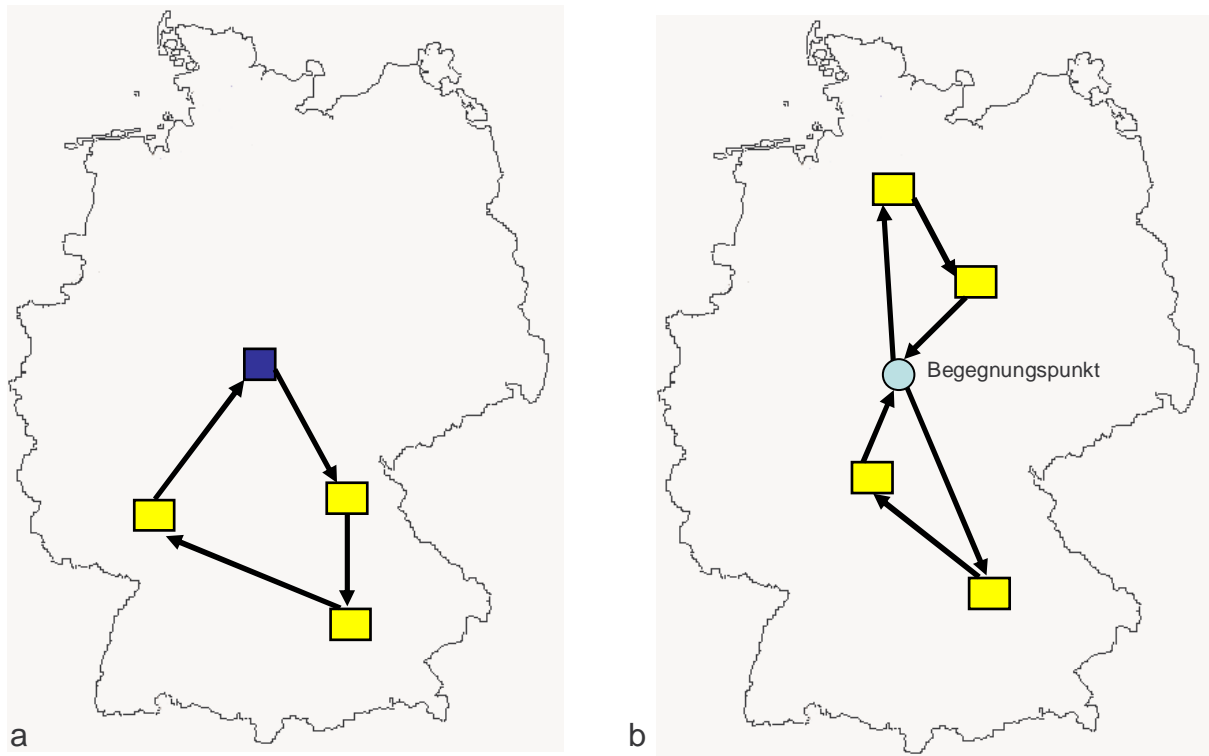


Abbildung 2.9: Rundlauf (a) Begegnungsverkehr (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 43)

Die günstigste Form sind die Ein-Tages-Touren, denn dadurch können Spesen und Übernachtungskosten gespart werden. Kann eine solche Ein-Tages-Tour durch eine Fahrzeug an einem Tag durchgeführt werden, wird diese Tour als *Rundlauf* (siehe Abbildung 2.9 (a)) bezeichnet. Häufig liegen allerdings die einzelnen Stationen einer Fahrzeugroute so weit auseinander, dass aufgrund der vorgeschriebenen Lenk- und Ruhezeiten eine Rückfahrt zum Ausgangsdepot nicht möglich ist. In solchen Fällen können, wie in Graphik 2.9 (b) dargestellt, sich zwei Fahrzeuge in der Mitte des Weges treffen, die Ladungen austauschen, und die restlichen Services der anderen Fahrzeugroute übernehmen. Die dadurch neu gebildeten Fahrzeugrouten beenden ihre Route dann am Ausgangsdepot. Oft sind allerdings für die sogenannten *Begegnungsverkehre* Umwege und Wartezeiten in Kauf zu nehmen; diese zusätzliche Zeit ist jedoch nicht immer vorhanden.

Als weitere Alternative kann der LDL *Umläufe* organisieren. Bei Umläufen (siehe Abbildung 2.10 (a)) werden Fahrzeugrouten verschiedener Tage so miteinander kombiniert,

⁹Für den Begriff Serviceroute wird auch der Begriff Linie vor allem im deutschsprachigen Transportgewerbe benutzt. In dieser Arbeit werden wir diese Begriffe synonym verwenden.

dass sich daraus eine Tour bildet. Somit hat die Aneinanderreihung dieser Routen das gleiche Start- wie Enddepot. Bei Umläufen entstehen höhere Kosten als bei den anderen Arten von Touren. Zum einen fallen Übernachtungskosten für die Fahrer an, zum anderen können die Fahrzeuge nicht für andere Aufgaben während ihres Stillstandes genutzt werden (vgl. Wlcek (1998), S. 42).

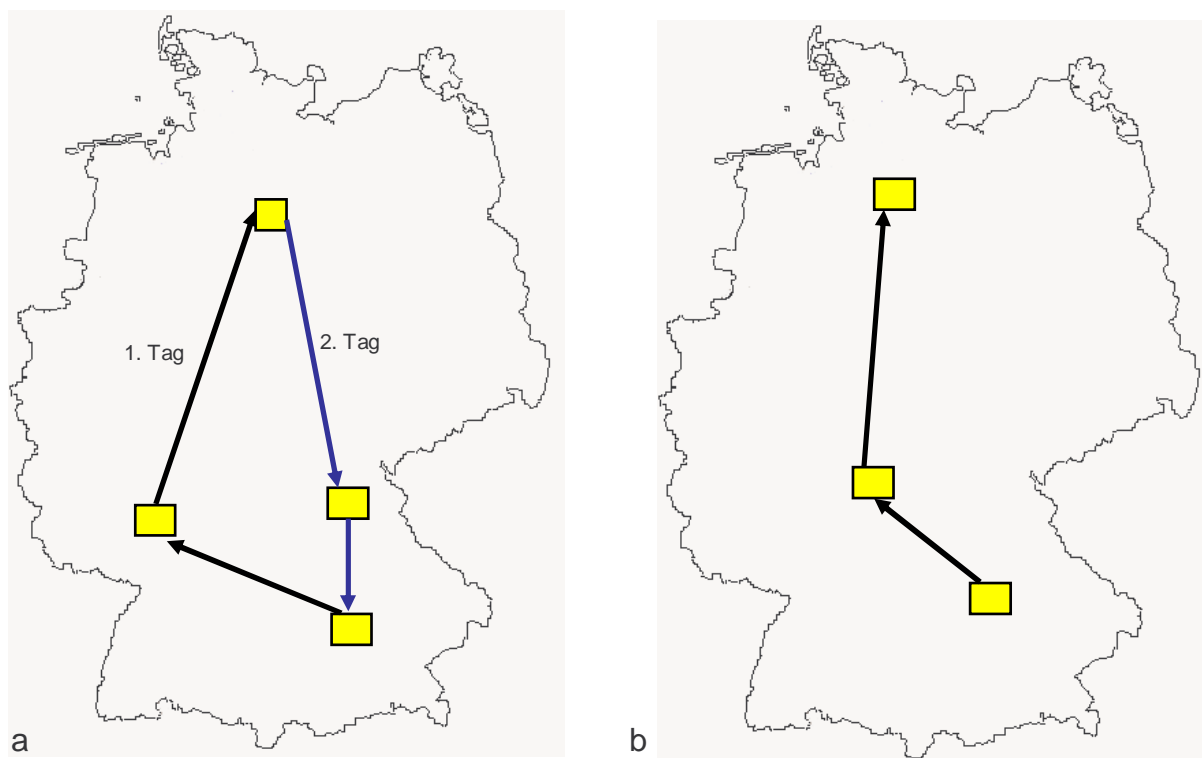


Abbildung 2.10: Zwei-Tages-Umlauf (a) One-Way-Fahrt (b) (in Anlehnung an Wlcek (1998), S. 44)

Als letzte Alternative gibt es noch die Möglichkeit der Durchführung von *One-Way-Fahrten*. Wie die Abbildung 2.10 (b) zeigt, unterscheiden sich hier Start- und Enddepot. LDL, welche einen Teil der notwendigen Transporte im Selbsteintritt durchführen, vergeben vor allem One-Way-Fahrten an zugekaufte Frachtführer. Neben den anfallenden Kosten für die Durchführung dieser Serviceroute fallen Zusatzkosten in Abhängigkeit der Region, in der das Enddepot liegt, an. Diese verlangen die Frachtführer als Aufwandsentschädigung für die Suche einer Rückfahrt am Markt oder für die Ausführung einer Leerfahrt.

2.2.3 Nationale, europaweite und interkontinentale Sammelgutnetze

Die Gestalt und insbesondere die Struktur der Dienstleisternetze wird neben dem Transportgut durch das Transportmittel und den Transportprozess festgelegt. Die Wahl des Transportmittels, der Ablauf des Transportprozesses von Stück- bzw. Sammelgut und deren Organisation hängt vor allem an der geographischen Lage und an den Entfernungen zwischen Versender und Empfänger. Daher wollen wir im Folgenden nationale, europaweite und interkontinentale Sammelgutnetze und deren Ablauforganisation auf Unterschiede

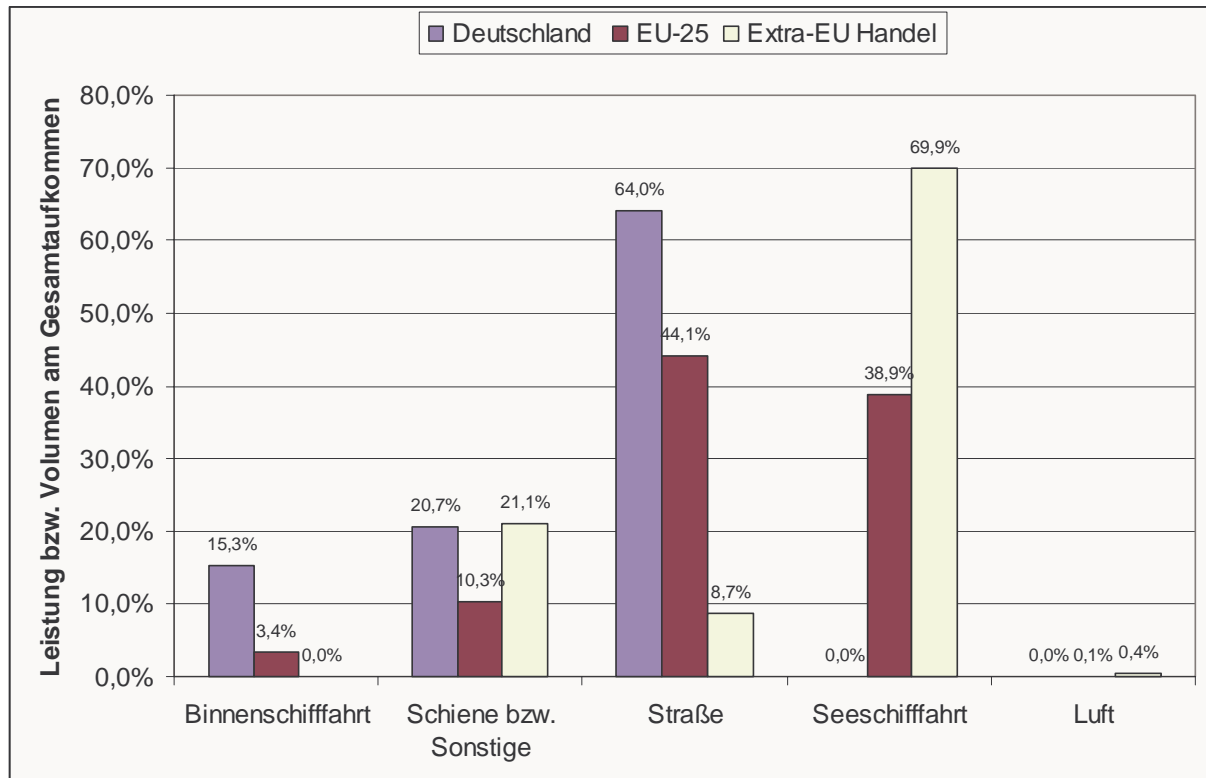


Abbildung 2.11: Vergleich der Verkehrsträger im Güterverkehr: Für Deutschland und EU-25 wurde der Anteil der Beförderungsleistung von 2004 hergenommen. Für den Extra-EU-Handel wurde das Beförderungsvolumen von 2002 als Basis herangezogen. Für Deutschland wurden die Daten entnommen aus Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2005); für die EU-25 stammen die Daten aus o. V. (2007b); für den Extra-EU-Handel aus Pongas und Tronet (2004a). Bei Extra-EU-Handel beinhaltet Sonstiges Bahn, Post, Rohrleitungen, Binnenwasserstraßen und unbekannt.

und Gemeinsamkeiten untersuchen.

Nationale Netze:

In nationalen Netzen werden Sammelgutverkehre hauptsächlich über den Verkehrsträger Straße abgewickelt. Der Transport mit Flugzeugen und der Seeverkehr spielen keine große Rolle. Die Vorteile des Luftverkehrs sind Schnelligkeit, Sicherheit und Häufigkeit. Weiterhin sind große Verpackungsaufwände nicht nötig, da Beschädigungen sehr selten auftreten (vgl. Jünemann (1999), S. 325ff.). Die gewonnene Zeitersparnis des Luftverkehrs wird durch zusätzliche Transporte über die Straße verringert. Dadurch fällt der Zeitvorteil gegenüber anderen Verkehrsträgern, vor allem der Straße und der Schiene, im Nationalen geringer aus als man erwarten würde. Zudem sind die Transportkosten sehr hoch. Dadurch rechnet sich diese Art des Transports nur bei sehr Eiligem, z. B. Postsendungen, oder hochwertigen Gütern (vgl. Piontek (1994), S. 88).

Aufgrund der geographischen Lage der Seehäfen können nur sehr wenige Transporte im nationalen Bereich über den Verkehrsträger See durchgeführt werden. Der Aufbau eines Netzes mit Seetransporten macht daher keinen Sinn.

Die meisten Güter werden über Straße, Schiene und Binnengewässer transportiert (siehe auch Abbildung 2.11), wobei die Binnenschifffahrt vor allem für Massen- und Schüttgüter und sehr selten für Stückgüter eingesetzt wird (vgl. Lang (2006), S. 60). Vor allem die lan-

gen Transportzeiten (vgl. Jünemann (1999), S. 321), die Abhängigkeit vom Wasserstand und der Eisbildung (vgl. Piontek (1994), S. 98) sowie die schlechte Netzbildungsfähigkeit, aufgrund des begrenzten Netzes aus Flüssen, Kanälen und Seen, sprechen gegen eine Beförderung mit dem Schiff. Nachdem für nationale europäische Netze die meisten LDL ihren Kunden für Stückgut Regel- oder Garantielaufzeiten von 24 Stunden geben, bleiben nur der Schienen- und Straßengüterverkehr für die Auswahl des Transportmittels übrig. Die Transportgeschwindigkeit der Eisenbahn ist wohl schneller als die der LKW, jedoch sind teilweise zusätzliche Umschläge und Straßentransporte nötig. Dadurch werden die Vorteile vom Schienenverkehr verringert bzw. aufgelöst. Der Einsatz der Eisenbahn in Sammelgutnetzen ist vor allem für längere Distanzen wirtschaftlich und zeitlich interessant; für kurze Distanzen ist nur die Beförderungen über die Straße rentabel.

Somit handelt es sich bei nationalen Sammelgutnetzen entweder um ein Straßennetz oder ein Netz mit Transportverbindungen aus Straßen- und Schienenwegen. Abbildung 2.12 stellt typische nationale Transportketten dar. Die Abholung und Belieferung im Vor- und Nachlauf wird über Touren organisiert und i. d. R. von LKW durchgeführt (vgl. Fleischmann und Gietz (2002), S. A3-50). Die Abwicklung des Schienentransports wird der staatlichen oder den privaten Eisenbahngesellschaften überlassen. Diese stellen dem LDL einen Fahrplan mit Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den einzelnen Bahnstationen für dessen Planung zur Verfügung. Wegen den erheblichen technischen Erleichterungen und vor allem wegen der Zeitersparnis, erfolgt beim Umschlag nur der Wechsel des Transportmittels und nicht der einzelnen Sendungen. Die Güter werden im Rahmen von Behälterverkehren mit den Containern umgeschlagen.

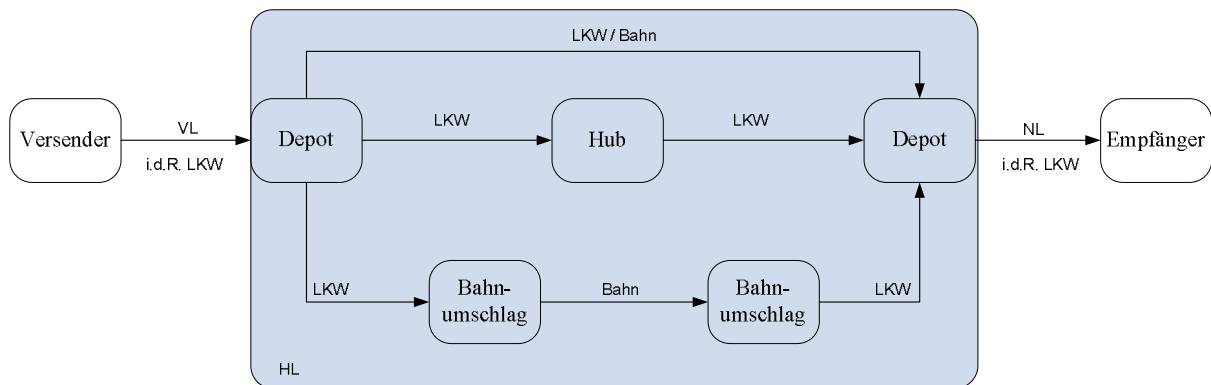


Abbildung 2.12: Nationale Transportketten

Aufgrund des engen zeitlichen Rahmens kann im Hauptlauf nicht mehr als ein Hubumschlag bewältigt werden. Damit sind die meisten nationalen Dienstleisternetze eine Mischung aus Raster- und Mehrhubstrukturen mit 20 bis zu 50 Depots. Relationen mit einem hohen Sendungsaufkommen werden über Direktverkehre abgewickelt, Transporte mit geringen Auslastungen werden durch eine Konsolidierung über Hubs möglichst vermieden. Als weitere Bündelungsmaßnahmen der Sendungen stehen die im vorigen Kapitel besprochenen Containerkonsolidierung und Beiladung zur Verfügung. In Abbildung 2.13 sind die dadurch entstandenen weiteren möglichen Transportketten graphisch dargestellt. Aufgrund des engen zeitlichen Rahmens können diese Konsolidierungsmöglichkeiten nur für den Transport auf der Straße durchgeführt werden. Somit besteht für den LDL die Möglichkeit, zwischen der direkten Beförderung vom Versand- zum Empfangsdepot, noch an einem weiteren Depot zu halten, um dort zusätzliche Ladungen aufzunehmen oder La-

dungen abzugeben. Die gleiche Strategie kann bei den Hubverkehren entweder zwischen Versanddepot und Hub und/oder Hub und Empfangsdepot angewendet werden.

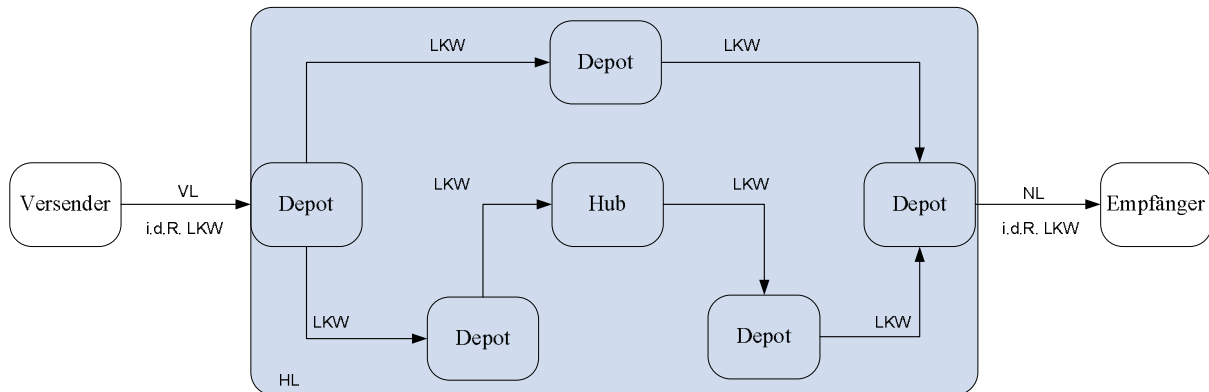


Abbildung 2.13: Zusätzliche nationale Transportketten bei Durchführung von Containerkonsolidierung oder Beiladung

Im Rahmen der Fahrzeugeinsatzplanung können Rundläufe, Begegnungsverkehre, Zwei-Tages-Umläufe und One-Way-Fahrten aus den Services organisiert werden. Drei- oder Mehr-Tages-Umläufe sind höchstens in Ländern mit einer großen geographischen Weite notwendig. Umläufe von mehreren Tagen sollen vor allem aus sozialen Gründen möglichst vermieden werden.

Europaweite Netze:

Für europäische Netze sind die Frequenzen der Transporte niedriger und die Regel- bzw. Garantielaufzeiten länger als bei nationalen Netzen, die je Land meist unterschiedlich angegeben werden. Vereinzelt Relationen werden auch nur unregelmäßig bedient. Jedoch zeigt sich bei innereuropäischen Stückgutnetzen ein ähnliches Bild wie bei nationalen Netzen. Der Anteil des Straßengüterverkehrs ist geringer, jedoch sind für Stückguttransporte die Verkehrsträger Luftverkehr, See- und Binnenschifffahrt weiterhin wenig bis nicht von Bedeutung. Der Transport mit dem Flugzeug ist auch innereuropäisch noch zu teuer, als dass sich der Zeitvorteil, der sich mit steigender Entfernung stetig verbessert, rechnen würde. Luftfrachtverkehr innerhalb Europas wird hauptsächlich von KEP-Diensten nachgefragt oder fällt im Rahmen einer Anbindung an den interkontinentalen Güterverkehr an (vgl. Höpper (2004)).

Der Anteil der Küstenseeschifffahrt im Güterverkehr ist relativ hoch (siehe Abbildung 2.11), jedoch werden wie in der Binnenschifffahrt überwiegend Schütt- und Flüssiggüter transportiert. Die Binnenschifffahrt leidet vor allem unter ihrer schlechten Netzbindungsfähigkeit, da nur fünf Staaten über ein zusammenhängendes Wasserstraßennetz verfügen. Es sind jedoch Bemühungen im Gange, die Binnenschifffahrt mehr in den Stückgutverkehr durch Container- und Roro-Transporte (Roll-on/Roll-off - Verfahren) sowie dem Einsatz moderner Technik bei den Betriebsmitteln einzubinden. Nach Höpper (2004) kann dies in Zukunft vor allem bei zeitunkritischen Transportketten eine rentable Alternative darstellen.

Die Abwicklung von Transporten im Rahmen von europaweiten Netzen findet entweder nur mit LKW oder in der Kombination Bahn/Lkw statt. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass der Anteil dieser Kombination im Vergleich zu nationalen Netzen größer ist, da die Schiene ihre Vorteile vor allem auf langen Distanzen ausspielen kann.

sätzlich nur noch Touren zwischen den einzelnen internationalen Hubs im Rahmen der Fahrzeugeinsatzplanung zu organisieren. Hierfür bieten sich Umläufe zwischen jeweils zwei Hubs an.

Interkontinentale Netze:

Können bei nationalen und inhereuropäischen Sammelgutnetzen noch relativ viele Ähnlichkeiten festgestellt werden, so unterscheiden sie sich grundlegend von den interkontinentalen. Die Benutzung der Seeschifffahrt bzw. des Luftverkehrs stellen die einzigen Möglichkeiten zur Durchführung einer interkontinentalen Transportverbindung dar.

Aufgrund der hohen Transportkosten ist der Anteil des Luftverkehrs (siehe auch Abbildung 2.11) am Stückguttransport relativ gering. Die Zeitersparnis ist allerdings gegenüber dem Seeverkehr gewaltig. Dadurch werden vor allem zeitkritische und hochwertige Güter mit dem Flugzeug befördert. Klar dominierend ist jedoch der Seeverkehr mit Stückgut im Containertransfer. Da Seehäfen zwangsläufig an Küsten liegen, entstehen häufig hohe Vor- und Nachlaufkosten vor allem für Länder ohne direkten Küstenzugang (vgl. Jünemann (1999), S. 321).

In 2.15 sind typische interkontinentale Transportketten abgebildet. Die Flächenverkehre werden i. d. R. aufgrund der guten Netzbildungsfähigkeit mit dem LKW ausgeführt. Die Beförderung von den Depots zu den Häfen und vice versa erfolgt meistens über die Straße, bei entsprechenden Entfernungen können auch weitere Umschläge an einem oder sogar mehreren Hubs durchgeführt werden. Hierbei müssen jedoch zeitliche Restriktionen beachtet werden. Durch die räumliche Ausdehnung der weltweiten Systeme bietet sich auch der Einsatz der Kombination Straße/Schiene für den Transport zu den Häfen an. Der Hauptlauf über die Seeschifffahrt wird häufig über *FCL-Verkehre* (Full-Container-Load), d. h. einer durchgängigen Containertransportkette ohne Wechsel des Transportgefäßes abgewickelt. Eine Abwicklung von *LCL-Verkehren* (Less-Container-Load) erscheint vor allem beim Einsatz von mehr als zwei Verkehrsträgern aufgrund der zeitaufwändigen Umschläge nicht sinnvoll.

Die Anbindung der Flughäfen erfolgt meist mit dem LKW. Flughäfen weisen meist eine bessere geographische Lage als Seehäfen auf, daher rechnen sich zusätzliche Umschläge zwischen Straßen und Bahn wirtschaftlich nicht. Vor allem geht dabei ein Teil der Zeitersparnis verloren, was beim Transport von zeitkritischen Gütern nicht erwünscht ist.

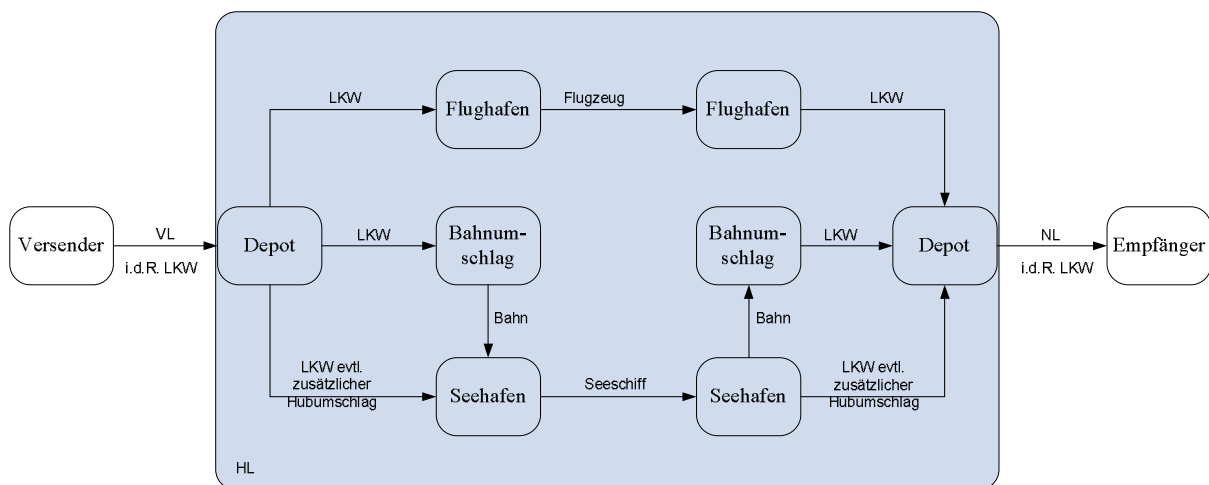


Abbildung 2.15: Interkontinentale Transportkette

Bei Transporten zwischen Asien und Europa, Asien und Südamerika oder Europa und Südamerika werden auch *Sea-Air-Verkehre* angeboten. Diese Art der Verkehre benutzen im Hauptlauf die Kombination Seeschiff und Flugzeug; die Zubringerstrecken werden mit dem LKW durchgeführt. Diese Kombination bietet dem LDL die Möglichkeit, die Nachteile der beiden Verkehrsträger zu mindern und die Vorteile besser zu nutzen, nach dem Motto „doppelt so schnell wie reine Seefracht und halb so teuer wie reine Luftfracht“ (Kummer und Schramm (2004), S. 246).

2.3 Planungsprobleme in Sammelgutssystemen

Damit der LDL auf dem hart umkämpften Markt in Zukunft weiter bestehen kann, ist nicht nur der Aufbau von Logistiknetzen und der darin enthaltenen Prozesse wichtig, sondern diese müssen auch auf eine intelligente Weise geplant werden. Aufbauend auf die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Abläufe und Strukturen werden in diesem Abschnitt die wesentlichen Planungsprobleme für einen auf Sammelgut spezialisierten Dienstleister erläutert. Diese Planungsaufgaben werden zum einen nach ihrer Fristigkeit - strategisch, taktisch und operativ - differenziert, zum anderen nach Fern- und Nahverkehr unterschieden. Abbildung 2.16 gibt einen kurzen Überblick über die einzelnen Planungsprobleme, welche in den folgenden Unterabschnitten detailliert ausgeführt werden.

Planungsprobleme	Strategisch	Taktisch	Operativ
Fernverkehr	Festlegung der Standorte	Organisation der Linien und Fahrplanfestlegung	Planung von Fernreisen
Nahverkehr	Festlegung der Einzugsgebiete	Tourgebietsplanung für ein Depot	Nahverkehrsdisposition für ein Depot

Abbildung 2.16: Einteilung der Planungsprobleme von Sammelgutssystemen

In Anlehnung an die Arbeiten von Sierke (1997), Pfohl (1997) und Macharis und Bontekoning (2004) können die einzelnen Planungsebenen folgendermaßen beschrieben werden: Die Entscheidungen der *strategischen Planungsprobleme* mit einem Planungshorizont von üblicherweise zwischen 10 und 20 Jahren sind langfristig ausgelegt und fordern enorme finanzielle Mittel für ihre Durchführung. Sind diese Entscheidungen einmal umgesetzt, sind sie nur schwer revidier- oder anpassbar. In der strategischen Planung der Logistiksysteme werden vor allem die Strukturen und die langfristig wirksamen, flussbezogenen Koordinationsaufgaben festgelegt. Die Vorgaben aus dieser Planungsebene werden in der *taktischen Planung* konkretisiert. Diese strukturverändernden Maßnahmen über die gesamte Wertschöpfungskette, wie z. B. die Festlegung der Abwicklungsregeln für die Durchführung der Transporte und die Auftragsrouten der Sendungen, setzen die Rahmenbedingungen für die operative Ebene fest. Die *kurzfristige, operative Planung* soll die bestehenden Erfolgspotentiale freisetzen. Sie ist besonders ausschlaggebend für den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens (vgl. Aberle (1997), S. 370). In dieser Planungsebene werden die Abläufe einzelner Bestandteile der Logistikketten, d. h. der Verkehre, täglich detailliert geplant.

Neben den Aufgaben der Verkehrsorganisation, d. h. der strategischen Planung des Dienst-

leisternetzes und der optimalen Organisation der Abläufe auf taktischer und operativer Ebene, fallen bei LDL auf allen Planungsebenen weitere Probleme an. Dazu zählen unter anderem die Festlegung des Leistungsspektrums, die langfristige Geschäftsfeldplanung, Planung der Personalkapazitäten und die Fuhrparkplanung. Diese Planungsprobleme sind nicht Bestandteil der nachfolgenden Abschnitte und Kapitel. Die weiteren Ausführungen beruhen in großen Teilen auf den Arbeiten von Wlcek (1998) und Stumpf (1998).

2.3.1 Strategische Planungsprobleme

Bei der strategischen Planung der Verkehrsorganisation geht es um die *Gestaltung des Sammelgutnetzes*. Die Struktur eines Netzes wird vor allem durch die Anzahl und Lage der Standorte, deren Einzugsgebiete sowie durch die Stufigkeit des Netzes und der möglichen Relationen determiniert.

Für die Standorte müssen dabei i. d. R. Depots, welche den Schnittpunkt zwischen Fern- und Nahverkehr markieren, und Hubs geplant werden. Jedem Depot soll ein nicht überlappendes Einzugsgebiet zugewiesen werden. Die Größe dieser Gebiete sollte so dimensioniert sein, dass die Sammel- und Verteilverkehre zeitlich gut machbar sind und das Depot eine gewisse Mindestauslastung hat. Daher sind Aspekte wie Sendungsaufkommen und die Erreichbarkeit der Standorte bezogen auf Zeit und Entfernung zu beachten (vgl. Freichel (1992), S. 15). Die Anzahl der Depots wird daher durch die Reichweite des zu bedienenden Gesamtgebietes bestimmt. Infrastrukturelle Gegebenheiten spielen natürlich für die Lage der Standorte eine entscheidende Rolle. So werden eventuell spezielle Anbindungspunkte an Schienennetz, Häfen und Flughäfen benötigt. Daher sollten grundsätzliche Entscheidungen über die einzusetzenden Verkehrsträger auf der langfristigen bis mittelfristigen Ebene getroffen werden.

Bei internationalen Netzen ist dieser Aspekt besonders hervorzuheben, da nur durch die Einbindung verschiedener Verkehrsträger die Transporte verwirklicht werden können. Auch sollten Standorte mit einer guten Verbindung ins Ausland eingeplant werden, über die die internationalen Verkehre abgewickelt werden können. Ebenso müssen länderspezifische Gegebenheiten im Bereich Infrastruktur, Gesetzgebung oder technischer Rahmenbedingungen in der Planung berücksichtigt werden (vgl. Pfohl (2000)).

Durch Hubs wird die Voraussetzung für Bündelungsmaßnahmen im Hauptlauf geschaffen. Für die Anzahl und Lage der Hubs ist die Wahl der Netzstruktur von großer Bedeutung. Mögliche Arten von Netzen sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Soll z. B. ein Single-Hub-and-Spoke-Netz aufgebaut werden, sollte der Hub recht zentral liegen. Es ist jedoch nicht nur wichtig die Anzahl der Hubs festzulegen, sondern auch die Hub-Stufigkeit des Netzes, d. h. wie viele Konsolidierungsschritte über ein Hub während eines Transportes durchgeführt werden können. Dabei müssen zeitliche Aspekte berücksichtigt und die Kosten im Auge behalten werden, denn jeder Umschlagsvorgang kostet Geld und verlängert die Durchlaufzeiten.

Weiterhin sind für eine Abschätzung der Dimensionen und Umschlagsleistungen der Depots und Hubs Richtlinien für die Abgrenzung zwischen Direkttrouten und Hubrouten notwendig, denn durch die Angabe einer Größengrenze kann die Anzahl der umzuschlagenden Sendungen abgeschätzt werden.

Das gängigste Ziel dieser strategischen Planung ist die kostenminimale Abwicklung aller Transport- und Umschlagsvorgänge bei einem gegebenen Kundenservice-Typ. Neben den

Nahverkehrskosten (als Vor- und Nachlaufkosten), den Linienverkehrskosten (Hauptlaufkosten) und Umschlagskosten müssen auch Investitionskosten als Fixkosten für die Errichtung neuer bzw. die Erweiterung bestehender Konsolidierungspunkte mit einbezogen werden. Zudem verlaufen die Transportkosten degressiv bezüglich Entfernung und Gewicht der Sendungen (vgl. Feige (2004)). Aufgrund ihrer langfristigen Ausrichtung sind die Planungsdaten oft unsicher und weisen Schwankungen auf. Diese sind teilweise sehr schwierig und nicht genau abschätzbar. Deshalb ist es wichtig bei Änderungen der Daten, z. B. Infrastruktur- und Nachfrageänderungen oder Neuerungen des gesetzlichen Rahmens, die Auswirkungen auf die geplante Struktur zu kennen (vgl. Crainic und Laporte (1997)). Der gesamte Aufbau sollte daher eine gewisse Robustheit und Flexibilität gegenüber Veränderungen aufweisen.

Eine Neuplanung eines Netzes tritt sehr selten auf; meist hat man es mit gewachsenen Strukturen zu tun. Nur bei der Erschließung neuer Regionen oder beim Aufbau eines neuen Geschäftsfeldes kann ohne Beachtung von Strukturen geplant werden. Aber selbst dies ist nur für finanzkräftige Unternehmen, i. d. R. globale Player, möglich. Jedoch wägen diese LDL vor den Investitionen ihre Entscheidung sehr genau ab. Der Kauf von bestehenden Betrieben oder das Eingehen von Kooperationen können sich als bessere Alternativen herausstellen (Aberle (1997), S. 378). Die Organisation von internationalen Netzen können mittelständische Speditionen, im Gegensatz zu den großen LDL, nur im Rahmen von Kooperationen realisieren. Allein für die flächendeckende Anbietetung eines nationalen Netzes bleibt ihnen oft gar keine andere Möglichkeit. In diesem Rahmen müssen oft Entscheidungen über z. B. die Zusammenlegungen von Depots oder die Öffnung neuer Hubs getroffen werden. Daher ist eher die Anpassung der Strukturen im Rahmen einer Planung unter Berücksichtigung von Verkehrs- und Umweltbelastungen sowie ökonomischer Aspekte gefragt.

2.3.2 Taktische Planungsprobleme

Die Entscheidungen auf der strategischen Ebene, getroffen von der obersten Managementebene in der Zentrale der Unternehmung (vgl. Crainic und Laporte (1997)), geben die Rahmenbedingungen für die mittelfristige Planung vor. Dies bedeutet in erster Linie für den Nahverkehr die *Definition von Tourgebieten* innerhalb des Zuständigkeitsgebietes eines Depots sowie für den Fernverkehr die *Festlegung der Linienverkehre* (vgl. Fleischmann und Gietz (2002)).

2.3.2.1 Planung von Tourgebieten

Das Einsammeln und Verteilen der Sendungen im Einzugsgebiet eines Depots wird i. d. R. in kombinierten Fahrzeugtouren durchgeführt. Der LDL strebt dabei aus organisatorischen und qualitativen Gründen eine sich wiederholende Abwicklung an. Da Standardtouren aber aufgrund der wechselnden Versender und Empfänger und der Schwankungen im Sendungsaufkommen nicht angesetzt werden können, soll der Fahrer wenigstens jeden Tag das selbe Gebiet bedienen. Folgende Vorteile ergeben sich aus diesem Vorgehen:

- Vereinfachung der Disposition sowie der Zusammenstellung der Sendungen zu Touren

- Aufbau einer Kundenbeziehung zu gewerblichen Stammkunden
- Orts- und Kundenkenntnis des Fahrers führt zu einer schnelleren Durchführung der Tour

Zunehmend werden wie bei KEP-Diensten auch in Stückgutspeditionen die Ausführung der Transporte an selbstständige Frachtführer vergeben. Durch die Festsetzung von festen Tourgebieten lassen sich deren Vergütungen wesentlich vereinfachen (vgl. Schmidthöfer (2004), S. 18).

Daher wird auf taktischer Ebene versucht, das Zuständigkeitsgebiet eines Depots in Tourgebiete einzuteilen, die von einem Fahrzeug komplett abgewickelt werden können. Je größer so ein Tourgebiet angesetzt wird, desto geringer sind die anfallenden Transportkosten. Jedoch muss das festgelegte Tourgebiet auch operativ von einem Fahrer zeitlich wie auch mengenmäßig machbar sein. Daher ist bei der Planung zu beachten, dass eine Balance zwischen niedrigen Transportkosten und Umsetzbarkeit gehalten wird. Die Reihenfolge der einzelnen Stationen wird aufgrund der guten Orts- und Kundenkenntnisse vom Fahrer selber festgelegt.

Als Datengrundlage wird das Sendungsaufkommen für den Sammelguteingang und Sammelgutausgang über einen längeren Zeitraum benötigt. Meistens werden, basierend auf Vergangenheitswerten, zukünftige Aufkommen prognostiziert. Neben den oben besprochenen Zeit- und Mengenrestriktionen sollten die Gebiete zusammenhängend und kompakt sein. Ferner sollten die Gebiete aus einer Menge an Postleitzahlgebieten bestehen. Dadurch können technische Hilfsmittel zur Sortierung eingesetzt werden, was zu einer Vereinfachung der Abläufe führt. Zusätzlich wird gewünscht, dass die Gebiete so aufgeteilt sind, dass für Subunternehmer in allen Tourgebieten etwa gleiche Verdienstmöglichkeiten bestehen.

2.3.2.2 Planung von Linienverkehren

Wenn im deutschsprachigen Logistikgewerbe von der taktischen Planung der Fernverkehrsorganisation gesprochen wird, ist damit die Linienverkehrsplanung gemeint. In der Literatur findet sich jedoch meistens für diese Art des Problems der Begriff *Service Network Design Problem* (SNDP) (siehe z. B. Crainic (2000), Crainic und Laporte (1997), Crainic (2003), Armacost u. a. (2002), Kim (1997), Kim und Barnhart (1999) oder Kim u. a. (1999)). In dieser Arbeit werden beide Begriffe synonym verwendet. Aus den Servicerouten oder Services (siehe Abschnitt 2.2.2) wird ein Netzwerk aufgebaut, genannt *Service-Netzwerk*, über welches die Güter geleitet werden. Im Rahmen der taktischen Planung soll die Gestaltung dieses Service-Netzwerkes, also die Bestimmung der Services oder Servicerouten zwischen den Depots und Hubs, festgelegt werden. Dazu werden alle Sendungen mit gleichem Versand- und Empfangsdepot und gleichem Kunden-Servicetyp (z. B. 24-, 48-, 72-Stunden-Service) gebündelt. Solch ein Versand-/Empfangsdepot-Paar wird als *Commodity* bezeichnet.

Zur Vereinfachung der organisatorischen Abwicklung der Gütertransporte und zur Verbesserung der Kunden-Servicequalität sollen die LKW-Fernverkehre inklusive der eventuellen Verkehre zu den Bahnhöfen, Häfen und Flughäfen in gleichen Intervallen, z. B. täglich, auf gleiche Art und Weise durchgeführt werden. Denn nur durch eine standardisierte Abwicklung ist der zuverlässige Transport der Güter bei den oft sehr engen zeitlichen Vorgaben

möglich. Das bedeutet, dass Linienverkehre¹⁰ oder regelmäßige Services bzw. Servicerrouten aufgebaut werden sollen, welche eine kostenminimale Abwicklung zulassen. Dazu ist für eine optimale Allokation der existierenden Ressourcen, z. B. Fahrzeuge, Fahrer oder Umschlagskapazitäten, zu sorgen, wobei gleichzeitig die Kundenanforderungen im Rahmen eines Kunden-Servicetyps erfüllt werden müssen.

Die Planung der Linien für die Eisenbahn-, Fluggesellschaften und Reedereien ist nicht Teil der Planungsaufgabe des Sammelgut-LDL. Im Gegensatz zu KEP-Diensten, welche sowohl eine eigene LKW- als auch Flugzeugflotte unterhalten und dadurch auch die Linien für die Flugzeugabwicklung planen müssen (vgl. Ihde und Bjelicic (1989) und Mengen (1993)).

Entscheidungen und Ziele:

Die Entscheidungen zur bestmöglichen Lösung des Zielkonfliktes zwischen Kundenservice und Kosten stellen den LDL vor eine schwierige komplexe Aufgabe. Aus wirtschaftlichen Gründen wäre die volle Ausnutzung der Fahrzeugkapazität am besten; jedoch würden dann viele Linien nicht täglich durchgeführt werden. Die Kunden verlangen jedoch vor allem in nationalen Netzen einen 24-Stunden-Service.

Aufgrund der in der strategischen Planung festgelegten Rahmenbedingungen können die Designalternativen für den Aufbau der Services abgeleitet werden. Dabei stehen für die Gestaltung die Bündelungsmöglichkeiten Hub- und Containerkonsolidierung sowie Beiladung (beschrieben in Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2) zur Verfügung. Weiterhin ist bei der Generierung der Designmöglichkeiten auf die Einhaltung der Zeitfenster an Depots und Hubs zu achten. Aus der damit erhaltenen Menge an Designalternativen ist die beste Kombination von Services für eine kostenminimale Durchführung der Transporte unter Beachtung diverser Restriktionen auszuwählen.

Die Kosten der Services fallen jedoch erst auf der operativen Ebene an. Somit müssen konsequenterweise Aspekte der operativen Planung in das taktische Planungsproblem integriert werden. Diese betreffen die Entscheidungen über den Weg der Aufträge sowie die Fahrzeug-einsatzplanung und das Ausgleichen von Transportfahrzeugen und Transportbehältern (vgl. Wieberneit (2007)).

Nach Crainic und Laporte (siehe Crainic (2000) und Crainic und Laporte (1997)) können die Entscheidungen folgendermaßen klassifiziert werden:

1. **Service-Auswahl:** Es werden die Servicerrouten mit ihren Charakteristika (z. B. direkt oder über ein Hub) oder die einzelnen Services festgelegt. Eine Servicerroute wird dabei auf Grundlage der Konsolidierungsmöglichkeiten und unter Berücksichtigung von Zeitfenstern bei Hubs and Depots sowie eventuell Restriktionen zur Laufzeit gebildet. Bei internationalen Netzwerken, bei denen kein fester Kundenservice-Typ, wie beispielsweise 24-Stunden-Service, vorgegeben ist, sind zusätzlich die Frequenzen der Servicerroute zu bestimmen. In der Planung wird dabei nicht nur unterschieden, ob eine Servicerroute ausgeführt wird oder nicht; sehr häufig wollen die LDL detaillierte Fahrpläne mit Reihenfolgen sowie Anfahrt- und Abfahrtszeiten als Output erhalten.
2. **Routing der Aufträge:** Der Bedarf einer jeder Commodity muss von seinem Versanddepot zu seinem Empfangsdepot transportiert werden. Beim Routing der Aufträge muss entschieden werden, welche angebotenen Servicerrouten und somit

¹⁰Es wird von Linien gesprochen, da es sich um regelmäßige Verkehre handelt.

Bündelungsmöglichkeit werden für den Transport der Commodities ausgewählt und über welche Depots und Hubs verläuft der Transportweg. Als Ergebnis erhält man Auftragsrouten mit den dazugehörigen benutzten Services und Operationen.

3. **Repositionierung leerer Fahrzeuge und/oder leerer Transportbehälter:** Innerhalb Handelsregionen herrschen üblicherweise unausgewogene Güterflüsse zwischen einzelnen Regionen. Damit zukünftige Bedürfnisse erfüllt werden können, müssen leere Fahrzeuge und / oder Transportbehälter repositioniert werden. Dazu müssen generelle Ausgleichstrategien aufgesetzt werden.
4. **Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung:** Ab und zu wird die Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung auch auf taktischer Ebene ausgeführt. Dies ist vor allem bei Planung von Sammelguttransporten in Europa notwendig, da Fahrzeug und Fahrer als eine Einheit betrachtet werden müssen. Die meisten Transporte werden an selbstständige Frachtführer mit nur einem Fahrzeug vergeben. Dadurch ist kein Wechsel des Personals nach Ablauf der gesetzlich vorgeschriebenen Einsatzzeit möglich. Bei der Bestimmung von Umläufen, Rundläufen oder One-Way-Fahrten muss der Planer gesetzliche und soziale Anforderungen beachten (vgl. Wlcek (1998), S. 42).

Die beschriebenen einzelnen Entscheidungen sind untereinander abhängig und beeinflussen sich gegenseitig, wie die folgende kurze Darstellung zu den Interdependenzen von Auftragsroute und Serviceroute zeigt. Für die Bestimmung einer kostengünstigen Auftragsroute sind Entscheidungen über Konsolidierungsmaßnahmen notwendig: Reicht der Bedarf für einen direkten Transport aus oder ist noch ein weiterer Stopp für eine Beladung oder Containerkonsolidierung nötig, um das Fahrzeug wirtschaftlich auszulasten? Oder ist eventuell sogar ein Umschlag an einem Hub angebracht? Dies hat enorme Auswirkungen auf die einzelnen Services der Servicerouten. Wiederum werden die Servicerouten aufgrund von Bündelungsmaßnahmen festgelegt. Werden zuerst die Servicerouten und danach die Auftragsrouten festgelegt, könnten eventuell Verbesserungen durch andere oder weitere Konsolidierungsmaßnahmen erreicht werden. Werden jedoch zuerst Auftragsrouten bestimmt, kann nicht mehr der gesamte Optimierungsspielraum für die Fahrzeugtypen- und -anzahlgenutzungsplanung genutzt werden, und es stehen dadurch nicht mehr alle Servicerouten zur Auswahl zur Verfügung.

Datengrundlage:

Aus der strategischen Planung ist die Struktur des Netzes mit seinen Depots und Hubs sowie die Art des Netzes gegeben. Weiter lassen sich aus den strategisch vorgegeben Rahmenbedingungen entweder früheste Abfahrts- und späteste Ankunftszeit je Commodity oder je Depot ableiten. Zudem ist für jeden Service die Entfernung sowie die Fahrzeit bekannt.

Ferner ist für jede Commodity das Mengenaufkommen oder der Bedarf geschätzt. Das aktuelle Sendungsaufkommen liegt zum Zeitpunkt der Planung nicht vor. Die LDL nehmen daher typische Vergangenheitswerte oder prognostizieren das Sendungsaufkommen, basierend auf ihren Erwartungen, als Grundlage. Es wird dabei von einem festen Tageswert ausgegangen. Schwankungen im Sendungsaufkommen werden im Rahmen der operativen Planung ausgeglichen. Das Ergebnis der Planung reagiert sehr sensitiv auf Veränderungen dieser Auftragsdaten. Entscheiden sich die Unternehmen durchschnittliche Auftragsdaten herzunehmen, kann es auf operativer Ebene zu einer Knappheit an Fahrzeugkapazitäten

kommen. Wird die Planung jedoch basierend auf den Spitzen im Auftragseingang durchgeführt, werden zu viele Kapazitäten bereitgestellt.

Einige LDL bieten Stückguttransporte auch für spezielle Güter wie beispielsweise Kühlprodukte an. Somit liegen heterogene Produkte vor, aus denen Produktgruppen bzw. -typen nach gewissen Charakteristika zusammengestellt werden. In diesem Fall müssen die Mengenaufkommen je Produktgruppe für die Planung vorliegen. Die einzelnen Produktgruppen benötigen teilweise spezielle Transportbehälter. Die Zusammenstellung der Ladungen in die verschiedenen Containertypen erfolgt über eine Verträglichkeitsmatrix, die eine Zuordnung von Produkttypen zu Containertypen erlaubt oder verbietet.

Die für die Transporte einzusetzenden Fahrzeuge und Transportbehälter müssen je Typ und Anzahl bekannt sein. Für die Planung wird in vielen Fällen angenommen, dass die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge alle zum eigenen Fuhrpark gehören, obwohl für die Ausführung auch Transportaufträge an Subunternehmen vergeben werden. Werden Transportkapazitäten komplett oder zum Teil am freien Markt eingekauft, kann von einer unendlichen Menge an Fahrzeugen ausgegangen werden. Die einzelne Fahrzeugkapazität wird entweder in Transporteinheiten (TE) oder Gewicht und Volumen angegeben. Es sind Fahrzeuge mit festem Aufbau sowie Fahrzeuge mit Wechselbrücken im Einsatz, die normalerweise zwei normierte Container aufnehmen können.

Zielsetzung und Kosten:

Die meisten Planungsvorgänge zielen auf eine Minimierung der Kosten ab. In neueren Ansätzen wird jedoch versucht, den besten Trade-Off zwischen Betriebskosten und Servicequalität zu bestimmen. Dies gestaltet sich jedoch als sehr schwierig, da in die Planung schwer vergleichbare Größen eingehen (vgl. Irnich (2002), S. 12). Somit wird i. d. R. der minimale Servicelevel, d. h. ein maximaler Zeitrahmen, vorgegeben. Die Transporte müssen dann innerhalb der entsprechenden Zeit durchgeführt sein. Daher ist die Zielsetzung der Planung, einen kostenoptimalen Ablaufplan für die Abwicklung der Transportvorgänge, inklusive des Ausgleichs der leeren Container, zu finden. Dabei sollen alle relevanten Kostenbestandteile berücksichtigt werden.

Die Kosten setzen sich aus Transport- und Umschlagskosten zusammen. Darüber hinaus können auch Zusatzkosten, wie z. B. für organisatorischen Aufwand, entstehen. Bei den Transportkosten gehen

- Fixkosten pro eingesetztes Fahrzeug,
- variable Transporteinsatzkosten je benötigter Zeit (Kosten pro Stunde und Fahrzeug) und
- je Entfernung (Kosten pro Kilometer und Fahrzeug) sowie
- Beiladungskosten

ein. Für die Umbrückvorgänge bei der Containerkonsolidierung fallen keine weiteren Kosten an, da keine zusätzlichen technischen Hilfsmittel und Personal benötigt werden. Diese Kosten sind in den variablen Transporteinsatzkosten aufgrund der benötigten Zeit integriert. Die Umschlagskosten bestehen aus

- fixen Depothandlingskosten,

- Beiladungskosten und
- variablen Umschlagskosten je Transporteinheit.

Die variablen Umschlagskosten können je Produktgruppe und Hub unterschiedlich ausfallen. Diese Unterschiede treten aufgrund besonderer Handlingsvorgaben einzelner Produktgruppen sowie unterschiedlicher technischer Ausstattung der Hubs und regionspezifischer Personalkosten auf. Ferner sind

- Übernachtungskosten und
- Spesen

mit einzukalkulieren.

Beim Einkauf von Transportleistungen fallen Pauschalkosten für die Servicerouten an. Jedoch wird in der Praxis meist für diese Routen trotzdem mit den oben genannten Kostensätzen gearbeitet.

Restriktionen:

Wie unter dem Bereich Zielsetzung schon erwähnt, werden Serviceanforderungen als Nebenbedingungen bei der Modellbildung berücksichtigt. Dabei kann der LDL dem Kunden verschiedene Servicetypen oder -levels anbieten. Beispiele hierzu sind der Nacht-Express, 24-, 42- oder 72-Stunden-Service. Erweitert man die Problemstellung auf europaweite oder interkontinentale Netze, können noch längere Servicezeiten, abhängig von der Relation, entstehen. Diese Servicelevels müssen eingehalten werden.

Die Hauptläufe müssen daher i. d. R. innerhalb eines sehr engen Zeitfensters abgewickelt werden. Dabei sind an den Depots und Hubs früheste Abfahrtszeiten (Earliest-Pickup-Time, EPT) und späteste Ankunftszeiten (Latest-Delivery-Time, LDT) vorgegeben, welche von den Servicerouten beachtet werden müssen. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Servicerouten im Rahmen der gesetzlichen Lenk- und Ruhezeitbestimmungen in den einzelnen Ländern durchführbar sind. Die EU-Verordnung (EG) 561/2006 z. B. schreibt unter anderem vor, dass die Lenkzeit eines Fahrers an einem Tag neun Stunden nicht überschreiten darf. Der Fahrer darf jedoch zweimal die Woche bis zu 10 Stunden fahren. Insgesamt sind pro Woche 56 Stunden möglich. Kann das Personal auf den Servicerouten gewechselt werden, müssen im Rahmen dieser Regeln Wechsellpunkte geplant werden.

Transportiert ein LDL mehr als eine Produktgruppe bzw. wickelt mehr als eine Produktgruppe in einem Netz zusammen ab, sind Zusammenladungsverbote einzuhalten. Dies gilt zum einen bei der Zuordnung der Produktgruppen zu den Containern und zum anderen bei der Zuordnung der Container zu Transportmitteln. Ferner können einzelne Produktgruppen, wie z. B. Kühlprodukte, nur durch spezielle Container- und Fahrzeugtypen befördert werden. Werden ein Teil der Güter im multimodalen Verkehr befördert, ist eventuell darauf zu achten, dass die eingesetzten Container ohne Schwierigkeiten umgeladen werden können.

Für die Beladung der einzelnen Wechselbrücken oder Fahrzeuge, sind die einzelnen Kapazitäten der heterogenen Ladebehälter und der Transportmittel zu berücksichtigen. Die Anzahl der Fahrzeuge kann i. d. R. als unendlich angenommen werden, da am freien Markt benötigte Ressourcen und Transportdienstleistungen hinzugekauft werden können.

Weiterhin sind Kapazitätsbeschränkungen an den Hubs bei der Planung zu beachten. Zum einen kann nur ein gewisses Sendungsaufkommen die Sortiergeräte innerhalb eines festgelegten Zeitabschnitts passieren und zum anderen ist die Anzahl der Rampen für die Be- und Entladung beschränkt. Weiterhin wünschen sich die LDL, dass die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Fahrzeuge bei den Depots nicht zeitpunktgeballt geplant, sondern gleichmäßig verteilt sind. Dadurch lassen sich Kosten aufgrund des geringeren Bedarfs an Personal sparen, und die Be-, Ent- und Umladevorgänge vereinfachen sich. Auch hier ist normalerweise nur eine beschränkte Anzahl von Rampen vorhanden.

Die Linienverkehrsplanung wird bei den LDL sehr intensiv betrieben. Die größten Schwierigkeiten stellen dabei das Handling der großen Datenmengen, die komplexe Planungsaufgabe mit ihrer großen Anzahl an möglichen Lösungen und die dabei schlechte, teilweise sogar fehlende, technische Planungsunterstützung dar.

2.3.3 Operative Planungsprobleme

Die operative Planung, ausgeführt von den Disponenten in den einzelnen Niederlassungen (vgl. Crainic und Laporte (1997)), setzt auf die Linienfahrpläne im Fernverkehr, die Tourgebiete im Nahverkehr und eventuell anderen organisatorischen Vorgaben auf. Dabei müssen alle Transporte vom Versender zum Empfänger über die festgelegten Strukturen ausgeführt werden (vgl. Clausen (1994)). Die *Touren im Nahverkehr* werden getrennt von den *Streckenverkehren* im Fernverkehr erstellt.

2.3.3.1 Nahverkehrsdisposition

In der *Nahverkehrsdisposition* müssen zum einen im Rahmen des Vorlaufes Sendungen vom Versender zum Depot vorgeholt werden, zum anderen im Rahmen des Nachlaufs die Transporte zwischen Depot und Empfänger organisiert werden. Diese Vorgänge sollen kombiniert durch Touren abgewickelt werden. Dafür werden in der mittelfristigen Planung die entsprechenden Tourgebiete gebildet. Die Zustell- und Abholaufträge werden daher in der Nahverkehrsdisposition den entsprechenden Gebieten und somit einer Tour anhand der PLZ des Empfängers bzw. PLZ des Versenders zugeordnet.

Am Vormittag werden die Sendungen des Nachlaufs, welche im Voraus alle bekannt sind, auf das Fahrzeug geladen und verteilt. Im Anschluss findet dann die Abholung der Sendungen vom Empfänger statt. Vor der ersten Abholung sind allerdings meistens noch nicht alle Anfahrtstationen bekannt, da die Abholaufträge im Laufe des Tages eintreffen. Somit können die Abholtouren, im Gegensatz zu den Verteiltouren, nicht vollständig im Voraus geplant werden. Diese Disposition wird daher meist dynamisch in einem späteren Schritt durchgeführt.

Aufgrund des täglich schwankenden Sendungsaufkommens kann es in diversen Tourgebieten dazu kommen, dass die Kapazität des Fahrzeugs nicht ausreicht und/oder die Anzahl der Stopps so groß ist, dass die Auslieferungen und die Sammlung der Güter nicht innerhalb der vorgeschriebenen Einsatzzeit machbar sind. Außerdem kann der Fall eintreten, dass die Kundenzeitfenster so eng aufeinander liegen, dass eine zeitgerechte Abarbeitung der Aufträge nicht durchführbar ist. Zur Lösung des Dilemmas kann der Disponent entweder einzelne Sendungen so anderen Tourgebieten zuordnen, dass alle Aufträge erledigt werden können, oder ein sogenanntes Springerfahrzeug einsetzen. Beim Austausch von

Empfangs- oder Versandkunden in andere Gebiete sollte jedoch darauf geachtet werden, dass nur Kunden am Rande des Tourgebiets betroffen sind. Die Planung der Reihenfolge der einzelnen Stopps wird aus oben genannten Gründen vom Fahrer selber durchgeführt.

2.3.3.2 Planung der Ferntouren

Nach Abschluss der Nahverkehrstouren sind alle Güter aus dem Vorlauf am Depot eingetroffen. Dort werden sie anhand des Empfangsdepots sortiert und den im Rahmen der Linienverkehrsplanung festgelegten Linien zugeordnet. Der in der Linienverkehrsplanung vorab festgelegte Bedarf je Relation dient als Grenze für die Planung der Ferntouren. Ist das Sendungsaufkommen einer Relation unterhalb dieser Grenze, kann das entsprechende Fahrzeug beladen werden. Ist jedoch die Grenze überschritten, muss der Disponent eine Entscheidung über den weiteren Ablauf des Transportes für die Überhangsmengen treffen. Zum einen kann ein Teil des Überhangs erst am nächsten Tag befördert werden, zum anderen kann ein zusätzliches Fahrzeug für den Transport eingesetzt werden.

Falls der LDL ebenso Teilladungsverkehre abwickelt, können Überhangsmengen, die noch am gleichen Tag weiter transportiert werden müssen, zusammen mit den Teilladungen in Ferntouren verplant werden. Bis zu sechs Aufträge werden dabei zu einer Tour zusammengestellt. Im Rahmen der Ferntourenplanung wird die Reihenfolge der Anfahrtssorte für Be- und Entladung sowie die dazugehörige Ankunftszeit geplant, so dass eine kostenminimale Zustellung ermöglicht wird. Die daraus gewonnene Abschätzung über die zeitliche Dauer der Tour ist notwendig, da Lenk- und Ruhezeiten der eingesetzten Fahrer beachtet werden müssen. Weiterhin müssen geeignete Fahrzeuge mit der notwendigen Größe und den Gegebenheiten und Fahrer gefunden werden. Dabei können eigene Ressourcen, ans Unternehmen gebundene Subunternehmer oder am Transportmarkt kurzfristig eingekaufte Frachtführer eingesetzt werden, je nach vorhandenen Ressourcen und Transportmengen.

Kapitel 3

Service Network Design

Zur Modellierung von Linienverkehrsproblemen können sogenannte Service-Network-Design-Formulierungen benutzt werden. In Abschnitt 3.1 wird eine Einordnung der verschiedenen Modelle anhand der Ausrichtung ihrer Fristigkeit und der Komplexität der Services vorgenommen. Die den Modellen zugrunde liegende Netzwerkdarstellung kann entweder auf den physischen Orten (Raum) oder auf den physischen Orten zu verschiedenen Zeiten (Raum und Zeit) basieren. Bei der zweiten Möglichkeit handelt es sich um sogenannte *Zeit-Raum-Netzwerke*, welche Inhalt des Abschnitts 3.2 sind. Für die Formulierung von SNDP werden in der Literatur verschiedene Ansätze diskutiert. Wir werden in Abschnitt 3.3 für ein komplexes SNDP drei Formulierungsarten vorstellen, nämlich die *Pfeil-*, die *Pfad-* und die *Baum-Formulierung*. Diese SNDP lassen sich durch die Fixierung von Variablen bzw. durch das Weglassen von Komplexität in *Mehrgüter-Netzwerkflussprobleme* bzw. *Netzwerkgestaltungsprobleme* überführen, welche in Abschnitt 3.4 erläutert werden. Zur Lösung der SNDP mit realistischen Instanzen werden vor allem Column- und Cut-Generation-Ansätze mit Branch-and-Bound-Verfahren verbunden. Die grundlegenden Ideen und Abläufe werden in Abschnitt 3.5 behandelt.

3.1 Klassifizierung von SNDP

Die taktischen Planungsprobleme im Fernverkehr können nach der Fristigkeit und nach der Komplexität der Services (siehe auch Abbildung 3.1) unterschieden werden. Laut Crainic (2000) sind SNDP entweder mehr strategisch/taktisch oder eher taktisch/operativ ausgerichtet. Strategisch/taktische SNDP beschäftigen sich mit Fragen der Art: Welcher Typ von Serviceroute soll eingerichtet werden?, Wie schauen diese Servicerouten aus? und Wie häufig sollen diese Servicerouten durchgeführt werden?. Diese Art von SNDP zielen auf die Festlegung von Frequenzen ab und werden daher *Frequency Service Network Design Problems* genannt. In taktisch/operativen SNDP liegt der Schwerpunkt auf der Festlegung von Fahrplänen, d. h. der Reihenfolge der Stopps inklusive Ankunfts- und Abfahrtszeiten der einzelnen Transportmittel. Aufgrund der dynamischen Komponente werden diese SNDP als *Dynamic Service Network Design Problems* bezeichnet. Irnich (2002) hat in seiner Arbeit noch eine weitere Unterscheidung von SNDP eingeführt. Er unterteilt die Planungsprobleme in SNDP mit *einfachen Services* und SNDP mit *komplexen Services*.

Die frequenz-orientierten SNDP können nach der Rolle der Modellierung der Frequenzentscheidung weiter klassifiziert werden. Zum einen können Entscheidungen zu Frequenzen

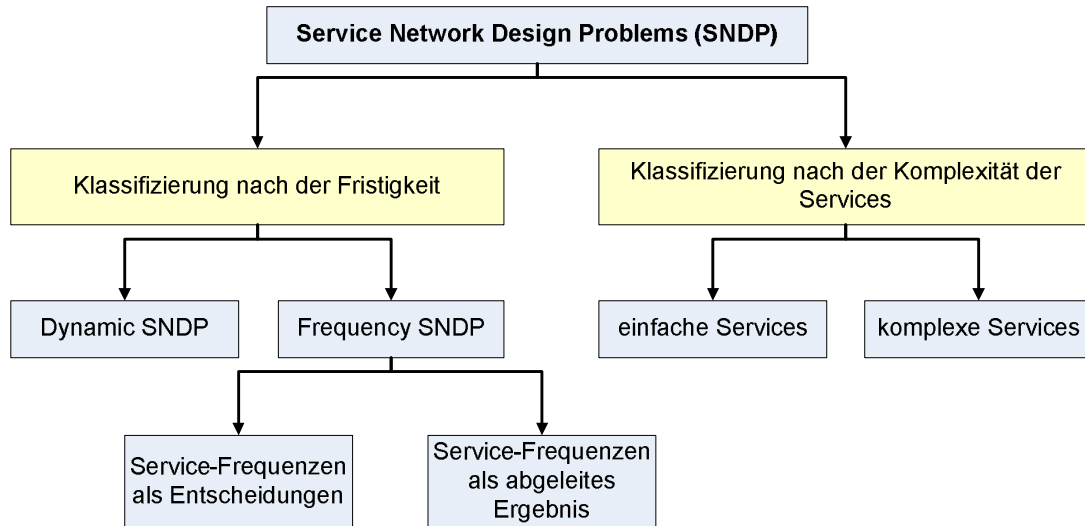


Abbildung 3.1: Klassifizierung von SNDP

direkt als ganzzahlige Variable abgebildet werden. Diese Klasse wird als Frequency-SNDP mit *Service-Frequenzen als Entscheidung* bezeichnet. Zum anderen können die Frequenzen vom Ergebnis eines Modells abgeleitet werden. Diese SNDP gehören zur Klasse *Frequenzen als abgeleitetes Ergebnis*.

Für SNDP der Klasse Service Frequenzen als Entscheidungen wird das physische Netzwerk in einem Graphen $G = (N, A)$ abgebildet, wobei N die Menge aller physischen Orte inklusive der Depots und Hubs repräsentiert. Zu jeder Serviceroute, abgebildet als Pfad im Graphen, gehören gewisse *Service-Charakteristika*. Zu den Service-Charakteristika zählen die zugehörigen Services (Pfeile im Graphen), eine *Service-Klasse* (Verkehrsträger, Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Priorität des Service) und die Kapazität auf der Serviceroute. Üblicherweise werden in solchen Modellen nicht-negative ganzzahlige Variablen für die Service-Frequenzen und nicht-negative kontinuierliche Variablen für die Abbildung der Güterflüsse benutzt. Eine allgemeine Beschreibung derartiger Modelle ist in der Arbeit von Crainic und Rousseau (1986) zu finden; Anwendungsbeispiele sind in Crainic u. a. (1984), Crainic und Roy (1988), Roy und Delmore (1989) und Roy und Crainic (1992) beschrieben.

In der Klasse Frequenzen als abgeleitetes Ergebnis entsprechen die Knoten in dem Netzwerk wieder den physischen Orten. Zur Abbildung der Linien werden ebenso Servicerouten hergenommen, die den Bedarf der Kunden decken müssen. Jedoch werden die Service-Entscheidungen als binäre Variable - eine Serviceroute wird durchgeführt oder nicht - modelliert. Die Frequenzen summieren sich dann aus der Anzahl an durchzuführenden Services zwischen zwei Standorten. Für diese Art der Modellierung sind Beispiele in den Arbeiten von Powell und Sheffi (Powell und Sheffi (1983), Powell (1986) und Powell und Sheffi (1989)), Lamar u. a. (1990) sowie Braklow u. a. (1992) erläutert.

Die Modelle der dynamischen SNDP sind denen der Frequency-SNDP sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die dynamische Modellierung des Netzwerkes und die damit verbundenen zusätzlichen Bedingungen für die zeitlichen Komponenten. Im Abschnitt 3.3 werden solche Zeit-Raum-Netzwerke näher betrachtet. Eine allgemeine Ausführung zu dynamischen SNDP und deren Zeitraum-Netzwerken ist in den Arbeiten von Kim und Barnhart (Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999)) zu finden. Ein Anwen-

dungsfall im Bereich der KEP-Dienste ist in Kim u. a. (1999) und Barnhart u. a. (2002) beschrieben.¹¹ Für LTL-Operationen wurde von Farvolden und Powell (1994) ein dynamisches SNDP aufgebaut, das auf Basis des Algorithmus von Farvolden u. a. (1993) gelöst wurde.¹² Weitere Beispiele finden sich unter anderem in Haghania (1989) und Gorman (1998).

In SNDP mit komplexen Services wird zusätzlich gefordert, dass Touren aus den Servicerouten gebildet werden können. Je nachdem ob ein räumliches Netzwerk oder ein Zeit-Raum-Netzwerk (siehe Abschnitt 3.2) im Graphen G vorliegt, kann eine Tour als Kreis oder als Pfad dargestellt werden. Touren können jedoch auch durch die Einführung einer weiteren Nebenbedingung zu dem SNDP mit einfachen Services modelliert werden. Bei der Bedingung handelt es sich um die Balance der Transportmittel, d. h. dass die Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge eines Typs plus die Anzahl der Fahrzeuge dieses Typs, die an einem Standort ankommen, gleich groß sein muss wie die Anzahl der abgehenden Fahrzeuge dieses Typs plus der Bedarf an Fahrzeugen dieses Typs an diesem Standort (vgl. Kim und Barnhart (1999)). Durch diese Bedingung können aus Service-routen jeweils Kreise oder Pfade mit gleichem physischen Start- und Zielort aufgebaut werden.

3.2 Zeit-Raum-Netzwerke

Die Basis der dynamischen SNDP ist die Integration der Zeitkomponente durch den Einsatz von Zeit-Raum-Netzwerken. Dazu wird der dynamische Horizont diskretisiert und das physische Netzwerk für jede Periode repliziert. Knoten repräsentieren in solchen Netzwerken einen Zustand in Raum und Zeit, d. h. einen Standort in einer Periode. Pfeile beschreiben entweder eine physische Bewegung von einem Standort zu einem anderen, d. h. Raum und Zeit verändern sich, oder nur eine Veränderung der Zeit an einem Standort.

Zeit-Raum-Netzwerke für SNDP können laut Kim und Barnhart (1999) auf zwei verschiedene Arten präsentiert werden: das *Time-Line-Netzwerk* und das *Time-Connection-Netzwerk*. Der Unterschied zwischen den zwei Netzwerkdarstellungen liegt bei den Typen der Pfeile. Bei beiden Netzwerken wird ein Knoten $i \in N$ durch einen Standort l_i und einer Zeit t_i beschrieben. In beiden Darstellungen wird ebenso ein *Design-Pfeil* zwischen zwei Standorten l_i und l_j eingezeichnet, wenn ein Service zwischen diesen Standorten zeitlich möglich ist, d.h. $(t_j - t_i) \geq \text{Transportzeit}$ (vgl. in Abbildung 3.2 und 3.3 die Pfeile in schwarzer Farbe).

Die zweite Art von Pfeilen unterscheidet sich jedoch in den beiden Netzwerkdarstellungen. Das Time-Line-Netzwerk hat zusätzlich sogenannte *Time-Line-Pfeile*, dargestellt mit blauer Farbe in Abbildung 3.2. Ein Time-Line-Pfeil wird zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Knoten i und j eines physischen Ortes eingefügt. Diese Art von Pfeilen beschreibt die Bewegung der Zeit an diesem speziellen Ort.

Die zweite Art von Pfeil im Connection -Netzwerk, der *Connection-Pfeil*, zeigt eine der möglichen Anbindungen für den weiteren Verlauf im Netzwerk an. Daher wird zwischen einem Knoten mit einem ankommenden Pfeil und einem zeitlich späteren Knoten mit

¹¹Siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.1.

¹²Dieses Vorgehen wird in Abschnitt 4.3 analysiert.

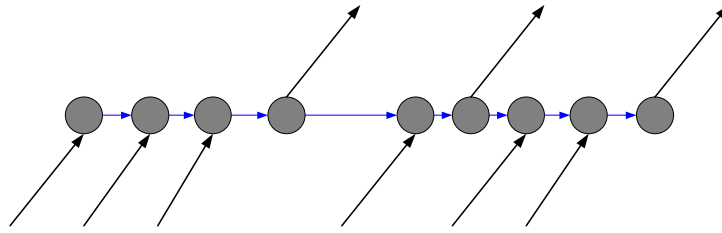


Abbildung 3.2: Time-Line-Netzwerk (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))

ausgehendem Pfeil zu einem Standort ein Connection-Pfeil eingefügt. Grundsätzlich kann diese Art von Pfeilen (siehe in Abbildung 3.3 die Pfeile in grüner Farbe) zwischen jedem Knoten eines Standortes existieren und nicht nur wie beim Time-Line-Netzwerk zwischen aufeinander folgenden Knoten.

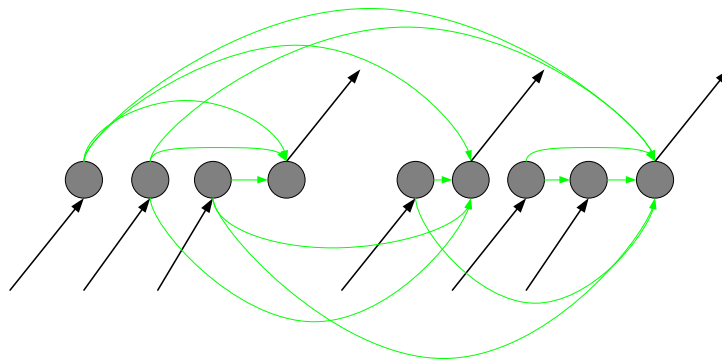


Abbildung 3.3: Connection-Netzwerk (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))

Welche Art von Netzwerkdarstellung für die Modellierung von dynamischen SNDP ausgewählt wird, ist abhängig vom spezifischen Problem. Grundsätzlich können mit dem Connection-Netzwerk kompliziertere Restriktionen als im Time-Line-Netzwerk abgebildet werden, jedoch werden mehr Pfeile benötigt (vgl. Kim und Barnhart (1999) und Kim (1997)).

In der Praxis sind diese Zeit-Raum-Netzwerke entweder enorm groß oder der einzelne Zeitpunkt repräsentiert ein großes Zeitintervall. Somit sind Techniken zur Reduzierung solcher Netzwerke notwendig. In der Modellierung von Zeit-Raum-Netzwerken in Anwendungen der Airline-Industrie, wurde erstmals erfolgreich eine Reduzierungstechnik namens *Node Consolidation* eingesetzt. Beispiele dazu sind in Hane u. a. (1995), Shenoj (1996) und Nemhauser (1994) aufgeführt. Diese wurde dann in den Arbeiten Kim u. a. (1999) und Barnhart u. a. (2002) auf SNDP übertragen. Hierbei werden alle Knoten eines Standortes i nach aufsteigender Zeit angeordnet. Alle aufeinander folgenden Knoten mit nur eingehenden oder ausgehenden Pfeilen, welche durch einen Knoten mit ausgehendem Pfeil oder eingehendem Pfeil unterbrochen werden, werden in einen Ankunfts-Knoten oder Abgangs-Knoten zusammengefasst. Danach wird jeweils ein Ankunfts-Knoten mit dem folgenden Abgangs-Knoten durch einen Super-Knoten ersetzt. Abbildung 3.3 zeigt das Netzwerk der Abbildung 3.2 nach der Knotenkonsolidierung.

Befinden sich in einem Zeit-Raum-Netzwerk aufgrund mehrerer Fahrzeugtypen viele verschiedene parallele Pfeile, kann die *Link Consolidation* ausgeführt werden. Die parallelen

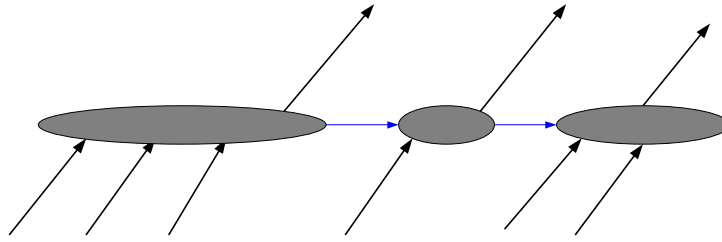


Abbildung 3.4: Knotenkonsolidierung eines Time-Line-Netzwerkes (in Anlehnung an Kim (1997) und Kim und Barnhart (1999))

Pfeile repräsentieren jeweils einen möglichen Service zwischen zwei Standorten, jedoch mit einem anderen Fahrzeugtyp. Zur Durchführung der Konsolidierung werden die parallelen Pfeile zu einem Pfeil zusammengeführt. Voraussetzung dafür ist, dass alle relevanten Charakteristika der Fahrzeugtypen, wie z. B. Geschwindigkeit oder Kapazitäten, dem Pfeil zugewiesen werden können.

Neben diesen Reduzierungstechniken sind noch weitere Aufwendungen zur Verkleinerung der Zeit-Raum-Netzwerke möglich. Dazu müssen allerdings problemspezifische Eigenschaften ausgenutzt werden. Einige Beispiele dazu werden im Kapitel 4 beschrieben.

3.3 Service Network Design Problems

In Abschnitt 2.3.2.2 wurden verschiedene Bestandteile von SNDP erläutert. In der Praxis treten daher diverse SNDP mit unterschiedlichen Ausprägungen auf. In jedem dieser Probleme müssen Entscheidungen aus der Gruppe 1 und 2, beschrieben in Abschnitt 2.3.2.2, getroffen werden, so dass die Kundenbedarfe über die eingerichteten Services gedeckt werden.

Formal lässt sich so ein SNDP durch einen Digraphen $G = (N, A)$ mit Knotenmenge N und Pfeilmenge A sowie einer Menge von Gütern K beschreiben. Zur Knotenmenge N gehören die Teilmengen O und D , welche alle Ausgangsorte bzw. Bestimmungsorte repräsentieren. Ein Pfeil $(i, j) \in A$ repräsentiert dabei einen Service zwischen zwei Standorten. Ein Gut oder ein Commodity $k \in K$ ist durch einen Ausgangsort $o(k) \in O$ und einen Bestimmungsort $d(k) \in D$ definiert. Der Bedarf einer Commodity b^k muss innerhalb des festgelegten Kundenservice-Typs vom Ausgangsort zum Bestimmungsort mit den variablen Kosten c_{ij}^k für den Transport einer Einheit der Commodity k über den Pfeil $(i, j) \in A$ befördert werden. Für die Ausführung der Services stehen dem Planer Fahrzeugtypen $f \in F$ mit der spezifischen Kapazität u^f zur Verfügung. Die Fixkosten h_{ij}^f fallen für die einmalige Ausführung des Services von Knoten i zu Knoten j , d. h. über den Pfeil $(i, j) \in A$, mit Fahrzeugtyp f an.

Für dieses SNDP werden in der Literatur verschiedene Formulierungen diskutiert. Wir wollen im Folgenden drei Formulierungen, die Pfeil-, Pfad- und Baum-Formulierung, für ein generelles SNDP mit komplexen Services und einem Kundenservice-Typ vorstellen. Alle drei Modelle gelangen zum gleichen optimalen Zielfunktionswert, jedoch unterscheiden sie sich in der Anzahl der Spalten und Zeilen.

3.3.1 SNDP in Pfeil-Formulierung

In der Pfeil-Formulierung bezeichnet y_{ij}^f die ganzzahlige *Designvariable*, welche die Anzahl der Services zwischen Knoten i und j mit Fahrzeugtyp f bezeichnet. Die zweite Variable x_{ij}^k , genannt *Güterflussvariable*, gibt den Fluss von Commodity k auf dem Pfeil (i, j) wieder.¹³

Die Pfeil-Formulierung des SNDP lautet:

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{(i,j) \in A} h_{ij}^f y_{ij}^f + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3.1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq \sum_{f \in F} u^f y_{ij}^f, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} -b^k, & \text{für } j = d(k) \\ b^k, & \text{für } j = o(k) \\ 0, & \text{für } j \neq d(k), o(k) \end{cases} \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ij}^f - \sum_{i \in N} y_{ji}^f = 0, \quad \forall j \in N, f \in F \quad (3.4)$$

$$x_{ij}^k \geq 0, \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.5)$$

$$y_{ij}^f \geq 0 \text{ und ganzzahlig}, \quad \forall (i, j) \in A, f \in F \quad (3.6)$$

Die Zielfunktion 3.1 minimiert die Fixkosten für die eingesetzten Services und die variablen Kosten für die Flüsse der Güter. Restriktionen 3.2, die Kapazitätsbedingungen, stellen sicher, dass die Flussmenge über einen Pfeil nicht die vorhandenen Kapazitäten überschreitet. Die Kapazität auf einem Pfeil wird durch die Anzahl der Services mit den dazugehörigen Kapazitäten festgelegt. Die Bedingungen 3.3 stellen die Flusserhaltungsgleichungen dar. Diese zwingen das Verfahren eine Lösung zu generieren, die den Bedarf der Commodities deckt. Nebenbedingungen 3.4 präsentieren die Balance der Transportmittel je Fahrzeugtyp. Sie sind so formuliert, dass die Anzahl der Services, die an einem Knoten ankommen, gleich groß ist wie die Anzahl der Services, die einen Knoten verlassen. Diese Bedingung muss für jeden Knoten im Netzwerk gelten und garantiert, dass Touren gebildet werden können. Die Restriktionen 3.5 und 3.6 stellen die Ganzzahligkeits- und Nichtnegativitätsbedingungen der Designvariablen sowie die Nichtnegativitätsbedingungen der Flussvariablen dar.

Das Modell besitzt ohne die Bedingungen 3.5 und 3.6 $|A||F| + |A||K|$ Variablen und $|A| + |N||K| + |N||F|$ Nebenbedingungen. Da praxisrelevante Anwendungen einige tausend Commodities und Pfeile haben können, sind die dazugehörigen Modelle sehr groß. Vor allem ein Anstieg an Nebenbedingungen lässt die Rechenzeit zur Lösung der LP-Relaxation im Rahmen der Lösungsverfahren beträchtlich ansteigen (Kim (1997)). Daher werden alternative Formulierungen zur Reduzierung der Anzahl der Nebenbedingungen benötigt.

Die nachfolgenden Pfad- und Baum-Formulierungen verkleinern die Anzahl der Bedingungen, jedoch auf Kosten der Anzahl an Variablen. Diese wächst exponentiell an.

¹³Alternativ wird auch der Anteil des Bedarfs von Commodity k modelliert. Dafür wird die Entscheidung w_{ij}^k für den Anteil (bezogen auf b^k) des Gutes k auf dem Pfeil (i, j) eingeführt. Damit gilt $w_{ij}^k * b^k = x_{ij}^k$ und die Modelle können leicht ineinander transferiert werden.

3.3.2 SNDP in Pfad-Formulierung

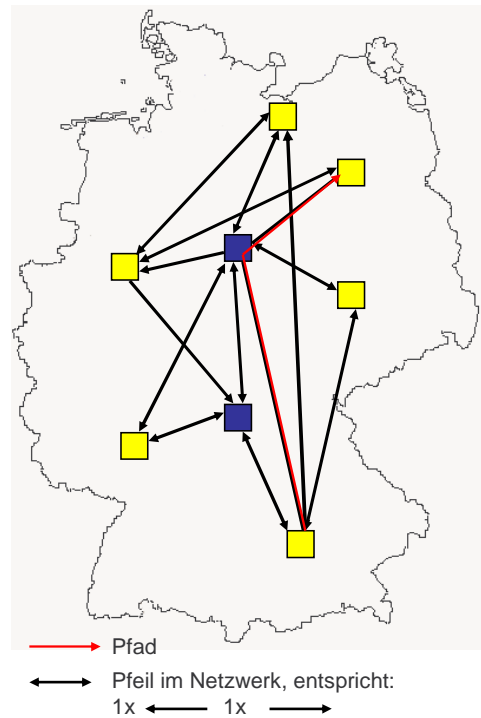


Abbildung 3.5: Darstellung eines Pfades im Netzwerk

In der Pfad-Formulierung wird das zugehörige Netzwerk nicht mehr durch einzelne Services, sondern durch Servicerouten aufgebaut. R präsentiert die Menge aller Servicerouten. Als *Pfad* p wird ein Weg von einem Ausgangsort $o \in O$ zu einem Bestimmungsort $d \in D$ bezeichnet, wobei jeder Knoten nur genau einmal vorkommt. Die Menge aller Pfade durch das Netzwerk wird als P definiert. In Abbildung 3.5 ist ein solcher Pfad $p \in P$ (roter Pfeil) dargestellt. Die Designvariable y_r^f modelliert die Entscheidung, wie viele Fahrzeuge von Typ $f \in F$ für die Serviceroute $r \in R$ benötigt werden. R^f ist die Teilmenge der Routen R , welche mit Fahrzeugtyp f ausgeführt werden. Die Güterflussvariable x_p^k beschreibt in dieser Formulierung den Fluss einer Commodity k , welche über Pfad p befördert wird. Die Menge aller möglichen Pfade zur Beförderung des Gutes k wird im Folgenden mit $P^k \in P$ bezeichnet. Für die Substitution von der Pfeil- zur Pfad-Formulierung werden drei Indikatoren benötigt: α_{ij}^r , β_i^r und δ_{ij}^p . α_{ij}^r gibt an, ob Pfeil (i, j) ein Teil der Route r ($=1$) ist oder nicht ($=0$). β_i^r ist 1, falls Route r im Knoten i startet und -1, falls Route r in i endet. δ_{ij}^p wird auf 1 gesetzt, falls (i, j) in Pfad p vorkommt, ansonsten auf 0. $h_r^f = \sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^r h_{ij}^f$ stellt die Fixkosten für den Unterhalt einer Serviceroute r mit Fahrzeugtyp f und $c_p^k = \sum_{(i,j) \in A} \delta_{ij}^p c_{ij}^k$ die variablen Kosten für den Güterfluss einer Einheit der Commodity k entlang Pfad p dar.

Durch Substitution kann die Pfeil-Formulierung in die folgende Pfad-Formulierung transformiert werden (für Details siehe Ahuja u. a. (1993)):

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{r \in R^f} h_r^f y_r^f + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} c_p^k x_p^k \quad (3.7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} \delta_{ij}^p x_p^k \leq \sum_{f \in F} \sum_{r \in R^f} u^f \alpha_{ij}^r y_r^f, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = b^k, \quad \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$\sum_{r \in R^f} \beta_i^r y_r^f = 0, \quad \forall i \in N, f \in F \quad (3.10)$$

$$x_p^k \geq 0, \quad \forall k \in K, p \in P^k \quad (3.11)$$

$$y_r^f \geq 0 \text{ und ganzzahlig}, \quad \forall r \in R^f, f \in F \quad (3.12)$$

In der Zielfunktion 3.7 werden die Kosten für die eingesetzten Routen und die Kosten für den Transport der Güter auf den Pfaden minimiert. Bedingungen 3.8 beschränken den Güterfluss auf jedem Pfeil gemäß seiner durch die Servicerouten zur Verfügung gestellten Kapazität. Restriktionen 3.9 stellen die Flusserhaltungsungleichungen dar und zwingen das Verfahren, alle Sendungen einer Commodity von ihrem Ausgangsort zu ihrem Bestimmungsort Pfaden zuzuordnen. Nebenbedingungen 3.10 werden zur Bildung von Touren benötigt. Dafür muss die Anzahl der Routen, die am Knoten i startet und endet, ausgeglichen sein. Auf den Zwischenknoten einer Route gilt dies bei Definition. Zum Schluss sind noch die Bedingungen zur Ganzzahligkeit und Nichtnegativität der Designrouten in Restriktion 3.11 und die Nichtnegativität der Flüsse in Restriktion 3.12 dargestellt.

Durch die Pfad-Formulierung konnte die Anzahl der Nebenbedingungen für die Flusserhaltungsungleichungen von $|N||K|$ in der Pfeil-Formulierung auf $|K|$ reduziert werden. Jedoch wächst die Anzahl der Variablen $|P|$ in einem allgemeinen Digraphen mit der Anzahl an Knoten $|A|$ exponentiell an.

3.3.3 SNDP in Baum-Formulierung

Die Zahl der Bedingungen kann durch die Baum-Formulierung noch weiter reduziert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Kosten nicht je Commodity variieren. Ist dies der Fall, können wir, wie bei Jones u. a. (1993) beschrieben, Commodities mit gleichem Ausgangsort zu einer *Super-Commodity* s zusammenfassen.¹⁴ Somit gibt es für jeden Ausgangsort $o \in O$ ein Super-Commodity s , das aus verschiedenen Commodities k besteht. Die Menge dieser Commodities bezeichnen wir mit K^s . Jedes dieser Güter kann entlang verschiedener Pfade von $o(k)$ nach $d(k)$ fließen. Die Menge aller Pfade p^k , die für Commodity k zwischen $o(k)$ und $d(k)$ infrage kommen, bezeichnen wir kurz als P^k . In Abbildung 3.6 ist ein Beispiel für so eine Supercommodity mit drei Commodities dargestellt. Vom Ausgangsort o zu den drei Bestimmungsorten $d1, d2$ und $d3$ gibt es jeweils zwei verschiedene Pfade.

Wählt man nun aus allen Mengen P^k mit der Eigenschaft $k \in K^s$ je einen beliebigen Pfad p^{k^*} heraus und bildet die Vereinigung dieser Pfade p^{k^*} , so bezeichnet man $\cup_{k \in K^s} p^{k^*}$ kurz als *Baum*. In dem vorgestellten Beispiel wurden zwei verschiedene Bäume gebildet.

Die Vielzahl an Möglichkeiten, jeweils die p^{k^*} auszuwählen, führt zu einer Menge von

¹⁴Dies kann auch alternativ für alle Bestimmungsorte $d \in D$ durchgeführt werden.

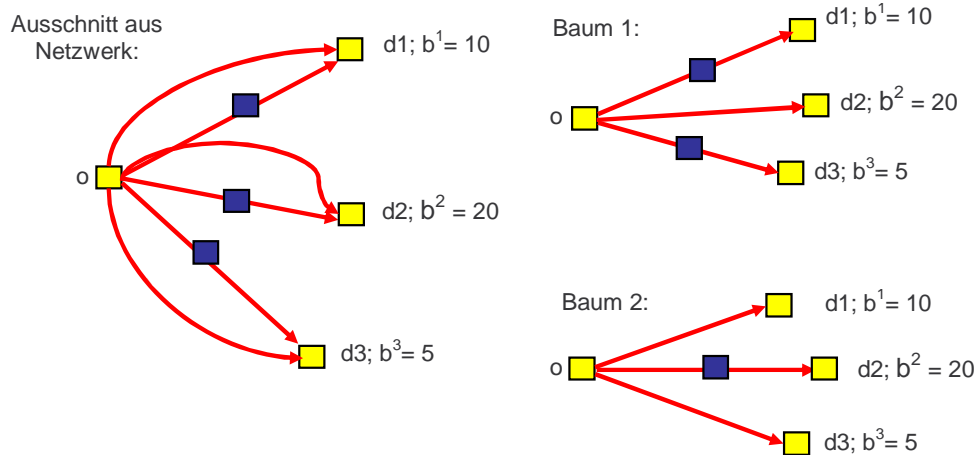


Abbildung 3.6: Darstellung eines Baumes

Bäumen q , die wir im Folgenden kurz als Q^s bezeichnen. p^{kq} beschreibt im Folgenden den Pfad, den Commodity k innerhalb eines Baumes $q \in Q^s$ einnehmen kann.

Dadurch kann jetzt jedes Super-Commodity s entlang verschiedener Bäume fließen. Analog zu obiger Schreibweise bedeutet γ_{ij}^q , wie oft (i,j) in q vorkommt. $\gamma_{ij}^q \in \mathbb{N}_0$, da mehrere Pfade im Baum den gleichen Pfeil enthalten können.

Der Fluss auf jedem Pfad in einem Baum hat immer den gleichen konstanten Anteil w , $0 \leq w \leq 1$, vom Bedarf b^k für jedes Commodity k in diesem Baum. In Abbildung 3.7 wurde für das obige Beispiel ein Anteil von $w_1 = 0,2$ für Baum 1 und $w_2 = 0,8$ für Baum 2 und dadurch die Güterflüsse auf den Pfaden festgelegt. Z. B. werden von o nach $d1$ $0,8 * 10 = 8$ ME direkt (durch Baum 2) und $0,2 * 10 = 2$ ME über das Hub (durch Baum 1) befördert.

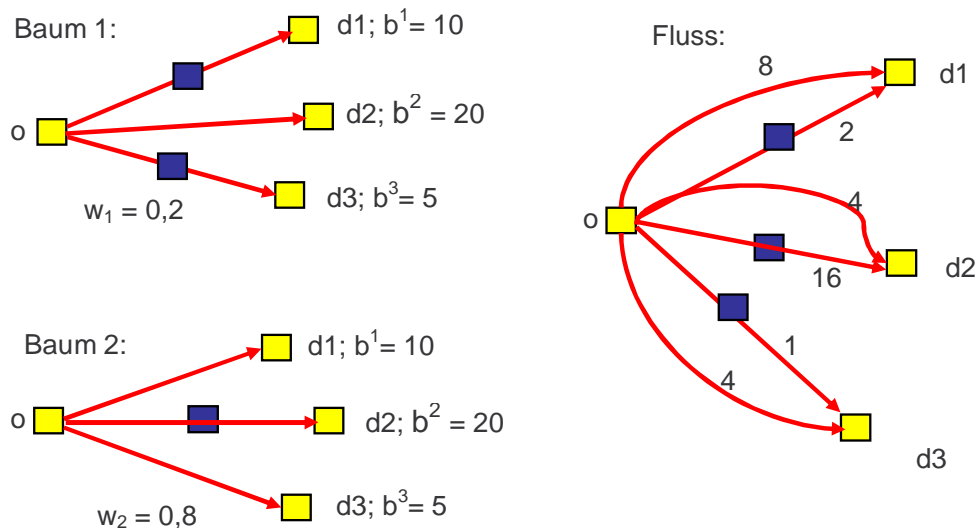


Abbildung 3.7: Flüsse entlang Bäumen

Somit erhalten wir die Güterflussvariable w_q^s , die den Anteil des Bedarfes von Baum q in Super-Commodity s angibt. Die dazugehörigen Flusskosten c_q^s setzen sich aus der Summe der Kosten der einzelnen Pfeile im Baum q , nämlich $\sum_{(i,j) \in A} \gamma_{ij}^q c_{ij}^k$ mit $k \in K^s$, bzw. aus der Summe der Pfadkosten zusammen. Damit können wir das SNDP in Baum-

Formulierung folgendermaßen angeben:

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} h_r^f y_r^f + \sum_{s \in S} \sum_{q \in Q^s} c_q^s w_q^s \quad (3.13)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{q \in Q^s} \left(\sum_{k \in K^s} \gamma_{ij}^q b^k \right) w_q^s \leq \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \alpha_{ij}^r u^f y_r^f, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.14)$$

$$\sum_{q \in Q^s} w_q^s = 1, \quad \forall s \in S \quad (3.15)$$

$$\sum_{r \in R^f} \beta_i^r y_r^f = 0, \quad \forall i \in N, f \in F \quad (3.16)$$

$$y_r^f \geq 0 \text{ und ganzzahlig}, \quad \forall r \in R^f, f \in F \quad (3.17)$$

$$w_q^s \geq 0, \quad \forall q \in Q^s, s \in S \quad (3.18)$$

Die Zielfunktion 3.13 minimiert die fixen Kosten für die Servicerouten und die Güterflusskosten. Die Nebenbedingungen 3.14 verhindern, dass Sendungen zu einem Pfeil zugeordnet werden, der nicht Bestandteil einer Serviceroute ist. Weiterhin werden die Flüsse auf den Pfeilen gemäß der Kapazitäten beschränkt. Bedingungen 3.15 erfordern die Deckung der Bedarfe, so dass für jede Super-Commodity eine Konvexkombination an Bäumen bestimmt wird. Die Restriktionen 3.16 erzwingen die Möglichkeit zur Bildung von Touren. Restriktionen 3.17 gewährleisten die Nichtnegativität und Ganzzahligkeit der Designvariablen, und Restriktionen 3.18 stellen die Nichtnegativität der Baumvariablen sicher.

Dadurch konnte eine weitere Reduzierung der Anzahl Flusserhaltungsbedingungen von $|K|$ auf $|S|$, d. h. der Anzahl an Ausgangsorten, erreicht werden. Daneben besitzen die Pfad- und Baum-Formulierungen noch zwei Vorteile gegenüber der Pfeil-Formulierung. Zum einen können nicht-lineare Kostensätze sowie pfadabhängige Pfeil- oder Routenkosten integriert werden. Dies ist bei einer Modellierung mit Pfeilen nicht möglich. Zum anderen können Anforderungen, wie beispielsweise die Anzahl der Services einer Serviceroute, Laufzeiten einer Serviceroute oder Zeitfenster an Depots und Hubs, sehr leicht mit diesen Formulierungen abgebildet werden. Routen, welche diesen Ansprüchen nicht genügen, werden einfach nicht in das Modell aufgenommen. Eine Abbildung dieser Klasse an Bedingungen ist in der Pfeil-Formulierung nicht unmöglich, jedoch sehr schwierig (vgl. Kim und Barnhart (1999)).

In der Literatur sind diverse verschiedene SNDP sowie Modellierungs- und Lösungsvorgehen zu finden. Einen generellen Überblick über Modellformulierungen von SNDP und einem allgemeinen Lösungsverfahren gibt die Arbeit von Kim und Barnhart (1999). In Crainic (2003) und Crainic (2000) werden verschiedene verallgemeinerte Problemstellungen inklusive Modellformulierungen behandelt. Spezielle Anwendungen, insbesondere von praxisrelevanten Problemstellungen werden in Kapitel 4 inklusive Lösungsmethodik vorgestellt.

3.4 Spezielle Varianten von SNDP

Planungsprobleme, welche einen Trade-Off zwischen den fixen Kosten für das Design und den variablen Kosten des Routings verlangen, sind in einer Vielzahl von Arbeiten in

der Literatur vorzufinden. Viele dieser Transportplanungsprobleme werden mithilfe von Network-Design-Formulierungen modelliert und sind daher spezielle Varianten des SNDP oder diesem zumindest sehr ähnlich. Die Arbeit von Magnanti und Wong (1984) gibt einen guten Überblick über verschiedene Beispiele. So können z. B. *Vehicle-Routing-Probleme* als ein spezielles SNDP beschrieben werden. Dazu nimmt man ein einfaches SNDP in Pfeil-Formulierung mit nur einer Quelle (*Single Source*), $s \in N$, und einem Fahrzeugtyp f . Weiterhin sind binäre Designvariablen und eine fixe Kapazität u auf allen Pfeilen gegeben. Durch das Hinzufügen von Zuordnungsbedingungen und einer Kapazitätsbeschränkung für die Anzahl der Fahrzeuge erhält man das Vehicle-Routing-Problem.

Weitaus interessanter für diese Arbeit ist jedoch der direkte Zusammenhang zu Mehrgüter-Netzwerkflussproblemen (multi-commodity network flow, MCNF) und Netzwerkgestaltungsproblemen (network design problem, NDP). Diese werden in den folgenden zwei Abschnitten näher betrachtet.

3.4.1 Mehrgüter-Netzwerkflussprobleme

Durch das Fixieren der Designvariablen werden die Services, d. h. die Pfeile, im Netzwerk festgelegt. Auf jedem Pfeil steht dann eine Kapazität $u_{ij} = \sum_{f \in F} y_{ij}^f u^f$ zur Verfügung. Dadurch muss nur noch die Güterflussvariable bestimmt werden. Bei diesem Problem handelt es sich um ein Mehrgüter-Netzwerkflussproblem. Das *Basis-MCNF-Problem* kann folgendermaßen beschrieben werden: Es soll ein optimaler Routing-Plan für die kostenminimale Beförderung der Güter durch das vorgegebene Netzwerk ohne Verletzung der Kapazitätsbeschränkungen gefunden werden.

Dieses Problem kann in den drei schon bekannten Formulierungen - Pfeil-, Pfad- und Baum-Formulierung - modelliert werden. Wir stellen im Folgenden das MCNF-Modell in Pfeil-Formulierung vor, da eine Übertragung in die anderen Formulierungen ohne Schwierigkeiten analog zu den obigen Modellen durchgeführt werden kann.

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3.19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq u_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.20)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} -b^k, & \text{für } j = d(k) \\ b^k, & \text{für } j = o(k) \\ 0, & \text{für } j \neq d(k), o(k) \end{cases} \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.21)$$

$$x_{ij}^k \geq 0, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (3.22)$$

MCNF-Probleme treten in diversen Planungssituationen auf. Zum einen werden Planungsprobleme direkt als MCNF-Modelle formuliert (siehe Ali u. a. (1984)), zum anderen treten sie als Subprobleme in komplizierteren Modellen auf (vgl. Holmberg und Yuan (2003)). Generelle Übersichtsarbeiten zu MCNF-Modellen und Lösungsmethoden finden sich bei Assad (1978), Kennington (1978), Ahuja u. a. (1993) und Ahuja (1997). Grundsätzlich lassen sich Algorithmen zur Lösung von MCNF-Problemen üblicherweise in die drei Klassen *Price-Directive-Dekomposition*, *Resource-Directive-Dekomposition* oder *Base-Partitioning*

differenzieren (siehe z. B. Ahuja u. a. (1993), S. 682ff). Für diese Arbeit ist vor allem die *Dantzig-Wolfe-Dekomposition* mit Column-Generation von großer Bedeutung. Sie gehört zu der Klasse der Price-Directive-Dekomposition und wird detaillierter in Abschnitt 3.5.1 erläutert.

McBride (1998) vergleicht verschiedene Lösungsmethoden für large-scale MCNF-Probleme anhand ihrer angegebenen Rechenzeit in der Literatur. Dabei stellt sich heraus, dass der *primale Basis-Partitioning-Algorithmus* von EMNET im Vergleich zu *Dekompositions- und Interior-Point-Methoden* am schnellsten zur Lösung kam.

Kim u. a. (1999) und Jones u. a. (1993) untersuchten jeweils die Auswirkungen verschiedener Formulierungsarten. Bei Kim u. a. (1999) ist im Rahmen der Lösung eines Express-SNDP (siehe auch Abschnitt 4.1) ein MCNF-Problem zu lösen. Dafür verwenden sie ein implizites Column-Generation-Verfahren (siehe Abschnitt 3.5.1). Sie berichten über sehr gute Ergebnisse bei der Anwendung der Baum-Formulierung. Bei einem Netzwerk von 807 Knoten, 1.363 Pfeilen und 17.539 Commodities konnte die Pfeil-Formulierung mit einer IBM RS/6000, 370 Workstations und 256 MB RAM gar nicht gelöst werden. Die Baum-Formulierung benötigte jedoch nur eine Minute und die Pfad-Formulierung 40 Minuten. Der Erfolg der Modellierung mit Bäumen wird mit dem nicht stark ausgelasteten Netzwerk begründet. Im Gegensatz dazu berichten Jones u. a. (1993) von großen Erfolgen mit der Pfad-Formulierung bei ebenfalls der Anwendung eines Column-Generation-Verfahrens.

Farvolden u. a. (1993) entwickelten eine Lösungsmethode basierend auf einem *Primal-Partitioning-Algorithmus* und Dekompositionsmethoden (siehe Abschnitt 4.3.2). Ein Column-Generation-Ansatz in einer *Cycle-Based-Formulierung* verbunden mit einer Partitionierung wird in der Arbeit von Barnhart u. a. (1995) vorgeschlagen. Dabei werden eine Reihe von reduzierten LP mit vielen relaxierten Nebenbedingungen unter zur Hilfenahme von allgemeinen Bounding-Techniken gelöst.

Weitere Methoden zur Lösung des Basis-MCNF-Problem werden z. B. in die Arbeiten von Barnhart (1993) (*Dual-Ascent-Heuristik*) und Barnhart und Sheffi (1993) (*Primal-Dual-Heuristik*) genannt.

3.4.2 Netzwerkgestaltungsprobleme

Sind in einem einfachen SNDP für die Designvariablen nur die Werte 0 oder 1 zugelassen, kann das Problem als ein *multilevel NDP* modelliert werden (vgl. Balakrishnan u. a. (1994)). In einem multilevel NDP liegt ein hierarchisches Netzwerk vor, in dem die Knoten gewissen Ebenen und Pfeile gewissen Fahrzeugtypen zugeordnet sind. Die Knoten einer Ebene können dabei nur von einem Fahrzeugtyp, welcher für diese Ebene oder eine höhere zugelassen ist, verbunden werden.

Ist zusätzlich nur ein Fahrzeugtyp vorhanden, liegt ein kapazitiertes NDP vor.

$$\min \sum_{(i,j) \in A} h_{ij} y_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3.23)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} -b^k, & \text{für } j = d(k) \\ b^k, & \text{für } j = o(k) \\ 0, & \text{für } j \neq d(k), o(k) \end{cases} \quad \forall j \in N, k \in K \quad (3.25)$$

$$x_{ij}^k \geq 0, \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (3.26)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A, f \in F \quad (3.27)$$

Liegen keine Kapazitätsbedingungen (3.24), die sogenannten *Forcing Constraints*, vor, spricht man von einem *unkapazitierten NDP*. Kapazitierte und unkapazitierte NDP mit ihren verschiedenen Erweiterungen sind Inhalt vieler Forschungsarbeiten. NDP finden sich in vielen verschiedenen Planungssituation, z. B. bei Fragestellungen aus der strategischen Planung, und Anwendungsbereichen, wie beispielsweise Telekommunikation, Produktion oder Energieversorgung, wieder. Sehr umfassende Übersichtsarbeiten finden sich in Magnanti und Wong (1984), Minoux (1989) und Balakrishnan u. a. (1997). Spezielle Anwendungen aus dem Transportbereich, insbesondere der Festlegung von Services zwischen Depots und / oder Hubs, sind für uns besonders interessant.

Crainic und Rousseau (1986) betrachten ein unkapazitiertes Frequency-SNDP in einem Frachtnetzwerk, das ausschließlich aus Depots besteht. Die Festlegung eines Fahrplans ist nicht Bestandteil der Arbeit. Jedoch werden Kapazitäts- und Zeitüberschreitungen mit Strafkosten belegt. Zur Lösung dieses Problems schlagen Crainic und Roy einen heuristischen Dekompositionsansatz und die Verwendung von Column-Generation-Techniken vor. Der Lösungsalgorithmus springt dabei iterativ zwischen der Festlegung der Servicevariablen und dem Routing der Güter hin und her.

Lamar u. a. (1990) stellen ein Lösungsverfahren, basierend auf dem Lösen von Kürzeste-Wege-Problemen und linearen Rucksackproblemen für ein unkapazitiertes, multi-commodity NDP einer LTL-Applikation, vor. Zusätzlich wird eine neue untere Schranke, die *capacity improvement bound*, präsentiert.

Leung u. a. (1990) betrachten ein Depot-zu-Depot Routing-Problem, welches in vielen large-scale Dienstleisternetzen vorkommt. In diesem Modell sind die folgenden zwei Entscheidungen zu treffen: Erstens muss jedes Commodity einem Ausgangshub (das erste Hub auf seinem Weg) und einem Bestimmungshub (das letzte Hub auf seinem Weg) zugeordnet werden. Zweitens muss dann für jede Commodity genau ein Weg zwischen Ausgangshub und Bestimmungshub gefunden werden (Single-Sourcing). Basierend auf dieser gegebenen Problemstruktur wird eine Dekomposition in zwei kleinere Teilprobleme aufgesetzt, welche mit einer Lagrange-Relaxation, kombiniert mit heuristischen Methoden, gelöst werden.

Kuby und Gray (1993) untersuchen ein Hub-and-Spoke-Netzwerk mit der Möglichkeit von Zwischenstopps und Feeders bei der Beförderung der Güter mit dem Flugzeug zum und vom Hub. Durch die Einführung dieser zusätzlichen Alternativen zum direkten Transport konnten am Beispiel von Federal Express substantielle Kostensenkungen bewirkt werden. Das Netzwerk war allerdings mit nur einem Hub und dem westlichen Teil der USA relativ klein.

Weitere einfache SNDP mit nur einem Fahrzeugtyp und binären Designvariablen sind in den Arbeiten von Farvolden und Powell (1994), Powell (1986) und Powell und Sheffi (1989) zu finden (siehe auch Abschnitt 4.3).

3.5 Lösungsalgorithmen für SNDP

Realistische Instanzen von SNDP in der Praxis sind in ihrer Größe enorm, so dass sie trotz der großen Fortschritte bei mathematischen state-of-the-art Solvern, wie beispielsweise CPLEX (siehe Abschnitt 6.1.3), und bei der Hardware, sehr selten direkt gelöst werden können. Durch den Einsatz der Pfad- oder Baum-Formulierung konnte eine große Anzahl an Nebenbedingungen gegenüber der Pfeil-Formulierung eingespart werden, jedoch steigt die Anzahl der Variablen exponentiell an. Somit stellt sogar die Lösung der *LP-Relaxation*¹⁵ (linear program, LP) mit dem *Simplex-Algorithmus* eine schier unüberwindbare Hürde dar (vgl. Lübbecke (2001), S.25). Zum Finden einer optimalen Lösung von den noch komplexeren ganzzahligen (*integer program*, IP) oder gemischt-ganzzahligen Problemen (*mixed integer program*, MIP) müssen daher effizientere Strategien als ein reines *Branch-and-Bound* mit einem Simplexverfahren in der LP-Relaxation angewendet werden.

Eine der meist genutzten Lösungstechniken für solche large-scale LP ist das Zerlegen des Ausgangsproblems nach Dantzig und Wolfe (1960) und die Erzeugung der Variablen bzw. Spalten (engl. *Column-Generation*), wenn sie tatsächlich im Simplex-Algorithmus benötigt werden. Diese fundamentale Idee von Dantzig und Wolfe wurde für generelle LP entwickelt, lässt sich aber auf binäre oder ganzzahlige Programme übertragen. In diesem Fall spricht man von *Integer-Column-Generation*. Wird Column-Generation mit einem Branch-and-Bound-Verfahren kombiniert, um IP oder MIP zu lösen, liegt ein *Branch-and-Price-Verfahren* vor.

Es gibt jedoch nicht nur die Möglichkeit, Column-Generation für die Bestimmung einer optimalen Lösung eines LP, IP oder MIP einzusetzen, sondern auch zusätzliche Schnittebenen durch ein Schnittebenenverfahren (engl. *Cut-Generation*) der LP-Relaxation iterativ zuzufügen. Dies soll die Rechenzeit zum Finden einer Lösung eines MIP oder IP beschleunigen. Wird das Schnittebenenverfahren in ein Branch-and-Bound eingebettet, erhält man ein sogenanntes *Branch-and-Cut-Verfahren*. Die Techniken zur Spalten- und Zeilenerzeugung lassen sich in synchronisierter Art zusammenführen. Bei einem *Branch-Price-and-Cut-Ansatz* handelt es sich dann, wie der Name schon sagt, um die Vereinigung der drei Verfahren Branch-and-Bound, Column- und Cut-Generation.

Zum Lösen von SNDP stehen jedoch auch noch andere Dekompositionen und Verfahren zur Verfügung, wie beispielsweise *Lagrange-Relaxation*, *Benders-Schnitte* oder *dynamische Programmierung*. Ein guter Überblick über diese Methoden wird bei Magnanti und Wong (1984) gegeben. Der problemspezifische Lösungsalgorithmus für das Planungsproblem in dieser Arbeit baut jedoch auf einen Branch-and-Price- und Branch-and-Price-and-Cut-Ansatz auf, daher werden wir uns bei der Beschreibung von allgemeinen Lösungsverfahren in den folgenden Unterkapiteln auf diese beschränken. Dabei ist unser Ziel, einen Überblick über die genannten Lösungsmethoden zu geben, ohne in die mathematischen und algorithmischen Details einzugehen. Für detailliertere Beschreibungen und Grundlagen

¹⁵Bei einer LP-Relaxation werden die Ganzzahligkeitsbedingungen eines IP oder MIP weggelassen, um ein einfacher zu lösendes Problem zu erhalten.

verweisen wir auf die erstklassige Standardliteratur zum Thema Operations Research, z. B. Domschke und Drexl (2005), Rardin (2000), Nemhauser und Wolsey (1988), Neumann und Morlock (1993), Grünert und Irnich (2005a) sowie Grünert und Irnich (2005b).

Grundlegende Arbeiten zum Thema Branch-and-Price, insbesondere für large-scale Probleme und Integer-Column-Generation stammen von Barnhart u. a. (1998), Savelsbergh (1997) und den zwei aufeinander aufbauenden Arbeiten von Vanderbeck und Wolsey (1996) und Vanderbeck (2000). Ausführliche Erläuterungen zur mathematischen Theorie und Algorithmen zum Thema Column-Generation sind in den Übersichtsarbeiten von Lübbecke und Desrosiers (2005) und Soumis (1997) zu finden. In dem Buch von Desaulniers u. a. (2005) finden sich verschiedene Column-Generation-Modelle, -Verfahren und -Anwendungen aus diversen Bereichen wieder. Insbesondere das Kapitel zum Thema „Implementation of Mixed Integer Column Generation“ (vgl. Vanderbeck (2005)) ist bei der Umsetzung von Column-Generation-Verfahren hilfreich. Eine Auflistung mit vielen Referenzen zum Thema Column-Generation bieten die Doktorarbeit von Lübbecke (2001) und der Artikel von Lübbecke und Desrosiers (2005). Für den Bereich der Transportlogistik geben unter anderem das Buchkapitel von Desrosiers u. a. (1995) und Desaulniers u. a. (1998b) eine gute Übersicht.

Als allgemeine Referenzen zum Thema Schnittebenen-Verfahren und Branch-and-Cut möchten wir auf Wolsey (1998) und Grünert und Irnich (2005a) verweisen.

Branch-Price-and-Cut ist nur in sehr wenigen Anwendungen in der Literatur zu finden, wobei dies erst der Anfang sein sollte. Als Beispiele seien die Arbeiten von Ropke und Cordeau (2006) für das *Pickup-and-Delivery-Problem* mit Zeitfenstern, die Dissertation von Irnich (2002) (vgl. auch Abschnitt 4.2.2) und die Arbeit von Barnhart u. a. (2000) für das ganzzahlige MCNF-Problem angeführt.

3.5.1 Column-Generation und Dantzig-Wolfe-Dekomposition

Column-Generation-Verfahren werden zur Lösung von sehr großen LP¹⁶ benutzt, welche aus Millionen von Variablen bestehen können. Diese Technik erreicht eine optimale Lösung ohne alle Variablen explizit zu berücksichtigen. Abbildung 3.8 gibt die prinzipielle Idee wieder, die folgendermaßen beschrieben werden kann:

Ein LP, auch *Master-Problem* (MP) genannt, soll optimal gelöst werden. Dazu wird ein *Restricted-Master-Problem* (RMP) betrachtet, das aus allen Restriktionen und nur einer Teilmenge von Variablen des MP aufgebaut ist. Dieses RMP wird z. B. mit einem *revidierten Simplex-Algorithmus* gelöst. Danach lösen wir ein oder mehrere *Pricing-Probleme* (PP) unter Berücksichtigung der dualen Preise. Das Ergebnis ist, dass es entweder neue Variablen gibt, welche zu einer Verbesserung im Zielfunktionswert führen, oder Optimalität der gefundenen Lösung des RMP nachgewiesen werden konnte. Falls so eine Variable gefunden worden ist, weist sie negative reduzierte Kosten auf und sie wird als Spalte dem RMP hinzugefügt. Danach startet die Iteration von vorne. Es wird so lange iteriert, bis keine neuen Variablen mit negativ reduzierten Kosten gefunden werden und somit die Optimalität der Lösung des RMP für das MP bewiesen ist.

Zum Start des Algorithmus kann es eventuell notwendig sein, Hilfsvariablen mit enormen Kosten einzuführen. Dadurch soll die Zulässigkeit des RMP in jeder Iteration gewährleis-

¹⁶Dies gilt ebenso für IP. Ein Beispiel dazu wird in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. Wir beschränken uns aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Erläuterung für LPs.

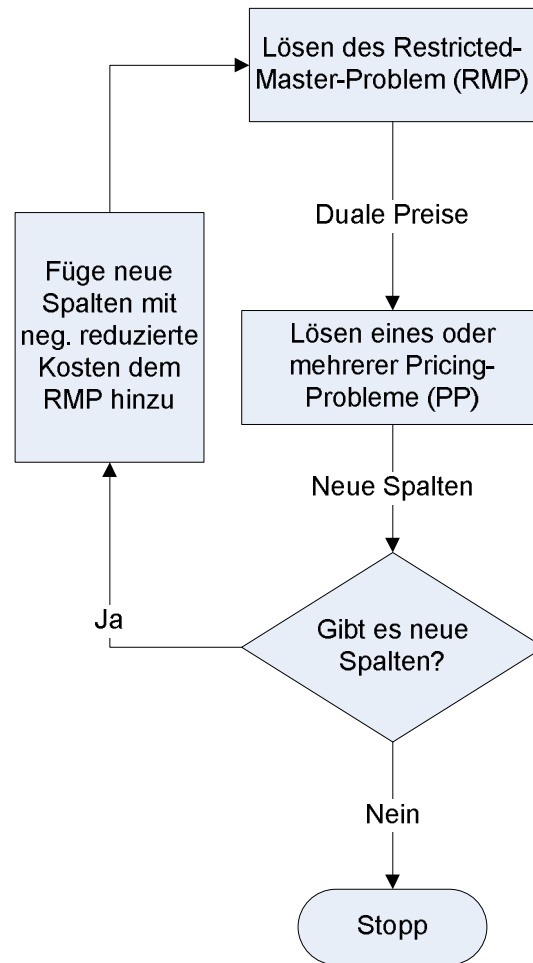


Abbildung 3.8: Prinzipielle Vorgehensweise eines Column-Generation-Verfahrens

tet werden. Falls in einer optimalen MP-Lösung Hilfsvariablen vorkommen, ist das MP unzulässig. Falls das MP zulässig ist, tauchen keine Hilfsvariablen in der Lösung auf.

Die Laufzeit und Durchführbarkeit eines Column-Generation-Verfahrens hängt stark von seinem PP ab. Im Laufe des Verfahrens muss das PP einige tausend Male oder öfter gelöst werden. Somit sollte das PP selber nicht zu komplex sein. Für die Evaluation der aufzunehmenden Variablen gibt es im Rahmen eines Column-Generation-Algorithmus generell zwei Vorgehen: *explizite Column-Generation* und *implizite Column-Generation*.

Beim expliziten Column-Generation-Algorithmus werden im PP die reduzierten Kosten möglicherweise aller Variablen berechnet. Dazu ist es notwendig, die Spalten vorab alle zu generieren. Sie werden jedoch nicht alle am Anfang in das RMP aufgenommen. Dieses explizite Column-Generation-Verfahren kann mit dem revidierten Simplex-Algorithmus verglichen werden. Die Pivotwahl einer neuen Spalte, die in die Basis aufgenommen werden soll, entspricht dem PP des Column-Generation-Verfahrens.

Im impliziten Column-Generation werden im PP nicht alle Variablen evaluiert, sondern durch das Lösen eines oder mehrerer Planungsmodelle (z. B. eines Kürzesten-Wege-Problems) eine Auswahl an „guten“ Variablen generiert. Nur für diese Variablen werden dann die reduzierten Kosten berechnet.

Die *Dantzig-Wolfe-Dekomposition* (vgl. Dantzig und Wolfe (1960)) stellt dabei eine Möglichkeit dar, entsprechende Modelle herzuleiten. Ein LP, welches aus *koppelnden* und *ein-*

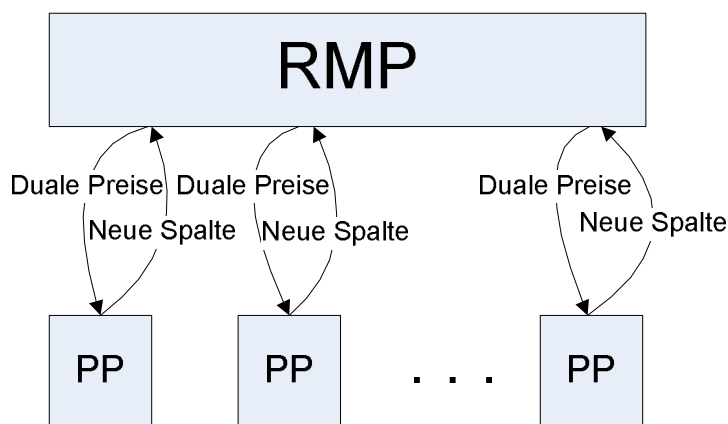


Abbildung 3.9: Prinzip der Dantzig-Wolfe-Dekomposition (in Anlehnung an Grünert und Irnich (2005a))

fachen Restriktionen sowie der Nichtnegativitätsbedingung aufgebaut ist, kann in ein MP und in ein oder mehrere PP zerlegt werden. Dazu ist es notwendig, eine Lösung x als Konvexkombination der Extrempunkte¹⁷ des Polyeders darzustellen und dem LP die Konvexitätsbedingung hinzuzufügen. Für das Aufstellen des MP werden dann die einfachen Restriktionen aus dem LP gelöscht. Die Menge der Lösungen für das PP werden durch die einfachen Restriktionen und die Nichtnegativitätsbedingungen beschrieben. Diese einfachen Nebenbedingungen lassen sich i. d. R. so anordnen, dass sie sich nur auf eine Gruppe von Variablen $g \in G$ beziehen. Das LP kann somit so gruppiert werden, dass sich eine Blockstruktur bildet (siehe z. B. Abbildung 4.4). Dadurch ist es möglich, anstatt ein PP für alle einfachen Restriktionen und Variablen $|G|$ PP separat zu lösen, die jeweils nur eine Gruppe von Variablen mit den zugehörigen Bedingungen beinhalten (vgl. Abbildung 3.9). Die dadurch generierten Lösungen stellen Variablen und somit Spalten für das MP dar. Im Column-Generation-Verfahren springt daher der Algorithmus in jeder Iteration zwischen dem Lösen des RMP und dem Lösen der $|G|$ PP hin und her.

3.5.2 Cutset-Inequalities und Cut-Generation

Die LP-Relaxation obiger SNDP generiert im Allgemeinen für das ganzzahlige Problem schwache untere Schranken. Somit ist eine Integration in Standard-Branch-and-Bound-Verfahren, wie sie von generischen Solvern benutzt wird, nicht zielführend (vgl. Irnich (2002), S. 34). Dieses Problem lässt sich, wie die Arbeit von Kim u. a. (1999) zeigt, teilweise durch die Einführung sogenannter *Cutset-Inequalities* beheben. Diese Cutset-Inequalities stellen verschärfte aggregierte Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen (*aggregate capacity demand inequalities*) für Schnitte zwischen $o(k)$ und $d(k)$ dar (vgl. Magnanti u. a. (1995)). Diese verlangen, dass die zur Verfügung gestellte Kapazität von Servicerrouten zwischen einer Menge S und T größer oder gleich dem aggregierten Bedarf zwischen diesen zwei Mengen ist.

Ein Schnitt $\{S, T\}$ enthält alle Pfeile zwischen der Knotenmenge $S \subset N$ und $T = N \setminus S$. Somit gehört ein Pfeil (i, j) zum $\{S, T\}$ -Schnitt, falls $i \in S$ und $j \in T$. Der aggregierte Bedarf $D_{S,T}$ summiert sich aus den Bedarfen der Commodities mit Ausgangs- und Bestimmungsort in verschiedenen Mengen, z. B. $o(k) \in S$ und $d(k) \in T$. Somit ist

¹⁷Wir gehen hier von einem beschränkten Polyeder ohne freie Richtungen aus.

$D_{S,T} = \sum_{k \in K: o(k) \in S, d(k) \in T} b^k$. Für die Pfad- und Baum-Formulierungen beschreibt $Y_{S,T}^f$ die Menge aller Servicerouten, welche einen Service zwischen einem Knoten $i \in S$ und einem Knoten $j \in T$ vorweisen, d. h. $Y_{S,T}^f = \sum_{r \in R^f} \sum_{(i,j) \in \{S,T\} \cap r} y_r^f$.

Die aggregierten Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen können dann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\sum_{f \in F} \left(u^f Y_{S,T}^f \right) \geq D_{S,T}, \quad \forall O/D \text{ cutsets } \{S, T\} \quad (3.28)$$

Um diese Ungleichungen als Schnittebene benutzen zu können, müssen sie gerundet werden. Dies kann zum einen durch die *Chvátal-Gomory Integer Rounding Procedure* (für weitere Details siehe Nemhauser und Wolsey (1988), S. 227) und zum anderen durch die Benutzung der schon erwähnten Cutset-Inequalities¹⁸ geschehen. Anhand eines Beispiels mit zwei Fahrzeugtypen soll die Erstellung von Cutset-Inequalities aus einer aggregierten Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichung 3.28 gezeigt werden:

Es liegt folgende Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichung vor:

$$u^{f1} Y_{S,T}^{f1} + u^{f2} Y_{S,T}^{f2} \geq D_{S,T} \quad (3.29)$$

Durch Umformungen und Rundung lassen sich die zwei dazugehörigen Cutset-Inequalities erstellen:

$$Y_{S,T}^{f1} + \frac{u^{f2}}{r(D_{S,T}, u^{f1})} Y_{S,T}^{f2} \geq \left\lceil \frac{D_{S,T}}{u^{f1}} \right\rceil \quad (3.30)$$

$$\frac{u^{f1}}{r(D_{S,T}, u^{f2})} Y_{S,T}^{f1} + Y_{S,T}^{f2} \geq \left\lceil \frac{D_{S,T}}{u^{f2}} \right\rceil \quad (3.31)$$

wobei $r(D_{S,T}, u^f) \equiv D_{S,T} - \left(\left\lceil \frac{D_{S,T}}{u^f} \right\rceil - 1 \right) u^f$.

In den Arbeiten von Magnanti u. a. (1993) und Magnanti u. a. (1995) wurden die Cutset-Inequalities ausführlich untersucht und die Ergebnisse zeigen, dass sich durch das Hinzufügen dieser weiteren Restriktionen im Rahmen eines Branch-and-Cut-Verfahrens der Gap zwischen LP-Relaxation und bester ganzzahlige Lösung stark verringern lässt. Jedoch ist bei der Implementierung dieser Restriktionen die Herausforderung durch die enorme Anzahl an vorhandenen aggregierten Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen und somit auch Cutset-Inequalities sowie der notwendigen Rechenzeit zur Erstellung der Cutset-Inequalities aus den Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen zu überwinden (vgl. Kim (1997)).

Die hier vorgestellten Schnittebenen sollen im Rahmen eines Branch-and-Price-and-Cut-Verfahrens eingesetzt werden. Das Cutting stellt dabei die duale Operation zum Pricing dar. Da die Anzahl der Cutset-Inequalities sehr groß ist, wäre eine Generierung der benötigten Restriktionen bei Bedarf durch ein Cut-Generation-Verfahren vorteilhaft. Dazu wird ähnlich wie beim Column-Generation mit einer kleinen Anzahl an Nebenbedingungen aus dem MP gestartet und das zugehörige *Relaxed-Problem* (RP) aufgestellt und

¹⁸In der Literatur wird auch bei der Benutzung von aggregierten Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen von Cutsets-Inequalities gesprochen (vgl. Kim u. a. (1999))

gelöst. Zur Überprüfung der Optimalität wird ein *Separationsproblem* gelöst, welches evaluiert, ob die Lösung des RP alle Ungleichungen der LP-Relaxation erfüllt. Falls ja, ist die gefundene Lösung optimal und der Algorithmus stoppt. Falls nein, werden die verletzten Restriktionen dem RP hinzugefügt und die Iteration wird von vorne mit einer Reoptimierung des RP begonnen.

Das Finden von verletzten Ungleichungen im Separationsproblem kann im Allgemeinen auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden. Zum einen durch ein *explizites Cut-Generation*. Hier werden alle Ungleichungen in einem Preprocessing-Schritt generiert und im Rahmen des Lösen des Separationsproblems durch einsetzen der RP-Lösung auf Gültigkeit überprüft. Zum anderen kann auch ein *implizites Cut-Generation* implementiert werden, falls ein effizientes Verfahren zum Separieren von Ungleichungen bekannt ist. Dabei werden Ungleichungen, welche die aktuelle Lösung verletzen, durch Lösen des Separationsproblems generiert. Leider ist bis dato noch kein Verfahren für die Separation von Cutset-Inequalities bei SNDP gefunden worden (vgl. Irnich (2002) und Balakrishnan u. a. (1994)).

3.5.3 Branch-and-Price, Branch-and-Cut und Branch-Price-and-Cut

Column- und Cut-Generation werden zum Lösen von large-scale Problemen, wie SNDP, in ein Branch-and-Bound-Verfahren integriert. Ein Branch-and-Bound-Algorithmus erzeugt systematisch Klassen von Lösungen durch Aufteilen der Menge der Lösungen von MIP oder IP (*Branching*). Eine Klasse von Lösungen entspricht einem Knoten im Branch-and-Bound-Baum. Diese Klassen werden durch das Lösen einer Relaxation, im Standard der LP-Relaxation, analysiert (*Bounding*). Durch diese Analyse kann festgestellt werden, ob die optimale Lösung in dieser Klasse zu finden sein kann oder nicht. Dies hat zur Folge, dass eine Reihe von LP-Teilproblemen im Rahmen des Branch-and-Bound gelöst werden. Dies kann durch ein Column- und/oder Cut-Generation-Verfahren unterstützt und beschleunigt werden.

3.5.3.1 Branch-and-Price

Die Variante Branch-and-Price wird eingesetzt, wenn das MIP oder das IP enorm viele Variablen¹⁹ besitzt. Dabei wird Column-Generation (vgl. Abschnitt 3.5.1) zur Lösung der LP-Relaxation in jedem Knoten des Branch-and-Bound-Baumes eingesetzt. Das Branching erfolgt, sobald keine weitere Spalte mit negativ reduzierten Kosten gefunden wird und die Klasse der Lösungen durch die gefundene Lösung der LP-Relaxation nicht ausgeschlossen werden kann.

Eine Implementierung eines Branch-and-Price-Verfahrens ist allerdings nicht trivial, da auf die Kompatibilität zwischen Branching-Regeln und Pricing geachtet werden muss (vgl. Barnhart u. a. (1998) und Grünert und Irnich (2005a)). Durch das Branching werden weitere Restriktionen zur Erzwingung der Ganzzahligkeit dem MP und somit dem RMP hinzugefügt. Dadurch verändern sich die dualen Preise der koppelnden Bedingungen und der Konvexitätsrestriktionen in der Dantzig-Wolfe-Dekomposition. Dies hat zur Folge,

¹⁹Wir sprechen hier vor allem von Planungsproblemen mit einigen Hunderttausend bis mehrere Millionen Variablen.

dass zum einen die Struktur des PP verändert wird und zum anderen, dass die Variablen, welche in höheren Knoten noch keine negativ reduzierten Kosten aufweisen, jetzt als Lösung des Pricing ausgegeben werden können.

Laut Grünert und Irnich (2005a) sollte folgende Regel beim Aufsetzen eines Branch-and-Price-Verfahrens beachtet werden:

„Ein Branching auf den Variablen des RMP ist in der Regel ineffizient und kompliziert zu realisieren. Das Branching sollte sich an den Entscheidungsvariablen des ursprünglichen Problems orientieren.“

3.5.3.2 Branch-and-Cut

Bringt die LP-Relaxation in einem Branch-and-Bound schwache untere Schranken hervor, kann es sinnvoll sein, gültige Ungleichungen, wie beispielsweise die Cutset-Inequalities oder aggregierten Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen, dem RP der LP-Relaxation hinzuzufügen. Dabei wird ein Cut-Generation-Verfahren in jedem Knoten des Branch-and-Bound Baumes durchgeführt.

Verletzte Ungleichungen werden in einem allgemeinen Standard-Verfahren in einem sogenannten *Cut-Pool* gespeichert und in jedem Knoten des Baumes als Erstes explizit auf Verletzung überprüft. Dadurch kann auf das aufwändige Lösen eines Separationsproblems teilweise verzichtet werden. Danach erfolgt in einem zweiten Schritt die Durchführung eines impliziten Cut-Generation-Verfahrens (vgl. Abschnitt 3.5.2), welches neue verletzte Schnittebenen generiert. Das Cut-Generation-Verfahren wird entweder gestoppt, falls keine weiteren ungültigen Ungleichungen gefunden oder Stopp-Kriterien erfüllt werden. Die gefundenen verletzten Cuts werden dem Cut-Pool für die Abarbeitung des nächsten Knotens hinzugefügt. Die damit erzeugte Lösung der LP-Relaxation wird dann in einem dritten Schritt für das Bounding eingesetzt. Falls diese Klasse an Variablen nicht für eine optimale Lösung ausgeschlossen werden kann, findet als viertes ein Branching statt.

3.5.3.3 Branch-Price-and-Cut

Eine Implementierung eines synchronisierten Column- und Cut-Generation, eingebettet in ein Branch-and-Bound-Verfahren, ist nicht trivial, jedoch können dadurch sehr scharfe untere Schranken für die LP-Relaxation generiert werden (vgl. Barnhart u. a. (1998), S. 327, und Irnich (2002), S. 110). In Abbildung 3.10 ist ein synchronisiertes Column- und Cut-Generation-Verfahren für ein LP dargestellt.

Am Anfang des Verfahrens wird aus einem MP ein RMP mit einer geringen Anzahl an Bedingungen und Variablen aufgestellt. Im ersten Schritt werden neue Variablen im Rahmen eines Column-Generation-Verfahrens generiert.²⁰ Die Iteration zwischen RMP und PP im Column-Generation wird solange durchgeführt, bis keine Spalten mit negativ reduzierten Kosten gefunden oder ein Stopp-Kriterium erreicht wurde. Der zweite Schritt ist dann die Ausführung des Cut-Generation-Verfahrens. Wir bilden dazu das RP aus den momentanen Zeilen und Spalten des RMP und lösen ein Separationsproblem. Die gefundenen verletzten Schnittebenen werden an das RP angefügt und das RP wird durch einen Simplex-Algorithmus gelöst. Dann fängt eine neue Iteration des Cut-Generations

²⁰Es kann ebenso mit dem Cut-Verfahren begonnen werden.

an und es wird wieder ein Separationsproblem gelöst. Diese Iteration im Rahmen des Cut-Generation läuft solange, bis keine verletzten Schnittebenen gefunden werden oder ein Stopp-Kriterium erfüllt wird. Danach startet der komplette Ablauf des Verfahrens wieder von vorne. Falls in einer Iteration keine neuen Zeilen oder Spalten hinzugefügt werden, terminiert das Branch-Price-and-Cut-Verfahren mit einer optimalen LP Lösung. In einer exakten Ausführung des Branch-Price-and-Cut-Verfahrens wird dieses synchronisierte Column- und Cut-Generation in jedem Knoten des Branch-and-Bound Baumes ausgeführt.

Die enormen Herausforderungen, die bei einer Implementation einer solchen Lösungsmethode überwunden werden müssen, liegen neben den schon erwähnten Schwierigkeiten beim Branch-and-Price in der Inkompatibilität zwischen Column- und Cut-Generation (vgl. Irnich (2002)). Durch das Hinzufügen neuer Zeilen entstehen duale Preise, welche in das PP mit einbezogen werden müssen. Dadurch wird die Struktur des PP verändert und es kann um einiges schwieriger werden, dieses PP zu lösen. Diese Unannehmlichkeiten ähneln den Schwierigkeiten, die beim Branching in einem Branch-and-Price-Algorithmus entstehen, denn auch in diesem Fall werden Bedingungen an das Modell angefügt. Ebenso verändert sich das Separationsproblem durch die Aufnahme neuer Spalten im Rahmen des Column-Generation-Verfahrens.

Diese Schwierigkeiten können behoben werden, indem eine explizite Column- und eine explizite Cut-Generation-Methode durchgeführt wird. Jedoch sollte nicht vergessen werden, dass durch realistische Applikationen enorme Anforderungen an den Speicherplatz gestellt werden sowie die Ausführungen sehr rechenzeit-intensiv sind.

Eine weitere Möglichkeit stellt eine heuristische Implementation dar. Z. B. führen Barnhart u. a. (1998) nur im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes ein synchronisiertes Column- und Cut-Generation aus. Für alle weiteren Knoten werden die im Wurzelknoten generierten Zeilen und Spalten für die LP-Relaxation des Branch-and-Bound-Verfahrens hergenommen.

Eine weitere Alternative wird in Barnhart u. a. (2000) angewendet. Hierbei findet die Separation von verletzten Ungleichungen statt, nachdem ein Knoten des Baumes eine primale und duale zulässige Lösung, d. h. eine ganzzahlige Lösung, aufweist.

Zum Lösen realistischer Probleminstanzen genügt der alleinige Einsatz eines Branch-Price-and-Cut-Verfahrens nicht (vgl. Kim u. a. (1999)). Es sind weitere Anstrengungen zum Finden optimaler Lösungen zu unternehmen. In der Literatur sind verschiedene Ansätze für SNDP zu finden. Im nächsten Kapitel werden einige interessante Vorgehensweisen analysiert.

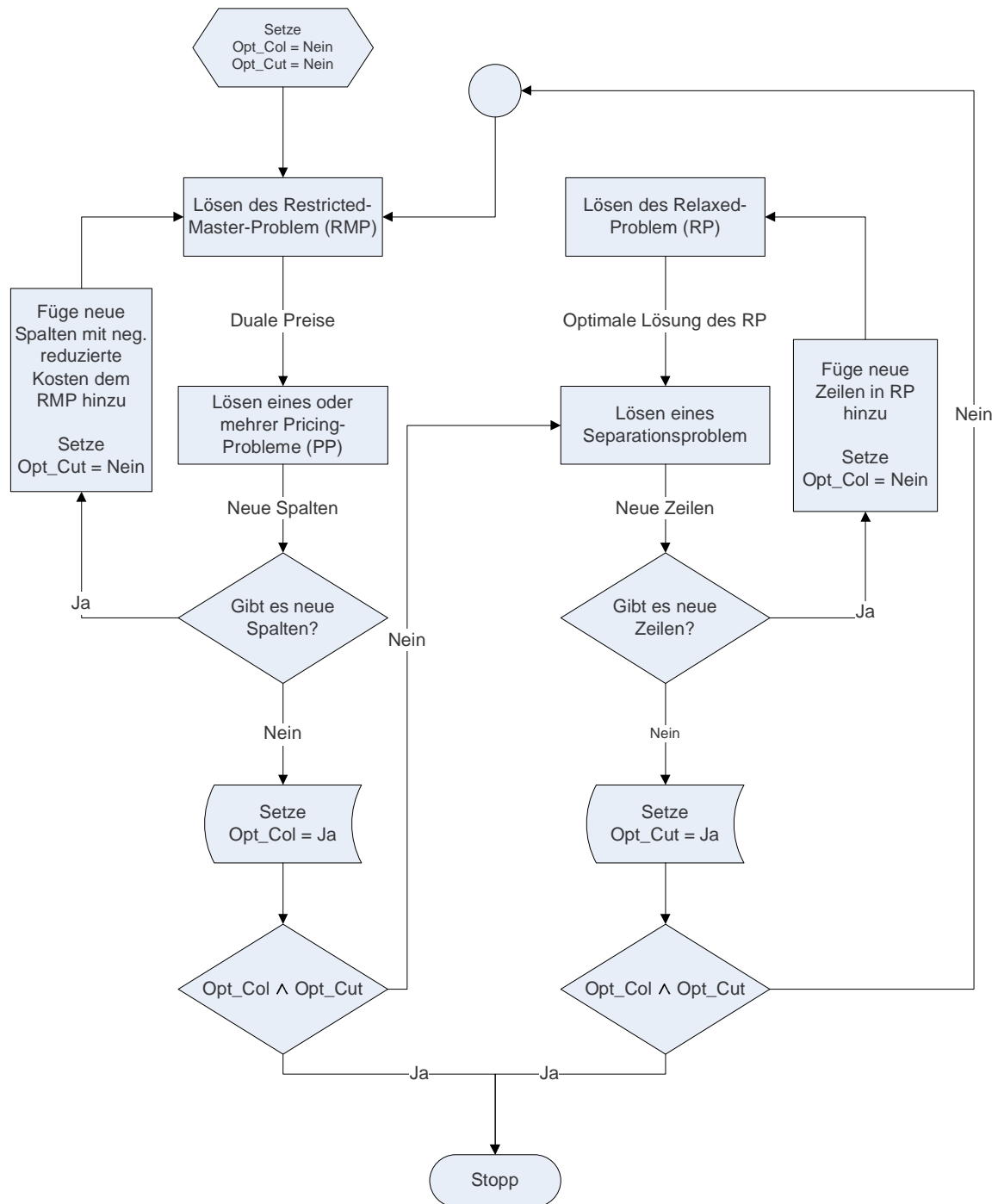


Abbildung 3.10: Synchronisiertes Column- und Cut-Generation (in Anlehnung an Kim und Barnhart (1999))

Kapitel 4

Probleme aus der Praxis und deren Lösungsansätze in der Literatur

In diesem Kapitel werden fünf taktische Planungsprobleme aus der Literatur vorgestellt. Die ausgewählten Artikel befassen sich mit praktischen Problemstellungen aus der Fernverkehrsplanung. Das Hauptinteresse dieser Arbeit liegt in der Organisation von Straßengütertransporten (siehe Abschnitt 2.3.2.2), jedoch wurden interessante Modellierungsaspekte und Verfahren für den Lufttransport entwickelt. Ein Transfer dieser Vorgehensweisen könnte sehr nützlich sein und die Vorgehensweisen werden deswegen hier vorgestellt. Planungsprobleme aus den Bereichen der Linienverkehrsplanung im öffentlichen Verkehr und im Schienengüterverkehr sowie der Seeschifffahrt werden aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen hier nicht beleuchtet.

Wir starten mit der Beschreibung der Problemstellung und dem dazugehörigen Modell der folgenden Planungsprobleme²¹:

- Das Expresslieferproblem
- Das Briefflugnetz
- LTL-Operationen in Nordamerika
- LTL-Operationen in Europa auf einem multimodalen Netz
- LTL-Operationen in Europa auf einem Straßennetz

Für diese Problemstellungen wurden verschiedene Modellierungs- und Lösungsvorgehen entwickelt. Wir stellen sechs Lösungsverfahren aus der Literatur vor, welche realistische Probleminstanzen lösen. Dabei gehen wir folgendermaßen vor: Als erstes untersuchen wir das spezielle Lösungsgerüst im Zusammenhang mit der Dekompositionsmethode. Danach folgt eine Fokussierung auf die Abbildung der Zeitplanung (Scheduling) und wie diese Anforderung modelliert wird. Als letztes werden die einzelnen Teilprobleme mit ihren zugehörigen Lösungsprozeduren analysiert.

²¹Zum besseren Verständnis und Vergleich werden für die Beschreibung der Probleme einheitliche Begriffe verwendet, auch wenn sie in der Branche anders benannt werden. Ein Beispiel dazu ist das Depot. Unter Depot verstehen wir den Eintritts- und Austrittspunkt in das Service-Netzwerk. Dies kann einmal ein Flughafen, ein Gateway oder ein Depot im ursprünglichen Sinne sein.

Eine Zusammenfassung der einzelnen Analysen findet sich im Anschluss in Abschnitt 4.6. Am Ende des Kapitels (siehe Abschnitt 4.7) untersuchen wir, in wie weit die vorgestellten Lösungsmethoden auf das spezifische Planungsproblem in dieser Arbeit übertragen werden können.

4.1 Das Expresslieferproblem

In einer Reihe von Veröffentlichungen (siehe Armacost u. a. (2002), Armacost u. a. (2004), Barnhart u. a. (2002), Barnhart und Schneur (1996), Kim u. a. (1999), Shen (2004), Barnhart und Shen (2005)) haben Forscher des MIT (Massachusetts Institute of Technology) das *Expresslieferproblem* von UPS (United Parcel Service) analysiert und verschiedene Modellierungsmöglichkeiten und Lösungsvorgehen entwickelt. Ein spezielles Planungsproblem stellt das *Über-Nacht-Luftzulieferproblem* für Paket- und Expressdienste dar, welches in 4.1.1 detailliert beschrieben wird. Für dieses Problem sind vier verschiedene Lösungsansätze in der Literatur zu finden. Drei basieren auf Network-Design-Formulierungen und eines beruht auf einer Modellformulierung namens *Composite-Variable*.

Barnhart und Schneur (1996) entwickelten ein erstes Modell und Lösungsalgorithmus für diese Klasse der Probleme. Ihr Modell weist einige operative Einschränkungen auf, wie beispielsweise ein vorgegebenes Hub und dass Güter an Depots nicht umgeladen werden dürfen. Dies führt zu einem vereinfachten Problem. Dadurch können Transportpfade (Auftragsrouten) komplett über Servicerouten bestimmt werden.

Kim u. a. (1999) implementierten ein generisches Modell für Transportabwicklungen realistischer Größe und benutzten das Expresslieferproblem als ein Anwendungsbeispiel. Um die Größe des Zeit-Raum-Netzwerkes dieses Planungsproblems in den Griff zu bekommen, wurden problemspezifische Charakteristika ausgenutzt und Reduzierungstechniken angewendet.

Ein iteratives Vorgehen, basierend auf konventionellen Network-Design-Methoden, wird in Barnhart u. a. (2002) vorgestellt. Dieses Verfahren wird detaillierter in 4.1.2 beschrieben.

Armacost u. a. (Armacost u. a. (2002) and Armacost u. a. (2004)) entwickelten die *Composite-Variable-Formulierung* für diese Art der Problemstellung. Die zugrunde liegende Idee für diese Formulierung und die dazugehörige Lösungsmethode ist Bestandteil des Kapitels 4.1.3.

Aufbauend auf der Composite-Variable-Formulierung von Armacost u. a. integrierten Barnhart und Shen in den Arbeiten Shen (2004) und Barnhart und Shen (2005) den 24-Stunden- und 48-Stunden-Service in ein Planungsproblem. Basierend auf dieser Formulierung wurde ein Lösungsverfahren entwickelt, welches auf einer Interaktion zwischen den Spalten beim Column-Generation beruht. Dadurch konnte die Lösungszeit für das IP signifikant reduziert werden.

4.1.1 Problembeschreibung

Generell müssen Expresslieferungen, wie z. B. Pakete, von einem Ausgangsdepot zu einem Bestimmungsdepot transportiert werden. Die zu transportierenden Güter sind dadurch gekennzeichnet, dass sie annähernd die gleiche Größe und das gleiche Gewicht aufweisen. Damit kann von homogenen Gütern ausgegangen werden. Der Transport der Sendungen

zwischen den einzelnen Depots kann mit LKW und/oder Flugzeugen durchgeführt werden. Typischerweise bietet der Expressdienstleister seinen Kunden einen 24-Stunden-Service innerhalb der USA an. Somit müssen Güter, welche nicht innerhalb dieses Zeitfensters per LKW geliefert werden können, per Luftfracht transportiert werden.

Die Sendungen für das Lufttransportnetz werden über Flughäfen ein- und ausgespeist. Dort werden die Güter sortiert und zwischen LKW und Flugzeugen umgeschlagen. Jeder Flughafen ist mit einem Zeitfenster versehen, innerhalb dessen die Abholung bzw. Belieferung stattfinden muss. Dadurch soll der angebotene Kundenservicegrad (24-Stunden-Service) garantiert werden. Um eine wirtschaftliche Auslastung der Flugzeuge zu gewährleisten, sollen alle Pakete über genau ein Hub umgeschlagen werden.

Die Integration der Straßen-, Feeder- und Lufttransporte in einem Planungsproblem wäre vom Modellierungsaspekt aus viel zu komplex. Somit wird das Planungsproblem in ein Feeder/Straßen-Netzwerk und in ein Luftnetzwerk geteilt, welche separat geplant werden. Dieses Vorgehen kann aus Kostensicht gerechtfertigt werden, da die operativen Kosten für das Luftnetzwerk die des Feeder/Straßen-Netzwerkes um einiges übersteigen. In diesem Kapitel steht das Über-Nacht-Flugnetzwerk im Fokus. Somit werden in diesem speziellen Planungsproblem die Flughäfen zu Ausgangs- und Bestimmungsdepots. Die ursprünglichen Depots, die Transporte von diesen ursprünglichen Depots zu den Flughäfen und vice versa, werden nicht berücksichtigt. Weiterhin kann ein Auftrag für den Transport auf verschiedene Routen gesplittet werden.

In diesem Netzwerk sind nur Hubrouten erlaubt. Somit kann jede Serviceroute in eine Pickup- und in eine Deliveryroute zerlegt werden. Die Anzahl an Services pro Route ist auf zwei limitiert. In Abbildung 4.1 ist ein einfaches Beispiel beschrieben.

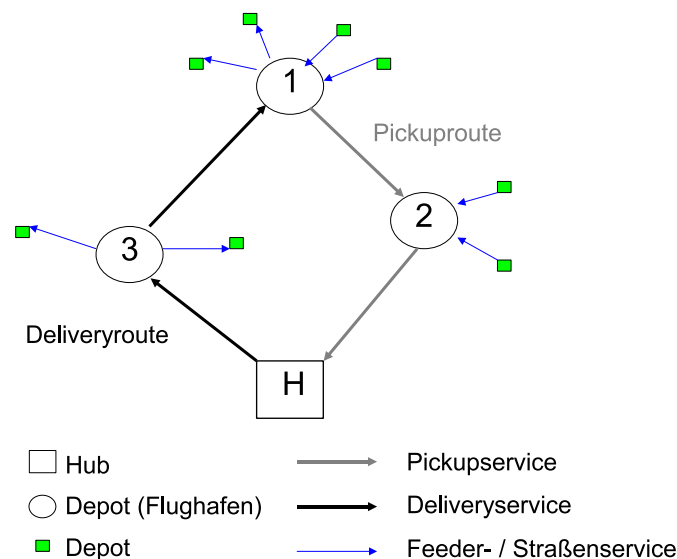


Abbildung 4.1: Beispiel für das Expresslieferproblem (Armacost u. a. (2002))

Beispielsweise ist der Ausgangsort eines Pakets Depot 1. Dort wird es in ein Flugzeug geladen. Dieses kann entweder direkt oder über ein anderes Depot (z. B. Depot 2) zum Hub fliegen. Das Flugzeug muss am Hub vor dem Ende dessen Hubsortierzeit angekommen

sein. Am Hub selber werden die Pakete entladen, sortiert und wieder in Flugzeuge zur Belieferung der Depots beladen. In der Zwischenzeit wartet das Flugzeug bis zum Ende der Sortierzeit und der Beladung am Boden. Danach liefert das Flugzeug die Pakete an ihre Bestimmungsdepots aus.

Zusätzlich zu dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen generischen Modell finden wir folgende Restriktionen vor. In der heterogenen Flugzeugflotte ist die Anzahl der Flugzeuge je Flugzeugtyp beschränkt. In den Hubs sind Sortier- und Landungskapazitäten zu berücksichtigen. Weiterhin verlangt UPS ein zusammenhängendes Netzwerk. Das bedeutet, dass es von jedem Depot mindestens eine Serviceroute zu dem Zentralhub und vice versa geben muss.

Wie in Kapitel 3.3 müssen zwei Entscheidungen getroffen werden: das Design der Services und der Fluss der Güter. Das Ziel des Planungsproblems soll die Minimierung der Kosten für das Betreiben der Pickup- und Deliveryrouten sein. Direkte Kosten für den Transport der Güter, wie z. B. Umschlagskosten, werden im Gegensatz zum generischen Modell nicht berücksichtigt, da diese von den Fixkosten der Routen dominiert werden.

4.1.2 Ein iterativer Lösungsansatz

Barnhart u. a. (2002) entwickelten ein iteratives Modellierungsvorgehen. Es basiert auf der Idee, die Größe des Problems in jeder Iteration zu reduzieren. Am Ende kann das Problem dann exakt mit dem Algorithmus von Kim u. a. (1999) gelöst werden. Die Reduktion erfolgt durch eine iterative Selektion der Designvariablen (Servicerouten) und der Güterflüsse.

Das Vorgehen ist auf der SND-Formulierung aus Abschnitt 3.3 aufgesetzt. Anstatt jedoch das Modell auf einmal zu lösen, entwickelten Barnhart u. a. eine Dekomposition, welche auf den zwei Typen von Entscheidungen beruht. Auf diesem Weg konnte eine Iteration zwischen der Selektion der Routen und dem Transport der Güter aufgesetzt werden, wobei jedoch die Entscheidung des einen Teilproblems das andere Teilproblem beeinflusst. Die Routen werden mithilfe des Route-Generation-Modells (*Route-Gen-Modell*) generiert, und die Güterflüsse werden über ein spezielles ganzzahliges Mehrgüternetzwerkfluss-Modell - das *Location-Elimination-Modell* (LEM) - festgelegt. Ein Überblick wird in Abbildung 4.2 beschrieben.

Wie in den meisten Scheduling-Problemen wird das zugrunde liegende Netzwerk als ein deterministisches Zeit-Raum-Netzwerk modelliert. In der Praxis werden diese Netzwerke entweder sehr groß oder ein einziger Zeitpunkt repräsentiert einen langen zeitlichen Abschnitt. Somit müssen Anstrengungen zur Reduzierung der Netzwerkgröße, oder noch besser zur gänzlichen Vermeidung dieser Zeit-Raum-Netzwerke, unternommen werden. Barnhart u. a. integrierten zuerst den Scheduling-Aspekt in die Routen und benutzten zweitens ein Netzwerk, dessen Größe drastisch verkleinert werden konnte. Der Mechanismus zur Reduzierung von Netzwerken wird *Derived Schedule Approach* genannt und ist ausführlich in Kim u. a. (1999) beschrieben. Solche Netzwerke können immer noch sehr groß sein, obwohl jede Route ohne exakten Zeitplan modelliert ist und maximal zwei Services pro Route erlaubt sind. Deswegen haben Barnhart u. a. nochmals die Größe mithilfe der Knoten- und Kanten-Konsolidierung (siehe Abschnitt 3.2) verkleinert.

In dem Lösungsvorgehen (siehe Abbildung 4.2) werden als erstes Routen mithilfe des Route-Gen-Modells (Schritt 1) generiert. Die Basis des Route-Gen-Modells ist das gene-

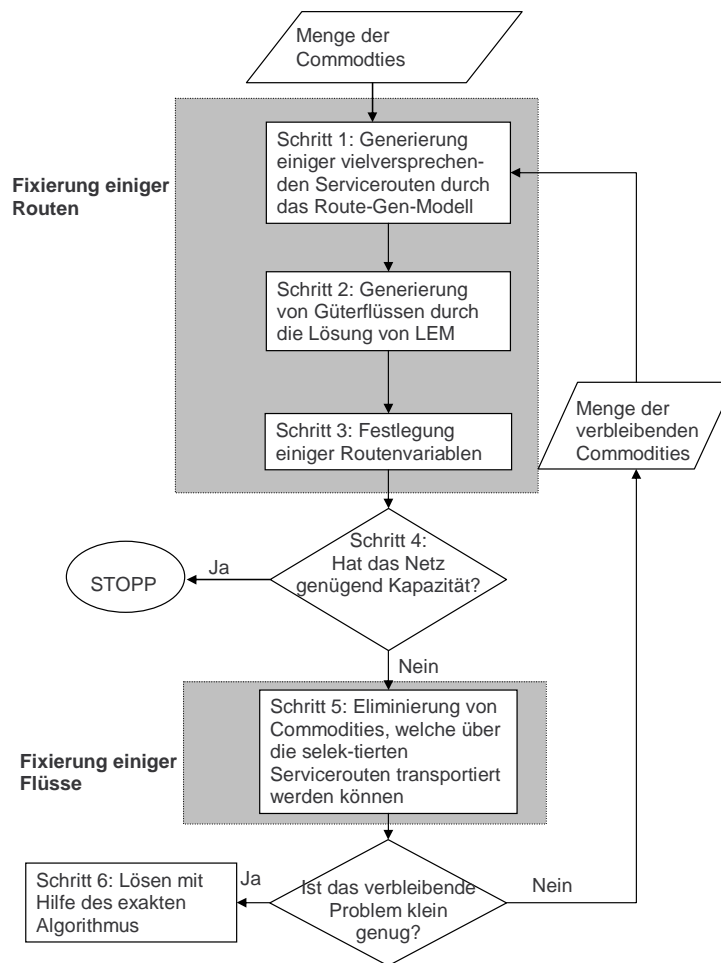


Abbildung 4.2: Überblick über das iterative Lösungsvorgehen für das Expresslieferproblem (Barnhart u. a. (2002))

rische SNDP mit allen zusätzlichen Bedingungen und der Zielfunktion wie oben beschrieben. Jedoch werden in diesem Modell nur die Designvariablen bestimmt. Dadurch müssen die Bedarfsrestriktionen indirekt abgebildet werden. Dies wurde von Barnhart u. a. über die Benutzung von Cutset-Inequalities (vgl. Abschnitt 3.5.2) umgesetzt. Dazu muss die Anzahl der generierten Routen von einer Menge in die komplementäre Menge mindestens soviel Kapazität für den Transport der Güter bereitstellen, wie für den Gesamtbedarf zwischen diesen zwei Mengen. Das Route-Gen-Modell wird durch ein synchronisiertes explizites Column- und explizites Cut-Generation, welches in ein Branch-and-Bound-Verfahren integriert ist, gelöst. Das Ergebnis, ein *derived Pickup-* und *derived Deliverynetzwerk*, ist der Input für das LEM.

Das LEM (Schritt 2) ist eine spezielle Variante eines MCNF-Problems, das die Güterflussvariablen bestimmt. Das Ziel dieses Modells ist die Maximierung der Anzahl von Ausgangs- bzw. Bestimmungsorten, deren Bedarf komplett gedeckt werden kann. Die Servicerouten, welche diesen Güterflüssen zugrunde liegen, werden im Anschluss festgelegt und die dazugehörigen Commodities können von dem Problem eliminiert werden. Zur Abbildung der Zielfunktion werden zwei binäre Variablen eingeführt. Falls alle Transporte von einem Ausgangsort (bzw. zu einem Bestimmungsort) über Pfade des *Derived-Schedule-Netzwerk* geroutet werden können, wird die dazugehörige Variable auf 1 gesetzt. Barnhart u. a. bedienen sich für dieses Modell der Baum-Formulierung (siehe Abschnitt 3.3.3). Zur

Lösung der LP-Relaxation des LEM wird ein implizites Column-Generation-Verfahren eingesetzt. Das resultierende PP stellt ein Kürzestes-Wege-Problem für jede Commodity über das Derived-Schedule-Netzwerk dar. Eine Variante der Branch-and-Price-Methode aus Abschnitt 3.5.3 wurde zur Lösung des LEM implementiert. Als Erstes relaxieren Barnhart u. a. das gemischt-ganzzahlige Problem und zerlegen das resultierende Problem danach in ein lineares MP und in ein lineares PP. Das Column-Generation-Verfahren wird nur am Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes ausgeführt. Das Branching wird anhand der binären Variablen durchgeführt.

Basierend auf den aus Schritt 2 festgelegten Güterflüssen werden alle Pickup- und Deliveryrouten, welche den gesamten Bedarf aus einen Ausgangsort oder in einen Bestimmungsort transportieren, als selektierte Routen festgelegt (Schritt 3). In Schritt 5 werden dann alle dazugehörigen Güterflüsse festgesetzt. Als Konsequenz können die zugrunde liegenden Commodities eliminiert und dadurch die Problemgröße reduziert werden. Alle anderen Aufträge, welche nicht von den fixierten Servicerouten bedient werden konnten, sind Input für Schritt 1 und die Prozedur startet von vorne. Als Ergebnis ist die Problemgröße entweder so klein, dass das Problem mithilfe des exakten Modells von Kim u. a. (1999) (Schritt 6) gelöst werden kann, oder die fixierten Servicerouten haben für alle Aufträge ausreichende Kapazitäten (Überprüfung in Schritt 4).

4.1.3 Composite-Variable-Formulierung

Die LP-Relaxation von SNDP, wie z. B. das generische oder das oben beschriebene Problem, liefern normalerweise schwache untere Schranken. Der Grund dafür liegt darin, dass die Verfahren dazu tendieren, keine ganzzahligen Routen zu bestimmen. Armacost u. a. (Armacost u. a. (2002) und Armacost u. a. (2004)) entwickelten ein Konzept, das genau dieses Problem vermeidet.

Konventionelle Network-Design-Methoden benötigen zwei Variablen: die Routenvariable und die Güterflussvariable (siehe Abschnitt 3.3). Die Idee ist, verschiedene Routen in eine Variable zu modellieren und den Güterfluss in dieser neuen Variablen implizit abzubilden. Die resultierende Composite-Variable repräsentiert eine Kombination von Routen mit genügend Kapazitäten für jeden machbaren Güterfluss.

Zur Konstruktion von Composite-Variablen werden zuerst die Güterflussvariablen integriert. Dafür werden die Servicerouten in Pickup- und Deliveryrouten aufgeteilt. Dadurch, dass eine Sendung immer über ein Hub transportiert werden muss, kann der Bedarf von jedem Pickup-Depot zu jedem Delivery-Depot in einen Depot-Hub-Bedarf gesplittet werden. Damit verändert sich in diesem speziellen Fall die Definition eines Commodity zu einem Depot-Hub-Paar. Das führt dazu, dass das Planungsproblem in zwei Teilprobleme zerlegt werden kann:

- Die Bestimmung der Pickuprouten und die dazugehörigen Güterflüsse
- Die Bestimmung der Deliveryrouten und die dazugehörigen Güterflüsse

Die Lösung dieser Teilprobleme sind konvexe lineare Kombinationen von Extrem Lösungen, die sogenannten *Extremrouten*. Jede Extremroute und somit jede Konvexkombination stellt genügend Kapazität zur Verfügung, damit ein gewisser Anteil des Bedarfes von einigen Commodities gedeckt und machbare Güterflüsse dargestellt werden können. Diese

Extremrouten werden dann durch die Kombination von Extremrouten zu Composite-Variablen erweitert. Jede Composite hat danach genügend Kapazität, um den Transport des gesamten Bedarfs von gewissen Commodities durchführen zu können. Armacost u. a. (2002) stellen zwei Definition für Composites vor:

Definition 1: C beschreibt die Menge aller Composites. Eine Composite, $c \in C$, ist eine Kollektion von Flugzeugrouten (f, r) , $f \in F, r \in R^f$. Der Parameter y_c^{fr} gibt die (ganzzahlige) Anzahl von Flugzeugen von Typ f wieder, welche Route r in Composite c fliegen.

Definition 2: Eine Composite c deckt eine Menge von Depot-Hub-Commodities ab, so dass machbare Flüsse in c für den gesamten Bedarf von diesen Commodities existiert.

Die Definitionen sind allerdings dahin gehend beschränkt, dass Güter nicht an Zwischenstopps einer Route in ein anderes Flugzeug umgeschlagen werden dürfen.

In diesem Vorgehen ist der Aspekt des Zeitplans in die Servicerouten integriert. Servicerouten, welche aufgrund von operativen Gesichtspunkten und den Zeitfenstern an Hubs und Depots machbar sind, können für die Bildung von Composites herangezogen werden. Die Güterflüsse sind direkt in den Composites integriert, so dass typische Zeit-Raum-Netzwerke nicht benötigt werden.

Durch die Einführung der Composite-Variable kann das Expresslieferproblem als ein *Set-Covering-Modell* aufgestellt werden. Der Pickup- und Deliverybedarf wird durch die Covering-Bedingungen abgedeckt (Bedarfsdeckung). Die Selektion von Flugzeugen muss ganzzahlig sein. Ferner sind die Bedingungen für die Hublandekapazität, der Ausgleich der Anzahl der Flugzeuge und die beschränkte Anzahl an Flugzeugen je Typ (siehe Abschnitt 4.1.2) abgebildet. Durch diese Art der Modellierung kann ein weiterer Vorteil realisiert werden: Abhängigkeiten zwischen Teilproblemen werden ausgeschlossen.

Dieses Set-Covering-Modell wird durch einen Branch-and-Bound-Algorithmus gelöst. Vorher müssen jedoch alle machbaren Servicerouten generiert und von diesen Routen die Composites gebildet werden.

Testergebnisse zeigen, dass die konventionelle Vorgehensweise, wie in Abschnitt 4.1.2, viel mehr Rechenzeit benötigt als die Composite-Variable-Formulierung. Dies ist vor allem auf die gute untere Schranke der LP-Relaxation am Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Verfahrens zurückzuführen (Armacost u. a. (2004), Seite 19). Im generellen erhöhen Composite-Variable-Modelle die Lösbarkeit von large-scale Problemen und erreichen eine bessere Lösungsqualität, falls adäquate Lösungsverfahren benutzt werden.²²

4.2 Das Briefflugnetzwerk

Die Universität RWTH Aachen und die Deutsche Post AG (DP AG) modellierten und lösten diverse Probleme der DP AG inklusive des taktischen Planungsproblems des Flugnetzwerkes in Deutschland.²³ Zwei Lösungsvorgehen werden für dieses *Briefflugnetzwerk* (4.2.1) in der Literatur vorgestellt. Büdenbender u. a. (2000) schlagen einen *Branch-and-Bound / Hybrid-Tabu-Search-Algorithmus* vor. Dieses Vorgehen basiert auf der Idee, dass

²²siehe dazu auch die Arbeiten von Cohn (2002) und Cohn und Barnhart (2003) über den Einsatz von Composite-Variable-Formulierungen in anderen Planungsproblemen.

²³Einen Überblick findet man in Grünert und Sebastian (2000)

die LP-Relaxation als ein Single-Sourcing-Warehouse-Location-Problem modelliert werden kann. Dabei repräsentieren die Routen die Lager, und die Zuordnung der Bedarfe zu Routen stellt die Versorgung der Kunden durch die Lager dar.

Irnich (2002) entwickelte einen Ansatz mithilfe der Dantzig-Wolfe-Dekomposition. Dieser wird in Kapitel 4.2.2 vorgestellt und analysiert.

4.2.1 Problembeschreibung

Die Briefe werden entweder direkt beim Kunden oder von Briefkästen eingesammelt und zu den regionalen Brieffrachtzentren (BFZ) geliefert. Dort werden alle Briefe nach ihrem Bestimmungs-BFZ sortiert. Der angestrebte Kundenservice verlangt, dass alle Briefe innerhalb einer Nacht von ihrem Ausgangs-BFZ zu ihrem Bestimmungs-BFZ befördert werden. Damit dieser Kundenservice auch erreicht wird, werden für alle BFZ Zeitfenster für das Einsammeln und Ausliefern der Güter festgelegt. Für gewisse Relationen ist ein Transport mit LKW aufgrund der kurzen Lieferzeiten nicht durchführbar. Somit müssen die relevanten Briefe via Luftfracht transportiert werden. In diesem speziellen Planungsproblem werden nur diese Briefe betrachtet. Da jedoch die BFZ normalerweise nicht in der Nähe eines Flughafens liegen, müssen die Briefe zuerst zu den Flughäfen geliefert werden. Dort werden die Briefe vom LKW ins Flugzeug umgeschlagen und zu ihrem Bestimmungsflughafen geflogen. Um eine höhere Auslastung der Flugzeuge zu erreichen, ist eine Konsolidierung der Briefe über ein Fluhub möglich. Von dem Bestimmungsflughafen werden die Briefe mithilfe von LKW zu ihren Bestimmungs-BFZ gebracht.

Aufgrund der knappen Zeitfenster der BFZ müssen die Flüge entweder direkt oder über das Hub in Frankfurt/Main durchgeführt werden. Das Hub in Frankfurt operiert gleichzeitig auch als Ausgangs- bzw. Bestimmungsflughafen. In diesem speziellen Planungsproblem sollen die Services zwischen den Flughäfen, die Feedertransports von und zu den Flughäfen und die Auftragsrouten der Briefe zwischen den BFZs geplant werden.

Die Optimierung des gesamten Briefnetzes inklusive aller Transporte wäre zu komplex. Somit wird eine erste heuristische Dekomposition des Netzwerkes an den intermodalen Schnittstellen durchgeführt. Daraus resultieren ein inneres Service-Netzwerk - das *Flugnetzwerk* - und ein äußeres Service-Netzwerk - das *Straßennetzwerk*. Die Durchführung dieser Dekomposition wird aus Kostengründen gerechtfertigt, da die Kosten für den Unterhalt des Flugnetzes um einiges größer sind als die für das Straßennetz. Das Ziel des in diesem Abschnitt vorgestellten Planungsproblems ist die Bestimmung des Designs für das gemischte Direktflug- und Hubflugnetz. Auf diesem Wege müssen nur Entscheidungen über das Design des inneren Netzwerkes getroffen werden; die Designentscheidungen, welche Services von und zu den Flughäfen von den LKW gefahren werden, sind nicht Bestandteil dieser Planung. Somit sind in diesem Fall die Depots die Flughäfen und nicht die BFZ. Jedoch werden alle Briefe mit gleichen Ausgangs-BFZ und Bestimmungs-BFZ in einen Auftrag zusammengefasst, im Gegensatz zu den anderen Planungsproblemen, bei denen ein Auftrag durch das Ausgangs- und Bestimmungsdepot definiert ist. Alle Briefe eines Auftrages müssen über den selben Weg geroutet werden.

Die große Besonderheit dieses Praxisproblems ist nicht die alleinige Fokussierung auf das Design des Netzwerkes zwischen den Depots, sondern zusätzlich die Zuordnung der Ausgangs- und Bestimmungs-BFZ der Aufträge zu den Depots. Diese Anforderung wird durch eine Zuordnungsvariable, die den Auftrag zur Route abbildet, modelliert. Dadurch

nen Flugzeugtypen sehr limitiert.

Um die Anzahl der Flugzeuge an einem Depot auszugleichen, können *Ferryflüge* zusätzlich zu den Direkt- und Hubrouten durchgeführt werden. Ein Ferryflug fliegt leer von einem Depot zum anderen und wird mit Strafkosten versehen. Ähnlich zum generischen Modell müssen die Anzahl an startenden Routen und Ferryflügen eines Flugzeugtyps an einem Depot gleich groß sein wie die Anzahl an ankommender Servicerouten und Ferryflüge dieses Typs.

In dieser Planung müssen drei Entscheidungen getroffen werden, welche zu den ersten drei Entscheidungsgruppen von Abschnitt 2.3.2.2 zählen.

1. Wie soll das Design des inneren Netzwerkes ausschauen?
2. Welche Aufträge sollen welchen Routen zugeordnet werden?
3. Sollen Ferryflüge durchgeführt werden oder nicht?

Ferner sind zusätzliche Restriktionen im Vergleich zum generischen SNDP zu beachten. Dies ist zum einen, dass die Anzahl an Flugzeugen je Flugzeugtyp sowie die Anzahl an Starts und Landungen an einem Depot beschränkt sind. Weiterhin muss ein Auftrag genau einer Route zugeordnet sein (Single-Sourcing).

Das Ziel ist, eine Kombination an Servicerouten und Ferryflügen zu finden, so dass die Summe über alle Kosten für die Servicerouten, die Ferryflüge und die Feedertransporte minimal ist. Umschlagskosten werden jedoch nicht berücksichtigt.

4.2.2 Eine Dantzig-Wolfe-Dekomposition

Die meisten der Ansätze zur Lösung von SNDP benützen eine Dekomposition auf Basis der Variablen, so wie der iterative Ansatz in Abschnitt 4.1.2. Irnich's Idee ist es stattdessen, eine Zerlegung anhand der Servicerouten vorzunehmen. Die Analyse seines Problems zeigt, dass das Modell in einer Art und Weise aufgebaut werden kann, dass eine Dantzig-Wolfe-Dekomposition (siehe Dantzig und Wolfe (1960) und Abschnitt 3.5.1) implementiert werden kann.

Dazu modellierte Irnich sein Problem als ein *Set-Partitioning-Modell*. Die Zuordnungsvariablen und die Designvariablen können je Serviceroute zusammen gruppiert werden (siehe dazu auch Abbildung 4.4). Die Bedarfsbedingungen, die zusätzlichen Bedingungen und die Bilanzbedingungen bilden die koppelnden Restriktionen. Die schwachen Restriktionen, welche nur eine Serviceroute betreffen, sind die Kapazitäts- sowie die Kompatibilitätsbedingungen. Als Ergebnis erhält man die benötigte Blockstruktur, wie in Abbildung 4.4 ersichtlich. Das Modell kann dann in zwei Teilprobleme zerlegt werden: Die schwierigen Restriktionen bilden das ganzzahlige MP und die einfachen Restriktionen bilden das ganzzahlige PP. Auf diese Art repräsentiert jede Serviceroute genau ein PP. In diesem PP werden Aufträge der Serviceroute zugewiesen, wobei die Kapazitäts- und die Kompatibilitätsbedingung beachtet werden müssen.

Durch die Abbildung der Kompatibilität von Aufträgen als Nebenbedingung konnte auf ein Zeit-Raum-Netzwerk verzichtet werden. Die Restriktionen zwingen den Lösungsalgorithmus nur Aufträge zu Servicerouten zuzuordnen, welche mindestens einen gemeinsamen Abflugzeitpunkt haben.

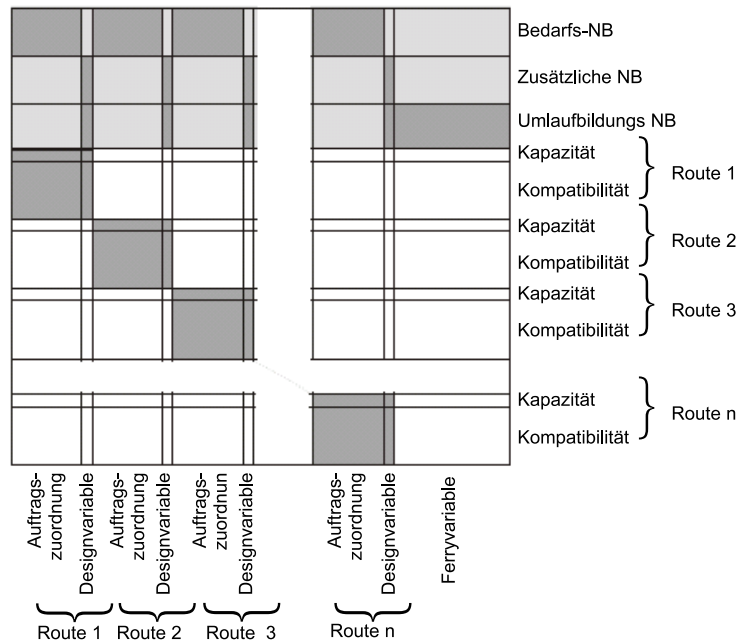


Abbildung 4.4: Blockstruktur (Irnich (2002))

Die ganzzahligen PP können der Klasse der *Cliquen-Rucksack-Probleme* zugeordnet werden. Die Kapazitätsrestriktion kann dabei als der Rucksack angesehen werden. Die Zuordnung von Aufträgen, zusammen mit den Kompatibilitätsbedingungen, kann als Clique interpretiert werden. Diese entstehenden Cliquen sollen in einen Rucksack gepackt werden. Zur Lösung dieser Probleme analysierte Irnich die Struktur des zugrunde liegenden Graphen: Jeder Graph beschreibt einen *Intervall-Graph*. Bei der Benutzung von Intervall-Graphen kann jedes Cliquen-Rucksack-Problem durch eine Sequenz von Rucksackproblemen ersetzt werden (vgl. Irnich (2002), Seite 120-124). Das Lösungsvorgehen für diese Cliquen-Rucksack-Probleme kann folgendermaßen beschrieben werden. Zuerst müssen alle maximalen Cliquen des Graphen bestimmt werden. Zweitens muss für jede Clique ein Rucksackproblem mithilfe von Standardalgorithmen gelöst werden. Drittens kann die optimale Lösung für das Cliquen-Rucksack-Problem durch die Auswahl der Lösung mit dem besten Zielfunktionswert aus der optimalen Lösungsmenge der Rucksackprobleme gefunden werden.

Die Zerlegung in ein ganzzahliges MP und in ein ganzzahliges PP kann genutzt werden, um eine Branch-and-Price-Prozedur zu implementieren. Das ganzzahlige MP wird dabei in einen Branch-and-Bound-Algorithmus eingebettet, welcher die LP-Relaxation zum Finden unterer Schranken benutzt. Das resultierende LP und die PP bilden die Basis für ein Column-Generation-Verfahren. Dies ist gegensätzlich zu dem Column-Generation-Algorithmus von Barnhart u. a. (2002), wo zuerst die LP-Relaxation und danach die Dekomposition in ein lineares MP und in lineare PP durchgeführt werden. Das RMP des LP-Modells wird durch ein Simplexverfahren gelöst. Neue Spalten werden durch das Lösen der ganzzahligen PP generiert. Die Servicerouten selbst werden in einem Preprocessing-Schritt erstellt. Irnich (2002) weist in seiner Arbeit ausdrücklich darauf hin, dass die Anzahl der Routen nicht einige Tausend übersteigen sollte, da ansonsten zu viele ganzzahlige PP gelöst werden müssen.

Zur Beschleunigung des beschriebenen Lösungsverfahrens analysierte und testete Irnich verschiedene Strategien: angefangen von diversen Branch-and-Bound-Strategien bis hin zur Implementierung von Schnittungleichungen mithilfe eines heuristischen Separationsverfahrens. Das Separationsverfahren sowie die Schnittungleichungen basieren auf seiner Modellformulierung. Die Vorgehensweisen und Ergebnisse sind im Detail beschrieben in Irnich (2002), Seite 189 bis 260.

4.3 LTL-Operationen in Nordamerika

Zur Lösung von taktischen Planungsproblemen aus dem Bereich der LTL-Transporte in Nordamerika (beschrieben in Abschnitt 4.3.1) wurden verschiedene Modellierungs- und Lösungsansätze vorgeschlagen.

Cheung und Muralidharan (2000) erarbeiteten eine Strategie, welche die Stochastik und Dynamik des Problems ausnutzt und gleichzeitig Echtzeit-Informationen in ihrem Lösungsansatz verarbeiten konnte. Diese Art der Problemstellung kann als operativ klassifiziert werden.

Powell und Sheffi (1983) starteten ihre Arbeit an LTL-Operationen mit der Entwicklung eines lokalen Verbesserungsalgorithmus. Diese Heuristik fügt Kanten in das Güterflussnetzwerk auf intelligente Weise ein und entfernt Kanten aus diesem Netzwerk.

Diese Arbeit wurde von Powell (1986) erweitert. Er kombinierte das *Local-Search-Verfahren* aus Powell und Sheffi (1983) mit dem Lösen des Routing-Teilproblems der Güter. Das Routing-Problem selbst ist als ein Kürzeste-Wege-Problem ohne Nebenbedingungen modelliert.

Koskosidis und Powell (1992) arbeiteten daran, das Routing-Problem um realistische Nebenbedingungen zu ergänzen und zu lösen. Somit wurde das Kürzeste-Wege-Problem um einige Nebenbedingungen erweitert. Das dazu entwickelte Lösungsverfahren basiert auf einem Routing-Algorithmus mit Baumvariablen.

In der Veröffentlichung von Powell und Sheffi (1989) ist eine Dekompositionsstrategie für das SNDP vorgeschlagen. Dieses beruht hauptsächlich auf der mathematischen Struktur des Problems und realistischen Charakteristika. Basierend auf dieser Zerlegung wurde eine lokale Verbesserungsheuristik entwickelt, in welche der Planer direkt in den Optimierungsprozess integriert ist. Er hat Entscheidungen in Bezug auf komplexe Restriktionen und dem Trade-Off zu treffen. Auch hier fungiert Powell und Sheffi (1983) als Vorgänger.

In Abschnitt 4.3.2 präsentieren wir eine *Subgradienten-Methode* zur Lösung von SNDP im Bereich von LTL-Operationen, entwickelt von Farvolden und Powell (1994). Dieses Lösungsvorgehen benutzt einen *primalen Partitioning-Algorithmus* und Zerlegungstechniken von Farvolden u. a. (1993) zur Bestimmung einer optimalen Lösung für das Routingproblem.

Aufbauend auf den durch die obigen Lösungsmethoden festgelegten Services müssen anschließend regelmäßige Fahrerrouuten gebildet werden. Diese Fahrerrouuten sollen sich jede Woche wiederholen, wobei alle geplanten Services abgedeckt und gesetzliche Arbeitszeitregelungen eingehalten werden müssen. Im Gegensatz zur europäischen Speditionsbranche können die Fahrer verschiedenen LKW zugeordnet werden.²⁴ Zur Lösung dieses Planungs-

²⁴Europäische LDL kaufen meistens die Durchführung der Transporte bei ans Unternehmen gebundenen

problems schlagen Crainic und Roy (1992) in ihrer Arbeit einen Ansatz vor, der häufig in dem sehr verwandten Problem des *Airline-Crew-Scheduling*²⁵ vorkommt. Dabei handelt es sich um eine Set-Covering-Formulierung, welche mit Column-Generation-Techniken gelöst wurde. Eine vereinheitlichte Formulierung für jegliche Routing- and Scheduling-Probleme und ein Column-Generation-Lösungsvorgehen wird in Desaulniers u. a. (1998b) vorgestellt.

4.3.1 Problembeschreibung

Die Fernverkehrsspeditionen in Nordamerika können, im Gegensatz zu Europa, 60-Tonnen-LKW verwenden, welche Ladungen bis zu 23 Tonnen, abhängig von deren Dichte laden können (Delorme u. a. (1988)). Die Güter können dabei in ihrer Größe, Gewicht und anderen Kriterien variieren, allerdings wird Homogenität angenommen. Normalerweise befördern LTL-Speditionen in Nordamerika Ladungen zwischen 45 und 4500 kg (vgl. Powell und Sheffi (1983)). Deswegen konsolidieren diese Speditionen ihre Güter, indem Hubs und Depots eingesetzt werden. In Kanada findet man auch Depots, die beide Funktionen ausführen (vgl. Delorme u. a. (1988) und Roy und Crainic (1992)). Fernverkehrstransporte finden normalerweise über Nacht statt, damit die Auslieferung am Morgen durchgeführt werden kann.²⁶

Im Gegensatz zu den schon beschriebenen Planungsproblemen können in diesem Fall die meisten Güter aufgrund der Geschwindigkeitsbeschränkungen für LKW nicht von einem Tag zum anderen von ihrem Ausgangsdepot zu ihrem Bestimmungsdepot befördert werden. Dadurch weist der Planungshorizont mehrere Tage auf. Somit müssen verschiedene Perioden in das Modell integriert werden. Ladungen mit geringem Volumen können dabei mehrere Hubs passieren, bevor sie an ihrem Bestimmungsdepot ankommen. Weiterhin müssen Services zwischen den Depots und ihrem nächstgelegenen Hub mindestens einmal am Tag angeboten werden. Diese Art von Service wird manchmal auch *primary service* genannt (vgl. Cheung und Muralidharan (2000)). Solche Hauptservices operieren ohne Rücksicht darauf, ob ein LKW ausgelastet ist oder nicht. Das Problem selber ist charakterisiert durch eine große geographische Fläche. In dieser Planung soll über die Services zwischen den Depots und den Hubs sowie über das Routing der Güter entschieden werden.

Alle Güter mit demselben Ausgangs- und Bestimmungsdepot und dem gleichen speziellen Liefertag werden zusammen in einen Auftrag gefasst. Dadurch erhält jeder Auftrag einen bestimmten Liefertag zugeordnet. Sollte ein Auftrag zu spät oder zu früh an seinem Bestimmungsdepot ankommen, fallen Strafkosten an.

Im Ferngüterverkehr wird die Ware vom Ausgangsdepot mit einem Service zum Hub befördert. Am Hub werden die Güter sortiert und danach zum Bestimmungsdepot transportiert. Nach Powell (1986) sind Services zwischen Depots sehr selten und können als Ausnahme gehandelt werden. Somit müssen in diesem Planungsproblem nur Hubrouten berücksichtigt werden, wobei jedoch Services zwischen den Hubs auf den Servicerouten erlaubt sind. Die Anzahl von gegebenen Depots und Hubs in solchen Netzwerken ist sehr groß. Dies führt zu einer Vielzahl von möglichen Services und Servicerouten.

Subunternehmern. Diese Subunternehmer sind zumeist Ein-Mann-Unternehmen mit einem Fahrzeug.

²⁵Der Aufsatz von Barnhart u. a. (2003) stellt unter anderem die einzelnen Planungsprobleme von Airlines vor. Einen Überblick über *Airline-Crew-Scheduling* ist in der Arbeit von Desaulniers u. a. (1998a) zu finden.

²⁶Für eine detaillierte Beschreibung der gesamten Transportkette verweisen wir auf Roy und Crainic (1992) oder Delorme u. a. (1988).

Im Unterschied zu dem generischen SNDP müssen Services keine Touren bilden. Dadurch kann ein Ungleichgewicht von Containern und LKW an Depots entstehen. Den Ausgleich von Fahrzeugen modellieren Farvolden und Powell (1994) als ein Minimum-Netzwerkflussproblem, welches unabhängig gehandhabt werden kann. Deswegen ist die Bildung von Servicerouten nicht notwendig, da alle Anforderungen mithilfe von Services formuliert werden können. Zusätzliche Restriktionen werden in diesem Problem nicht modelliert.

Dieses Modell soll festlegen, welche Services aus der Menge der möglichen Services gefahren werden und wie die Güter über diese Services geroutet werden. Im nordamerikanischen Speditionsgewerbe wird das Ergebnis *Ladeplan* genannt. Das Ziel ist, einen kostenminimalen Ladeplan zu finden, in welchem Servicekosten und Strafkosten berücksichtigt sind.

4.3.2 Eine Subgradienten-Lösungsmethode

Die grundlegende Idee hinter der Veröffentlichung von Farvolden und Powell (1994) ist, dass die Auswirkung einer Änderung der Menge von Services durch die Dualvariablen des Routing-Problems abgeschätzt werden kann. Deswegen wird eine Dekomposition eingesetzt, welche zwischen den zwei Entscheidungsvariablen alterniert. Sobald die Designvariable festgelegt ist, müssen nur die Wege der Ladungen bestimmt werden, um das Problem zu lösen. Dieses Routing-Problem kann als MCNF-Problem (siehe Abschnitt 3.4.1) über ein dynamisches Netzwerk (siehe Abschnitt 3.2) modelliert werden. Die Dualvariablen der optimalen Lösung des MCNF-Problems können dann dazu benutzt werden, kostengünstigere Services zu identifizieren. Diese Services reduzieren entweder die Kosten für das Routing der Ladung und/oder die Fixkosten für den Betrieb der Services. Daraus ergibt sich dann eine neue Menge an festgelegten Services.

Die Vorgehensweise basiert auf einer dynamischen Formulierung des SNDP (siehe Kapitel 3.3) mit nur zwei Nebenbedingungen: die Kapazitätsrestriktion für jeden Service und die Flusserhaltung in jedem Knoten.

Die Zeitplanung ist als deterministisches Zeit-Raum-Netzwerk modelliert. Das Netzwerk besteht aus zwei Typen von Knoten und drei Typen von Kanten. Erwähnenswert ist der zweite Typ von Knoten und der dritte Typ von Pfeilen. Diese sind zusätzlich zu Standard Zeit-Raum-Netzwerken notwendig, um die Serviceanforderung der Kunden bzgl. Lieferzeitpunkt und somit den Liefertag am Bestimmungsdepot abzubilden. Die Knoten werden *Superknoten* genannt, und jeder dieser Knoten entspricht genau einem Depot. Diese Superknoten beschreiben Bedarfsknoten, in denen alle Lieferungen münden. Um diese Superknoten mit den Depotknoten (Knoten, welche ein Depot zu einem Zeitpunkt repräsentieren) zu verbinden, werden für jedes Depot zwischen seinen Depotknoten und dem Superknoten Pfeile eingefügt. Diese Pfeile werden als *Superpfeile* bezeichnet und haben spezielle Strafkosten, welche eine pünktliche Lieferung erzwingen sollen. Die Kapazitätsbedingungen werden auf den Servicepfeilen des Zeit-Raum-Netzwerkes angetragen. Die Kapazitätsbedingung eines Servicepfeils wird aus der Anzahl der geplanten Services zwischen zwei Depots zu spezifischen Zeitpunkten errechnet. Farvolden und Powell (1994) geben keine Auskunft, wie diese Zeitpunkte gewählt sind.

Das Lösungsvorgehen (siehe Abbildung 4.5) startet mit einer fixierten Menge an Services. Diese Services bilden ein Service-Netzwerk, über das die Güter geroutet werden sollen. Das resultierende MCNF in Pfad-Formulierung wird mithilfe eines primalen Partitioning-

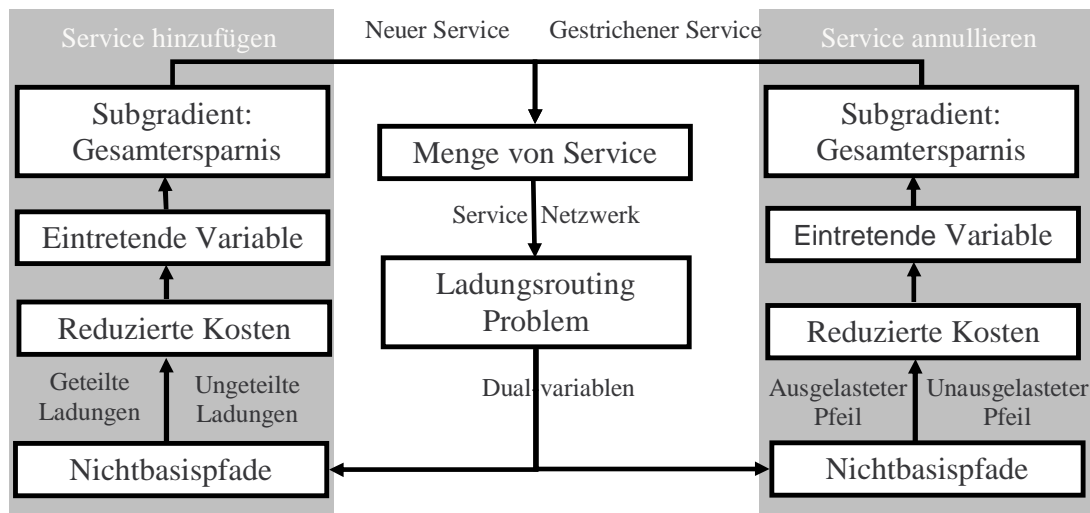


Abbildung 4.5: Überblick über das Lösungsvorgehen für LTL Operationen in Nordamerika

Algorithmus, welcher auf dem revidierten Simplex beruht, gelöst. Dieser Algorithmus von Farvolden u. a. (1993) nutzt typische Eigenschaften der Güterdistribution aus:

- Güterflüsse nehmen den kostenminimalen Pfad, bis ein Pfeil an der Kapazitätsgrenze angekommen ist. Die restliche Menge der Ladungen wird dann über den nächsten kostenminimalen Pfad geroutet.
- Nur ein kleiner Anteil an Ladungen wird über verschiedene Pfade transportiert.

Die Basis der LP-Lösung des MCNF-Problems kann wie in Abbildung 4.6 aufgeteilt werden. Die Variablen werden in drei Gruppen eingeteilt - alle Variablen mit ungeteilten Ladungen, alle Variablen mit geteilten Ladungen und die Schlupfvariablen. Die Nebenbedingungen sind ebenso in drei Gruppen aufgeteilt - alle Flusserhaltungsbedingungen mit ungeteilten Ladungen, alle Kapazitätsrestriktionen mit nicht bis zur Kapazitätsgrenze ausgelasteten Pfeilen und alle restlich verbleibenden Nebenbedingungen. Durch diese Aufteilung wird eine Arbeitsbasis namens P isoliert, welche Variablen und Nebenbedingungen mit Optimierungspotential darstellt. Die Variablen der geteilten Ladungen sind die Spalten von P . Die Zeilen von P werden aus den Flusserhaltungsbedingungen für geteilte Ladungen und den nicht voll ausgelasteten Pfeilen der Kapazitätsbedingungen gebildet.

Mit dieser Aufteilung können die Dualvariablen mit weniger Aufwand kalkuliert werden, da nur ein kleiner Teil der Matrix, nämlich P , multipliziert werden muss. Dadurch konnte die Lösungszeit deutlich verringert werden. Die Dualvariablen werden dann herangezogen, um verbesserte Services zu identifizieren. Es gibt zwei Wege, die Menge der Services zu verändern: Entweder werden neue Services der Menge hinzugefügt oder schon existierende Services aus der Menge annulliert oder gestrichen.

In beiden Fällen (siehe Abbildung 4.5) müssen zuerst neue Nichtbasispfade (Nichtbasisvariablen) für die Routings der Ladungen generiert werden. Falls ein neuer Service hinzugefügt werden soll, muss dafür ein Kürzestes-Wege-Problem gelöst werden. Sollte ein Service annulliert werden, müssen die Pfade durch Schnittungleichungen wieder verknüpft werden. Danach können die reduzierten Flusskosten für diese Nichtbasispfade mithilfe der Dualvariablen kalkuliert werden. Die Kalkulation richtet sich danach, welcher der zwei

Ungeteilte Ladungen	Geteilte Ladungen	Schlupfvariablen	
	0	0	Flusserhaltung für ungeteilte Ladungen
	P	0	Flusserhaltung für geteilte Ladungen
		0	Kapazitätsbed. für ausgelastete Kanten
		0	Kapazitätsbed. für nicht ausgelastete Kanten

Abbildung 4.6: Partitioning-Matrix der Basis

Fälle vorhanden ist und ob geteilte bzw. ungeteilte Ladungen und volla ausgelastete Pfeile oder Pfeile mit noch vorhandener Kapazität vorhanden sind. Die reduzierten Kosten der in die Basis kommenden Variablen zeigen die Veränderung in der Zielfunktion an. Der Nichtbasispfad mit den kleinsten reduzierten Kosten tritt dabei als nächster Kandidat in die Basis ein. Um jedoch die wirkliche Kostenveränderung in der Zielfunktion abschätzen zu können, müssen nicht nur die veränderten Kosten für die Routings der Ladungen einkalkuliert werden, sondern es müssen auch die Veränderungen in den Fixkosten beachtet werden. Die gesamten Kostenersparnisse werden dann in einem Subgradient bestimmt. Für den Fall, dass ein neuer Service aufgenommen wird, sind die Kostenersparnisse die Differenz zwischen den Fixkosten für den neuen Service und den Ersparnissen durch die reduzierten Flusskosten. Der Subgradient bzw. die gesamten geschätzten Kostenersparnisse für den anderen Fall lassen sich aus der Differenz zwischen den Fixkostenersparnissen und den zusätzlichen Kosten für die Umleitung der Flüsse über die neuen Pfade errechnen.²⁷

Diese Subgradienten spiegeln die Profitabilität für das Hinzufügen oder Annullieren von Services wieder und stellen dadurch eine Identifikationsmöglichkeit von verbesserten Services bereit. Als Ergebnis erhält man eine neue Menge von fixierten Services und eine neue Iteration kann beginnen.

4.4 LTL-Operationen in einem multimodalen Netzwerk in Europa

Gütertransporte in Europa sind generell gekennzeichnet durch eine Planung auf nationaler Ebene. Das bedeutet, dass die taktische Planung für jedes Land oder für jede Region separat durchgeführt wird. Innerhalb eines Landes werden die internationalen Sendungen an ein *internationales Hub* transportiert, wo sie sortiert und nach ihrem Bestimmungsland gebündelt werden. Von dort werden sie in das dortige internationale Hub befördert. Die internationalen Hubs dienen als Eintritts- und Austrittspunkte für die nationalen Netze.

²⁷ Alle mathematischen Schritte für dieses Vorgehen und die Ergebnisse können in Farvolden und Powell (1994) nachgelesen werden.

In Jansen u. a. (2004) wird ein multimodales Transportsystem der Deutschen Post World Net in Deutschland behandelt. Die Güter können entweder mit dem Zug und/oder mit dem LKW transportiert werden (siehe dazu Kapitel 4.4.1). Zur Lösung des Planungsproblems wurde eine Dekomposition mit sechs Teilproblemen implementiert, welches in Kapitel 4.4.2 detailliert beschrieben ist.

4.4.1 Problembeschreibung

Normalerweise sollten in den nationalen Transportsystemen in Europa die Sendungen innerhalb von 24 Stunden bei ihren Empfängern angekommen sein. In diesem Planungsproblem ist jedoch auch eine 48-Stunden-Belieferung möglich. Dadurch können Aufträge mit verschiedenen Lieferzeitpunkten zusammen befördert werden. Die Aufträge sind in Container-Einheiten gegeben und enthalten die bevorzugte Transportmittelwahl. Die Container können entweder mit LKW und/oder Zug transportiert werden. Für den Transport über die Schiene bedient sich die Deutsche Post World Net der Dienste des LDL Deutsche Bahn AG. Somit steht dem Planer der Zugfahrplan mit allen Haltestationen und Zeitpunkten zur Verfügung und ist damit nicht Bestandteil der Planung. Jeder Auftrag hat eine früheste Pickup- und eine späteste Lieferzeit gegeben.

Aus der Sicht der Planung müssen legale und soziale Anforderungen berücksichtigt werden. Dies liegt vor allem an dem Faktum, dass die Fahrzeugflotte ausgegliedert ist und die meisten Fahrer ihre LKW selber besitzen. Deswegen kann Fahrer und Fahrzeug als eine Einheit angesehen werden. Dadurch sind Anforderungen wie Fahrzeitbeschränkungen in das Modell zu integrieren. Eine genaue Fahrer- und Fahrzeugeinsatzplanung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Planung.

Weiterhin muss jeder LKW nach spätestens fünf Tagen zu einem der Heimatdepots zurückkehren. Somit können für den Frachtführer, falls er mehrere Standorte in verschiedenen Städten mit Depots des LDL hat, innerhalb der Planung der Tour seine LKW an einem dieser Depots enden.

In diesem Planungsproblem müssen Entscheidungen aus allen vier Entscheidungsgruppen, definiert in Abschnitt 2.3.2.2, getroffen werden.

Da die Aufträge in Container-Einheiten gegeben sind, macht es keinen Sinn Hubs zur Konsolidierung der Straßentransporte heranzuziehen. Daraus ergibt sich, dass nur Direkt-routen geplant werden müssen. Für Aufträge, welche über die Schiene transportiert werden, müssen die Straßenfeedertransporte von und zu den Bahnhöfen durchgeführt und bestimmt werden (siehe Abbildung 4.7). Daraus folgt, dass zusätzliche Straßenaufträge generiert werden. Die Direkttrouten können aus Feedertransporten, Auftragstransporten und Leerfahrten bestehen. Leerfahrten sind manchmal aufgrund der Anforderung der Bildung von Touren notwendig. Dies wird in diesem Modell in der Art und Weise abgebildet, dass mehrere Routen eine Tour bilden müssen und eine Tour mehrere Tage dauern kann.

Abbildung 4.7 zeigt ein Beispiel eines solchen Netzwerkes mit verschiedenen Depots und Bahnhöfen. Eine Möglichkeit einer Serviceroute ist z. B. von Depot 1 zu Bahnhof a und von dort über Depot 2 zu Depot 3 und wieder zurück zu Depot 1. Die Anzahl der Stopps innerhalb einer Serviceroute ist unbeschränkt. Jedoch darf eine Route nur gewisse machbare Zeitrahmen (Zeitfenster und Fahrzeit) und Distanz benötigen. Um die mögliche Fahrzeit zu verlängern, müssen zwei Fahrer je LKW eingesetzt werden.

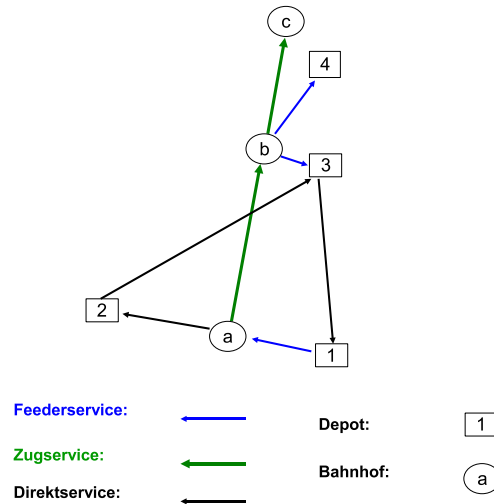


Abbildung 4.7: Beispiel für LTL in einem multimodalen Netzwerk

Weitere zusätzliche Bedingungen zu dem generischen SNDP sind begrenzte Sortierkapazitäten in Depots und die Repositionierung leerer Container. Innerhalb Deutschlands herrscht ein unausgewogenes Verhältnis von Gütertransporten, deswegen müssen Container ausgeglichen und somit leer transportiert werden. Dieser Umstand kommt in vielen Ländern vor.

Das Ziel des Planungsproblems ist, eine kostenminimale Menge an Services, Feedertransporten und Leerfahrten zu erhalten. Die Transportkosten sind als nichtlineare Tarife gegeben. Der Fokus dieser Planung ist jedoch nicht taktisch, sondern operativ ausgerichtet. Das bedeutet, dass die Aufträge wirklich vorhanden sind und alle Aufträge mit Pickupzeitpunkt innerhalb eines frei wählbaren Planungshorizontes in die Planung mit einbezogen werden sollen. Der Planungslauf wird einmal täglich durchgeführt. Somit sollte das Lösungsvorgehen eine maximale Laufzeit von wenigen Minuten haben. Wir haben dieses realistische Problem in den Literaturüberblick über taktische Planung für Güterferntransporte aufgenommen, da ähnliche Entscheidungen wie in dem spezifischen Problem in dieser Arbeit getroffen werden.

4.4.2 Ein iterativer Dekompositionsansatz

Der Fokus des Lösungsvorgehens von Jansen u. a. (2004) liegt in der Zerlegung des Problems in eine Anzahl von Teilproblemen. Der hybride Lösungsalgorithmus läuft iterativ durch die Dekomposition und kann jederzeit gestoppt werden. Eine Teillösung steht dann zur Verfügung.

Insgesamt besteht der iterative Algorithmus, wie in Abbildung 4.8 ersichtlich, aus sechs Teilproblemen. Im ersten Schritt, dem *Transportmittelwahl-Teilproblem*, muss für alle Aufträge mit der Präferenz Schienentransport - genannt *Zugaufträge* - das Transportmittel festgelegt werden. Die Bestimmung wird durch eine Zuordnung der Zugaufträge zu spezifischen Zügen mittels einer First-Fit-Strategie durchgeführt. Zugaufträge mit der längsten Distanz erhalten Priorität. Für alle zugeordneten Zugaufträge müssen Feedertransporte ausgeführt werden. Diese neuen Feederaufträge mit den benötigten Zeitfenstern werden der Menge der *Straßenaufträge* hinzugefügt. Dieser Planungsschritt wird nur einmal am

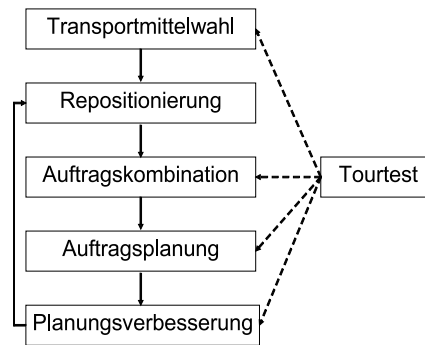


Abbildung 4.8: Ein iterativer Dekompositionsansatz für das multimodale Netzwerk (vgl. Jansen u. a. (2004))

Anfang des gesamten Planungslaufes ausgeführt.

Eine komplette Separation in zwei Planungsprobleme - wie in dem Expresslieferproblem und dem Briefflugnetzwerk - ist nicht sinnvoll, da für Aufträge, welche mit dem Zug befördert werden, Feedertransporte von und zu den Bahnhöfen nötig sind. Dadurch erweitert sich die Menge der Straßenaufträge, und die zusätzlichen Feedertransporte sollten zusammen mit den anderen Straßenaufträgen geplant werden.

Das Lösungsverfahren des zweiten Schrittes löst das *Repositionierungsproblem von Containern*. Das Planungsproblem kann folgendermaßen beschrieben werden: An jedem Depot muss die Menge der leeren Container zwischen festgelegten Grenzen sein. Unglücklicherweise ist der Güterfluss in Deutschland nicht gleich verteilt und dadurch müssen leere Container verlagert werden. Dieses Repositionierungsproblem wird als kostenminimales Netzwerkflussproblem, basierend auf einem Zeit-Raum-Netzwerk, modelliert. Dieses Netzwerkflussproblem wird durch den Algorithmus *cs2* von Goldberg (1997) gelöst. Als Ergebnis erhält man eine neue Menge von Aufträgen - die *Leercontaineraufträge* - und diese werden der Menge der Straßenaufträge hinzugefügt.

Im dritten Schritt wird der Umstand ausgenutzt, dass jeder LKW genau zwei Container befördern kann. In diesem Teilproblem muss die Menge der unverplanten Straßenaufträge in Paare eingeteilt werden. Diese Paare sind der Input zur *Auftragsplanung*, welche zuerst versucht, Kombinationen von Aufträgen den Routen zuzuordnen. Deshalb ist die *Auftragskombination* sehr wichtig für die Lösungsqualität der Auftragsplanung. Das Problem Aufträge zu Paaren zu gruppieren wird als *gewichtetes Matchingproblem* mit dem Ziel der Maximierung der gesamten Ersparnisse modelliert. Für die Bestimmung der optimalen Lösung für das Matchingproblem wurde das Verfahren von Gabow (1973) implementiert.

In der Auftragsplanung werden Servicerouten erweitert oder neue generiert; die noch zu verplanenden Aufträge und Kombinationen von Aufträgen werden diesen Servicerouten zugeordnet. Die Routen müssen dabei Zeit- und Kapazitätsbedingungen berücksichtigen. Der Auftragsplanungsalgorithmus basiert auf zwei Phasen. In der ersten Phase ist eine routenorientierte Planungsmethode aufgesetzt, die von einer auftrags- und routenorientierten Planungsmethode in der zweiten Phase gefolgt wird. Abbildung 4.9 gibt einen Überblick über die zwei Planungsphasen.

In der ersten Phase werden Aufträge schon existierenden Servicerouten zugeordnet. Dafür werden die Fahrzeuge für die existierenden Routen nach bestimmten Prioritäten sortiert. Die Kombination von Aufträgen bzw. die Aufträge werden nach ihrer Pickupzeit priorisiert. Mit Hilfe einer First-Fit-Strategie werden die Aufträge dann zu den Servicerouten

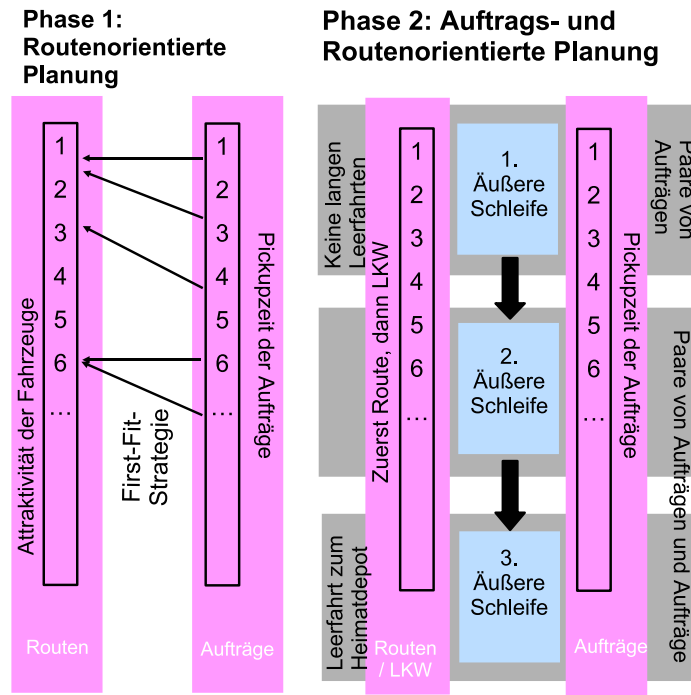


Abbildung 4.9: Zwei Phasen der Auftragsplanung

allokiert.

Der auftrags- und routenorientierte Planungsansatz in Phase zwei wurde in äußere und innere Schleifen eingeteilt. Es gibt drei äußere Schleifen, die jeweils die gleichen inneren Schleifen durchlaufen (siehe Abbildung 4.10). Die äußeren Schleifen bestimmen, welche Art von Aufträgen zu den Servicerouten bzw. Fahrzeugen zugeordnet und welche Art von Servicerouten generiert oder erweitert werden dürfen. Die Zuordnung selber wird in den inneren Schleifen durchgeführt. Ein Überblick wird in Abbildung 4.10 gegeben. Hier alterniert der Algorithmus zwischen der Zuordnung eines ungeplanten Auftrages zu einer Route und der Erweiterung genau dieser Route. Ungeplante Aufträge oder Paare von Aufträgen werden in maximal drei Schritten verplant. Als erstes sucht der Algorithmus innerhalb existierender Servicerouten nach freien Strecken, ohne dabei den Weg der Serviceroute verändern zu müssen. Falls keine passende Route gefunden wurde, läuft der Algorithmus im zweiten Schritt nochmals durch die Liste der existierenden Servicerouten und versucht den Auftrag zu einer Route mit einer Best-Fit-Strategie zuzuordnen. In diesem Schritt kann die Serviceroute um den zusätzlichen Service durch den neuen zuzuordnenden Auftrag erweitert werden. Falls dann immer noch keine passende Serviceroute gefunden werden konnte, wird im dritten Schritt eine neue Route generiert. Danach wird versucht, zur soeben erweiterten oder neuen generierten Serviceroute, weitere ungeplante Aufträge und Kombination von Aufträgen zuzuordnen. Dadurch kann der Gesamtplan verbessert werden. Ein Auftrag, der die gleiche Richtung wie der zugordnete Auftrag hat, ist ein Beispiel für einen solchen gesuchten Auftrag. Somit sind hier sehr einfache Heuristiken zur Generierung von Servicerouten implementiert.

Im letzten Teilproblem *Planungsverbesserung* wird versucht, den resultierenden Plan durch die Verschiebung von Aufträgen und Services mithilfe von drei unterschiedlichen Local-Search-Verfahren zu verbessern. Diese Heuristiken nutzen dabei operationale Eigenschaften aus, wobei jede verschiedene Arten von Ausgangslösungen benutzt.

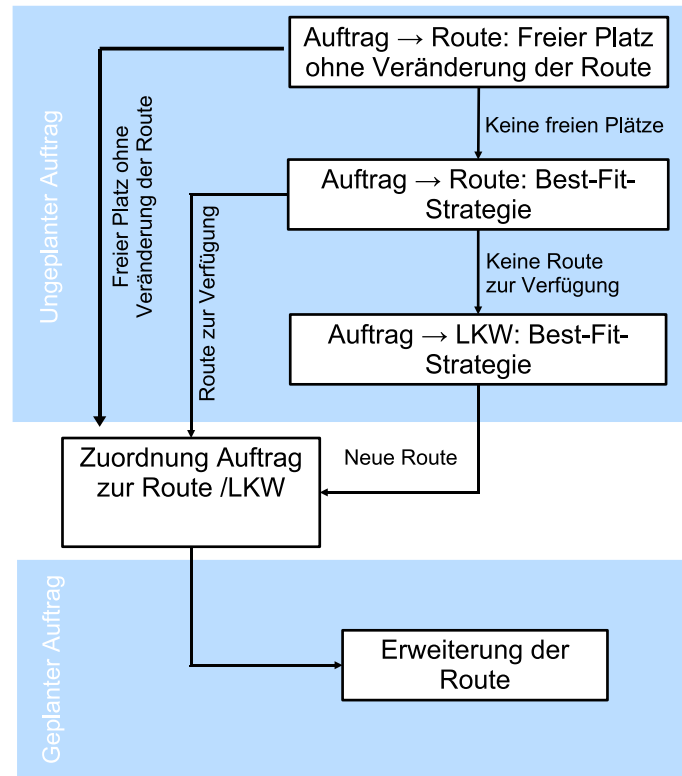


Abbildung 4.10: Innere Schleifen der Auftragsplanung

Im *Tourtest* werden Restriktionen evaluiert und Ankunfts- und Abfahrtszeit zusammen mit den Kosten errechnet. Dadurch, dass dieses Teilproblem sehr oft aufgerufen wird, ist eine sehr kurze Laufzeit zwingend erforderlich.

Am Ende von jeder Iteration steht ein Plan mit generierten Routen und den zugeordneten Leercontainer-, den Feeder- und den Straßentransporten zur Verfügung. Der Zeitplan der Routen wird durch die zugewiesenen Aufträge festgelegt. Jeder Auftrag hat ein Zeitfenster, welches berücksichtigt werden muss. Alle diese Zeitfenster bilden die Basis für die Kalkulation der Abfahrts- und Ankunftszeiten an den Depots.

Aufgrund des gesamten Lösungsvorgehens kann der Planer den Algorithmus nach jeder Iteration anhalten und erhält einen machbaren Teilplan. Jansen u. a. berichten, dass die Laufzeiten zwischen einigen Minuten und 15 Minuten in den Hauptbelastungszeiten liegen.

4.5 LTL-Operationen in einem Straßennetzwerk in Europa

Wlcek (1998) betrachtet in seiner Arbeit ein Straßennetzwerk in Deutschland, beschrieben in Abschnitt 4.5.1, und schlägt einen sequentiellen Dekompositionsalgorithmus (siehe Abschnitt 4.5.2) vor.

4.5.1 Problembeschreibung

In Wlcek (1998) werden die Güter im Fernverkehr durch LKW befördert und der LDL bietet seinen Kunden einen 24-Stunden-Service an. In diesem Planungsproblem wird von einer homogenen unbeschränkten Fahrzeugflotte ausgegangen, wobei jedes Fahrzeug maximal zwei Container transportieren kann. Die Aufträge sind in Transporteinheiten gegeben und füllen normalerweise keinen kompletten Container. Der Container wird an den Depots und Hubs mit den Gütern be- und entladen. Ferner sind an den Depots Pickup- und Deliveryzeitfenster gegeben.

Die Aufträge sind meistens so klein, dass direkte Straßentransporte ineffizient sind. Dadurch erhalten wir hier eine Besonderheit. Drei verschiedene Konsolidierungsmaßnahmen sind in diesem Planungsproblem möglich: Containerkonsolidierung, Beiladung und die Konsolidierung über Hubs (siehe Abschnitt 2.2.2). Für die Hubkonsolidierung stehen zwei verschiedene Typen von Hubs zur Verfügung: Regionalhubs und ein Zentralhub.

Zusätzlich zum generischen SNDP (siehe Abschnitt 3.3) muss hier eine dritte Entscheidung getroffen werden. Es reicht nicht zu wissen, über welche Services die Güter befördert werden, sondern die TE müssen auch Containern zugeordnet sein. Eine Repositionierung der Container, wie beschrieben in Unterkapitel 4.4, ist jedoch nicht notwendig, da dieses Teil der operativen Planung ist. Die Umlaufbildung ist jedoch Bestandteil dieses Planungsproblems und ein LKW muss nach spätestens zwei Tagen zu seinem Heimatdepot zurückkehren.

In diesem Modell werden zwei Typen von Routen berücksichtigt: Direkt- und Hubrouten mit maximal vier Services. Aus den gleichen Gründen, wie oben beschrieben, müssen die Anforderungen von beschränkten Fahrzeiten und Zeitfenstern in die Routen integriert werden.

Wie in Abschnitt 4.4 werden Touren zur Modellierung des Ausgleichs der Fahrzeuge gebildet. Unter gewissen Umständen können dabei Leerfahrten notwendig sein. Diese können besonders sinnvoll sein, wenn dadurch aus zwei Routen eine Route gebildet werden kann. Grundsätzlich ist es erlaubt, Rundläufe, 2-Tages-Umläufe und 2-Tages-Umläufe mit einer Leerfahrt zu bilden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Das Ziel dieser Planung ist eine kostenminimale Menge an Services und einen Transportplan für die Aufträge zu generieren. Nichtlineare Transportkostentarife und Frachtschlagskosten müssen dabei berücksichtigt werden.

Wlcek entwickelte ein Lösungsvorgehen für das strategische Planungsproblem eines Speditionsnetzwerkes. Innerhalb dieses Verfahrens musste eine Abschätzung der Transportkosten durchgeführt werden. Dadurch war er gezwungen, Services zwischen Hubs und Depots zu planen. Er erweiterte diesen Ansatz auf die taktische Planung. Somit ist der Fokus dieses realistischen Planungsproblems mehr strategischer Art.

4.5.2 Ein sequentieller Dekompositionsansatz

Die Idee dieses Lösungsvorgehens ist eine sequentielle Zerlegung in Teilprobleme mit zwei Konsolidierungsschritten und einem Routengenerierungsschritt. Der begrenzende Faktor in allen Teilproblemen ist die Fahrzeit mit den dazugehörigen Zeitfenstern. Aufgrund der Konsolidierung wird der zur Verfügung stehende Zeitrahmen in jedem Teilproblem verkleinert und Optimierungspotential geht dadurch verloren bzw. wird eingeschränkt. Deswegen

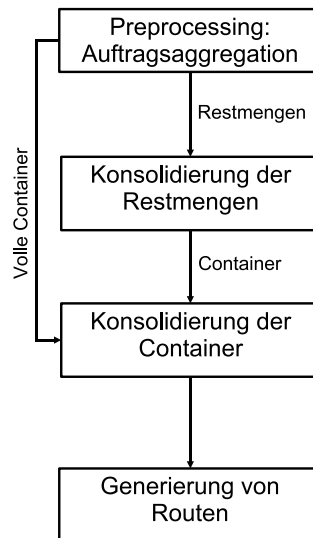


Abbildung 4.11: Lösungsvorgehen für das Straßennetzwerk

sollte in den ersten zwei Teilproblemen auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Ersparnissen aufgrund von Konsolidierung und der Reduzierung des Zeitrahmens geachtet werden.

Ein Überblick über das gesamte Lösungsvorgehen ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Zuerst startet der Algorithmus mit einem Preprocessing-Schritt. Der Bedarf der verschiedenen Commodities, welcher in TE gegeben ist, wird zu Containern bzw. zu einer Containermenge aggregiert. Die *Restmengen*, welche keinen Container füllen, müssen in dem Schritt *Konsolidierung der Restmengen* weiter konsolidiert werden. Die vollen Container sind Input in den Schritt *Containerkonsolidierung*.

Im ersten Teilproblem Konsolidierung der Restmengen müssen die Restmengen aller Commodities in einer kosteneffizienten Art gruppiert und zu Containern zugeordnet werden. Dazu müssen adäquate Konsolidierungspunkte für die Hubkonsolidierung und Beiladung gefunden werden. Um diese Konsolidierungspunkte erreichen zu können, müssen Umwege bei der Bildung der Routen in Kauf genommen werden. Diese Zusatzkosten müssen gegen die Kostenersparnisse durch die höhere Auslastung der Container gerechnet werden. Die Lösungsheuristik dieses Teilproblems ist in zwei Phasen aufgebaut: In der ersten Phase wird eine Anfangslösung erzeugt, welche in der zweiten Phase mithilfe eines Local-Search-Verfahrens verbessert wird.

In der Initialisierungsphase wird zuerst der Güterflusspfad für die Restmengen bestimmt. Falls die zu transportierende Menge je Commodity groß genug ist, werden diese TE direkt befördert. Ansonsten erfolgt eine Konsolidierung über ein Regionalhub oder den Zentralthub, welche von der einzelnen Commodity abhängt. Falls das Ausgangs- und Bestimmungsdepot einer Commodity in der selben Region liegt, wird über das Regionalhub konsolidiert. Zweitens müssen die TE Containern oder einer Serie von Containern, welche dem geforderten Güterflusspfad folgen, zugeordnet werden. Dieses Problem modelliert Wlcek als Kürzeste-Wege-Problem mit Nebenbedingungen, welches durch die Anwendung eines Markierungsalgorithmus gelöst wird. Im Anschluss müssen die Zeitfenster für die Container unter Berücksichtigung der TE und deren Zeitfenster neu berechnet werden.

Für die Verbesserungsphase der Konsolidierung der Restmengen wurde eine iterative Local-Search-Heuristik implementiert. Die Idee dahinter ist, dass Kostenersparnisse nur durch die Annullierung von Containertransporten freigesetzt werden können. Dieses kann erreicht werden, indem die TE eines Containers in einen anderen Container, der dem gleichen Güterflusspfad folgt oder dessen Güterflusspfad verändert werden kann, transferiert werden.

Im zweiten Teilproblem werden die Container zu Services konsolidiert. Somit besteht das Problem darin, eine kostenminimale Kombination von Containern zu finden, welche dann den Services zugeordnet werden können. Der Lösungsalgorithmus für dieses Teilproblem ist dem aus der Konsolidierung der Restmengen sehr ähnlich. Der einzige Unterschied liegt in der Initialisierungsphase. Die Transportpfade für die Container werden immer als direkte Transporte bestimmt.

Im dritten und letzten Teilproblem, der *Routengenerierung*, müssen die Services zu Servicerouten verplant werden. Das Ziel der Planung ist, einen kostenminimalen Fahrplan für die Servicerouten unter der Bedingung, dass alle Services zugeordnet sind, zu finden. Dieses Problem kann als Set-Partitioning-Modell formuliert werden. Jeder Service repräsentiert eine Zeile in dem Modell und jede Spalte steht für eine Route mit möglichen Kombinationen von Transporteinheiten. Die Servicerouten mit den dazugehörigen Services werden mithilfe eines heuristischen, expliziten Column-Generation-Verfahrens generiert. Zur Verbesserung der Kombinationen wurde ein genetischer Algorithmus implementiert.

Der Fahrplan für die Routen wird dann unter der Berücksichtigung der Zeitfenster der Container und somit der TE kalkuliert.

Tests mit Echtdateien eines LDL haben gezeigt, dass die Längen der Routen des Lösungsverfahrens kürzer als die manuell erstellten der Planer sind, jedoch sind die Gesamtkosten in etwa die gleichen. Dies liegt vor allem daran, dass der Planer mehr Rundläufe und weniger 2-Tages-Umläufe bildet. Im Speziellen sind die Testergebnisse für den Schritt der Generierung der Routen sehr unbefriedigend (vgl. Wlcek (1998), S. 192).

4.6 Analyse der Problemstellungen und Lösungsvorgehen

Um die vorgestellten Planungsprobleme und Modellierungsansätze zusammenzufassen, geben wir in Tabelle 4.1 einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften und beschreiben typische Problemgrößen.

Wir starten die Tabelle mit den Problemeigenschaften wie geographische Lage, Gütertypen und Transportmittel. Im Anschluss analysieren wir, wie die Anforderung des Kundenservices in das Problem integriert ist. Die meisten realistischen Planungsprobleme benutzen Zeitfenster an den Depots und diese müssen von den Servicerouten berücksichtigt werden. Farvolden und Powell lassen Verspätung zu, belegen diese aber mit Strafkosten. Weitere wichtige Aspekte in taktischen Planungsproblemen sind, welche Arten von Servicerouten - Hub- und/oder Direkt Routen - erlaubt sind und ob der Ausgleich von Fahrzeugen und somit die Tourbildung berücksichtigt werden muss. Ferner vergleichen wir die Kostentypen in den Zielfunktionen und welche zusätzlichen Nebenbedingungen im Vergleich zum generischen SNDP vorhanden sind.

EIGENSCHAFTEN	[1a]	[1b]	[2]	[3]	[4]	[5]
PROBLEMEIGENSCHAFTEN						
Geographische Lage und Internationalität						
• Kleiner geographischer Bereich			X		X	X
• Großer geographischer Bereich	X			X		
• National	X		X	X	X	X
• International/Interkontinental						
Transportmittel						
• Flugzeug	X		X			
• Zug					X	
• LKW	(X)		(X)	X	X	X
Art der Güter						
• Homogene Güter	X		X	(X)	(X)	X
• Heterogene Güter						
Ausgleich der Fahrzeuge						
• Umläufe/Touren	X					
• Leertransporte/Ferryflüge			X		X	X
Kundenservice						
• 24-Stunden-Service	X		X		X	X
• 48-Stunden-Service oder länger				X	X	
• Zeitfenster	X		X		X	X
• Strafkosten für Verspätungen				X		
Kosten						
• Servicekosten	X		X	X	X	X
• Eigentümerkosten	X					
• Kosten für Ferrytransporte			X			
• Strafkosten für Verspätungen			X			
• Frachtumschlagskosten						X
• Nichtlineare Kosten					X	X
• Kosten für Feedertransporte			X			
Servicerouten						
• Hubrouten	X		X	X		X
• Direkt Routen			X		X	X
• Maximale Anzahl an Services	2		2	unbeschränkt	unbeschränkt	4
Güterflüsse						
• Single-Routing von Aufträgen			X			
• Aufteilung eines Auftrages	X			X	X	X
Zusätzliche Bedingungen zum generischen SNDP						
• Hubkapazität	X					
• Depotkapazität					X	
• Anzahl von Starts und Landungen	X					
• Anzahl von Flugzeugen	X		X			
• Containerausgleich					X	
• Fahrzeit					X	X
• Netzwerkzusammenhang	X					
• Kompatibilität			X			

EIGENSCHAFTEN	[1a][1b]	[2]	[3]	[4]	[5]
PROBLEMINSTANZEN					
• Fahrzeugtypen	7/7	4	1	nicht erwähnt	1
• Hubs	7/7	1	15	nicht erwähnt	2
• Depots	84/101	18		nicht erwähnt	32
		81(BFZ)			
• Commodities	6606/NA	5100	2448	nicht erwähnt	929
betrachtete Referenzen in Tabelle:					
[1a] Barnhart u. a. (2002)		[3] Farvolden und Powell (1994)			
[1b] Armacost u. a. (2002) und (2004)		[4] Jansen u. a. (2004)			
[2] Irnich (2002)		[5] Wlcek (1998)			

Tabelle 4.1: Haupteigenschaften der ausgesuchten Planungsprobleme

Bei den Probleminstanzen untersuchen wir die Anzahl verschiedener Fahrzeugtypen, wie viele Hubs und Depots das Netz aufweist und wie viele Commodities gegeben sind.

In Tabelle 4.2 geben wir einen Überblick über die wichtigsten Komponenten, welche die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Lösungsverfahren aufzeigen.

Scheduling-Aspekt:

Der klassische Ansatz besteht darin deterministische Zeit-Raum-Netzwerke, wie bei Farvolden und Powell (1994), zu bilden. In der Realität sind diese Netzwerke entweder riesig in ihrer Größe oder einzelne Zeitpunkte repräsentieren große Zeitabschnitte. Somit müssen Anstrengungen unternommen werden, um diese Netzwerke zu reduzieren oder noch besser, Zeit-Raum-Netzwerke ganz zu vermeiden. Armacost u. a. (siehe Armacost u. a. (2002) und Armacost u. a. (2004)) und Barnhart u. a. (2002) integrierten den Scheduling-Aspekt in die Servicerouten. In Barnhart u. a. (2002) bilden die Servicerouten die Basis eines reduzierten Zeit-Raum-Netzwerkes, über das die Güterflüsse bestimmt werden. In der Composite-Variable-Formulierung (siehe Abschnitt 4.1.3) wurde ein Ansatz ohne die Benutzung von Zeit-Raum-Netzwerken entwickelt. Dafür wurden die Servicerouten, zusammen mit der Güterflussvariablen, in eine neue Variable kombiniert. Um das Zeit-Raum-Netzwerk loszuwerden, führte Irnich (2002) eine zusätzliche Nebenbedingung in sein Modell ein - nämlich die Kompatibilität von Aufträgen. Armacost u. a. mit ihrer Composite-Variable-Formulierung sowie Irnich berichten von guten Erfolgen mit ihrem Vorgehen. Ein anderer Weg, den Jansen u. a. (2004) und Wlcek (1998) eingeschlagen haben, ist den Fahrplan nach der Zuordnung der Aufträge zu den Servicerouten unter Berücksichtigung der Zeitfenster der Aufträge zu errechnen.

Alle beschriebenen Beispiele reduzieren die Größe ihres Netzwerkes durch Einbeziehung von operativen Charakteristika der Realität. Z. B. sind in dem Expresslieferproblem nur Servicerouten mit maximal zwei Services erlaubt. Andere Beispiele können in den Lösungen für LTL-Operationen oder dem Briefflugnetz nachgelesen werden. Dadurch können die Designalternativen und die daraus entstehenden Zeit-Raum-Netzwerke, falls überhaupt notwendig, reduziert werden.

MODELLE UND LÖSUNGSVERFAHREN	[1a]	[1b]	[2]	[3]	[4]	[5]
SCHEDULING ASPEKT						
Scheduling-Aspekt der Routen oder Services						
• Deterministisches Zeit-Raum-Netzwerk				X		
• Integration in Routen	X	X				
• Reduziertes Zeit-Raum-Netzwerk	X					
• Kompatibilität der Aufträge			X			
• Bestimmt durch die zugeordneten Aufträge					X	X
DEKOMPOSITION UND TEILPROBLEME						
Dekomposition						
• Nach Transportmittel	X	X	X		X	
• Nach Entscheidungsvariable	X			X	X	X
• Iterativ	X		X	X	X	
• Sequentiell		X				X
• Dantzig-Wolfe-Dekomposition			X			
Teilprobleme						
• Mehrgüternetzwerkflussproblem	X			X		
• Set-Partitioning-Modell			X			X
• Set-Covering-Modell		X				
• Netzwerkflussproblem					X	
• Matching-Problem					X	
Mehrgüternetzwerkflussformulierung						
• Pfad-Formulierung				X		
• Baum-Formulierung	X					
SERVICEROUTEN-GENERIERUNG						
Routen-Generierung						
• Explizites Column-Generation	X					X
• Enumerierung		X	X			
• Heuristik					X	
ALGORITHMEN						
Algorithmen						
• Branch-and-Bound		X				
• Branch-and-Price	X		X			
• Branch-and-Price-and-Cut	X		(X)			
• Local-Search-Heuristik					X	X
• Partitioning-Algorithmus				X		
• Subgradient-Algorithmus				X		
• Genetischer Algorithmus						X

MODELLE UND LÖSUNGSVERFAHREN	[1a]	[1b]	[2]	[3]	[4]	[5]
Column-Generation						
• Explizites Column-Generation	X					X
• Implizites Column-Generation	X		X			
• Nach Commodity	X					
• Nach Route			X			
Pricing-Probleme						
• Kürzeste-Wege-Problem	X			X		
• Cliques-Rucksack-Problem			X			
Cut-Generation						
• Explizites Cut-Generation-Verfahren	X					
• Limitiertes Cut-Generation-Verfahren	X					
• Heuristischer Separationsalgorithmus				X		
betrachtete Referenzen in Tabelle :						
[1a] Barnhart u. a. (2002)				[3] Farvolden und Powell (1994)		
[1b] Armacost u. a. (2002) und (2004)				[4] Jansen u. a. (2004)		
[2] Irnich (2002)				[5] Wlcek (1998)		

Tabelle 4.2: Lösungsvorgehen der ausgesuchten Planungsprobleme

Aus den vorgestellten Lösungsansätzen können wir erstens ableiten, dass Planungsprobleme auf eventuell vorhandene Vereinfachungen aufgrund Praxisgegebenheiten untersucht und diese gegebenenfalls implementiert werden sollten. Zweitens sollten Zeit-Raum-Netzwerke, falls möglich, gänzlich vermieden werden. Drittens, falls Zeit-Raum-Netzwerke benötigt werden, sollten Reduzierungstechniken, wie beispielsweise die Knotenkonsolidierung, durchgeführt werden.

Dekomposition und Teilprobleme:

Mehrere Zerlegungsstrategien sind in den Lösungsvorgehen zum Einsatz gekommen. Diese sind stark mit den daraus resultierenden Teilproblemen verknüpft. Somit sind verschiedene Arten von Modellen für die Repräsentation dieser Teilprobleme notwendig. Alle beschriebenen Planungsprobleme, bei denen die Güter über verschiedene Transportmittel befördert werden können, nehmen diesen Aspekt als Möglichkeit das Problem zu zerlegen; z. B. werden in dem Expresslieferproblem oder dem Briefflugnetzwerk nur die Flüge berücksichtigt. Das Design der Feeder- und der Straßentransporte wird in einem separaten Planungsproblem behandelt. Jansen u. a. (2004) haben jedoch Transporte über die Straße und die Schiene in ihrer Planung integriert. Eine komplette Separation in zwei Planungsprobleme ist hierbei nicht sinnvoll, da für die Abwicklung der Zugaufträge LKW-Transporte von und zu den Bahnhöfen notwendig sind. Dieser Umstand wird allerdings von Jansen u. a. als Dekompositionsmöglichkeit ausgenutzt. Daraus können wir ableiten, dass, falls Transportmittel direkte Auswirkungen auf das Planungsproblem haben, wie beispielsweise neue Aufträge, diese mit in die Planung integriert werden sollten. Ansonsten kann es sinnvoll sein, das Problem zu zerlegen und die Teilprobleme separat zu behandeln.

Der iterative Lösungsansatz für das Expresslieferproblem (vgl. Barnhart u. a. (2002)) sowie die Subgradientenmethode für LTL-Operationen in Nordamerika (vgl. Farvolden und

Powell (1994)) setzen ihre Dekomposition auf die Entscheidungsvariablen auf. Sie basieren ihre Lösungsvorgehen auf dem Faktum, dass, wenn die Designvariable fixiert ist, das verbleibende Problem - die Bestimmung der Güterflussvariable - als ein MCNF-Problem modelliert werden kann. Barnhart u. a. (2002) modellierte es in der Baum-Formulierung; Farvolden und Powell (1994) modellierten es in der Pfad-Formulierung.

Irnich (2002) nimmt die Services als Grundlage und wendet eine Dantzig-Wolfe-Dekomposition an, welche auf den Servicerouten basiert. Für diese Art der Dekomposition ist eine Blockstruktur notwendig, die durch die Formulierung des Problems als ein Set-Partitioning-Modell erreicht wird.

Die Basis für die Dekomposition von Jansen u. a. (2004) sind operative Eigenschaften, beispielsweise das Repositionierungsproblem, das als Netzwerkflussproblem modelliert wird, oder die Kombination von Aufträgen zu Paaren, das als gewichtetes Matching-Problem abgebildet wird.

Alle Lösungsvorgehen, außer der Composite-Variable-Formulierung und dem sequentiellen Ansatz von Wlcek, sind iterativ und berücksichtigen Abhängigkeiten zwischen den Teilproblemen. In dem Ansatz von Armacost u. a. sind Wechselbeziehungen zwischen den Variablen nicht notwendig, da in der Composite beide Variablen vereint sind. Das Problem kann dann als ein Set-Covering-Modell formuliert werden. Wlcek benutzt ein sequentielles Vorgehen, welches auf den natürlichen Eigenschaften des Problems aufgesetzt ist. Zuerst werden verschiedene Aufträge in Containern konsolidiert. Dann werden die Container zu Services zusammengesetzt und am Schluss werden daraus die Servicerouten generiert. Die Routengenerierung ist als Set-Partitioning-Modell formuliert, mit unbefriedigenden Testergebnissen.

Daher können wir folgendes ableiten: Falls eine Dekomposition notwendig ist, sollte diese iterativ aufgesetzt sein und operative Eigenschaften verwenden.

Routengenerierung:

Wlcek sowohl als auch Barnhart u. a. implementierten ein explizites Column-Generation-Verfahren. Für die Composite-Variable-Formulierung und die Dantzig-Wolfe-Dekomposition ist eine Enumerierung aller machbaren Servicerouten in einem Preprocessing-Schritt notwendig. Dies kostet Laufzeit und Speicherplatz, jedoch zeigen Testergebnisse, dass die Modelle mit einer guten Qualität gelöst werden können. Jansen u. a. benützen verschiedene einfache Heuristiken, um Servicerouten zu generieren.

Algorithmen:

Durch die Kombination der Designvariablen und der Güterflussvariablen in eine Variable, nämlich der Composite-Variablen, können durch die LP-Relaxationen sehr gute untere Schranken erreicht werden. Daher kann ein Standard Branch-and-Bound-Verfahren realistische Instanzen lösen. Dies ist bei Modellen, welche beide Variablen explizit formulieren, nicht möglich. Daher müssen in dem iterativen Verfahren für das Expresslieferproblem zwei Teilprobleme und ihre dazugehörigen Modelle gelöst werden. Für das Routengenerierungsmodell wurde ein Branch-and-Price-and-Cut-Verfahren mit einem expliziten Column- und einem expliziten Cut-Generation implementiert. Zur Lösung des MCNF-Problems wurde eine Branch-and-Price-Methode entwickelt. Dieses Branch-and-Price-Verfahren basiert auf einer impliziten Column-Generation-Methode, wobei das resultierende PP als ein Kürzeste-Wege-Problem für jede Commodity beschrieben wird. Hierfür relaxieren Barnhart u. a. zuerst das gemischt-ganzzahlige Problem und zerlegen

es danach in ein lineares MP und in ein lineares PP. Irnich wendet ebenso ein Branch-and-Price-Verfahren mit einem impliziten Column-Generation-Verfahren an. Allerdings benutzt er eine Zerlegung in ein ganzzahliges MP und in ein ganzzahliges PP. Das ganzzahlige MP wird erst danach relaxiert. Daher muss er für jede Route ein ganzzahliges PP lösen, welches als Cliques-Rucksack-Problem modelliert wird.

Farvolden and Powell implementierten einen Partitioning-Algorithmus (vgl. Farvolden u. a. (1993)) um das MCNF-Problem zu lösen. Dieser Algorithmus basiert auf dem revidierten Simplex und nutzt operative Charakteristika aus. Daher konnte der revidierte Simplex beschleunigt werden. Die Subgradienten können dann mithilfe der Dualvariablen kalkuliert werden.

In den Lösungsvorgehen für die Planung der LTL-Operationen in Europa wurden unter anderem Local-Search-Heuristiken implementiert. Diese Heuristiken beruhen auf operativen Eigenschaften, werden jedoch auf verschiedene Typen von ersten Anfangslösungen angewendet. Das Ziel der Local-Search-Verfahren bei Jansen u. a. ist die Verbesserung eines ersten Gesamtplans. Dieser erste Plan beinhaltet Servicerouten mit den dazugehörigen Fahrplänen und den zugeordneten Aufträgen. Wlcek entwickelte seine Local-Search-Algorithmen, um die Zuordnung der Transporteinheiten zu Containern bzw. die Zuordnung der Container zu den Services zu verbessern.

4.7 Möglichkeiten des Transfers der Lösungsansätze

Die Analyse der Modellierungs- und Lösungsansätze zeigt, dass unterschiedliche Wege zum Lösen der jeweiligen Planungsprobleme eingeschlagen worden sind. Alle Ansätze nutzen dabei spezifische Charakteristika ihrer Problemstellung aus. Die Problemstellungen selber sind unterschiedlichster Natur und unterscheiden sich von dem Planungsproblem in dieser Arbeit (siehe Abschnitt 2.3.2.2), welches bei typischen Sammelgutdienstleistungen auftritt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die ersten und meisten Arbeiten zu SNDP auf den nordamerikanischen Transportmarkt ausgerichtet sind. Insbesondere bei LTL-Operationen liegen andere Gegebenheiten als in Europa vor. Dies liegt zum einen an den großen geographischen Entfernungen, die überbrückt werden müssen. Zum anderen ist der Fuhrpark seltener ausgegliedert und die Fahrer sind beim LDL angestellt. Die Personaleinsatzplanung ist somit der operativen Planung zuzuordnen. Dadurch sind Anforderungen, wie beispielsweise gesetzliche Arbeitsbedingungen, nicht abzubilden. Somit konnten spezielle Lösungsverfahren für diese Planungsprobleme konzipiert werden.

Eines dieser Verfahren wird in der Arbeit von Farvolden und Powell (1994) dargestellt. Das Herzstück dieses Lösungsverfahrens ist die Partitionierung der Basis nach den Kapazitäts- und Flusserhaltungsbedingungen. Durch diese Einteilung konnte der revidierte Simplex zur Lösung des MCNF-Problems sowie die Berechnung der Dualvariablen für die Subgradienten erheblich beschleunigt werden. Andere Nebenbedingungen, die bei der spezifischen Problemstellung in dieser Arbeit auftauchen, sind aufgrund der Partitionierung schwierig in diesen Ansatz zu integrieren. Eine Übertragung scheint daher nicht sinnvoll.

Einzig die Arbeiten von Wlcek (1998) und Jansen u. a. (2004) sind dem Planungsproblem in dieser Arbeit sehr ähnlich. Bei Wlcek ist jedoch das Verfahren auf ein nationales Netz mit strategischem Fokus ausgerichtet. Zudem sind die beschriebenen Ergebnisse, insbesondere durch die Routengenerierung und dem sequentiellen Lösungsverfahren, nicht zufriedenstel-

lend und daher für uns nicht vielversprechend für einen Transfer. Dieses Verfahren ist so aufgesetzt, dass mit jedem Teilproblem der Puffer für die Berechnung der Zeitfenster und somit für die Routenbildung verkleinert wird. Damit geht viel Optimierungsspielraum verloren, was ein Grund für die schlechte Qualität der Lösungen ist.

Mit ihren einfachen Heuristiken konnten Jansen u. a. (2004) kurze Laufzeiten erzielen, jedoch ist die Lösungsqualität als problematisch anzusehen. Weiterhin sind Konsolidierungen via Hubs aufgrund der gegebenen Containermengen in diesem Planungsproblem nicht notwendig. Somit ist dieses Konzept auf die in dieser Arbeit vorhandenen Problemstellung, insbesondere bei internationalen Netzwerken, nicht anwendbar. Zusätzlich werden in der Lösungsmethode operationale Charakteristika ausgenutzt, welche eine Übertragung erschweren.

Die Arbeiten von Barnhart u. a. (vgl. z. B. Barnhart u. a. (2002), Armacost u. a. (2002) und Armacost u. a. (2004)) und Irnich (2002) befassen sich mit taktischen Planungsproblemen von KEP-Diensten. Ihre zeitlichen Anforderungen sind so strikt, dass der Einsatz von Flugzeugen notwendig ist. Irnich (2002) hat einen Ansatz ohne den Einsatz von Zeit-Raum-Netzwerken entwickelt. Dieser basiert auf einer Dekomposition nach den einzelnen Servicerouten und der Zuordnung von Aufträgen zu Servicerouten. Er berichtet von großen Erfolgen mit diesem Lösungsverfahren, jedoch ist es unglücklicherweise nicht auf alle taktischen Planungsprobleme anwendbar. In dem Algorithmus wird ein ganzzahliges PP für jede Designalternative, d. h. Serviceroute, gelöst. Nachdem die Laufzeit von der Anzahl der PP abhängt, sollte die Anzahl der machbaren Servicerouten nicht allzu hoch sein. Nach Irnich ist der Algorithmus für ein paar Tausend solcher Designalternativen durchführbar. Ein nationales Sammelgutnetz hat jedoch schon mehrere Hunderttausend machbare Routen.

Die Modellierung des Expresslieferproblems von UPS mit einer Composite-Variable-Formulierung (vgl. Armacost u. a. (2002), Armacost u. a. (2004), Barnhart und Shen (2005) und Shen (2004),) hat zu einer sehr erfolgreichen Implementierung geführt. Dieses liegt vor allem an den scharfen unteren Schranken der LP-Relaxation. Dadurch sind die Laufzeiten kurz und die Lösungsqualität ist gut. Dem Konzept liegt eine Aufteilung in Pickup- und Deliveryrouten zugrunde; eine Wahl zwischen den Designalternativen *direkter Transport* oder *via ein Hub* muss nicht getroffen werden. Somit können die Commodities in Depot-Hub-Paare aufgeteilt werden, welche zur Bildung der Composites notwendig sind. In Problemen mit Direkt- und Hubrouten kann diese Aufteilung nicht für alle Commodities durchgeführt werden. Ebenso ist die Abbildung von mehrtägigen Servicerouten und verschiedenen Produktgruppen durch eine Composite-Variable-Formulierung nicht oder nicht einfach machbar. Zusätzlich stellt die Integration von spezifischen Containertypen und somit einer dritten Variablen eine große Hürde dar. Zusammenfassend können wir sagen, dass dieses Konzept für das spezifische Planungsproblem in dieser Arbeit nicht anwendbar ist.

Jedoch stellt der generelle Ansatz von Barnhart u. a. (2002) ein sinnvolles Lösungsvorgehen dar. Durch die Anwendung eines Derived-Schedule-Netzwerkes konnte die Größe des Zeit-Raum-Netzwerkes drastisch reduziert werden. Dafür musste die Anzahl der Services je Route auf zwei reduziert werden, welches jedoch realistischen Annahmen entspricht. Dies stellt die einzige Beschränkung in diesem Lösungsansatz dar. Weiterhin können mit diesem Konzept auch weitere Anforderungen wie die Integration von Containertypen und die Zuordnung der Güter zu den Containern modelliert werden.

Wir wollen daher dieses Lösungsvorgehen für KEP-Dienste auf das Planungsproblem von Sammelgut-Dienstleistern übertragen. Das ist Inhalt des nächsten Kapitels.

Kapitel 5

Modell und Lösungsvorgehen für ein nationales Sammelgutnetz

Im ersten Abschnitt 5.1 nehmen wir eine Abgrenzung der Planungssituation vor und beschreiben das Grundproblem. Für die Modellierung des Grundproblems legen wir ein Zeit-Raum-Netzwerk zugrunde, welches auf den festgelegten Servicerouten aufgebaut wird. Diese zugrunde liegenden Servicerouten werden in Unterkapitel 5.2 beschrieben. Über das durch Servicerouten aufgebaute Netzwerk werden dann die Aufträge geroutet. Zum Aufstellen dieses Netzwerkes nutzen wir den Derived Schedule Approach von Kim u. a. (1999). Dieser Ansatz basiert auf der Idee, dass es zur Planung der Verkehre nicht notwendig ist den genauen Zeitplan einer Route zu kennen, sondern nur, dass es eine mögliche Route gibt. Dadurch kann die Größe des Netzwerks drastisch reduziert werden. In Abschnitt 5.3 wird dann der Aufbau dieses Derived-Schedule-Netzwerks detailliert erläutert. Danach wird in Abschnitt 5.4 das dazugehörige Grundmodell formuliert. Abschnitt 5.5 behandelt ausführlich das Vorgehen zum Lösen des Grundmodells.

5.1 Abgrenzung der Planungssituation

Die Problemstellung des SND tritt in unterschiedlichen Anwendungsfällen auf. Eine erste Abgrenzung wurde in Abschnitt 2.3 mit der Betrachtung von Sammelgutspeeditionen vollzogen. In diesen Fällen ist nur die Gestaltung des LKW-Service-Netzes festzulegen. Bei der Benutzung von anderen Verkehrsträgern sind die Linien, inklusive Abfahrts- und Ankunftszeiten, fest vorgegeben. Nicht explizit betrachtet werden somit Linienverkehrsplanungsprobleme von Airlines, Reedereien oder Eisenbahngesellschaften. Ebenso wenig sind Problemstellungen von KEP-Diensten und Personenverkehren, die im öffentlichen Nah- und Fernverkehr anfallen, Bestandteil dieser Arbeit.

Die derzeitige Forschung ist bei weitem noch nicht in der Lage, solche komplexe Probleme, wie in Abschnitt 2.3.2.2 dargestellt, zu lösen.²⁸ Trotz der oben genannten Einschränkungen würde daher das Aufstellen und Lösen eines Modells mit allen seinen Möglichkeiten und Anforderungen den Rahmen der Arbeit sprengen. Somit soll in dieser Arbeit an der Lösung eines Grundmodells gearbeitet werden, auf das in zukünftigen Forschungsprojekten aufgebaut werden kann.

²⁸Siehe dazu auch die Ausführung in Kapitel 4.

In der Grundproblemstellung betrachten wir ein nationales Netz mit 24-Stunden-Service. Eine Bestimmung von Frequenzen für die einzelnen Relationen ist in dieser Arbeit dadurch nicht beabsichtigt. Die vorgegebene Netzstruktur ist eine Mischstruktur aus Mehrhub- und Rasternetz. Es sind zwei verschiedene Typen von Hubs möglich: zentrale Hubs und regionale Hubs. Regionale Hubs fungieren im Gegensatz zu den zentralen Hubs auch als Depots und sind vor allem für den Güterumschlag von Relationen mit Versand- und Empfangsdepot in der gleichen Region gedacht. Ein zentrales Hub dient zur Abwicklung der europaweiten Sendungen zusätzlich als internationales Hub. Dies ist notwendig, da die heutigen Planungen von europaweiten Netzen auf den Ergebnissen der nationalen Netze aufbauen.²⁹ Für eine spätere Erweiterung der Grundproblemstellung ist daher eine Anbindung aller Depots an das internationale Hub gefordert.

Aufgrund der vorgegebenen kurzen Garantie- bzw. Regellaufzeiten ist die Anzahl der Konsolidierungsmaßnahmen beschränkt. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, darf im Hauptlauf nur ein Hubumschlag durchgeführt werden. Die Transporte vom und zum Hub dürfen nur aus zwei Services zur Ausführung von Beiladung und / oder Containerkonsolidierung bestehen. Dies gilt ebenso für die direkten Transporte vom Versand- zum Empfangsdepot.

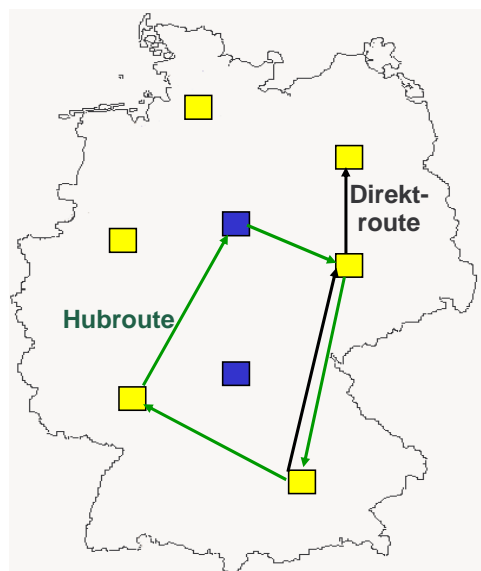


Abbildung 5.1: Darstellung des Grundproblems

Zur Einhaltung der Qualitätsstandards beim Kundenservice sind an den Depots früheste Pickup- und späteste Deliveryzeiten vorgegeben. Die früheste Pickupzeit kennzeichnet den Zeitpunkt, ab dem die Güter zur Abholung für den Hauptlauf am Depot bereitstehen. Dieser Zeitpunkt ist so spät wie möglich gewählt, um den Kunden mehr Zeit zur Sendungszusammenstellung zu gewähren, jedoch noch früh genug, um die Servicestandards einhalten zu können. Die späteste Deliveryzeit kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem die Sendungen spätestens am Depot eingetroffen sein müssen, damit noch genügend Zeit zur Auslieferung der Güter vorhanden ist. An den Hubs sind ebenso Zeitfenster, nämlich die Anfangssortierzeit und Endsortierzeit, gegeben.

Ferner ist die Anzahl der Rampen an den Hubs beschränkt. Dadurch können nur die Güter

²⁹Siehe dazu auch Abschnitt 2.2.3.

einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen in einem Zeitintervall umgeschlagen werden.

Für die Beförderung der Güter stehen Fernverkehrs-LKW zur Verfügung. Bei den eingesetzten Fahrzeugen handelt es sich um Wechselbrückenfahrzeuge, welche jeweils zwei Wechselkoffer befördern können. Wir gehen dabei von einem homogenen Fuhrpark aus, der in unbeschränkter Menge vorhanden ist. Die Homogenität bezieht sich dabei auf die Kapazität und die durchschnittliche Geschwindigkeit. Ebenso werden für jedes Fahrzeug die gleichen Kostensätze angenommen. Daneben ist die Lenk- und Ruhezeitbestimmung der EU für die Fahrer zu berücksichtigen.

Bei den zu transportierenden Sendungen sind die gleichen Produkteigenschaften vorhanden. Es liegt somit nur eine Produktgruppe vor, und wir können von homogenen Gütern ausgehen. Dadurch sind Zusammenladungsverbote von Sendungen zu Containern und Containern zu Fahrzeugen nicht zu beachten. Zur Vereinfachung können wir daher auf einen Containertyp aufbauen. Eine Planung der Transporte auf Basis von Containern ist somit nicht notwendig, d. h. eine Zuordnung von Transporteinheiten zu einzelnen Wechselkoffern wird nicht vorgenommen.

Die Entscheidungen zur Repositionierung der Container werden auf die operative Ebene verlegt, d. h. es wird nicht betrachtet, ob genug leere Wechselkoffer an einem Standort für die nächste Planungsperiode vorhanden sind. Jedoch sollte ein Ausgleich der Fahrzeuge stattfinden bzw. eine Balance dieser eingehalten werden. Die Fahrzeuge sollen dabei nach spätestens zwei Tagen wieder an ihren Heimatstandort zurückkehren. Somit sind nur die Auftragsrouten und Servicerouten, welche zu Touren kombiniert werden sollen, zu bestimmen.

Das Verfahren sollte so konzipiert sein, dass in das Grundmodell, wenn möglich, die folgenden Erweiterungen in zukünftigen Arbeiten integriert werden können:

- Das Modell soll auf ein europaweites Netz erweiterbar sein. Über größere Entfernungen sind 24-Stunden Laufzeiten nicht mehr zu bewerkstelligen. Daher werden verschiedene Kundenservice-Typen in dem Netz je nach Relation angeboten. Daher sollen mehrere Servicelevel in einem Netz geplant werden.
- Je größer die Entfernungen werden, desto mehr rentiert sich ein nochmaliger Umschlag auf ein kostengünstigeres Transportmittel, wie z. B. die Bahn oder das Binnenschiff, bzw. ist aufgrund der zeitlichen oder geographischen Beschränktheit nur die Integration weiterer Verkehrsträger möglich. Das Ziel ist, einen Ansatz zu erarbeiten, der den multimodalen Verkehr bei der Linienverkehrsplanung mit einbezieht.
- Weiterhin kann die Berücksichtigung eines heterogenen Fuhrparks untersucht werden. Dort wird zum einen zwischen Wechselbrückenfahrzeugen und LKW mit Festaufbau unterschieden. Zum anderen sind dann auch die Verträglichkeiten zwischen Fahrzeugtyp und Containertyp zu beachten.
- In einer zusätzlichen Erweiterung sollen heterogene Sendungen, d. h. mehrere Produktgruppen, in einem Netz befördert werden. Dadurch müssen die Produktgruppen auf den Servicerouten einzelnen Containern zugeordnet werden. Ebenso sind Zusammenladungsverbote zu beachten.

5.2 Servicerouten

Das aufzubauende Netzwerk wird aus eintägigen Servicerouten bzw. deren Services erzeugt. Jede dieser Routen wird mit genau einem LKW durchgeführt. Dieser hält im Rahmen seiner Fahrt an Depots und möglicherweise an einem Hub. Dort werden Güter eingeladen (Pickup-Stopps), ausgeladen (Delivery-Stopps) oder umgeschlagen (Hub-Stopp). Insgesamt stehen drei verschiedene Typen von Servicerouten zur Verfügung: die *Hubroute*, die *Pickup-Direktroute* und die *Delivery-Direktroute*.

Eine Hubroute kann maximal zwei Pickup-Stopps und zwei Delivery-Stopps besitzen, d. h. es können zwei Services bis zum Erreichen des Hubs und zwei Services nach dem Umschlag durchgeführt werden. Dazwischen liegt ein Hub-Stopp, an dem die Güter sortiert und zu neuen Ladungen zusammengestellt werden. Eine Hubroute mit fünf Stopps sieht folgendermaßen aus: Pickup-Stopp $\xrightarrow{\text{Service}}$ Pickup-Stopp $\xrightarrow{\text{Service}}$ Hub-Stopp $\xrightarrow{\text{Service}}$ Delivery-Stopp $\xrightarrow{\text{Service}}$ Delivery-Stopp.

Eine Pickup-Direktroute bzw. eine Delivery-Direktroute ist aus maximal drei Stopps aufgebaut. Bei einer Pickup-Direktroute folgt auf zwei Pickup-Stopps ein Delivery-Stopp. Im Gegensatz dazu sind bei einer Delivery-Direktroute nur ein Pickup-Stopp und zwei Delivery-Stopps vorhanden. Somit sind in diesen Routen maximal zwei Services möglich.

Durch diese Art der Modellierung der Routen können wir, neben den Designalternativen 'direkter Transport' oder 'via Hub', ebenfalls die Containerkonsolidierung und die Beladung abbilden. Die Routen sind so aufgebaut, dass wir dadurch Rundläufe, 2-Tages-Umläufe sowie One-Way-Fahrten darstellen können. Einzig allein Begegnungsverkehre werden durch diese Routendarstellung nicht modelliert. Durch den Gebrauch von Routen können wir allerdings die Alternativen für die Bildung von Rundläufen, 2-Tages-Umläufen und die Designalternativen zusammen abbilden.

Damit Pakete zwischen Pickup- und Delivery-Stopps transportiert werden können, muss eine Route mindestens zwei verschiedene Standorte anfahren und zwar folgendermaßen:

- Bei einer Pickup-Direktroute müssen die beiden Pickup-Depots unterschiedlich zu dem Delivery-Depot sein.
- Bei einer Delivery-Direktroute muss der Pickup-Stopp unterschiedlich zu den zwei Delivery-Stopps sein.

Jede gebildete Serviceroute muss dabei an den einzelnen Stopps die gegebenen Zeitfenster für Pickup bzw. Delivery sowie gegebenenfalls das Hubumschlagzeitfenster beachten. Weiterhin ist es uns möglich, durch den Routenansatz die Einhaltung der Arbeitszeitregelungen über die Servicerouten abzubilden. Bei einem Fahrer darf die Serviceroute nicht länger als neun Stunden dauern; bei zwei Fahrern kann die Dauer auf 20 Stunden erweitert werden. Dieses ist innerhalb eines nationalen Netzes mit 24-Stunden-Service ausreichend, um die Waren innerhalb eines Tages zu liefern. Alle Servicerouten, die diese Bedingungen einhalten, sind machbare Routen und stehen dem Verfahren zur Bildung einer Lösung zur Verfügung.

Die Abbildung der Designvariablen über Servicerouten hat gegenüber der Benutzung von einzelnen Services nach Kim (1997) die folgenden drei großen Vorteile:

1. Es können Fixkosten sowie nicht-lineare Kostentarife bezüglich Entfernungen sehr einfach in eine Serviceroute integriert werden, da genau ein Fahrzeug zu einer Route zugeordnet ist.
2. Restriktion bezüglich der Einhaltung von Zeitfenstern oder Fahrzeiten, welche sich auf ein Fahrzeug oder einen Güterpfad beziehen, können durch die Variablen abgebildet werden. Dadurch ist eine komplexe und teilweise nicht umsetzbare Modellierung über Nebenbedingungen nicht nötig.
3. Bei einer Abbildung über Services in einer Pfeil-Formulierung wird die Anzahl der Nebenbedingungen zu groß, so dass realistische Instanzen nicht gelöst werden können.

5.3 Service-Netzwerk

Wir stellen in diesem Ansatz das Service-Netzwerk als ein Zeit-Raum-Netzwerk dar. Über dieses Service-Netzwerk werden dann die Aufträge geroutet (vgl. Abschnitt 5.5.2).

Die Knoten in dem Zeit-Raum-Netzwerk entsprechen Stopps von Servicerouten an einem Depot oder Hub zu gewissen Zeitpunkten. Kanten repräsentieren einen Service zwischen zwei Standorten oder den Aufenthalt eines LKW an einem Standort. Zur Beschreibung des Netzwerkes werden folgende Knoten- und Pfeilmengen benutzt:

N :	Menge aller Knoten
A :	Menge aller Pfeile
$N_1 (\subset N)$:	Depot-Knoten, die den ersten Stopp (Ausgangsdepot) auf einer Serviceroute repräsentieren = Pickup-Knoten
$N_2 (\subset N)$:	Depot-Knoten, die einen Zwischenstopp einer Serviceroute repräsentieren = Pickup-Knoten
$N_3 (\subset N)$:	Depot-Knoten, die einen Zwischenstopp einer Serviceroute repräsentieren = Delivery-Knoten
$N_4 (\subset N)$:	Depot-Knoten, die den letzten Stopp (Bestimmungsdepot) einer Serviceroute repräsentieren = Delivery-Knoten
$H (\subset N)$:	Menge aller Hubknoten
$L (\subset A)$:	Servicepfeile, die Services einer Route darstellen
$G (\subset A)$:	Bodenpfeile, die Perioden darstellen, an denen Fahrzeuge an einem Standort stehen und somit Güter nicht transportiert werden

Jeder *Knoten* i im Raum-Zeit-Netzwerk ist durch seine Zeitkomponente t_i und seinen Standort l_i beschrieben. Somit kann ein Knoten im realen Netz mehrfach im Raum-Zeit-Netzwerk vorkommen. Ein *Pfeil* wird durch einen Anfangspunkt (=Knoten) und einem Endpunkt (=Knoten) definiert.

Im Folgenden wird der Aufbau des Service-Netzwerks mit allen machbaren Servicerouten beschrieben. Dazu stellen wir der Übersicht halber zuerst das Service-Netzwerk mit den Hubrouten und im Anschluss das Netzwerk, basierend auf Pickup- und Delivery-Direktrouten, vor. Innerhalb dieser Erläuterungen werden in einem ersten Schritt die

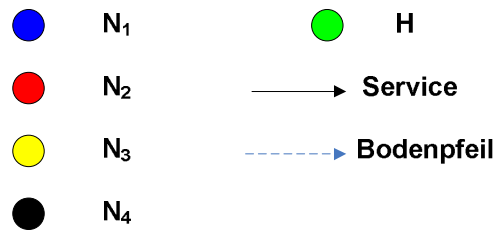


Abbildung 5.2: Legende für Abbildungen des Zeit-Raumnetzwerkes

Raumbeziehungen der Knoten angesprochen, während im zweiten Schritt die zeitliche Dimension behandelt wird. Im Anschluss werden dann die Service- sowie die Bodenpfeile erläutert. Zur Unterstützung der Beschreibungen werden Graphiken verwendet. Die Symbole der dazugehörigen Knoten- und Pfeilmengen sind in Abbildung 5.2 dargestellt und dienen als Legende.

5.3.1 Service-Netzwerk aufgebaut aus Hubrouten

In der Abbildung 5.3 sind exemplarisch für drei Depots und ein Hub die verschiedenen Knotenmengen dargestellt. Die Mengen N_1 und N_4 beinhalten jeweils einen Knoten je Depot (*Depotknoten*). N_1 entspricht der Menge der Ausgangsorte und N_4 der Menge der Bestimmungsorte. Sie dienen als Start- bzw. Endpunkt einer Serviceroute. Zur Vereinfachung der Darstellung entspricht Depot i dem Knoten $i \in N_1$ bzw. $i \in N_4$, d. h. $l_i = i$. In der Menge H sind zwei Knoten für jedes Hub enthalten, welche die Ankunft und Abfahrt der LKW repräsentieren. Jedem *Hubknoten* $h \in H$ ist das zugehörige Hub zugeordnet.

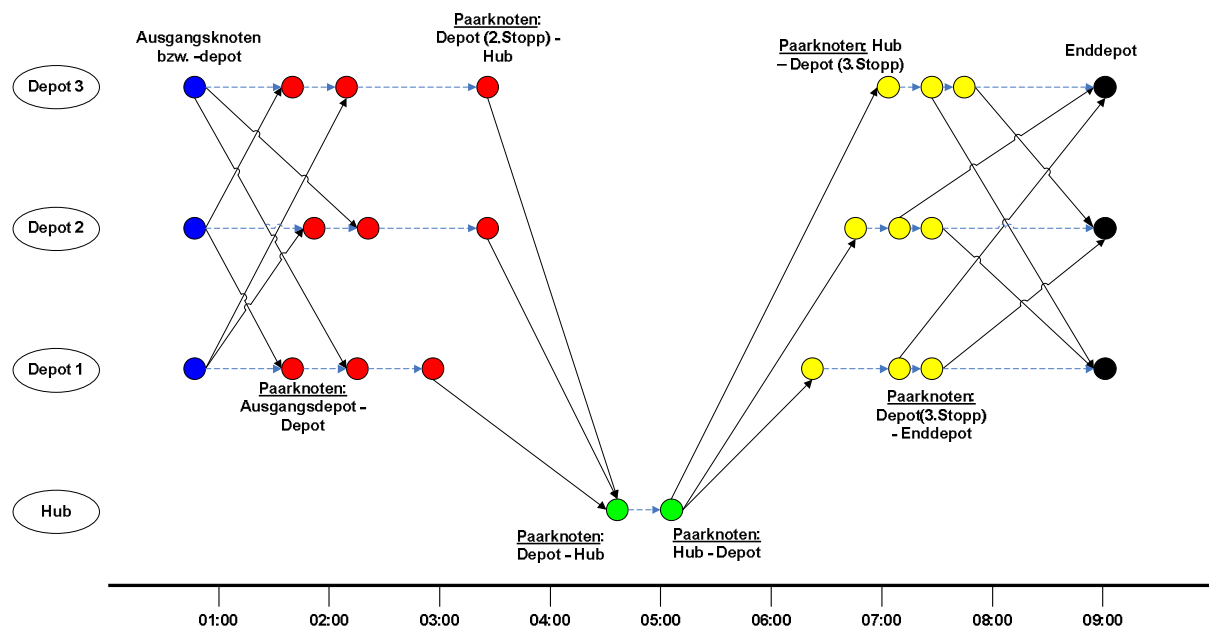


Abbildung 5.3: Knotenmengen der Hubrouten

Die *Zwischenknoten* N_2 und N_3 repräsentieren eine Beziehung zwischen zwei Standorten und stellen *Ankunftsknoten* (eingehender Servicepfeil) und *Abfahrtsknoten* (ausgehender Servicepfeil) eines Services an einem Standort dar. Sie werden daher als *Paarknoten* bezeichnet. In N_2 gibt es für jedes Depot n und für jedes Hub h einen Paarknoten. Diese

Paarknoten stehen für Services zwischen den folgenden Standorten:

- Ankunftsknoten: Ausgangsdepot (1. Stopp) - Depot (2. Stopp)
- Abfahrtsknoten: Depot (2. Stopp) - Hub

Analog zu N_2 können für N_3 folgende Paarknoten festgehalten werden:

- Ankunftsknoten: Hub - Depot (3. Stopp)
- Abfahrtsknoten: Depot (3. Stopp) - Enddepot (4. Stopp)

Bis jetzt wurden die Knoten nur bezüglich ihrer Raumkomponente betrachtet. Nachdem es sich aber um Raum-Zeit-Netzwerke handelt, wird im Folgenden detailliert auf die Zeit eines jeden Knotens eingegangen.

Jeder Depotknoten $i \in N_1$ besitzt eine assoziierte Zeit auf Grundlage der frühesten Abfahrtszeit, nämlich $t_i = EPT(i) + \text{Zeit, um die Sendungen am Depot } i \text{ zu laden}$. Dabei handelt es sich um die früheste Zeit, zur der ein LKW am Ausgangsdepot im Rahmen einer Route abfahren kann. Ähnlich verhält es sich bei den Knoten der Menge N_4 in Bezug auf seine späteste Ankunftszeit, d. h. $t_i = LDT(i) - \text{Zeit, um die Sendungen zu entladen}$. Dies spiegelt die späteste Zeit wider, zu der ein Fahrzeug bei der Durchführung seiner Route am Enddepot ankommen muss, damit noch alle Serviceanforderungen erfüllt werden können.

Bei den Hubs müssen die LKW die „Sort End Time“, $t_h = SET(h)$, einhalten. Anhand dieser festen Zeit werden die spätesten Ankunfts- bzw. frühesten Abfahrtszeiten der Fahrzeuge an jedem Hub festgelegt. Somit besitzen der Ankunfts-Hubknoten $h_1 \subset H$ die Zeit $t_{h_1} = t_h - \text{Entladezeit der Sendungen an Hub } h$. Genauso kann ein LKW erst dann am Hub abfahren, wenn die SET vorbei ist und die Güter geladen sind. Dem Abfahrts-Hubknoten $h_2 \subset H$ wird somit die Zeit $t_{h_2} = t_h + \text{Ladezeit der Sendungen an Hub } h$ zugeordnet.

Bei der Beschreibung der Zeit für die Knoten der Menge $l \in N_2$ müssen wir Ankunfts- und Abfahrtsknoten unterscheiden. Für den Ankunftsknoten l , welcher Depotpaar (i, j) repräsentiert, ist dies die früheste Zeit, zu der ein LKW auf seiner Route bei Start im Anfangsknoten i an seinem zweiten Stopp j zur Beladung der Güter ankommen kann: $t_l = \max[EPT(j), t_i + \text{Reisezeit von } i \text{ nach } j]$. Dies ist entweder die früheste Pickup-Zeit in Knoten l oder der Zeitpunkt, an dem ein Fahrzeug nach Abfahrt in Depot i zum Zeitpunkt t_i und der benötigten Fahrzeit zum Depot j dort frühestens ankommen kann. Von diesen zwei Zeitpunkten wird der spätere ausgewählt. Ist die Ankunftszeit in j bei Abfahrt in i kleiner als die EPT in Depot j , so wartet der LKW am Depot j . Sollte $i = j$ sein, so ist $t_l = t_i$.

Bei Abfahrtsknoten $l \in N_2$, welche die Beziehung Depot - Hub (j, h) repräsentiert, wird die späteste Zeit berücksichtigt, die ein Fahrzeug am Depot j abfahren muss, um noch rechtzeitig am Hub h zu sein, d. h. $t_l = \max[EPT(j), t_h - \text{Reisezeit von } j \text{ nach } h - \text{Zeit, um die Sendungen in } h \text{ zu entladen}]$. Bei Wahl der EPT als Zeitpunkt kann kein Service von j nach h durchgeführt werden. Daraus folgt, dass kein Servicepfeil in das Netzwerk eingefügt wird.

Auch bei der Berechnung der Zeiten für die Paarknoten $l \in N_3$ wird wieder nach Ankunfts- und Abfahrtsknoten unterschieden. Für den Abfahrtsknoten l , welcher für das Depot j

und das Enddepot i steht, wird der Zeitpunkt t_l mit der spätesten Zeit, die ein Fahrzeug j verlassen muss, um die Serviceanforderungen in i noch befriedigen zu können, angegeben: $t_l = t_i - \text{Reisezeit von } j \text{ nach } i$. Falls $j = i$, sind die zwei Zeitpunkte identisch, d. h. $t_l = t_i$.

Handelt es sich bei dem Knoten l um einen Ankunfts-knoten für Hub h und Depot j , dann ist $t_l = \min [LDT(j), t(h) + \text{Reisezeit von } h \text{ nach } j + \text{Zeit, um Sendungen in } h \text{ zu laden}]$, d. h. die früheste Zeit, zu der ein LKW am Depot j die Güter ausladen kann. Falls als Minimum die späteste Ankunftszeit ausgewählt worden ist, kann kein Service innerhalb der vorgeschriebenen Zeitfenster von Hub h zum Depot j durchgeführt werden. Dies führt wieder dazu, dass kein Servicefeil in das Service-Netzwerk eingefügt wird.

Die dargestellten Zeiten sind auch noch einmal in der Abbildung 5.4 für die einzelnen Knotenmengen beschrieben.

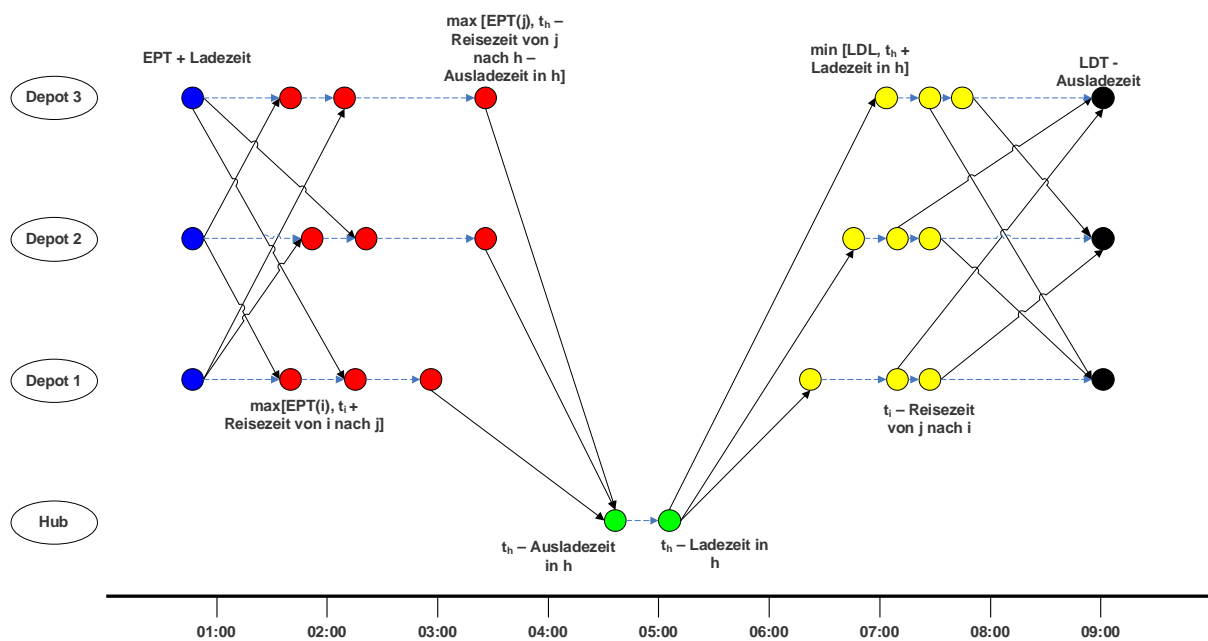


Abbildung 5.4: Zeiten der Knotenmengen von Hubrouten

Als nächstes möchten wir in dem Zeit-Raum-Netzwerk die Pfeile definieren. Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen zwei verschiedenen Sorten von Pfeilen: *Servicepfeile* und *Bodenpfeile*. In Tabelle 5.1 werden die Bedingungen zur Konstruktion der Servicepfeile zwischen den Knotenmengen bei Hubrouten beschrieben.

Mit Anfangs- und Endpunkt eines Pfeils ist jeweils ein Knoten gemeint. Falls die Bedingungen für die Konstruktion, insbesondere der Ungleichungen, nicht erfüllt sind, können diese Services nicht von einem LKW gefahren werden. Somit wird kein Servicefeil zwischen den Knoten, welche die zugehörigen Depots abbilden, eingefügt.

Für den Fall zwei bedeutet die Ungleichung, dass der Zeitpunkt t_l des Abfahrtsknotens l kleiner oder gleich sein muss wie die späteste mögliche Abfahrtszeit von diesem Depot zum Hub, damit das Fahrzeug noch rechtzeitig vor der SET am Hub angekommen ist.

Im Fall drei wird durch die Ungleichung gefordert, dass die Ankunftszeit in einem Paarknoten $l \in N_3$ frühestens dem Zeitpunkt entsprechen darf, zu dem ein Fahrzeug nach dem Laden der Sendungen am Hub und der Fahrt vom Hub zum Depot ankommen kann. Ist

Fall	Anfangspunkt des Pfeils	Endpunkt des Pfeils	Bedingungen für die Konstruktion eines Servicepfeils
1	$i \in N_1$	$l \in N_2$ (repäsentiert das geordnete Depot-Paar (i, j))	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen i und j nicht überschritten wird
2	$l \in N_2$ (repäsentiert das geordnete Depot-Paar (j, h))	$h \in H$	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen j und h nicht überschritten wird 2. falls $j \neq h$ gilt 3. $t_l \leq [t_h - \text{Fahrzeit von } j \text{ nach } h - \text{Entladezeit der Sendungen in } h]$
3	$h \in H$	$l \in N_3$ (repäsentiert das geordnete Depot-Paar (h, j))	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen h und j nicht überschritten wird 2. falls $h \neq j$ gilt 3. $t_l \geq [t_h + \text{Fahrzeit von } h \text{ nach } j + \text{Ladezeit der Sendungen in } h]$
4	$l \in N_3$ (repäsentiert das geordnete Depot-Paar (j, i))	$i \in N_4$	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen j und i nicht überschritten wird 2. $t_l \leq [t_i - \text{Fahrzeit von } j \text{ nach } i]$

Tabelle 5.1: Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Hubrouten

dies nicht gegeben, kommt das Fahrzeug nach dem Ablauf des Zeitfensters am Hub an.

Beim Fall vier soll ausgedrückt werden, dass die Abfahrtszeit in einem Paarknoten der Menge N_3 nicht später sein darf als die geforderte Ankunftszeit am Enddepot nach Berücksichtigung der Fahrzeit. Bei Nichterfüllung kommt auch in diesem Fall das Fahrzeug später als die LDL am Depot zum Ausliefern an.

Als Letztes müssen noch die Bodenpfeile für das Service-Netzwerk beschrieben werden. Dazu werden für die Abbildung der räumlichen Komponente zuerst die einzelnen Knoten einem Depot zugeordnet. Diese Zuordnung ist nicht eindeutig, da die Paarknoten eine Beziehung zwischen zwei Standorten ausdrücken. Dabei gehen wir wie folgt vor:

- Knoten $i \in N_1$ wird dem Ausgangsdepot i zugeordnet.
- Ankunfts-knoten $l \in N_2$, welcher das geordnete Depot-Paar (i, j) darstellt, wird zum Depot j zugeordnet.
- Abfahrts-knoten $l \in N_2$, der das geordnete Depot-Hub-Paar (j, h) darstellt, wird zum Depot j zugeordnet.
- Hub-Knoten $h \in H$ wird zum Hub h zugeordnet.
- Ankunfts-knoten $l \in N_3$, welcher das geordnete Hub-Depot-Paar (h, j) darstellt, wird zum Depot j zugeordnet.
- Abfahrts-knoten $l \in N_3$, welcher das geordnete Depot-Paar (j, i) darstellt, wird zum Depot j zugeordnet.
- Knoten $i \in N_4$ wird zum Enddepot i zugeordnet.

In einem zweiten Schritt werden alle Knoten aus allen Knotenmengen, die Depot j zugewiesen sind, nach aufsteigender Zeit geordnet. Dies wird für alle Depots j durchgeführt. Damit wird gewährleistet, dass der Ausgangspunkt eines Bodenpfeils keine spätere Zeit aufweist als der Endpunkt dieses Pfeils.

Im dritten und letzten Schritt wird für jedes Depot zwischen jedem Paar aufeinander folgender Knoten aus den Mengen N_1 und N_2 , die dem gleichen Depot zugeordnet sind, ein Bodenpfeil eingefügt. Die gleiche Vorgehensweise wird bei Knoten aus den Knotenmengen N_3 und N_4 durchgeführt. Bodenpfeile zwischen einem Depot und einem Hub dürfen nicht existieren, wie auch aus Abbildung 5.4 deutlich ersichtlich. Weiterhin dürfen bei der Abbildung von Hubrouten keine Service- sowie Bodenpfeile zwischen Knoten aus der Menge N_2 und N_3 vorhanden sein. Dies liegt an dem Aufbau von Hubrouten und der Anforderung, dass höchstens zwei Services bis zum Hub und vom Hub aus durchgeführt werden dürfen.

Im Folgenden beschreiben wir das Service-Netzwerk für Pickup- und Delivery-Direktrouten.

5.3.2 Service-Netzwerk aufgebaut aus Pickup- und Delivery-Direktrouten

Wie bereits erwähnt, sind bei Direktrouten maximal drei Stopps, d. h. zwei Services, erlaubt. Bei einer größeren Anzahl an Services ist der Derived-Schedule-Ansatz nicht umsetzbar. Dadurch wäre die Durchführung des Verfahrens schwer realisierbar. Allerdings ist diese Einschränkung auch für die Einhaltung eines 24-Stunden-Services sinnvoll. Wie am Beispiel der Hubrouten nachvollziehbar ist, werden die Zeiten der Ankunfts-knoten der Knotenmengen N_2 und N_3 durch eine Art Vorwärtseinlastung und die Abfahrtsknoten durch eine Rückwärtseinlastung bestimmt. Für diese Vorgehensweise sind allerdings fixe Zeitpunkte der Ausgangsknoten für die Einlastung notwendig. Diese fixen Zeiten sind beim Hub durch die SET, beim Anfangsknoten durch die EPT und beim Endknoten durch die LDT gegeben. Ohne diese festen Zeiten würde die Zeit des Nachfolgeknotens von der Zeit des Vorgänger-knotens und umgekehrt abhängen. Dies führte zu einem Zirkelschluss³⁰, der nur durch die explizite Darstellung aller Zeitpunkte auflösbar wäre. Dadurch würde allerdings die Größe des Netzwerkes enorm wachsen.

Die Knotenmengen N_1 und N_4 werden auf die gleiche Weise wie bei den Hubrouten bezüglich ihrer Raum- und Zeitkomponente bestimmt. Somit sind diese identisch mit denen der Hubrouten.

Für die Pickup-Direktrouten ist die Knotenmenge N_2 relevant, da diese zwei Pickup-Stopps aufweisen. Die Knotenmenge N_3 , wie aus Abbildung 5.5 ersichtlich, wird zur Darstellung nicht benötigt. N_2 enthält wieder Ankunfts- und Abfahrtsknoten, welche eine Beziehung zwischen zwei Standorten ausdrücken:

- Ankunfts-knoten: Ausgangsdepot - Depot (2. Stopp)
- Abfahrts-knoten: Depot (2. Stopp) - Endepot

³⁰Ein Zirkelschluss entsteht, wenn eine Aussage von einer These abgeleitet wird, deren Voraussetzung sie gleichzeitig ist.

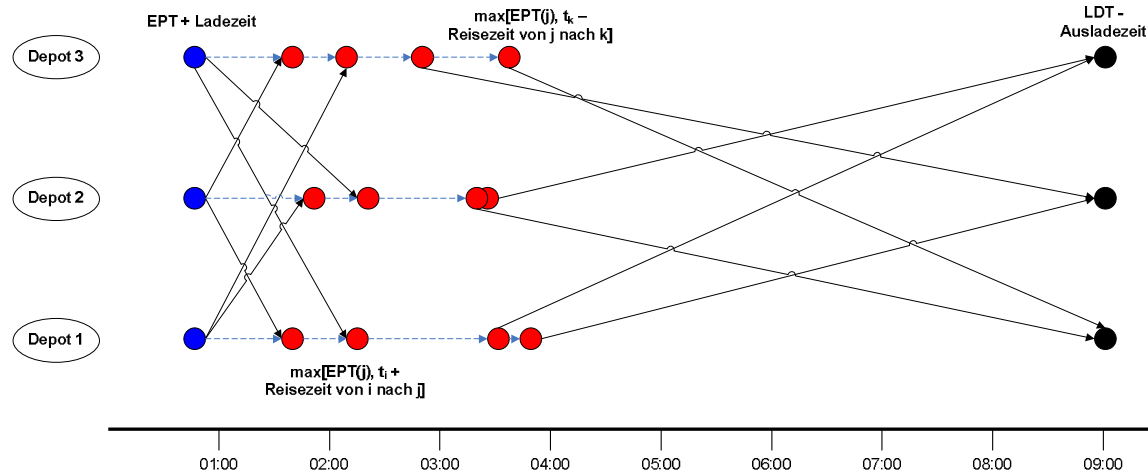


Abbildung 5.5: Zeiten der Knotenmengen von Pickup-Direktrouten

Ein Ankunfts-knoten $l \in N_2$ steht für das geordnete Depotpaar (i, j) . Die Zeit dieses Knotens stellt den frühesten Zeitpunkt dar, an dem ein Fahrzeug, ausgehend von Depot i , in Depot j für die Beladung der Güter ankommen kann. Falls der LKW vor der EPT am Depot eintrifft, muss er bis zum frühesten Ladezeitpunkt am Depot warten, d. h. $t_l = \max [EPT(j), t_i + \text{Reisezeit von } i \text{ nach } j]$. Sollte $i = j$ sein, so ist $t_l = t_i$.

Für Abfahrtsknoten $l \in N_2$, welche das Depotpaar 2. Stopp - Enddepot (j, k) repräsentieren, wird die späteste Abfahrtszeit in Depot j bestimmt, so dass die Serviceanforderungen in Depot k noch erfüllt werden können: $t_l = \max [EPT(j), t_k - \text{Reisezeit von } j \text{ nach } k]$. Für ein besseres Verständnis des obigen Sachverhaltes haben wir die verschiedenen Knotenmengen sowie die dazugehörige Berechnung der Zeiten in Abbildung 5.5 für Pickup-Direktrouten veranschaulicht.

Die Knotenmenge N_3 wird zur Darstellung der Delivery-Direktrouten benötigt. Auch hier betrachten wir Paarknoten. Für den Ankunfts-knoten gilt folgende Beziehung:

- Ausgangsdepot - Depot (3. Stopp)

Wie Abbildung 5.6 verdeutlicht, handelt es sich bei dem Depot um den zweiten Stopp in der Serviceroute. Allerdings repräsentiert dieses Depot einen Delivery-Stopp und wird daher der Menge N_3 zugewiesen. Dies ist notwendig, um zum einen eine gleichbleibende Notation durchzuhalten und zum anderen die Zusammenführung der Service-Netzwerke für Hubrouten und Direktrouten gewährleisten zu können. Ein Abfahrtsknoten der Menge N_3 stellt eine Beziehung zwischen einem

- Depot (3. Stopp) - Enddepot

dar.

Die Zeit für einen Ankunfts-knoten $l \in N_3$, welcher stellvertretend für das Depotpaar (i, j) steht, ist $t_l = \min [LDT(j), t_i + \text{Reisezeit von } i \text{ nach } j]$. Die Zeitkomponente beschreibt hier die frühestmögliche Ankunftszeit des LKW im Depot (3.Stopp) zur Auslieferung der Güter. Bei Ankunft nach der spätesten Lieferzeit, d. h. $t_l = LDT(j)$, ist es nicht möglich, einen Service zwischen Ausgangsdepot i und Depot j durchzuführen. Somit wird kein Servicepfeil zwischen den zugehörigen Knoten eingefügt. Dieser Fall sollte eigentlich nicht

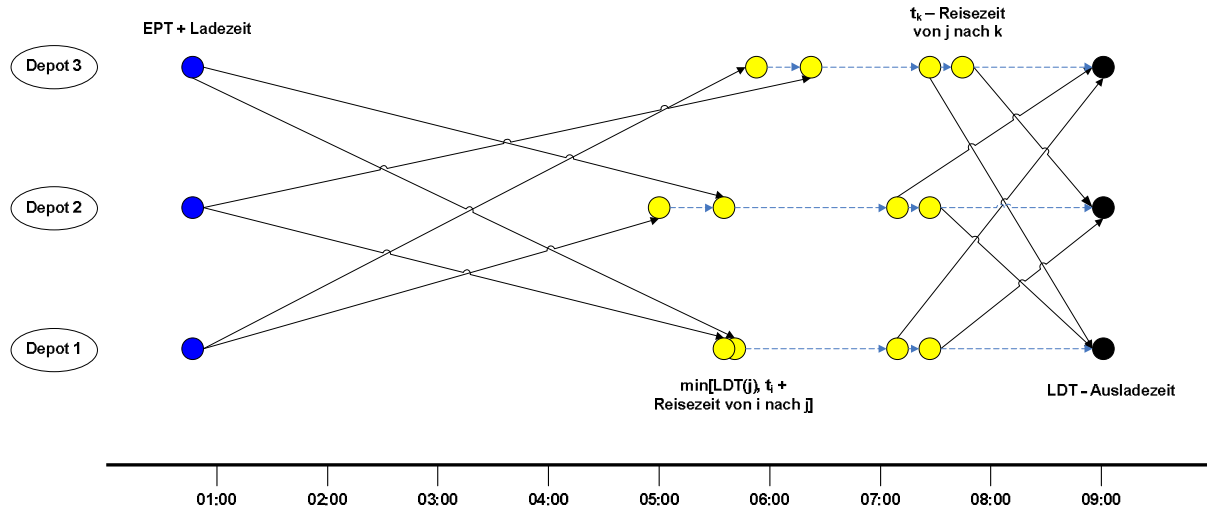


Abbildung 5.6: Zeiten der Knotenmengen von Delivery-Direktrouten

Fall	Anfangspunkt des Pfeils	Endpunkt des Pfeils	Bedingungen für die Konstruktion eines Servicepfeils
1	$i \in N_1$	$l \in N_2$ (repräsentiert das geordnete Depot-Paar (i, j))	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen i und j nicht überschritten wird
2	$l \in N_2$ (repräsentiert das geordnete Depot-Paar (j, k))	$k \in N_4$	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen j und k nicht überschritten wird 2. falls $j \neq k$ gilt 3. $t_l \leq [t_k - \text{Fahrzeit von } j \text{ nach } k]$

Tabelle 5.2: Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Pickup-Direktrouten

treten, da damit ein Transport der Güter einer Commodity mit Ausgangsort i und Bestimmungsort j nicht möglich ist.

Für Abfahrtsknoten $l \in N_3$ wird die späteste Zeit angegeben, zu der das Fahrzeug das Depot j verlassen muss, um noch die Serviceanforderungen im Enddepot k erfüllen zu können: $t_l = t_k - \text{Reisezeit von } j \text{ nach } k$. Falls $j = k$ gilt, ist $t_l = t_k$. In Abbildung 5.6 ist das Service-Netzwerk aus Delivery-Direktrouten für drei Depots dargestellt.

Servicepfeile bei Pickup-Direktrouten werden bei Erfüllung der Bedingungen gemäß Tabelle 5.2 zwischen den jeweiligen Knoten eingefügt. Dies bedeutet unter anderem, dass die Abfahrtszeit eines Knotens der Menge N_2 nicht später sein darf, als die geforderte Ankunftszeit im Knoten der Menge N_4 , abzüglich der Fahrzeit zwischen diesen Knoten. Bei Nichterfüllung kann ein Service zeitlich unter den gegebenen Bedingungen nicht durchgeführt werden.

Ähnlich ist die Vorgehensweise für Servicepfeile bei den Delivery-Direktrouten. Ein Pfeil kann zwischen zwei Knoten eingefügt werden, wenn die Bedingungen der Tabelle 5.3 erfüllt sind. Hierbei ist allerdings die maximale Fahrzeit zwischen zwei Depots zu beachten. Im Fall 1 gilt zusätzlich, dass die Zeit des Ankunfts-knoten $l \in N_3$ frühestens dem Zeitpunkt entsprechen darf, an dem ein LKW nach Abfahrt vom Ausgangsdepot, zuzüglich der Fahrzeit zwischen den zwei unterschiedlichen Standorten, am Delivery-Depot ankommt. Ist dies nicht gegeben, kommt der LKW nach der LDT am Depot an und der Pfeil kann nicht eingefügt werden. Dieser Pfeil sollte eigentlich immer vorhanden sein, ansonsten

Fall	Anfangspunkt des Pfeils	Endpunkt des Pfeils	Bedingungen für die Konstruktion eines Servicepfeils
1	$i \in N_1$	$l \in N_3$ (repräsentiert geordnetes Depot-Paar (i, j))	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen i und j nicht überschritten wird 2. falls $j \neq i$ gilt $t_l \geq [t_i + \text{Fahrzeit von } i \text{ nach } j]$
2	$l \in N_3$ (repräsentiert geordnetes Depot-Paar (j, k))	$i \in N_4$	1. für jedes Depot j , falls die maximale Fahrzeit zwischen j und k nicht überschritten wird 2. $t_l \leq [t_k - \text{Fahrzeit von } j \text{ nach } k]$

Tabelle 5.3: Bedingungen für die Konstruktion der Servicepfeile von Delivery-Direktrouten

kann man keine Aufträge zwischen diesen zwei Depots innerhalb der vorgeschriebenen Servicezeit durchführen.

Für Fall 2 wird zusätzlich festgesetzt, dass die Zeit des Abfahrtsknotens aus der Menge N_3 nicht größer sein darf, als die berechnete Ankunftszeit ausgehend vom Enddepot, abzüglich der Fahrzeit zwischen diesen beiden Depots. Wird diese Grundvoraussetzung eingehalten, erreicht der LKW von dem Depot (3. Stopp) noch rechtzeitig vor Ablauf der Delivery-Zeitfenster das Enddepot und der Service kann durchgeführt werden.

Zum Schluss sind noch die Bodenpfeile des Zeit-Raum-Netzwerks einzufügen. Das Vorgehen für die Zuordnung der Knoten zu den Depots sowie die Sortierung nach aufsteigenden Zeiten dieser Knoten, kann analog zu den Hubrouten beschrieben werden. Das Einfügen von Bodenpfeilen wird bei Pickup-Direktrouten lediglich zwischen aufeinander folgenden Knoten aus den Mengen N_1 und N_2 , die zu dem gleichen Depot gehören, durchgeführt. Bei Delivery-Direktrouten wird zwischen jedem Paar aufeinander folgender Knoten, zugeordnet zum gleichen Depot, aus den Knotenmengen N_3 und N_4 eine Verbindung durch einen Bodenpfeil hergestellt. Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass die Zeit des Ausgangsknotens eines Bodenpfeils nie später sein darf als die Zeit des Endknotens.

5.3.3 Charakteristika des Service-Netzwerks

Wir haben für die einzelnen Routentypen das Service-Netzwerk jeweils getrennt dargestellt. In der Modellierung wird jedoch nur ein Zeit-Raum-Netzwerk betrachtet. Deshalb werden die einzelnen Netzwerke der verschiedenen Routentypen in einem Netz zusammengefasst. Dabei werden Knoten der einzelnen Knotenmengen und Pfeile, mit derselben Definition, in einen Knoten oder einen Pfeil überführt. In Abbildung 5.7 ist das zusammengefasste Service-Netzwerk dargestellt.

Durch dieses Design besitzt das Zeit-Raum-Netzwerk folgende Charakteristika:

- Ein Pfad in dem Service-Netzwerk beginnt an einem Depot (Ausgangsdepot) und endet an einem Depot (Enddepot).
- Jeder Pfad in diesem Netzwerk entspricht einer möglichen Serviceroute eines Fahrzeuges an einem Tag.
- Jede machbare Serviceroute wird durch einen Pfad im Service-Netzwerk abgebildet.

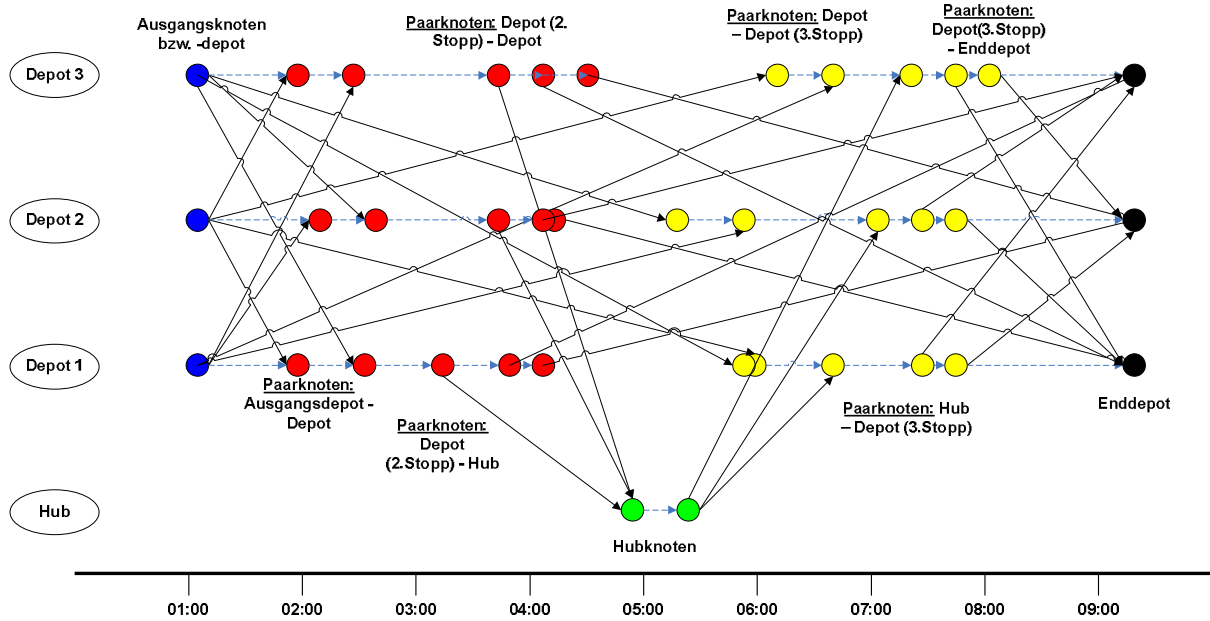


Abbildung 5.7: Service-Netzwerk mit Hub- und Direkttrouten

- Direkttrouten, die nur einen Service besitzen, werden durch einen Pfad mit nur einem Servicepfeil abgebildet. Eine Pickup-Direktroute von beispielsweise Depot 1 zu Depot 3 mit nur einem Service, wird durch den folgenden Pfad repräsentiert: Knoten für Ausgangsdepot 1 $\xrightarrow{\text{Servicepfeil}}$ Ankunftspaarknoten l (für Knotenpaar $(1,1)$) $\xrightarrow{\text{Bodenpfeil}}$ Abfahrtsknoten m (für Knotenpaar $(1,3)$) $\xrightarrow{\text{Servicepfeil}}$ Knoten für Enddepot 3. Es ist dabei zu beachten, dass die Zeit des Knotens für Ausgangsdepot 1 und den Ankunftspaarknoten l identisch ist, d. h. $t_1 = t_l$.
- Hubrouten mit nur einem Stopp für Pickup- bzw. Delivery werden nach der gleichen Vorgehensweise modelliert.
- Jede Serviceroute und somit jeder Pfad hat viele verschiedene mögliche Zeitpläne, die aber nicht explizit abgebildet sind. Wir wollen diesen Sachverhalt an einer Pickup-Direktroute (1 - 2 - 3) illustrieren, welche durch die Knoten 1, Ankunftspaarknoten m , Abfahrts-Paarknoten n und Knoten 3 modelliert ist. Eine Route kann frühestens zur Zeit t_3 und spätestens um t_3 plus dem Zeitpuffer in der Route starten. Der vorhandene Zeitpuffer ist durch $t_n - t_m$ gegeben. Dieser Puffer ist nicht-negativ für jede machbare Serviceroute. Falls die Route jetzt zu einer Zeit $t_1 + \delta$ beginnt, wobei $\delta \leq (t_n - t_m)$ gilt, dann ist die Abfahrtszeit vom Zwischendepot 2 ($t_m + \delta + \gamma$) mit $\gamma \leq (t_n - t_m - \delta)$. Die Ankunft in Depot 3 ist dann um $t_m + \delta + \gamma + \text{Fahrzeit von Depot 2 zu Depot 3}$.
- Dieses Netzwerk kann durch die Anwendung der Knoten-Konsolidierung (vgl. Abschnitt 3.2) noch weiter reduziert werden.
- Über dieses Service-Netzwerk können alle Güter geroutet werden. Die Kapazität eines Servicepfeils wird durch die Anzahl der LKW, die diesen Service durchführen, und durch die LKW-Kapazität bestimmt. Bodenpfeile werden mit unendlicher Kapazität ausgestattet, da keine Güter transportiert werden und der LKW am Depot wartet.

Damit wird eine mögliche Abfolge von Orten in einem Zeit-Raum-Netzwerk nur noch durch eine Route abgebildet. Es ist nicht nötig, Servicerouten mit verschiedenen Startzeiten für diese Abfolge von Orten in das Modell aufzunehmen. Dadurch kann die Bestimmung von Servicerouten über ein geographisches Netz erfolgen. Einzig für das Routen der Aufträge wird das Derived-Schedule-Netzwerk und somit ein Zeit-Raum-Netzwerk zugrunde gelegt.

Wir haben jetzt alle Grundlagen geschaffen, so dass wir das Grundmodell durch eine SND-Formulierung beschreiben können.

5.4 Formulierung des Grundmodells

Wir wollen das Grundproblem durch den Einsatz einer Baum-Formulierung abbilden. Dafür müssen wir zum generellen SNDM aus Abschnitt 3.3.3 noch weitere Nebenbedingungen hinzufügen. Die Definitionen der Variablen bleiben weiterhin bestehen, wobei nur ein Fahrzeugtyp zur Verfügung steht. Für jeden Ausgangsort $o \in O$ wird ein Super-Commodity gebildet. Das Ziel ist,

1. Servicerouten, durchgeführt von LKW, zu finden, welche die fixen Designkosten und die variablen operativen Kosten minimieren, und
2. Auftragsrouten zu bestimmen, die den Bedarf der Kunden decken, ohne Kundenservice-Anforderungen und Kapazitätsrestriktionen auf den einzelnen Services zu verletzen.

5.4.1 Nebenbedingungen

Die SNDP-Formulierung wird im Folgenden erweitert und verändert werden, um das spezielle Planungsproblem dieser Arbeit besser modellieren zu können. Dabei handelt es sich um die Balance der Transportmittel, die Kapazitätsbeschränkungen an den Hubs und den Zusammenhang zwischen dem internationalen Hub und allen Depots. Für die weiteren Ausführungen ist es wichtig, die Notation aus Abschnitt 3.3 um die Menge aller Hubknoten $H (\subset N)$ und Depotknoten $T (\subset N)$ zu ergänzen. Dadurch kann die gegebene Mischstruktur besser dargestellt werden.

Balance der Transportmittel:

In der gegebenen Grundproblemstellung sollen die Fahrzeuge spätestens nach zwei Tagen wieder an ihren Heimatstandort zurückgekehrt sein. Dies kann durch Rundläufe und 2-Tages-Umläufe geschehen. Nachdem Servicerouten von einem LKW an einem Tag gefahren werden, können Rundläufe allein durch die Routen abgebildet werden. Rundläufe stellen demnach Routen dar, bei denen der Ausgangsort o dem Bestimmungsort d entspricht. Somit kann ein Rundlauf nur aus einer Hubroute entstehen. Direkt Routen müssen verschiedene Ausgangs- und Bestimmungsorte vorweisen. Zur Abbildung der 2-Tages-Umläufe benötigen wir eine neue Menge $R(o, d) (\subset R)$ mit $R(o, d) = \bigcup_r \{o \in O \wedge d \in D\}$. Sie repräsentiert die Menge aller Routen r mit Ausgangsort o und Bestimmungsort d .

Die neue Restriktion für den Ausgleich der Fahrzeuge zwingt für jedes Commodity die Anzahl der Routen von o nach d gleich groß zu sein wie die Anzahl der Routen von d nach o :

$$\sum_{r \in R(o,d)} y_r = \sum_{r \in R(d,o)} y_r, \quad \forall (o,d) \in K, \quad o \neq d \quad (5.1)$$

Dadurch ist es möglich, 2-Tages-Umläufe aus allen Routen mit $o \neq d$ zu bilden. Zusammen mit den Rundläufen haben wir somit Servicerouten bestimmt, aus denen ausschließlich Touren generiert werden können.

Kapazitätsbeschränkung an den Hubs:

Jedes Hub hat nur eine gewisse Anzahl an Rampen zur Entladung zur Verfügung. Um diese Hubkapazität modellieren zu können, dividieren wir die zur Verfügung stehende Ankunftszeit in gleich große Intervalle $t = \{1, 2, \dots, T\}$. L_i^t definiert die Menge aller Routen mit frühester Ankunftszeit in Hub i nicht vor Start des Zeitintervalls t . a_i^t entspricht der Anzahl an LKW, die in Zeitintervall t am Hub i Sendungen ausladen können. Die Kapazitätsbeschränkung an den Hubs kann dann nach Barnhart u. a. (2002) folgendermaßen formuliert werden:

$$\sum_{r \in (R \cap L_i^t)} y_r \leq \sum_{m=t}^T a_i^m, \quad \forall i \in H, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (5.2)$$

In diesen Restriktionen wird jeweils die Gesamtkapazität vom Start des Zeitintervalls t bis zum Ende der Sortierzeit betrachtet. Diese Gesamtkapazität muss immer größer sein als die noch ankommenden Fahrzeuge in dieser gesamten Zeit. Dadurch ist auch der Fall modelliert, dass, wenn in einem Zeitintervall t mehr Routen am Hub ankommen als Rampen vorhanden sind, die Fahrzeuge auch warten können und in einem späteren Intervall entladen werden. Es ist jedoch sicherzustellen, dass bis zur SET alle Fahrzeuge entladen sind. Diese Nebenbedingung kann somit als Aufnahmekapazität eines Hubs verstanden werden. Somit kann damit auch indirekt die Sortierkapazität abgebildet werden.

Zusammenhang zwischen internationalem Hub und Depots:

In dem Grundproblem handelt es sich wohl um ein nationales Netz, jedoch werden internationale Güter im Rahmen eines nationalen Netzes ebenso befördert (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dadurch ist es notwendig, dass von jedem Depot mindestens eine Serviceroute zum internationalen Hub und ebenso vom internationalen Hub zu jedem Depot vorhanden ist (Network Connectivity). Bei dem internationalen Hub handelt es sich um ein Zentralhub, welches als Umschlag für internationale Güter dient.

Mit V_o wird die Menge der Routen bezeichnet, welche am Ausgangsort o starten und einen Stopp am Zentralhub einlegen. V_d repräsentiert die Menge der Servicerouten, welche am Depot d enden und über das internationale Hub führen. Diese Service-Verknüpfung zwischen Depots und dem internationalen Hub wird dann folgendermaßen formuliert:

$$\sum_{r \in (R \cap V_o)} y_r \geq 1, \quad \forall o \in O \quad (5.3)$$

$$\sum_{r \in (R \cap V_d)} y_r \geq 1, \quad \forall d \in D \quad (5.4)$$

5.4.2 SNDP für das Grundproblem

Das resultierende SNDP in Baumformulierung³¹ (siehe Abschnitt 3.3.3) für das Grundproblem ist:

$$\min \sum_{r \in R} h_r y_r + \sum_{o \in O} \sum_{q \in Q^o} c_q^o w_q^o \quad (5.5)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{q \in Q^o} \left(\sum_{k \in K^o} \gamma_{ij}^q b^k \right) w_q^o \leq \sum_{r \in R} \alpha_{ij}^r u y_r, \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.6)$$

$$\sum_{q \in Q^o} w_q^o = 1, \quad \forall o \in O \quad (5.7)$$

$$\sum_{r \in R(o,d)} y_r = \sum_{r \in R(d,o)} y_r, \quad \forall (o, d) \in K, \quad o \neq d \quad (5.8)$$

$$\sum_{r \in (R \cap L_i^t)} y_r \leq \sum_{m=t}^T a_i^m, \quad \forall i \in H, \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (5.9)$$

$$\sum_{r \in (R \cap V_o)} y_r \geq 1, \quad \forall o \in O \quad (5.10)$$

$$\sum_{r \in (R \cap V_d)} y_r \geq 1, \quad \forall d \in D \quad (5.11)$$

$$y_r \geq 0 \text{ und ganzzahlig}, \quad \forall r \in R \quad (5.12)$$

$$w_q^o \geq 0, \quad \forall q \in Q^o, \quad o \in O \quad (5.13)$$

Die Zielfunktion 5.5 findet die kostenminimale Menge an Rundläufen und 2-Tages-Umläufen sowie Auftragsrouten. Bedingungen 5.6 stellen die Kapazitätsbedingungen auf den Pfeilen des Service-Netzwerkes dar. Diese weist einem Service nur Sendungen zu, falls dieser Service innerhalb einer ausgewählten Serviceroute vorhanden ist. 5.7 repräsentiert die Bedarfsrestriktionen. Diese stellen sicher, dass die Bedarfe aller Aufträge gedeckt sind. Die Nebenbedingungen 5.8 stehen für die Balance der Transportmittel, die Restriktionen 5.9 stehen stellvertretend für die Hubkapazitäten und die Bedingungen 5.10 sowie 5.11 sind die Zusammenhangsbedingungen zwischen internationalem Hub und Depots. Bedingungen 5.12 beschränken die Designvariablen auf nicht-negative ganzzahlige Werte und Restriktionen 5.13 stellen Nicht-Negativität für die Auftragsrouten, dargestellt durch Bäume über das Service-Netzwerk, sicher.

5.5 Lösungsvorgehen

In dem entwickeltem heuristischen Lösungsvorgehen wird eine Dekomposition nach den zwei Entscheidungsvariablen durchgeführt: das Routing der Aufträge und die Bewegung der Fahrzeuge. Dabei ist eine Iteration zwischen der Auswahl der Servicerouten und der Bewegung der Güter aufgebaut, die einen Einfluss der jeweiligen Entscheidungen auf das

³¹Es wird für jeden Ausgangsort o genau eine Supercommodity gebildet. Dadurch kann $s = o$ gesetzt werden und die Mengen S und O sind identisch.

andere Problem zulässt. Durch diese iterative Auswahl von Service- und Auftragsrouten wird die Größe des Planungsproblems immer weiter verkleinert.

Eine Übersicht über die Vorgehensweise ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die einzelnen Schritte sind wie folgt:

Input: Es werden alle Daten zu den Standorten inklusive Fahrzeiten und Entfernungen, Commodities, Kapazitäten der Fahrzeuge und der Hubs sowie die Kosten in das Verfahren eingegeben. Die Mengen der fixierten Service- und Auftragsrouten werden als leere Mengen initialisiert. Alle Sendungen werden in der Menge der noch zu verplanenden Transportaufträge aufgenommen.

Schritt 0: In einem Preprocessing-Schritt werden unter Berücksichtigung der Zeitfenster an den Depots und Hubs sowie der maximalen Einsatzzeiten der Fahrzeuge alle machbaren Servicerouten generiert.

Schritt 1: Die Auswahl Servicerouten für die LKW findet durch das Lösen des *Bestimmung von Servicerouten-Modells* für die Menge der noch zu verplanenden Transportaufträge statt. Als Lösungsverfahren ist eine heuristische Implementation eines Branch-Price-and-Cut-Algorithmus eingesetzt.

Schritt 2: Aus den Servicerouten wird ein Derived-Schedule-Netzwerk gebildet. Über dieses Service-Netzwerk werden alle Aufträge aus der Menge der zu verplanenden Sendungen geroutet. Die *Generierung der Auftragsrouten* wird über ein spezielles MCNF-Problem abgebildet. Gelöst wird dieses Modell durch eine heuristische Branch-and-Price-Methode.

Schritt 3: Aus der Menge der Servicerouten, die in Schritt 1 bestimmt wurden, werden Servicerouten fixiert, d. h. diese Routen werden endgültig durchgeführt. Dabei kommt folgende Regel zur Anwendung:

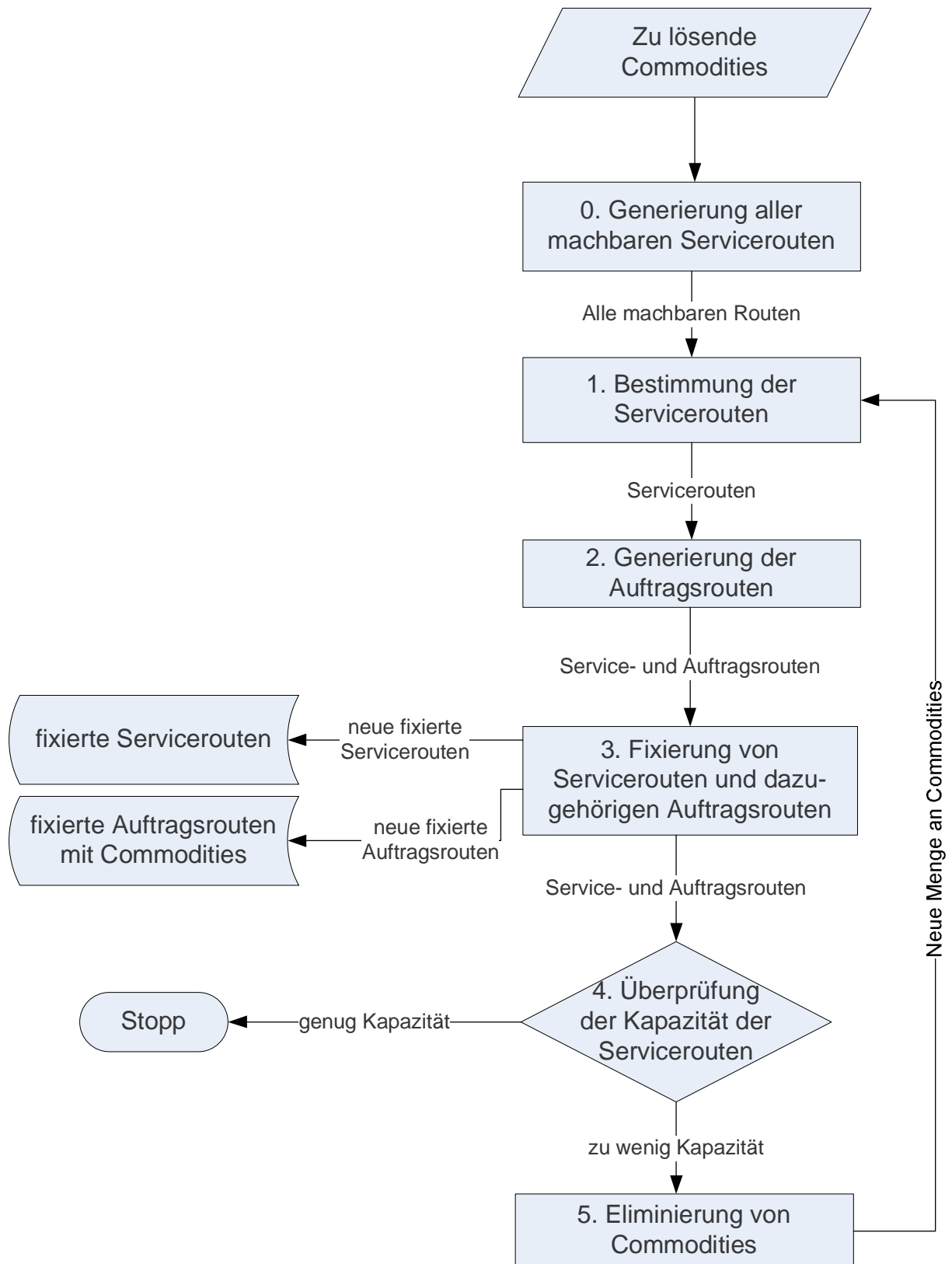


Abbildung 5.8: Übersicht über die Vorgehensweise zur Lösung des Grundproblems

Werden für einen Ausgangsort (bzw. Bestimmungsort) alle Bedarfe von Commodities mit diesem Ausgangsort (bzw. Bestimmungsort) durch Auftragsrouten transportiert, dann werden die für die Beförderung benötigten Servicerouten fixiert. Diese Servicerouten werden zur Menge der fixierten Servicerouten hinzugefügt. Für jede fixierte Route werden auch die zu transportierenden Commodities inklusive Mengen auf den einzelnen Services gespeichert. Ebenso werden die Pfade der Güter fixiert. Diese Auftragsrouten werden der Menge der fixierten Auftragsrouten inklusive der zugehörigen Commodities zugeordnet.

Schritt 4: Mit Hilfe der Dualvariablen der LP-Relaxation des Modells Generierung der Auftragsrouten wird überprüft, ob das Service-Netzwerk aus Schritt 2 genügend Kapazität zur Beförderung aller zu verplanenden Transportaufträge vorweist. Falls ja, ist die Iteration zu Ende, ansonsten gehe zu Schritt 5.

Schritt 5: Alle Commodities aus der Menge der zu verplanenden Sendungen, welche über das Service-Netzwerk, aufgebaut aus den fixierten Servicerouten in dieser Iteration, transportiert wurden, werden aus der Menge der zu verplanenden Sendungen gelöscht.

Bei dieser Vorgehensweise kann es jedoch in seltenen Fällen vorkommen, dass auf dem gebildeten Service-Netzwerk in Schritt 2 nicht genügend Kapazitäten vorhanden sind, um von einem Ausgangsort oder Bestimmungsort den kompletten Bedarf zu decken. In diesem Fall werden laut der Methode keine Servicerouten fixiert und die Problemgröße in dieser Iteration nicht reduziert.

Der Grund hierfür liegt in den Cutset-Inequalities (vgl. Abschnitt 5.5.1.1). Diese zwingen das Verfahren, nur soviel Kapazität zwischen zwei disjunkten Mengen zur Verfügung zu stellen, wie aggregierter Bedarf zwischen den zwei Mengen vorhanden ist. Potentielle Direkttrouten aus Schritt 1 liefern dafür viel Kapazität für eine Beförderung, die jedoch in Schritt 2 nicht genutzt werden kann. Im Gegensatz dazu stellen Hubrouten, insbesondere zum internationalen Hub, zu wenig Kapazität zur Verfügung.

Damit dieser Ansatz weiter zum Lösen des Grundproblems eingesetzt werden kann, wird bei Eintritt dieses Falles die Anzahl der Routen zum internationalen Hub um eins erhöht. Danach wird wieder zu Schritt 2 gegangen.

Durch die Verkleinerung der Problemgröße in jeder Iteration hat der vorgestellte Lösungsansatz den großen Vorteil, dass dieser sogar für realistische, sehr große SNDP durchführbar ist. In den folgenden zwei Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 werden die zwei Modelle und deren Lösungsvorgehen detailliert erläutert.

5.5.1 Bestimmung von Servicerouten

Zum Lösen des Modells zur Bestimmung von Servicerouten sind ein explizites Column- und ein explizites Cut-Generation-Verfahren implementiert. Der Einsatz eines impliziten Column-Generation-Verfahrens ist leider nicht möglich. Zur Generierung der Servicerouten müsste im PP ein weiteres Planungsproblem, nämlich ein Kürzeste-Wege-Problem mit Nebenbedingungen, gelöst werden. Leider können die Kosten auf dem Kürzesten-Wege-Netz nicht so angetragen werden, dass die Summe der Kosten der einzelnen Pfeile eines Pfades im Netz gleich der Gesamtkosten der Route ist. Dies liegt an der Möglichkeit, dass eine Route zwei Fahrer haben kann. In diesem Fall hängen die Pfeilkosten von dem gewählten Pfad ab. Aus diesem Grund verwenden wir ein explizites Column-Generation-Verfahren, welches auf das Planungsproblem in dieser Arbeit zugeschnitten ist. Dazu wer-

den in einem Preprocessing-Schritt alle machbaren Routen generiert. Jedoch sollen im PP nicht für alle diese Servicerouten auf einmal die reduzierten Kosten berechnet werden. Im Rahmen der Bestimmung der Servicerouten wird einmal die maximale Auslastung A einer Route berechnet.³² Im PP einer Iteration des Column-Generations werden dann diejenigen Routen überprüft, deren maximale Auslastung A zwischen zwei definierten Grenzen liegt. Diese heuristische Vorgehensweise wurde in der Arbeit von Barnhart und Schneur (1996) zur Generierung von Routen in einem Express-SNDP erstmalig eingesetzt³³.

Für die Berechnung der Auslastung müssen wir nach den jeweiligen Routentypen unterscheiden. Generell haben wir Commodities $k \in K$ mit den dazugehörigen Bedarfen b^k und die Kapazität eines LKW u gegeben. Die Auslastung A für die drei Routentypen ist folgendermaßen:

- Wir haben eine Route (p_1, p_2, d) mit den zwei Pickup-Stopps p_1 und p_2 und dem Delivery-Stopp d gegeben.

$$A = \sum_{k:(o(k)=p_1 \vee o(k)=p_2) \wedge d(k)=d} \frac{b^k}{u} * 100$$

- Wir haben eine Route (p, d_1, d_2) mit dem Pickup-Stopp p und den Delivery-Stopps d_1 und d_2 gegeben.

$$A = \sum_{k:o(k)=p \wedge (d(k)=d_1 \vee d(k)=d_2)} \frac{b^k}{u} * 100$$

- Wir haben eine Route (p_1, p_2, h, d_1, d_2) bei der zwei Pickup-Stopps p_1 und p_2 , ein Hub h sowie zwei Delivery-Stopps d_1 und d_2 gegeben sind.

$$A = \sum_{k:(o(k)=p_1 \vee o(k)=p_2) \vee (d(k)=d_1 \vee d(k)=d_2)} \frac{b^k}{u} * 100$$

Somit stehen dem Modell und dem Lösungsverfahren alle zeitlich machbaren Servicerouten inklusive ihrer berechneten maximalen Auslastung A zur Verfügung.

5.5.1.1 Modell

Durch die Dekomposition nach Entscheidungsvariablen wird das Grundmodell aus Abschnitt 5.4.2 in zwei Modelle aufgeteilt. Bei der Auswahl von Servicerouten werden nur die Designvariablen betrachtet. Die Güterflussvariablen mit ihren zugehörigen Nebenbedingungen werden in einem nachgelagerten Modell (Generierung der Auftragsrouten) bestimmt. Dadurch werden für die Optimierung nur die Kosten für die Servicerouten betrachtet, die minimiert werden sollen. Die Kosten, die beim Handling der Güter anfallen, müssen vernachlässigt werden. Jedoch sind diese Kosten im Vergleich zu den anfallenden Gesamtkosten sehr gering und rechtfertigen somit dieses Vorgehen.

³²Die Berechnung der Auslastung wird in jeder Iteration des Gesamtalgorithmus einmal durchgeführt und zwar beim Start zur Bestimmung von Servicerouten.

³³Laut Barnhart und Schneur (1996), S. 860, erzeugt dieses Column-Generation-Vorgehen für das Express-SNDP immer eine optimale Lösung. Ein Beweis dafür wird allerdings nicht angegeben.

Durch diese Aufteilung in zwei Modelle kann der Bedarf im Modell zur Bestimmung von Servicerouten nicht explizit abgebildet werden. Damit allerdings Routen in der Lösung vorkommen, integrieren wir Schnittungleichungen, nämlich verschärfte aggregierte Kapazitäts-Bedarfs-Ungleichungen (vgl. Abschnitt 3.5.2). Das Modell zur Bestimmung von Servicerouten kann dann folgendermaßen formuliert werden:

$$\text{Minimiere } \sum_{r \in R} c_r y_r \quad (5.14)$$

$$\text{unter } \sum_{r \in R(o,d)} y_r = \sum_{r \in R(d,o)} y_r, \quad \forall (o,d) \in K, \quad o \neq d \quad (5.15)$$

$$\sum_{r \in (R \cap L_i^t)} y_r \leq \sum_{m=t}^T a_i^m, \quad \forall i \in H, \quad t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (5.16)$$

$$\sum_{r \in (R \cap V_o)} y_r \geq 1, \quad \forall o \in O \quad (5.17)$$

$$\sum_{r \in (R \cap V_d)} y_r \geq 1, \quad \forall d \in D \quad (5.18)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{(i,j) \in \{S,T\} \cap r} y_r \geq \left\lceil \frac{D_{S,T}}{u} \right\rceil, \quad \forall \text{ O-D Schnittmengen } \{S, T\} \quad (5.19)$$

$$y_r \geq 0 \text{ und ganzzahlig, } \forall r \in R \quad (5.20)$$

Ziel des Modells ist, die Kosten für die Rundläufe und 2-Tages-Umläufe zu minimieren (5.14). 5.15 stellen die Bedingungen zur Bildung von Touren dar. Die beschränkten Hubkapazitäten sind in den Restriktionen 5.16 abgebildet. Mit den Nebenbedingungen 5.17 und 5.18 wird jedes Ausgangsdepot und jedes Bestimmungsdepot an das internationale Hub angebunden. Zusätzlich wird dadurch gewährleistet, dass es von jedem Ausgangsort einen Pfad zur Beförderung der Güter zu jedem Bestimmungsort gibt (Network Connectivity). Bedingungen 5.19 repräsentieren die angesprochenen Cutset-Inequalities. Diese werden zum einen benötigt die Anforderung, dass zumindest soviel Kapazität wie Gesamtbedarf vorhanden ist, abzudecken. Diese Restriktionen sind somit das Bindeglied zu den Aufträgen. Zum anderen wird damit die LP-Relaxation verschärft (vgl. Magnanti u. a. (1995)). Nebenbedingungen 5.20 bilden die Ganzzahligkeit und die Nicht-Negativität der Designvariablen ab.

5.5.1.2 Lösungsverfahren

Grundlage des Lösungsverfahrens zur Bestimmung von Servicerouten ist ein Branch-and-Bound-Verfahren. Nachdem zur Lösung von nationalen oder internationalen Netzen die Anzahl der Designvariablen sehr groß wird³⁴, verwenden wir aus oben genannten Gründen ein explizites Column-Generation-Verfahren. Aus praktischen Gründen ist es nicht sinnvoll, alle machbaren Servicerouten im PP-Schritt zu untersuchen. Nachdem Servicerouten mit einer höheren Auslastung in einer Lösung eher vorzufinden sind, haben wir in Anlehnung an Barnhart und Schneur (1996) ein Column-Generation-Verfahren implementiert. Jedoch wird die Column-Generation-Methode nur bei der LP-Relaxation im

³⁴In den Testinstanzen sind maximal ca. 950.000 mögliche Servicerouten vorhanden.

Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes durchgeführt und ist auf heuristische Weise implementiert. Die in der Lösung der LP-Relaxation enthaltenen Spalten stehen dann dem Branch-and-Bound zur Verfügung. Ebenso steigt die Anzahl der Nebenbedingungen durch den Gebrauch von Cutset-Inequalities stark an. Daher ist der Einsatz eines Cut-Generation-Verfahrens sinnvoll. Nachdem noch kein Separationsalgorithmus für die implizite Erzeugung dieser Schnittungleichungen gefunden worden ist, wird die IP-Lösung explizit auf Verletzung der Cutset-Inequalities untersucht. Aufgrund von Speicherplatz-Anforderungen ist es jedoch notwendig, nur Schnittmengen mit $|S| \leq 3$ oder $|T| \leq 3$ zu betrachten.

Das Branch-Price-and-Cut-Verfahren, welches vom beschriebenen Standard-Verfahren in Abschnitt 3.5.3.3 abweicht, lässt sich im Detail folgendermaßen beschreiben:

Start: Als Input werden dem Verfahren die Menge aller *machbaren Servicerouten* sowie alle *zu untersuchenden Cutset-Inequalities* zur Verfügung gestellt. Dafür werden die Servicerouten und die Cutset-Inequalities mit $|S| = 2$ und $|S| = 3$ bzw. $|T| = 2$ und $|T| = 3$ in einem Preprocessing-Schritt explizit generiert. Das RMP wird aus allen Schnittungleichungen mit $|S| = 1$ und $|T| = 1$ (= Cutpool) und allen anderen Nebenbedingungen sowie einer Menge von *Ausgangs-Servicerouten* erstellt. Durch die Aufnahme von ersten Designvariablen in das RMP, wird in der ersten Iteration eine Basislösung gewährleistet. In die Menge der Ausgangs-Servicerouten werden folgende Routen aufgenommen:

- für jede Commodity die billigste Route, welche als Pickupstopp den Ausgangsort der Commodity und als Deliverystopp den Bestimmungsort der Commodity besitzt
- von jedem Ausgangsort die billigste Hubroute zum internationalen Hub
- die billigste Route vom internationalem Hub zu jedem Bestimmungsort

Weiterhin wird eine untere Auslastungsgrenze g_u und eine obere Auslastungsgrenze g_o initialisiert. Zur Steuerung des explizitem Column-Generation-Verfahrens wird noch eine Schrittweite sw benötigt. In jeder Iteration werden beide Auslastungsgrenzen um die Schrittweite herabgesetzt.

Iteration:

1. Löse die LP-Relaxation des Modells 5.14 bis 5.20 durch den Gebrauch eines expliziten Column-Generation-Verfahrens zur Bestimmung der Designvariablen. Die Iteration der Column-Generation-Methode springt zwischen dem RMP und dem PP hin und her (vgl. auch Abschnitt 3.5.1):
 - (a) Lösen des linearen RMP mit einem Simplex-Algorithmus, der von CPLEX zur Verfügung gestellt wird. Falls in der vorherigen Iteration keine Servicerouten hinzugefügt worden sind, wird dieser Schritt ausgelassen.
 - (b) Im PP werden jeweils für machbare Servicerouten zwischen der unteren Auslastungsgrenze und der oberen Auslastungsgrenze, d. h Routen mit $g_u \leq A \leq g_o$, die reduzierten Kosten mithilfe der Dualvariablen berechnet und auf Negativität überprüft.
 - (c) Alle Servicerouten mit negativ reduzierten Kosten werden dem RMP hinzugefügt.

- (d) Setze $g_o = g_u$ und $g_u = g_u - sw$.
 - (e) Gehe wieder zu 1.a bis alle Servicerouten überprüft worden sind, d. h. $g_u \leq 0$.
2. Suche eine mögliche IP-Lösung für das Modell mithilfe von CPLEX³⁵. Das Modell besteht aus der momentanen Menge an Spalten, die in Schritt 1 dem RMP hinzugefügt wurden, dem Cut-Pool und allen anderen Restriktionen.
 3. Untersuche die gefundene IP-Lösung, ob sie Schnittungleichungen aus der Menge der zu untersuchenden Cutset-Inequalities verletzt. Die Überprüfung auf Verletzung wird durch das Einsetzen der IP-Lösung in die Schnittungleichung durchgeführt. Sind verletzte Ungleichungen gefunden worden, werden diese dem Cut-Pool hinzugefügt und aus der Menge der zu untersuchenden Cutset-Inequalities gestrichen; gehe zu Schritt 1. Ansonsten gehe zu Schritt 4.
 4. Alle positiven Designvariablen in der momentanen IP-Lösung werden zusammengekommen und bilden den Input für das Modell zur Generierung von Auftragsrouten.

5.5.2 Generierung von Auftragsrouten

Die bestimmten Servicerouten aus Schritt 1 des Gesamtalgorithmus bilden ein Service-Netzwerk. Die Güter sollen jetzt über dieses Service-Netzwerk in kostenminimaler Weise von ihrem Ausgangsort zu ihrem Bestimmungsort befördert werden, d. h. es liegt ein MCNF-Problem für die Generierung der Auftragsrouten vor (siehe Abschnitt 3.4.1). Bei diesem Planungsproblem wird allerdings eine spezielle Variante benötigt, die zum ersten Mal bei Barnhart u. a. (2002) beschrieben worden ist.

Die Vorgehensweise ist so aufgebaut, dass zuerst die Servicerouten bestimmt werden, ohne die genauen Bedarfe zu kennen. Im Rahmen des Einsatzes der Cutset-Inequalities ist ein Gesamtbedarf zwischen zwei Mengen zu befriedigen. Dadurch kann es allerdings dazu kommen, dass nicht genügend Kapazität vorhanden ist, um alle Sendungen von ihrem Ausgangsort zu ihrem Bestimmungsort zu transportieren. In dem Modell zur Generierung der Auftragsrouten wollen wir aber wenigstens einen Teil der Güter befördern. Dazu werden Anteile der Bedarfe über das Netz geroutet, wobei das Ziel des Modells ist, die Anzahl der Ausgangs- und Bestimmungsorte zu maximieren, deren Bedarfe über alle Commodities mit diesem Ausgangsort bzw. Bestimmungsort komplett gedeckt sind. Diese befriedigten Commodities müssen dann in der nächsten Iteration des Gesamtalgorithmus nicht mehr beachtet werden.

5.5.2.1 Modell

Für die Modellierung der Bestimmung von Auftragsrouten benutzen wir die Baumformulierung (siehe Abschnitt 3.3.3). Gegeben haben wir das Derived-Schedule-Netzwerk $G = (N, A)$, das aus der Auswahl der Servicerouten resultiert. Dieses Netzwerk wird nach der Vorgehensweise in Abschnitt 5.3 gebildet, wobei ein Servicepfeil nur unter der zusätzlichen Bedingung, dass dieser Service in einer Serviceroute vorkommt, eingefügt wird. Die Kapazität u_{ij} eines Servicepfeils berechnet sich aus der Anzahl der Servicerouten mit

³⁵CPLEX benutzt zum Lösen eines ganzzahligen Problems im Standard ein Branch-and-Cut-Verfahren (vgl. ILOG (2007d)).

diesem Service multipliziert mit der LKW-Kapazität. Bodenpfeile haben eine unendliche Kapazität.

Über dieses Netzwerk sollen nun die einzelnen Transporte der Waren festgelegt werden. Jeder Transportauftrag $k \in K$ (Commodity) ist durch einen Ausgangsort $o \in O$ und einen Bestimmungsort $d \in D$ gegeben, wobei $N_1 = O$ und $N_4 = D$ gilt. Die Menge K^o repräsentiert die Menge aller Commodities mit Ausgangsort o .

Zur Abbildung der Zielfunktion werden zwei weitere Variablen neben der Güterflussvariablen benötigt: y_o für die Ausgangsorte und z_d für die Bestimmungsorte. $y_o = 1$, falls alle Bedarfe von Commodities mit Ausgangsort $o(k) = o$ zu ihren Bestimmungsorten transportiert werden, für jeden Ausgangsort $o \in O$. Ansonsten ist $y_o = 0$. Ebenso ist z_d eine Binärvariable für jeden Bestimmungsort $d \in D$, die 1 ist, falls alle Sendungen mit Bestimmungsort d zu Netzwerk-Pfaden zugeordnet sind, und sonst 0. Weiterhin benötigen wir zur Beschreibung des Modells die Menge O_d . Sie gibt die Anzahl der Commodities, d. h. verschiedene Ausgangsorte mit Bestimmungsort d , wieder: $O_d = \{o(k) : d(k) = d\}$

Das Modell zur Generierung von Auftragsrouten kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\text{Maximiere } \sum_{o \in O} y_o + \sum_{d \in D} z_d \quad (5.21)$$

$$\text{unter } \sum_{q \in Q^o} w_q^o - y_o \geq 0, \quad \forall o \in O \quad (5.22)$$

$$\sum_{o \in O_d} \sum_{q \in Q^o} w_q^o - z_d |O_d| \geq 0, \quad \forall d \in D \quad (5.23)$$

$$\sum_{q \in Q^o} w_q^o \leq 1, \quad \forall o \in O \quad (5.24)$$

$$\sum_{o \in O} \left\{ \sum_{q \in Q^o} \left(\sum_{k \in K^o} \gamma_{ij}^q b^k \right) w_q^o \right\} \leq u_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.25)$$

$$w_q^o \geq 0, \quad \forall q \in Q^o, \forall o \in O \quad (5.26)$$

$$y_o, z_d \in \{0, 1\} \quad (5.27)$$

Die Zielfunktion 5.21 maximiert die Anzahl der Ausgangsorte und Bestimmungsorte, deren Bedarfe über alle Commodities mit diesem Ausgangsort bzw. Bestimmungsort komplett gedeckt sind. Die Bedingungen 5.22 erfordern für jeden Ausgangsort o , dass die Variable y_o erst dann für einen Ausgangsort o den Wert 1 annehmen darf, wenn alle Bedarfe von diesem Ausgangsort Pfaden zugeordnet sind. Das gleiche gilt für jeden Bestimmungsort d , abgebildet durch die Restriktionen 5.23. Die Nebenbedingungen 5.24 verhindern, dass mehr Waren den Pfaden zugeordnet werden als Bedarf vorhanden ist. Im Gegensatz zu herkömmlichen MCNF-Modellen kann hier die Summe auch kleiner als 1 sein. Gilt $\sum_{q \in Q^o} w_q^o = 1$, dann muss y_o auf 1 gesetzt werden. Restriktionen 5.25 erzwingen die Einhaltung der Kapazitätsbeschränkung auf jedem Pfeil (i, j) . Die Bedingungen 5.26 stellen die Nicht-Negativität der Baumvariablen (Güterflussvariablen) sicher. Die Variablen y_o für die Ausgangsdepots und z_d für die Bestimmungsdepots können zwei verschiedene Status besitzen, entweder werden alle Bedarfe der zugehörigen Commodities eines Depots befördert oder nicht. Dies ist in den Restriktionen 5.27 abgebildet.

5.5.2.2 Lösungsverfahren

Zum Lösen des obigen Modells setzen wir ein heuristisches Branch-and-Price-Verfahren ein. Für die Generierung der Auftragsrouten bedienen wir uns in der LP-Relaxation des Wurzelknotens eines impliziten Column-Generation-Verfahrens (siehe Abschnitt 3.5.1). Das zugehörige PP lässt sich als ein Kürzeste-Wege-Problem modellieren und ist mit dynamischen Verfahren (vgl. Grünert und Irnich (2005b)) einfach zu optimieren. Diese Column-Generation wird jedoch nur im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes durchgeführt.

Das Modell 5.21 bis 5.27 besteht zum einen aus den Güterflussvariablen und zum anderen aus y_o und z_d . Nachdem die Anzahl von y_o und z_d relativ gering ist (höchstens Anzahl der Depots mal zwei), starten wir in der LP-Relaxation des Wurzelknotens mit diesen Variablen. Die Baumvariablen werden durch das Lösen der PP generiert. Zur Aufstellung dieser PP werden folgende Vektoren für die Dualvariablen benötigt:

- λ : Dual-Variable, die zur Nebenbedingung 5.22 gehört
- μ : Dual-Variable, die zur Nebenbedingung 5.23 gehört
- σ : Dual-Variable, die zur Nebenbedingung 5.24 gehört
- π : Dual-Variable, die zur Nebenbedingung 5.25 gehört

Das PP kann für das Planungsproblem folgendermaßen aufgestellt werden³⁶:

$$p^* = \max_{q \in Q^o} \left\{ -\lambda_o - \sum_{d \in D_o} \mu_d - \sigma_o - \sum_{k \in K^o} \sum_{(i,j) \in A} (\gamma_{ij}^q b^k) \pi_{ij} \right\}, \quad \forall o \in O \quad (5.28)$$

$$p^* = - \min_{q \in Q^o} \left\{ \lambda_o + \sum_{d \in D_o} \mu_d + \sigma_o + \sum_{k \in K^o} \sum_{(i,j) \in A} (\gamma_{ij}^q b^k) \pi_{ij} \right\}, \quad \forall o \in O \quad (5.29)$$

Das Optimalitätskriterium lässt sich jetzt mithilfe des komplementären Schlupfes ableiten:

$$\sum_{k \in K^o} \left(\min_{q \in Q^o} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} (\gamma_{ij}^q) \pi_{ij} \right\} \right) \geq - \left(\lambda_o + \sum_{d \in D_o} \mu_d + \sigma_o \right), \quad \forall o \in O \quad (5.30)$$

Der Term $\min_{q \in Q^o} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} (\gamma_{ij}^q) \pi_{ij} \right\}$ entspricht einem Kürzeste-Wege-Problem für jeden Ausgangsknoten $o \in O$ und für jede Commodity $k \in K^o$ über das Derived-Schedule-Netzwerk. π_{ij} stellen die modifizierten Pfeilkosten dar (siehe auch Jones u. a. (1993) und Barnhart u. a. (2002)). Daraus folgt, dass die PP für die Baumformulierung durch die Optimierung Kürzeste-Wege-Probleme gelöst werden können.

Das Branch-and-Price-Verfahren lässt sich im Detail folgendermaßen darstellen:

1. Löse die LP-Relaxation des Modells durch den Gebrauch eines impliziten Column-Generation-Verfahrens zur Generierung von Auftragsrouten. Es wird mit allen Variablen y_o und z_d gestartet.

³⁶Eine genaue Beschreibung zur Aufstellung von PP kann in Ahuja u. a. (1993) nachgelesen werden.

-
- (a) Das lineare RMP wird mit einem Simplex-Algorithmus gelöst, der von CPLEX zur Verfügung gestellt wird.
 - (b) Für jeden Ausgangsknoten o und die dazugehörigen Commodities $k \in K^o$ wird ein Kürzeste-Wege-Problem aufgestellt. Diese lösen wir mit dem Verfahren von Bellmann. Die resultierenden kürzesten Pfade für jedes k werden danach in ihrem Ausgangsort o zu einem Baum $q \in Q^o$ zusammengesetzt.
 - (c) Diese Bäume werden auf reduzierte Kosten überprüft und, falls positiv, dem Modell hinzugefügt.
 - (d) Falls Bäume mit positiven reduzierten Kosten gefunden worden sind, gehe zu Schritt 1a. Ansonsten ist eine optimale LP-Lösung gefunden worden und das Column-Generation-Verfahren stoppt.
2. Suche eine IP-Lösung für das Modell zur Generierung von Auftragsrouten mithilfe von CPLEX. Das Modell besteht aus der momentanen Menge an Spalten, die in Schritt 1 dem RMP hinzugefügt wurde, und allen Zeilen.

Kapitel 6

Tests

In diesem Kapitel sollen Tests und Rechenergebnisse zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit des entwickelten Verfahrens vorgestellt werden. Im Rahmen von empirischen Tests werden eine Reihe von Probleminstanzen mithilfe einer Computersimulation gelöst. Es stellt sich die Frage, welche Schlüsse aus solchen Tests gezogen werden können und dürfen.

Verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die Einstellung von Parametern oder die Probleminstanz, haben Auswirkungen auf die Ergebnisse. Grundsätzlich gilt, dass nur für die untersuchte Klasse von Probleminstanzen eine Aussage über ihre Performance, also die Leistungsfähigkeit eines Algorithmus, getroffen werden darf.

Die Leistungsfähigkeit von heuristischen Verfahren wird entweder durch vergleichende oder deskriptive Tests ermittelt. Vergleichende Experimente, zwischen beispielsweise einem exakten Verfahren und einer Heuristik, werden angesetzt, wenn man die Performance von verschiedenen Algorithmen für die gleiche Klasse von Problemen untersuchen möchte. Bei deskriptiven Experimenten wird die Performance des Algorithmus isoliert betrachtet, indem verschiedene Parameter-Variationen eines Verfahrens miteinander verglichen werden (vgl. Barr u. a. (1995)). Zur Beurteilung dienen dabei sogenannte *Performance-Maße*, welche durch *Performance-Faktoren* beeinflusst werden. Nach Barr u. a. (1995) gibt es drei Gruppen für die Performance-Maße, nämlich

- Qualität der Lösungen,
- Rechenaufwand,
- Stabilität oder Robustheit des Verfahrens.

Jeder dieser drei Gruppen stehen diverse Kriterien zur Verfügung. Für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit sollten aus allen Gruppen Maße verwendet werden.

Barr u. a. (1995) zählen zu den Performance-Faktoren

- Problemgröße und charakteristische Daten einer Probleminstanz und
- Parameter der Algorithmen.

Die Analyse der Testergebnisse erlaubt es dann, Zusammenhänge zwischen den Performance-Faktoren und der Performance herzustellen. Empirische Tests zeigen auch die Grenzen eines Algorithmus, z. B. im Bezug auf seine Leistungsfähigkeit, auf. Ferner gewähren

sie Einblicke in das Verhalten einzelner Teile eines Algorithmus im Verhältnis zum gesamten Verfahren. Die Untersuchung der Testergebnisse kann letztendlich zur Verbesserung der Methodik und sogar zum Aufbau komplett neuer Verfahren anregen (vgl. Irnich (2002)).

In Abschnitt 6.1 beginnen wir mit Vorbemerkungen zu den empirischen Tests. Danach wird in Kapitel 6.2 die Datengrundlage analysiert und darauf aufbauend Testinstanzen gebildet. In den nächsten Abschnitten werden die Testergebnisse präsentiert, analysiert und bewertet. Dabei widmen wir uns zuerst den zwei großen Teilproblemen mit dem Ziel, das Verfahren so zu beschleunigen, dass die Laufzeiten zum Lösen eines SNDP realistisch sind. Die Ergebnisse werden dabei isoliert für das jeweilige Teilproblem betrachtet. Rückschlüsse auf das Gesamtverfahren werden nicht vorgenommen. In Unterkapitel 6.3 wird das Verfahren zur Bestimmung von Servicerouten analysiert und beschrieben wie die Rechenzeiten mit verschiedenen Mitteln verkürzt werden. In Abschnitt 6.4 wird das Teilproblem Generierung von Auftragsrouten in Bezug auf die Rechenzeit untersucht.

Nach der Untersuchung der zwei Teilprobleme widmen wir uns dem SNDP. In Unterkapitel 6.5 wird das implementierte Verfahren zum Lösen eines SNDP auf Schnelligkeit und Qualität analysiert. Abschnitt 6.6 stellt drei Anwendungen im Rahmen von Sensitivitätstests vor.

6.1 Vorbemerkungen

Dieser einführende Abschnitt enthält generelle Ausführungen zum eigentlichen Untersuchungsgegenstand und den benutzten Testrechnern. Ferner wird auf die C-Implementierung und insbesondere auf das Optimierungstool ILOG CPLEX eingegangen.

6.1.1 Untersuchungsgegenstand

Bei dem in Kapitel 5 vorgestellten Lösungsansatz handelt es sich, wie schon erwähnt, um ein heuristisches Verfahren, welches auf einer Zerlegung in Teilprobleme basiert. Hauptbestandteil dieser Zerlegung sind zwei Optimierungsmodelle - Bestimmung von Servicerouten und die Generierung von Auftragsrouten. Beide Modelle werden mithilfe eines exakten Verfahrens gelöst, wobei jedoch heuristische Komponenten zum Einsatz kommen. Dadurch werden die Verfahren und somit auch das gesamte Verfahren als Heuristik klassifiziert.

Tests zur Bestimmung von Servicerouten:

Die Laufzeit zum Lösen des Teilproblems zur Bestimmung von Servicerouten wird, ausschlaggebend von der Anzahl der Iterationen, im Folgenden *Anzahl zu lösender MIP* genannt, und der Lösungsdauer der MIP bestimmt. Daher ist es wichtig, eine Einstellung von festgelegten CPLEX-Parametern (vgl. 6.3.2) für das Lösen der MIP mit guter Lösungsqualität bei kurzer Laufzeit zu finden. Diese Einstellung soll mittels Simulationen gefunden werden, wobei jeweils nur ein Parameter verändert wird. Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit wird anhand der Kriterien

1. Lösungsdauer, unterteilt nach den einzelnen Verfahrensschritten,
2. Zielfunktionswert,

3. Anzahl Simplex-Iterationen (Pivotschritte) und
4. Anzahl verarbeiteter (gelöster) Knoten des Branch-and-Bound-Baums

gemessen und analysiert. Die Betrachtung der Testergebnisse findet isoliert für dieses Teilproblem statt. Es werden keine Zusammenhänge der Lösungsqualität der Ergebnisse im Bezug auf das Gesamtverfahren hergestellt. Das Ziel der Analyse ist, relevante Performance-Faktoren zu erkennen und diese von irrelevanten abzugrenzen. Die so gefundene beste Parametereinstellung dient als Basis für die weiteren empirischen Tests am Gesamtalgorithmus.

Die Untersuchungen zur Lösungsqualität des Verfahrens zur Bestimmung von Service-routen werden ferner durch eine Analyse des Cut-Generation-Verfahrens und durch ein vergleichendes Experiment weiter verfeinert. Für den Vergleich wurde ein exaktes Verfahren mithilfe von ILOG CPLEX implementiert. Dabei wollen wir wichtige Einblicke in das Verhalten der Methode und ihrer Einflussfaktoren erhalten.

Tests zur Generierung von Auftragsrouten:

Tests zur Lösung des Problems Generierung von Auftragsrouten mit den CPLEX-Default-einstellungen haben gezeigt, dass die Rechenzeit bei der vorherrschenden Problemgröße, maximal 647 Spalten und 486 Zeilen, kein kritischer Faktor ist. Weitere Untersuchungen werden daher nicht durchgeführt.

Tests zum SNDP:

Mit den empirischen Tests für das Gesamtverfahren zum Lösen realistischer SNDP wollen wir folgende Fragen beantworten:

- Können realistische Instanzen für ein nationales Netz in annehmbarer Zeit gelöst werden?
- Wie ist die Qualität der gefundenen Lösung?
- Welche Auswirkungen haben Bedarfsveränderungen?
- Welche Hubs sind überflüssig; ab welchem Mengenwachstum werden sie gebraucht?
- Kann dieses Verfahren als Basis für eine Erweiterung der Problemstellung dienen, um beispielsweise internationale und / oder multimodale Netze abzubilden, mehrere LKW-Typen sowie Container-Typen zu integrieren?

Für die Beurteilung des Rechenaufwandes werden die absolute Rechenzeit, die durchschnittliche Rechenzeit je Iteration und die Anzahl der Iterationen herangezogen. Neben der Anzahl der Iterationen hängt die Rechenzeit größtenteils von der Anzahl der möglichen Servicerouten, d. h. der Problemgröße, ab. Somit werden zusätzlich Abhängigkeiten zwischen diesen Kriterien für die Analyse des Rechenaufwandes und der Problemgröße untersucht.

Für die qualitativen Untersuchungen stehen leider keine Vergleichswerte aus der Praxis, von anderen Heuristiken oder einem exaktem Verfahren zur Verfügung. Somit können Vergleiche zur absoluten und relativen Qualität ganzzahliger Lösungen schlecht getroffen werden. Weiterhin können auch keine Abschätzungen der Güte mithilfe von unteren

Schranken durchgeführt werden. Jedoch können Aussagen über die Qualität der ganzzahligen Lösungen und der Sensitivität des Verfahrens anhand von folgenden Kriterien abgeleitet werden:

- Zielfunktionswert
- Anzahl Fahrzeugumläufe und Anzahl One-Way-Fahrten
- Anzahl Pickup-, Delivery-Direktrouten und Hubrouten
- Anzahl der Stopps auf den einzelnen Routentypen
- Auslastung der Servicerouten
- Anzahl Auftragsrouten und Umschläge
- Anzahl Auftragsrouten je Commodity

Die Kapazitäten am Hub stellen für die realistischen Testinstanzen (vgl.6.2) kaum Engpässe dar, da diese sehr leicht angepasst werden können. Daher sehen wir von einer Sensitivitätsanalyse in Bezug auf verschiedene Kapazitäten am Hub ab. Weiterhin haben Sensitivitätsanalysen für die Bestimmung der Servicerouten in der Arbeit von Geyer (2007) gezeigt, dass eine Untersuchung der Veränderung der Mautkosten nicht unbedingt aussagekräftig ist. Der Grund dafür kann im Aufbau des Streckennetzes gesehen werden. 96 Prozent des Netzes sind mautpflichtig und somit sind nur in marginalem Umfang Ausweichungen auf andere Routen möglich.

6.1.2 Implementierung und Beschreibung der Hardware

Die Implementierung der Heuristik erfolgte in der Programmiersprache C in der C++ Umgebung von Microsoft Visual Studio .NET 2003. Neben den klassischen C-Funktionen stand auch die *Callable Library* von CPLEX zur Verfügung (siehe Abschnitt 6.1.3 und ILOG (2007b)). Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass nur Unix-kompatible Funktionen verwendet werden.

Die Rechenergebnisse der empirischen Tests wurden auf Maschinen mit jeweils 2 AMD Opteron(tm) 250 Prozessoren mit 2,39 Gigahertz und Linux (Linux Kernel Version 2.6.9.) als Betriebssystem erzielt. Es standen 15,6 Gigabyte Hauptspeicher (RAM) sowie 32 Gigabyte virtueller Speicher zur Verfügung. Für die Ausführung der Tests wurde der C-Code von Microsoft Visual Studio .NET 2003 nach Linux konvertiert und mit gcc Version 3.4.4 (default-Einstellungen) in Release-Version übersetzt. Als LP- und MIP-Solver diente die kommerzielle Bibliothek von CPLEX Version 10.0 (vgl. ILOG (2007b)).

6.1.3 ILOG CPLEX

ILOG CPLEX oder kurz CPLEX ist eines von mehreren auf dem Markt erhältlichen Optimierungstools, welches in diversen Applikationen in Industrieunternehmen und Universitäten im Einsatz ist. Innerhalb der Operations Research Community wird CPLEX als eines der führenden Tools im Hinblick auf Performance, Robustheit und Usability

angesehen. Durch CPLEX bietet die Firma ILOG (vgl. ILOG (2007a)) die Möglichkeit, Optimierungsalgorithmen direkt in den Lösungsvorgang von spezifischen Optimierungsproblemen zu integrieren. Es stellt dafür Bibliotheken für unterschiedliche Plattformen und Entwicklungsumgebungen zur Verfügung, um Planungsprobleme mit linearen oder quadratisch beschränkten Nebenbedingungen, einer linearen oder konvex quadratischen Zielfunktion und kontinuierlichen oder diskreten Variablen lösen zu können (vgl. ILOG (2005)).

Abhängig von der Art des Planungsproblems kann unter den Optimierern

- ILOG CPLEX Simplex Optimizer,
- ILOG CPLEX Barrier Optimizer und
- ILOG CPLEX Mixed Integer Optimizer

mit einer Vielzahl von Tuning-Optionen ausgewählt werden. Mit jedem Optimierer sind *presolve-Algorithmen* zur Verringerung der Problemgröße verknüpft.³⁷

Der *Simplex Optimizer* stellt einen primalen und dualen Simplex-Algorithmus sowie einen Netzwerk-Simplex zur Lösung von LP-Problemen und quadratischen Optimierungsproblemen zur Verfügung. Der *Barrier Optimizer* kann als Alternative zum Simplex Optimizer benutzt werden. Dieser Optimierer stellt zusätzlich eine Methode zum Lösen von Problemen mit quadratischen Nebenbedingungen (quadratically constrained programming (QCP)) und einer konvex quadratischen Zielfunktion (second order cone programming (SOCP)) zur Verfügung. Der *Mixed Integer Optimizer* kann zur Lösung von Optimierungsproblemen mit gemischt-ganzzahligen oder binären Variablen sowie einer linearen oder quadratischen Zielfunktion eingesetzt werden. Zur Lösung werden dabei state-of-the-art Branch-and-Cut-Techniken eingesetzt (vgl. ILOG (2007d)).

Im Fokus dieser Arbeit stehen der Simplex Optimizer und insbesondere der Mixed Integer Optimizer. Zum Lösen der linearen RMP in den Column-Generation-Verfahren benutzen wir den *Simplex Optimizer* mit Defaulteinstellung. Wie schon in Kapitel 5 ausführlich beschrieben, werden die Column-Generation-Verfahren eingesetzt, um die zur Verfügung stehenden Variablen im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes zu bestimmen. Danach folgt das Lösen eines MIP mithilfe des Mixed Integer Optimizer, wobei wir verschiedene der Features, wie beispielsweise Branching-Prioritäten und -Richtungen, Knotenauswahl oder Variablenauswahl, im Rahmen der empirischen Tests verglichen werden. Das gesamte Spektrum der Tuning-Features kann unter ILOG (2007d) nachgelesen werden.

6.2 Testdaten und Testinstanzen

Grundlage für die folgenden empirischen Tests ist ein realistischer Datensatz eines LDL, der die Struktur eines deutschlandweiten Netzes mit seinen Flüssen darstellt. Dieser wurde verfremdet, um Rückschlüsse auf den LDL zu vermeiden. Relative Verhältnisse von Kosten und Entfernungen behalten jedoch ihre Aussagekraft.

Im Folgenden analysieren wir zuerst den Datensatz. Zum einen sollen die daraus gewonnenen Erkenntnisse die Analyse der Rechenergebnisse unterstützen, damit Zusammenhänge

³⁷Für Details siehe ILOG (2005).

besser abgeleitet und dargestellt werden können. Zum anderen sollen diese Erkenntnisse auch beim Aufbau verschiedener Testinstanzen unterschiedlicher Größe behilflich sein. Testinstanzen vor allem kleinerer Größe sind für die Durchführung der Parametertests notwendig, da mit langen Laufzeiten bei verschiedenen Parametereinstellungen zu rechnen ist. Ferner sind Testinstanzen unterschiedlicher Größe für die Erkennung von Zusammenhängen zwischen Problem, Problemgröße und Laufzeiten unabdingbar. Diese Erkenntnisse sind vor allem wichtig für die Beantwortung der Frage, ob das Verfahren auch bei einer erweiterten Problemstellung eingesetzt werden kann. Ferner stellen wir die Vorgehensweise zur Berechnung von Fahrzeiten, Wartezeiten und Kosten der Routen vor. Im Anschluss widmen wir uns dem Aufbau der Testinstanzen.

6.2.1 Analyse der Datengrundlage

Für die Analyse der Datengrundlage werden neben den Depot-, Hub- und Sendungsdaten auch die Fahrzeugdaten sowie die Kosten untersucht.

6.2.1.1 Depot- und Hubdaten

Der LDL betreibt 51 Standorte innerhalb Deutschlands. Die jeweiligen Standorte können drei verschiedene Funktionen innehaben. Entweder sie fungieren als reine Depots, als reine Hubs oder als Mischung von beiden. Die letztgenannten Standorte nennen wir im Folgenden *Depothubs*. Diese werden grundsätzlich als Depots angesehen, können allerdings optional mit den Funktionen eines Hubs erweitert werden. In dem Datensatz liegen 44 reine Depots, zwei reine Hubs und fünf Depothubs vor. Diese Depots und/oder Hubs (siehe Abbildung 6.1) sind so in der Fläche verteilt, dass das gesamte Bundesgebiet durch ein Güterverkehrsnetz abgedeckt ist. Neben den einzelnen Standorten sind in der Abbildung noch die wichtigsten deutschen Flüsse und Gebirge eingezeichnet. Dadurch soll ein besserer Überblick über die geographischen Anordnungen gegeben werden. Fahrzeiten zwischen Depots, welche per Luftlinie sehr nah zusammenliegen, können doch länger sein als erwartet. Die Nummern innerhalb der kleinen Rechtecke geben die von uns vergebene Nummer des Standortes wieder. Weiterhin wurden die verschiedenen Postleitzonen sehr grob in der Abbildung skizziert. Diese sind für die Analyse der Sendungsaufkommen (siehe Abschnitt 6.2.1.3) von Bedeutung.

Für die Generierung der Servicerouten und Berechnung ihrer Kosten wurde vorab mithilfe einer Routenplanersoftware und Standarddurchschnittsgeschwindigkeiten für LKW zwischen den einzelnen Standorten

- die Entfernung in Minuten,
- die Entfernung in Kilometern und die darin
- enthaltenen Mautkilometer

berechnet.

Um den organisatorischen Ablauf so reibungslos wie möglich zu gestalten und den angebotenen Serviceleistungen gerecht zu werden, sind zeitliche Vorgaben für den Fahrzeugeinsatz und die Umschlagsleistungen an den Depots und Hubs gegeben. Dadurch soll eine

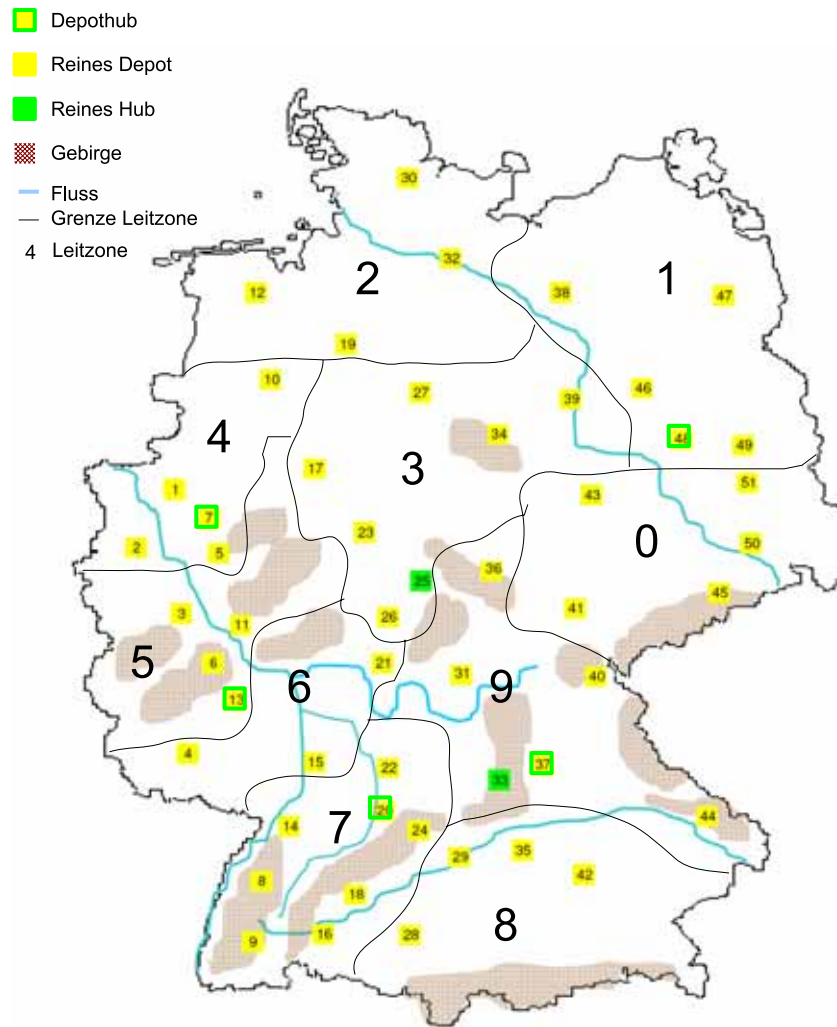


Abbildung 6.1: Lage der Standorte

grobe Abstimmung zwischen den Sammel- und Verteilverkehren im Nahverkehr sowie den Linienverkehren im Fernverkehr gewährleistet werden. Alle Depots haben die gleichen Zeitfenster. Für die folgenden empirischen Tests wurde die EPT auf 15.00 Uhr und die LPT auf 18.00 Uhr festgesetzt. Weiterhin wurde das Delivery-Zeitfenster von 03.00 Uhr (EDT) bis 07.00 Uhr (LDT) gesetzt. In den meisten Depots sind jedoch normalerweise gestaffelte Abfahrtszeiten je nach Entfernung der Serviceroute angesetzt. Diese Zeitklassen können wir jedoch nicht vorher festsetzen, da die Depot-Zeitfenster zur Generierung der Servicerouten benötigt werden. Dies ist auch der Grund, warum die Pickup-Zeitfenster von uns außergewöhnlich früh gewählt wurden. Dadurch wollen wir eine Vielzahl von möglichen Servicerouten zur Auswahl haben. Als Zeitfenster für die Hubs sind die späteste Anlieferzeit und die früheste Abfahrtszeit (SET) am Hub gegeben. Die SET kann je Hub unterschiedlich gewählt werden. Für die Parametertests wurde die SET für alle Hubs mit 02.00 Uhr festgesetzt. Der Programmcode ist so geschrieben, dass eine Veränderung dieser Parameter jederzeit möglich ist.

Die Kapazität der Hubs ist über die Anzahl möglicher abzuarbeitender LKW bis zur SET gegeben. Diese Kapazität nimmt mit fortschreitender Uhrzeit ab. Zur Modellierung dieser Anforderung wurden sieben verschiedene Zeitklassen eingeführt, welche frei definiert werden können. Dazu kann die jeweilige Kapazität angegeben werden. Grundsätzlich können

die Kapazitäten an den Hubs sehr leicht angepasst werden und stellen somit selten Engpässe dar. Für die Tests wurde mit Hubs gearbeitet, die vier Zeitklassen haben, wobei in jeder Stunde (einer Zeitklasse) 20 LKW abgefertigt werden können. Der Hub 25 wird in den Tests als so genannter Zentralthub gesetzt, d. h. von jedem Depot muss es mindestens eine Serviceroute zu diesem Hub und von diesem Hub zum Depot geben.

6.2.1.2 Fahrzeugdaten

Die in der Planung eingesetzten Transportmittel sind homogene Wechselbrückenfahrzeuge, die unbegrenzt zur Verfügung stehen. Jeder LKW kann zwei Wechselkoffer transportieren, welche für alle zu transportierenden Produkte des LDL geeignet sind. Bei dem vorherrschenden Produktmix des LDL ist die Kapazitätsobergrenze eines Wechselkoffers mit 600 TE angegeben. Somit kann ein LKW maximal 1.200 TE befördern.

Zur Abbildung der Lenkzeiten des Fahrzeuges wurden von uns folgende Annahmen getroffen:

1. Eine Fahrzeugroute mit einem Fahrer darf nur eine Fahrzeit von neun Stunden aufweisen.
2. Dabei wird angenommen, dass die nötigen Lenkzeitunterbrechungen bei den Zwischenstopps an den Depots oder an den Hubs genommen werden.
3. Eine Fahrzeugroute mit zwei Fahrern darf nur eine Fahrzeit von 20 Stunden aufweisen. Lenkzeitunterbrechungen müssen hier nicht berücksichtigt werden, da während ein Fahrer arbeitet der andere ruhen kann.

Die Servicerouten werden in einem Preprocessing-Schritt am Anfang des Verfahrens generiert und auf Machbarkeit bzgl. der Zeitfenster und Lenkzeiten überprüft. Nur in diesem Sinn machbare Servicerouten stehen dem Verfahren zur Planung der Linienverkehre zur Verfügung. Für jede dieser Servicerouten sind die einzelnen Stopps (Standorte) bekannt, jedoch nicht die genauen Abfahrts- und Ankunftszeiten (siehe Abschnitt 5.3). Die für das Verfahren notwendigen Fahr- und Wartezeiten berechnen wir folgendermaßen:

Fahrzeit der Serviceroute = Summe der Fahrzeiten zwischen den einzelnen Standorten

Wartezeit der Serviceroute = $\max \{ 0, (\text{Wartezeit am Delivery-Stopp} + \text{Wartezeit am Hub}) - 45 \text{ Minuten Pause} \}$

Tag	TE	Schwankungen zum Vortag	Gesamt- anstieg
Montag	295.682		
Dienstag	305.888	3,45 %	3,45 %
Mittwoch	316.058	3,32 %	6,89 %
Donnerstag	326.255	3,23 %	10,34 %
Freitag	336.447	3,12 %	13,79 %
Durchschnitt	316.066		
Gesamt	1.580.330		

Tabelle 6.1: Verteilung des Sendungsaufkommens über die Wochentage

Falls Serviceroute keine Hubroute:

- Wartezeit am Delivery-Stopp = $\max \{ 0, EDT - LPT - \text{Fahrzeit zwischen Pickup- und Delivery-Standort} \}$
- Wartezeit am Hub = 0

Falls Serviceroute eine Hubroute:

- Wartezeit am Delivery-Stopp = $\max \{ 0, EDT - SET - \text{Fahrzeit zwischen Hub und Delivery-Standort} \}$
- Wartezeit am Hub = $\max \{ 0, SET - LPT - \text{Fahrzeit zwischen Pickup-Standort und Hub} \}$

Wartezeiten für das Be- und Entladen an den Pickup- und Delivery-Stopps sind nicht mit einkalkuliert. Die Fahrzeiten zwischen den einzelnen Standorten sind als Input-Daten vorhanden (siehe Abschnitt 6.2.1.1).

6.2.1.3 Sendungsdaten

Die der Analyse und empirischen Tests zugrunde liegenden Sendungsdaten umfassen einen Zeitraum von einer Woche und sind in TE gegeben. Insgesamt werden 1.580.330 TE bei 2352 Ausgangsort-Bestimmungsort-Paaren (Commodities) abgefertigt. In Tabelle 6.1 sind die Verteilung des Aufkommens auf die einzelnen Wochentage und der Durchschnitt dargestellt. Dabei ist ein permanenter Anstieg des Sendungsaufkommens um ca. 3 % zum Vortag erkennbar. Insgesamt nimmt das Aufkommen zwischen Montag und Freitag um über 13 % im Vergleich zum Montag zu. Dadurch wird die Planung von täglich wiederkehrenden Linienverkehren erschwert. Der LDL muss für sich entscheiden, welche Daten er als Grundlage für die Planung hernehmen möchte.

Für die Parametertests, ebenso wie für die Tests zur Untersuchung der Laufzeiten und Qualität der Lösungen, wurden die Bedarfe des Wochentages Montag hergenommen. Jedoch wurden in einer Testreihe zur Untersuchung der Sensitivität die zugrunde liegenden Bedarfe mit den verschiedenen Aufkommen der Wochentage sowie dem Durchschnittswert variiert.

Eine Untersuchung des Sendungsaufkommens nach Sendungsgrößen liefert wichtige Erkenntnisse über die Sendungsstruktur. Tabelle 6.2 gibt die Einteilung der Sendungen wieder. Wir haben dazu die einzelnen Sendungen des Wochentages Montag in verschiedene Größenklassen gruppiert. Für jede Klasse haben wir dann die Anzahl der Commodities (= Comm) sowie die dazugehörigen TE summiert. Zur besseren Veranschaulichung haben wir den Anteil dieser Sendungsdaten dann noch in Prozent und kumuliert in Prozent angegeben.

Sendungsgröße in TE	Anzahl Comm	Anzahl TE	Anteil Comm	Anteil TE	Anteil Comm kumuliert	Anteil TE kumuliert
0 - 10	175	804	7,44 %	0,27 %	7,44 %	0,27 %
11- 50	496	15.283	21,09 %	5,17 %	28,53 %	5,44 %
51 - 100	554	40.606	23,55 %	13,73 %	52,08 %	19,17 %
101 - 150	411	51.045	17,47 %	17,26 %	69,56 %	36,44 %
151 - 200	263	45.309	11,18 %	15,32 %	80,74 %	51,76 %
201 - 250	148	33.197	6,29 %	11,23 %	87,03 %	62,99 %
251 - 300	114	31.335	4,85 %	10,60 %	91,88 %	73,59 %
300 - 600	181	71.196	7,70 %	24,08 %	99,57 %	97,66 %
> 600	10	6.907	0,43 %	2,34 %	100,00 %	100,00 %
Gesamt	2.352	295.682				

Tabelle 6.2: Verteilung des Sendungsaufkommens nach Sendungsgrößen

Der größte Anteil der Commodities hat ein Aufkommen zwischen 11 und 200 TE. Sie machen dabei aber weniger als 50 % der gesamten TE aus; über die Hälfte aller Commodities haben sogar weniger als 100 TE Bedarf aufzuweisen. Im Gegensatz dazu gibt es nur sehr wenig Ausgangsort-Bestimmungsort-Paare mit großen Bedarfen. Über 99 % der Commodities (97 % der TE) haben ein Aufkommen von weniger als 600 TE und mehr als 91 % der Commodities (73 % der TE) haben sogar einen Bedarf von weniger als 300 TE. Damit füllen sie noch nicht einmal die Hälfte der Kapazität einer Wechselbrücke aus (siehe dazu Abschnitt 6.2.1.2). Somit macht nur für sehr wenige Commodities ein direkter Transport zwischen den Depots Sinn. Auch durch eine Konsolidierung über eine Beiladung und / oder eine Containerkonsolidierung ist die Auslastung des LKW noch sehr gering. Für die meisten Sendungsaufkommen ist daher ökonomisch nur eine Konsolidierung über ein Hub machbar.

Nicht nur die Analyse der Sendungsgröße ist von Interesse, sondern auch die regionale Verteilung des Sendungsaufkommens. Dazu haben wir zuerst für jedes einstellige Postleitzahlengebiet (PLZ-Gebiet) - auch genannt Postleitzone oder nur Leitzone - das Sendungsaufkommen innerhalb der Leitzone und zwischen den Leitzonen je nach Versand und Empfang kumuliert (siehe Tabelle 6.3). Die einzelnen Postleitzonen sind für einen Überblick in der Abbildung 6.1 grob wiedergegeben.

PLZ-Leitzzone	Sendungsaufkommen innerhalb der Leitzzone	Sendungsaufkommen zwischen den Leitzonen	
		Versand	Empfang
0	1.526	6.415	18.687
1	905	6.203	19.386
2	3.195	21.527	24.130
3	4.130	29.170	31.938
4	8.539	43.908	33.470
5	3.596	32.762	27.599
6	1.192	19.510	20.769
7	9.104	45.185	28.123
8	3.432	24.659	26.788
9	3.321	27.403	25.852
Gesamt	38940	256742	256742

Tabelle 6.3: Sendungsaufkommen innerhalb und außerhalb der Leitzonen

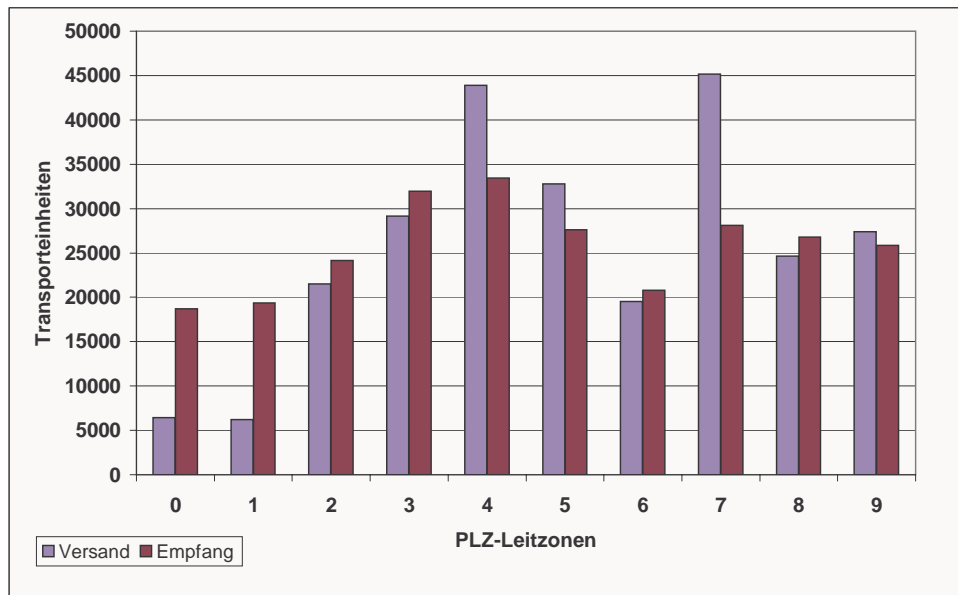


Abbildung 6.2: Regionale Verteilung von Versand- und Empfangsaufkommen

Das Ergebnis ist graphisch in Abbildung 6.2 dargestellt. Versandseitig ist eine starke Konzentration des Aufkommens auf das Ruhrgebiet (Leitzone 4) und den Raum Baden-Württemberg (Leitzone 7) feststellbar. Dagegen fallen die Leitzonen 0 und 1 für die neuen Bundesländer mit sehr geringen Versandmengen auf. Ein Grund hierfür ist in der geringen Anzahl an Industrieunternehmen in diesen Gebieten zu finden. Empfangsseitig sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Leitzonen weniger ausgeprägt. Ein Vergleich mit den Daten für Bevölkerungswachstum (Statistisches Bundesamt (2007)) lässt einen proportionalen Zusammenhang zwischen den Empfangsmengen und der Bevölkerungsverteilung in den Postleitzonen erkennen.

Für weitere detailliertere Untersuchungen haben wir dann noch die einzelnen Versand- und Empfangsmengen zwischen den einzelnen Leitzonen in einer Pivottabelle aufgetragen und ins Verhältnis zu den Empfangsmengen (siehe Tabelle 6.4) und Versandmengen (siehe Tabelle 6.5) je Leitzone gesetzt.

nach von	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		5,24	2,08	3,36	2,49	1,93	1,77	2,35	1,98	3,48
1	3,56		3,28	3,68	2,76	2,24	1,95	2,27	1,91	1,83
2	8,14	11,90		11,54	11,03	9,28	7,39	8,17	7,43	7,52
3	12,90	11,46	14,87		15,99	12,80	10,99	12,87	11,08	12,36
4	17,84	17,42	21,66	22,16		23,24	17,98	19,35	17,81	17,52
5	11,80	11,45	13,39	14,21	17,61		16,01	15,75	12,83	13,46
6	7,11	6,29	7,58	7,83	8,17	9,77		9,81	8,71	8,16
7	17,95	17,67	17,23	17,31	19,35	19,64	22,20		24,13	22,23
8	8,67	8,47	9,17	8,83	10,04	9,95	11,00	15,98		13,45
9	12,03	10,10	10,74	11,08	12,55	11,14	10,70	13,44	14,13	
Σ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 6.4: Detaillierte Verteilung des Empfangsaufkommens zwischen den Leitzonen (in Prozent)

Die oben genannten Erkenntnisse sind auch klar in der detaillierten Aufstellung 6.4 über die prozentuale Verteilung der Empfangsmengen je Leitzone erkennbar. Aus den neuen Bundesländern erhalten die jeweiligen anderen Leitzonen unterdurchschnittlich wenig Sendungen (weniger als 5,3 % der gesamten Empfangsmenge). Im Gegensatz dazu empfangen alle Leitzonen von den PLZ-Gebieten 4 und 7 zwischen 17 und 25 % ihrer gesamten Empfangsmenge, das ist überdurchschnittlich viel. Weitere ausgeprägte Schwankungen sind empfangsseitig nicht zu erkennen.

Diese großen Unterschiede machen sich bei der Planung bemerkbar. Der LDL muss das Ungleichgewicht von Fahrzeugen und Wechselbrücken ausgleichen. Weitere Folgen können eine große Anzahl von Leerfahrten sein. Hierbei ist eine gute Planung für einen effizienten und kostenoptimalen Einsatz der eigenen Ressourcen sowie der eingekauften Dienstleistungen notwendig.

nach von	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
0		15,78	7,84	16,71	13,00	8,31	5,74	10,32	8,28	14,03	100
1	10,72		12,78	18,93	14,91	9,98	6,53	10,29	8,25	7,61	100
2	7,07	10,68		17,13	17,15	11,90	7,13	10,67	9,25	9,03	100
3	8,27	7,59	12,33		18,35	12,11	7,82	12,41	10,17	10,95	100
4	7,59	7,66	11,94	16,12		14,61	8,51	12,39	10,86	10,31	100
5	6,73	6,75	9,89	13,85	17,99		10,15	13,52	10,49	10,62	100
6	6,81	6,23	9,40	12,81	14,01	13,82		14,14	11,95	10,81	100
7	7,42	7,56	9,23	12,24	14,33	12,00	10,20		14,30	12,72	100
8	6,57	6,63	9,00	11,43	13,63	11,14	9,27	18,23		14,10	100
9	8,20	7,12	9,48	12,92	15,33	11,22	8,11	13,80	13,81		100

Tabelle 6.5: Detaillierte Verteilung des Versandaufkommens zwischen den Leitzonen (in Prozent)

Bei der detaillierten Analyse des Versandaufkommens (siehe Tabelle 6.5) wird deutlich, dass von allen Leitzonen überdurchschnittlich viel (zwischen 11 % und 19 %) an die PLZ-

Gebiete 3 und 4 versendet werden. Weiterhin ist eine regionale Konzentration ersichtlich. So werden im Allgemeinen an die angrenzenden Leitzonen prozentual mehr TE versendet als an die meisten anderen Leitzonen. Beispielsweise gehen von Postleitzone 0 15,78 % der Sendungen in das PLZ-Gebiet 1, 16,71 % in das Gebiet 3 und 14,03 % in die Leitzone 9. Dadurch spielen regionale Umschlagsmöglichkeiten bei der Planung der Linienverkehre eine wichtige Rolle.

6.2.1.4 Kosten

Im Rahmen des Verfahrens sollen bei der Generierung der Servicerouten die Kosten über die gewählten Servicerouten minimiert werden. Die Servicerouten werden dabei in einem Preprocessing-Schritt generiert, auf Machbarkeit überprüft und bei Erfolg die zugehörigen Kosten berechnet. Die zugrunde liegenden Kostensätze werden von uns dabei folgendermaßen angenommen:

- Übernachtungskosten: 20 Euro/Tag
- Spesen: 10 Euro/Tag
- Fahrzeugeinsatzkosten: 91 Euro/Einsatz
- Kosten/km: 0,36 Euro/km
- Kosten/Stunde: 24 Euro/Stunde
- Mautkosten/km: 0,124 Euro/Mautkm

Aufgrund der im Verfahren eingesetzten Dekomposition werden alle Kosten den Servicerouten zugeordnet. Die Anzahl der TE auf einer Serviceroute und die Anzahl der Umschläge wird erst in dem Schritt Generierung von Auftragsrouten bestimmt. Daher müssen Umschlagskosten in dem implementierten Verfahren vernachlässigt werden. Dieses Vorgehen kann jedoch durch die großen Kostenunterschiede zwischen den Kosten für eine Serviceroute und den Umschlagskosten für die TE gerechtfertigt werden.

Die Kosten einer Serviceroute berechnen wir folgendermaßen:

Kosten einer Serviceroute = Fahrzeugeinsatzkosten + Länge der Serviceroute in km * (Kosten/km + Mautkosten/km) + Kosten für Fahrer

- Falls Fahrzeit der Serviceroute \leq Lenkzeit für einen Fahrer und erster Stopp der Serviceroute \neq letzter Stopp der Serviceroute:
Kosten für Fahrer = (Fahrzeit der Serviceroute + Wartezeit der Serviceroute) * Kosten/Stunde + Spesen + Übernachtungskosten
- Falls Fahrzeit der Serviceroute \leq Lenkzeit für einen Fahrer und erster Stopp der Serviceroute = letzter Stopp der Serviceroute:
Kosten für Fahrer = (Fahrzeit der Serviceroute + Wartezeit der Serviceroute) * Kosten/Stunde + Spesen

- Falls Fahrzeit der Serviceroute $>$ Lenkzeit für einen Fahrer und erster Stopp der Serviceroute \neq letzter Stopp der Serviceroute (Rundtour):
 Kosten für Fahrer = ((Fahrzeit der Route + Wartezeit der Route) *
 Kosten/Stunde + Spesen + Übernachtungskosten) * 2
- Falls Fahrzeit der Serviceroute $>$ Lenkzeit für einen Fahrer und erster Stopp der Serviceroute = letzter Stopp der Serviceroute:
 Kosten für Fahrer = ((Fahrzeit der Serviceroute + Wartezeit der Serviceroute) *
 Kosten/Stunde + Spesen) * 2

6.2.2 Aufbau der Testinstanzen

Um das Verfahren sinnvoll untersuchen zu können, sind Testinstanzen unterschiedlicher Größenordnungen notwendig. Vor allem Testinstanzen mit weniger als 49 Depots werden für die Parametertests benötigt. Daher wollen wir in Abschnitt 6.2.2.1 die Vorgehensweise zur Erstellung von weiteren Testproblemen mit reduzierter Problemgröße aus dem Datensatz darstellen. In Kapitel 6.2.2.2 werden dann die einzelnen Testinstanzen anhand von spezifischen Problem-Charakteristika beschrieben.

6.2.2.1 Vorgehensweise zur Erstellung der Testinstanzen

Aus dem Datensatz mit 44 reinen Depots, zwei reinen Hubs und fünf Depothubs wollen wir vier verschiedene Gruppen von Testproblemen mit 20, 30, 40 und 49 Depots oder Depothubs mit der Funktion Depot bilden. Die Hubs oder die Hubfunktion der Depothubs soll alternativ bei den einzelnen Testinstanzen hinzugeschaltet werden können. Die Idee der folgenden Vorgehensweise (vgl. Geyer (2007)) ist, eine Verdichtung der Standorte vorzunehmen. Dazu werden Depots zu Verbänden verdichtet und jeweils ein Depot mit seinem Sendungsaufkommen als Repräsentant für seinen Verbund gewählt. Die Depothubs werden von vornherein aus der Verdichtung ausgeschlossen. Stattdessen sind sie mit ihrer Funktion als Depot Bestandteil jeder Testinstanz.

Start: Die Menge der Depots für das Testproblem besteht nur aus den Depothubs (Standorte mit den Nr. 7, 13, 20, 37, 48). Die Menge der Depots für die Verbundbildung wird aus allen Depots mit Ausnahme der Depothubs gebildet.

1. Schritt: Standorte mit sehr geringem Versand- und Empfangsaufkommen werden für Testprobleme mit weniger als 49 Depots nicht zugelassen. Sie werden somit aus der Depotmenge für die Verbundbildung ausgeschlossen. Als sinnvolle Grenze wurde dabei eine Größe von 4.000 TE kumuliert über die gesamte Versand- bzw. Empfangsmenge des Depots gesetzt. Dadurch wurden die neun Depots in Tabelle 6.6 heraus gefiltert.

2. Schritt: Aus der Menge der Depots für die Verbundbildung werden alle möglichen Depotpaare gebildet. Diese Depotpaare werden nach folgenden Prioritäten sortiert:

- 1. Priorität:** Aufsteigend nach Fahrzeit (Entfernung in Minuten)
- 2. Priorität:** Aufsteigend nach Entfernung in Kilometern
- 3. Priorität:** Absteigend nach Anzahl der Mautkilometer

Standort - nummer	durchschnittliche Versandmenge	durchschnittliche Empfangsmenge
26	3.575	3.635
28	2.972	3.751
34	2.190	3.387
45	3.166	3.921
46	1.510	3.013
47	122	2.347
49	276	2.952
51	297	2.285

Tabelle 6.6: Depots mit Versand- und Empfangsaufkommen kleiner 4.000 TE (in Anlehnung an Geyer (2007))

Depots, die zeitlich sehr nahe zusammenliegen, werden durch dieses Vorgehen für eine Verdichtung priorisiert. Ferner werden unterschiedliche Fahrzeiten aufgrund von verschiedenen Straßenarten (z. B. Autobahn, Bundesstraße oder Stadtstraße) und geographischen Hindernissen (z. B. Gebirge, Flüsse, Brücken oder Tunnel) berücksichtigt. Zusätzlich werden bei gleicher Entfernung in Kilometern die Depotpaare mit den geringeren Mautkosten bevorzugt. Das Ergebnis dieser Priorisierung kann in Tabelle 1 im Anhang nachgelesen werden.

3. Schritt: Die Bildung der Depotverbände wird auf Grundlage der Priorisierung in Schritt 2 durchgeführt. Dabei wird nach absteigenden (laut Priorisierungsregeln: beste zuerst) Depotpaaren folgendermaßen vorgegangen:

- A: Überprüfe, ob ein oder beide Depots des Depotpaares schon Bestandteil eines Verbundes sind:
- Falls eines der Depots Bestandteil eines Verbundes ist, weise das nicht zugehörige Depot des Depotpaares diesem Verbund zu. Zusätzlich streiche dieses Depot aus der Menge der Depots zur Verbundbildung und gehe zu B.
 - Falls beide Depots zum gleichen Verbund gehören, gehe zu B.
 - Falls die Depots Bestandteil von zwei verschiedenen Verbänden sind, lege diese zwei Verbände zu einem Verbund zusammen. Weiterhin ersetze in der Menge der Depots zur Verbundbildung diese zwei Verbände durch den neuen und gehe zu B.
 - Falls kein Depot zu einem Verbund gehört, bilde aus den beiden Depots des Depotpaares einen neuen Verbund. Ferner streiche beide Depots aus der Menge der Depots zur Verbundbildung und füge den neuen Verbund dieser Menge hinzu. Gehe zu B.
- B: Bestimme Anzahl der Depots und Verbände in der Menge der Depots zur Verbundbildung. Hierbei wird ein Verbund wie ein einzelnes Depot, nämlich als 1, gezählt.
- C: Falls Anzahl der Depots und Verbände plus Anzahl Depothubs gleich die Anzahl gewollter Depots im Testproblem ist, gehe zum 4. Schritt. Ansonsten gehe zum nächsten Depotpaar und fange für dieses Depotpaar bei A an.

4. Schritt: Für jeden Verbund in der Menge der Depots zur Verbundbildung wird ein Repräsentant nach dem größten Versand- und Empfangsaufkommen ausgewählt. Die restlichen Depots aus diesem Verbund werden eliminiert.

5. Schritt: Die jetzt noch vorhandenen Depots in der Menge der Depots zur Verbundbildung werden mit der Menge der Depots für das Testproblem vereint (siehe Start).

Das Ergebnis dieses Vorgehens für die Gruppe von Testinstanzen mit 20 Depots ist graphisch in Abbildung 6.3 dargestellt. Sie beinhaltet eine Skizze der Verbünde mit seinen Depots, den einzelnen Hubs, Depots und Depothubs. Weiterhin sind die eliminierten Depots und die Repräsentanten eines Verbundes gekennzeichnet.

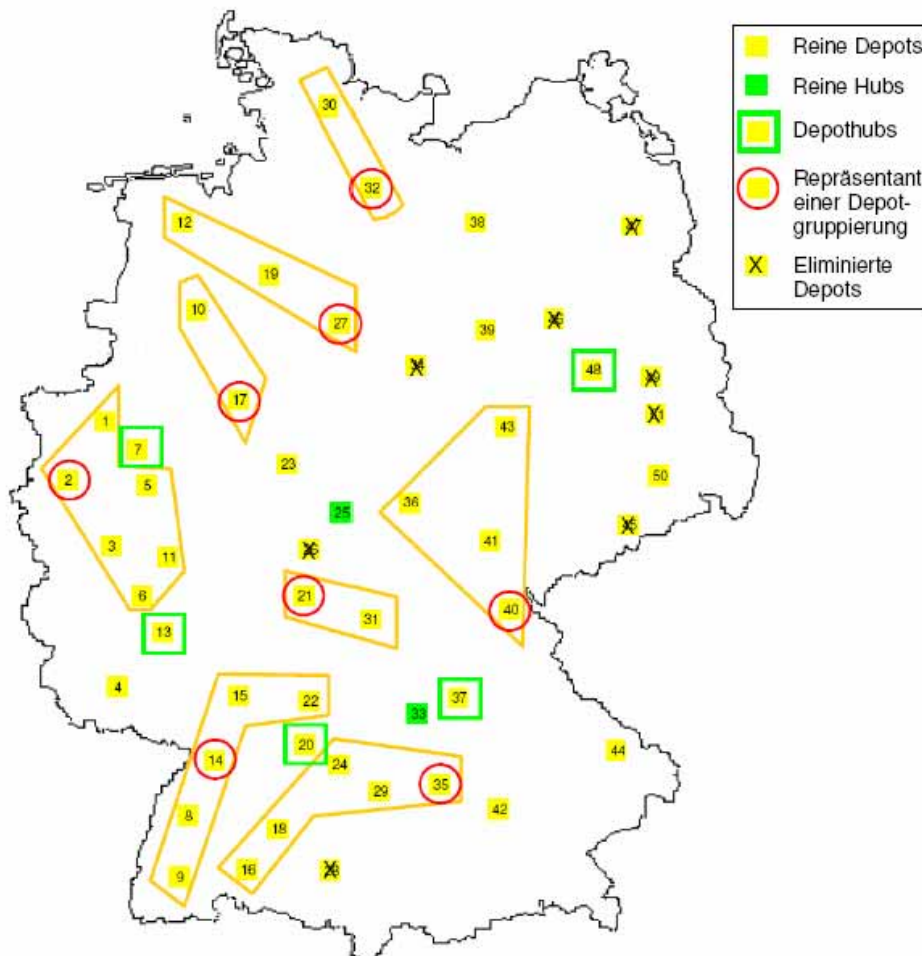


Abbildung 6.3: Deutschlandkarte mit den Depotverbänden für die Gruppe mit 20 Depots (Geyer (2007))

Durch dieses Vorgehen erhalten wir die Reduzierung der Problemgröße und die vier gewünschten Gruppen von Testinstanzen mit 20, 30 und 40 Depots sowie 49 Depots. In jeder dieser vier Gruppen von Testproblemen können für das Testen einzelner Instanzen die Hubs oder die Funktion Hub der Depothubs hinzugefügt werden. Die Gruppen der Testprobleme werden mit ihrer Anzahl der Depots und den einzelnen Hubs, z. B. 20Depots_hub25_33_7 bezeichnet. Für die empirischen Tests haben wir von vornherein festgelegt, dass der Hub mit der Nummer 25 immer von jedem Depot aus angefahren werden soll. Als Zweites wird dann immer der Hub 33 hinzugefügt.

6.2.2.2 Beschreibung der Testinstanzen

Die Problemgröße einer Instanz ist in erster Linie durch die Anzahl der möglichen Servicerouten R determiniert. Diese wird durch D , die Menge der Depots und Depothubs, und H , die Menge der Hubs und Depothubs mit Funktion `Hub`, und den dazugehörigen Zeitfenstern festgelegt. Im Rahmen der Tests sind die Zeitfenster fest vorgegeben und werden nicht variiert. Aus der Anzahl der Depots leitet sich die Anzahl der möglichen Cutset-Inequalities für $|S| = 2$, $|T| = 2$, $|S| = 3$ und $|T| = 3$ ab. Daneben ist noch die Anzahl an Commodities, vor allem bei der Generierung der Auftragsrouten, von Bedeutung. Folgende Notationen werden benutzt:

Instanz	Name der Testinstanz
D	Anzahl der Depots
H	Anzahl der Hubs
C	Anzahl der Commodities
HR	Hubroute $\subset R$
PR	Pickup-Direktroute $\subset R$
DR	Delivery-Direktroute $\subset R$
R	Anzahl der Routen
HR	Anzahl der Hubrouten
PR	Anzahl der Pickup-Direktrouten
DR	Anzahl der Delivery-Direktrouten
2er	Anzahl Schnitte für $ S = 2$ und $ T = 2$
3er	Anzahl Schnitte für $ S = 3$ und $ T = 3$

Die vorliegenden Instanzen variieren diese Performance-Faktoren. Ein Auszug von verschiedenen Instanzen aus den vier Gruppen und ihrer Größe ist in Tabelle 6.7 dargestellt. Eine genaue Auflistung der einzelnen Depots jeder Testgruppe befindet sich im Anhang in Tabelle 2.

6.2.3 Notation zur Beschreibung der Ergebnisse

Die folgenden Schreibweisen werden zur Darstellung der Ergebnisse der folgenden Analysen verwendet:

Instanz	D	H	C	PR	DR	HR	R	2er	3er
20Depots_hub25	20	1	380	560	5.996	6.240	12.796	382	2.282
20Depots_hub25_33	20	2	380	560	5.996	11.431	17.987	382	2.282
30Depots_hub25	30	1	870	1.654	20.572	27.434	49.660	872	8.122
30Depots_hub25_33	30	2	870	1.654	20.572	50.226	72.452	872	8.122
40Depots_hub25	40	1	1.560	4.144	50.630	90.396	145.170	1.562	19.762
40Depots_hub25_33	40	2	1.560	4.144	50.630	167.458	222.232	1.562	19.762
49Depots_hub25	49	1	2.352	6.864	90.067	165.590	262.521	2.234	36.850
49Depots_hub25_33	49	2	2.352	6.864	90.067	303.330	400.261	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7	49	3	2.352	6.864	90.067	426.410	523.341	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_13	49	3	2.352	6.864	90.067	435.658	532.589	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_20	49	3	2.352	6.864	90.067	409.705	506.636	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_37	49	3	2.352	6.864	90.067	431.982	528.913	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_48	49	3	2.352	6.864	90.067	371.695	468.626	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_13	49	4	2.352	6.864	90.067	558.738	655.669	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20	49	4	2.352	6.864	90.067	532.785	629.716	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_37	49	4	2.352	6.864	90.067	555.062	651.993	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_48	49	4	2.352	6.864	90.067	478.070	575.001	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_20_13	49	4	2.352	6.864	90.067	542.033	638.964	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_20_37	49	4	2.352	6.864	90.067	661.437	758.368	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_20_48	49	4	2.352	6.864	90.067	494.775	591.706	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20_13	49	5	2.352	6.864	90.067	665.113	762.044	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20_37	49	5	2.352	6.864	90.067	661.437	758.368	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20_48	49	5	2.352	6.864	90.067	601.150	698.081	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	49	6	2.352	6.864	90.067	733.478	830.409	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	49	6	2.352	6.864	90.067	729.802	826.733	2.234	36.850
49Depots_hub25_33_alle	49	7	2.352	6.864	90.067	862.130	959.061	2.234	36.850

Tabelle 6.7: Problemgröße für typische Testinstanzen

z_{SG}	Zielfunktionswert (in Euro) der Lösung des Modells für die Bestimmung von Servicerouten. Wollen wir zwischen verschiedenen Zielfunktionswerten unterscheiden, schreiben wir z_{SG}^i
z_{GES}	Zielfunktionswert des Gesamtalgorithmus (in Euro)
T_{GES}	Rechenzeit des Gesamtalgorithmus (in Sekunden)
$\bar{\emptyset} T_{GES}^{ITER}$	Durchschnittliche Rechenzeit je Iteration des Gesamtalgorithmus (in Sekunden)
T_{SG}	Rechenzeit zur Lösung des Modells zur Bestimmung der Servicerouten (in Sekunden)
T_{MIP}	Summierte Rechenzeiten für das Lösen der MIP im Verfahren zur Bestimmung der Servicerouten (in Sekunden)
T_{LP}	Summierte Rechenzeiten für das Lösen der LP-Relaxationen im Wurzelknoten im Verfahren zur Bestimmung der Servicerouten (in Sekunden)
T_{CUT}	Summierte Rechenzeiten für das Überprüfen der Schnitte im Verfahren zur Bestimmung der Servicerouten (in Sekunden)
T_{AG}	Rechenzeit zur Lösung des Modells zur Generierung der Auftragsrouten (in Sekunden)
#MIP	Anzahl der MIP, die zur Lösung des Modells zur Bestimmung von Servicerouten gelöst wurden. Dies entspricht der Anzahl der Iteration in diesem Verfahren.
#iter	Anzahl der Iterationen des Gesamtalgorithmus
#simpl	Anzahl der Pivotschritte des Simplex-Algorithmus bei der Lösung der MIP (ILOG (2007b))
#nodes	Anzahl der verarbeiteten (gelösten) Knoten des Branch-and-Bound-Baumes bei der Lösung der MIP (ILOG (2007b))
#cols	Anzahl der generierten Spalten im Modell
#rows	Anzahl der Zeilen im Modell
#cuts	Anzahl der verletzten Schnitte
#PR	Anzahl Pickup-Direktrouten in der Lösung
#DR	Anzahl Delivery-Direktrouten in der Lösung
#HR	Anzahl Hubrouten in der Lösung
#SR	Anzahl Servicerouten in der Lösung
#AR	Anzahl Auftragsrouten in der Lösung
#umschläge	Anzahl Umschläge in der Lösung
#umläufe	Anzahl Rundläufe und 2-Tages-Umläufe in der Lösung
#one-way	Anzahl One-Way-Fahrten in der Lösung

6.3 Tests zur Bestimmung von Servicerouten

Die Bestimmung von Servicerouten nimmt eine zentrale Bedeutung in unserer Arbeit ein. Zum einen sind die ausgewählten Servicerouten Input für die Generierung der Auftragsrouten und stellen somit die Basis für eine qualitativ gute Lösung des Planungsproblems dar. Zum anderen hängt die Laufzeit des Gesamtverfahrens stark von der Laufzeit zur Lösung dieses Problems ab. Wir wollen daher in diesem Kapitel das Verfahren beschleunigen und die Lösungsqualität mit einem exakten Verfahren vergleichen. Daher widmen wir uns im ersten Abschnitt dieses Kapitels (6.3.1) der Analyse der Laufzeit. Darauf auf-

bauend analysieren wir in Unterkapitel 6.3.2 verschiedene Parametereinstellungen für das MIP. In 6.3.3 vergleichen wir dann die Lösung der Heuristik mit einem exakten Verfahren. Zum Schluss untersuchen wir die verletzten Schnittungleichungen in Abhängigkeit vom Zielfunktionswert (siehe Abschnitt 6.3.4).

6.3.1 Analyse der Laufzeiten

Als Erstes wollen wir die Aufteilung der Gesamtlaufzeit in ihre einzelnen Bestandteile untersuchen. Ziel dieser Analyse ist es, herauszufinden an welcher Stelle es Sinn macht, das Verfahren zu beschleunigen. Daher stellen sich für uns die folgenden Fragen:

A: In welche Bestandteile kann die Laufzeit zerlegt werden? Welchen Anteil an der Gesamtlaufzeit haben die einzelnen Bestandteile?

B: Für welche Bestandteile machen weitere empirische Tests zur Beschleunigung der Heuristik Sinn?

Als Parameter werden für das Lösen des RMP im Rahmen des Column-Generation-Verfahrens und des MIP die CPLEX-Standardinstellungen verwendet. Die Auswahl der Servicerouten im expliziten Column-Generation-Verfahren, für welche die Berechnung der reduzierten Kosten durchgeführt werden soll, wird über die Parameter g_u und g_o , die Auslastungsunter- und -obergrenze, sowie die Schrittweite sw eingestellt werden. Diese Schrittweite gibt die Intervallgröße für die Reduzierung der Grenzen der maximalen Auslastung A einer Serviceroute an. Im Rahmen des Column-Generation-Verfahrens werden in jeder Iteration die Auslastungsgrenzen um die Schrittweite verringert. Für alle Routen, welche eine maximale Auslastung A zwischen diesen Auslastungsgrenzen g_u und g_o besitzen, werden die reduzierten Kosten berechnet und auf Negativität überprüft. Alle Routen mit negativen reduzierten Kosten werden zu dem RMP hinzugefügt. Für diese Tests wurde das Intervall auf 10 % gesetzt. Die Größe des Intervalls ist sehr klein gewählt, damit, aufgrund von eventuell auftretenden Speicherplatzproblemen, so wenig Routen wie möglich in das RMP und später in das MIP aufgenommen werden. Weiterhin ist die Laufzeit auf sechs Stunden beschränkt. Bei Überschreitung dieses Zeitlimits wird nach Ablauf der momentanen Iteration und nicht direkt nach den sechs Stunden abgebrochen. Die dann gefundene Kombination an Servicerouten wird als Lösung ausgegeben.

Als Testbeispiele nehmen wir aus den vier verschiedenen Testgruppen jeweils die Instanz mit Hub 25 und die Instanz mit Hub 25 und 33.

Zu A: Die Laufzeit der Heuristik wird von vier verschiedenen Faktoren bestimmt:

1. der Laufzeit zum Lösen der LP-Relaxation im Wurzelknoten mithilfe eines expliziten Column-Generation-Verfahrens (T_{LP})
2. der Laufzeit zum Lösen des MIP (T_{MIP})
3. der Laufzeit zur Überprüfung der Schnitte (T_{CUT})
4. der Anzahl an gelösten MIP ($\#MIP$)

Für die weitere Untersuchung betrachten wir die summierten Laufzeiten (in Sekunden) über alle Iterationen, die Anzahl der gelösten MIP und ob ein Abbruch aufgrund Zeitüberschreitung stattfand oder nicht. Die dazugehörigen Daten sind in Tabelle 6.8 aufgelistet. Wie daraus ersichtlich ist, können nur die Instanzen mit 20 Depots innerhalb der sechs Stunden gelöst werden. Alle anderen Instanzen fallen durch einen vorzeitigen Stopp der Optimierung und eine sehr geringe Anzahl an gelösten MIP auf. Somit sind die Laufzeiten einer Iteration schon am Anfang des Verfahrens sehr lang. Sie werden aufgrund der ansteigenden Größe des Planungsproblems durch das Zufügen von Schnitten je Iteration immer länger. Es drängt sich dann natürlich die Frage auf, welcher Bestandteil oder welche Bestandteile tragen denn zu den langen Laufzeiten bei?

Instanz	T_{MIP}	T_{LP}	T_{CUT}	T_{SG}	#MIP	Abbruch
20Depots_hub25	10856	44	2	10902	20	
20Depots_hub25_33	475	24	2	501	13	
30Depots_hub25	41447	41	2	41490	3	Ja
30Depots_hub25_33	25108	95	3	25206	4	Ja
40Depots_hub25	21764	554	6	22324	2	Ja
40Depots_hub25_33	21837	650	11	22498	2	Ja
49Depots_hub25	22514	1274	15	23803	2	Ja
49Depots_hub25_33	22419	2108	20	24547	2	Ja

Tabelle 6.8: Laufzeiten bei der Bestimmung von Servicerouten mit CPLEX-Defaulteinstellung

Aus Abbildung 6.4, welche die Anteile (in Prozent) der summierten Laufzeiten über alle Iterationen der einzelnen Bestandteile darstellt, ist ersichtlich, dass über 90 % der Gesamtlaufzeit für das Lösen der MIP aufgewendet wird. Der Rest der Laufzeit wird dann fast komplett für das Column-Generation-Verfahren verwendet und nur ein sehr geringer Anteil - im kleinen Sekundenbereich - wird für die Überprüfung der Cutset-Inequalities benötigt.

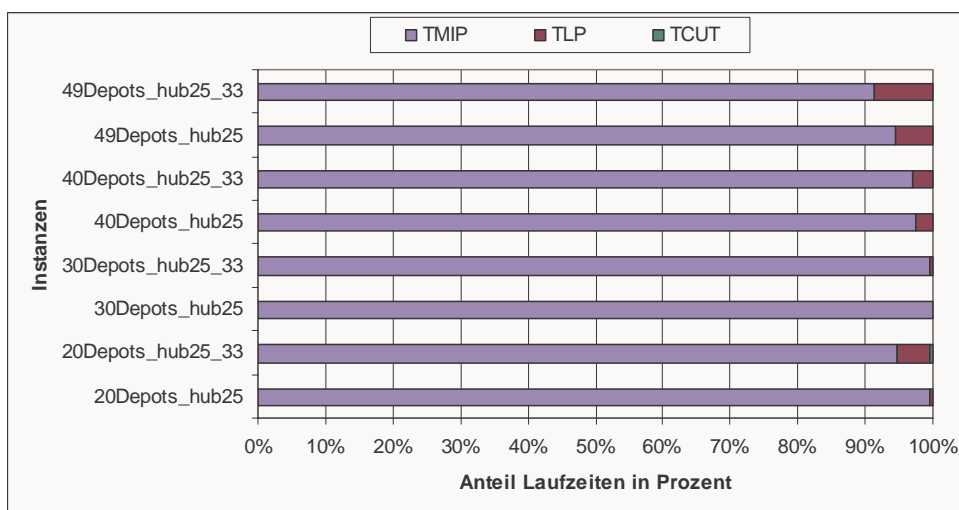


Abbildung 6.4: Anteile der Laufzeiten für die Bestimmung von Servicerouten mit CPLEX-Defaulteinstellung

Zu B: Die Tabelle 6.8 und die Abbildung 6.4 zeigen deutlich, dass das explizite Überprüfen der einzelnen Schnitte kaum Zeit in Anspruch nimmt und eine Verbesserung der Laufzeit hierfür nicht notwendig ist. Die Anzahl der zu überprüfenden Cutsets ist aus der Darstellung der Problemgrößen der Testinstanzen (siehe Tabelle 6.7) ersichtlich. Verletzte Cutset-Inequalities erzwingen jedoch eine weitere Iteration im Verfahren zur Lösung des Teilproblems Bestimmung von Servicerouten. Somit ist aus Sicht der Gesamtrechenzeit ein explizites Cut-Generation-Verfahren von Cutset-Inequalities mit $|S| > 3$ und $|T| > 3$ nicht erstrebenswert. Weitere Ergebnisse zu den Untersuchungen der Schnitte sind im Kapitel 6.3.4 aufgeführt.

In der LP-Relaxation des Wurzelknotens wird iterativ zwischen dem Lösen des RMP mit einem Simplex-Algorithmus und dem Lösen der PP (siehe Abschnitt 3.5.1) gewechselt. Die zu überprüfenden Servicerouten werden indirekt durch die Auslastungsgrenzen g_u und g_o sowie der Schrittweite sw bestimmt. Je kleiner die Schrittweite, desto weniger Servicerouten werden je Iteration überprüft, desto mehr Iterationen werden benötigt, um alle Servicerouten zu durchlaufen (siehe Abschnitt 5.5.1.2). Damit wächst die Anzahl der zu lösenden RMP an. Die Anzahl der zu lösenden PP (= Anzahl Servicerouten) bleibt jedoch immer gleich. Eine Beschleunigung des Verfahrens zum Lösen der LP-Relaxation kann somit nur durch das Simplex-Verfahren und über die Schrittweite erreicht werden.

Aus Abbildung 6.4 ist ersichtlich, dass die Laufzeiten zum Lösen der MIP mit dem Branch-and-Cut-Verfahren von CPLEX im Vergleich zu den anderen Bestandteilen des Verfahrens sehr lang sind. Daher ist es sinnvoll, nur an der Beschleunigung des Branch-and-Cut-Algorithmus zu arbeiten.

Für alle weiteren empirischen Tests zur Lösung des RMP im Rahmen des Column-Generation-Verfahrens verwenden wir die CPLEX-StandardEinstellung und die Schrittweite von 10 %. Die Parametereinstellungen für die Optimierung der MIP wird im nächsten Unterkapitel 6.3.2 bestimmt.

6.3.2 Parametertests

Dieses Kapitel ist ein sehr zentraler Bestandteil dieser Arbeit, da nur durch eine Beschleunigung des Verfahrens zur Bestimmung von Servicerouten realistische Laufzeiten für den Gesamtalgorithmus möglich sind. Nach den Ergebnissen aus dem obigen Kapitel ist es vor allem notwendig, an einer Verbesserung der Laufzeit des Branch-and-Cut-Verfahrens von CPLEX zu arbeiten. CPLEX stellt dafür dem Benutzer diverse Möglichkeiten (ILOG (2007c)) zur Verfügung. Als Erstes erläutern wir die von uns ausgewählten Parameter und gehen dann zur Analyse der Testergebnisse. Dieses Unterkapitel wird mit einer abschließenden Beurteilung abgeschlossen.

6.3.2.1 Beschreibung der Parameter

Aus einer Reihe von Performance-Faktoren haben wir uns sechs ausgewählt, welche uns sehr hilfreich erscheinen, um die Lösungsdauer und die Qualität der Ergebnisse zu beeinflussen. Eine Untersuchung aller zur Verfügung stehenden Parameter ist zeitlich nicht möglich. Die ausgewählten Parameter sind zum einen die folgenden Parameter zur Steuerung des Weges, welchen der Algorithmus im Baum zurücklegt:

- Knotenauswahlstrategie,
- Variablenauswahlstrategie,
- Branching-Richtung.

Zum anderen haben wir noch drei weitere Parameter, nämlich

- MIP Dive Strategie,
- MIP Emphasis Indikator und
- Relative MIP-Gap Toleranz

für die empirischen Tests ausgewählt.

Die einzelnen Parameter werden neben einer allgemeinen Erklärung anhand ihrer Callable Library Routine, den möglichen Einstellungswerten mit der CPLEX-Kurzbeschreibung sowie einer zugehörigen Beschreibung erläutert.

Knotenauswahlstrategie:

CPLEX bietet im Rahmen des Branch-and-Cut-Algorithmus die Möglichkeit entweder an der Stelle des momentanen Knotens weiter zu gehen (Diving) oder an einer anderen Stelle des Baumes die Abarbeitung der Knoten zu beginnen (auch genannt Backtracking). Wie oft ein Backtracking durchgeführt wird, ist durch den Parameter CPX_PARAM_BTTOL kontrollierbar. Diesen haben wir auf seinen Defaultwert 0.9999 festgesetzt, womit das Verfahren eher dazu neigt mit dem Diving fortzufahren. Sollte jedoch ein Backtracking stattfinden, können wir die Auswahl des Knotens aus der Vielzahl noch nicht besuchter Knoten im Baum mit dem Parameter CPX_PARAM_NODESEL festlegen. Die einzelnen Einstellungen - inklusive Erklärungen - können in Tabelle 6.9 nachgelesen werden.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
0	DEPTH-FIRST	Diese Tiefensuche wählt den Knoten aus, welcher zuletzt generiert worden ist.
1 (Default)	BEST-BOUND	Die Auswahl des Knotens findet über den besten Zielfunktionswert der zugehörigen LP-Relaxation statt. Dieser ist meist im oberen Bereich des Branch-and-Bound-Baumes zu finden.
2	BEST-ESTIMATE	Es wird der Knoten ausgewählt, welcher durch eine Schätzung die größte Tendenz für eine ganzzahlige Lösung relativ zur Verschlechterung des Zielfunktionswertes aufweist. Die Schätzung erfolgt durch das Weglassen aller Bedingungen, welche zur Verletzung der Ganzzahligkeit führen.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
3	VARIATION OF BEST-ESTIMATE	Alternative der Best-Estimate-Auswahl

Tabelle 6.9: Parametereinstellungen für die Knotenauswahl (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))

Variablenauswahlstrategie

Nach der Wahl eines Knotens wird über den Parameter CPX_PARAM_VARSSEL die zu verzweigende Variable für das Branching festgelegt. CPLEX gibt dem Benutzer die Möglichkeit, zwischen sechs verschiedenen Einstellung (siehe Tabelle 6.10) zu wählen.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
-1	MININFEAS	Das Branching wird an der Variable mit minimaler Unzulässigkeit ausgeführt, d. h. es wird anhand der Variable verzweigt, deren gebrochener Wert am nächsten an einer ganzen Zahl liegt.
1	MAXINFEAS	Hier erfolgt das Branching anhand der Variable, deren gebrochener Wert am weitesten entfernt von einer ganzen Zahl liegt.
0	DEFAULT	Dieser Wert erlaubt CPLEX die beste Strategie, basierend auf dem Problem und dem Fortschritt im Verfahren, selber zu wählen.
2	PSEUDO	Die Auswahl der Variable erfolgt über Pseudokosten. Die Pseudokosten werden über die Dualinformationen berechnet und erlauben eine Schätzung des Effektes der Verzweigung.
3	STRONG	Das strong-branching führt die Auswahl der Variable, basierend auf dem partiellen Lösen von Teilproblemen möglicher Verzweigungen, durch. Dahinter steht die Idee, durch diesen beträchtlichen Aufwand frühzeitig aussichtsreiche Variablen zu finden, um dadurch die Anzahl der zu verarbeiteten Knoten zu verringern.
4	PSEUDOREDUCED	Mit dieser Strategie erfolgt das Branching mithilfe von pseudo-reduzierten Kosten. Im Vergleich zur Pseudo-Strategie werden diese Kosten auf eine weniger rechenintensive Weise bestimmt.

Tabelle 6.10: Parametereinstellungen für die Variablenauswahlstrategie (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))

Branching-Richtung

Als Letztes im Rahmen des Weges durch den Baum können wir die Richtung der Verzweigung auswählen. Über den Parameter CPX_PARAM_BRDIR (siehe auch Tabelle 6.11) wird entschieden, ob zuerst der up- oder der down-Ast bearbeitet wird.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
-1	DOWN	Es findet ein Branching abwärts statt.
0 (Default)	AUTO	Es wird CPLEX die Auswahl über die Branching-Richtung gelassen.
1	UP	Das Branching wird nach oben durchgeführt.

Tabelle 6.11: Parametereinstellungen für die Branching-Richtung (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))

MIP-Dive-Strategie

Im Rahmen der MIP-Lösungsstrategie kann CPLEX gelegentlich sogenannte probing dives ausführen. Dafür werden die beiden Nachfolgeknoten untersucht. Das Ergebnis der Analyse spielt bei der Wahl des nächsten abzuarbeiteten Knotens eine Rolle. Diese probing dives sind vor allem zum Auffinden von ganzzahligen Lösungen oder ähnlichen Lösungen zur momentan besten ganzzahligen Lösung hilfreich. Die einzelnen Einstellungswerte sind aus Tabelle 6.12 ersichtlich.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
0 (Default)	AUTOMATIC	Es wird CPLEX überlassen, wann ein probing-dive stattfinden soll.
1	TRADITIONAL-DIVE	Es wird kein probing-dive durchgeführt.
2	PROBING-DIVE	An jedem Knoten werden die zwei nachfolgenden Knoten überprüft.
3	GUIDED-DIVE	Hierbei findet ein probing-dive an jedem Knoten statt. Dabei wird ein hoher Aufwand betrieben, um ähnliche Lösungen zu der momentanen besten ganzzahligen Lösung zu finden.

Tabelle 6.12: Parametereinstellungen für die MIP-Dive-Strategie (vgl. ILOG (2007c))

MIP-Emphasis-Indikator

Mit dem Parameter CPX_PARAM_MIPEMphasis steht dem Benutzer von CPLEX eine der wichtigsten Beschleunigungsoptionen für schwierige MIP zur Verfügung. Hierbei steht vor allem die Idee im Vordergrund, dass der Benutzer dem Algorithmus den Stellenwert seiner Ziele der Optimierung mitteilen kann. Der MIP-Lösungsalgorithmus arbeitet darauf hin

- eine Reihe von verbesserten ganzzahligen Lösungen zu erhalten, während
- er gleichzeitig daran arbeitet, die Optimalität einer Lösung zu beweisen (vgl. ILOG

(2007c)).

Mithilfe des MIP-Emphasis-Parameter können jetzt verschiedene Gewichtungen (siehe Tabelle 6.13) dieser zwei Ziele vorgenommen werden.

Werte	CPLEX-Kurzbeschreibung	Erläuterungen
0 (Default)	BALANCED	In dieser Einstellung arbeitet CPLEX daran, schnell den Nachweis einer optimalen Lösung zu geben. Zum Ausgleich versucht es jedoch, hoch qualitative ganzzahlige Lösungen am Anfang des Algorithmus zu finden.
1	FEASIBILITY	Hierbei wird mehr Wert auf zulässige Lösungen als auf die Optimalität einer Lösung gelegt. Dadurch generiert CPLEX mehr zulässige Lösungen; was sich wiederum auf die Schnelligkeit des Nachweises auf Optimalität negativ auswirkt.
2	OPTIMALITY	Der Benutzer möchte bei dieser Strategie einen großen Stellenwert auf die Optimalität legen. Dadurch legt CPLEX weniger Wert darauf, am Anfang des Verfahrens zulässige Lösungen zu finden.
3	BESTBOUND	Mit der Einstellung BESTBOUND wird noch mehr Relevanz auf die Optimalität gelegt als mit OPTIMALITY. Dies geschieht durch die Verschiebung der besten Schranke, welche den Zielfunktionswert, an dem ganzzahlige Lösungen noch existieren können, repräsentiert.
4	HIDDENFEAS	Hier erhält das Auffinden von ganzzahligen Lösungen einen höheren Stellenwert als der Nachweis der Optimalität. Vor allem wenn die Einstellung FEASIBILITY Schwierigkeiten hat, zulässige Lösungen zu finden, kann diese Parameterauswahl zielführend sein. CPLEX versucht hierbei, versteckte, schwer auffindbare Lösungen hoher Qualität zu lokalisieren.

Tabelle 6.13: Parametereinstellungen für den MIP-Emphasis-Indikator (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c))

Relative MIP-Gap-Toleranz

CPLEX gibt dem Benutzer die Möglichkeit, verschiedene Stoppkriterien für den Branch-and-Cut-Algorithmus festzulegen. Diese Stoppkriterien können zwei verschiedenen Gruppen zugeordnet werden. Bei der einen Gruppe von Kriterien können verschiedene Grenzwerte, wie z. B. Anzahl gefundener ganzzahliger Lösungen, Zeitlimit, Anzahl gelöster Knoten im Branch-and-Bound-Baum oder die Größe dieses Baumes, angegeben werden. Falls diese Grenze erreicht wird, stoppt der Algorithmus und die beste gefundene Lösung wird als optimal angesehen (vgl. ILOG (2007b)).

Die andere Gruppe von Kriterien beinhaltet Toleranzen bzgl. Optimalitätskriterien. Einer davon ist die relative MIP-Gap-Toleranz. Der Algorithmus stoppt, wenn eine ganzzahlige Lösung nachweislich höchstens soviel wie die MIP-Gap-Toleranz (CPLEX-Parametername CPX_PARAM_EPGAP) vom möglichen Optimalwert abweicht. Z. B. hat CPLEX den Defaultwert bei $1e-4$ festgesetzt. Somit ist eine Lösung optimal, falls sie weniger als 0,01 % von der bisher besten gefunden unteren (bei Minimierungsproblemen) bzw. oberen (bei Maximierungsproblem) Schranke entfernt ist. Es ist jedoch nicht sicher, ob noch ein besserer Zielfunktionswert existiert. Vor allem bei schwer lösbaren Problemen, bei denen die Inputdaten nur mit annähernder Genauigkeit vorliegen und die voraussichtlichen Laufzeiten lang sind, kann der Benutzer durch eine höhere MIP-Gap-Toleranz eine frühzeitige Beendigung und somit eine Laufzeitverkürzung erzielen (vgl. ILOG (2007b) und ILOG (2007c)).

6.3.2.2 Ergebnisse der Analyse der Parametertests

Ziel dieser Parametertests ist, wie schon am Anfang des Kapitels 6.1.1 erörtert, eine Einstellung, welche qualitativ gute Lösungen mit kurzen Laufzeiten erstellt, festzulegen. Wir analysieren dazu die Ergebnisse der einzelnen Parametertests anhand der folgenden Fragen:

- Wie unterscheiden sich die Rechenzeiten und der dazu gefundene beste Zielfunktionswert bei den verschiedenen Strategien bzw. Parametern?
- Wie verhalten sich die Performance-Maße Anzahl der Simplexiterationen und Anzahl der gelösten Knoten des Branch-and-Bound-Baums in Bezug auf die Rechenzeit? Die Anzahl der Simplexiterationen und die Anzahl der gelösten Knoten bis zur optimalen Lösung geben dabei den Aufwand im Branch-and-Bound-Baum wieder. Sie stehen damit in direktem Zusammenhang zur Bearbeitungszeit eines MIP.

Die Simulation wurde in der Art und Weise durchgeführt, dass jeweils nur ein Parameter gegenüber der folgenden Grundeinstellung verändert wurde:

Parameter	Parametername	Wert	Kurzerklärung
Knotenauswahlstrategie	CPX_PARAM_NODESEL	1	BEST-BOUND
Variablenauswahlstrategie	CPX_PARAM_VARSSEL	0	DEFAULT
Branching-Richtung	CPX_PARAM_BRDIR	0	AUTO
MIP-Dive-Strategie	CPX_PARAM_DIVETYPE	0	AUTOMATIC
MIP-Emphasis-Indikator	CPX_PARAM_MIPEMPHASIS	0	BALANCED
Relative MIP-Gap-Toleranz	CPX_PARAM_EPGAP	0,03	3 %

Tabelle 6.14: Grundeinstellung der Parameterwerte

Alle anderen Parameter wurden grundsätzlich bei ihren Defaultwerten gelassen. Für die Parametertests wurden aus den vier Testgruppen jeweils die Instanzen mit Hub 25 und Hub 25 und 33 herangezogen. Zur Lösung der Instanzen stand ein Zeitlimit von sechs Stunden (21600 Sekunden) zur Verfügung. Bei Überschreitung dieses Zeitlimits wird nach Beendigung der momentanen Iteration abgebrochen und die dabei gefundene Lösung ausgegeben.

Die Ergebnisse der Tests zeigen, dass eine vernünftige Auswertung erst ab Probleminstanzen von 30 Depots vorgenommen werden kann. Dies liegt daran, dass für kleinere Testbeispiele mit einer 3 %igen MIP-Gap-Toleranz das MIP bereits im Wurzelknoten gelöst wird. Dies ist an sich ein gutes Ergebnis, jedoch können damit die einzelnen von uns ausgesuchten Parameter nicht verglichen werden. Die verschiedenen Strategien für den Branch-and-Bound-Baum haben dadurch keine Durchschlagskraft und man erhält für jeden Parameterwert die gleiche Lösung.

Zur Darstellung der Ergebnisse der anderen Instanzen haben wir die gleiche Vorgehensweise und Arten von Diagrammen verwendet, wobei jeweils dieselbe Legende (siehe Abbildung 6.5) benutzt wird. Die Testbeispiele mit 30 Depots werden gelb, mit 40 Depots blau und mit 49 Depots violett dargestellt. Die jeweils hellere Farbgebung stellt die Instanz mit Hub 25 und die dunklere Farbgebung die Instanz mit Hub 25 und 33 dar.

■ 30Depots_hub25_33	■ 30Depots_hub25	■ 40Depots_hub25
■ 40Depots_hub25_33	■ 49Depots_hub25	■ 49Depots_hub25_33

Abbildung 6.5: Legende für Parametertests

In jeder Ergebnisanalyse zu den einzelnen Parametern sind jeweils drei Abbildungen vorhanden. Auf der x-Achse dieser Diagramme befinden sich jeweils die einzelnen Parameterwerte der Testbeispiele; auf der y-Achse ist jeweils ein Kriterium angetragen.

In der ersten Abbildung sind jeweils drei Graphiken - für die Problemgrößen 30 Depots, 40 Depots und 49 Depots - zu sehen. Diese stellen die Zielfunktionswerte der Testinstanzen bei den jeweiligen Parametereinstellungen dar.

In der zweiten Abbildung gibt das Diagramm auf der linken Seite die gesamte Laufzeit (in Sekunden) zur Lösung des Modells zur Bestimmung von Servicerouten wieder. Hierbei ist der Abbruch-Wert von 21600 Sekunden hervorgehoben. Die Laufzeiten der einzelnen Testinstanzen können jedoch größere Werte annehmen, da nach Überschreiten des Abbruch-Wertes erst noch die Optimierung des MIP und die Überprüfung auf verletzte Cutset-Inequalities beendet wird. Dadurch steht eine Lösung für das nächste Teilproblem Generierung von Auftragsrouten zur Verfügung. Im Diagramm auf der rechten Seite der zweiten Abbildung ist die durchschnittliche Rechenzeit zur Lösung eines MIP angegeben. Da zumeist ab einer Probleminstanz von 40 Depots der Algorithmus länger als sechs Stunden benötigt, haben wir für eine bessere Vergleichbarkeit die durchschnittlichen Werte der MIP-Lösungsdauer sowie die Anzahl der Simplexiterationen und der Anzahl gelöster Knoten je MIP hergenommen. Dafür haben wir die jeweiligen Gesamtsummen (Summe der einzelnen Werte über alle Iterationen) durch die Anzahl der Iterationen geteilt. Die einzelnen Ausgangswerte sind im Anhang nachlesbar.

Die dritte Abbildung gibt zum einen die durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen (Diagramm auf der linken Seite) und zum anderen die durchschnittliche Anzahl an gelö-

ten Knoten im Branch-and-Bound-Baum für die Lösung eines MIP wieder (Diagramm auf der rechten Seite). Säulen, die im Diagramm oben abgeschnitten sind, sollen Ergebnisse mit weitaus höherem Wert anzeigen als dargestellt. Die exakte Höhe ist jedoch irrelevant, da es auf den Vergleich mit den anderen Parametereinstellungen ankommt.

Knotenauswahlstrategie:³⁸

Die Zielfunktionswerte, welche in Abbildung 6.6 dargestellt sind, lassen eine erste Tendenz zum Parameterwert 1 erkennen. Mit diesem Wert wird oft das beste Ergebnis erzielt. Falls dies nicht zutrifft, ist der Zielfunktionswert dieser Testbeispiele nicht weit vom besten Zielfunktionswert entfernt. Die drei weiteren Parameter lassen keine weitere Priorisierung zu.

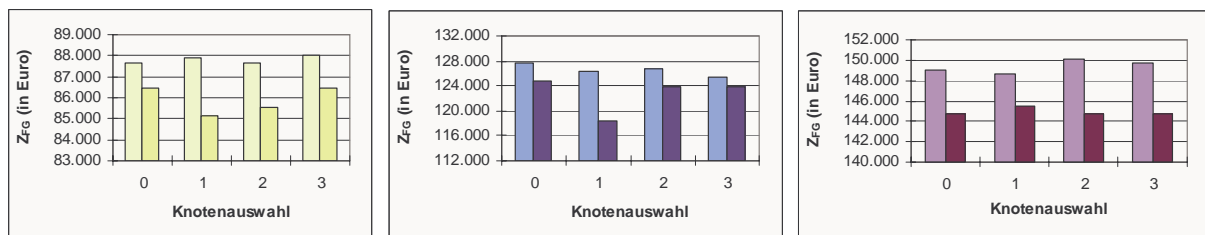


Abbildung 6.6: Knotenauswahlstrategie: Zielfunktionswerte der einzelnen Testinstanzen

Es ist jedoch wichtig, dieses Ergebnis der Analyse noch durch die anderen Performance-Maße zu untermauern oder zu widerlegen. Denn der Fokus für die Analysen liegt auf einer geringen Lösungsdauer, da diese als besonders kritischer Faktor angesehen wird und aufgrund der heuristischen Vorgehensweise ein optimaler Zielfunktionswert meist nicht vorliegt.

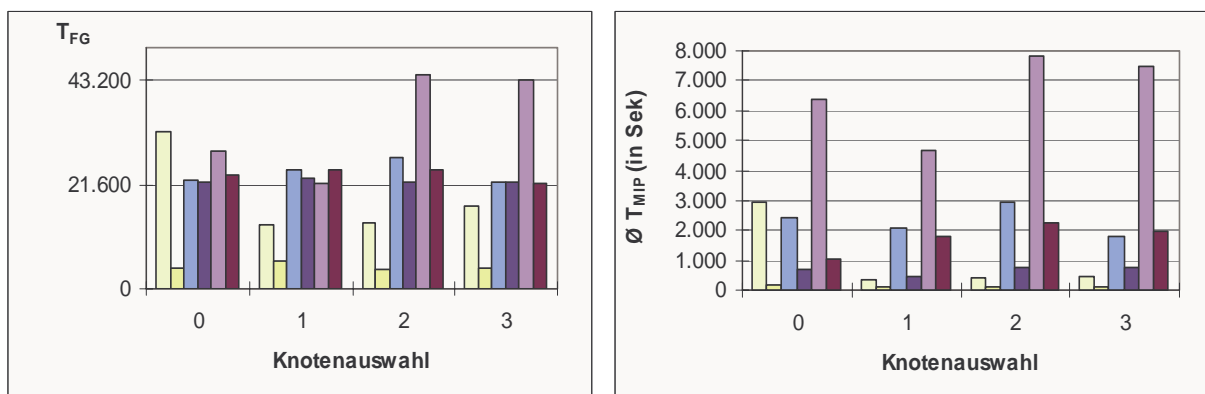


Abbildung 6.7: Knotenauswahlstrategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Aus der Abbildung 6.7 zu den Gesamtlaufzeiten ist erkennbar, dass alle Testbeispiele ab 40 Depots mehr als sechs Stunden Laufzeit aufweisen. Von den anderen wird einzig die Testinstanz 30Depots_hub25 mit der Einstellung 0 vorzeitig abgebrochen. Ein Blick auf Abbildung 6.7 zur mittleren Laufzeit der MIP genügt, um zu erkennen, dass der Parameterwert 1 mit Ausnahme der Testinstanzen 40Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33 die kürzesten Laufzeiten aufzuweisen hat. Dies wird auch durch die Untersuchung der Anzahl

³⁸Die Ergebnisse sind detailliert in den Tabelle 3 und 4 im Anhang aufgelistet.

Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten in Abbildung 6.8 unterstützt.

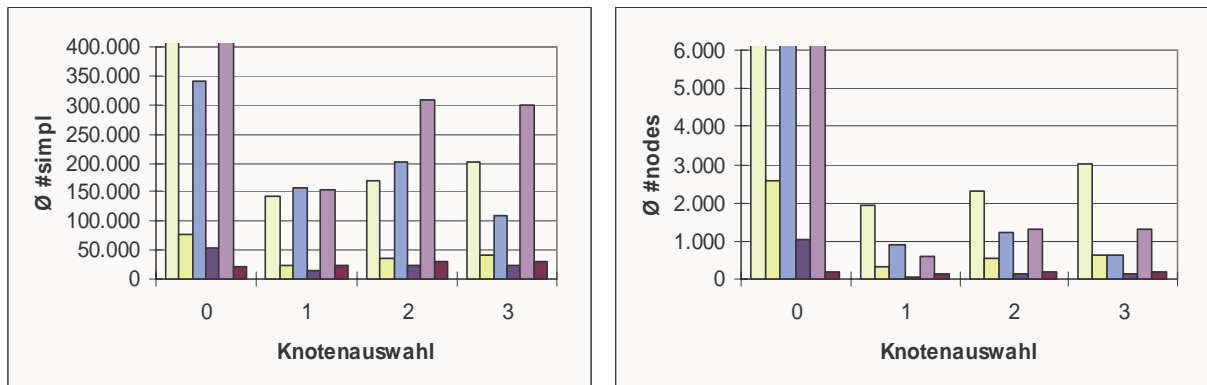


Abbildung 6.8: Knotenauswahlstrategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP

49Depots_hub25_33 wird am schnellsten und mit am wenigsten Aufwand im Branch-and-Bound-Baum bei Knotenauswahlstrategie 0 gelöst. Jedoch zeigen hier die anderen Testinstanzen sehr große negative Ausschläge bezüglich der Laufzeit und vor allem der Anzahl der Simplexiterationen und der gelösten Knoten. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Tiefensuche (Parameterwert 0) selten zu besseren Ergebnissen kommt als die anderen Strategien (siehe auch ILOG (2007c)). Die Tiefensuche sollte vor allem bei Speicherplatzproblemen eingesetzt werden. Dies könnte eventuell bei größeren Probleminstanzen, wie beispielsweise internationalen Netzen, nötig sein. Für die weiteren Tests kommt jedoch dieser Einstellungswert nicht für eine spätere optimale Parametereinstellung in Frage.

Der Parameterwert 3 konnte die Testinstanz 40Depots_hub25 mit der geringsten Laufzeit lösen. Diese Einstellung zeigt jedoch in den anderen Testfällen die zweit-schlechtesten Ergebnisse im Hinblick auf Laufzeit und Aufwand zur Lösung der MIP. Daher scheint, bezogen auf die Zielfunktionswerte, die durchschnittlichen Lösungsdauern der MIP sowie die durchschnittliche Anzahl an Simplexiterationen und gelöster Knoten des Branch-and-Bound-Baumes, die Parametereinstellung 1 am vorteilhaftesten zu sein. Eine Analyse der Gesamtsummen anstatt der durchschnittlichen Werte kommt zum gleichen Ergebnis. Dies ist aus der Tabelle 4 im Anhang erkennbar. Bei der Bearbeitung des Baumes ist somit die beste Strategie, den Knoten mit der besten unteren Schranke aus der LP-Relaxation auszuwählen (Parametereinstellung 1). Dies ist auch die Defaulteinstellung von CPLEX und wird bei uns als zukünftiger Einstellungswert gewählt.

Variablenauswahlstrategie:³⁹

Bei der Analyse der verschiedenen Möglichkeiten zur Wahl einer Variablen im Branch-and-Bound-Baum erhoffen wir uns vor allem von den Parameterwerten 2, 3 und 4 kurze Rechenzeiten. Diese Einstellungen versuchen den Effekt einer Verzweigung zu kalkulieren bzw. zu schätzen, um den nachfolgenden Aufwand zu verringern. Die jeweiligen Parameterwerte investieren jedoch unterschiedlich viel Rechenzeit in diese Kalkulation. Von der Defaulteinstellung (Wert 0) erwarten wir uns auch gute Ergebnisse bzgl. Laufzeit und Zielfunktionswert. Hier wird die Strategie vom System anhand des Problems und des Fortschritts im Baum bestimmt.

³⁹Die Ergebnisse können detailliert in den Tabellen 5 und 6 im Anhang nachgelesen werden.

Beim Vergleich der Zielfunktionswerte in Abbildung 6.9 kann nur für die Variablenauswahlstrategie 0 eine klare Aussage getroffen werden. Diese überzeugt durch recht gute Zielfunktionswerte. Sie sind nicht immer unter den Besten zu finden, jedoch ist auch kein negativer Ausreißer dabei. Ansonsten ist keine andere Strategie überzeugend.

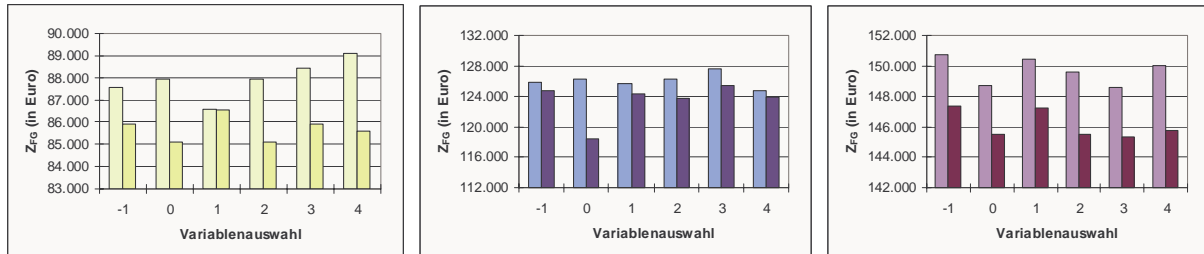


Abbildung 6.9: Variablenauswahlstrategie: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen

Bei der Untersuchung der Gesamtlaufzeiten fällt auf, dass vor allem die Werte -1 und 3 negativ auffallen. Wie aus Abbildung 6.10 ablesbar, konnten nur 9 von 36 Testinstanzen innerhalb von sechs Stunden gelöst werden. Gerade der Vergleich der einzelnen Einstellungen der Testinstanz 30Depots_hub25 ist sehr aufschlussreich; die Einstellungen -1, 3 und 4 konnten das Problem nicht vor dem Abbruch beenden.

Die Analyse der durchschnittlichen Laufzeiten zur Lösung der MIP (siehe Abbildung 6.10) zeigt, dass im Allgemeinen die Einstellungen 0, 2 und 4 kurze Rechenzeiten aufweisen. Der Wert 0 weist vor allem bei kleinen Probleminstanzen geringe Lösungsdauern auf. Bei den großen Probleminstanzen (49 Depots) ist auch die Anzahl der MIP im Verhältnis klein (siehe Anhang 6). Dadurch muss eventuell bei größeren Testbeispielen, z. B. internationalen Netzen, mit schlechteren Laufzeiten gerechnet werden. Eine eindeutige Aussage kann jedoch hierfür nicht getroffen werden, sondern müsste dementsprechend untersucht werden. Parametereinstellung 2 ist im Schnitt ähnlich gut wie Einstellung 0, jedoch können wir hier bei 49Depots_hub25_33 einen negativen Ausreißer beobachten. Auch für die Variablenauswahlstrategie 4 können im Vergleich zu den anderen Strategien lange Laufzeiten auftreten. Dies ist z. B. bei 30Depots_hub25 sichtbar. Der hohe Aufwand zum Finden einer guten Variablen, um dadurch die Anzahl der zu betrachteten Knoten zu verringern, zahlt sich, wie aus der Abbildung 6.10 erkennbar, für den Parameterwert 3 nicht aus.

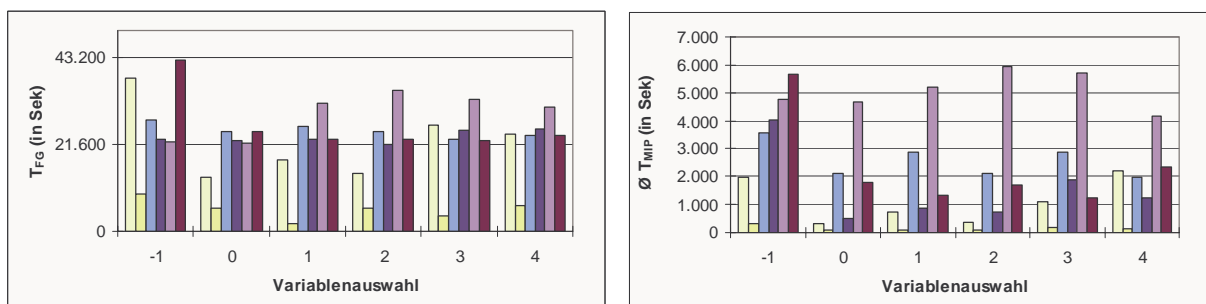


Abbildung 6.10: Variablenauswahlstrategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Zur endgültigen Festlegung einer Parametereinstellung ist es nötig, noch die durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der gelösten Knoten im Branch-and-Bound-Baum

zu betrachten. Die Analyse, welche in Abbildung 6.11 graphisch dargestellt ist, lässt klar erkennen, dass der Parameterwert 3, wie erwartet, hier sehr gut abschneidet. Wie oben jedoch schon erörtert, ist die mittlere Laufzeit für das MIP unverhältnismäßig hoch. Als Zweitbeste schneidet die Variablenauswahlstrategie 0 ab, die auch hier wieder keine Ausreißer nach oben aufweist.

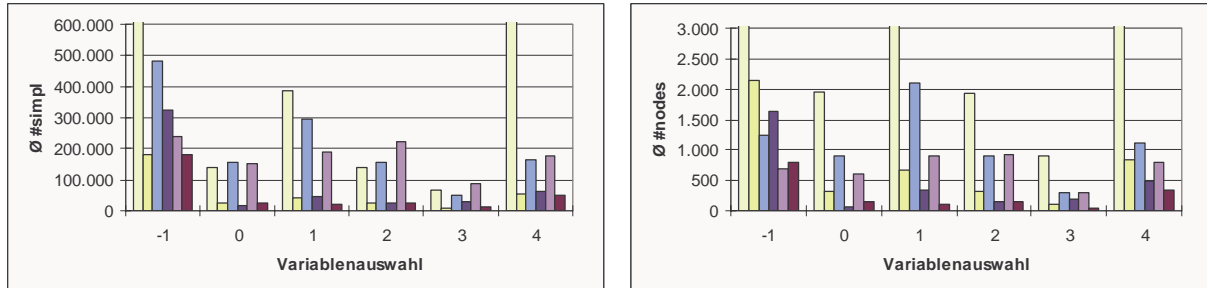


Abbildung 6.11: Variablenauswahlstrategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP

Insgesamt haben sich die Annahmen bestätigt, dass vor allem mit den Strategien 0, 2, 3 und 4 teilweise sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. 1 und -1 können wohl vereinzelt einmal Spitzenwerte aufweisen, haben allerdings im Mittel schlechtere Ergebnisse und benötigen teilweise sehr viel Rechenzeit und damit Aufwand, um das Modell zu lösen. Unter der Berücksichtigung aller Kriterien schneidet der Parameterwert 0 am besten ab. Zum einen sind damit schnelle Laufzeiten bei guten Zielfunktionswerten erreichbar. Zum anderen scheint uns diese Strategie am wenigsten anfällig für Werte, die deutlich über dem Mittel liegen.

Branching-Richtung:⁴⁰

Die Auswertung der Ergebnisse für die Tests zur Branching-Richtung zeigen ganz klar, dass es am besten ist, für die weiteren Tests die Einstellung 0 zu wählen. Das bedeutet, CPLEX wählt sich automatisch die beste Verzweigungsrichtung.

Für alle Probleminstanzen, außer 49Depots_hub25_33, erzielt die Branching-Richtung 0 den geringsten Zielfunktionswert (siehe Abbildung 6.12) bei gleichzeitig kürzester Rechenzeit (siehe Abbildung 6.13). Die durchschnittliche Lösungsdauer für die MIP ist bei 49Depots_hub25_22 geringfügig länger im Vergleich zum besten Ergebnis. Bei großen Testbeispielen unterscheiden sich die Zielfunktionswerte der anderen Branching-Richtungen kaum. Bei den kleinen Probleminstanzen treten jedoch teilweise deutliche Unterschiede auf.

Die Abbildung 6.14 zeigt für die durchschnittliche Anzahl an Simplexiterationen sowie der gelösten Knoten im Branch-and-Bound-Baum ein ähnliches Bild. Die Einstellung 0 erreicht für alle Testbeispiele die niedrigsten Werte. Die Branching-Richtungen 1 und -1 können wohl teilweise ähnlich gute Ergebnisse erzielen, allerdings sind auch große Ausreißer nach oben festzustellen.

MIP-Dive-Strategie:⁴¹

⁴⁰Die Ergebnisse können detailliert in den Tabellen 7 und 8 im Anhang nachgelesen werden.

⁴¹Die Ergebnisse sind detailliert in den Tabellen 9 und 10 im Anhang aufgelistet.

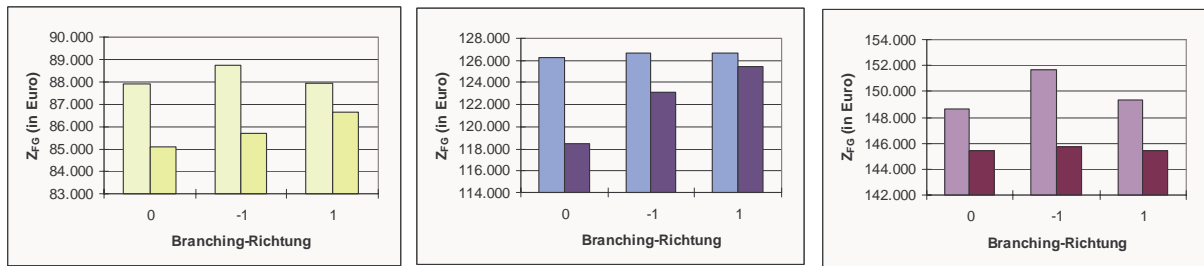


Abbildung 6.12: Branching-Richtung: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen

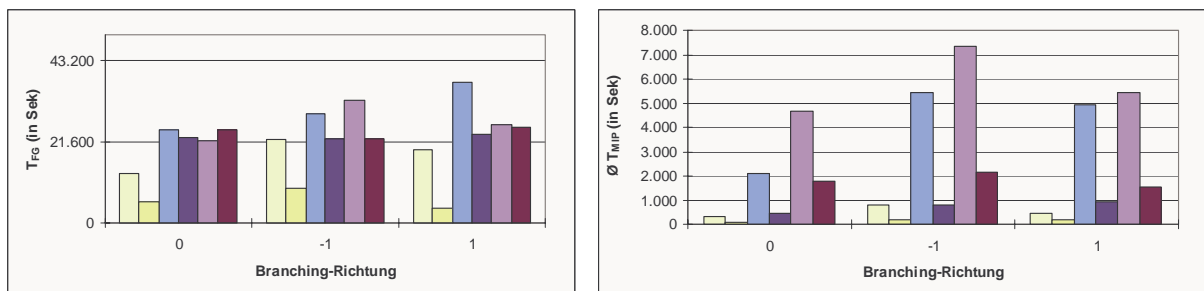


Abbildung 6.13: Branching-Richtung: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Bei den Einstellungen zur MIP-Dive-Strategie kann zwischen keinem Probing-Dive (Einstellung 1), Probing-Dives mit unterschiedlichem Aufwand (Wert 2 und 3) und der Defaulteinstellung (Wert 0) gewählt werden. Wir erwarten, dass durch einen Probing-Dive kürzere Laufzeiten erzielt werden können, da an jedem Knoten eine Analyse der zwei nachfolgenden Knoten durchgeführt wird. Dadurch sollen ganzzahlige Lösungen schneller gefunden werden. Mit Parameterwert 3 wird ein größerer Rechenaufwand betrieben als bei Einstellung 2. Mit den nachfolgenden Analysen wollen wir klären, ob sich dieser Aufwand rechnet und wie die Probing-Dives im Verhältnis zur Defaulteinstellung, CPLEX wählt den MIP-Dive-Typ selber aus, abschneiden.

Die Analyse der Zielfunktionswerte (siehe Abbildung 6.15) stellt keine Tendenz für oder gegen einen Parameterwert als beste Einstellungsoption fest. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Zielfunktionswerten für das jeweilige Testbeispiel sind sehr gering. Die größte Abweichung zwischen bestem und schlechtestem Wert liegt bei 6 %. Der MIP-Dive-Typ 3 schafft es nie unter die TOP-Performer, allerdings ist die größte Abweichung hier nur 5 % und meistens ist sie geringer als 2 %.

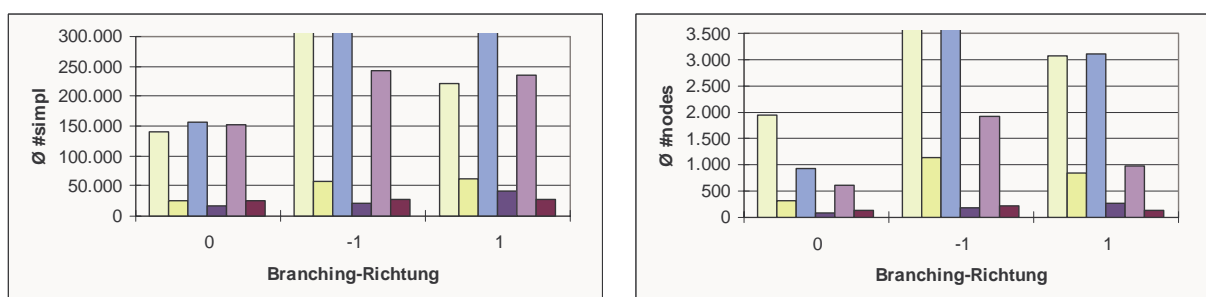


Abbildung 6.14: Branching-Richtung: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der gelösten Knoten bei der Lösung der MIP

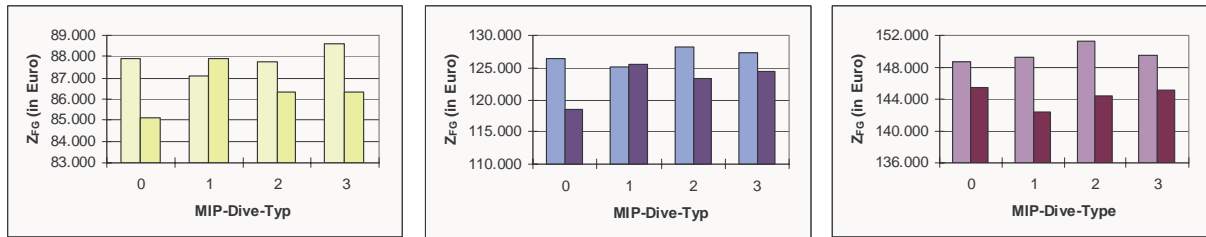


Abbildung 6.15: MIP-Dive-Strategie: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen

Jedoch erzielt Parametereinstellung 3 im Vergleich zu den anderen Einstellungen sehr gute Rechenzeiten bei der Lösung des MIP. Dies ist aus der Abbildung 6.16 zur durchschnittlichen Laufzeit der MIP klar erkennbar. Aus Abbildung 6.16 über die Gesamtlaufzeit ist ersichtlich, dass alle Strategien die Instanzen mit 30 Depots klar innerhalb der festgesetzten Dauer lösen können. Innerhalb der festgesetzten Laufzeit können die Instanzen ab 40 Depots, vor allem für MIP-Dive-Typ 3, viele MIP durchlaufen (siehe Tabelle 10). Damit können wir davon ausgehen, dass der erhöhte Aufwand für das prüfende Diving auch in der Laufzeit für die einzelnen MIP durchschlägt. Weiterhin können wir die Annahme bestätigen, dass ohne Probing-Dives (Einstellung 1) die Rechenzeiten generell länger sind. Parameterwert 0 konnte die Testinstanzen teilweise mit sehr schnellen Rechenzeiten lösen, jedoch sind teilweise kleine Ausschläge nach oben in der Abbildung erkennbar. Auch die Einstellung 2 zeigt vereinzelt sehr gute Ergebnisse, weist allerdings auch im Vergleich sehr große Lösungszeiten auf.

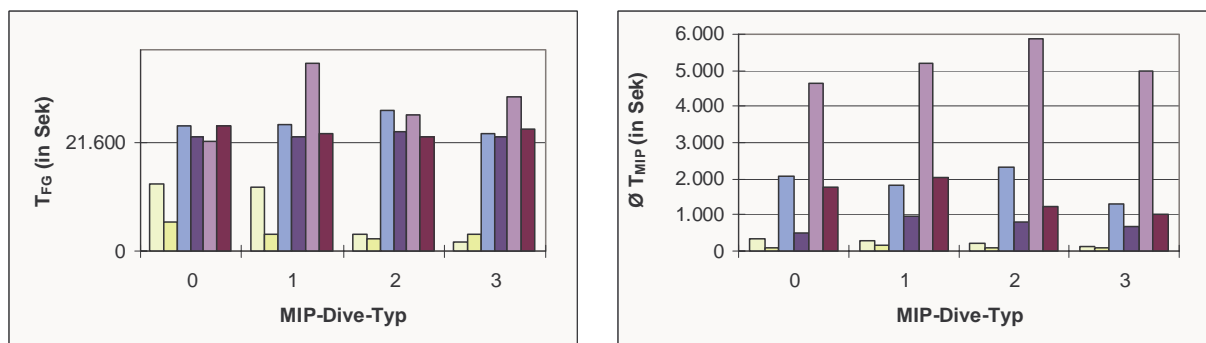


Abbildung 6.16: MIP-Dive-Strategie: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Daher ist es notwendig, sich die durchschnittlichen Anzahlen an Simplexiterationen und gelösten Knoten im Branch-and-Bound-Baum genauer anzuschauen. In Abbildung 6.17 sind die Ergebnisse dazu graphisch dargestellt. Die Untersuchung der Simplexiterationen zeigt, dass auch hier die Einstellung 3, wie erwartet, sehr gut abschneidet. Es ist klar ersichtlich, dass sie deutlich bessere Ergebnisse als die anderen Parameterwerte erzielt. Die Werte 0 und 2 liefern auch recht gute Werte für die Anzahl der Simplexiterationen, allerdings sind für die Instanzen mit nur Hub 25 kräftige Ausreißer nach oben erkennbar.

Aus der Analyse der durchschnittlichen Anzahl an verarbeiteten Knoten können keine neuen Erkenntnisse gezogen werden. Der GUIDED-DIVE (Wert 3) kann auch hier mit sehr guten Ergebnissen punkten. MIP-Dive-Typ 1 schneidet bei diesem Kriterium im Allgemeinen schlecht ab. Alle anderen Einstellungen können teilweise mit einer sehr geringen Anzahl an abgearbeiteten Knoten aufwarten, haben aber allerdings auch negative Ausreißer nach oben.

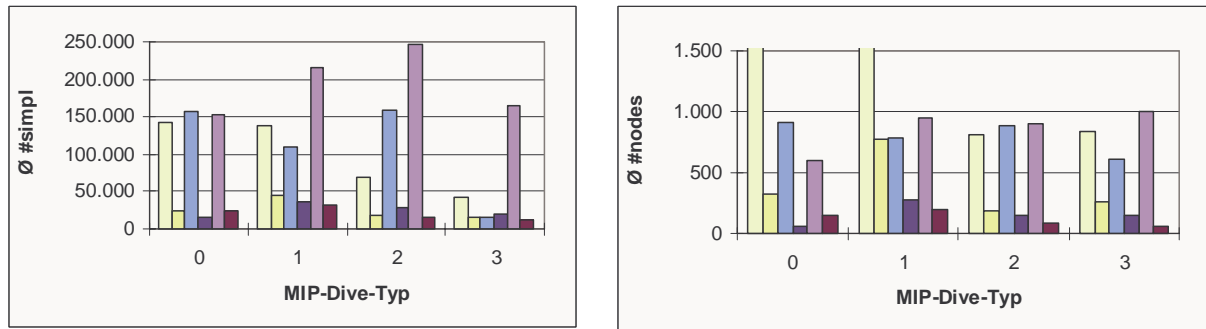


Abbildung 6.17: MIP-Dive-Strategie: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP

Zusammenfassend lässt sich aus den einzelnen Untersuchungen ableiten, dass die Parametereinstellung Divetype 3 als vorteilhaft betrachtet werden kann. Sie zeigt mit die schnellsten Laufzeiten und den geringsten Aufwand im Hinblick auf Simplexiterationen und verarbeitete Knoten für das Lösen der MIP auf. Die Zielfunktionswerte sind wohl oftmals schlechter, jedoch innerhalb eines vertretbaren Rahmens. Nachdem es sich bei dem Branch-and-Price-Cut-Verfahren um eine Heuristik handelt, und wir der Lösungsdauer eine höhere Priorität als dem Zielfunktionswert gegeben haben, wird der Divetype 3 als zukünftige Einstellung für die weiteren Tests gewählt.

MIP-Emphasis-Indikator:⁴²

Der MIP-Emphasis-Indikator gibt dem Benutzer von CPLEX die Möglichkeit, seine Ziele bzgl. Optimalität oder kurzer Laufzeit der Optimierung mitzugeben. Für uns ist es wichtiger, schnell eine zulässige Lösung innerhalb der MIP-Gap-Toleranzgrenze zu finden, um damit das Gesamtverfahren zu beschleunigen. Im Umkehrschluss geben wir dadurch der optimalen Lösung weniger Priorität. Daher erhoffen wir uns, dass mit den MIP-Emphasis-Indikatoren 1 und 4 schnellere Rechenzeiten im Vergleich zur Defaulteinstellung BALANCED (Wert 0) sowie natürlich zu den Parameterwerten 2 und 3 (Fokus auf Optimalität) möglich sind. Die Analyse der Zielfunktionswerte, welche in Abbildung 6.18 graphisch dargestellt ist, zeigt, dass sich die Ergebnisse für die einzelnen Testinstanzen und Einstellungswerte kaum unterscheiden. Somit können auch keine großen Abweichungen für die Parameterwerte 1 und 4 zu den MIP-Emphasis-Indikatoren, welche großen Wert auf Optimalität legen, nachgewiesen werden. Einzig bei dem Testbeispiel 30Depots_hub25_33 und dem Parameterwert 1 sind im Vergleich schlechte Zielfunktionswerte sichtbar.

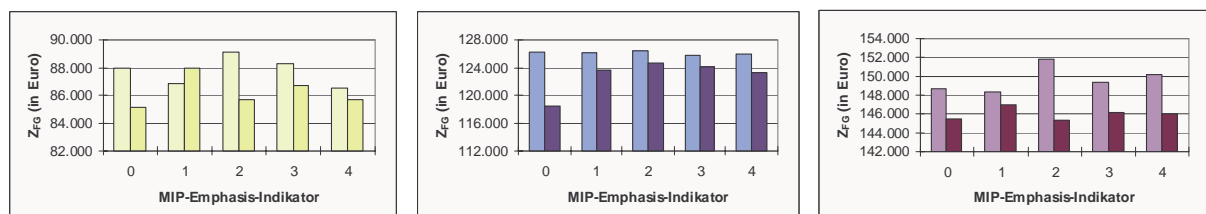


Abbildung 6.18: MIP-Emphasis-Indikator: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen

⁴²Die Ergebnisse sind detailliert in den Tabellen 11 und 12 im Anhang aufgelistet.

Ein kurzer Blick auf Abbildung 6.19 genügt, um zu erkennen, dass von den kleinen Probleminstanzen mit 30 Depots fast alle Parameterwerte das Modell innerhalb von sechs Stunden mit dem Branch-Price-and-Cut-Verfahren lösen konnten. Einzig für Parameterwert 2 und 30Depots_hub25 musste die Optimierung abgebrochen werden. Für diese kleinen Testinstanzen benötigt der MIP-Emphasis-Indikator 0 eine große Anzahl an MIP bis zur endgültigen Lösung (siehe Tabelle 12 im Anhang). Dies bedeutet, dass die gefundenen ganzzahligen Lösungen immer wieder Schnittungleichungen verletzten, welche dem Modell hinzugefügt werden. Darunter leidet der Trade-Off zwischen Qualität der Lösung und der Laufzeit. Die MIP-Emphasis-Indikatoren 1, 3 und 4 können mit relativ wenig durchlaufenden MIP bis zur endgültigen Lösung aufwarten.

Aus der graphischen Darstellung der durchschnittlichen MIP-Laufzeiten in Abbildung 6.19 ist klar erkennbar, dass mit dem MIP-Emphasis-Indikator 4 sehr schnelle Rechenzeiten im Vergleich zu den anderen Einstellungswerten erzielt werden. Die Einstellungen 0 und 1 schneiden in diesem Vergleich auch nicht schlecht ab, jedoch sind die Laufzeiten in einzelnen Tests mehr als doppelt so lange, als die schnellsten Zeiten von Parameterwert 4. Die MIP-Emphasis-Indikatoren 2 und 3 warten, wie angenommen, mit sehr langen Lösungszeiten auf.

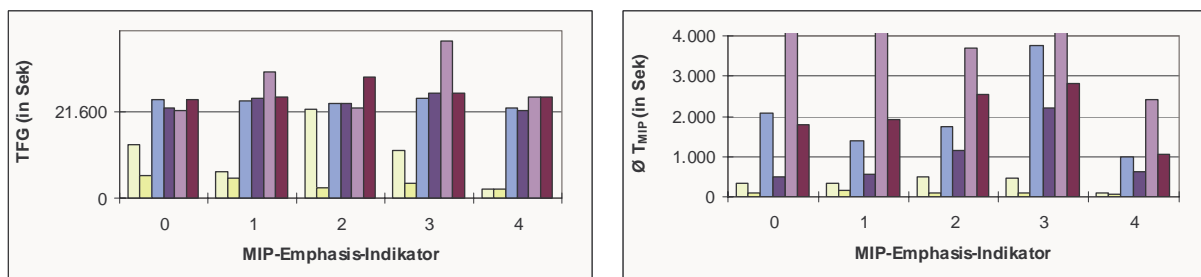


Abbildung 6.19: MIP-Emphasis-Indikator: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Die Analyse der durchschnittlichen Anzahl an Simplexiterationen sowie gelöster Knoten im Branch-and-Bound-Baum beim Lösen der MIP (siehe Abbildung 6.20) bestätigen, dass der Einstellungswert 4 sehr vorteilhaft für unsere Zwecke erscheint. Parameterwert 1 benötigt sehr viele Simplexiterationen und fällt somit endgültig als möglicher Einstellungswert für spätere Tests aus. Das gleiche Bild zeigt sich für diesen Wert bei der Analyse der gelösten Knoten. Der Defaultwert kann bei den Simplexiterationen noch mit einem passablen Ergebnis aufwarten, jedoch werden vergleichsweise sehr viele Knoten im Branch-and-Bound-Baum gelöst. Die Parametereinstellung 2 und 3 verblüffen bei diesen zwei Kriterien teilweise mit sehr guten Ergebnissen, obwohl die mittlere MIP-Lösungszeit sehr lange dauert. Daraus kann geschlossen werden, dass viel Aufwand zum Finden von optimalen Lösungen investiert worden ist.

Aus den einzelnen Analysen lässt sich schließen, dass der Parameter MIP-Emphasis mit Einstellung 4 einen großen Beitrag zum schnellen Lösen von Problemen leisten kann. Die Einbußen hinsichtlich der Qualität, insbesondere im Zielfunktionswert, liegen dabei sehr gut im Rahmen des Vertretbaren.

Relative MIP-Gap-Toleranz:⁴³

⁴³Die Ergebnisse sind detailliert in den Tabellen 13 und 14 im Anhang aufgelistet.

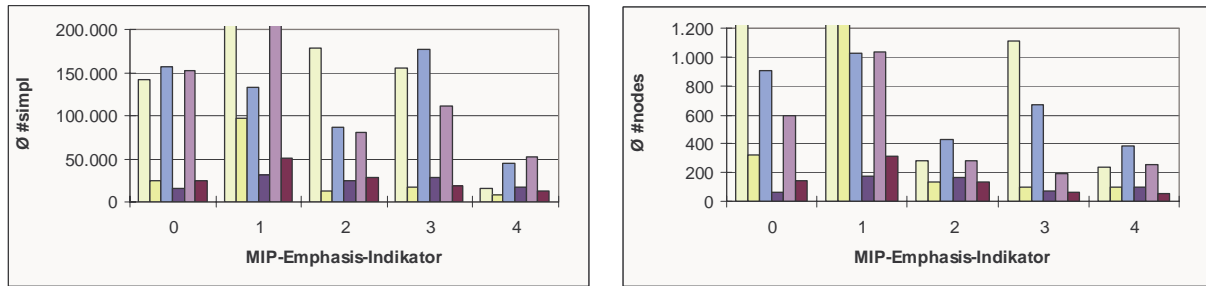


Abbildung 6.20: MIP-Emphasis-Indikator: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP

Ziel dieser Analyse zur relativen MIP-Gap-Toleranz ist es nicht, den Parameterwert mit der besten Einstellung bzgl. erstens Rechenzeit und zweitens Zielfunktionswert herauszuarbeiten. Bei dieser Untersuchung ist es wichtig, ein gutes Verhältnis zwischen Aufwand - Laufzeit, Anzahl Simplexiterationen und gelöster Knoten im Branch-and-Bound-Baum - und Qualität - Zielfunktionswert - zu finden. Dazu haben wir Parameterwerte zwischen 0,03 und 0,08 (entspricht einem relativen Gap von 3 % bis 8 %) getestet. Wir haben uns dafür entschieden die Tests bei einem Wert von 3 % zu starten, da die Untersuchungen zu den Laufzeiten in Kapitel 6.3.1 mit den CPLEX-Defaultwert aufgezeigt haben, dass die Laufzeiten ansonsten zu lang wären.

Grundsätzlich können die einzelnen Lösungen eines Testbeispiels mehr als 5 % auseinanderliegen. Es kann sogar vorkommen, dass z. B. der Parameterwert 0,07 ein besseres Endergebnis erzeugt als Parameterwert 0,05. Der Grund hierfür liegt in der heuristischen Vorgehensweise des Branch-Price-and-Cut-Verfahrens, insbesondere in den aufgenommen Spalten und somit Variablen im MIP.

In der Abbildung 6.21 sind die Zielfunktionswerte der einzelnen Einstellungen und Testinstanzen dargestellt. Wie erwartet, werden die Ergebnisse mit wachsender Toleranzgrenze schlechter. Der Unterschied zwischen dem besten und schlechtesten Wert liegt bei maximal 6,5 % und minimal 2 %. Vor allem bei den großen Probleminstanzen sind zwischen den Einstellungen 0,05 bis 0,08 nur sehr geringe Abweichungen zu erkennen.

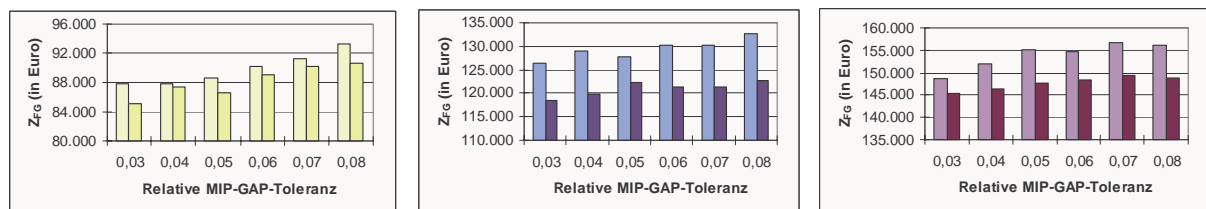


Abbildung 6.21: MIP-Gap-Toleranz: Zielfunktionswerte für die einzelnen Testinstanzen

Bei Betrachtung der Gesamtlaufzeit (siehe Abbildung 6.22) ist zu erkennen, dass alle Testbeispiele mit 30 Depots innerhalb des gesetzten zeitlichen Limits gelöst werden können. Dabei fällt auf, dass für diese Instanzen die Einstellung mit 3 % wesentlich längere Laufzeiten aufweist als die anderen Einstellungswerte.

Die Analyse der durchschnittlichen Lösungslaufzeit je MIP, dargestellt in Abbildung 6.22, zeigt sehr deutlich, dass vor allem für große Probleminstanzen die Rechenzeit für eine MIP-Gap-Toleranz von 0,03 und 0,04 oft das Dreifache der besten Laufzeiten übersteigt.

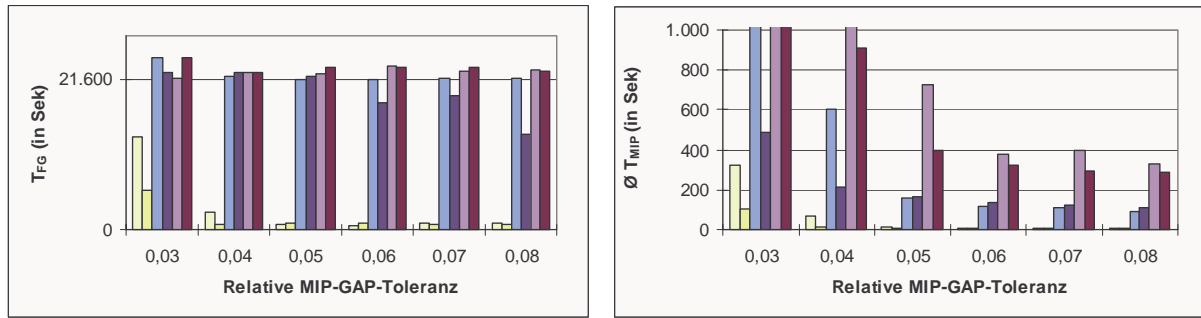


Abbildung 6.22: MIP-Gap-Toleranz: Gesamtlaufzeit und durchschnittliche MIP-Laufzeit

Auch für die Einstellung von 0,05 sind noch klar längere Laufzeiten bei den Instanzen mit 49 Depots sichtbar. Wird die Toleranzgrenze jedoch weiter angehoben, treten nur noch kleine bis keine Unterschiede mehr auf.

Die Performance-Maße durchschnittliche Anzahl an Simplexiterationen und gelöste Knoten im Branch-and-Bound-Baum zeigen nochmals, dass ab dem Parameterwert 0,05 sich keine großen Aufwandsveränderungen im Branch-and-Bound-Baum abspielen. Diese Kriterien sind mit ihren Ergebnissen in der Abbildung 6.23 aufgezeichnet. Ab dem Wert 0,05 werden sogar alle Instanzen, mit Ausnahme von 49Depots_hub25, direkt im Wurzelknoten gelöst, d. h. $\#nodes = 0$.

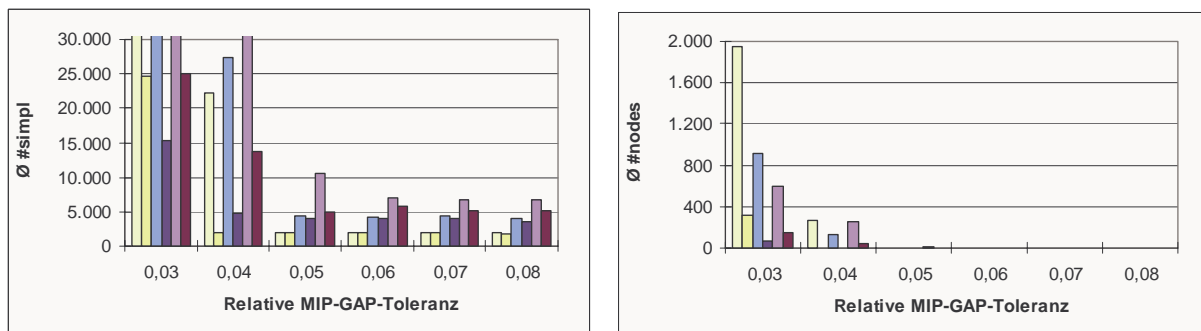


Abbildung 6.23: MIP-Gap-Toleranz: durchschnittliche Anzahl der Simplexiterationen und der verarbeiteten Knoten bei der Lösung der MIP

Die Ergebnisse zeigen, dass ab einer relativen MIP-Gap-Toleranzgrenze von 5 % bzw. 6 % sehr schnell recht gute Lösungen erarbeitet werden können. Aufgrund dessen, dass wir es in den weiteren Tests vor allem mit größeren Instanzen zu tun haben, halten wir es für sinnvoll, den Wert für alle weiteren Test auf 0,06, d. h. auf einen maximalen Gap von 6 %, zu setzen.

6.3.2.3 Beurteilung der Parametertests

Für die sechs untersuchten CPLEX-Parameter wurden im Rahmen der Analysen neue Einstellungswerte bestimmt. Die Parameter, ihre Namen in CPLEX, ihr neuer Einstellungswert und die Beschreibung dieser Werte ist in Tabelle 6.15 dargestellt. Diese neuen Einstellungswerte bilden eine sogenannte neue Kombination an Parameterwerten.⁴⁴

⁴⁴Bei den Parametertests wurde immer nur ein Parameter zur Defaulteinstellung von CPLEX verändert. Wir gehen davon aus, dass die dadurch festgelegten Parameterwerte auch in der Kombination aller

Parameter	Parametername	Wert	Kurzerklärung
Knotenauswahlstrategie	CPX_PARAM_NODESEL	1	BEST BOUND
Variablenauswahlstrategie	CPX_PARAM_VARSSEL	0	DEFAULT
Branching-Richtung	CPX_PARAM_BRDIR	0	AUTO
MIP-Dive-Strategie	CPX_PARAM_DIVETYPE	3	GUIDED DIVE
MIP-Emphasis-Indikator	CPX_PARAM_MIPEMPHASIS	4	HIDDENFEAS
Relative MIP-Gap-Toleranz	CPX_PARAM_EPGAP	0,06	6 %

Tabelle 6.15: Neue Kombination von Parameterwerten

Die Einstellungswerte, welche verschiedene Strategien für den Weg durch den Branch-and-Bound-Baum zulassen, werden dabei auf ihren CPLEX-Default Werten gelassen. Die Parametertests haben gezeigt, dass für die vorliegende Art von Problemklasse CPLEX selber sehr gute Strategien für eine kurze Rechenzeit auswählt. Für die anderen Parameterwerte - MIP-Dive-Strategie, MIP-Emphasis-Indikator und die relative MIP-Gap-Toleranz - konnten durch die Tests mit anderen Werten enorme Verbesserungen der Lösungszeit erzielt werden.

Im Folgenden analysieren und vergleichen wir die Laufzeit dieser neuen Parameterkombination mit den CPLEX-Defaulteinstellungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.16 aufgeführt. Neben der Anzahl an Iterationen, den summierten Laufzeiten über die MIP, den LP-Relaxationen und den Schnittverfahren, befinden sich auch die Laufzeiten für die neue sowie alte Parameterkombination und die erzielte Verbesserung für alle Testinstanzen in dieser Tabelle.

Instanz	T_{MIP}	T_{LP}	T_{CUT}	T_{SG}	T_{SG}^{alt}	Verbesserung	#MIP	Abbruch
20Depots_hub25	11	25	2	38	1.090	99,65 %	15	
20Depots_hub25_33	7	14	1	22	501	95,61 %	11	
30Depots_hub25	172	441	5	618	41.490	>98,51 %	25	
30Depots_hub25_33	235	806	5	1.046	25.206	>95,85 %	28	
40Depots_hub25	4.383	17.474	26	21.883	22.324	>1,98 %	37	
40Depots_hub25_33	3.628	18.276	30	21.934	22.498	>2,51 %	26	
49Depots_hub25	5.411	16.251	36	21.698	23.803		13	Ja
49Depots_hub25_33	3.559	19.932	47	23.538	24.547		11	Ja

Tabelle 6.16: Laufzeiten mit neuer Parametereinstellung inkl. Vergleich mit Gesamtlaufzeit bei Defaulteinstellung

Im Vergleich zu der Defaulteinstellung (siehe Abschnitt 6.3.1, insbesondere Tabelle 6.8) fällt auf, dass auch die Testbeispiele mit 30 und 40 Depots ohne Abbruch gelöst werden. Die Zeiten bei 40 Depots sind wohl leicht über 21600 Sekunden, jedoch wurde in der letzten Iteration auch die optimale Lösung erzeugt. Dies stellt nochmals eine Verbesserung zu der ausgeführten Simulation im Rahmen der Parametertests dar, wo nur jeweils ein Parameterwert verändert wurde.

Für die zwei Testinstanzen mit 49 Depots können mit dieser Einstellung wesentlich mehr MIP (von 2 auf 11 bzw. 13 MIP) bis zum Zeitlimit durchlaufen werden. Somit kann allein mit diesem Kriterium schon eine klare Verbesserung der Laufzeiten festgestellt werden. Wenn wir uns die Gesamtlaufzeiten und die Verbesserungen in der Tabelle genauer anschauen, fällt auf, dass Laufzeitreduktionen von über 95 % realisiert werden konnten. Bei den Tests mit 30 und 40 Depots können wir keine genauen Verbesserungswerte angeben,

Parameter zum besten Ergebnis führen.

da mit der CPLEX-Defaulteinstellung ein Abbruch erzeugt worden ist. Die angegebene Prozentzahl stellt einen Mindestwert dar, der noch um einiges höher ausfallen kann. Die Laufzeiten der ganz großen Probleminstanzen können schlecht miteinander verglichen werden, da für beide Einstellungen das Verfahren abgebrochen wurde.

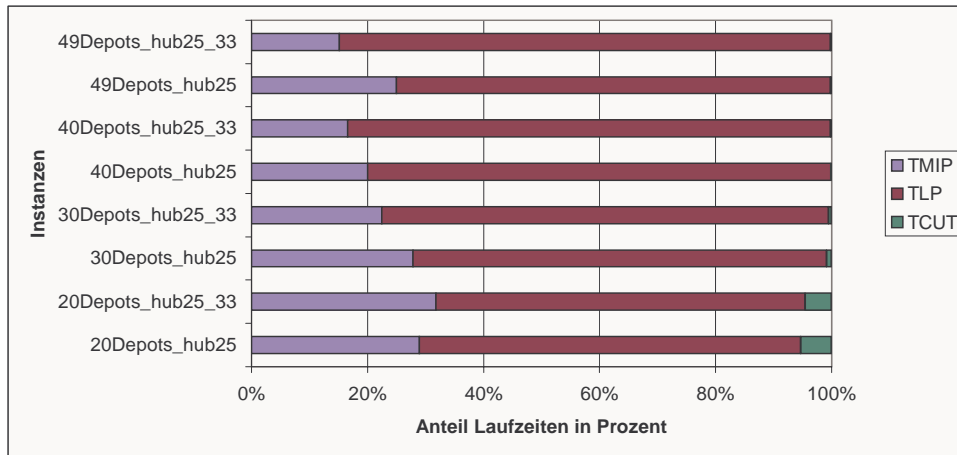


Abbildung 6.24: Relative Laufzeiten für die Bestimmung von Servicerouten mit neuer Parametereinstellung

In Abbildung 6.24 betrachten wir die Anteile der verschiedenen Laufzeiten für das Lösen der MIP, das Lösen der LP-Relaxation mit Column-Generation und das explizite Cut-Generation-Verfahren. Die Aufteilung fällt mit der neuen Parameterkombination um einiges anders aus. Der Anteil der Laufzeit für die MIP konnte auf unter 40 % gesenkt werden. Im Vergleich zu vorher betrug dieser Anteil immer mehr als 90 % (siehe Abbildung 6.4). Die meiste Zeit benötigt das Branch-Price-and-Cut-Verfahren jetzt für das Lösen der LP-Relaxation mit einem Column-Generation-Verfahren.

Wir konnten nachweisen, dass sich mit dieser neuen Parameterkombination die Laufzeiten deutlich verringert haben. Die Frage, die sich jetzt stellt ist, in wiefern die Zielfunktionswerte unter dieser Beschleunigung gelitten haben.⁴⁵ Ein Vergleich dieses Kriteriums zeigt, dass die Zielfunktionswerte für die neue Parameterkombination höchstens 6 % höher als mit der CPLEX-Defaulteinstellung ausfallen. Diese Analyse ist in Abbildung 6.25 dargestellt. Dort sind die einzelnen Zielfunktionswerte der Testinstanzen in Säulen für beide Einstellungen angetragen. Die Prozentzahlen über den Säulen geben die Veränderung von der Defaulteinstellung zur neuen Parameterkombination wieder. Der Anstieg der Zielfunktionswerte liegt vor allem an zwei Tatbeständen. Erstens wurde die MIP-Gap-Toleranz auf 6 % gesetzt. Damit werden auch eventuell schlechtere Ergebnisse für das MIP akzeptiert. Zweitens ist die Anzahl der gelösten MIP gestiegen. Dadurch wurden nach jedem MIP weitere Cutset-Inequalities hinzugefügt. Der Anstieg der Anzahl der Nebenbedingungen kann zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führen. Eine höhere Anzahl an gelösten MIP, d. h. Iterationen, führt somit nicht zwangsläufig, wie in anderen Verfahren, zu einem besseren Zielfunktionswert. In Abschnitt 6.3.4 werden die Auswirkungen von S,T-Cuts genauer untersucht. Die Ergebnisse der neuen Parameterkombination werden im nächsten Abschnitt 6.3.3 noch mit den Ergebnissen eines optimalen Verfahrens verglichen.

⁴⁵Eine Aussage über die Lösungsqualität in Bezug auf das Gesamtverfahren kann damit allerdings nicht getroffen werden.

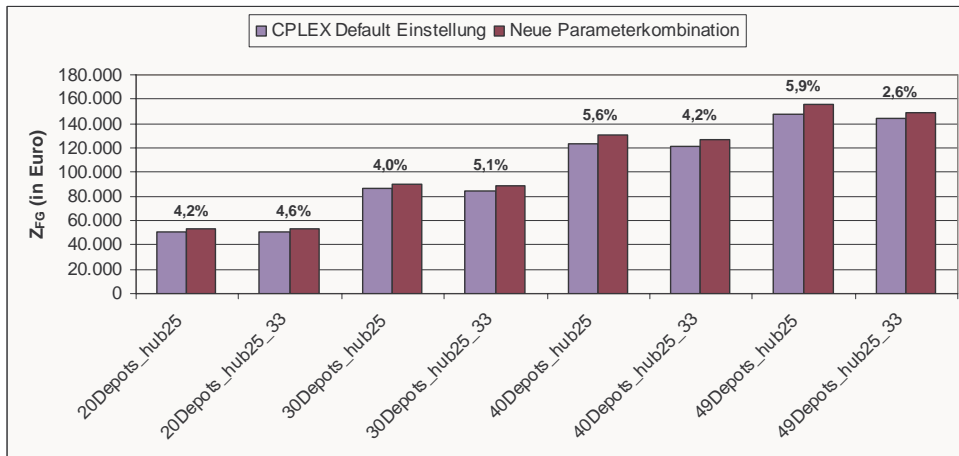


Abbildung 6.25: Vergleich der Zielfunktionswerte für die CPLEX-Default Parametereinstellung und die neue Parameterkombination

Zusammenfassend können wir über die neue Parameterkombination folgende Aussagen treffen:

1. Es können größere Probleminstanzen ohne Abbruch gelöst werden.
2. Es können wesentlich mehr MIP innerhalb eines vorgegeben Zeitlimits durchlaufen werden.
3. Die MIP werden schneller und mit weniger Aufwand gelöst.

Dadurch ist es möglich, realistische Testinstanzen zu lösen. Somit können wir die Parametertests und ihre Ergebnisse für die Bestimmung von Servicerouten in Bezug auf das Kriterium Rechenzeit als Erfolg bewerten. Die Qualität der Lösung wird im folgenden Abschnitt genauer analysiert.

6.3.3 Vergleich der heuristischen Lösungen mit optimalen MIP-Lösungen

In diesem Unterkapitel möchten wir die Qualität der heuristischen Lösung durch einen Vergleich mit einer optimalen Lösung näher untersuchen. Dafür haben wir ein Verfahren ohne Column-Generation für die Bestimmung der Servicerouten implementiert. Stattdessen werden im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes, und somit im MIP, alle Servicerouten als Variablen aufgenommen. Zum Vergleich: In dem heuristischen Verfahren besteht das MIP nur aus den Variablen, welche beim Lösen der LP-Relaxation im Wurzelknoten mit dem Column-Generation-Verfahren negativ reduzierte Kosten aufgewiesen haben und somit dem RMP zugeordnet worden sind. Bei beiden Verfahren werden nur Cutset-Inequalities kleiner gleich drei berücksichtigt.

Exaktes Verfahren zur Bestimmung der Servicerouten:

Wie in Abbildung 6.26 ersichtlich, erfolgen am Anfang des Verfahrens zwei Preprocessing-Schritte. Im einen Schritt werden alle Servicerouten generiert und auf Machbarkeit überprüft. In dem anderen Schritt werden alle möglichen Cutset-Inequalities für $|S| = 2$, $|S| = 3$, $|T| = 2$ und $|T| = 3$ generiert. Alle machbaren Servicerouten bilden die Spalten

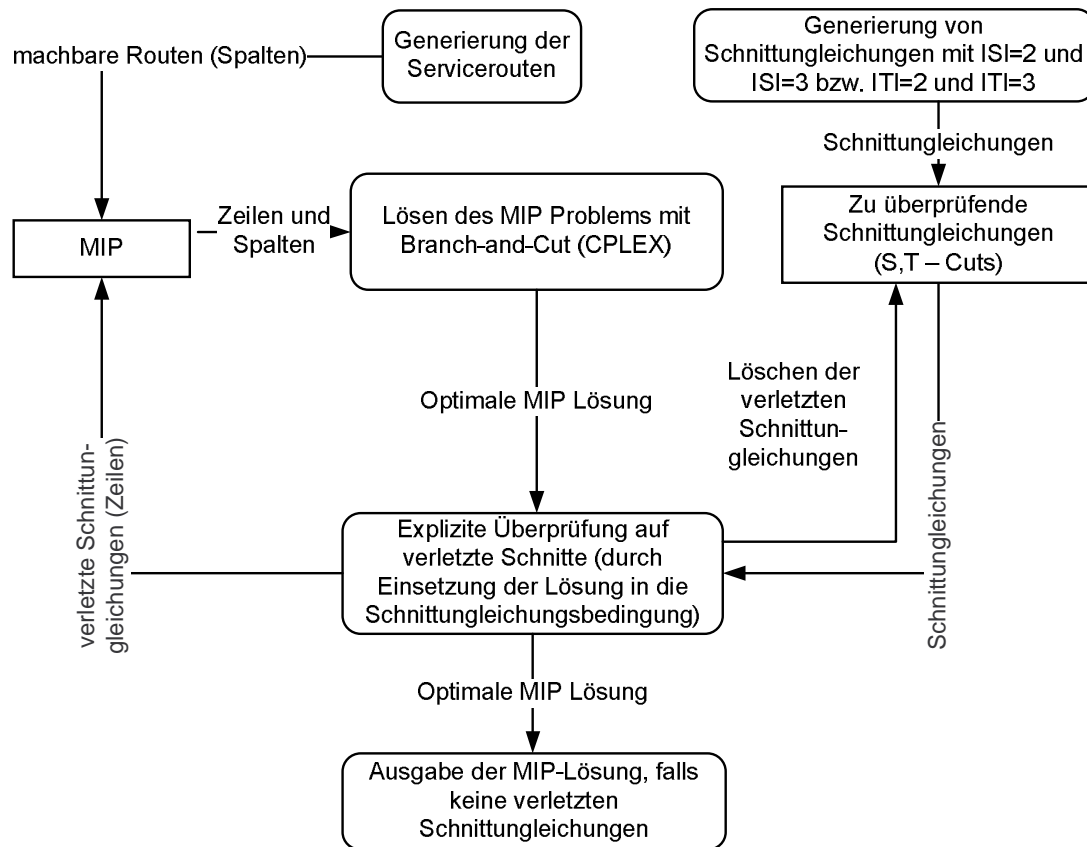


Abbildung 6.26: Vorgehen des exakten Verfahrens zur Bestimmung von Servicerouten

des MIP. Die Zeilen des MIP bestehen am Anfang aus den Nebenbedingungen 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 und den Schnittmengen (Nebenbedingungen 5.19) für $|S| = 1$ und $|T| = 1$. Das MIP wird dann mithilfe des Branch-and-Cut-Verfahrens von CPLEX gelöst. Die dadurch gefundene optimale ganzzahlige Lösung wird durch ein explizites Cut-Verfahren auf Verletzung der S,T-Cuts untersucht. Dabei wird die Lösung in die dazugehörigen Nebenbedingungen der Schnitte eingesetzt. Ist ein Schnitt verletzt, wird dieser dem MIP als neue Zeile hinzugefügt und aus der Menge der zu untersuchenden Cutset-Inequalities gelöscht. Das Verfahren stoppt, falls keine Schnitte der MIP-Lösung verletzt werden. Ansonsten fängt eine neue Iteration an, und das MIP mit den zusätzlichen Zeilen wird optimiert.

Ergebnisse der Analyse:

Für die Untersuchung haben wir wieder aus den vier Testgruppen die Instanzen mit Hub 25 und Hub 25 und 33 gelöst, wobei die Verfahren nach Überschreitung von sechs Stunden Laufzeit nach dem Lösen des MIP und des Separationsproblems abbrechen. Als Parametereinstellung wurde für beide Verfahren die von uns festgelegte beste Kombination von Parameterwerten benutzt.

In Abbildung 6.27 sind die Zielfunktionswerte der einzelnen Testbeispiele für beide Verfahren angegeben. Die Prozentzahl über den Säulen einer Testinstanz gibt die Verschlechterung der Heuristik zum exakten Verfahren an. Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die heuristische Lösung über 5 % von der optimalen Lösung entfernt liegt. Dieser Gap verschlechtert sich, je größer die Probleminstanzen werden. Weiterhin ist aus der Tabelle 6.17 ersichtlich, dass zur Berechnung der exakten Lösung weniger Iterationen aufgewendet werden müssen. Dabei wurden alle diese Lösungen innerhalb der sechs Stunden Laufzeit

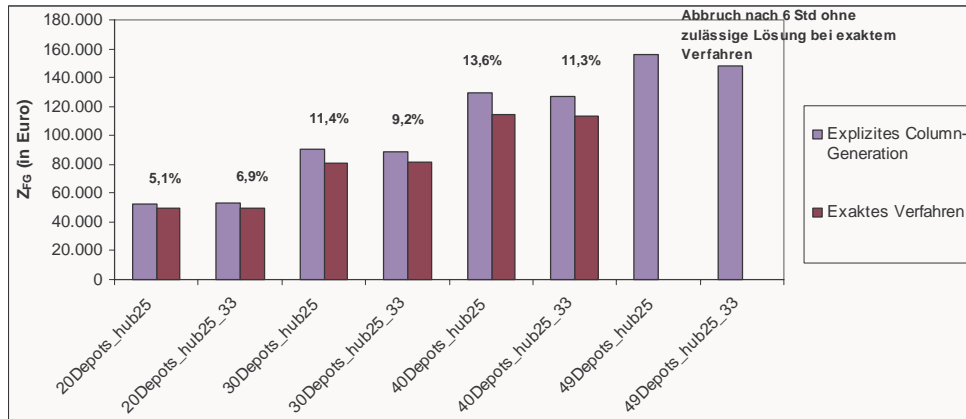


Abbildung 6.27: Vergleich der Zielfunktionswerte zwischen einem exakten Lösen des MIP und einem expliziten Column-Generation-Verfahren

errechnet. Im Gegensatz dazu musste das explizite Verfahren ab einer Problemgröße von 40 Depots vorzeitig abbrechen.

Explizites Column-Generation:

Instanz	T_{SG}	#iterSG	Z_{SG}	#cuts
20Depots_hub25	38	15	52.597	374
20Depots_hub25_33	22	11	53.284	265
30Depots_hub25	618	25	90.087	1.013
30Depots_hub25_33	1.046	28	89.055	1.127
40Depots_hub25	21.883	37	129.895	2.306
40Depots_hub25_33	21.934	26	126.707	2.197
49Depots_hub25	21.698	13	156.111	3.460
49Depots_hub25_33	23.538	11	148.276	2.840

Exaktes Verfahren:

Instanz	T_{SG}	#iterSG	Z_{SG}	#cuts
20Depots_hub25	140	15	50.059	382
20Depots_hub25_33	71	7	49.857	327
30Depots_hub25	1.622	19	80.855	1.053
30Depots_hub25_33	929	11	81.549	983
40Depots_hub25	28.765	22	114.309	2.330
40Depots_hub25_33	25.198	15	113.899	2.217
49Depots_hub25	Abbruch nach 6 Stunden			
49Depots_hub25_33	ohne zulässige Lösung			

Tabelle 6.17: Vergleich zwischen exaktem Verfahren zur Bestimmung der MIP-Lösung und dem expliziten Column-Generation-Verfahren

Diese Resultate sind doch ein wenig überraschend. Nicht nur, dass die Lösungen teilweise über 10 Prozent auseinander liegen, sondern, dass vor allem die Laufzeiten beim exakten Verfahren auch noch kürzer sind. Dies liegt vor allem an der geringeren Anzahl an Iterationen wie aus Tabelle 6.17 ersichtlich. Dort sind auch die Ergebnisse zur Untersuchung der verletzten Schnitte (siehe Tabelle 6.17) zu finden, welche jedoch zeigen, dass beim exakten Algorithmus meistens mehr Cutset-Inequalities zum MIP hinzugefügt werden als

beim heuristischen Verfahren. Dies bedeutet, dass, je Iteration beim exakten Verfahren, die gefundene optimale MIP-Lösung mehr Schnitt-Nebenbedingungen verletzt, dadurch aber schneller eine optimale Lösung gefunden werden kann.

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt nicht nur, dass die Zielfunktionswerte und Anzahl Iterationen geringer sind, vielmehr wird deutlich, dass die Lösungen sehr unterschiedliche Strukturen aufweisen. Dazu haben wir die Lösungen auf die Anzahl der verschiedenen Servicerouten je Routentyp und deren Anzahl von Stopps analysiert. Die detaillierten Ergebnisse dazu können im Anhang Tabelle 15 nachgelesen werden. Zur besseren Veranschaulichung haben wir die Anteile der Servicerouten je Routentyp (Pickup-Direktroute, Delivery-Direktroute und Hubroute) für die Testinstanzen in zwei Abbildungen - für das explizite Column-Generation-Verfahren Abbildung 6.28 und für das exakte Verfahren Abbildung 6.29 - angetragen. Die Prozentzahl hinter dem Balken eines Testbeispiels gibt die Anzahl der Servicerouten mit zwei Stopps, d. h. eine direkt Fahrt zwischen einem Pickup- und einem Delivery-Stopp, an.

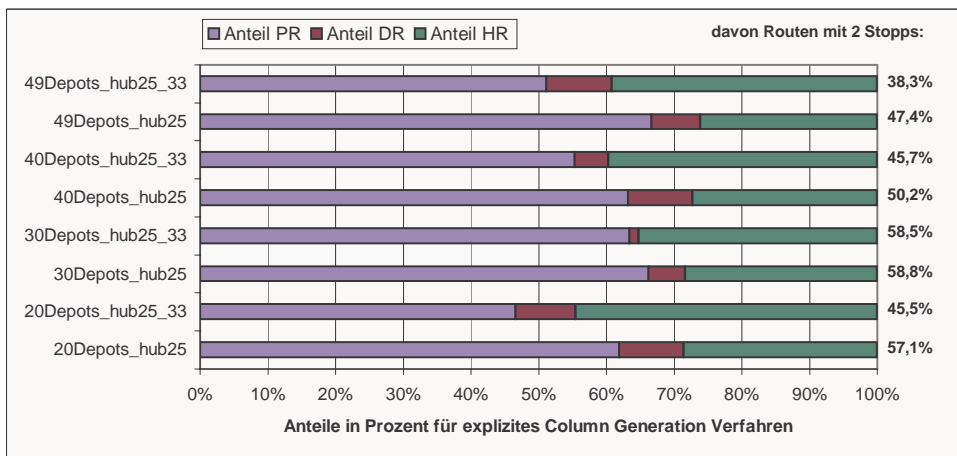


Abbildung 6.28: Anteile der Routentypen im expliziten Column-Generation

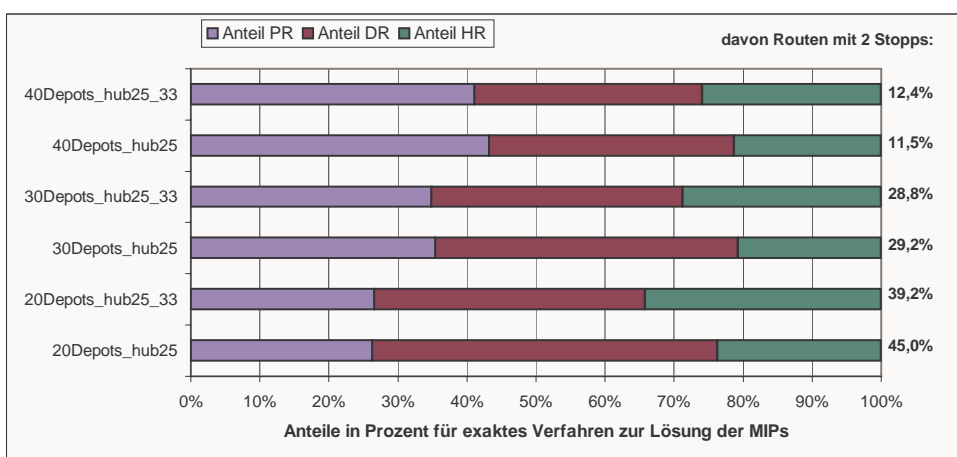


Abbildung 6.29: Anteile der Routentypen im exakten Verfahren

Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen wird ersichtlich, dass beim Column-Generation-Verfahren wesentlich mehr Pickup-Direktrouten in der Lösung vorkommen als beim exakten Algorithmus. Dies geschieht vor allem auf Kosten der Delivery-Direktrouten. Die

se machen in der Heuristik im Gegensatz zum exakten Verfahren nur einen kleinen Anteil der Servicerouten in der Lösung aus. Die meisten durch das explizite Column-Generation-Verfahren erzeugten Direkttrouten bestehen dabei nur aus zwei Stopps.

Der Grund für diese Phänomene bei der Heuristik ist im Aufbau des Verfahrens zu suchen. Alle möglichen Servicerouten werden in einem Preprocessing-Schritt erstellt. Zur Initialisierung des Column-Generation-Verfahrens in der LP-Relaxation des Wurzelknotens ist eine erste Basislösung notwendig. Dazu wird für jede Commodity die günstigste Serviceroute - im Normalfall eine Direktroute - ausgewählt. Im Rahmen der Column-Generation-Methode werden dem LP dann Servicerouten, welche eine Verbesserung des Zielfunktionswertes ermöglichen, hinzugefügt. Nach der Optimierung der LP-Relaxation werden alle Spalten aus dem LP-Modell in das MIP übertragen. Dieses MIP wird dann mithilfe des Branch-and-Cuts von CPLEX gelöst.

Das detaillierte Verfahren für die Auswahl der ersten Spalten für die Basislösung geht dabei so vor, dass für jedes Ausgangsort-Bestimmungsort-Paar alle Servicerouten nach ihrer Reihenfolge bei der Generierung überprüft werden. Sollte eine Serviceroute einen gleichen Pickup-Stopp, wie der Ausgangsort und einen Delivery-Stopp, wie der Bestimmungsort aufweisen und zu dem noch günstiger sein, als schon eine gefundene beste Route, so wird diese als neueste beste Route gesetzt. Direkttrouten mit nur zwei Stopps sind grundsätzlich günstiger, als ein Umweg über einen weiteres Depot oder eine Hubroute (Stopp an einem zusätzlichen Standort). Die Generierung der Servicerouten beginnt zuerst mit den Pickup-Direkttrouten, dann folgen die Delivery-Direkttrouten und am Schluss werden die Hubrouten erstellt. Somit werden zur Initialisierung des Verfahrens hauptsächlich Pickup-Direkttrouten mit zwei Stopps als Spalten in die LP-Relaxation aufgenommen. Im Laufe des Column-Generation-Verfahrens werden dann selten Delivery-Direkttrouten hinzugefügt, da diese keine Verbesserung darstellen. Aufgrund der linearen Programmierung können auch nicht-ganzzahlige Lösungen und somit Servicerouten vorkommen. Damit werden Servicerouten, welche im MIP zu einem günstigeren Zielfunktionswert führen würden, in der LP-Relaxation nicht in das RMP aufgenommen.

Dadurch lässt sich zumindest der hohe Anteil an Pickup-Direkttrouten und an Direkttrouten mit nur zwei Stopps bei der Anwendung des Column-Generation-Verfahrens erklären. Beim exakten Verfahren für das MIP ist der Anteil an Servicerouten mit nur zwei Stopps um einiges geringer und nimmt vor allem mit der Größe der Testinstanz ab. Grundsätzlich sind in beiden Verfahren die Hubrouten unterrepräsentiert. Der Grund hierfür liegt in der indirekten Abbildung des Bedarfes der Commodities über die S,T-Schnitte. Dabei wird nur der kumulierte Bedarf aus einem Ausgangsort oder zu einem Bestimmungsort betrachtet, welcher oft günstiger über eine Kombination von Direkttrouten, als über eine Kombination von Hubrouten gedeckt werden kann. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Auslastung der LKW, welche durch die Lösung des Modells zur Generierung von Auftragsrouten festgelegt wird. Aus der Analyse der Sendungsdaten (siehe Abschnitt 6.2.1.3) ist nämlich ersichtlich, dass nur 10 Commodities - also weniger als 1 % der Paare - mehr als einen Wechselbehälter füllen. Dadurch werden die Servicerouten mit den dazugehörigen LKW, insbesondere durch die Heuristik, sehr schlecht ausgelastet. Dies führt zu hohen Fixkosten, da mehr Servicerouten gefahren werden müssen. Zum anderen sind mehr Iterationen im Gesamtverfahren notwendig, da mit den Servicerouten in der Lösung nicht alle Bedarfe von oder zu einem Depot gedeckt werden können.

Beurteilung:

Der exakte Algorithmus erstellt, wie erwartet, Lösungen mit geringeren Kosten, wobei außerdem die Laufzeit, vor allem bei kleineren Instanzen, kürzer ist. Zudem sind die Lösungen im Hinblick auf das Gesamtverfahren qualitativ besser. Große Testinstanzen, gebildet aus internationalen Netzen, lassen sich damit aber nicht in einer annehmbaren Zeit lösen, wie schon die Testbeispiele mit 49 Depots gezeigt haben. Im Gegensatz dazu ist es mit dem expliziten Column-Generation-Verfahren möglich, auch größere Instanzen zu lösen.

Um den Anteil der Delivery-Direktrouten und den Anteil an Direktrouten mit drei Stopps beim Einsatz des Column-Generation-Verfahrens zu verbessern, wäre es möglich, mit einer größeren Anzahl an Servicerouten die Initialisierung zu beginnen. Dies würde jedoch dazu führen, dass das RMP und das MIP größer werden und somit die Lösungszeiten in die Höhe schnellen.

Die Schwäche der beiden Verfahren - die geringe Anzahl der Hubrouten - lässt sich nur beheben, indem man entweder auch Schnitte mit $|S|$ und $|T|$ größer drei untersucht und gegebenenfalls hinzufügt oder eine andere Methode findet, die Bedarfe direkt in dem Modell abzubilden. Das Hinzufügen weiterer Schnitte lässt wiederum die Größe des Problems relativ schnell stark anwachsen, was zu Speicherplatz- und Laufzeitproblemen führt. Somit ist auch dieser Weg für die Abbildung von internationalen Netzen mit eventuell verschiedenen Fahrzeug- und Containertypen nicht sinnvoll. Eine sinnvolle Alternative zum expliziten Cut-Generation-Verfahren ist die Entwicklung eines Separationsalgorithmus, welcher die Bedarfe auch für größere Schnittmengen berücksichtigt. Ein solcher exakter Algorithmus ist unseres Wissens nach noch nicht gefunden worden, stellt aber einen interessanten Bereich für zukünftige Forschungsaufgaben dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden wir uns auf das explizite Verfahren beschränken.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass, bei den momentan vorhandenen Rechnerkapazitäten, die Heuristik für das Lösen von großen Probleminstanzen von Vorteil ist. Liegen jedoch kleine Netze (z. B. nationale Netze) vor, ist es sinnvoll, auf das exakte Verfahren für die Bestimmung von Servicerouten zurückzugreifen.

6.3.4 Analyse des Cut-Generation-Verfahrens

Die Cutset-Inequalities (siehe Abschnitt 3.5.2) spielen eine wichtige Rolle in dem Modell zur Bestimmung der Servicerouten. Sie gewährleisten, dass Servicerouten überhaupt generiert werden und somit der Bedarf oder zumindest ein Teil des Bedarfes der Commodities gedeckt werden kann. Sie wirken sich damit direkt auf die Lösung und den dazugehörigen Zielfunktionswert aus. Es steht jedoch nicht fest, wie effizient diese Schnittungleichungen genutzt werden können. Unter *Effizienz* wird hierbei der Trade-Off zwischen dem Aufwand zur Separation und der daraus resultierenden Laufzeitverlängerung und der Verbesserung der Lösungsqualität verstanden. Der Aufwand für das explizite Überprüfen der Schnitte ist, wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, vernachlässigbar. Jedoch kommt es zum einen durch neue gefundene verletzte Schnitte zu einer neuen Iteration und zum anderen wächst die Problemgröße des MIP durch die hinzugefügten Nebenbedingungen an.

Mit Hilfe des expliziten Schnittebenen-Verfahrens wird untersucht, ob die S,T-Cuts im Rahmen der Lösung des Modells zur Bestimmung von Servicerouten effizient eingesetzt werden können. Folgende Fragen werden für die Analyse beantwortet:

- A:** Welche Auswirkungen haben die verletzten Schnitte auf den Zielfunktionswert? Kann dadurch eine Verbesserung der Lösung gewährleistet werden?
- B:** Wie viele verletzte Cutset-Inequalities werden gefunden und wie verteilen sie sich über die Iterationen?
- C:** Welchen Einfluss hat das Cut-Generation-Verfahren auf die gesamte Dauer des Verfahrens?

Für die Tests steht wieder eine Rechenzeit von 21600 Sekunden zur Verfügung. Bei Überschreitung dieses Zeitlimits erfolgt der Abbruch des Branch-Price-and-Cut-Verfahrens am Ende der Iteration, d. h. nach Lösen des MIP und des Cut-Generation-Verfahrens. Die Analyse wurde mit den Testbeispielen hub25 und hub25_33 aus den vier Testgruppen mit der gefundenen besten Parametereinstellung durchgeführt.

Vorab erscheint eine nochmalige kurze generelle Erklärung der Vorgehensweise (siehe dazu Abschnitt 5.5.1.2) sinnvoll: Zur Initialisierung des Verfahrens werden die Ungleichungen für alle S,T-Cuts mit $|S| = 1$ und $|T| = 1$ dem Modell hinzugefügt. Die Schnitte für $|S|$ bzw. $|T|$ gleich zwei und drei werden in einem Preprocessing-Schritt generiert. Diese werden durch Einsetzen der optimalen ganzzahligen Lösung in die Schnittungleichungen explizit auf Verletzung überprüft und gegebenenfalls bei Nichterfüllung dem Modell hinzugefügt. Ungleichungen für Schnittmengen mit mehr als drei Elementen werden grundsätzlich nicht betrachtet.

Ergebnisse der Analyse:

Zu A: Zur Beantwortung der Fragen wollen wir zuerst die Veränderung des Zielfunktionswertes für die ersten fünf gelösten MIP genauer untersuchen. Dazu ist in Abbildung 6.30 für jede Testinstanz der prozentuale Anstieg oder Abstieg des Zielfunktionswertes der MIP-Lösung zur vorherigen Lösung angetragen. Die dazugehörigen einzelnen Zielfunktionswerte und die Anzahl der verletzten Cutsets befinden sich in Tabelle 16 im Anhang. Grundsätzlich kann es von einem gelösten MIP zum nächsten zu einer Verbesserung des Zielfunktionswertes - also geringeren Kosten - kommen, obwohl sich die Modelle nur durch die zusätzlich hinzugefügten verletzten Schnittungleichungen unterscheiden. Dies liegt zum einen an der heuristischen Vorgehensweise (Column-Generation nur im Wurzelknoten) und zum anderen an der 6 % MIP-Gap-Toleranzgrenze.

Bei Betrachtung der Abbildung 6.30 fällt sofort auf, dass es zwischen der Lösung des ersten MIP und des zweiten MIP zur größten Veränderung des Zielfunktionswertes kommt. Es ist bei allen Testbeispielen ein Anstieg von über 25 % zu verzeichnen. Danach bewegen sich die Schwankungen zwischen 3 % und -2 % und sind im Vergleich zur Veränderung zwischen der ganzzahligen Lösung des ersten MIP und des zweiten MIP sehr gering.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die verletzten Schnitte durch die erste MIP-Lösung eine große Auswirkung auf die Lösung des Modells zur Bestimmung der Servicerouten haben. Sie drängen das Verfahren dazu, die Anzahl der Servicerouten in der Lösung zu erhöhen. Dadurch stehen dem Modell zur Generierung von Auftragsrouten mehr Servicerouten zur Deckung des Bedarfes der Commodities zur Verfügung. Somit kann dadurch die Qualität der Lösung im Hinblick auf das Gesamtverfahren merklich gesteigert werden. Dies lässt sich mithilfe der Tabelle 16 im Anhang untermauern. Dort findet man für die ersten fünf Iterationen die Anzahl gefahrener Servicerouten der ganzzahligen Lösung. Die hinzugefügten Schnitte zu den weiteren drei MIP führen zu keiner merklichen Änderung in der Anzahl der Servicerouten. Das Verfahren verändert nur die Kombinationen

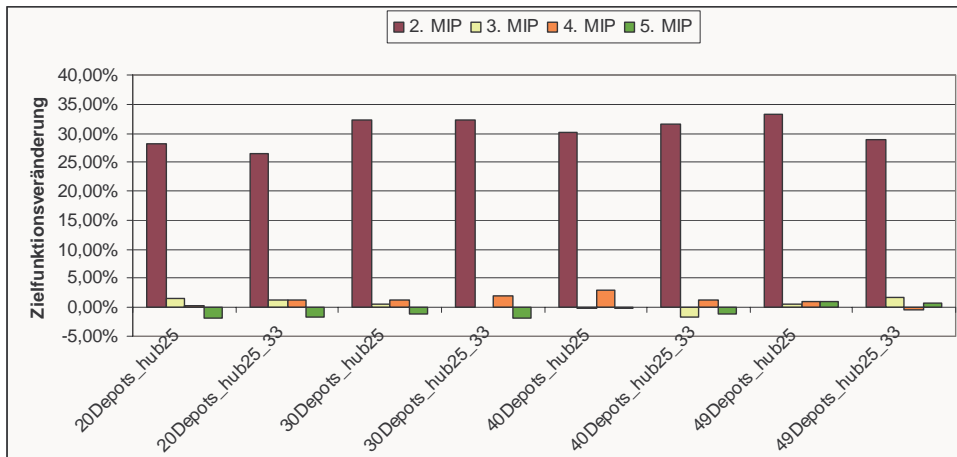


Abbildung 6.30: Veränderung des Zielfunktionswertes der zweiten bis fünften gelösten MIP im Vergleich zur vorherigen MIP-Lösung

von Routen in der Lösung. Die dadurch bereitgestellte Gesamtkapazität bleibt somit im Wesentlichen gleich; sie wird nur zwischen den einzelnen Standorten anders verteilt.

Bis jetzt wurden nur die prozentualen Veränderungen zur vorherigen Iteration untersucht. Wie schauen die Zielfunktionswerte aber im Vergleich zum endgültigen Zielfunktionswert aus? Dazu sind in Tabelle 6.18 die prozentualen Abweichungen zwischen den jeweiligen Werten angegeben.

Instanz	1. MIP	2. MIP	3. MIP	4. MIP	5. MIP
20Depots_hub25	22,56 %	0,73 %	-0,65 %	-0,89 %	1,06 %
20Depots_hub25_33	21,82 %	1,11 %	-0,06 %	-1,42 %	0,24 %
30Depots_hub25	25,92 %	1,95 %	1,45 %	0,32 %	1,45 %
30Depots_hub25_33	25,11 %	0,90 %	0,85 %	-1,18 %	0,71 %
40Depots_hub25	25,23 %	2,70 %	2,95 %	0,14 %	0,28 %
40Depots_hub25_33	23,22 %	-1,05 %	0,54 %	-0,68 %	0,49 %
49Depots_hub25	28,04 %	4,11 %	3,67 %	2,64 %	1,62 %
49Depots_hub25_33	23,23 %	1,11 %	-0,55 %	0,00 %	-0,72 %

Tabelle 6.18: Veränderung des Zielfunktionswertes der jeweiligen MIP-Lösung zum Zielfunktionswert der endgültigen Lösung

Dort finden wir ein ähnliches Ergebnis wie bei Abbildung 6.30. Die Lösung des ersten MIP ist noch über 20 % vom eigentlichen Zielfunktionswert entfernt. Durch das Hinzufügen der verletzten Ungleichungen durch die erste MIP-Lösung wird der Zielfunktionswert der zweiten MIP-Lösung sehr nahe an den endgültigen Wert herangeschoben. Die dritte MIP-Lösung weist weniger als 3 % Differenz auf, wobei die meisten Lösungswerte weniger als 1,5 % von der endgültigen Lösung abweichen. Die weiteren hinzugefügten Schnitte tragen damit wenig zur Verbesserung der Lösungsqualität bei.

Zu B: Für die detaillierte Untersuchung der Schnitte selber analysieren wir zuerst, zu welchem Zeitpunkt in dem Verfahren die verletzten Schnitte vermehrt auftreten. Zur Unterstützung dieser Analyse ist in Abbildung 6.31 der Anteil (in Prozent) der verletzten Schnitte je MIP-Lösung in Bezug auf die Gesamtanzahl der hinzugefügten Schnittungleichungen für jede Testinstanz dargestellt. Dabei unterscheiden wir sechs verschiedene

Klassen: jeweils die verletzten Cutset-Inequalities der ersten fünf MIP und als letztes die gesamten Cutset-Inequalities der restlichen MIP.

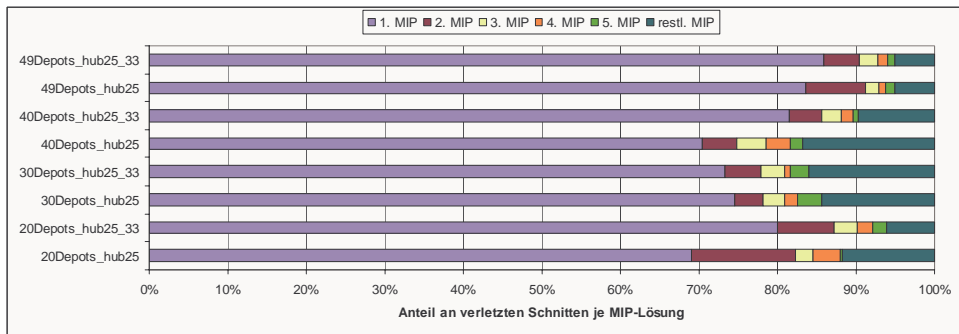


Abbildung 6.31: Anteil der verletzten Schnitte, hervorgerufen durch die jeweilige MIP-Lösung relativ zur Summe aller verletzten Schnitte

Insgesamt werden zwischen 7 % und 14 % (siehe dazu Tabelle 17 im Anhang) aller möglichen Ungleichungen für $|S|$ und $|T| = 2$ und 3 im Laufe des Verfahrens verletzt. Ein Großteil der Cutsets wird nach der Untersuchung der ersten MIP-Lösung dem Modell hinzugefügt, wie aus der Abbildung ersichtlich ist. Dadurch ist ein klarer Zusammenhang zur Erhöhung des Zielfunktionswertes der zweiten MIP-Lösung erkennbar. In der dritten MIP-Lösung sind zumeist deutlich mehr als 80 % aller verletzten Schnitte schon berücksichtigt. Die Anzahl der danach gefundenen verletzten Cutsets ist sehr gering.

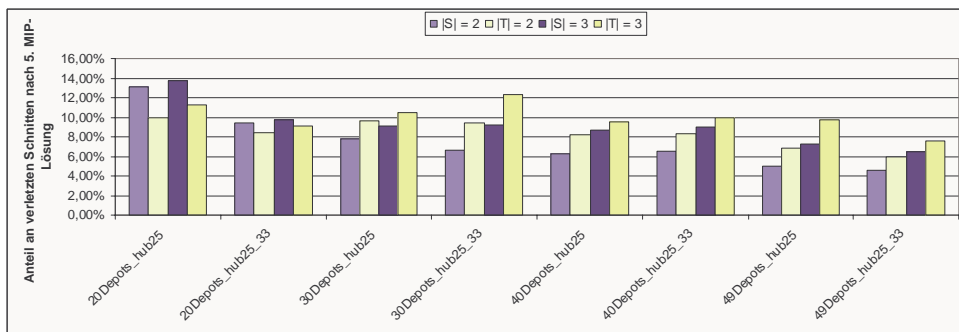


Abbildung 6.32: Anteil der Schnitte nach der 5. MIP-Lösung aufgeteilt nach $|S|$ und $|T|$

Bei der Betrachtung der Aufteilung der Schnitte nach $|S|$ bzw. $|T|$ und 2 bzw. 3 Elemente in den Schnittmengen (siehe dazu Abbildung 6.32) für jedes der Testbeispiele ist ersichtlich, dass der Anteil der verletzten 3er-Cuts (dunkle Farben im Diagramm) größer ist als der der 2er-Cuts (helle Farben im Diagramm). Ein Grund hierfür mag in der großen Anzahl an Direkt Routen mit nur zwei Stopps liegen (siehe dazu Abschnitt 6.3.3). Dadurch können wohl die Gesamtbedarfe von Cutsets mit zwei Elementen abgedeckt werden, jedoch nicht diejenigen mit drei Elementen. Die ganzzahligen Lösungen scheinen vor allem die Bedingungen für die Cutsets mit $|T|$ (gelbe Farben im Diagramm), insbesondere für $|T| = 3$, zu verletzen. Dies liegt vor allem an dem ungleichen Verhältnis zwischen Pickup- und Delivery-Direkt Routen in der Lösung. Das Phänomen wird detailliert in Abschnitt 6.3.3 erörtert. Dadurch stehen mehr Servicerouten für den Abtransport der Bedarfe von der Menge S in die Menge T zur Verfügung als anders herum.

Die Anzahl der gefundenen Schnitte für $|S| = 3$ und $|T| = 3$ steigt, wie aus Tabelle 7.2

Instanz	T_{MIP}^1	T_{MIP}^2	T_{MIP}^3	T_{MIP}^4	T_{MIP}^5	#MIP	$\bar{\Theta} T_{MIP}^i$
20Depots_hub25	0	0	0	1	1	15	0,73333
20Depots_hub25_33	0	0	1	0	1	11	0,63636
30Depots_hub25	0	3	4	5	5	25	6,88
30Depots_hub25_33	0	2	6	6	7	28	8,39286
40Depots_hub25	2	69	80	86	148	37	118,459
40Depots_hub25_33	3	87	135	197	161	26	139,538
49Depots_hub25	8	253	361	414	404	13	416,231
49Depots_hub25_33	12	241	259	275	522	11	323,545

Tabelle 6.19: Laufzeiten zum Lösen der jeweils ersten 5 MIP

im Anhang ersichtlich ist, bei großen Probleminstanzen sehr schnell stark an. Dies hängt jedoch mit der hohen Anzahl von Kombinationen der Elemente in den Schnittmengen und dadurch mit den möglichen Ungleichungen zusammen. Prozentual gesehen kann jedoch der Trend ausgemacht werden, dass je größer die Probleminstanzen sind, desto geringer ist der Anteil an verletzten Schnitten.

Zu C: In Tabelle 6.19 sind neben der Anzahl der gelösten MIP bis zum Stoppkriterium oder zum Abbruch, auch die durchschnittlichen Laufzeiten des Branch-and-Cut-Verfahrens und die einzelnen Laufzeiten zur Lösung der ersten fünf MIP angegeben. Die Rechenergebnisse der Testbeispiele zeigen deutlich, dass bis zur endgültigen Lösung sehr viele MIP durchlaufen werden, wobei oft nur einige wenige Schnitte verletzt sind.⁴⁶ Dadurch verlängern sich die Laufzeiten für das Branch-Price-and-Cut-Verfahren, wobei die Qualität der Lösungen dabei nicht unbedingt besser wird (siehe Frage A).

Die Laufzeit zum Lösen des zweiten MIP ist im Vergleich zum Lösen des ersten MIP bedeutend länger. Der Grund dafür liegt in der hohen Anzahl von hinzugefügten Schnittungleichungen, welche die Problemgröße um ein Vielfaches wachsen lässt. Jedoch schwanken die Laufzeiten für die Lösung der nachfolgenden MIP (z. B. drittes bis fünftes MIP) teilweise sehr und sind kleiner und größer als der Durchschnittswert. Es ist wohl ein stetiger Anstieg der Anzahl der Zeilen gegeben, jedoch variiert die Anzahl der Spalten im MIP. Dies liegt am Aufbau des Verfahrens, da in jeder Iteration das Column-Generation-Verfahren neu durchgeführt wird und somit unterschiedliche Variablen als Spalten aufgenommen werden. Damit vernünftige Rückschlüsse auf das Laufzeitverhalten gegeben werden können, ist es sinnvoll, die Laufzeiten der einzelnen MIP im Zusammenhang mit der Problemgröße zu betrachten. Dafür haben wir exemplarisch die Testinstanzen 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33 analysiert (siehe Tabelle 6.20).

Ein Blick auf die Tabelle genügt jedoch, um sagen zu können, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Laufzeit und Anzahl der Zeilen und Spalten herstellbar ist. Generell kann wohl festgehalten werden, dass ein großer Sprung in der Problemgröße zu einer längeren Laufzeit führt. Jedoch muss eine steigende Anzahl an Zeilen und Spalten zwischen zwei MIP nicht notwendigerweise zu einer Verlängerung der Rechenzeit führen. Dies ist z. B. beim 10. und 11. MIP des Testbeispiels 49Depots_hub25 gegeben. Auffällig ist auch, dass 40Depots_hub25_33 ab dem zweiten MIP bei fast doppelt soviel Spalten und um ca. 10 % weniger Zeilen als 49Depots_hub25 oft geringere Rechenzeiten vorweist.

Beurteilung: Nachdem es sich bei dem implementierten Branch-Price-and-Cut-Verfah-

⁴⁶Die Abnahme der Anzahl der gelösten MIP durch das Verfahren ab einer Größe von 40 Depots hängt mit dem Abbruch des Verfahrens nach 6 Stunden zusammen.

Instanz	49Depots_hub25			49Depots_hub25_33		
	#cols	#rows	T_{MIP}^i	#cols	#rows	T_{MIP}^i
1.	42.584	1.379	8	54.248	1.386	12
2.	35.925	4.270	253	63.068	3.828	241
3.	37.035	4.536	361	62.947	3.955	259
4.	36.946	4.593	414	63.129	4.022	275
5.	36.969	4.624	404	63.049	4.059	522
6.	36.872	4.666	374	63.278	4.082	322
7.	37.110	4.708	375	64.282	4.119	392
8.	37.044	4.724	448	63.464	4.131	327
9.	36.221	4.747	471	64.077	4.147	343
10.	36.265	4.771	704	63.494	4.186	333
11.	36.896	4.794	453	63.548	4.206	533
12.	36.887	4.812	466			
13.	37.001	4.826	680			

Tabelle 6.20: Laufzeiten der MIP in Abhängigkeit der Anzahl Zeilen und Spalten je Iteration

ren um eine Heuristik handelt und eine MIP-Gap-Toleranz von 6 % eingestellt ist, können die Abweichungen der Zielfunktionswerte spätestens ab dem dritten gelösten MIP als nicht relevant angesehen werden. Die Laufzeit des Verfahrens wird durch die Anzahl der zu lösenden MIP beeinflusst; ein starkes Anwachsen der Lösungszeit ab dem dritten MIP kann nicht nachgewiesen werden. Dies hängt vor allem auch damit zusammen, dass in den meisten Testinstanzen über 80 % der verletzten Schnitte durch die drei ersten MIP-Lösungen gefunden werden. Es kann damit klar ausgesagt werden, dass dieses Verfahren für die ersten drei zu lösenden MIP sehr effizient eingesetzt werden kann, jedoch verschlechtert sich der Trade-Off mit jedem weiteren Durchlauf. Aus Effizienzgründen ist es daher nicht sinnvoll, mehr als drei MIP in dem Verfahren zu optimieren. Daher werden für die Tests zum Gesamtverfahren das Branch-Price-and-Cut-Verfahrens nach dem dritten gelösten MIP abgebrochen. Diese Lösung stellt den Input für die Generierung von Auftragsrouten dar.

6.4 Tests zur Generierung von Auftragsrouten

Bei dem zweiten Modell - der Generierung von Auftragsrouten -, welches im Rahmen des Gesamtalgorithmus gelöst wird, stellt die Lösungsdauer keinen kritischen Faktor dar. Tests mit der CPLEX-Defaulteinstellung zeigen, dass das Problem innerhalb weniger Sekunden gelöst ist. Die Ergebnisse für die Laufzeit der einzelnen Testinstanzen sind in Tabelle 6.21 dargestellt. Zur Einschätzung der Problemgröße des zu lösenden MIP-Modells haben wir dessen Anzahl Zeilen und Spalten mit angegeben.

Die kurzen Rechenzeiten für das Branch-and-Price-Verfahren liegen zum einen an dem impliziten Column-Generation-Verfahren. Dadurch konnte die Anzahl der Spalten sehr klein gehalten werden. Zum anderen wird das Column-Generation-Verfahren nicht in jedem Knoten des Branch-and-Bound-Baumes durchgeführt, sondern, wie auch bei der Generierung der Servicerouten, nur in der LP-Relaxation im Wurzelknoten. Die hierbei generierten Variablen stellen die Menge der Variablen für den restlichen Branch-and-Bound-Baum.

Instanz	T_{AG}	#cols	#rows
20Depots_hub25	2	109	171
20Depots_hub25_33	2	107	174
30Depots_hub25	2	221	273
30Depots_hub25_33	2	171	270
40Depots_hub25	3	339	390
40Depots_hub25_33	3	428	398
49Depots_hub25	4	385	476
49Depots_hub25_33	5	647	486

Tabelle 6.21: Laufzeiten zur Lösung des Modells zur Generierung von Auftragsrouten, inklusive Anzahl Zeilen und Spalten

Das durch diese Variablen und Nebenbedingungen erzeugte gemischt-ganzzahlige Optimierungsproblem kann von dem Mixed Integer Optimizer in CPLEX mit seinem Branch-and-Cut-Verfahren innerhalb von Sekunden gelöst werden, da die Anzahl der Zeilen und Spalten, wie aus der Tabelle ersichtlich, sehr gering sind.

Aufgrund dieser geringen Laufzeiten sind Parametertests zur Beschleunigung des Verfahrens für die Generierung der Auftragsrouten nicht notwendig. Alle nachfolgenden empirischen Tests zum Gesamtalgorithmus werden für dieses Teilproblem mit der CPLEX-Defaulteinstellung zum Lösen der MIP und LP durchgeführt.

6.5 Tests zum SNDP

In diesem Unterkapitel möchten wir den Gesamtalgorithmus zur Linienverkehrsplanung anhand von Performance-Maßen untersuchen: Es werden der Rechenaufwand (siehe Abschnitt 6.5.1) und die Qualität der Testergebnisse (siehe Abschnitt 6.5.2) analysiert. Als Basis für die quantitativen und qualitativen Untersuchungen werden alle Testinstanzen aus Tabelle 6.7 benutzt.

6.5.1 Rechenaufwand

Die Linienverkehrsplanung in speditionellen Netzen gehört zu der Gruppe der large-scale Probleme. Für diese Gruppe gilt bis heute, dass nur kleine Probleminstanzen exakt gelöst werden können, wobei die Laufzeiten sehr schnell anwachsen. Realistische Probleminstanzen können meist nur mithilfe von Heuristiken geplant werden. Vor allem die langen Laufzeiten und der große Speicherplatzbedarf haben in der Vergangenheit große Schwierigkeiten bereitet (siehe dazu z. B. Barnhart u. a. (2002)). Deswegen ist es unerlässlich im Rahmen dieser Arbeit, den Rechenaufwand zu untersuchen. Wir wollen daher in dieser Analyse die folgenden drei Fragen beantworten:

A: Können realistische Instanzen für ein nationales Netz in annehmbarer Zeit gelöst werden?

B: Welche Zusammenhänge zwischen Rechenaufwand und Problemgröße sind erkennbar?

C: Können Probleminstanzen mit einer erweiterten Problemstellung, wie z. B. bei internationalen Netzen, mit diesem Verfahren in Bezug auf Rechenaufwand noch gelöst werden?

Ergebnisse der Analyse und Beurteilung:

Zu A: Diese Frage kann klar positiv beantwortet werden. Es traten bei keinem Testbeispiel Speicherplatzprobleme auf, und alle Testinstanzen konnten in weniger als 15 Stunden (maximale Laufzeit: 52.654 Sekunden) gelöst werden. Die detaillierten Rechenzeiten, inklusive Anzahl der Iterationen, sind in Tabelle 19 im Anhang aufgelistet. Die Rechenzeiten und die Anzahl der möglichen Servicerouten der Testbeispiele sind in Abbildung 6.33 graphisch dargestellt. Die Höhe der blauen Balken zeigt die Laufzeit an; die gepunktete orange-farbene Linie gibt die Anzahl der möglichen Servicerouten für das Testbeispiel wieder. Die Problemgröße ist, wie berichtet, hauptsächlich abhängig von der Anzahl der Depots, Hubs und machbarer Servicerouten. Vor allem die Laufzeiten für die Column-Generation-Methode bei der Bestimmung der Servicerouten, welche einen Großteil der Rechenzeit ausmachen, wird durch die Menge der möglichen Servicerouten bestimmt. Die Testinstanzen sind daher nach aufsteigender Anzahl an Servicerouten geordnet.

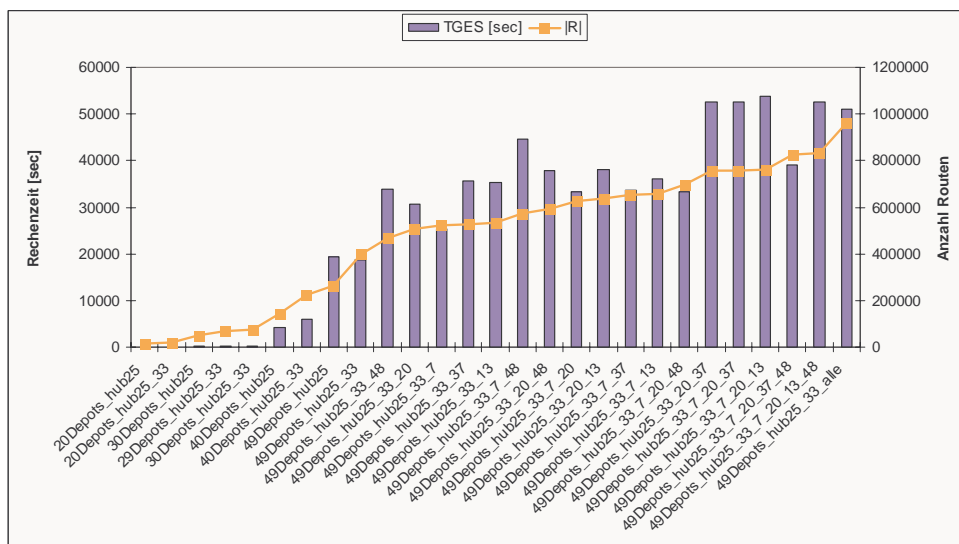


Abbildung 6.33: Rechenzeit und Anzahl Servicerouten der Testinstanzen

In der Abbildung ist klar der Trend zu erkennen, dass mit steigender Problemgröße die Rechenzeiten anwachsen. Der Rechenaufwand geht zwar teilweise bei größeren Problemen im Verhältnis zu kleineren Beispielen zurück. Im Allgemeinen ist jedoch bei größeren Netzen mit längeren Laufzeiten zu rechnen. Die Linienverkehrsplanung wird bei LDL im Abstand von einigen Wochen oder Monaten durchgeführt. Somit sind aus operativer Sicht keine kurzen Laufzeiten notwendig. Die Rechenzeit für einen Planungslauf darf mehrere Stunden betragen. Der Rechenaufwand für ein nationales Netz ist damit akzeptabel.

Zu B: Für die Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Problemgröße und Rechenaufwand ist es wichtig, die einzelnen Einflussfaktoren zu kennen. Die Laufzeit setzt sich hauptsächlich aus der Bestimmung der Servicerouten, aus der Generierung der Auftragsrouten und der Anzahl an Iterationen zusammen. Wie die Ergebnisse der Parameter-tests in Kapitel 6.3.2.3 zeigen, wird für die Bestimmung der Servicerouten hauptsächlich Zeit für die Column-Generation-Methode aufgewendet. Der Anteil der Rechenzeit an der Lösung

des MIP und der Überprüfung der Cutsets ist gering. Das Modell zur Generierung der Auftragsrouten wird laut der Tests in Abschnitt 6.4 innerhalb weniger Sekunden gelöst. Andere Schritte des Gesamtverfahrens benötigen weniger als drei Sekunden. Somit fokussieren wir in dieser Analyse auf die Laufzeit des expliziten Column-Generation-Verfahrens zur Lösung der LP-Relaxation im Wurzelknoten und auf die Anzahl der Iterationen im Gesamtverfahren. Die Anzahl der Iterationen hängt davon ab, wie viele Depots vollständig durch die Auftragsrouten bedient werden. Je größer die Menge dieser Depots ausfällt, desto kleiner wird das Problem in der nächsten Iteration. Solange nicht für alle Depots der Bedarf gedeckt ist, wird eine weitere Iteration angeschlossen.

In dem expliziten Column-Generation-Verfahren wird in jeder Iteration ein Teil der möglichen Servicerouten (absteigend nach maximaler Auslastung) auf negativ reduzierte Kosten überprüft. Das Verfahren endet, wenn die maximale Auslastung bei 0 angekommen ist (siehe auch Abschnitt 5.5.1.2). Dadurch werden für jede Serviceroute genau einmal die reduzierten Kosten berechnet, was sehr zeitaufwendig ist. Damit erhalten wir einen direkten Zusammenhang zwischen Rechenaufwand und $|R|$. Die Anzahl der Depots und Hubs spielen zum einen eine Rolle in der Anzahl der machbaren Servicerouten, zum anderen bestimmen sie die Anzahl der Nebenbedingungen in den zwei Modellen. Im Allgemeinen erwarten wir somit für größere Probleminstanzen längere Laufzeiten.

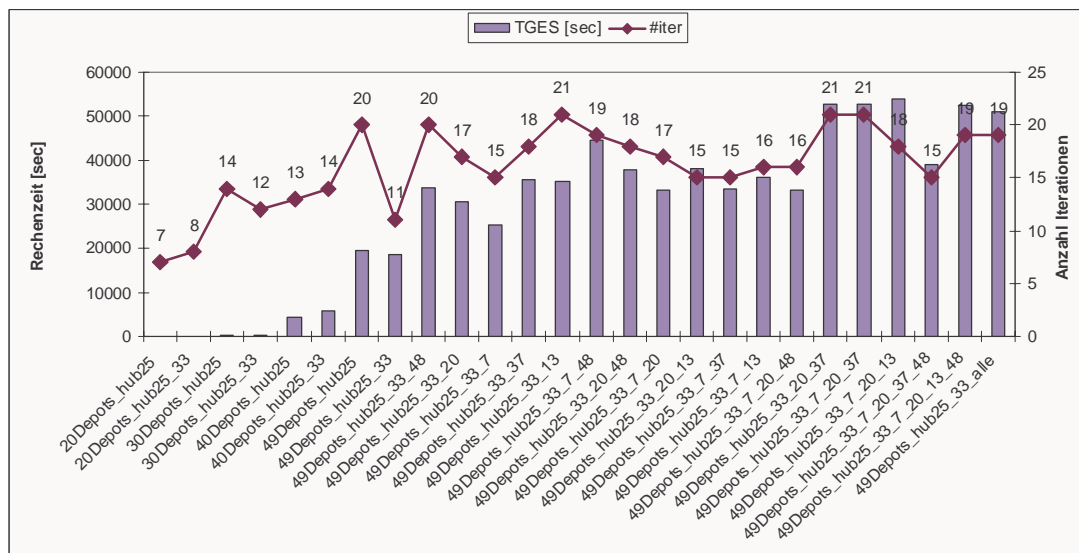


Abbildung 6.34: Rechenzeit und Anzahl Iterationen der Testinstanzen

In Abbildung 6.34 ist die Rechenzeit (hellblaue Balken) für die einzelnen Probleminstanzen und die Anzahl der durchlaufenen Iterationen (violette Linie) gegeben. Die Testinstanzen sind nach aufsteigender Anzahl an Servicerouten ($|R|$) geordnet. Als Erstes ist erkennbar, dass Beispiele mit einem geringeren Wert $|D|$ weniger Iterationen und eine kürzere Rechenzeit aufweisen (siehe Testbeispiele mit 20, 30 oder 40 Depots). Somit benötigt der Algorithmus zum Decken aller Bedarfe der Depots weniger Iterationen. Dadurch muss weniger oft das zeitintensive explizite Column-Generation-Verfahren durchgeführt werden. Weiterhin ist die Anzahl der Servicerouten bei den kleineren Testinstanzen weitaus kleiner und somit ist der Rechenaufwand für die Bestimmung der Servicerouten kleiner und somit auch für den Gesamtalgorithmus.

Zweitens ist kein direkter Zusammenhang zwischen $|R|$ und der Anzahl an Iterationen erkennbar. Wenn man die Beispiele mit 49 Depots und unterschiedlicher Anzahl an Hubs betrachtet, schwankt die Anzahl an Iterationen zwischen 11 und 21, wobei z. B. 49Depots_hub25 mit 262.521 Routen in 20 Iterationen und 49Depots_alle mit 959.061 Routen 19 Iterationen durchläuft.

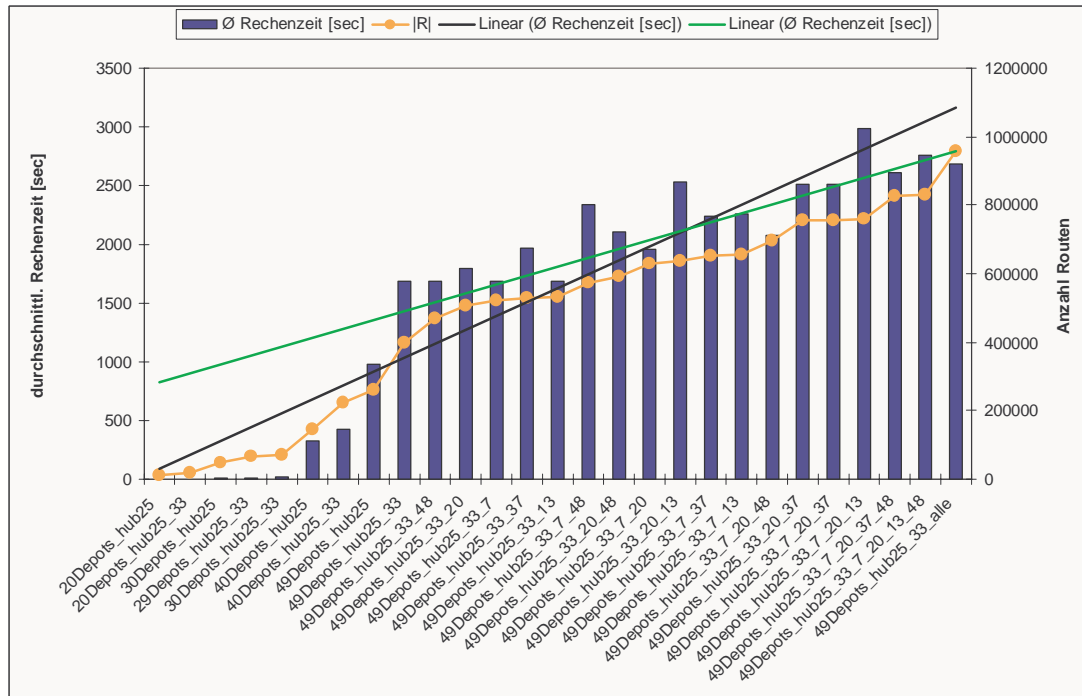


Abbildung 6.35: Durchschnittliche Rechenzeit je Iteration und Anzahl Servicerouten der Testinstanzen

Drittens kann ein Trend zu wachsenden Laufzeiten bei steigender Problemgröße (wie schon in Frage A erörtert) festgestellt werden. Dieser soll genauer untersucht werden. Dazu betrachten wir die durchschnittliche Rechenzeit je Iteration. Dafür haben wir die gesamte Laufzeit durch die Anzahl der Iterationen geteilt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.35 dargestellt. Die dunkelblauen Balken geben die durchschnittliche Rechenzeit je Iteration wieder. Die gelbe Linie zeigt die Anzahl der möglichen Servicerouten je Testinstanz an. Um das Anwachsen der Laufzeiten besser aufzeigen zu können, haben wir zwei Linien für einen linearen Trend eingezeichnet. Wir wollen damit allerdings keinesfalls aussagen, dass wir es hier mit einem linearen Trend zu tun haben. Als Basis für die Berechnung des Trends werden bei der schwarzen Linie alle Testbeispiele herangezogen, bei der grünen Linie nur die Instanzen mit 49 Depots.

Aus dieser Abbildung ist klar eine Zunahme der durchschnittlichen Rechenzeiten je Iteration bei steigendem $|R|$ feststellbar. Der durchschnittliche Rechenaufwand für die Beispiele mit 49 Depots startet bei knappen 1000 Sekunden und verdreifacht sich fast, wobei immer wieder Schwankungen aufgrund des Verfahrens auftreten. Die grüne Trendlinie lässt den Anstieg gut erkennen. Das Anwachsen der Laufzeiten ist dabei vor allem durch die Zunahme des Aufwandes beim expliziten Column-Generation-Verfahren zurückzuführen. Die Problemgröße für das MIP bei der Bestimmung der Servicerouten sowie für das Modell zur Generierung der Auftragsrouten verändert sich dabei kaum, da $|D|$ gleich bleibt und $|H|$ nur sehr gering wächst.

Der durchschnittliche Rechenaufwand springt von einer Testgruppe zur anderen mit steigender Anzahl an Depots weiter nach oben: angefangen von zwei Sekunden bei 20 Depots, auf ca. 18 Sekunden bei 30 Depots und zwischen 330 und 430 Sekunden bei 40 Depots. Die großen Sprünge sind zum einem auf die Zunahme der Anzahl der Zeilen in den Modellen zurückzuführen. Somit steigt der Rechenaufwand zur Lösung dieser Modelle. Zum anderen nimmt gleichzeitig auch die Anzahl der möglichen Servicerouten zu und dadurch wieder die Laufzeit des Column-Generation-Verfahrens. Die schwarze Trendlinie deutet den Anstieg der Rechenzeit an.

Zu C: Grundsätzlich können auch erweiterte Problemstellungen, und somit größere Probleminstanzen, mit diesem Verfahren gelöst werden. Wie die Antwort der Frage B jedoch zeigt, muss man sich auf noch längere Laufzeiten einstellen. Für eine detailliertere Beantwortung ist eine Gruppierung nach verschiedenen Erweiterungen notwendig.

Sollten mehrere Fahrzeugtypen und/oder Containertypen in der Problemstellung zugelassen werden, muss mit einem drastischen Anstieg an möglichen Servicerouten gerechnet werden. Für jeden Fahrzeug- oder Containertyp müssen die Servicerouten separat generiert werden. Somit generiert man z. B. bei drei Fahrzeugtypen drei machbare Servicerouten, in der im Basismodell nur eine Route vorhanden war. Dieser Anstieg an Servicerouten schlägt sich direkt im Rechenaufwand des expliziten Column-Generation-Verfahrens nieder, welcher um einiges größer wird. Die Rechenzeit kann dabei schnell auf einige Tage anwachsen.

Durch eine Erweiterung der Problemstellung auf ein internationales Netz müssen Modelle mit mehr Depots und Hubs gelöst werden. Dadurch wächst vor allem die Laufzeit zur Lösung der MIP bei der Bestimmung der Servicerouten und des Modells zur Generierung von Auftragsrouten an. Durch beschränkte Transportzeiten und Zeitfenster kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Anstieg in der Menge $|R|$ sich in Grenzen hält. Dadurch ist nicht mit einem sehr großen Rechenaufwand beim expliziten Column-Generation-Verfahren zu rechnen. Jedoch spielt bei internationalen Netzen der Einsatz von verschiedenen Verkehrsträgern eine wichtige Rolle. Da Bahn, Schiffe sowie Flugzeuge jedoch meist vorher festgelegte Fahrpläne befolgen, bleibt die Menge der möglichen Servicerouten weiterhin begrenzt.

6.5.2 Lösungsqualität

Die Untersuchung der Lösungsqualität kann, wie schon in Abschnitt 6.1.1 erläutert, nicht anhand eines Benchmarks, eines exakten Verfahrens oder unterer Schranken analysiert werden. Dadurch ist es nicht möglich, einen Vergleich zwischen Verfahren herzustellen. Die Lösungsqualität muss daher mithilfe von *deskriptiven Experimenten* (vgl. Barr u. a. (1995)) untersucht werden. Ziel dieser Analyse ist es, eine Aussage über die Qualität der Lösungen anhand von verschiedenen Performance-Maßen (siehe Abschnitt 6.1.1) treffen zu können.

In Tabelle 6.22 ist ein Überblick über alle durchgeführten Testinstanzen und die Ergebnisse der ausgesuchten Kriterien gegeben. Neben dem Zielfunktionswert und der Anzahl an Servicerouten, inkl. der Aufteilung nach Routentypen, sind noch die Anzahl der Rundläufe und 2-Tages-Umläufe, die Anzahl der One-Way-Fahrten, die Auslastungen der Servicerouten und die Auftragsrouten mit den dazugehörigen Umschlägen von Interesse.

Instanz	zGES	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung	#AR	#umschläge	#iter
20Depots_hub25	113.726	191	48	11	132	36	126	44,55 %	382	335	7
20Depots_hub25_33	116.539	204	42	12	150	32	148	42,94 %	391	354	8
30Depots_hub25	210.511	353	64	25	264	58	246	42,69 %	1.014	1.000	14
30Depots_hub25_33	215.342	374	64	17	293	51	288	42,08 %	971	997	12
40Depots_hub25	343.223	589	122	43	424	65	464	41,36 %	1.907	2.228	13
40Depots_hub25_33	328.890	578	96	40	442	79	426	43,21 %	2.082	2.470	14
49Depots_hub25	445.123	764	141	61	562	89	590	39,15 %	3.106	3.835	20
49Depots_hub25_33	415.297	700	147	38	515	94	530	41,38 %	3.092	3.711	11
49Depots_hub25_33_48	460.912	809	119	45	645	86	645	37,31 %	3.139	3.953	20
49Depots_hub25_33_20	428.676	714	124	39	551	82	559	39,76 %	2.873	3.455	17
49Depots_hub25_33_7	423.640	713	76	42	595	76	578	41,45 %	3.038	4.089	15
49Depots_hub25_33_37	430.266	746	120	40	586	81	590	40,12 %	3.018	3.827	18
49Depots_hub25_33_13	443.389	790	114	49	627	83	633	37,79 %	3.136	3.932	21
49Depots_hub25_33_7_48	445.670	772	96	41	635	84	616	38,05 %	2.948	3.578	19
49Depots_hub25_33_20_48	450.858	823	89	44	690	85	665	36,77 %	3.151	4.076	18
49Depots_hub25_33_7_20	444.066	767	107	41	619	100	572	38,02 %	3.089	3.816	17
49Depots_hub25_33_7_13	420.098	704	85	41	578	84	546	37,60 %	3.064	3.895	15
49Depots_hub25_33_20_13	424.366	726	111	43	572	92	548	33,51 %	3.102	3.580	15
49Depots_hub25_33_7_37	424.911	730	107	36	587	95	556	40,40 %	3.013	3.924	16
49Depots_hub25_33_7_20_48	441.124	783	102	45	636	85	665	38,80 %	2.998	3.800	16
49Depots_hub25_33_20_37	422.617	730	99	46	585	70	594	39,75 %	3.017	3.795	21
49Depots_hub25_33_7_20_37	459.728	812	95	34	683	100	629	36,21 %	2.989	3.896	21
49Depots_hub25_33_7_20_13	453.402	783	92	40	651	89	622	37,85 %	2.880	3.580	18
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	398.608	676	76	38	562	91	508	43,06 %	3.029	3.878	15
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	423.932	724	78	33	613	86	564	39,75 %	3.102	4.042	19
49Depots_hub25_33_alle	442.773	780	85	41	654	79	633	37,13 %	2.900	3.717	19

Tabelle 6.22: Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten und Stopps je Typ, Anzahl Umläufe und One-Way-Fahrten, Auslastung der Servicerouten, Anzahl Auftragsrouten, Anzahl Umschläge und Anzahl Iterationen im Verfahren für alle durchgeführten Testbeispiele

Auf die Tabelle sowie weiteren Analysen und Diagrammen wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

6.5.2.1 Zielfunktionswert

Der Zielfunktionswert berechnet sich aus der Summe der Kosten für die Servicerouten in der Lösung. Im Allgemeinen gilt daher die Abhängigkeit, dass je mehr Depots und somit Commodities gegeben sind, desto mehr Servicerouten werden benötigt und desto größer ist der Zielfunktionswert. Der beschriebene Umstand ist auch aus der Übersichtstabelle ersichtlich. Die Kosten für die Servicerouten steigen von 113.726 Euro bei 20 Depots bis zu 460.912 Euro bei 49 Depots an.

Für jedes Minimierungsproblem gilt, dass durch die Vergrößerung der Anzahl der Möglichkeiten der Zielfunktionswert des Optimums entweder gleich bleibt oder sinkt. Aus Tabelle 6.22 ist jedoch zu entnehmen, dass bei dem Gesamtverfahren durch das Hinzuschalten der Funktion Hub der Depothubs, die Gesamtkosten oft schlechter werden, obwohl mehr Servicerouten für die Auswahl zur Verfügung stehen. So ist z. B. der Zielfunktionswert der Instanz 49Depots_hub25_33_48 um mehr als 45.000 Euro, d. h. 10 %, höher als bei 49Depots_hub25_33.

Instanz	zGES [Euro]	#HR	Hub 25	Hub 33	Hub 48	#PR	#DR
49Depots_hub25_33	415.297	515	464	51	-	96	40
49Depots_hub25_33_48	460.912	645	588	52	5	119	45

Tabelle 6.23: Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten je Typ und je Hub für die Instanzen 49Depots_hub25_33 und 40Depots_hub25_33_48

In Tabelle 6.23 sind die Anzahl der Servicerouten je Typ und je Hub für diese beiden Instanzen aufgelistet. Es fällt auf, dass in der Lösung der 49Depots_hub25_33_48 mehr Direkt Routen und bedeutend mehr Hubrouten vorkommen. Vor allem treffen über 120 Servicerouten mehr am Hub 25 ein, wobei die Anzahl der Servicerouten über Hub 33 fast identisch ist. Über das zusätzliche Regionalhub 48 laufen allerdings nur fünf Routen. Diese fünf Servicerouten transportieren die Bedarfe von 10 Commodities mit einem Sendungsaufkommen von 447 TE (siehe Tabelle 20 im Anhang). Dadurch ist die Auslastung⁴⁷ der LKW auf jedem Service unter 10 %. Die Analyse des Ergebnisses der Testinstanz 49Depots_hub25_33 zeigt, dass diese 10 Commodities gebündelt mit anderen Sendungen über das Hub 25 transportiert werden. Die Ausgangs- und Bestimmungsorte dieser Commodities liegen vorwiegend im Einzugsgebiet des Regionalhubs 48 (vgl. dazu auch Abbildung 6.1), welcher als Umschlagpunkt genutzt wird. Allerdings ist die Auslastung dieses Regionalhubs mit fünf Servicerouten und 10 Commodities viel zu gering. Die Ergebnisse für andere Testinstanzen, z. B. 49Depots_hub25_33_7, 49Depots_hub25_33_13, 49Depots_hub25_33_20, 49Depots_hub25_33_37, geben ein ähnliches Bild wieder.

Es stellt sich die Frage, was sind die Gründe für diese schlechten Ergebnisse? In der Arbeit von Geyer (2007) wurde festgestellt, dass durch eine Erhöhung der Freiheitsgrade für das Teilproblem Bestimmung der Servicerouten kleinere Zielfunktionswerte generiert werden. Es verändert sich vor allem die Kombination an Servicerouten. Weiterhin fällt auf, dass durch das Hinzunehmen eines weiteren Hubs die Anzahl der Iterationen meistens

⁴⁷Für die Definition von Auslastung und die Analysen zu diesem Performance-Maß siehe Abschnitt 6.5.2.3.

ansteigen (siehe Tabelle 6.22), d. h. es werden je Iteration durchschnittlich von weniger Ausgangs- und Bestimmungsorten die kompletten Bedarfe gedeckt. Somit muss das durch die Servicerouten erzeugte Service-Netzwerk so verändert sein, dass durch die generierten Auftragsrouten auf diesem Netz im Schnitt weniger Commodities gestrichen werden können. Die Analyse der Service-Netzwerke je Iteration zeigt, dass es bei Testinstanzen mit mehr Hubs weniger Servicerouten aus diesen Regionen gibt, die mit dem Zentralhub 25 verbunden sind. Es sind jedoch mehr Servicerouten über die entsprechenden Regionalhubs vorhanden, wobei dadurch mehr Kapazität in der Region zur Verfügung steht. Dies geht auf Kosten der zur Verfügung gestellten Transportkapazität von diesen Regionen zu den restlichen Regionen in Deutschland. Somit können meistens für weniger Ausgangs- oder Bestimmungsorte die kompletten Bedarfe gedeckt werden. Die Bedarfe dieser Commodities werden gebündelt und zusammen zum Zentralhub transportiert. Nur falls noch weitere Kapazität benötigt wird, werden die regionalen Hubrouten zur Beförderung herangezogen. Dieser Umstand erklärt die schlechte Auslastung dieser regionalen Hubrouten.

In Abbildung 6.36 sind für zwei Testbeispiele alle Ausgangsorte, deren Bedarfe in der ersten Iteration gedeckt werden konnten, dargestellt. Dabei stellen die Depots mit blauen Kreisen die Ausgangsorte für die Testinstanz 49Depots_hub25_33 und die Depots mit roten Kreisen die Ausgangsorte für die Testinstanz 49Depots_hub25_33_48 dar.⁴⁸ Es fällt auf, dass in dem Testbeispiel mit dem zusätzlichen Regionalhub 48 die Commodities von nur sechs Ausgangsorten gestrichen werden können. Beim Testbeispiel mit nur den zwei Zentralhubs können für vier weitere Ausgangsorte die Bedarfe befriedigt werden.

Ferner ist aus Abbildung 6.37 ein Zusammenhang zwischen Anzahl der Iterationen und Zielfunktionswert erkennbar. Die Abbildung gibt für ausgesuchte Testinstanzen - geordnet nach Anzahl der möglichen Servicerouten - als Balken den Zielfunktionswert und als Linie die Anzahl der Iterationen wieder. Auf der linken y-Achse ist der Zielfunktionswert und auf der rechten y-Achse die Anzahl der Iterationen angetragen. Die Testbeispiele mit wenigen Iterationen besitzen in den meisten Fällen einen kleineren Zielfunktionswert. Dies muss allerdings nicht immer gelten, so hat beispielsweise 49Depots_hub25_33_13 mit 21 Iterationen geringere Kosten als 49Depots_hub25_33_7_48 mit 19 Iterationen. Die Untersuchung der Korrelation bestätigt das Ergebnis aus der Abbildung. Der Korrelationskoeffizient für

⁴⁸Bestimmungsorte, deren Bedarfe komplett gedeckt werden, kommen in dieser Iteration nicht vor.

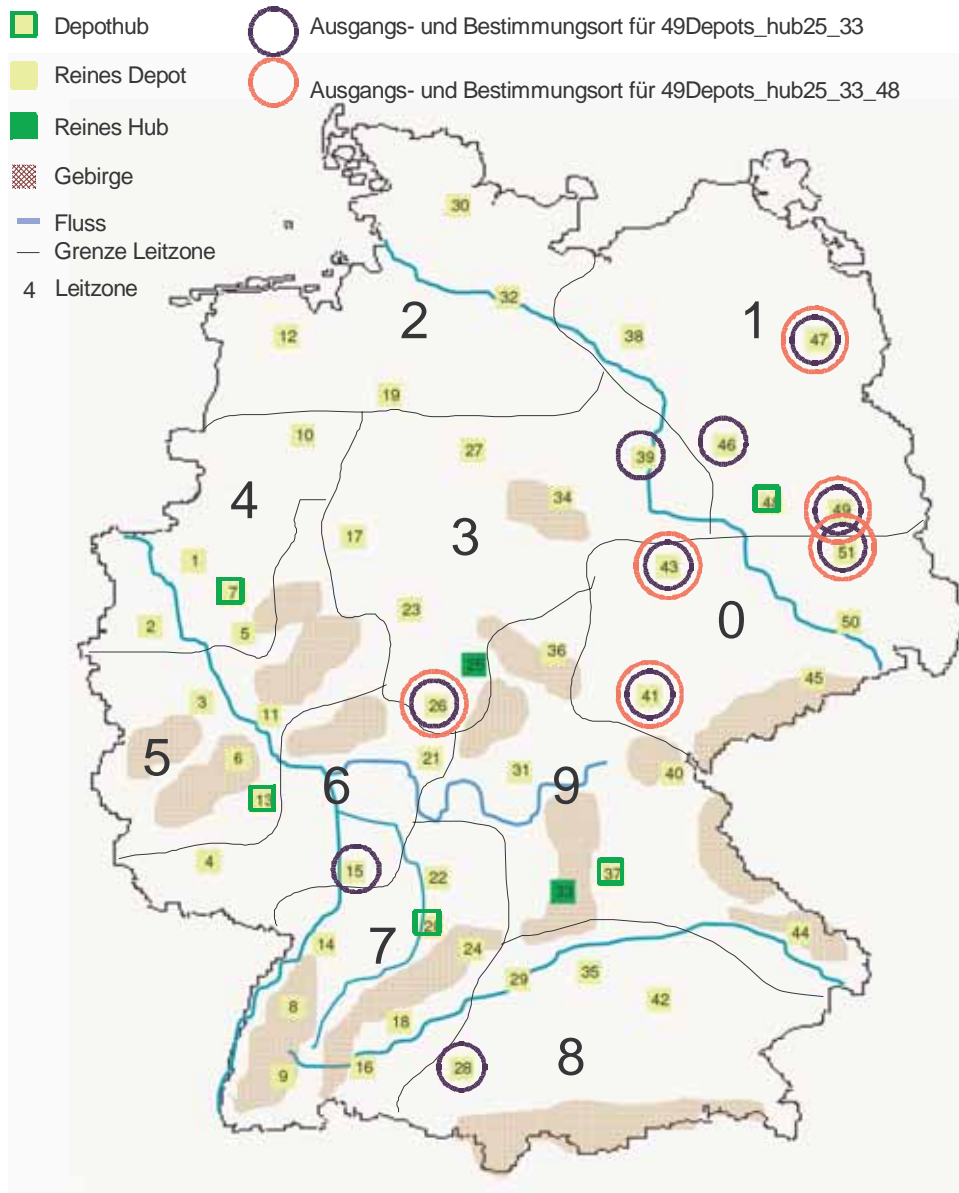


Abbildung 6.36: Für die Testinstanzen 49Depots_hub25_33_48 und 49Depots_hub25_33 die Ausgangsorte, deren Bedarfe in der ersten Iteration komplett gedeckt werden konnten.

die Beziehung zwischen Zielfunktionswert und Iteration liegt für diese Testbeispiele bei 0,83.

Obwohl die Kosten für die Servicerouten unterschiedlich sind, gilt in den meisten Fällen, dass je mehr Servicerouten in der Lösung vorkommen, desto höher ist der Zielfunktionswert. Nachdem der Zielfunktionswert von den Anzahl der Iterationen beeinflusst wird, findet man einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Iterationen und den Servicerouten. Zur Untermauerung dieser Feststellung haben wir die Anzahl der Servicerouten (grüne Balken) und die Anzahl der Iterationen (blaue Linie) für die gleichen obigen Testbeispiele in Abbildung 6.38 dargestellt. Die linke y-Achse gibt dabei die Anzahl der Servicerouten wieder; die rechte y-Achse stellt die Anzahl der Iterationen dar.

Aus der Darstellung ist deutlich der Trend zu erkennen, dass die Anzahl der Servicerouten mit der Anzahl der Iterationen korreliert (Korrelationskoeffizient von 0,85). Die Höhe

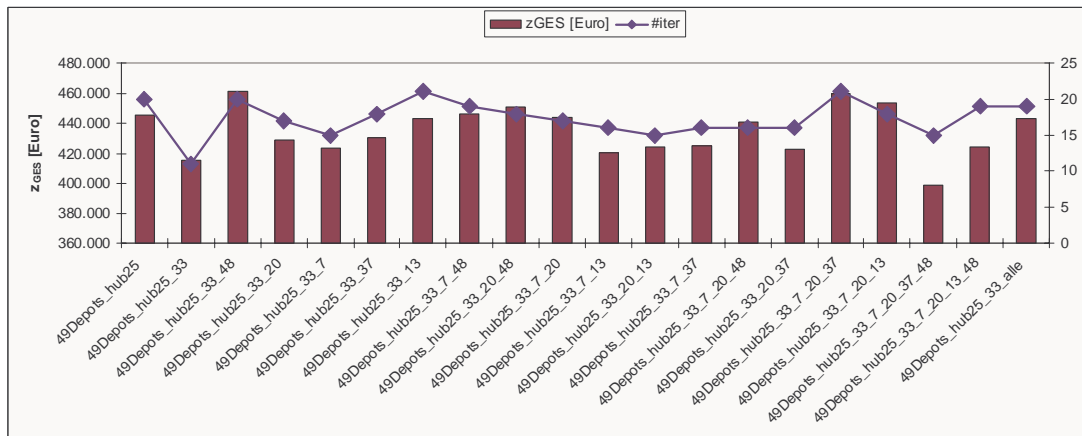


Abbildung 6.37: Zielfunktionswert und Anzahl Iterationen für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots

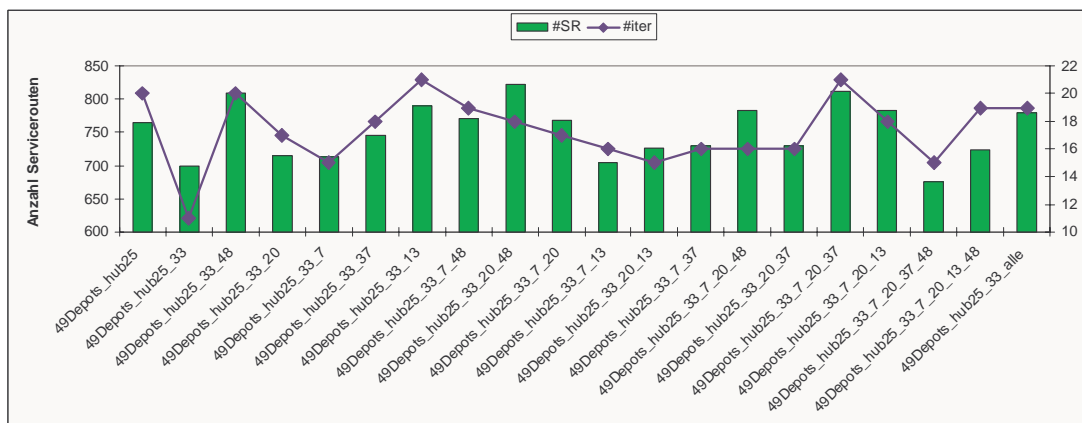


Abbildung 6.38: Anzahl Servicerouten und Iterationen für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots

der Balken für die Routen verläuft im Allgemeinen ähnlich wie die blauen Linien für die Iterationen, wobei auch hier Ausnahmen, z. B. bei Beispiel 49Depots_hub25_33_20_48, auftreten. Für die Erklärung dieses Phänomens sollte man sich das Vorgehen vor Augen halten. In jeder Iteration werden Servicerouten fixiert, über welche Aufträge geroutet werden. In den nächsten Iterationen werden dann für die noch vorhandenen Commodities neue Servicerouten bestimmt. Somit nimmt mit jeder Iteration die Anzahl der Servicerouten in der Gesamtlösung weiter zu.

6.5.2.2 Anzahl der Servicerouten und Anzahl der Stopps je Routentyp

In dem Planungsproblem in dieser Arbeit sind drei verschiedene Typen von Servicerouten - nämlich Pickup-Direktrouten, Delivery-Direktrouten und Hubrouten - mit unterschiedlicher Anzahl von Stopps zugelassen. Die Analyse der Sendungsdaten in Abschnitt 6.2.1.3 hat gezeigt, dass für Direkt Routen selten eine gute Auslastung der Kapazität erreicht werden kann. Weiterhin wird gefordert, dass von und zu jedem Depot ein Weg zum Zentralhub existiert und aufgrund der Größe der Sendungen eine Route eher viele Stopps aufweist. Wir erwarten daher, dass in einer qualitativ guten Lösung hauptsächlich Hubrouten mit vier bis fünf Stopps vorkommen.

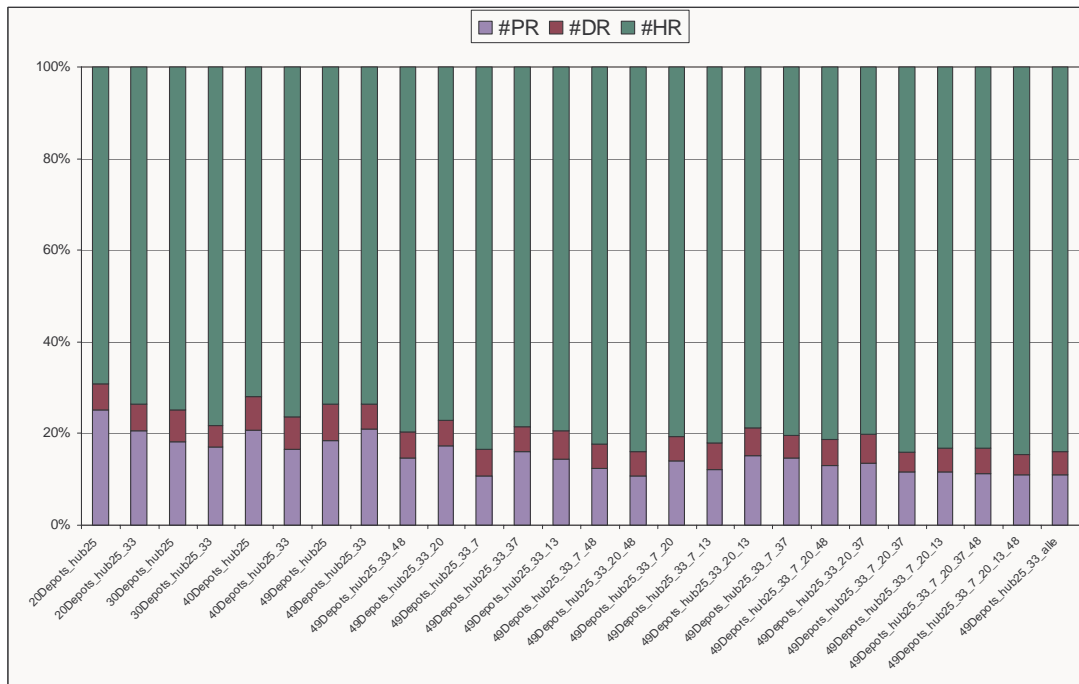


Abbildung 6.39: Anteil der verschiedenen Routentypen

In der graphischen Darstellung 6.39 sind die Anteile der verschiedenen Routentypen für die Testbeispiele dargestellt. Die Anzahl der Servicerouten je Typ kann in Tabelle 6.22 nachgelesen werden. Den größten Anteil stellen dabei die Hubrouten. Bei den großen Beispielen mit 49 Depots machen diese mehr als 80 % der Servicerouten aus. Dieser hohe Anteil an Hubrouten ist sehr positiv zu bewerten. Die Delivery-Direktrouten sind mit weniger als 7 % Anteil in der Lösung vorhanden. Das seltene Vorkommen von Delivery-Direktrouten im Vergleich zu Pickup-Direktrouten hängt mit dem Vorgehen in der Generierung der Servicerouten und dem Column-Generation-Verfahren zur Bestimmung von Servicerouten zusammen.⁴⁹

Für ein detaillierteres Bild untersuchen wir das Vorkommen der einzelnen Routentypen nach Stopps. Dazu haben wir die Anzahl der Servicerouten je Stopp und Typ im Anhang (siehe Tabelle 21) aufgelistet. Der Anteil der Stopps ist in Abbildung 6.40 für jeden Routentyp dargestellt.⁵⁰

⁴⁹Eine detailliertere Erläuterung findet sich in Abschnitt 6.3.3.

⁵⁰Falls bei einer Serviceroute einem Service keine Aufträge zugeteilt worden sind, wird dieser Service auch nicht ausgeführt. Daher kann es zu Hubrouten mit nur zwei Stopps kommen.



Abbildung 6.40: Anteil der verschiedenen Servicerouten je Stopp und Routentyp

Bei den Pickup-Direktrouten fällt sofort der hohe Anteil von Servicerouten mit nur zwei Stopps auf. Dieser liegt bei allen Testinstanzen bei über 80 % und ist bei einzelnen Testbeispielen, wie etwa 20Depots_hub25, sogar bei über 97 %. Bei den Delivery-Direktrouten schaut die Aufteilung etwas besser aus, jedoch überwiegt auch hier meistens die Anzahl der Servicerouten mit zwei Stopps. Auf diesen Direkttrouten mit nur zwei Stopps kann nur der Bedarf für ein Commodity transportiert werden. Nachdem die Sendungsgrößen in dem Testszenario sehr klein sind und selten einen Wechselbehälter ausfüllen, wird die Auslastung für diese Servicerouten schlecht ausfallen. Der Grund für die vielen Servicerouten mit nur zwei Stopps liegt in dem Vorgehen des Column-Generation-Verfahrens und in der heuristischen Vorgehensweise des Branch-Price-and-Cut-Verfahrens bei der Bestimmung von Servicerouten (siehe auch Abschnitt 6.3.3).

Die Analyse der Hubrouten zeigt, dass vor allem Servicerouten mit drei Stopps in den Testinstanzen vorkommen. Die Anzahl der Hubrouten mit fünf Stopps bildet die kleinste Menge, und über 60 % der Hubrouten weisen nur zwei oder drei Stopps auf. Dadurch ist die Anzahl der Commodities, welche den Services zugewiesen werden können, beschränkt. Dies führt wiederum zu einer schlechteren Auslastung. Das Problem hier ist allerdings nicht so gravierend wie bei den Direkttrouten, da von und zu den Hubs auch noch Bedarfe von anderen Commodities transportiert werden können.

Bis jetzt gehen wir davon aus, dass Servicerouten mit wenigen Stopps eine geringere Auslastung vorweisen können. Dies wollen wir im nächsten Abschnitt genauer untersuchen.

6.5.2.3 Auslastung der Servicerouten

Die Auslastung der Servicerouten⁵¹ ist das Performance-Maß, an dem die Qualität einer Lösung für das Verfahren am besten direkt abgelesen werden kann. Einen Vergleich der Zielfunktionswerte (Balken) mit der Auslastung der Servicerouten (Linie) für die jeweiligen Testinstanzen ist in Abbildung 6.41 dargestellt. Die linke y-Achse repräsentiert die Skalierung der Zielfunktionswerte in Euro. Die rechte y-Achse gibt die Auslastung der Servicerouten in Prozent wieder. Aus der graphischen Gegenüberstellung ist deutlich ein Zusammenhang zu sehen: ein geringer Zielfunktionswert besitzt meistens eine große Auslastung und vice versa. Der Korrelationskoeffizient $-0,73$ bestätigt den graphischen Zusammenhang. Jedoch muss eine schlechtere Auslastung nicht unbedingt höhere Kosten nach sich ziehen, wie beispielsweise der Fall 49Depots_hub25_33_20_13 zeigt.

In der Übersichtstabelle 6.22 ist die Auslastung über alle Servicerouten der jeweiligen Testinstanzen angegeben. Die Ergebnisse liegen in einem Intervall von $[33,51 \%, 44,55 \%,$ d. h. im Schnitt transportiert jeder LKW weniger als die Hälfte der möglichen Menge. Die Testbeispiele mit weniger Depots schließen in dieser Auswertung im Allgemeinen besser ab als diejenigen mit 49 Depots, bei denen nur vier Instanzen auf eine Auslastung mit mehr als 40 % kommen.

Diese Werte geben die Auslastung über alle Servicerouten wieder. Es stellt sich jetzt allerdings die Frage, ob es zwischen den einzelnen Routentypen und der dazugehörigen Anzahl an Stopps Unterschiede gibt, wie wir es schon im letzten Unterkapitel vermutet haben. Um dieses beantworten zu können, haben wir die Servicerouten nach Routentyp

⁵¹Die *Auslastung einer Serviceroute* entspricht dem Mittel der Auslastung auf allen Services der Serviceroute. Die Auslastung eines Service berechnet sich aus der zugewiesenen Auftragsmenge dividiert durch die gegebene Kapazität auf diesem Service.

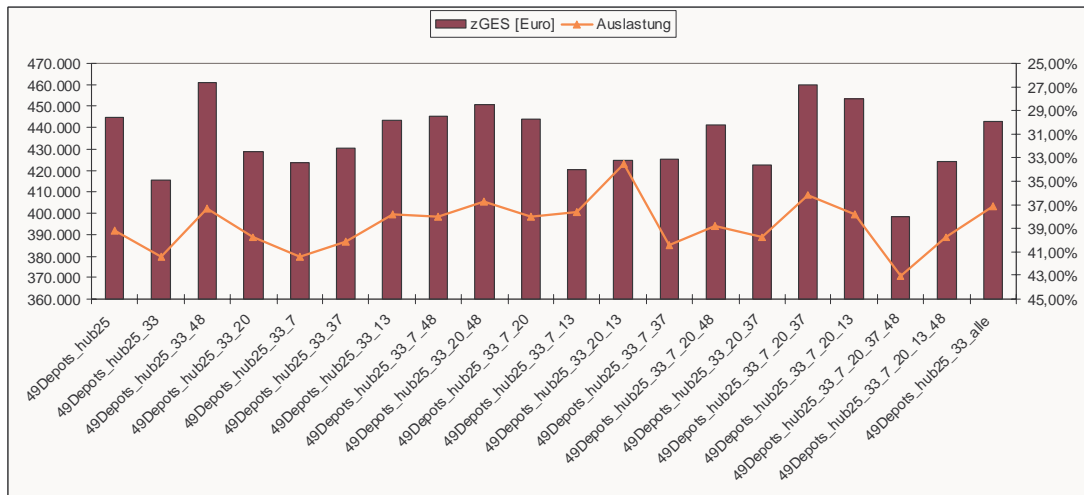


Abbildung 6.41: Zielfunktionswerte und Auslastung der Servicerouten für ausgesuchte Testbeispiele mit 49 Depots

und Anzahl Stopps klassifiziert. Für die jeweilige Klasse haben wir dann die Auslastung berechnet. Die Abbildung 6.42 gibt das Ergebnis wieder. Für eine bessere Übersicht haben wir für jeden Routentyp jeweils eine eigene Abbildung benutzt.

Die graphische Darstellung⁵² zeigt, dass wir mit unserer Vermutung Recht haben: bei den Direkt Routen erhalten wir insgesamt selten eine Auslastung von über 50 %. Einzig bei den Pickup-Direkt Routen mit drei Stopps schaffen die Servicerouten der meisten Instanzen eine Auslastung an die 50 % und sogar darüber. Jedoch sind wie erwartet vor allem die Werte für Servicerouten mit nur zwei Stopps schlecht. Der Mittelwert liegt für die Direkt Routen bei ca. 20 %, wobei bei den Pickup-Direkt Routen Auslastungen von 15,6 % bis 28,4 % vorkommen. Die Delivery-Direkt Routen weisen eine größere Streuung auf, nämlich zwischen 11,3 % und 33,6 %. In Anbetracht der gegebenen Inputdaten und hier vor allem der geringen Sendungsgrößen geht die Auslastung für Direkt Routen mit zwei Stopps an ihre maximal möglichen Werte.

Bei den Hub Routen ist die Auslastung um einiges besser als bei den Direkt Routen. So haben die Routen mit vier und fünf Stopps, abgesehen von zwei Ausnahmen, eine LKW-Auslastung von über 50 %. Der Spitzenwert hier liegt bei 64,3 %. Auch die Hub Routen

⁵²Die Auslastungen zu den einzelnen Klassen sind im Anhang in Tabelle 22 aufgeführt.

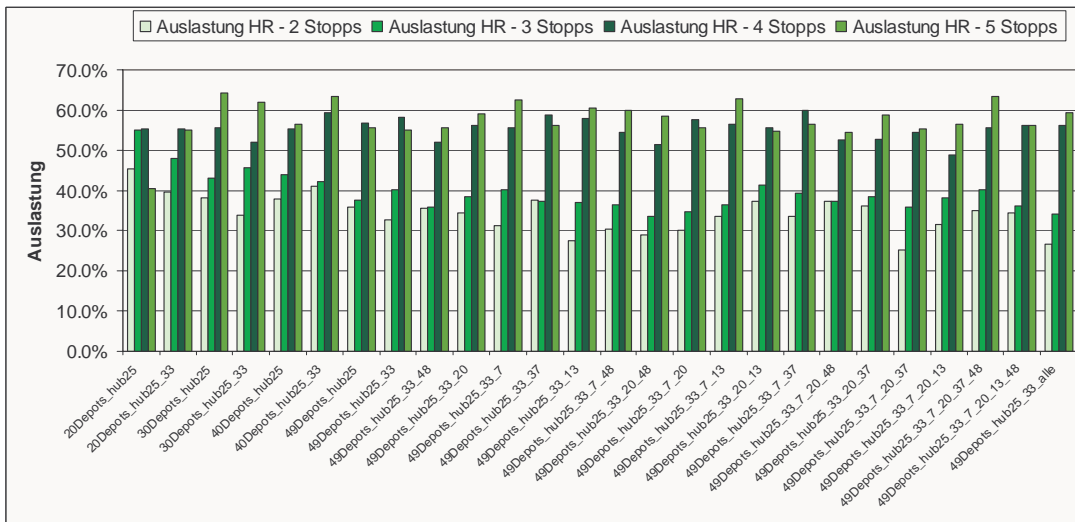
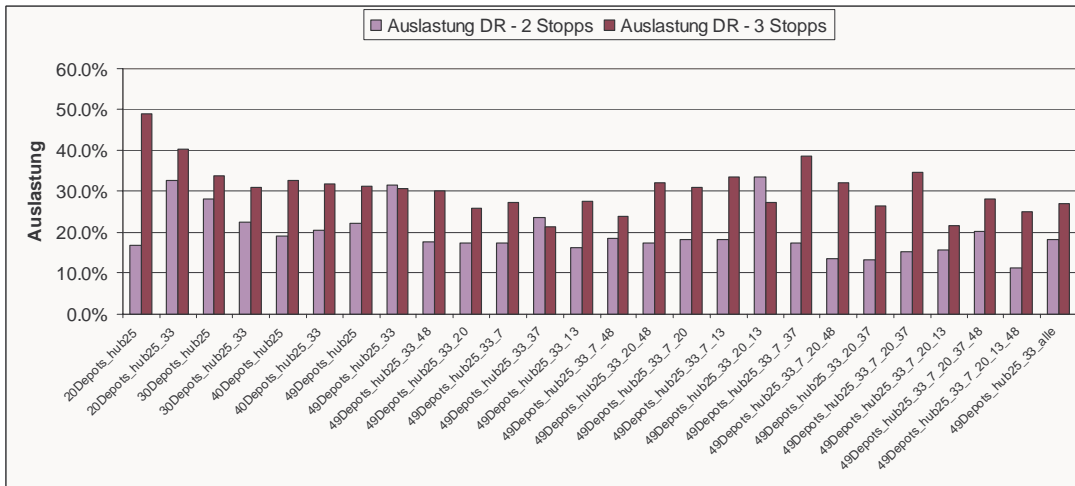
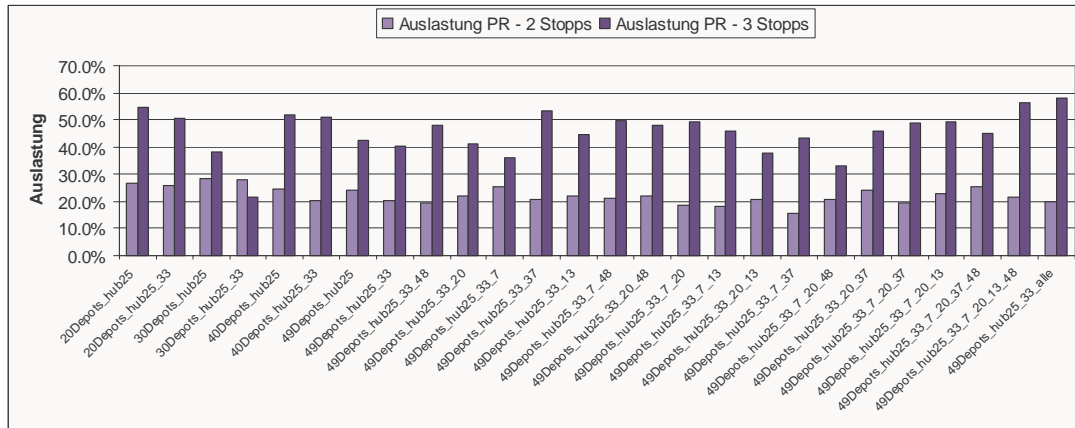


Abbildung 6.42: Auslastung der verschiedenen Routen je Stopp und Routentyp

mit nur zwei Stopps zeigen mit einem Mittelwert von 34,3 % deutlich höhere Werte auf als die Direkttrouten. Jedoch schneidet diese Klasse sowie diejenigen Hubrouten mit drei Stopps (Mittelwert 39,5 %) im Vergleich zu den Hubrouten mit vier oder fünf Stopps deutlich schlechter ab.

Diese Ergebnisse werden durch die Dekomposition in zwei Modelle verursacht. In dem ersten Modell werden die Gesamtkosten für die Servicerouten minimiert und somit indirekt versucht, die Auslastung hoch zu halten. Im zweiten Modell stehen für die Auftragsrouten neben den Hubrouten hauptsächlich Direkttrouten mit zwei Stopps zur Verfügung. Die Generierung der Auftragsrouten wird als MCNF-Problem modelliert. In diesem Modell wird aber die Auslastung der Servicerouten nicht berücksichtigt. Auf den Pfeilen wird nur die Kapazitätsgrenze der LKW angetragen. Deshalb kann eine Serviceroute eine Auslastung zwischen 0 und 100 % erhalten. In der Graphik 6.43 werden exemplarisch die Auslastungen (y-Achse) der einzelnen Servicerouten (x-Achse) einer Testinstanz dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Auslastung der einzelnen Routen sehr unterschiedlich ausfällt. Der Median teilt die Auslastungen der Servicerouten bei 32 %; ab 70 % Auslastung sind allerdings deutlich weniger Servicerouten zu finden.

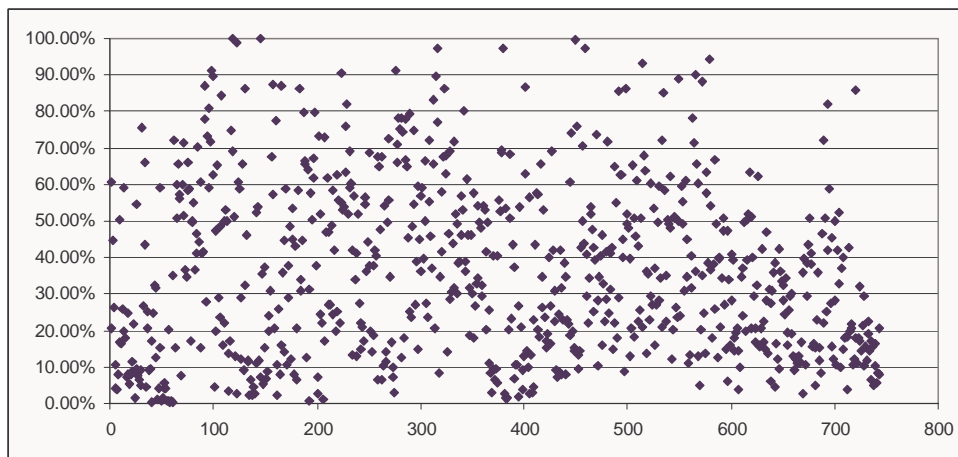


Abbildung 6.43: Verteilung der Auslastung der einzelnen Servicerouten des Beispiels 49Depots_hub25_33_48

6.5.2.4 Rundläufe, 2-Tages-Umläufe und One-Way Fahrten

Die Anzahl oder der Anteil der Fahrzeugumläufe⁵³ an allen Servicerouten ist ein sehr wichtiger Indikator für die Qualität einer Lösung. One-Way-Fahrten führen zu zusätzlichen Kosten, die noch nicht in den Gesamtkosten berücksichtigt sind. Grundsätzlich werden im Modell zur Bestimmung von Servicerouten immer nur Fahrzeugumläufe festgelegt. Jedoch wird diese Restriktion bei der Fixierung der Servicerouten nicht berücksichtigt. Es werden nur die Servicerouten fixiert, auf welchen die Bedarfe der Commodities von Orten mit y_o oder $z_d = 1$ transportiert werden. Hierbei wird nicht darauf geachtet, ob es sich dabei um Umläufe handelt. Eine Fixierung von Umläufen ist mit der gegebenen Formulierung des

⁵³Ein Fahrzeugumlauf kann auf zwei verschiedene Arten gebildet werden: Zum einen aus jeweils zwei Servicerouten, wobei die eine Route als ersten Stopp den gleichen Ort vorweist, wie die andere Route als letzten Stopp (2-Tages-Umlauf); zum anderen aus einer Route, wobei der Ort des ersten Stopps identisch ist mit dem des letzten Stopps (Rundlauf).

Modells zur Generierung von Auftragsrouten nicht auf triviale Weise umsetzbar.

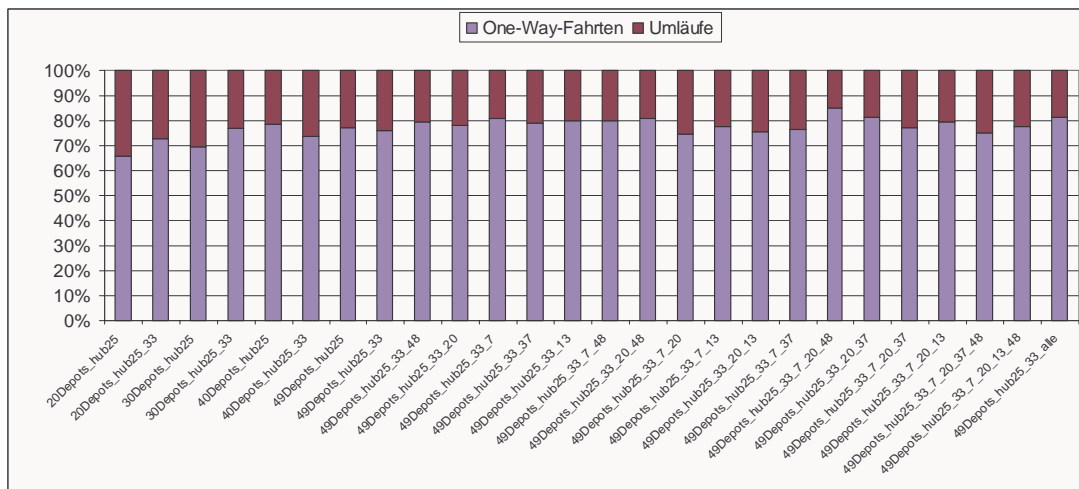


Abbildung 6.44: Anteil an Fahrzeugumläufen und One-Way-Fahrten

Die Abbildung 6.44 gibt die Aufteilung zwischen Fahrzeugumläufen (lila) und One-Way-Fahrten (blau) wieder. Ein Blick auf die Graphik genügt um zu sehen, dass bei allen Testinstanzen One-Way-Fahrten weitaus häufiger vorkommen als Fahrzeugumläufe. In der Überblickstabelle 6.22 können die Daten dazu nachgelesen werden. Dieser große Unterschied liegt, wie schon beschrieben, an der Fixierung der Servicerouten. Ein weiterer Grund liegt in der MCNF-Formulierung der Generierung von Auftragsrouten. In diesem Modell ist keine Bedingung vorhanden, die darauf achtet, dass bei der Festlegung von Flüssen nur Fahrzeugumläufe benutzt werden.

Jedoch muss festgehalten werden, dass noch keine Begegnungsverkehre und kleinere Umwege mit Leerfahrten für die Umlaufbildung berücksichtigt wurden. Dadurch kann das Ergebnis noch bedeutend verbessert werden.

6.5.2.5 Auftragsrouten und Umschläge

Für die Analyse der Auftragsrouten und der Umschläge haben wir die dazugehörigen Performance-Maße aus der Übersichtstabelle 6.22 in ein Verhältnis zu der Anzahl der Commodities gesetzt. Dadurch erhalten wir die durchschnittlichen Werte je Commodity. Viele Auftragsrouten und somit ein hoher durchschnittlicher Wert führen zu einem hohen organisatorischen Aufwand bei den operativen Prozessen Beladen, Entladen und Umschlag. Die Anzahl der Be- und Entladungen sind bekannt. Auf einer Auftragsroute kann es allerdings noch zu Umschlägen kommen. Diese messen wir anhand der Anzahl der Umschläge und dem dazugehörigen durchschnittlichen Wert.

Aus der Tabelle ist abzulesen, dass jede Commodity im Durchschnitt eine oder zwei Auftragsrouten sowie zwischen ein und zwei Umschläge aufzuweisen hat. Anhand des Testbeispiels 49Depots_hub25_33_7_20_37_48 wollen wir uns exemplarisch die Streuung näher betrachten. Diese Instanz kann gut als Repräsentant betrachtet werden, da ihre Werte im Vergleich zu anderen Beispielen am oberen Ende der Skala liegen. In der Lösung dieser Instanz kommen bis zu vier Auftragsrouten und bis zu sechs Umschläge je Commodity vor. Die Häufigkeit der einzelnen Klassen ist in Tabelle 6.25 aufgelistet.

Instanz	Ø Anzahl AR je Commodity	Ø Umschläge je Commodity
20Depots_hub25	1.005	0.882
20Depots_hub25_33	1.029	0.932
30Depots_hub25	1.166	1.149
30Depots_hub25_33	1.116	1.146
40Depots_hub25	1.222	1.428
40Depots_hub25_33	1.335	1.583
49Depots_hub25	1.321	1.631
49Depots_hub25_33	1.315	1.578
49Depots_hub25_33_48	1.335	1.681
49Depots_hub25_33_20	1.222	1.469
49Depots_hub25_33_7	1.292	1.739
49Depots_hub25_33_37	1.283	1.627
49Depots_hub25_33_13	1.333	1.672
49Depots_hub25_33_7_48	1.253	1.521
49Depots_hub25_33_20_48	1.340	1.733
49Depots_hub25_33_7_20	1.313	1.622
49Depots_hub25_33_7_13	1.319	1.656
49Depots_hub25_33_20_13	1.311	1.522
49Depots_hub25_33_7_37	1.281	1.668
49Depots_hub25_33_7_20_48	1.275	1.616
49Depots_hub25_33_20_37	1.283	1.614
49Depots_hub25_33_7_20_37	1.271	1.656
49Depots_hub25_33_7_20_13	1.224	1.522
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	1.288	1.649
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	1.319	1.719
49Depots_hub25_33_alle	1.233	1.580

Tabelle 6.24: Durchschnittliche Anzahl an Auftragsrouten je Commodity und Anzahl an Umschlägen je Commodity

Über 99 % der Commodities werden nur über eine oder zwei Auftragsrouten transportiert. Die Klasse der drei oder vier Auftragsrouten ist, bzgl. der Kosten und somit der Qualität der Lösung, zu vernachlässigen. Die meisten Commodities (95 %) werden dreimal oder weniger auf ihrem Weg umgeschlagen. Nachdem die meisten Servicerouten über ein Hub führen und es durchschnittlich mehr als eine Auftragsroute pro Commodity gibt, sind die Ergebnisse als gut einzustufen. Die durch die Umschläge anfallenden zusätzlichen variablen Kosten halten sich damit sehr gut im Rahmen.

# AR	Häufigkeit	# Umschläge	Häufigkeit
1	1.703	0	123
2	629	1	1.168
3	16	2	611
4	5	3	333
		4	105
		5	9
		6	4

Tabelle 6.25: Häufigkeit der Anzahl Auftragsrouten und Umschläge für das Testbeispiel 49Depots_hub25_33_7_20_37_48

6.5.2.6 Zusammenfassung und Bewertung

Wir können also festhalten: das Verfahren gewährleistet nicht, dass bei einer Vergrößerung der Menge der Kombinationsmöglichkeiten der Zielfunktionswert sich nicht verschlechtert. Bei einigen Testbeispielen ist im Vergleich zu ähnlichen Instanzen eine sehr große Anzahl an Iterationen festzustellen. Dadurch erhalten wir einen höheren Zielfunktionswert. Wir können daher nur bei einigen Testinstanzen von einer guten Lösungsqualität ausgehen. Weiterhin konnten wir einen Zusammenhang zwischen Zielfunktionswert, Auslastung, Anzahl der Iterationen und Anzahl der Servicerouten nachweisen.

Der hohe Anteil der Hubrouten in der Lösung ist sehr positiv. Dadurch sind Lösungen mit hoher Qualität möglich. Jedoch ist die Auslastung der Hubrouten noch stark verbesserungsfähig. Bei den Direkt Routen findet das Verfahren meistens Routen mit nur zwei Stopps, deren Auslastung bei den Inputdaten nicht akzeptabel ist. Dadurch entstehen Kosten, die eventuell hätten vermieden werden können. Vor allem Servicerouten mit sehr geringer Auslastung sollten bei einer Verbesserung des Verfahrens verhindert werden. Dies könnte man z. B. dadurch regeln, dass man Servicerouten mit nur zwei Stopps nicht zulässt oder dass man beim Modell zur Generierung von Auftragsrouten die unteren Kapazitätsschranken auf den Pfeilen hoch setzt. Dadurch können Lösungen mit besserer Qualität entstehen.

Ebenso zeigt die Analyse der Fahrzeugumläufe keine positiven Ergebnisse. Deren Anteil im Ergebnis ist viel zu gering. Dadurch fallen hohe Leerfahrtkosten an. Allerdings können diese noch um einiges verringert werden, indem Begegnungsverkehre und kleinere Umwege in die Umlaufbildung integriert werden. Jedoch können auch im Verfahren noch Verbesserungen, wie beispielsweise bei der Fixierung, durchgeführt werden.

Die Untersuchung der Auftragsrouten und Umschläge hat gezeigt, dass die Modellierung der Generierung der Auftragsrouten über ein MCNF-Problem erfolgreich war. Die Commodities werden, wenn überhaupt, meistens nur in zwei Auftragsrouten geteilt, und je Auftragsroute fällt meistens nur ein Umschlag an. Durch die vielen Hubrouten in der Lösung ist somit ein Umschlag je Auftragsroute mehr als akzeptabel.

6.6 Sensitivitätstests

Im Folgenden werden im Rahmen von Sensitivitätstests drei verschiedene exemplarische Anwendungen des Verfahrens vorgestellt. Erstens wird in Abschnitt 6.6.1 die Netzstruktur durch eine mögliche Einbindung mehrerer Hubs optimiert. Im Abschnitt (6.6.2) werden zweitens die Auswirkungen der Veränderungen der Bedarfe im Laufe der Woche untersucht. Drittens analysieren wir die Auswirkungen von Bedarfsrückgängen und -zuwachsen auf die Struktur des Service-Netzwerkes (siehe Abschnitt 6.6.3).

6.6.1 Untersuchung der Netzstruktur: Einbindung von mehreren Hubs

Zur Optimierung der Netzstruktur im Rahmen einer Simulation stehen die 44 Depots, die zwei Hubs und die fünf Depothubs zur Verfügung. Als Ausgangsbasis dient die Testinstanz 49Depots_hub25_33, wobei Hub 25 als Zentralhub fungiert. Uns interessiert vor allem,

welche weiteren Hubs (aus der Menge der Depothubs) als Regionalhubs zusätzlich geöffnet werden sollten.

Durch die Aufnahme von weiteren Hubs in der Rolle Regionalhub sollen die Fixkosten für Linienverkehre verringert werden. Gleichzeitig fallen zusätzliche Kosten für die Unterhaltung der weiteren Hubs an. Diese Kosten können im Rahmen der Modelle nicht abgebildet werden. Jedoch können wir mithilfe des Verfahrens die Kosten für die Linienverkehre ermitteln. Als Performance-Maße werden der Zielfunktionswert und der Anteil der Servicerouten je Hub festgelegt.

Für die Simulation haben wir ausgehend von der Ausgangsbasis Schritt für Schritt die Anzahl der Standorte mit Hubfunktionalität um eins erhöht. Dazu haben wir zuerst für drei Hubs jeweils alle Möglichkeiten getestet. Für Tests mit vier oder mehr Hubs wurden nur Instanzen mit Hub 7 und 20 benutzt. In Abbildung 6.45 sind die Zielfunktionswerte der einzelnen Testinstanzen dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, und die Untersuchung zur Qualität der Lösung (siehe Abschnitt 6.5.2.1) zeigt, werden durch eine Erhöhung der Freiheitsgrade meistens keine Lösungen mit niedrigeren Kosten generiert.

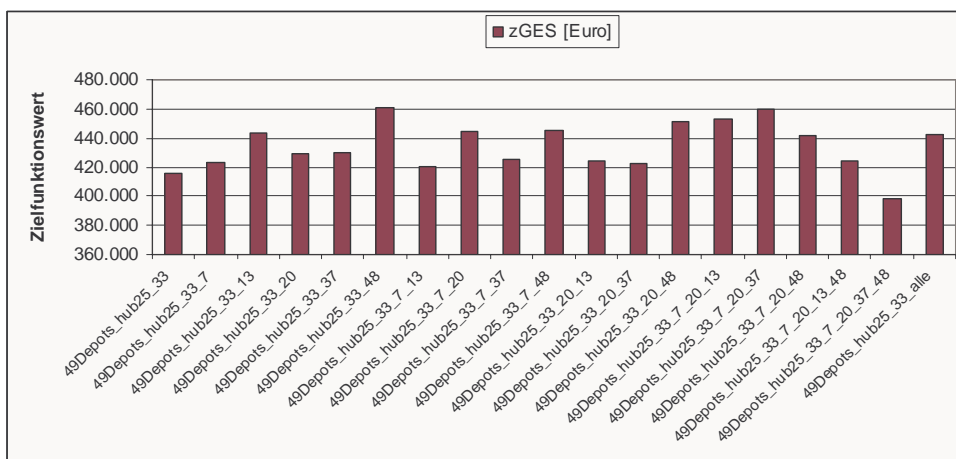


Abbildung 6.45: Zielfunktionswerte der Testinstanzen bei der Variation der möglichen Hubs

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die niedrigsten Servicekosten beim Betrieb der Hubs 25, 33, 7, 13, 20 und 48 anfallen, gefolgt von der Kombination mit den zwei Zentralhubs. Dieses gegensätzliche Ergebnis zeigt, dass in diesem Fall eine Aussage basierend auf dem Zielfunktionswert sehr schwierig ist. Im Folgenden werden die Testinstanzen mit ihrem Anteil an Hubrouten analysiert.

Alle durchgeführten Testinstanzen mit den Ergebnissen sind in Tabelle 6.26 aufgelistet. Je Instanz sind jeweils der Anteil der Servicerouten in Prozent für jeden einzelnen Hub bzw. Depothub und die Zielfunktionswerte aufgeführt.⁵⁴

Aus der Tabelle 6.26 und der Abbildung 6.46 ist zu entnehmen, dass Hub 25 mit über 80 % Anteil an Hubrouten bei allen Testinstanzen die meisten Umschlagsaktivitäten vorweist. Der Grund für diese hohe Zahl ist in seiner speziellen zusätzlichen Rolle als internationales Hub zu sehen. In der Ausgangstestinstanz werden sogar 90.10 % aller Hubumschläge an

⁵⁴Die Anzahl der Servicerouten je Hub und der dazugehörige Zielfunktionswert kann in Tabelle 23 im Anhang nachgelesen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit in der Analyse wurde für die Darstellung der Anteil der Servicerouten gewählt.

Instanz	Hub 25	Hub 33	Hub 7	Hub 13	Hub 20	Hub 37	Hub 48
49Depots_hub25_33	90,10 %	9,90 %	-	-	-	-	-
49Depots_hub25_33_7	83,70 %	9,41 %	6,89 %	-	-	-	-
49Depots_hub25_33_13	89,00 %	4,15 %	-	6,86 %	-	-	-
49Depots_hub25_33_20	91,47 %	4,54 %	-	-	3,99 %	-	-
49Depots_hub25_33_37	91,64 %	7,68 %	-	-	-	0,68 %	-
49Depots_hub25_33_48	91,16 %	8,06 %	-	-	-	-	0,78 %
49Depots_hub25_33_7_13	82,01 %	6,57 %	7,44 %	3,98 %	-	-	-
49Depots_hub25_33_7_20	85,14 %	3,39 %	8,24 %	-	3,23 %	-	-
49Depots_hub25_33_7_37	84,16 %	5,79 %	8,52 %	-	-	1,53 %	0,00 %
49Depots_hub25_33_7_48	90,87 %	4,88 %	3,31 %	-	-	-	0,94 %
49Depots_hub25_33_20_13	89,69 %	3,85 %	-	4,90 %	1,57 %	-	-
49Depots_hub25_33_20_37	88,55 %	5,81 %	-	-	4,96 %	0,68 %	-
49Depots_hub25_33_20_48	83,19 %	7,39 %	-	-	9,28 %	-	0,14 %
49Depots_hub25_33_7_20_13	82,03 %	3,99 %	7,68 %	3,53 %	2,76 %	-	-
49Depots_hub25_33_7_20_37	82,87 %	5,27 %	7,47 %	-	3,22 %	1,17 %	-
49Depots_hub25_33_7_20_48	83,33 %	5,97 %	8,33 %	-	2,04 %	-	0,31 %
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	83,36 %	3,59 %	8,48 %	1,79 %	2,61 %	-	0,16 %
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	80,43 %	2,67 %	11,03 %	-	4,27 %	1,25 %	0,36 %
49Depots_hub25_33_alle	83,18 %	2,29 %	8,41 %	1,68 %	3,36 %	1,07 %	0,00 %

Tabelle 6.26: Anteil der Hubrouten, aufgeteilt nach Hub für ausgesuchte Testinstanzen mit 49 Depots

Hub 25 und nur 9.90 % über Hub 33 realisiert. Durch die Hinzunahme eines weiteren Hubs findet eine Verschiebung der Anteile statt. Hub 25 verliert vor allem bei der Aufnahme von Standort 7. Die Hinzunahme von Standort 13 oder 20 geht vor allem auf die Kosten von Hub 33. Die prozentualen Verluste halten sich jedoch mit unter 10 % klar in Grenzen. Die zusätzlichen Orte 37 und 48 bringen für die anderen Hubs kaum eine Entlastung und sorgen sogar dafür, dass über Hub 25 prozentual mehr Servicerouten verlaufen als im Ausgangsbeispiel.

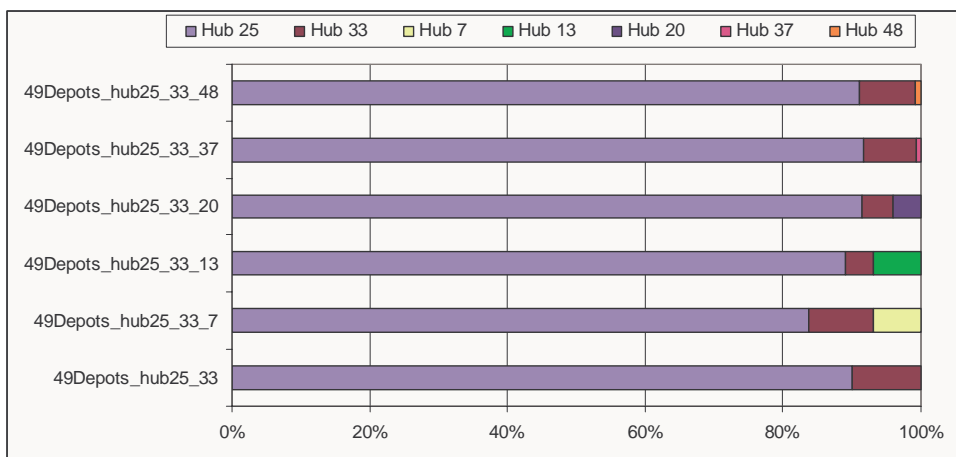


Abbildung 6.46: Anteil der Servicerouten je Hub bei drei Hubalternativen

Auch weitere Tests mit einer größeren Anzahl an Hubs zeigen, dass die Standorte 37 und 48 mit weniger als 2 % Anteil vernachlässigbar sind. Die Entfernung zwischen Depothub 37 und Hub 33 ist sehr gering. Einzig durch die fränkische Schweiz wird der Transport zwischen den zwei Regionen erschwert. Ein Blick auf die Abbildung 6.1 über die Lage der Standorte verdeutlicht dies klar. Die Unterhaltung der Hubfunktion an diesem Standort dürfte sich mit den momentanen Transportmengen daher kaum rechnen. Depothub 48 liegt

im Osten der Republik und könnte als Regionalhub eingesetzt werden. Das Sendungsaufkommen ist jedoch, wie die Analyse der Sendungsdaten (siehe Abschnitt 6.2.1.3) gezeigt hat, vor allem innerhalb der Leitzonen 0 und 1 sehr gering. Dadurch enthält die Lösung sehr wenige Servicerouten über diesen Hub. Es ist daher sinnvoller, diesen Standort nicht als Hub einzusetzen.

Der Standort 7 schneidet bei der Aufnahme eines weiteren Hubs zur Ausgangsinstanz mit einem Anteil von 6,89 % am besten von allen Depothubs ab. Dieser Wert für Depothub 7 steigert, sich mit einer einzigen Ausnahme, sogar bei der Vergrößerung der Anzahl der Hubs. Im Schnitt werden ca. 8 % aller Hubrouten über diesen Standort abgewickelt. Der Anteil der Servicerouten über Regionalhub 7 ist meistens größer als der Anteil über Hub 33. Zum einen befindet sich dieser Ort im größten Ballungsgebiet Deutschlands. Dies wird auch in den Sendungsdaten mit einem starken Versands- und Empfangsaufkommen untermauert. Zum anderen herrschen überdurchschnittlich hohe Transportaufkommen zwischen den angrenzenden Gebieten vor. Regionale Umschlagsmöglichkeiten spielen dadurch eine größere Rolle. Somit sollte bei einer Vergrößerung der Anzahl der Hubs die Wahl auf Standort 7 fallen.

Der Anteil der Hubrouten über Standort 20 und 13 fällt bei fast allen Testbeispielen sehr moderat aus. Der Mittelwert liegt bei beiden Depothubs bei 3,8 %, wobei Schwankungen zwischen 1,5 % und 9,3 % auftreten. Beide Standorte sollen regionale Transportkonzentrationen von Ballungsgebieten abfangen. Mit den momentanen Sendungsaufkommen dürften sich jedoch die zusätzlichen Kosten nicht unbedingt rechnen. Eine endgültige Aussage kann hier allerdings nicht getroffen werden, da uns die Angaben für die zusätzlichen Fixkosten für den Unterhalt eines Hubs fehlen. Bei einem Anstieg des Transportaufkommens könnte die Bewertung dieser Standorte sich allerdings zu Gunsten des Einsatzes der Funktion Hub verlagern.

Diese kurze Analyse zeigt, dass mithilfe des Verfahren zur Linienplanung die Netzstruktur optimiert werden kann. Bei einer Optimierung sollten jedoch die einzelnen Kostenbestandteile gegenüber gestellt werden, damit eine endgültige Aussage getroffen werden kann.

6.6.2 Variation des täglichen Bedarfs anhand der Wochentage

Das Sendungsaufkommen des vorliegenden Datensatzes wächst von einem zum anderen Tag um jeweils ca. 3 %. Das Anwachsen des Bedarfes im Laufe der Woche kann zu einem Anwachsen der benötigten Servicerouten oder zu anderen Servicerouten in der optimalen Lösung führen. Eines der Ziele bei der Linienverkehrsplanung ist es jedoch, mithilfe eines Verfahrens einen Fahrplan für einen Tag zu generieren, der an jedem Wochentag ausgeführt werden soll. Dieser Fahrplan soll dabei alle Bedarfe decken können und möglichst geringe Kosten aufweisen. Dies wollen wir überprüfen, indem wir das Verfahren für jeden Wochentag auf die Testinstanz 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33 anwenden.

Die Zielfunktionswerte sind in Abbildung 6.47 dargestellt. Die Linie repräsentiert die Anzahl der Sendungen und die Säulen die Zielfunktionswerte der beiden Testinstanzen.

Wie aus der Abbildung erkennbar ist, schwanken die einzelnen Zielfunktionswerte sehr. Bei 49Depots_hub25_33 ist eine Differenz von fast 60.000 Euro oder 14 % vom kleinsten zum größten Wert vorhanden. Für die Testinstanz 49Depots_hub25 zeigt sich ein ähnliches Bild; die Streuung fällt nur nicht ganz so groß aus. Durch den Anstieg der Anzahl der Sendungen von insgesamt 14 % kommt es auch beim Zielfunktionswert zu einer Erhöhung. Diese fällt

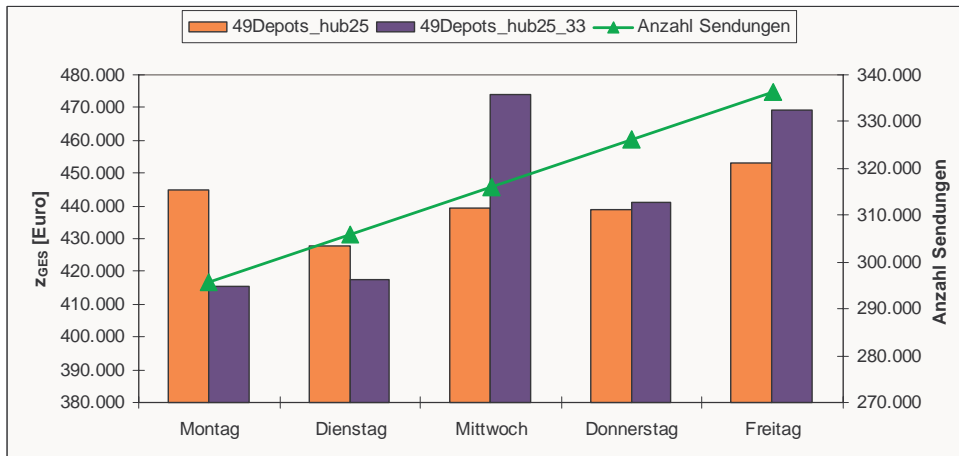


Abbildung 6.47: Zielfunktionswert und Anzahl der Sendungen je Wochentag für die Testinstanzen 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33

allerdings nicht so gleichmäßig wie bei der Sendungsgröße aus. Dieses Ergebnis könnte sich dadurch erklären lassen, dass zuerst noch freie Kapazitäten für die zusätzlichen Sendungen genutzt werden. Erst danach werden neue Servicerouten in die Lösung aufgenommen. Das Verfahren hat sicherlich jedoch auch seinen Anteil daran. Dies wird vor allem an den Ausreißern nach oben - 49Depots_hub25 am Montag oder 49Depots_hub25_33 am Mittwoch - sichtbar.

In Abbildung 6.48 sind die Anzahl der Servicerouten je Typ und Wochentag einmal für die Instanz 49Depots_hub25 und einmal für 49Depots_hub25_33 dargestellt. Die Ergebnisanalyse zeigt auch hier, dass die Anzahl der Servicerouten je Routentyp sowie die gesamte Anzahl der Servicerouten je Tag schwanken. Die Balken für die Anzahl der Servicerouten⁵⁵ beschreiben dabei den gleichen Kurvenverlauf wie die Säulen vom Zielfunktionswert. Dies ist auch nachvollziehbar, da Zielfunktionswert und Anzahl der Servicerouten zusammenhängen.

Die Aufteilung und Anzahl der Servicerouten je Routentyp zeigt keinen Zusammenhang mit dem Anwachsen des Sendungsaufkommens. So sind beispielsweise bei der Testinstanz 49Depots_hub25_33 am Montag 515, am Mittwoch 666 und am Freitag 612 Hubrouten vorhanden. Die Pickup-Direktrouten von 49Depots_hub25 weisen in ihren Ergebnissen eine Differenz von 60 aus; dies entspricht einen Anstieg von 30 %. Einzig die Anzahl und der Anteil der Delivery-Direktrouten ist einigermaßen konstant, wobei auch hier beim Beispiel mit einem Hub am Freitag ein Ausreißer in der Abbildung erkennbar ist.

6.6.3 Bedarfsvariation

Für die Analyse in Abschnitt 6.6.2 wurden die realen Bedarfsdaten für die einzelnen Wochentage benutzt. Für das gesamte Sendungsaufkommen lag ein stetiges Wachstum von 3 % vor, jedoch war dies nicht für jede Commodity so gegeben. Im Folgendem wollen wir die Bedarfe der Commodities einheitlich um exakt den gleichen Wert verändern. Das Sendungsaufkommen wird dafür in je 5 % Schritten erhöht und verringert. Getestet werden die Instanzen 49Depots_hub25, 49Depots_hub25_33 und 49Depots_hub25_33_alle.

⁵⁵Die Daten für die Diagramme befinden sich im Anhang in Tabelle 24. Zusätzlich sind dort noch weitere Ergebnisse zu der Anzahl der Umläufe und Auslastungen angegeben.

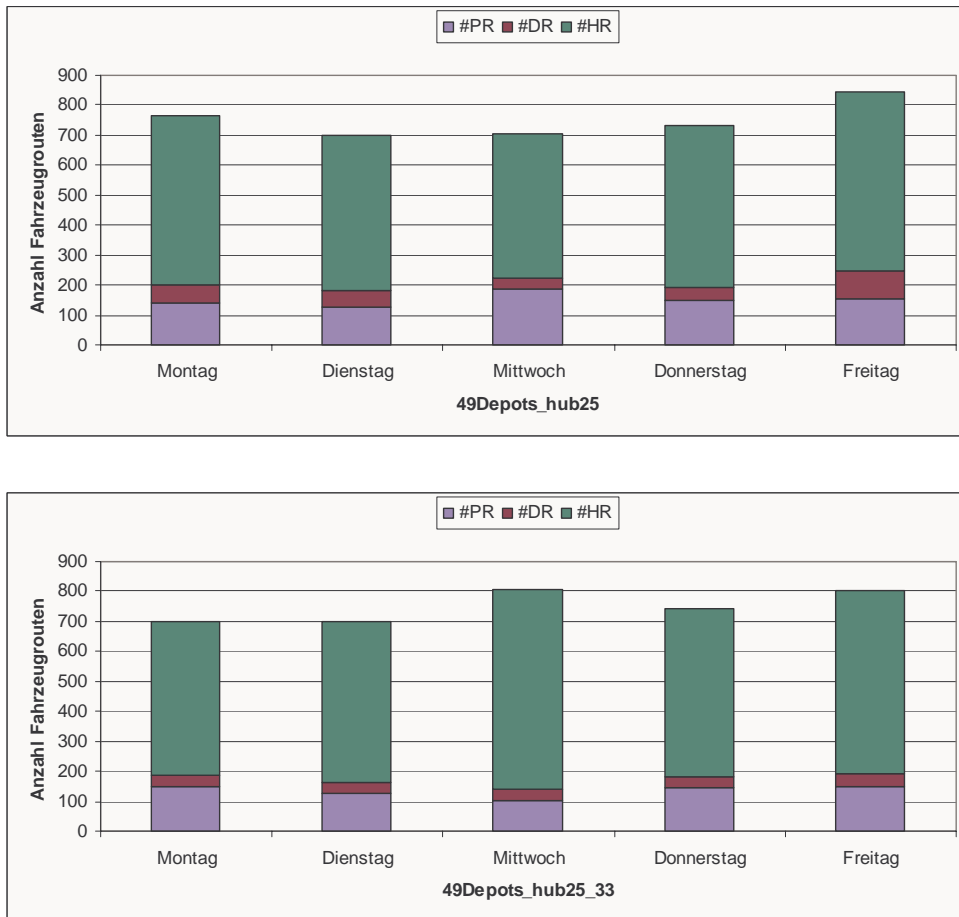


Abbildung 6.48: Anzahl Servicerouten je Routentyp und Wochentag für die Testinstanzen 49Depots_hub25 und 49Depots_hub25_33

In Abbildung 6.49 sind die Zielfunktionswerte (y-Achse) der drei Testbeispiele und die veränderten Inputwerte dargestellt. Die Zielfunktionswerte der einzelnen Testinstanzen von 0 % Veränderung stellen dabei die Basiswerte dar und werden mit 100 % repräsentiert. Alle anderen Zielfunktionswerte sind zu diesen Basiswerten ins Verhältnis gesetzt.

Aus der Abbildung und den dazugehörigen Daten (siehe Anhang Tabelle 25) können wir erkennen, dass bei größeren Erhöhungen und Verringerungen sich die Kosten ebenso verändern. Bei Bedarfserhöhungen bleiben die Kostensteigerungen unter dem prozentualen Veränderungswert; bei z. B. der 15 % Erhöhung verändern sich die Zielfunktionswerte der drei Instanzen um 5 %, 8 % bzw. fast 15 %. Als Grund für dieses Resultat können die freien Kapazitäten auf den Fahrzeugen angeführt werden. Diese werden zuerst genutzt, bevor neue Servicerouten gebildet werden. Allerdings verhält sich das Verfahren nicht grundsätzlich so, wie das Beispiel mit 49 Depots und den beiden Hubs zeigt: eine 5 % Erhöhung führt zu ca. 10 % höheren Routenkosten.

Im Gegensatz dazu werden bei einer Verringerung des Sendungsaufkommens nicht die prozentual gleichen Kosteneinsparungen erzielt. In der Regel bleiben sie - wie auch in der Abbildung ersichtlich - unterhalb des Veränderungsprozentsatzes. Die Senkung des Sendungsaufkommens führt also nicht dazu, dass der gleiche Prozentsatz an Servicerouten nicht mehr benötigt wird. Der Grund hierfür ist bei der Auslastung der Servicerouten zu suchen. Bei einer Senkung fallen nur die Servicerouten weg, deren Auslastung unter dem Senkungswert liegen. 49Depots_hub25 stellt bei einer 15 % Verringerung des Bedar-

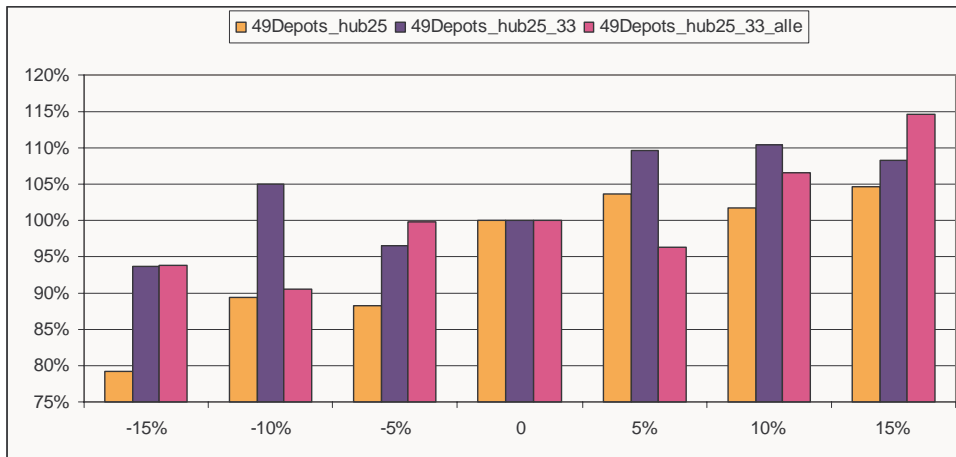


Abbildung 6.49: Zielfunktionswerte für die veränderten Bedarfswerte für die Testinstanzen 49Depots_hub25, 49Depots_hub25_33 und 49Depots_hub25_33_alle

es eine Ausnahme dar. Hier können Kosteneinsparungen von mehr als 20 % freigesetzt werden. Allerdings sind auch Kostenerhöhungen, wie beispielsweise bei der Instanz 49Depots_hub25_33 und der Verringerung um 10 %, durch das Verfahren möglich. Es muss also immer wieder mit positiven und negativen Ausreißern gerechnet werden.

Zum Abschluss wollen wir uns noch der Frage widmen, welche Regionalhubs ab einem gewissen Mengenwachstum benötigt werden und welche Hubs bei einer Verringerung des Sendungsaufkommens geschlossen werden können. Aus der Ergebnisanalyse in Kapitel 6.6.1 wissen wir, dass bei den momentanen Bedarfsmengen neben den Hubs 25 und 33 vor allem Depothub 7 in Betrieb sein sollte.

In Tabelle 6.27 sind die Anzahl der Servicerouten je Hub für die Testinstanz 49Depots_hub25_33_alle wiedergegeben. Die Anzahl der Servicerouten über die Depothubs 37 und 48 sind auch bei einer Erhöhung der Bedarfe von 15 % noch so gering (maximal 13 Routen), dass sich die Inbetriebnahme als Hub hier nicht lohnen dürfte.

49Depots_hub25_33_alle	Hub 25	Hub 33	Hub 7	Hub 13	Hub 20	Hub 37	Hub 48
-15 %	516	18	37	7	14	6	1
-10 %	490	26	34	13	8	2	3
-5 %	555	27	42	12	12	6	3
0	544	15	55	11	22	7	0
5 %	520	24	62	28	19	13	1
10 %	573	30	48	18	32	13	5
15 %	574	27	71	29	31	11	7

Tabelle 6.27: Anzahl der Hubrouten je Hub für die veränderten Bedarfswerte für die Testinstanz 49Depots_hub25_33_alle

Der Standort 7 baut bei einer Mengenerhöhung seine Wichtigkeit als Hub noch weiter aus. Bei 15 % Erhöhung machen 71 Servicerouten (9,5 % aller Hubrouten) an diesem Hub für einen Umschlag halt. Auch bei einer Senkung des Sendungsaufkommens wird dieser Regionalhub mit minimal 34 Servicerouten noch gut ausgelastet. Somit sollte für dieses Depothub die Funktion Hub auf jeden Fall genutzt werden.

Bei den Depothubs 13 und 20 konnten wir bei den gegebenen realen Inputdaten keine end-

gültige Entscheidung für oder gegen eine Öffnung als Hub treffen. Bei einem Anstieg des Bedarfes steigt nicht nur der Anteil der Servicerouten über diese Standorte auf über 4 % an, sondern auch die Anzahl der Servicerouten. Bei Depothub 13 wird eine maximale Zahl von 31 und bei Depothub 20 von 32 Servicerouten erreicht. Dadurch sollten sich die Investitionen und der Betrieb als Regionalhub wirtschaftlich lohnen. Für eine endgültige Aussage müssten allerdings alle Kosten, inklusive Investitionskosten und fixe Kosten, für den Hub berücksichtigt werden. Diese liegen uns jedoch nicht vor.

In der gegebenen Ausgangslage ist Hub 33 in Betrieb. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass diese Entscheidung noch einmal überdacht werden sollte. Die Anzahl der Servicerouten bewegen sich in einem Intervall von 15 bis 30 mit einem maximalen Anteil von 4,5 % über alle Hubrouten. Diese Werte sind im Vergleich zum anderen Hub und zu den möglichen Regionalhubs sehr gering. Daher sollte für dieses Hub eine Kostenanalyse mit allen Kosten durchgeführt werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Gestaltung von Service-Netzwerken. Das Design solcher komplexen Netzwerke, insbesondere von großen Liniennetzen, bietet große Potentiale zur Kostensenkung und Verbesserung der Service-Qualität. Durch eine Einsparung von wenigen Prozentpunkten kann durch die regelmäßige Wiederholung der Abläufe eine hohe Gesamtkostenreduzierung erzielt werden.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Organisation eines nationalen Liniennetzes, welches typischerweise bei großen europäischen Sammelgutspeeditionen auftritt. Aus der strategischen Planung ist ein gemischtes Transportnetz mit einer Menge an Depots und einer Menge an Hubs gegeben. Für die Gestaltung des Service-Netzwerkes können zum einen Services zwischen Depots und zum anderen Services zwischen einem Depot und einem Hub eingesetzt werden. Insbesondere die Einsatzmöglichkeit von mehreren zentralen und regionalen Hubs ist in der wissenschaftlichen Literatur nur unzureichend berücksichtigt. Die wesentlichen taktischen Planungsaufgaben sind die Auswahl und die zeitliche Festlegung der Services sowie die Festlegung der Umladestationen, der Aufträge und die Zuweisung der Aufträge zu Services.

Die Planung von Service-Netzwerken ist ein bedeutender Schwerpunkt bei der Forschung auf den Gebieten des Operations Research und der Logistik, jedoch betrachtet die Literatur vor allem Anwendungen aus dem Bereich der KEP-Dienste oder von Speditionen aus dem nord-amerikanischen Markt. Die speziellen Anforderungen unterscheiden sich allerdings von dem Planungsproblem eines europäischen LDL. Einzig die Arbeiten von Wlcek (1998) und Jansen u. a. (2004) befassen sich mit LTL-Operationen in Europa. Jedoch besitzt die Lösungsmethode von Wlcek einen strategischen Fokus und die von Jansen u. a. einen operativen Fokus. Beide Vorgehen haben sich als unpassend für die taktische Planung erwiesen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen neuen Ansatz für die Planung der Linienverkehre eines nationalen Netzes zu entwickeln. Dieser Ansatz sollte allerdings so aufgesetzt sein, dass Aspekte für die Planung von internationalen Netzen leicht integriert werden können. LDL müssen in Zukunft ihre Geschäftsfelder erweitern, um wettbewerbsfähig bleiben zu können. Dafür stellen effiziente internationale Netzwerke eine der notwendigen Grundlagen. Weiterhin wird bei der Aufstellung eines Modells auf den Praxisbezug Wert gelegt. Dazu wurde in einem ersten Schritt ein komplexes Grundmodell mit den wich-

tigsten Planungsanforderungen und -restriktionen erstellt. Die Services in diesem Modell wurden mithilfe von Servicerouten modelliert und der Weg der Aufträge über diese Services wurde durch Auftragsrouten abgebildet. Für die Darstellung des Service-Netzwerkes wurde ein spezielles Zeit-Raum-Netzwerk, das Derived-Schedule-Netzwerk, gewählt sowie problemspezifische Charakteristika ausgenutzt. Die Idee dieses Netzwerkes ist, dass jede Serviceroute nur einmal abgebildet wird und nicht die Darstellung jedes möglichen Abfahrtszeitpunktes notwendig ist. Durch diese Art der Modellierung und die Anwendung der Knotenkonsolidierung konnte die Größe des Service-Netzwerkes drastisch reduziert werden. Dadurch wurde es möglich, solche großen Service-Netzwerken zu optimieren. Es muss dennoch in Kauf genommen werden, dass dieses Modell für realistische Probleminstanzen mit den heutigen state-of-the-Art Methoden nicht optimal gelöst werden kann. Auch aussagekräftige Lower-Bounds können nicht angegeben werden.

Zur Lösung dieses Linienplanungsproblems wurde eine iterative Lösungsmethode implementiert, welche, auf einer Dekomposition, basierend auf den zwei Entscheidungsvariablen, beruht. Zuerst werden durch ein heuristisches Branch-Price-and-Cut-Verfahren die Servicerouten bestimmt. Diese Servicerouten bilden das Service-Netzwerk, über das die Aufträge transportiert werden sollen. Der Weg der Aufträge wird im zweiten Schritt durch den Einsatz eines Branch-and-Price-Verfahrens festgelegt. Durch die Wahl der Auftragsrouten wird dann entschieden, welche Servicerouten fixiert werden. Dadurch haben die jeweiligen Entscheidungen des einen Planungsproblems einen Einfluss auf das jeweilige andere Problem. Diese iterative Auswahl von Service- und Auftragsrouten verkleinert die Größe des Planungsproblems immer weiter, da durch die Fixierung der Servicerouten auch festgelegt wird, welche Bedarfe von Commodities gedeckt werden können. Diese Commodities müssen in der nächsten Iteration nicht mehr berücksichtigt werden.

Zur Überprüfung des entwickelten Konzeptes haben wir die Modelle und Verfahren mit Echtdateien getestet. Dazu wurde in drei Schritten vorgegangen. Zuerst wurde isoliert an dem Modell zur Bestimmung von Servicerouten gearbeitet. Die Laufzeit zur Lösung dieses Modells konnte durch eine neue Parametereinstellung in CPLEX deutlich verbessert werden, wobei die Qualität der Lösung nur geringfügig schlechter wurde. Zweitens wurde das Modell für die Generierung der Auftragsrouten mit der zugehörigen Lösungsmethode betrachtet. Das implementierte Branch-and-Price-Verfahren benötigte für alle Testinstanzen nur wenige Sekunden, um das Problem zu optimieren. Drittens wurde der gesamte Algorithmus durch eine Anwendung auf ein realistisches SNDP einer Sammelgutspektion auf Laufzeit und Lösungsqualität getestet sowie Sensitivitätstests durchgeführt. Die Laufzeit von maximal 15 Stunden ist bei einer taktischen Planung noch im Bereich des Zulässigen. Jedoch ist bei internationalen Netzen mit längeren Lösungszeiten zu rechnen. Ohne auf mathematische Aussagen oder Benchmarks zurückgreifen zu können, ist ersichtlich, dass die Qualität der Ergebnisse im Bereich der Auslastung und der Anteil an Rundläufen und 2-Tages-Umläufen stark verbesserungsfähig sind. Dennoch konnte mit diesem Verfahren, basierend auf exakten Methoden, ein möglicher Lösungsweg für Linienplanungsprobleme aufgezeigt werden.

7.2 Ausblick

Bei der Erstellung des Grundmodells sowie bei der Auswertung der Testergebnisse konnten einige Aufgabenstellungen für zukünftige Forschungsprojekte identifiziert werden. Durch

die Veränderung des Verfahrens oder die Entwicklung eines neuen Modellierungs- und Lösungsansatzes können Potentiale zur Verbesserung der Rechenzeiten und Lösungsqualität freigesetzt werden. Ferner wurde das Planungsproblem aufgrund seiner Komplexität für diesen ersten Lösungsansatz vereinfacht. Daher sind praxisrelevante Erweiterungen im Modell wünschenswert.

Für die Anwendung des vorgestellten Lösungsverfahrens von internationalen SNDP ist es notwendig, die Rechenzeiten weiter zu reduzieren. Dies ist nur zu bewerkstelligen, wenn die Anzahl der Iterationen des Gesamtalgorithmus reduziert werden können. Dazu ist es notwendig, die Lösungsqualität der Servicerouten aus Schritt 1 des Verfahrens (vgl. Abschnitt 5.5) so zu verändern bzw. zu verbessern, dass im Schritt 2 mehr Ausgangs- und Bestimmungsorte ihren kompletten Bedarf gedeckt bekommen. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, wäre die Anzahl der zu überprüfenden Cutset-Inequalities zu erhöhen. Insbesondere ein effizienter Separationsalgorithmus würde zusätzlich die Laufzeit und die Speicherplatzanforderungen verringern. Unglücklicherweise wurde, so weit es uns bekannt ist, bis jetzt kein solches Verfahren entwickelt, obwohl viel Forschungsaufwand in diesen Punkt gesteckt worden ist.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Verbesserung der Lösungsqualität wäre, das Column- und Cut-Generation-Verfahren in jedem Knoten des Branch-and-Bound-Baumes bei der Bestimmung von Servicerouten durchzuführen. Dafür ist der Einsatz einer effizienten und lenkbaren Branching-Strategie notwendig. Diese nicht triviale Aufgabe (vgl. auch Abschnitt 3.5.3) bietet ein interessantes Feld für neue Forschungsaufgaben.

Durch die genannten Veränderungen könnten nicht nur die Lösungszeiten reduziert, sondern auch die Auslastung der Fahrzeuge deutlich erhöht werden. Dieses kann durch die Einbeziehung der schon fixierten Servicerouten noch weiter verbessert werden. In jeder Iteration sind dazu die fixierten Servicerouten mit ihren freien Kapazitäten aus den vorherigen Iterationen bei der Generierung von Auftragsrouten mit in den Aufbau des Service-Netzwerkes zu integrieren. Ebenso könnte eventuell der Einsatz von Mindestauslastungen die Auslastungen der einzelnen Fahrzeuge erhöhen. Dazu müsste im Schritt 2 des Verfahrens die unteren Schranken des Service-Netzwerkes erhöht werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich dann bei den PP nicht mehr um einfache Kürzeste-Wege-Probleme handelt und somit die Lösungszeiten für diese Teilprobleme steigen. Dennoch könnte dies in einer weiteren Forschungsaufgabe untersucht werden.

Neben der Auslastung war auch der Anteil der 2-Tages-Umläufe und Rundläufe nicht befriedigend. Die Einbeziehung der Bedingung zur Bildung von Touren in das Modell zur Bestimmung von Servicerouten zeigte sehr wenig Erfolg. Das Lösen des SNDP ohne den Einsatz einer Dekomposition ist aufgrund der Größe realistischer Instanzen keine Option (siehe auch Kim (1997)). Könnte das SNDP ohne Dekomposition optimiert werden, käme der Anteil der Umläufe auf 100 % und die Lösungsqualität könnte allgemein deutlich verbessert werden. Jedoch sind Anforderungen zu Laufzeiten und Speicherplatz damit nicht zu erfüllen. Es wäre sehr sinnvoll für die Umsetzung der Anforderungen nach Umläufen weitere Untersuchungen durchzuführen, um bessere Konzepte entwickeln zu können.

Die Arbeiten zur Composite Variable (siehe Armacost u. a. (2002), Armacost u. a. (2004), Barnhart u. a. (2002), Barnhart und Schneur (1996), Kim u. a. (1999), Shen (2004), Barnhart und Shen (2005)) und der Dantzig-Wolfe-Dekompositionsansatz von Irnich (2002) zeigen, dass sehr gute Ergebnisse mit neuen Modellformulierungen erreicht worden sind. Diese Formulierungen beruhen nicht auf dem klassischen Ansatz zur Modellierung von

SNDP. Beide Konzepte konnten jedoch nicht auf das vorhandene Planungsproblem in dieser Arbeit übertragen werden. Die Entwicklung einer neuen Modellformulierung könnte eventuell viele der oben genannten Probleme lösen. Es wäre daher sehr sinnvoll, diesem Punkt in zukünftigen Forschungsvorhaben weiter nachzugehen.

Zukünftige Forschungsprojekte sollten jedoch nicht nur Verbesserungen am Verfahren beinhalten, sondern auch weitere Anforderungen in das Modell integrieren. Vor allem durch die weiter wachsende Globalisierung und der zunehmenden Nachfrage von integrativen, internationalen Leistungen der verladenden Wirtschaft wird der Aufbau und Unterhalt internationaler Netze immer wichtiger. Der Druck auf die LDL wird durch die ansteigende Verkehrsdichte auf den europäischen Straßen weiter verstärkt, so dass die Planung solcher Netzwerke einen immer wichtigeren Punkt einnimmt. Dazu wird es in Zukunft notwendig sein,

- einen heterogenen Fuhrpark, insbesondere Sprinter, 40- und evtl. 60-Tonnen LKW, für den Straßentransport einzusetzen,
- verschiedene Beförderungsarten in die Planung einzubeziehen,
- Frequenzen für internationale Relationen festzulegen und
- verschiedene Produktgruppen in einer Applikation zu optimieren.

Wie der Literaturüberblick (siehe Kapitel 4) gezeigt hat, sind erste erfolgreiche Konzepte für die Lösung von SNDP implementiert worden, jedoch steht diese Forschung erst am Anfang ihrer Entwicklung. Es gibt noch viele interessante Aspekte zu analysieren und es ist viel Raum für neue Lösungsmethoden und Modelle vorhanden, um für eines der schwersten Planungsprobleme optimale oder gute Lösungen in annehmbarer Zeit zu finden.

Anhang

Von Standort	Nach Standort	Fahrzeit in Minuten	Entfernung in km	Entfernung in Mautkm
2	5	41	43	35
12	19	53	57	49
2	3	56	59	51
24	29	60	62	42
16	18	60	64	55
6	11	66	64	24
36	41	68	75	66
1	2	68	80	73
3	5	71	74	60
14	15	71	74	56
8	14	71	78	57
41	43	73	78	62
40	41	75	80	69
3	6	76	76	57
30	32	76	77	53
15	22	77	76	58
8	9	78	83	61
14	22	79	85	69
29	35	79	86	65
10	17	82	77	39
1	5	83	92	80
18	24	86	95	88
21	31	89	91	70
19	27	96	107	99
32	28	96	109	104
10	12	100	108	100
4	15	100	109	100
17	27	101	114	107

Tabelle 1: Auszug aus den Depotkombinationen nach Priorisierung (in Anlehnung an Geyer (2007))

Gruppe mit 20 Depots	Gruppe mit 30 Depots	Gruppe mit 40 Depots
2	2	1
4	4	2
7	7	3
13	9	4
14	10	6
17	11	7
20	13	8
21	14	9
23	17	10
27	18	11
32	19	12
35	20	13
37	21	14
38	22	15
39	23	16
40	27	17
42	29	18
44	30	19
48	31	20
50	32	21

Tabelle 2: Depots in den Gruppen der Testprobleme für 20, 30 und 40 Depots (in Anlehnung an Geyer (2007))

Instanz		0	1	2	3
20Depots_hub25	T_{FG}	18	18	19	18
	T_{MIP}	10	9	10	9
	Z_{FG}	51.519	51.519	51.519	51.519
	#MIP	6	6	6	6
	#simpl	5.181	5.181	5.181	5.181
	#nodes	0	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	16	17	16
	T_{MIP}	9	9	10	10
	Z_{FG}	51.860	51.860	51.860	51.860
	#MIP	7	7	7	7
	#simpl	5.631	5.631	5.631	5.631
	#nodes	0	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	32.523	13.315	13.721	17.027
	T_{MIP}	32.342	12.471	12.973	16.188
	Z_{FG}	87.660	87.923	87.695	88.038
	#MIP	11	39	33	37
	#simpl	31.520.001	5.526.007	5.582.684	7.484.626
	#nodes	977.502	76.056	76.620	112.128
30Depots_hub25_33	T_{FG}	4.254	5.790	3.780	4.366
	T_{MIP}	3.438	4.198	2.922	3.486
	Z_{FG}	86.452	85.111	85.551	86.459
	#MIP	23	41	25	27
	#simpl	1.776.184	1.007.521	909.916	1.092.745
	#nodes	59.593	13.086	13.276	17.634

Tabelle 3: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Knotenauswahlstrategie

Instanz	0		1		2		3	
40Depots_hub25	T_{FG}	22.661	24.820	27.033	22.101			
	T_{MIP}	19.530	20.892	23.394	17.567			
	Z_{FG}	127.682	126.314	126.701	125.330			
	#MIP	8	10	8	10			
#simpl	2.718.548	1.570.377	1.618.750	1.085.352				
#nodes	49.000	9.104	9.839	6.200				
40Depots_hub25_33	T_{FG}	21.997	22.685	22.147	22.277			
	T_{MIP}	11.390	8.790	11.066	11.599			
	Z_{FG}	124.837	118.416	123.790	123.790			
	#MIP	16	18	15	15			
#simpl	854.979	276.169	365.677	365.677				
#nodes	16.400	1.204	2.200	2.200				
49Depots_hub25	T_{FG}	28.694	21.902	44.209	43.178			
	T_{MIP}	25.584	18.668	39.200	37.455			
	Z_{FG}	148.977	148.684	150.135	149.703			
	#MIP	4	4	5	5			
#simpl	2.666.976	611.629	1.535.944	1.489.579				
#nodes	34.200	2.400	6.464	6.500				
49Depots_hub25_33	T_{FG}	23.731	24.813	24.592	21.937			
	T_{MIP}	8.318	12.427	13.618	11.900			
	Z_{FG}	144.704	145.477	144.751	144.751			
	#MIP	8	7	6	6			
#simpl	156.468	175.051	169.480	169.480				
#nodes	1.400	1.010	1.010	1.010				

Tabelle 4: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Knotenauswahlstrategie

Instanz	-1	0	1	2	3	4
20Depots_hub25	T_{FG}	18	17	18	18	18
	T_{MIP}	9	9	9	10	9
	Z_{FG}	51.519	51.519	51.519	51.519	51.519
	#MIP	6	6	6	6	6
	#simpl	5.181	5.181	5.181	5.181	5.181
	#nodes	0	0	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	16	16	17	16
	T_{MIP}	10	9	9	10	10
	Z_{FG}	51.860	51.860	51.860	51.860	51.860
	#MIP	7	7	7	7	7
	#simpl	5.631	5.631	5.631	5.631	5.631
	#nodes	0	0	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	38.149	13.315	17.770	14.347	24.190
	T_{MIP}	37.771	12.471	17.293	13.489	23.993
	Z_{FG}	87.550	87.923	86.596	87.923	89.097
	#MIP	19	39	23	39	11
	#simpl	22.589.483	5.526.007	8.898.772	5.526.007	14.564.124
	#nodes	117.887	76.056	135.896	75.056	221.281
30Depots_hub25_33	T_{FG}	9.259	5.790	1.907	5.695	6.350
	T_{MIP}	8.477	4.198	1.515	4.130	4.981
	Z_{FG}	85.945	85.112	86.557	85.112	85.602
	#MIP	25	41	15	41	35
	#simpl	4.479.441	1.007.521	646.288	1.007.521	1.929.992
	#nodes	53.444	13.086	10.203	13.086	29.184

Tabelle 5: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Variablenauswahlstrategie

Instanz	-1	0	1	2	3	4	
40Depots_hub25	T_{FG}	27.616	24.820	26.008	24.915	22.937	23.770
	T_{MIP}	25.066	20.892	22.937	21.020	20.170	19.557
	Z_{FG}	125.874	126.314	125.723	126.314	127.635	124.744
	#MIP	7	10	8	10	7	10
	#simpl #nodes	3.354.548 8.649	1.570.377 9.104	2.363.792 16.800	1.570.377 9.104	355.378 2.119	1.660.893 11.095
40Depots_hub25_33	T_{FG}	23.003	22.685	22.820	21.748	25.153	25.487
	T_{MIP}	20.205	8.790	12.075	10.652	18.902	15.914
	Z_{FG}	124.675	118.416	124.264	123.790	125.495	123.861
	#MIP	5	18	14	15	10	13
	#simpl #nodes	1.619.683 8.200	276.169 1.204	646.587 4.815	365.677 2.200	275.613 1.979	810.954 6.354
49Depots_hub25	T_{FG}	22.170	21.902	31.873	35.191	32.831	31.004
	T_{MIP}	18.987	18.668	26.110	29.767	28.504	24.892
	Z_{FG}	150.722	148.684	150.446	149.604	148.559	150.074
	#MIP	4	4	5	5	5	6
	#simpl #nodes	946.102 2.800	611.629 2.400	939.048 4.508	1.115.424 4.600	421.482 1.515	1.065.665 4.800
49Depots_hub25_33	T_{FG}	42.743	24.813	22.869	23.006	22.706	23.770
	T_{MIP}	34.111	12.427	9.132	11.878	9.841	14.021
	Z_{FG}	147.414	145.477	147.229	145.477	145.337	145.786
	#MIP	6	7	7	7	8	6
	#simpl #nodes	1.094.405 4.801	175.051 1.010	142.755 800	175.051 1.010	83.002 276	303.457 2.000

Tabelle 6: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Variablenauswahlstrategie

Instanz		0	-1	1
20Depots_hub25	T_{FG}	18	18	18
	T_{MIP}	9	10	9
	Z_{FG}	51.519	51.519	51.519
	#MIP	6	6	6
	#simpl	5.181	5.181	5.181
	#nodes	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	16	17
	T_{MIP}	9	9	10
	Z_{FG}	51.860	51.860	51.860
	#MIP	7	7	7
	#simpl	5.631	5.631	5.631
	#nodes	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	13.315	22.286	19.383
	T_{MIP}	12.471	21.761	18.407
	Z_{FG}	87.923	88.769	87.954
	#MIP	39	27	39
	#simpl	5.526.007	9.149.961	8.679.462
	#nodes	76.056	182.742	119.612
30Depots_hub25_33	T_{FG}	5.790	9.348	4.003
	T_{MIP}	4.198	7.798	3.292
	Z_{FG}	85.112	85.704	86.639
	#MIP	41	38	20
	#simpl	1.007.521	2.170.226	1.234.502
	#nodes	13.086	42.600	17.038

Tabelle 7: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Branching-Richtung

Instanz		0	-1	1
40Depots_hub25	T_{FG}	24.820	29.077	37.459
	T_{MIP}	20.892	27.247	34.575
	Z_{FG}	126.314	126.691	126.631
	#MIP	10	5	7
	#simpl	1.570.377	2.188.707	3.202.197
	#nodes	9.104	23.600	21.783
40Depots_hub25_33	T_{FG}	22.685	22.522	23.612
	T_{MIP}	8.790	10.816	14.007
	Z_{FG}	118.416	123.162	125.417
	#MIP	18	14	15
	#simpl	276.169	279.432	616.918
	#nodes	1.204	2.568	4.034
49Depots_hub25	T_{FG}	21.902	32.555	26.022
	T_{MIP}	18.668	29.488	21.690
	Z_{FG}	148.684	151.704	149.309
	#MIP	4	4	4
	#simpl	611.629	965.024	946.106
	#nodes	2.400	7.700	3.920
49Depots_hub25_33	T_{FG}	24.813	22.334	25.564
	T_{MIP}	12.427	12.849	12.205
	Z_{FG}	145.477	145.685	145.442
	#MIP	7	6	8
	#simpl	175.051	171.406	221.818
	#nodes	1.010	1.202	1.000

Tabelle 8: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Branching-Richtung

Instanz		0	1	2	3
20Depots_hub25	T_{FG}	18	19	19	17
	T_{MIP}	9	10	9	8
	Z_{FG}	51.519	51.519	51.519	51.519
	#MIP	6	6	6	6
	#simpl	5.181	5.181	5.181	5.181
	#nodes	0	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	17	16	16
	T_{MIP}	9	10	9	9
	Z_{FG}	51.860	51.860	51.860	51.860
	#MIP	7	7	7	7
	#simpl	5.631	5.631	5.631	5.631
	#nodes	0	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	13.315	12.628	3.356	1.958
	T_{MIP}	12.471	11.767	3.059	1.724
	Z_{FG}	87.923	87.096	87.731	88.623
	#MIP	39	38	16	13
	#simpl	5.526.007	5.262.975	1.109.704	545.485
	#nodes	76.056	83.398	12.983	10.887
30Depots_hub25_33	T_{FG}	5.790	3.185	2.340	3.290
	T_{MIP}	4.198	2.645	1.679	2.398
	Z_{FG}	85.112	87.933	86.306	86.323
	#MIP	41	17	20	26
	#simpl	1.007.521	771.134	349.721	398.544
	#nodes	13.086	13.274	3.788	6.798

Tabelle 9: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zur MIP-Dive-Strategie

Instanz	0	1	2	3	
40Depots_hub25	T_{FG}	24.820	25.243	27.980	23.337
	T_{MIP}	20.892	19.838	23.175	17.184
	Z_{FG}	126.314	125.121	128.279	127.239
	#MIP	10	11	10	13
	#simpl	1.570.377	1.212.714	1.587.656	210.637
#nodes	9.104	8.619	8.880	8.000	
40Depots_hub25_33	T_{FG}	22.685	22.740	23.710	22.678
	T_{MIP}	8.790	13.414	12.217	10.643
	Z_{FG}	118.416	125.468	123.377	124.389
	#MIP	18	14	15	16
	#simpl	276.169	523.165	419.678	323.495
#nodes	1.204	3.801	2.200	2.341	
49Depots_hub25	T_{FG}	21.902	37.266	26.983	30.459
	T_{MIP}	18.668	31.248	23.487	25.018
	Z_{FG}	148.684	149.202	151.329	149.535
	#MIP	4	6	4	5
	#simpl	611.629	1.286.684	986.288	819.184
#nodes	2.400	5.711	3.600	5.000	
49Depots_hub25_33	T_{FG}	24.813	23.343	22.714	24.304
	T_{MIP}	12.427	12.202	8.638	9.180
	Z_{FG}	145.477	142.442	144.496	145.099
	#MIP	7	6	7	9
	#simpl	175.051	193.186	118.823	116.093
#nodes	1.010	1.200	570	600	

Tabelle 10: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zur MIP-Dive-Strategie

Instanz	0	1	2	3	4	
20Depots_hub25	T_{FG}	18	51	25	35	25
	T_{MIP}	9	23	11	20	10
	Z_{FG}	51.519	52.396	52.102	51.977	52.102
	#MIP	6	15	9	9	9
	#simpl	5.181	14.408	8.157	10.176	8.157
	#nodes	0	0	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	26	55	70	55
	T_{MIP}	9	11	21	41	20
	Z_{FG}	51.860	53.676	51.395	53.425	51.395
	#MIP	7	11	19	18	19
	#simpl	5.631	9.851	17.821	21.371	17.821
	#nodes	0	0	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	13.315	6.506	22.272	11.857	2.179
	T_{MIP}	12.471	6.168	21.278	11.280	2.697
	Z_{FG}	87.923	86.827	89.113	88.252	86.566
	#MIP	39	18	42	25	25
	#simpl	5.526.007	4.194.080	7.493.237	3.900.899	374.809
	#nodes	76.056	72.995	11.832	27.816	5.932
30Depots_hub25_33	T_{FG}	5.790	4.845	2.706	3.575	2.430
	T_{MIP}	4.198	4.103	2.016	2.654	1.606
	Z_{FG}	85.111	87.924	85.705	86.711	85.689
	#MIP	41	26	20	24	24
	#simpl	1.007.521	2.523.313	242.423	394.447	197.712
	#nodes	13.086	44.864	2.766	2.501	2.433

Tabelle 11: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zum MIP-Emphasis-Indikator

Instanz	0	1	2	3	4	
40Depots_hub25	T_{FG}	24.820	24.242	23.502	24.837	22.557
	T_{MIP}	20.892	17.889	19.148	22.529	14.656
	Z_{FG}	126.314	126.186	126.363	125.777	125.914
	#MIP	10	13	11	6	15
	#simpl	1.570.377	1.710.242	941.042	1.059.449	669.986
#nodes	9.104	13.374	4.763	4.021	5.703	
40Depots_hub25_33	T_{FG}	22.685	24.871	23.768	26.246	21.950
	T_{MIP}	8.790	9.768	14.958	19.987	10.776
	Z_{FG}	118.416	123.570	124.678	124.143	123.243
	#MIP	18	17	13	9	17
	#simpl	276.169	529.109	312.660	246.629	280.902
#nodes	1.204	3.000	2.084	661	1.700	
49Depots_hub25	T_{FG}	21.902	31.554	22.792	39.314	25.299
	T_{MIP}	18.668	25.244	18.546	34.740	16.897
	Z_{FG}	148.684	148.315	151.796	149.420	150.208
	#MIP	4	6	5	5	7
	#simpl	611.629	1.282.061	402.160	553.272	362.506
#nodes	2.400	6.200	1.400	970	1.800	
49Depots_hub25_33	T_{FG}	24.813	25.345	30.471	26.467	25.381
	T_{MIP}	12.427	13.501	17.841	16.776	9.390
	Z_{FG}	145.477	146.998	145.383	146.131	146.034
	#MIP	7	7	7	6	9
	#simpl	175.051	356.063	194.373	111.501	111.925
#nodes	1.010	2.200	940	403	501	

Tabelle 12: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zum MIP-Emphasis-Indikator

Instanz		0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
20Depots_hub25	T_{FG}	18	51	26	38	19	53
	T_{MIP}	9	24	12	15	6	13
	Z_{FG}	51.519	51.845	52.102	52.597	52.536	53.626
	#MIP	6	14	9	15	9	22
	#simpl	5.181	13.546	8.157	13.943	7.814	19.925
	#nodes	0	0	0	0	0	0
20Depots_hub25_33	T_{FG}	16	67	57	21	8	53
	T_{MIP}	9	33	19	7	2	18
	Z_{FG}	51.860	52.981	51.395	53.285	54.214	53.016
	#MIP	7	20	19	11	5	22
	#simpl	5.631	18.908	17.821	9.043	3.297	20.441
	#nodes	0	0	0	0	0	0
30Depots_hub25	T_{FG}	13.315	2.494	886	622	985	1.036
	T_{MIP}	12.471	1.922	317	178	260	222
	Z_{FG}	87.923	87.923	88.557	90.088	91.252	93.238
	#MIP	39	28	29	25	37	42
	#simpl	5.526.007	623.011	59.363	48.286	76.167	81.747
	#nodes	76.056	7.461	0	0	0	0
30Depots_hub25_33	T_{FG}	5.790	723	998	1.040	812	692
	T_{MIP}	4.198	227	243	236	136	100
	Z_{FG}	85.112	87.355	86.649	89.055	90.223	90.688
	#MIP	41	17	24	28	20	18
	#simpl	1.007.521	34.507	46.297	54.186	37.761	31.210
	#nodes	13.086	40	0	0	0	0

Tabelle 13: 1. Teil der Ergebnisse der Tests zur Relativen MIP-GAP-Toleranz

Instanz		0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
40Depots_hub25	T_{FG}	24.820	22.029	21.757	21.675	21.815	21.938
	T_{MIP}	20.892	12.595	5.249	4.441	4.023	3.264
	Z_{FG}	126.314	129.086	127.684	130.102	130.224	132.704
	#MIP	10	21	34	38	37	36
	#simpl	1.570.377	575.774	145.913	161.099	159.234	144.463
	#nodes	9.104	2.800	0	0	0	0
40Depots_hub25_33	T_{FG}	22.685	22.594	22.073	18.277	19.268	13.821
	T_{MIP}	8.790	4.690	4.166	2.939	2.879	1.751
	Z_{FG}	118.416	119.923	122.324	121.207	121.386	122.627
	#MIP	18	22	25	21	24	16
	#simpl	276.169	104.915	101.638	83.242	93.909	58.041
	#nodes	1.204	0	0	0	0	0
49Depots_hub25	T_{FG}	21.902	22.759	22.451	23.587	22.818	23.140
	T_{MIP}	18.668	15.141	8.687	5.659	5.601	4.941
	Z_{FG}	148.684	152.028	155.248	154.765	156.808	156.337
	#MIP	4	7	12	15	14	15
	#simpl	611.629	567.912	126.534	104.076	95.837	101.722
	#nodes	2.400	1.792	200	0	0	0
49Depots_hub25_33	T_{FG}	24.813	22.763	23.500	23.550	23.429	22.932
	T_{MIP}	12.427	8.215	4.392	3.504	3.240	3.162
	Z_{FG}	145.477	146.238	147.556	148.276	149.347	148.812
	#MIP	7	9	11	11	11	11
	#simpl	175.051	122.814	54.924	63.245	56.281	56.822
	#nodes	1.010	400	0	0	0	0

Tabelle 14: 2. Teil der Ergebnisse der Tests zur Relativen MIP-GAP-Toleranz

Explizites Column-Generation										
Instanz	T_{FG}	#MIP	Z_{FG}	#PR 2 Stopps	#DR 2 Stopps	#HR 3 Stopps	#HR 4 Stopps	#HR 5 Stopps	#HR 4 Stopps	#HR 5 Stopps
20Depots_hub25	38	15	52.597	52	8	24	12	10	10	2
20Depots_hub25_33	22	11	53.285	47	9	45	11	29	29	5
30Depots_hub25	618	25	90.088	98	8	42	11	14	14	17
30Depots_hub25_33	1.046	28	89.055	90	2	50	9	18	18	23
40Depots_hub25	21.883	37	129.895	132	20	57	11	14	14	32
40Depots_hub25_33	21.934	26	126.707	110	10	79	10	20	20	49
49Depots_hub25	21.698	13	156.111	166	18	65	9	14	14	42
49Depots_hub25_33	23.538	11	148.276	116	22	89	5	30	30	54
Exaktes Verfahren										
Instanz	T_{FG}	#MIP	Z_{FG}	#PR 2 Stopps	#DR 2 Stopps	#HR 3 Stopps	#HR 4 Stopps	#HR 5 Stopps	#HR 4 Stopps	#HR 5 Stopps
20Depots_hub25	140	15	50.059	21	40	19	11	6	6	2
20Depots_hub25_33	71	7	49.857	21	31	27	14	10	10	3
30Depots_hub25	1.622	19	80.855	46	57	27	9	13	13	5
30Depots_hub25_33	929	11	81.549	46	48	38	15	19	19	4
40Depots_hub25	28.765	22	114.309	79	65	39	5	19	19	15
40Depots_hub25_33	25.198	15	113.899	76	61	48	12	25	25	11
49Depots_hub25	Abbruch nach 6 Stunden									
49Depots_hub25_33	ohne zulässige Lösung									

Tabelle 15: Vergleich explizites Column-Generation und exaktes Verfahren

	20 Depots Hub 25	20 Depots Hub 25 & 33	30 Depots Hub 25	30 Depots Hub25 & 33
Z_{FG}^1	40.729	41.659	66.739	66.696
#cuts1	258	212	755	826
#SR	50	57	94	87
Z_{FG}^2	52.213	52.691	88.333	88.254
#cuts2	50	19	37	52
#SR	78	81	129	134
Z_{FG}^3	52.940	53.314	88.784	88.299
#cuts3	8	8	28	34
#SR	84	79	135	133
Z_{FG}^4	53.064	54.042	89.803	90.103
#cuts4	13	5	16	8
#SR	83	84	134	141
Z_{FG}^5	52.042	531.598	88.778	88.426
#cuts5	1	5	32	26
#SR	80	81	133	128
	40 Depots Hub 25	40 Depots Hub 25 & 33	49 Depots Hub 25	49 Depots Hub25 & 33
Z_{FG}^1	97.126	97.283	112.334	113.835
#cuts1	1624	1793	2891	2442
#SR	124	136	147	154
Z_{FG}^2	126.388	128.032	149.692	146.637
#cuts2	101	90	266	127
#SR	187	179	209	211
Z_{FG}^3	126.066	126.027	150.375	149.085
#cuts3	88	54	57	67
#SR	189	173	216	216
Z_{FG}^4	129.719	127.563	151.994	148.275
#cuts4	69	33	31	37
#SR	197	189	221	212
Z_{FG}^5	129.528	126.092	153.581	149.340
#cuts5	37	13	42	23
#SR	190	179	228	210

Tabelle 16: Zielfunktionswerte, Anzahl verletzter Schnitte und Anzahl gefahrener Service-routen je MIP

Instanz	1. MIP	2. MIP	3. MIP	4. MIP	5. MIP	restl. MIP	Gesamt
20Depots_hub25	9,68 %	1,88 %	0,30 %	0,49 %	0,04 %	1,65 %	14,04 %
20Depots_hub25_33	7,96 %	0,71 %	0,30 %	0,19 %	0,19 %	0,60 %	9,95 %
30Depots_hub25	8,39 %	0,41 %	0,31 %	0,18 %	0,36 %	1,61 %	11,26 %
30Depots_hub25_33	9,18 %	0,58 %	0,38 %	0,09 %	0,29 %	2,01 %	12,53 %
40Depots_hub25	7,62 %	0,47 %	0,41 %	0,32 %	0,17 %	1,81 %	10,81 %
40Depots_hub25_33	8,41 %	0,42 %	0,25 %	0,15 %	0,06 %	1,00 %	10,30 %
49Depots_hub25	7,40 %	0,68 %	0,15 %	0,08 %	0,11 %	0,44 %	8,85 %
49Depots_hub25_33	6,25 %	0,32 %	0,17 %	0,09 %	0,06 %	0,37 %	7,27 %

Tabelle 17: Anteil der verletzten Schritte je MIP im Vergleich zu den möglichen Schritten

Aufteilung der einzelnen verletzten Schnitte nach 1. MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	11	128	13	106	258
20Depots_hub25_33	9	96	13	94	212
30Depots_hub25	22	315	33	385	755
30Depots_hub25_33	21	340	30	435	826
40Depots_hub25	31	774	41	778	1.624
40Depots_hub25_33	39	838	47	869	1793
49Depots_hub25	40	1.237	57	1.557	2.891
49Depots_hub25_33	39	1.110	47	1.246	2.442
Aufteilung der einzelnen verletzten Schnitte nach 2. MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	8	18	5	19	50
20Depots_hub25_33	4	9	2	4	19
30Depots_hub25	5	25	3	4	37
30Depots_hub25_33	3	8	5	36	52
40Depots_hub25	9	27	8	57	101
40Depots_hub25_33	1	20	8	61	90
49Depots_hub25	10	88	10	158	266
49Depots_hub25_33	7	49	9	62	127
Aufteilung der einzelnen verletzten Schnitte nach 3. MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	2	5	0	1	8
20Depots_hub25_33	3	2	0	3	8
30Depots_hub25	2	6	2	18	28
30Depots_hub25_33	1	7	4	22	34
40Depots_hub25	3	45	7	33	88
40Depots_hub25_33	5	15	5	29	54
49Depots_hub25	2	7	5	43	57
49Depots_hub25_33	2	9	5	51	67
Aufteilung der einzelnen verletzten Schnitte nach 4. MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	3	6	1	3	13
20Depots_hub25_33	1	2	1	1	5
30Depots_hub25	2	3	1	10	16
30Depots_hub25_33	1	3	0	4	8
40Depots_hub25	5	9	4	51	69
40Depots_hub25_33	5	9	3	16	33
49Depots_hub25	3	11	1	16	31
49Depots_hub25_33	3	7	4	23	37

Aufteilung der einzelnen verletzten Schnitte nach 5. MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	1	0	0	0	1
20Depots_hub25_33	1	2	0	2	5
30Depots_hub25	3	20	3	6	32
30Depots_hub25_33	3	17	2	4	26
40Depots_hub25	1	4	4	28	37
40Depots_hub25_33	1	5	2	5	13
49Depots_hub25	1	8	4	29	42
49Depots_hub25_33	1	8	2	12	23
Anzahl verletzter Schnitte in den ersten fünf MIP:					
Instanz	 S = 2	 S = 3	 T = 2	 T = 3	Gesamt
20Depots_hub25	25	157	19	129	330
20Depots_hub25_33	18	111	16	104	249
30Depots_hub25	34	369	42	423	868
30Depots_hub25_33	29	375	41	501	946
40Depots_hub25	49	859	64	947	1.919
40Depots_hub25_33	51	887	65	980	1.983
49Depots_hub25	56	1.351	77	1.803	3.287
49Depots_hub25_33	52	1.183	67	1.394	2.696

Tabelle 18: Anzahl verletzter Schnitte im 1. bis 5. MIP

Instanz	T_{GES}	$\bar{\varnothing} T_{GES}^{ITER}$	z_{GES}	#iter	#SR	#AR
20Depots_hub25	16	2	113.726	7	191	382
20Depots_hub25_33	18	2	116.539	8	204	391
30Depots_hub25	223	16	210.511	14	353	1.014
29Depots_hub25_33	205	16	213.390	13	368	923
30Depots_hub25_33	240	20	215.342	12	374	971
40Depots_hub25	4.281	329	343.223	13	589	1.907
40Depots_hub25_33	5.913	422	328.890	14	578	2.082
49Depots_hub25	19.519	976	445.123	20	764	3.106
49Depots_hub25_33	18.568	1.688	415.297	11	700	3.092
49Depots_hub25_33_48	33.800	1.690	460.912	20	809	3.139
49Depots_hub25_33_20	30.574	1.798	428.676	17	714	2.873
49Depots_hub25_33_7	25.295	1.686	423.640	15	713	3.038
49Depots_hub25_33_37	35.479	1.971	430.266	18	746	3.018
49Depots_hub25_33_13	35.330	1.682	443.389	21	790	3.136
49Depots_hub25_33_7_48	44.477	2.341	445.670	19	772	2.948
49Depots_hub25_33_20_48	37.864	2.104	450.859	18	823	3.151
49Depots_hub25_33_7_20	33.299	1.959	444.066	17	767	3.089
49Depots_hub25_33_7_13	36.153	2.260	420.098	16	704	3.102
49Depots_hub25_33_20_13	38.061	2.537	424.366	15	726	3.084
49Depots_hub25_33_7_37	33.585	2.239	424.911	15	730	3.013
49Depots_hub25_33_7_20_48	33.258	2.079	441.124	16	783	2.998
49Depots_hub25_33_20_37	52.654	2.507	459.728	21	812	2.989
49Depots_hub25_33_7_20_37	52.648	2.507	459.728	21	812	2.989
49Depots_hub25_33_7_20_13	53.888	2.994	453.402	18	783	2.880
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	39.156	2.610	398.608	15	676	3.029
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	52.463	2.761	423.932	19	724	3.102
49Depots_hub25_33_alle	51.061	2.687	442.773	19	780	2.900

Tabelle 19: Rechenaufwand, Zielfunktionswerte, Anzahl Servicerouten und Auftragsrouten in den Lösungen der Testergebnisse

Commodity	Ausgangsort	Bestimmungsort	TE
1	38	10	34
2	15	10	40
3	46	19	38
4	46	30	62
5	46	49	12
6	30	49	37
7	30	46	44
8	48	36	49
9	12	30	111
10	45	30	20

Tabelle 20: Ausgangsort-Bestimmungsort-Paar und dazugehörige TE auf den Servicerouten über Hub 28 in Lösung der Testinstanz „49Depots_hub25_33_48“

Anzahl Routen	#PR		#DR		#HR		#HR	
	2 Stopps	3 Stopps	2 Stopps	3 Stopps	2 Stopps	3 Stopps	4 Stopps	5 Stopps
20Depots_hub25	47	1	6	5	35	62	29	6
20Depots_hub25_33	41	1	4	8	51	66	21	12
30Depots_hub25	57	7	10	15	79	104	57	24
30Depots_hub25_33	63	1	8	9	80	139	58	16
40Depots_hub25	111	11	28	15	73	215	97	39
40Depots_hub25_33	83	13	25	15	98	208	96	40
49Depots_hub25	123	18	38	23	122	281	103	56
49Depots_hub25_33	134	13	27	11	95	228	133	59
49Depots_hub25_33_48	105	14	28	17	120	356	138	31
49Depots_hub25_33_20	113	11	20	19	124	233	128	66
49Depots_hub25_33_7	69	7	26	16	139	266	122	68
49Depots_hub25_33_37	104	16	26	14	129	280	125	52
49Depots_hub25_33_13	101	13	32	17	151	284	133	59
49Depots_hub25_33_7_48	82	14	27	14	149	296	126	64
49Depots_hub25_33_20_48	79	10	33	11	139	364	125	62
49Depots_hub25_33_7_20	97	10	22	19	149	273	122	75
49Depots_hub25_33_7_13	74	11	27	14	115	253	138	72
49Depots_hub25_33_20_13	96	15	25	18	127	266	125	54
49Depots_hub25_33_7_37	92	15	22	14	113	289	116	69
49Depots_hub25_33_7_20_48	94	8	33	12	140	301	140	55
49Depots_hub25_33_20_37	83	16	26	20	127	266	134	58
49Depots_hub25_33_7_20_37	86	9	22	12	160	320	138	65
49Depots_hub25_33_7_20_13	84	8	27	13	141	310	140	60
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	67	9	20	18	123	247	115	77
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	70	9	19	14	116	291	135	71
49Depots_hub25_33_alle	77	8	23	18	136	325	137	56

Tabelle 21: Anzahl Stopps je Routentyp

Auslastung	PR 2 Stopps	PR 3 Stopps	DR 2 Stopps	DR 3 Stopps	HR 2 Stopps	HR 3 Stopps	HR 4 Stopps	HR 5 Stopps
20Depots_hubb25	26,8 %	54,7 %	16,8 %	49,2 %	45,3 %	55,2 %	55,3 %	40,4 %
20Depots_hubb25_33	25,8 %	50,3 %	32,8 %	40,2 %	39,6 %	47,8 %	55,4 %	55,0 %
30Depots_hubb25	28,4 %	38,1 %	28,3 %	33,9 %	38,2 %	43,0 %	55,5 %	64,3 %
30Depots_hubb25_33	27,8 %	21,7 %	22,6 %	31,0 %	33,8 %	45,7 %	52,0 %	62,0 %
40Depots_hubb25	24,8 %	51,7 %	19,2 %	32,5 %	37,8 %	44,0 %	55,3 %	56,6 %
40Depots_hubb25_33	20,3 %	51,0 %	20,5 %	31,7 %	41,1 %	42,1 %	59,4 %	63,4 %
49Depots_hubb25	24,3 %	42,5 %	22,2 %	31,2 %	35,9 %	37,5 %	56,8 %	55,7 %
49Depots_hubb25_33	20,3 %	40,5 %	31,4 %	30,7 %	32,8 %	40,2 %	58,2 %	55,1 %
49Depots_hubb25_33_48	19,6 %	48,1 %	17,7 %	30,1 %	35,6 %	35,9 %	51,9 %	55,7 %
49Depots_hubb25_33_20	22,2 %	41,4 %	17,4 %	25,9 %	34,5 %	38,5 %	56,3 %	59,1 %
49Depots_hubb25_33_7	25,4 %	36,1 %	17,6 %	27,3 %	31,4 %	40,2 %	55,6 %	62,5 %
49Depots_hubb25_33_37	20,9 %	53,4 %	23,8 %	21,4 %	37,5 %	37,4 %	58,8 %	56,4 %
49Depots_hubb25_33_13	22,1 %	44,6 %	16,4 %	27,5 %	27,5 %	37,1 %	58,1 %	60,5 %
49Depots_hubb25_33_7_48	21,3 %	49,8 %	18,5 %	24,0 %	30,4 %	36,4 %	54,4 %	59,8 %
49Depots_hubb25_33_20_48	22,1 %	48,0 %	17,4 %	32,1 %	28,9 %	33,4 %	51,4 %	58,4 %
49Depots_hubb25_33_7_20	18,7 %	49,3 %	18,2 %	30,9 %	30,1 %	34,6 %	57,7 %	55,6 %
49Depots_hubb25_33_7_13	18,3 %	45,9 %	18,4 %	33,4 %	33,6 %	36,5 %	56,4 %	63,0 %
49Depots_hubb25_33_20_13	20,9 %	38,0 %	33,6 %	27,5 %	37,2 %	41,4 %	55,6 %	54,8 %
49Depots_hubb25_33_7_37	15,6 %	43,1 %	17,6 %	38,5 %	33,6 %	39,4 %	60,1 %	56,6 %
49Depots_hubb25_33_7_20_48	20,8 %	33,1 %	13,4 %	32,2 %	37,2 %	37,3 %	52,6 %	54,5 %
49Depots_hubb25_33_20_37	24,0 %	45,9 %	13,1 %	26,5 %	36,1 %	38,4 %	52,7 %	58,7 %
49Depots_hubb25_33_7_20_13	19,4 %	48,7 %	15,3 %	34,7 %	25,3 %	35,9 %	54,5 %	55,4 %
49Depots_hubb25_33_7_20_37	23,0 %	49,2 %	15,7 %	21,6 %	31,5 %	38,1 %	48,7 %	56,5 %
49Depots_hubb25_33_7_20_37_48	25,3 %	45,1 %	20,2 %	28,2 %	35,0 %	40,1 %	55,7 %	63,5 %
49Depots_hubb25_33_7_20_13_48	21,5 %	56,4 %	11,3 %	25,0 %	34,3 %	36,1 %	56,3 %	56,2 %
49Depots_hubb25_33_alle	19,8 %	58,1 %	18,4 %	27,1 %	26,8 %	34,1 %	56,1 %	59,4 %

Tabelle 22: Auslastung der verschiedenen Servicerouten aufgeteilt nach der Anzahl der Stopps

Instanz	zGES	#HR	Hub 25	Hub 33	Hub 7	Hub 13	Hub 20	Hub 37	Hub 48
49Depots_hub25_33	415.297	515	464	51	-	-	-	-	-
49Depots_hub25_33_7	423.640	595	498	56	41	-	-	-	-
49Depots_hub25_33_13	443.389	627	558	26	-	43	-	-	-
49Depots_hub25_33_20	428.676	551	504	25	-	-	22	-	-
49Depots_hub25_33_37	430.266	586	537	45	-	-	-	4	-
49Depots_hub25_33_48	460.912	645	588	52	-	-	-	-	5
49Depots_hub25_33_7_13	420.098	578	474	38	43	23	-	-	-
49Depots_hub25_33_7_20	444.066	619	527	21	51	-	20	-	-
49Depots_hub25_33_7_37	424.911	587	494	34	50	-	-	9	-
49Depots_hub25_33_7_48	445.670	635	577	31	21	-	-	-	6
49Depots_hub25_33_20_13	424.366	572	513	22	-	28	9	-	-
49Depots_hub25_33_20_37	422.617	585	518	34	-	-	29	4	-
49Depots_hub25_33_20_48	450.859	690	574	51	-	-	64	-	1
49Depots_hub25_33_7_20_13	453.402	651	534	26	50	23	18	-	-
49Depots_hub25_33_7_20_37	459.728	683	566	36	51	-	22	8	-
49Depots_hub25_33_7_20_48	441.124	636	530	38	53	-	13	-	2
49Depots_hub25_33_7_20_13_48	423.932	613	511	22	52	11	16	-	1
49Depots_hub25_33_7_20_37_48	398.608	562	452	15	62	-	24	7	2
49Depots_hub25_33_alle	442.773	654	544	15	55	11	22	7	0

Tabelle 23: Zielfunktionswert, Anzahl Hubrouten und Anzahl Hubrouten je Hub für ausgesuchte Testbeispiele mit 49 Depots

49Depots_hub25	<i>zGES</i>	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung
Montag	445.123	764	141	61	562	89	590	39,15 %
Dienstag	427.956	699	128	53	518	91	523	41,76 %
Mittwoch	439.595	705	187	36	482	101	511	42,49 %
Donnerstag	439.154	733	150	42	541	97	547	44,31 %
Freitag	452.884	804	152	96	596	108	599	42,83 %
Mittelwert	441.078	719	187	34	498	103	521	42,26 %
49Depots_hub25_33	<i>zGES</i>	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung
Montag	415.297	700	147	38	515	94	530	41,38 %
Dienstag	417.633	698	128	36	534	97	514	43,37 %
Mittwoch	474.200	808	103	39	666	89	650	38,95 %
Donnerstag	441.177	741	146	38	557	114	534	42,80 %
Freitag	469.327	801	147	42	612	94	627	40,99 %
Mittelwert	474.099	807	103	39	665	88	650	38,95 %

Tabelle 24: Zielfunktionswert, Anzahl Servicerrouten je Typ, Anzahl Umläufe und One-Way-Fahrten und Auslastung für die Wochentage Montag bis Freitag und den Mittelwert

49Depots_hub25		z_{GES}	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung
-15 %		353.079	577	102	46	429	64	451	41,69 %
-10 %		398.021	663	116	42	505	79	510	39,10 %
-5 %		393.202	634	111	58	465	81	485	41,77 %
0		445.123	764	141	61	562	89	590	39,15 %
5 %		461.692	817	136	65	616	106	608	38,41 %
10 %		453.188	788	187	50	551	121	559	43,25 %
15 %		465.409	820	169	67	584	103	620	41,50 %
49Depots_hub25_33		z_{GES}	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung
-15 %		389.028	667	108	29	530	78	519	38,35 %
-10 %		436.398	775	103	42	630	78	624	35,15 %
-5 %		400.578	664	115	24	525	65	539	40,58 %
0		415.297	700	147	38	515	94	530	41,38 %
5 %		455.343	796	113	47	636	74	655	38,86 %
10 %		458.615	797	113	38	646	107	596	41,48 %
15 %		449.950	771	126	47	598	100	585	43,65 %
49Depots_hub25_33_alle		z_{GES}	#SR	#PR	#DR	#HR	#umläufe	#one-way	Auslastung
-15 %		415.926	718	87	32	599	69	587	34,97 %
-10 %		401.157	678	71	31	576	76	536	38,41 %
-5 %		441.541	778	93	28	657	76	643	36,04 %
0		442.773	780	85	41	654	79	633	37,13 %
5 %		426.257	766	69	30	667	99	581	41,40 %
10 %		471.730	846	95	32	719	119	636	39,63 %
15 %		507.072	912	122	40	750	110	708	38,17 %

Tabelle 25: Variation des Bedarfs: Zielfunktionswert, Anzahl Servicerouten je Routentyp, Anzahl Umläufe und Auslastung

Literaturverzeichnis

- [Aberle 1997] ABERLE, G: *Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*. 2. Auflage. R. Oldenburg Verlag München, Wien, 1997
- [Ahuja 1997] AHUJA, RK: *Annotated Bibliographics in Combinatorial Optimization*. Kap. Flows and Paths, S. 283–309, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, NY, 1997
- [Ahuja u. a. 1993] AHUJA, RK ; MAGNANTI, TL ; ORLIN, JB: *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1993
- [Ali u. a. 1984] ALI, I ; BARNETT, D ; FARHANGIAN, K ; KENNINGTON, J ; PATTY, B ; SHETTY, B ; MCCARL, B ; WONG, P: Multicommodity network problems: applications and computations. In: *IIE Transactions* 16 (1984), S. 127–134
- [Armacost u. a. 2002] ARMACOST, A ; BARNHART, C ; WARE, K: Composite Variable Formulations for Express Shipment Service Network Design. In: *Transportation Science* 36 (2002), S. 1–20
- [Armacost u. a. 2004] ARMACOST, A ; BARNHART, C ; WARE, K ; WILSON, A: UPS Optimizes Its Air Network. In: *Interfaces* 34 (2004), S. 15–25
- [Arnold u. a. 2002] ARNOLD, D (Hrsg.) ; ISERMANN, H (Hrsg.) ; KUHN, A (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H (Hrsg.): *Handbuch der Logistik*. Berlin : Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [Assad 1978] ASSAD, AA: Multicommodity network flows - a survey. In: *Networks* 8 (1978), S. 37–91
- [BAG 2005] BAG: Marktbeobachtung Güterverkehr – Sonderbericht zum Strukturwandel im Güterkraftverkehrsgewerbe. 2005. – Forschungsbericht
- [Balakrishnan u. a. 1994] BALAKRISHNAN, A ; MAGNANTI, TL ; MIRCHANDANI, P: A dual-based Algorithm for Multilevel Network Design. In: *Management Science* 40 (5) (1994), S. 1–16
- [Balakrishnan u. a. 1997] BALAKRISHNAN, A ; MAGNANTI, TL ; MIRCHANDANI, P: *Annotated Bibliographics in Combinatorial Optimization*. Kap. Network Design, S. 311–334, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, NY, 1997
- [Barnhart 1993] BARNHART, C: Dual-ascent methods for large-scale multi-commodity flow problems. In: *Naval Research Logistics* 40 (1993), S. 305–324

- [Barnhart u. a. 2003] BARNHART, C ; BELOBABA, P ; ODoni, AR: Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. In: *Transportation Science* 37 (4) (2003), S. 368ff
- [Barnhart u. a. 1995] BARNHART, C ; HANE, CA ; JOHNSON, EL ; SIGISMONDI, G: A column generation and partitioning approach for multi-commodity network flow problems. In: *Telecommunication Systems* 3 (1995), S. 239–258
- [Barnhart u. a. 2000] BARNHART, C ; HANE, CA ; VANCE, PH: Using branch-and-price-and-cut to solve origin-destination integer multicommodity flow problems. In: *Operations Research* 48 (2) (2000), S. 318–326
- [Barnhart u. a. 1998] BARNHART, C ; JOHNSON, EL ; NEMHAUSER, GL ; SAVELSBERGH, MWP ; VANCE, PH: Branch-and-price: Column generation for solving high integer programs. In: *Operations Research* 46 (3) (1998), S. 316–329
- [Barnhart u. a. 2002] BARNHART, C ; KRISHNAN, N ; KIM, D ; WARE, K: Network Design for Express Shipment Delivery. In: *Computational Optimization and Applications* 21 (2002), S. 239–262
- [Barnhart und Schneur 1996] BARNHART, C ; SCHNEUR, RR: Air Network Design For Express Shipment Service. In: *Operations Research* 44 (1996), S. 852–864
- [Barnhart und Sheffi 1993] BARNHART, C ; SHEFFI, Y: A network-based primal-dual heuristic for the solution of multi-commodity network flow problems. In: *Transportation Science* 27 (1993), S. 102–117
- [Barnhart und Shen 2005] BARNHART, C ; SHEN, S: Logistics Service Network Design for Time-Critical Delivery. In: BURKE, E (Hrsg.) ; TRICK, M (Hrsg.): *PATAT 2004* Bd. 3616, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005, S. 86–105
- [Barr u. a. 1995] BARR, RS ; GOLDEN, BL ; KELLY, JP ; RESENDE, MGC ; STEWART, WR: Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristic Methods. In: *Journal of Heuristics* 1 (1995), S. 9–32
- [Baumgarten 1996] BAUMGARTEN, H: Trends und Strategien in der Logistik, Analyse – Potentiale – Perspektiven (Kurzergebnisse) / Technische Universität Berlin. 1996. – Forschungsbericht
- [Büdenbender u. a. 2000] BÜDENBENDER, K ; GRÜNERT, T ; SEBASTIAN, HJ: A Hybrid Tabu Search/Branch-and-Bound Algorithm for the Direct Network Design Problem. In: *Transportation Science* 34 (2000), S. 364–380
- [Bertram 1995] BERTRAM, HG: *Logistik-Informationssysteme*. Shaker Verlag, Aachen, 1995
- [Blunck 2001] BLUNCK, S: Bedarf an wirtschaftlichen Sortern steigt. In: *Logistik für Unternehmen* 15 (2001), S. 72–74
- [Blunck 2005] BLUNCK, S: *Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke Netzen mit beschränkter Sortierkapazität*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2005

- [Braklow u. a. 1992] BRAKLOW, JW ; GRAHAM, WW ; HASSLER, SM ; PECK, KE ; POWELL, WB: Interactive optimization improves services and performance for Yellow Freight System. In: *Interfaces* 22 (1) (1992), S. 147–172
- [Bretzke 1999] BRETZKE, WR: Überblick über den Markt an Logistik-Dienstleistern. In: WEBER, J (Hrsg.) ; BAUMGARTEN, H (Hrsg.): *Handbuch der Logistik*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1999, S. 219–225
- [Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen 2005] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN: *Verkehr in Zahlen 2005/2006*. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2005
- [Cheung und Muralidharan 2000] CHEUNG, RK ; MURALIDHARAN, B: Dynamic Routing for Priority Shipments in LTL Service Networks. In: *Transportation Science* 34 (2000), S. 86–98
- [Clausen 1994] CLAUSEN, U: Herausforderung für die Verkehrswirtschaft. In: *Jahrbuch der Logistik 1994*. Handelsblatt, Düsseldorf, 1994
- [Cohn 2002] COHN, A: *Composite-Variable Modeling for Large-Scale Problems in Transportation and Logistics.*, MIT, Dissertation, 2002
- [Cohn und Barnhart 2003] COHN, A ; BARNHART, C: Improving crew scheduling by incorporating key maintenance routing decisions. In: *Operations Research* 51 (2003), S. 387–396
- [Crainic 2000] CRAINIC, TG: Service network design in freight transportation. In: *European Journal of Operational Research* 122 (2000), S. 272–288
- [Crainic 2003] CRAINIC, TG: Long-haul Freight Transportation. In: HALL, RW (Hrsg.): *Handbook of Transportation Science*. Norwell : Kluwer, 2003, S. 451–516.
- [Crainic u. a. 1984] CRAINIC, TG ; FEDERLAND, JA ; ROUSSEAU, JM: A tactical planning model for rail freight transportation. In: *Transportation Science* 18 (2) (1984), S. 165–184
- [Crainic und Laporte 1997] CRAINIC, TG ; LAPORTE, G: Planning models for freight transportation. In: *European Journal of Operational Research* 97 (1997), S. 409–438
- [Crainic und Rousseau 1986] CRAINIC, TG ; ROUSSEAU, JM: Multicommodity, multimode freight transportation: A general modeling and algorithmic framework. In: *Transportation Research B: Methodology* 20 (1986), S. 225–242
- [Crainic und Roy 1988] CRAINIC, TG ; ROY, J: OR tools for tactical freight transportation planning. In: *European Journal of Operational Research* 33 (1988), S. 290–297
- [Crainic und Roy 1992] CRAINIC, TG ; ROY, J: Design of Regular Intercity Driver Routes for the LTL Motor Carrier Industry. In: *Transportation Science* 26 (4) (1992), S. 280–295
- [Dantzig und Wolfe 1960] DANTZIG, GB ; WOLFE, P: Decomposition principle for linear programs. In: *Operations Research* 8 (1960), S. 101–111

- [Dederichs und Moock 2001] DEDERICHS, AM ; MOOCK, J: Unternehmenskooperation in der Transportwirtschaft – Ergebnisse einer Studie / Technische Universität Hamburg-Harburg Arbeitsbereich Technikbewertung und Technikgestaltung. 2001. – Forschungsbericht
- [Delorme u. a. 1988] DELORME, L ; ROY, J ; ROUSSEAU, JM: Motor-carriers operations planning models: A state of the art. In: BIANCO, L (Hrsg.) ; LABELLA, A (Hrsg.): *Freight Transport Planning and Logistics*. Berlin : Springer, 1988
- [Desaulniers u. a. 1998a] DESAULNIERS, G ; DESROSIERS, J ; GAMACHE, M ; SOUMIS, F: Crew Scheduling in air transportation. In: CRAINIC, T (Hrsg.) ; LAPORTE, G (Hrsg.): *Fleet Management and Logistics*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts und Dordrecht, Niederlande, 1998, S. 169–186
- [Desaulniers u. a. 1998b] DESAULNIERS, G ; DESROSIERS, J ; IOACHIM, I ; SOLOMON, M ; SOUMIS, F ; VILLENEUVE, D: A unified framework for deterministic time constrained vehicle routing and crew scheduling problems. In: CRAINIC, T (Hrsg.) ; LAPORTE, G (Hrsg.): *Fleet Management and Logistics*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts und Dordrecht, Niederlande, 1998, S. 57–93
- [Desaulniers u. a. 2005] DESAULNIERS, G (Hrsg.) ; DESROSIERS, J (Hrsg.) ; SOLOMON, M (Hrsg.): *Column Generation*. Springer Verlag, Boston, 2005 (Number 5 in GERAD 25th Anniversary Series)
- [Desrosiers u. a. 1995] DESROSIERS, J ; DUMAS, Y ; SOLOMON, MM ; SOUMIS, F: Time Constrained Routing and Scheduling. In: BALL, MO (Hrsg.) ; MAGNANTI, TL (Hrsg.) ; MONMA, CL (Hrsg.) ; NEMHAUSER, GL (Hrsg.): *Handbooks in Operations Research and Management Science: Network Routing* Bd. 8. Elsevier, Amsterdam, 1995, Kap. 2, S. 35–139
- [Domschke und Drexl 2005] DOMSCHKE, W ; DREXL, A: *Einführung in Operations Research*. Springer Verlag, Heidelberg Berlin, 2005
- [Eisenkopf 2004] EISENKOPF, A: *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Kap. Verkehrspolitische und volkswirtschaftliche Rahmenbedingungen, S. 568–574, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004
- [Farvolden und Powell 1994] FARVOLDEN, JM ; POWELL, WB: Subgradient Methods for the Service Network Design Problem. In: *Transportation Science* 28 (1994), S. 256–272
- [Farvolden u. a. 1993] FARVOLDEN, JM ; POWELL, WB ; LUSTIG, IJ: A Primal Partitioning Solution for the Multicommodity Network Flow Problem. In: *Operations Research* 41 (1993), S. 669–693
- [Feige 2004] FEIGE, D: Optimierung von Frachtnetzstrukturen. In: KLAUS, P (Hrsg.) ; KRIEGER, W (Hrsg.): *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004, S. 160–166
- [Fischer 1994] FISCHER, E: Outsourcing von Logistik als strategische Chance. In: *Outsourcing von Logistik*, 1994

- [Fleischmann 2002a] FLEISCHMANN, B: Begriffliche Grundlagen. In: ARNOLD, D (Hrsg.) ; ISERMANN, H (Hrsg.) ; KUHN, A (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. A 1–3 bis A 1–13
- [Fleischmann 2002b] FLEISCHMANN, B: Systeme der Transportlogistik. In: ARNOLD, D (Hrsg.) ; ISERMANN, H (Hrsg.) ; KUHN, A (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Berlin : Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. A1–13 – A1–19.
- [Fleischmann und Gietz 2002] FLEISCHMANN, B ; GIETZ, M: Transport- und Tourenplanung. In: ARNOLD, D (Hrsg.) ; ISERMANN, H (Hrsg.) ; KUHN, A (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. A 3–45 bis A 3–61
- [Fohrmann 2000] FOHRMANN, M: *Güterverkehrszentren als ein Ansatz zur Gestaltung und Bewältigung des Güterverkehrs vor dem Hintergrund einer konzeptionellen Erweiterung um virtuelle Aspekte*. Europäische Hochschulschriften/5, Lang Verlag, Frankfurt am Main, 2000
- [Freichel 1992] FREICHEL, S: Organisation von Logistikservice-Netzwerken – Theoretische Konzeption und empirische Fallstudien. In: PFOHL, HC (Hrsg.): *Total quality management in der Logistik*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1992
- [Gabow 1973] GABOW, H: *Implementation of algorithms for maximum matching on non-bipartite graphs.*, Stanford University, Dissertation, 1973
- [Geyer 2007] GEYER, R: *Parameter- und Sensitivitätstests für Verfahren zur Lösung der Linienverkehrsplanung in speditionellen Netzen*, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2007
- [Goldberg 1997] GOLDBERG, AV: An efficient implementation of a scaling minimum-cost flow algorithm. In: *Journal of Algorithms* 22 (1997), S. 1–29
- [Gorman 1998] GORMAN, MF: An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem. In: *Annals of Operations Research* 78 (1998), S. 51–69
- [Grünert und Irnich 2005a] GRÜNERT, T ; IRNICH, S: *Optimierung im Transport, Band I: Grundlagen*. Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2005
- [Grünert und Irnich 2005b] GRÜNERT, T ; IRNICH, S: *Optimierung im Transport, Band II: Wege und Touren*. Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2005
- [Grünert und Sebastian 2000] GRÜNERT, T ; SEBASTIAN, HJ: Planning models for long-haul operations of postal and express shipment companies. In: *European Journal of Operational Research* 122 (2000), S. 289–309
- [Haghanie 1989] HAGHANIE, AE: Formulation and solution of combined train routing and makeup, and empty car distribution model. In: *Transportation Research B: Methodology* 23 (6) (1989), S. 431–433

- [Hane u. a. 1995] HANE, A ; BARNHART, C ; JOHNSON, EL ; MARSTEN, RE ; NEMHAUSER, GL ; SIGISMONTI, G: The Fleet Assignment Problem: Solving a Large-Scale Integer Program. In: *Mathematical Programming* 70 (1995), S. 211–232
- [Holmberg und Yuan 2003] HOLMBERG, K ; YUAN, D: A Multicommodity Network-Flow Problem with Side Constraints on Paths Solved by Column Generation. In: *INFORMS Journal on Computing* 15 (1) (2003), S. 42–57
- [Höpper 2004] HÖPPER, J: Logistik in Europa. In: KLAUS, P (Hrsg.) ; KRIEGER, W (Hrsg.): *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004, S. 318–324
- [Ihde und Bjelicic 1989] IHDE, G ; BJELICIC, B: Luftfrachtdienste – Integrierte Dienstleistungen zu. In: *Jahrbuch Logistik 1989* Bd. 3. Korschbroich, 1989, S. 63–68
- [Ihde 1991] IHDE, GB: *Transport, Verkehr, Logistik: Gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung*. Bd. 2. Auflage. Verlag Franz Vahlen, München, 1991
- [ILOG 2005] ILOG, Inc: ILOG CPLEX Market-leading optimization technology / ILOG S.A. 2005. – Forschungsbericht
- [ILOG 2007a] ILOG, Inc: *Corporate Profile*. Internet. 18. Mai 2007. – URL <http://www.ilog.com/corporate/profile/>
- [ILOG 2007b] ILOG, Inc: *ILOG CPLEX Callable Library Reference Manual, Version 10.0 bzw. 10.1*, 2007
- [ILOG 2007c] ILOG, Inc: *ILOG CPLEX Parameters Reference Manual*, 2007
- [ILOG 2007d] ILOG, Inc: *World's Leading Mathematical Programming Optimizers*. Internet. 18. Mai 2007. – URL <http://www.ilog.com/products/cplex/index.cfm>
- [Irnich 2002] IRNICH, S: *Netzwerk-Design für zweistufige Transportsysteme und ein Branch-and-Price Verfahren für das gemischte Direkt- und Hubflugproblem.*, RWTH Aachen, Dissertation, 2002
- [Jansen u. a. 2004] JANSEN, B ; SWINKELS, PCJ ; TEEUWEN, GJA ; VAN ANTWERPEN DE FLUITER, B ; FLEUREN, HA: Operational planning of a large-scale multi-modal transportation system. In: *European Journal of Operational Research* 156 (2004), S. 41–53
- [Jünemann 1999] JÜNEMANN, R: *Materialflusssysteme – Systematische Grundlagen*. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, 1999
- [Jones u. a. 1993] JONES, KL ; LUSTIG, I J. ; FARVOLDEN, J M. ; POWELL, WB: Multicommodity Network Flows: The Impact Of Formulation on Decomposition. In: *Mathematical Programming* 70 (1993), S. 95–117
- [Kennington 1978] KENNINGTON, JL: A survey of linear cost multicommodity network flows. In: *Operations Research* 26 (1978), S. 209–236

- [Kentner 2004] KENTNER, W: *Die EU-Osterweiterung aus Sicht der Spedition*. http://www.bochum.ihk.de/.../netmedia_document/data/Die2004. – Vortrag vor dem Verkehrsausschuss der Industrie- und Handelskammer mittleres Ruhrgebiet zu Bochum am 26.04.2005
- [Kim 1997] KIM, D: *Large Scale Transportation Service Network design: Models, Algorithms and Applications.*, MIT, Dissertation, 1997
- [Kim und Barnhart 1999] KIM, D ; BARNHART, C: Transportation Service Network Design: Models and Algorithms. In: WILSON, NHM (Hrsg.): *Computer-Aided Transit Scheduling.*, Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1999, S. 259–283.
- [Kim u. a. 1999] KIM, D ; BARNHART, C ; WARE, K ; REINHARDT, G: Multimodal Express Package Delivery: A Service Network Design Application. In: *Transportation Science* 33 (1999), S. 391–407
- [Klaus 2006] KLAUS: Die TOP 100 der Logistik - Executive Summary. 2006. – Forschungsbericht
- [Klaus und Krieger 2004] KLAUS, P (Hrsg.) ; KRIEGER, W (Hrsg.): *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004
- [Koch 1996] KOCH, U: *Bewertung und Wirtschaftlichkeitsermittlung logistischer Systeme*. Deutscher Universitätsverlag, 1996
- [Koller u. a. 1999] KOLLER, I ; ROTH, WH ; MORCK, W: *HGB, Handelsgesetzbuch, Kommentare*. Verlag C.H. Beck, München, 1999
- [Korf 1994] KORF, W: *Leitfaden für die Berufsausbildung des Spediteurs, Sonderband: der Güterverkehr nach der Tarifaufhebung.*, Deutscher Verkehrs-Verlag, 1994
- [Koskosidis und Powell 1992] KOSKOSIDIS, IA ; POWELL, WB: Shipment Routing Algorithms with Tree Constraints. In: *Transportation Science* 26 (1992), S. 230–245
- [Kuby und Gray 1993] KUBY, MJ ; GRAY, RG: The Hub Network Design Problem with Stopovers and Feeders: The Case of Federal Express. In: *Transportation Research A* 27A (1) (1993), S. 1–12
- [Kummer und Schramm 2004] KUMMER, S ; SCHRAMM, HJ: *Internationales Transport- und Logistikmanagement*. Fakultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien, 2004
- [Lamar u. a. 1990] LAMAR, BW ; SHEFFI, Y ; POWELL, WB: A capacity improvement lower bound for fixed charge network design problems. In: *Operations Research* 38 (4) (1990), S. 704–710
- [Lang 2006] LANG, S: *Internationale Speditionslogistik*, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2006
- [Lübbecke 2001] LÜBBECKE, M: *Engine Scheduling By Column Generation*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2001
- [Lübbecke und Desrosiers 2005] LÜBBECKE, ME ; DESROSIERS, J: Selected Topics in Column Generation. In: *Operations Research* 53 (6) (2005), S. 1007–1023

- [Leung u. a. 1990] LEUNG, J ; MAGNANTI, TL ; SINGHAL, V: Routing in Point-to-Point Delivery Systems: Formulations and Solution Heuristics. In: *Transportation Science* 24 (4) (1990), S. 245–260
- [Macharis und Bontekoning 2004] MACHARIS, C ; BONTEKONING, YM: Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. In: *European Journal of Operational Research* 153 (2004), S. 400–416
- [Magnanti u. a. 1993] MAGNANTI, TL ; MIRCHANDANI, P ; VACHANI, R: The Convex Hull of Two Core Capacitated Network Design Problems. In: *Mathematical Programming* 60 (1993), S. 233–250
- [Magnanti u. a. 1995] MAGNANTI, TL ; MIRCHANDANI, P ; VACHANI, R: Modeling and Solving the Two-Facility Capacity Network Loading Problem. In: *Operations Research* 43 (1) (1995), S. 142–157
- [Magnanti und Wong 1984] MAGNANTI, TL ; WONG, RT: Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. In: *Transportation Science* 18 (1) (1984), S. 1–55
- [Mayer 2005] MAYER, A: *Frachtlogistik an Flughäfen*, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2005
- [McBride 1998] MCBRIDE, RD: Advances in Solving Multicommodity-Flow Problem. In: *Interfaces* 28 (2) (1998), S. 32–41
- [Mengen 1993] MENGEN, A: *Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Hochschule für Unternehmensführung Koblenz*,. Bd. Forschung/16: *Konzeptgestaltung von Dienstleistungsprodukten – Eine Conjoint-Analyse im Luftfrachtmarkt unter Berücksichtigung der Qualitätsunsicherheit beim Dienstleistungskauf*,. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993
- [Minoux 1989] MINOUX, M: Network Synthesis and Optimum Network Design Problems: Models, Solution Methods and Applications. In: *Network* 19 (3) (1989), S. 313–360
- [Nemhauser 1994] NEMHAUSER, G: The Age of Optimization: Solving Large-Scale Real-World Problems. In: *Operations Research* 42 (1) (1994), S. 5–13
- [Nemhauser und Wolsey 1988] NEMHAUSER, GL ; WOLSEY, LA: *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, New York, 1988
- [Neumann und Morlock 1993] NEUMANN, K ; MORLOCK, M: *Operations Research*. Hanser, Wien, 1993
- [Noppe 2003] NOPPE, R: *Nationale und Europäische politische Regulierung im Transport- und Postsektor*. <http://www.input-consulting.com/download/Regulierung-RN.pdf>. 2003. – Referat für die Branchenkonferenz des ver.di Landesbezirks Baden-Württemberg in Stuttgart
- [Otremba und Waibel 2004] OTREMB A, M ; WAIBEL, F: Logistik in Osteuropa. In: KLAUS, P (Hrsg.) ; KRIEGER, W (Hrsg.): *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004, S. 318–324

- [Otrembra 2004] OTREMBRA, M ; KLAUS, P (Hrsg.): *Internationale Wettbewerbsfähigkeit im Straßengüterverkehr: Eine Untersuchung zur künftigen Wettbewerbsfähigkeit deutscher Straßengüterverkehrsunternehmen nach der EU-Osterweiterung*. Deutscher Verkehrs-Verlag, 2004
- [Paraschis 1989] PARASCHIS, IN: *Optimale Gestaltung von Mehrprodukt-Distributions-systemen*. Physika, Heidelberg, 1989
- [Pfohl 2000] PFOHL, H-C: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 6. Auflage. Springer Verlag Berlin, 2000
- [Pfohl 1997] PFOHL, H-Ch: *Vahlers Großes Logistikleikon*. Kap. Strategische Logistikplanung, S. 630–633, C.H. Beck, München, 1997
- [Piontek 1994] PIONTEK, J: *Internationale Logistik*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1994
- [Pompl 2002] POMPL, W: *Luftverkehr – Eine ökonomische und politische Einführung*. 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [Pongas und Tronet 2004a] PONGAS, E ; TRONET, V: Extra-EU Handel der Mitgliedsstaaten nach Verkehrszweigen. In: *Statistik kurz gefasst, Außenhandel und Verkehr*. Statistisches Bundesamt, 2004 (Thema 6 / Thema 7 – 3/2004)
- [Pongas und Tronet 2004b] PONGAS, E ; TRONET, V: Intra- und Extra-EU Handel im Seeverkehr. In: *Statistik kurz gefasst, Außenhandel und Verkehr*. Statistisches Bundesamt, 2004 (Thema 6 / Thema 7 – 4/2004)
- [Powell 1986] POWELL, WB: A Local Improvement Heuristic For The Design Of Less-than-Truckload Motor Carrier Networks. In: *Transportation Science* 20 (1986), S. 246–257
- [Powell und Sheffi 1983] POWELL, WB ; SHEFFI, Y: The Load Planning Problem of Motor Carriers: Problem Description and Proposed Solution Approach. In: *Transportation Science* 17 (1983), S. 471–480
- [Powell und Sheffi 1989] POWELL, WB ; SHEFFI, Y: Design and implementation of an interactive optimization system for network design in the motor carrier industry. In: *Operations Research* 37 (1989), S. 12–29
- [Rardin 2000] RARDIN, LR: *Optimization In Operations Research*. Prentice Hall, 2000
- [Ropke und Cordeau 2006] ROPKE, S ; CORDEAU, JF: Branch-and-Cut-and-Price for the Pickup and Delivery Problem with Time-Windows / CRT, Montreal, Canada. 2006. – Forschungsbericht
- [Roy und Crainic 1992] ROY, J ; CRAINIC, TG: Improving Intercity Freight Routing with a Tactical Planning Model. In: *Interfaces* 22 (1992), S. 31–44
- [Roy und Delmore 1989] ROY, J ; DELMORE, L: NETPLAN: A network optimization model for tactical planning in less-than-truckload motor-carrier industry. In: *INFOR* 27 (1) (1989), S. 22–35

- [Savelsbergh 1997] SAVELSBERGH, MWP: A branch-and-price algorithm for the generalized assignment problem. In: *Operations Research* 45 (6) (1997), S. 831–841
- [Schmid 2000] SCHMID, N: *Informationsbedarf der Akteure einer integrierten, intermodalen Logistikkette*, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2000
- [Schmidthöfer 2004] SCHMIDTHÖFER, A: *Taktische Bestimmung von Tourgebieten für die speditionelle Tourenplanung*. Shaker Verlag, 2004
- [Seidelmann 2002] SEIDELMANN, C: Kombiniertes Verkehr. In: ARNOLD, D (Hrsg.) ; ISERMANN, H (Hrsg.) ; KUHN, A (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, H (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. C 3–12 – 3–19
- [Shen 2004] SHEN, S: *Logistics Service Network Design: Models, Algorithms and Applications*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2004
- [Shenoi 1996] SHENOI, RG: *Integrated Airline Schedule Optimization: Models and Solution Methods*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 1996
- [Sierke 1997] SIERKE, B: Logistikplanung. In: BLOECH, J (Hrsg.) ; IHDE, G (Hrsg.): *Vahrens Großes Logistiklexikon*. C.H. Beck, München, 1997, S. 627–628
- [Soumis 1997] SOUMIS: Decomposition and column generation. In: DELL’AMICO, M (Hrsg.) ; MAFFIOLI, F (Hrsg.) ; MARTELLO, S (Hrsg.): *Annotated Bibliographics in Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, NY, 1997, S. 115–126
- [Stahlknecht und Hasenkamp 1997] STAHLKNECHT, P ; HASENKAMP, U: *Einführung in die Wirtschaftsinformatik*. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 1997
- [Statistisches Bundesamt 2007] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Bevölkerung nach Bundesländern*. 24.05 2007. – URL <http://www.destatis.de/download/d/bevoe/BevoelkerungBundeslaendern.pdf>
- [Stumpf 1998] STUMPF, P: *Tourenplanung im speditionellen Güterfernverkehr*. Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V., 1998
- [Terhorst 1992] TERHORST, R: *Das Modell eines Frachtflughafens und sein Beitrag zur logistischen Optimierung der Luftfrachttransportkette – Eine theoretische Analyse als Beitrag zur Wirtschaftlichkeit des Luftfrachtsystems*, Universität Köln, Dissertation, 1992
- [o. V. 2001] V. o.: *Handelsgesetzbuch (HGB)*. 37., überarbeitete Auflage. Deutscher Taschenbuch Verlag, März 2001 2001
- [o. V. 2007a] V. o.: *Logistikdienstleister – Aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie*. 2007. – URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Logistikdienstleister>
- [o. V. 2007b] V. o.: *Panorama of Transport / Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft, Europäische Kommission, Eurostat*. 2007. – Forschungsbericht
- [Vanderbeck 2000] VANDERBECK, F: On Dantzig-Wolfe Decomposition In Integer Programming And Ways To Perform Branching in a Branch-And-Price Algorithm. In: *Operations Research* 48 (1) (2000), S. 111–128

- [Vanderbeck 2005] VANDERBECK, F: Implementing mixed integer column generation. In: DESAULNIERS, G (Hrsg.) ; DESROSIERS, J (Hrsg.) ; SOLOMON, M (Hrsg.): *Column Generation*. Springer Verlag, Boston, 2005
- [Vanderbeck und Wolsey 1996] VANDERBECK, F ; WOLSEY, LA: An exact algorithm for IP column generation. In: *Operations Research Letters* 19 (4) (1996), S. 151–159
- [Von Helldorff 2002] VON HELLDORFF, WD: Strategie eines führenden Luftfrachtspediteurs. In: *9. Luftverkehrsforum, Luftfrachtverkehr – globaler Dienstleister für Wirtschaft und Industri*. Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. – DVWG, Reihe B –Seminar-, Bergisch Gladbach, 2002
- [Wieberneit 2007] WIEBERNEIT, N: Service Network Design for Freight Transportation. In: *OR Spectrum* angenommen (2007)
- [Wittmann 1979] WITTMANN, W: *Handwörterbuch der Organisation*. Kap. Information, S. 699–707, Poeschel Verlag, Stuttgart, 1979
- [Wlcek 1998] WLCEK, H: *Gestaltung der Güterverkehrsnetze von Sammelgutspeditionen*. Nürnberg : Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V., 1998
- [Wohler und Kille 2004] WOHLER, M ; KILLE, C: KEP-Märkte und Dienste. In: KLAUS, P (Hrsg.) ; KRIEGER, W (Hrsg.): *GABLER LEXIKON LOGISTIK. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004, S. 231–235
- [Wolsey 1998] WOLSEY, LA: *Integer Programming*. Wiley, Chichester, New York, 1998