

**Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen
Personennahverkehr:
Ähnlichkeitsaspekte in der
fahrplanübergreifenden Optimierung**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum politicarum (dr. rer. pol.)
im Fach Wirtschaftsinformatik

eingereicht an der
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Universität Paderborn

von Dipl. Wirt.-Inform. Boris Amberg

GUTACHTER

Prof. Dr. Natalia Kliewer

Prof. Dr. Leena Suhl

Paderborn, im August 2014

Inhaltsverzeichnis

I	Stand der Technik und Forschungsbedarf	1
1	Einleitung und Motivation	3
2	Operative Planung im ÖPNV	9
2.1	Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV-Planungsprozess	9
2.1.1	Umlaufplanung	11
2.1.2	Dienstplanung	13
2.2	Varianten der Umlauf- und Dienstplanung	15
2.2.1	Sequenzielle Planung – Fahrplanbasierte Umlaufbildung und umlaufbasierte Dienstbildung	16
2.2.2	Unabhängige Planung – Fahrplanbasierte Dienstbildung	18
2.2.3	Teilintegrierte Umlauf- und Dienstbildung	19
2.2.4	Integrierte Umlauf- und Dienstbildung	19
2.3	Ähnlichkeit bzw. Regelmäßigkeit in der Planung	21
2.3.1	Regelmäßigkeit von Fahrplänen	21
2.3.2	Ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne	25
2.3.3	Verwandte weitere Planungsaufgaben	26
2.4	Unterstützung des Planungsprozesses durch Softwaresysteme mit ma- thematischen Optimierungsmethoden	28
2.4.1	Ressourceneinsatzplanung als Optimierungsprobleme betrachtet	28
2.4.2	Unterstützung beim Finden von kosteneffizienten Ressourcen- einsätzen	31
2.4.3	Unterstützung beim Finden von ähnlichen Ressourceneinsätzen	32
2.4.4	Zusammenfassung	38
3	Mathematischer Hintergrund zur Optimierung von Umläufen und Diens- ten	39
3.1	Relevante Modellarten	39
3.1.1	Set-Partitioning/Covering-Problem	39

3.1.2	Netzwerkflussprobleme	40
3.2	Relevante Optimierungstechniken	46
3.2.1	Lagrange-Relaxation mit Subgradienten-Verfahren	46
3.2.2	Column Generation	48
3.2.3	Branch-and-Bound	51
4	Stand der Forschung	53
4.1	Modelle und Methoden für einen kosteneffizienten Ressourceneinsatz .	53
4.1.1	Ein- und Mehr-Depot-Busumlaufplanung	53
4.1.2	Dienstplanung	55
4.1.3	Partielle Integration von Umlauf- und Dienstplanung	56
4.1.4	Vollständige Integration von Umlauf- und Dienstplanung	59
4.2	Behandlung praktischer Anforderungen zur Dienstbildung in Ansätzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung	65
4.2.1	Ressourcen(verbräuche) eines Dienstes	66
4.2.2	Pausenregeln	68
4.2.3	Fahrzeugwechsel	69
4.2.4	Ablösemöglichkeiten	71
4.2.5	Dienstmix	72
4.3	Modelle und Methoden zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeit	73
4.3.1	Ähnlichkeit für einen Tag – Referenzplan-basierte Ansätze . .	74
4.3.2	Ähnlichkeit für mehrere Tage – Regelmäßigkeit-basierte Ansätze	81
4.3.3	Verwandte Planung für mehrere Tage ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeit	85
5	Handlungsbedarf und Zielsetzung	91
II	Lösbarkeit einzelner Ressourceneinsatzplanungsprobleme ohne fahrplanübergreifende Optimierung	99
6	Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung	101
6.1	Modelltechnische und methodische Grundlage	101
6.1.1	Modellierung	102
6.1.2	Lösungsansatz	105
6.2	Basis-Column-Generation-Framework	107
6.2.1	Netzwerkrepräsentation der zu planenden Ressourcen	109
6.2.2	Lösen von Master-Problemen mit Lagrange-Relaxation	114

6.2.3	Spalten-Management	115
6.2.4	Lösen von Column Generation Pricing-Problemen als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme mit Dynamischer Programmierung	115
6.2.5	Pricing-Management	119
6.2.6	Bestimmung ganzzahliger Lösungen	121
6.3	Zusammenfassung	123
7	Umsetzung unternehmensspezifischer Regelungen	125
7.1	Anforderungen an die Dienstbildung	125
7.1.1	Katalog individueller Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten	126
7.1.2	Berücksichtigung von Pausenmöglichkeiten	129
7.1.3	Berücksichtigung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten	134
7.1.4	Berücksichtigung von Ablösemöglichkeiten	139
7.1.5	Besetzbarkeit von Fahrzeugen außerhalb der Depots	140
7.2	Fallstudie zur Umlauf- und Dienstplanung	142
7.2.1	Datenbasis des zu untersuchenden Szenarios	142
7.2.2	Zu berücksichtigende betriebsspezifische Regelungen	143
7.2.3	Ergebnisse	146
7.3	Zusammenfassung	148
III	Neue Ansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen	151
8	Bewertung von Ähnlichkeit	153
8.1	Definition r -regelmäßiger Fahrten bzw. Aufgaben	154
8.2	Ähnlichkeit von Fahrplänen	155
8.2.1	Visualisierungsmittel und qualitative Beurteilung	155
8.2.2	Kennzahlen und quantitative Beurteilung	159
8.3	Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen	163
8.3.1	Wiederverwendbarkeit von Ressourceneinsätzen	164
8.3.2	Regelmäßigkeit unterschiedlicher Ressourceneinsätze	168
8.4	Zusammenfassung	173
9	Ressourceneinsatzplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen	175
9.1	Problemdefinition	175

9.2	Neue Ansätze für tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan . . .	177
9.2.1	Bestimmung eines Referenzplanes	178
9.2.2	Modellierung RSP-IT-RS: Verknüpfen von Referenzplan und Elastic Cost Constraint	180
9.2.3	Lösungsansatz: Column Generation und ressourcenbeschränkte kürzeste Wege	183
9.2.4	Analyse numerischer Ergebnisse	189
9.3	Neue Ansätze für tagesübergreifende Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster	193
9.3.1	Implizite Muster durch heuristische Verfahren	193
9.3.2	Modellierung S-RSP-IT-RP: Verknüpfen von expliziten Mustern und Regelmäßigkeitsgruppen	196
9.3.3	Lösungsansatz: Column Generation, ressourcenbeschränkte kürzeste Wege, Branching-Prioritäten, Lagrange-Heuristiken und Variablen-Fixierung	203
9.3.4	Auswahl expliziter Fahrten- bzw. Aufgabenmuster	214
9.3.5	Analyse numerischer Ergebnisse	217
9.4	Preprocessing für ähnliche Pläne: Fixieren von Fahrten- bzw. Aufgabensequenzen	225
9.4.1	Grundschema	226
9.4.2	Erweiterte Fixierungsmöglichkeiten durch Fahrten- bzw. Aufgabenmuster	227
9.4.3	Analyse numerischer Ergebnisse	228
9.5	Zusammenfassung	231

IV Einbettung der Ähnlichkeitsansätze in Planungsvarianten 233

10	Sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen	235
10.1	Problemdefinition – VSP-CSP-IT	235
10.2	Lösungsschema für VSP-CSP-IT	236
10.3	Bilden von kostenoptimalen, ähnlichen Umlaufplänen mittels globaler Flussdekomposition über mehrere Umlaufplanungsnetzwerke	238
10.3.1	Flussdekomposition auf Basis von RSP-IT-RS	240
10.3.2	Flussdekomposition auf Basis von S-RSP-IT-RP	245
10.4	Bilden von ähnlichen Umlaufplänen mit erlaubten Mehrkosten	249
10.4.1	Umlaufplanung auf Basis von RSP-IT-RS	250

10.4.2	Umlaufplanung auf Basis von S-RSP-IT-RP	255
10.5	Bilden von ähnlichen (Tages-)Umläufen auf Basis von Umlaufblöcken	258
10.5.1	Tageweises Vorgehen	260
10.5.2	Tagesübergreifendes Vorgehen	263
10.6	Bilden von ähnlichen Diensten basierend auf (ähnlichen) Umläufen . .	264
10.6.1	Sequenzielle Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS	265
10.6.2	Sequenzielle Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP	265
10.7	Analyse numerischer Ergebnisse	266
11	Teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszie-	273
	len	
11.1	Problemdefinition – PVCSP-IT	273
11.2	Lösungsschema für PVCSP-IT	274
11.3	Bilden von kosteneffizienten, ähnlichen Bündeln an Umlaufplänen . .	276
11.4	Bilden von ähnlichen Diensten basierend auf (ähnlichen) Bündeln an Umlaufplänen	277
11.4.1	Teilintegrierte Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS	277
11.4.2	Teilintegrierte Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP	278
11.5	Bilden von (ähnlichen) Umläufen basierend auf ähnlichen Diensten . .	278
11.6	Analyse numerischer Ergebnisse	279
12	Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen	285
12.1	Problemdefinition – IVCSP-IT	285
12.2	Lösungsschema für IVCSP-IT	286
12.3	Integrierte Umlauf- und Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS	288
12.3.1	Modellierung	288
12.3.2	Lösungsansatz	290
12.4	Integrierte Umlauf- und Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP . .	293
12.4.1	Modellierung	293
12.4.2	Lösungsansatz	296
12.5	Analyse numerischer Ergebnisse	299
13	Zusammenfassung und Ausblick	303
	Literatur	308
A	Anhang – Testinstanzen	321
A.1	Dienstarten	321
A.2	Instanzen	321

B Anhang – Beispiele zur Reduktion von Fahrtenpaaren**327**

Abbildungsverzeichnis

2.1	Operative Planung als Teil des Planungsprozesses im ÖPNV	10
2.2	Grundbegriffe der Umlaufplanung am Beispiel einer Aufteilung von zu leistenden Servicefahrten auf zwei Umlaufblöcke	13
2.3	Grundbegriffe der Umlauf- und Dienstplanung am Beispiel einer Aufteilung von zu leistenden Servicefahrten auf zwei Umlaufblöcke und zwei Dienste	15
2.4	Sequenzielle Umlauf- und Dienstbildung	16
2.5	Integrierte Umlauf- und Dienstbildung	20
2.6	Ganglinien für Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer mittelgroßen Stadt an den Wochentagen Montag bis Freitag und bzw. oder Samstag zu bedienen sind	22
2.7	Ganglinie für gleiche und unterschiedliche Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer großen Stadt an den Wochentagen Montag bis Freitag zu bedienen sind	23
2.8	Auswirkungen von geringfügig unterschiedlichen Fahrplänen auf die Ähnlichkeit der Dienstpläne bei unabhängiger Dienstplanung mit dem Ziel Kosteneffizienz nach [Steinzen, 2007]	33
2.9	Dienstplanung mit Nutzen eines Referenzplanes zur Erstellung ähnlicher Dienste: Die Ähnlichkeit zwischen den Plänen einzelner Tagen ist abhängig von der Qualität des Referenzplans	35
2.10	Zeitliche Lage, Start- und Endhaltestellen und Ablösepunkte der zu verplanenden regelmäßigen Servicefahrten R1, R2, R3, R4 und der unregelmäßigen Servicefahrt U1	36
2.11	Referenzplan zur Planung der regelmäßigen Servicefahrten R1, R2, R3, R4	36
2.12	Optimale Lösung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems für Tag 1 und Tag 2 BEI Planung der regelmäßigen Fahrten R1, R2, R3, R4 nach Referenzplan aus Abbildung 2.11	37
2.13	Optimale Lösung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems für Tag 1 und Tag 2 OHNE Planung der regelmäßigen Fahrten R1, R2, R3, R4 nach Referenzplan aus Abbildung 2.11	37

3.1	Beispiele für eine Connection-basierte und eine Time-Space-basierte Netzwerkrepräsentation	42
5.1	Tageweise und tagesübergreifende Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen	96
6.1	Schematische Übersicht über MDIVCS-Opt als Beispiel für ein System zur Umlauf- und Dienstplanoptimierung	108
6.2	Durch unterschiedliche tageszeitabhängige Leerfahrten notwendige zusätzliche Modellierung von Verbindungskanten im Vergleich zu einer Modellierung mit identischen Leerfahrtszeiten	110
6.3	Reduktion der zur Diensterzeugung notwendigen Rechenzeit durch paralleles Pricing auf mehreren Threads	120
6.4	Reduktion der notwendigen Rechenzeit bei der Bestimmung zulässiger Lösungen für integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit einem zusätzlichen heuristischen Abbruchkriterium LB/UB-Ratio	122
7.1	Katalog möglicher Ausprägungen und Kombinationen von Pausen (P), Fahrzeugwechseln (F) und Ablösen (A)	127
7.2	Explizite und implizite Pausenrepräsentation	130
7.3	Identische Kantenmenge aus den Umlaufplanungsnetzwerken zweier Depots	137
7.4	Aufbau der Netzwerkschicht einer Depotgruppe bestehend aus zwei Depots	139
7.5	Ganglinie der Servicefahrten des zu untersuchenden Werktages	143
7.6	Vergleich der Dienstplanstrukturen – Unterschiedliche Dienst- und Schichttypen je Dienstplan absolut und anteilig zusammengefasst	148
8.1	Beispiel A - Ganglinien zu unregelmäßigen Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer mittelgroßen Stadt von Montag bis Freitag bedient werden sollen und durchgehend über den Tag verteilt sind	157
8.2	Beispiel B - Ganglinien zu lokal begrenzten unregelmäßigen Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer Großstadt von Montag bis Freitag bedient werden sollen und nur in den Abend- und Nachtstunden anfallen	158
8.3	Dimensionen zur Bewertung der Ähnlichkeit in der Ressourcen-einsatzplanung	164
8.4	Beispiel zum Distanzmaß (8.11) basierend auf regelmäßigen Fahrtensequenzen und Berücksichtigung von Aus- und Einrückfahrten mit zwei Ressourceneinsatzplänen	172

9.1	Verlauf der (un-)regelmäßigen Fahrten an den betrachteten Tagen . . .	190
9.2	Fixieren von Fahrtenketten bei der All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik nach [Amberg et al., 2011]	195
9.3	Unterschiedliche Time-Space-Netzwerke zur Ressourceneinsatzplanung bei drei Tagen mit zwei regelmäßig stattfindenden Fahrten 1 und 2, sowie drei unregelmäßig stattfindenden Fahrten 3, 4 und 5	200
9.4	Mögliche Dienste und Muster bei drei Tagen mit zwei regelmäßig stattfindenden Fahrten 1 und 2, sowie drei unregelmäßig stattfindenden Fahrten 3, 4 und 5 in Modell (9.17)-(9.22)	201
9.5	Möglichkeiten zur Bildung von Fahrtensequenzen anhand von Fahrplaninformationen am Beispiel einer Bestimmung von Fahrtenpaaren ausgehend von Fahrt 1	216
9.6	Anteile vollständig identischer Dienste und Anzahl genutzter Muster in den Ressourcenplänen bei zunehmender Auswahl expliziter Fahrten-/Aufgabenmuster	223
9.7	Anteile vollständig identischer Dienste und Anzahl genutzter Muster in den Ressourcenplänen bei zunehmender Gewichtung der Bonuswerte für explizite Fahrten-/Aufgabenmuster	225
10.1	Sequenzielle Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung	237
10.2	Lokale Dekomposition eines Flusses nach FIFO, First In First Out und LIFO, Last In First Out nach [Kliwer, 2005]	238
10.3	Möglichkeiten zur Bestimmung von ähnlichen Umläufen bei einer globalen Flussdekomposition über mehrere Netzwerke nach [Amberg et al., 2011]	240
10.4	Flussmodell zur Umlaufplanung mit Umlaufblöcken als Kanten und einem Depot	251
10.5	Umlaufblöcke zu Abbildung 10.4 mit Distanz zu einem Referenzplan nach Modell (10.5)-(10.10)	253
10.6	Grundsätzliche Vorgehensweisen beim Bilden von ähnlichen Tagesumläufen aus Umlaufblöcken für die Fahrpläne mehrerer Tage	259
10.7	Gegenüberstellung von Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen bei rein kosteneffizienten Umlaufplänen als Ausgangspunkt für die Dienstplanung (Bilder I-III) sowie bei ähnlichen Umlaufplänen (Bilder IV-VI)	270
11.1	Teilintegrierte Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung	275

11.2	Gegenüberstellung von Kosten und Wiederholrate (Bilder I-IV) sowie von Kosten und dem Anteil identisch bedienter Fahrten (Bilder V-VIII)	281
11.3	Gegenüberstellung von Kosten und Distanz in Sequenzen regelmäßiger Fahrten	282
12.1	Integrierte Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung	287
A.1	Testinstanzenset A	322
A.2	Testinstanzenset B	323
A.3	Testinstanzenset C	324
A.4	Testinstanzenset D	325

Tabellenverzeichnis

2.1	Verteilung der Fahrten zur Ganglinie aus Abbildung 2.7	24
3.1	Beispielfahrplan für Netzwerkmodelle	41
5.1	Möglichkeiten zur Konstruktion ähnlicher Pläne in Ansätzen aus der Literatur	92
5.2	Potenziale aus Ansätzen in der Literatur für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen	93
5.3	Grenzen aus Ansätzen in der Literatur zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen	94
6.1	Generelle Ressourcenverbräuche auf den Kanten im Dienstelement-Abschnitt basierten Time-Space-Dienstgenerierungsnetzwerk	113
6.2	Unterschiede von heuristischer Lösung der Pricing-Probleme zu exakter Lösung	118
7.1	Szenarioübersicht	143
7.2	Generelle Eigenschaften der Dienstarten (mit Zeiten in hh:mm)	144
7.3	Schichtlagen (mit Zeiten in hh:mm)	145
7.4	Ergebnisübersicht über das Werktagszenario mit Zeiten in hh:mm	147
8.1	Gültigkeit der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen A und B aus den Abbildungen 8.1 und 8.2	161
8.2	Gültigkeit der Dauer der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen A und B aus den Abbildungen 8.1 und 8.2	161
8.3	Gültigkeit der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen B aus Abbildung 8.2 in Zeiträumen mit regelmäßigen Servicefahrten	162
8.4	Gültigkeit der Dauer der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen B aus Abbildung 8.2 in Zeiträumen mit regelmäßigen Servicefahrten	162

8.5	Kennzahlen zur Ähnlichkeitsbewertung von Ressourceneinsätzen (k) und Ressourceneinsatzplänen (K) auf Basis der vollständigen Wiederholbarkeit von Umläufen bzw. Diensten (V) oder auf Basis einer partiellen Wiederholbarkeit (P), unter Berücksichtigung (r)-regelmäßiger Fahrten	174
9.1	Ähnlichkeitbewertungen zu mit Referenzplänen ermittelten Ressourceneinsatzplänen für fünf Tage ohne Erhöhung der Kosten	192
9.2	Kombinationsmöglichkeiten von kompatiblen Fahrten zu Fahrtensequenzen für 211 Fahrten eines Beispielfahrplans bei unterschiedlicher Sequenzlänge	215
9.3	Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen für Modell S-RSP-IR-RP	220
9.4	Ergebnisse zur Auswahl expliziter Fahrtenpaare in unterschiedlichem Umfang	222
9.5	Ergebnisse zur Belohnung expliziter Fahrtenpaare mit unterschiedlicher Gewichtung	224
9.6	Reduktion der Fahrtenmenge im Testset B durch Fixierung stabiler Fahrtenketten (f) verglichen mit Fahrtenketten in einer kosteneffizienten Lösung ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung (c) und einer kosteneffizienten Lösung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung (c.s)	229
9.7	Ergebnisse zur Ressourceneinsatzplanung für mehrere Tage mit und ohne Preprocessing durch Fixierung von Fahrten-/Aufgabensequenzen	230
10.1	Laufzeit, Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen zur Umlaufplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten	268
10.2	Laufzeiten in hh:mm:ss bei einer sequenziellen Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen	270
11.1	Laufzeiten in hh:mm:ss bei einer teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen	282
12.1	Laufzeit, Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten . . .	300
A.1	Generelle Eigenschaften der Dienstarten (mit Zeiten in hh:mm) . . .	321
A.2	Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset A . . .	322
A.3	Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset B . . .	323
A.4	Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset C . . .	324

A.5	Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset D . . .	325
B.1	Beispiel (I) zur Reduktion von zu berücksichtigenden Fahrtenpaaren bei Nutzung der nächsten Nachfolgefahrten an 129 Haltestellen bei einem Fahrplan mit 1.356 Fahrten	327
B.2	Beispiele (II), (III) und (III) zur Reduktion von zu berücksichtigenden Fahrtenpaaren bei Nutzung der nächsten Nachfolgefahrten an 129 Haltestellen in nach (II), (III) und (IV) definierten Zeiträumen bei einem Fahrplan mit 1.356 Fahrten	329

Liste der Algorithmen

3.2.1 Grundversion Subgradienten-Verfahren	48
3.2.2 Column Generation-Verfahren	50
3.2.3 Heuristik zur Anpassung von Lagrange-Multiplikatoren	51
6.1.1 Lösungsschema für Modell MD-IVCSP (6.1)-(6.6)	106
7.1.1 Label Setting unter Berücksichtigung verschiebbarer Verbindungsfahrten bei im TSN-Modell implizit modellierten Pausen	133
9.2.1 Label Setting mit Distanzberücksichtigung zu einem gegebenen Referenzplan	188
9.3.1 All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik	195
9.3.2 Label Setting mit Berücksichtigung von Fahrten-/Aufgabenmustern	209
9.4.1 Heuristik zur Fixierung von Fahrtenketten	227
10.3.1 Globale Flussdekomposition über die Umlaufplanungsnetzwerke mehrerer Tage bei Nutzung eines Referenzplans	243
10.3.2 Globale Flussdekomposition über die Umlaufplanungsnetzwerke mehrerer Tage mit Hilfe von regelmäßigen Mustern	248

Abkürzungsverzeichnis

3P	Three-Phase Approach
CSP	Crew Scheduling Problem
CSP-IT-RS	Crew Scheduling Problem with Irregular Tasks using a Reference Schedule
IP	Integer Program
IVCSP	Integrated Vehicle and Crew Scheduling Problem
IVCSP-IT	Integrated Vehicle and Crew Scheduling Problem with Irregular Trips and Tasks from various timetables
LH _{fix}	Lagrange-Heuristik Fix
LH _x	Lagrange-Heuristik X
LH _z	Lagrange-Heuristik Z
LDP	Lagrange-Dual-Problem
LP	Linear Program
MCFP	Multicommodity Flow Problem
MD-IVCSP	Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling Problem (Formulierung (6.1)-(6.6))
MD-IVCSP-IT-RS	Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling Problem with Irregular Tasks using a Reference Schedule (Formulierung (12.1)-(12.8))
MDIVCS-Opt	Multiple Depot (Integrated) Vehicle and Crew Scheduling - Optimizer
MDVSP	Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problem
MFP	Minimum Cost Flow Problem
MIP	Mixed-Integer Program
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
RCSP	Resource Constrained Shortest Path Problem
RH	Rolling Horizon Approach
RSP	Resource Scheduling Problem (Formulierung (9.1)-(9.3))
RSP-IT-RS	Resource Scheduling Problem with Irregular Tasks using a Reference Schedule (Formulierung (9.5)-(9.9))

RSP-IT-RS-SD	Resource Scheduling Problem with Irregular Tasks using a Reference Schedule simultaneously for Several Days (Formulierung (9.10)-(9.14))
S-CSP-IT-RP	Simultaneous Crew Scheduling Problem with Irregular Tasks and Regular Patterns
S-MD-IVCSP-IT-RP ...	Simultaneous Multiple Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling Problem with Irregular Tasks and Regular Patterns (Formulierung (12.18)-(12.26))
S-RSP-IT-RP	Simultaneous Resource Scheduling Problem with Irregular Tasks and Regular Patterns (Formulierung (9.17)-(9.22))
S-RSP-IT-RP-CC	Simultaneous Resource Scheduling Problem with Irregular Tasks, Regular Patterns, and Cost Constraint (Formulierung (9.23)-(9.30))
S-VSP-IT-RP-MCFP ...	Simultaneous Multi Commodity Flow Vehicle Scheduling Problem with Irregular Trips and Regular Patterns (Formulierung (10.12)-(10.18))
SCP	Set-Covering Problem
SDVSP	Single-Depot Vehicle Scheduling Problem
SP	Shortest Path Problem
SPP	Set-Partitioning-Problem
TSN	Time-Space-Network
VCSP	Vehicle and Crew Scheduling Problem
VCSP-IT	Vehicle and Crew Scheduling Problem with Irregular Tasks from various timetables
VDC-NWFP	Vehicle Duty Construction Network Flow Problem (Formulierung (10.24)-(10.27))
VDC-SPP	Vehicle Duty Construction Set Partitioning Problem (Formulierung (10.20)-(10.23))
VSP	Vehicle Scheduling Problem
VSP-IT-RS-MCFP	Multi Commodity Flow Vehicle Scheduling Problem with Irregular Trips using a Reference Schedule (Formulierung (10.5)-(10.10))

Teil I

Stand der Technik und Forschungsbedarf

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

Zwei wirtschaftlich existenzielle Aufgaben im Planungsprozess eines Unternehmens des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) sind die Fahrzeugumlaufplanung und die Fahrdienstplanung, die im Folgenden kurz als Umlaufplanung und Dienstplanung bezeichnet werden. Bei der *Umlaufplanung* werden die für die Personenbeförderung geplanten Fahrten eines Tages Fahrzeugen zugeordnet und bei der *Dienstplanung* werden die zu leistenden Fahrzeugaktivitäten auf Dienste für das Fahrpersonal verteilt. Die Betriebskosten eines Verkehrsunternehmens für die produzierte Fahrleistung entfallen dabei nach [Leuthardt, 2005] zu ca. 20 bis 25 Prozent auf die eingesetzten Fahrzeuge und zu ca. 54 bis 58 Prozent auf das Fahrpersonal.

Um diese beiden sehr komplexen Planungsaufgaben zu bewältigen, nutzen viele Verkehrsunternehmen seit Jahren computergestützte Planungssysteme. Ein entscheidender Bestandteil der Systeme auf dem Markt für Planungssoftware sind dabei Optimierungskomponenten geworden. Diese Entwicklung ist einerseits darauf zurückzuführen, dass Verkehrsunternehmen aufgrund des zunehmenden Kostendrucks verstärkt nach Möglichkeiten für einen optimalen, kosteneffizienten Einsatz der im Unternehmen zur Verfügung stehenden Ressourcen suchen. Andererseits spielt die intensive Erforschung mathematischer Optimierungsverfahren und -modelle auf diesem Gebiet eine entscheidende Rolle. So bieten z.B. die Planungssysteme Hastus, IVU.plan und MOBILE-Plan eine Planungsunterstützung durch mathematische Optimierung an. Mit den Optimierungskomponenten können Planern der Verkehrsbetriebe mathematisch bewertete Möglichkeiten für einen kosteneffizienten Ressourceneinsatz aufgezeigt werden. So können oftmals auch Möglichkeiten zur Freisetzung von Ressourcen identifiziert werden, die zur Verbesserung des Fahrgastangebotes genutzt werden können.

Für einen erfolgreichen und vorteilhaften Einsatz von mathematischer Optimierungssoftware in der Planung ist neben kosteneffizient zusammengestellten Ressourceneinsatzplänen allerdings noch ein weiterer Faktor von zentraler Bedeutung: die Akzeptanz der vorgeschlagenen Pläne.

Diese Akzeptanz hängt davon ab, ob ein Plan Qualitätskriterien erfüllt, die explizit oder implizit von Planern bzw. vom Fahrpersonal gewünscht sind. Ein entscheidendes Qualitätskriterium ist die *Regelmäßigkeit bzw. Ähnlichkeit* von Ressourceneinsatzplänen. An verschiedenen Tagen bedienen Verkehrsunternehmen zu einem Großteil identische Fahrten. Für die einzelnen Tage können mit den bisher erforschten mathematischen Optimierungsmodellen und -verfahren zwar kosteneffiziente Ressourceneinsatzpläne berechnet werden. Allerdings kann das Ergebnis sehr stark variieren: Obwohl die Fahrtenmenge verschiedener Tage als Input für die Umlauf- und Dienstplanung sehr ähnlich zueinander ist, können die als Lösung berechneten Umlauf- und Dienstpläne für verschiedene Tage sehr stark voneinander abweichen, wie es unter anderem von [Steinzen, 2007] und [Borndörfer et al., 2012] festgestellt wird. Diese Abweichung ist in der Praxis nicht erwünscht. Aus praktischer Sicht ermöglichen nach [Borndörfer et al., 2012] regelmäßige bzw. ähnliche Pläne eine operative Stabilität und vereinfachen die Erstellung von Dienstplänen für das Fahrpersonal. Darüber hinaus stellt sich aus wissenschaftlicher Sicht die Frage, warum ein ähnlicher Input nicht zwangsläufig auch zu einem ähnlichen Output führt.

Zielsetzung und wesentliche Forschungsfragen

Um diese Frage zu beantworten, besteht die **Hauptzielsetzung dieser Arbeit** darin, die Berücksichtigung von **Regelmäßigkeits- bzw. Ähnlichkeitsaspekten beim Bilden von Ressourceneinsatzplänen für verschiedene Tage** in Optimierungsverfahren zur Umlauf- und Dienstbildung zu untersuchen. So soll als wesentliche Forschungsfrage beantwortet werden, ob und mit welchen Modellen und Methoden es möglich ist, sowohl kosteneffiziente als auch zueinander ähnliche Pläne berechnen zu können. In dieser Arbeit sollen dazu Konzepte zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitsaspekten entwickelt werden. Neben der Entwicklung von Modellen und Methoden zur fahrplanübergreifenden Planung mehrerer Tage soll auch analysiert werden, wie Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen geeignet messbar gemacht werden kann. Die Konzepte sollen für verschiedene Varianten der ÖPNV-Planung untersucht werden, die unterschiedliche Freiheitsgrade für die Realisierung von Ähnlichkeitszielen bieten. So soll für unterschiedliche Planungsvarianten aus der Praxis eine (kosteneffiziente) Planung mit Ähnlichkeitszielen ermöglicht werden.

Die beste Berücksichtigung von Qualitätskriterien in mathematischen Optimierungsmethoden zum Bilden von Umläufen und Diensten hilft einem Verkehrsunternehmen allerdings nur dann weiter, wenn die vorgeschlagenen Pläne im Unternehmen direkt umsetzbar sind. Voraussetzung für eine direkte Umsetzbarkeit ist die *Zulässigkeit* des vorgeschlagenen Ressourceneinsatzes. Komplizierte gesetzliche, tarifliche und

betriebsspezifische Regelungen wie z.B. Arbeits- und Pausenzeiten für das Fahrpersonal und Ablösemöglichkeiten von Fahrern am Fahrzeug sollten möglichst vollständig von einer mathematischen Optimierungskomponente bei der Plan-Erstellung berücksichtigt worden sein. Eine vorgeschlagene Lösung, die von Hand (aufwändig) nachbearbeitet werden muss, um den Regelungen entsprechend gültige Ressourceneinsatzpläne zu erreichen, ist bei der Unterstützung des Planungsprozesses im Verkehrsunternehmen eher hinderlich. Neben dem zeitlichen Aufwand für eine Nachbearbeitung kann eine fehlende Berücksichtigung von Regelungen in der Optimierungskomponente dazu führen, dass der vorgeschlagene Ressourceneinsatzplan so geändert werden muss, dass er (stark) von der als kosteneffizient errechneten Vorlage abweicht und nicht nicht mehr als kosteneffizient anzusehen ist.

Die **Nebenzielsetzung dieser Arbeit** besteht daher darin, die Lösbarkeit praxisnaher Problemstellungen zur Umlauf- und Dienstplanung zu untersuchen. Aufbauend auf bisherigen Forschungsergebnissen in diesem Bereich soll die Forschungsfrage beantwortet werden, wie weit sich **spezielle unternehmensspezifische Regeln** in effizienten Optimierungsverfahren zur Umlauf- und Dienstbildung realisieren lassen. Dabei liegt der Fokus auf einer Umsetzbarkeit von Regelungen in einer integrierten Umlauf- und Dienstplanung. Die integrierte Planung von Umläufen und Diensten unterscheidet sich von einer traditionellen sequenziellen Vorgehensweise dahingehend, dass Umlauf- und Dienstplan gemeinsam in einem Schritt erstellt werden, statt zunächst der Umlaufplan und darauf aufbauend der Dienstplan. Eine gleichzeitige Planung von Busumläufen und Diensten erlaubt mehr Flexibilität bei der Dienstplanung und kann so zu einem insgesamt effizienteren Ressourceneinsatz führen. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch deutlich komplexer als ein sequenzielles Vorgehen.

Struktur der Arbeit

Der beschriebenen Haupt- und Nebenzielsetzung entsprechend ist diese Arbeit aufgebaut. Sie gliedert sich in vier Teile.

Teil I bestehend aus vier Kapiteln gibt einen Überblick über den Stand der Technik und leitet den Forschungsbedarf ab.

Kapitel 2 analysiert zunächst die Problemstellung. Neben einer Einführung in die Praxis der operativen Planung im ÖPNV werden die einzelnen Planungsaufgaben mit Fokus auf die Umlaufplanung und die Dienstplanung erläutert, sowie unterschiedliche Ablaufvarianten dieser beiden Planungsschritte. Anschließend wird die Regelmäßigkeit bzw. Ähnlichkeit von Fahrplänen unterschiedlicher Tage und ihre Auswirkung auf die Planungsaufgaben erörtert. Wie die bisherige Unterstützung der Planungsauf-

gaben durch Softwaresysteme mit mathematischen Optimierungsmethoden aussieht, wird ebenfalls untersucht.

Kapitel 3 stellt zum besseren Verständnis der in den Softwaresystemen mit mathematischen Optimierungskomponenten genutzten Modellierungen und den in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansätzen zur Umlauf- und Dienstplanung relevante Problembeschreibungen aus dem Bereich der kombinatorischen Optimierung vor. Die zum Lösen dieser Probleme wesentlichen mathematischen Verfahren werden ebenfalls kurz dargestellt.

Kapitel 4 beleuchtet den Stand der Forschung zur aufgegriffenen Problemstellung. Zum einen werden Modelle und Methoden für eine kosteneffiziente Umlauf- und Dienstplanung diskutiert sowie die Behandlung praktischer Anforderungen zur Dienstbildung in diesen. Zum anderen werden bestehende Modelle und Methoden zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen untersucht.

Basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 2 und dem Stand der Forschung aus Kapitel 4 wird in *Kapitel 5* der Forschungsbedarf konkretisiert und eine geeignete Vorgehensweise zur Erfüllung des Bedarfs im Rahmen dieser Arbeit abgeleitet.

Teil II untersucht in zwei Kapiteln grundlegende technische und methodische Voraussetzungen für eine (in der ÖPNV-Planung praktisch einsetzbare) Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen.

Kapitel 6 stellt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstbildung vor.

Darauf aufbauend werden in *Kapitel 7* Möglichkeiten zur Berücksichtigung individueller Anforderungen zur Umlauf- und Dienstbildung in den eingesetzten Modellen und Methoden diskutiert.

Teil III untersucht in zwei Kapiteln neue generelle Ansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen.

Dazu werden zunächst zur Formulierung von Ähnlichkeitszielen in *Kapitel 8* mögliche Bewertungen von Ähnlichkeit am Beispiel der Umlauf- und Dienstplanung vorgeschlagen. Konzepte für eine durch mathematische Optimierung unterstützte Planung mit Ähnlichkeitszielen werden darauf folgend in *Kapitel 9* entwickelt.

Teil IV diskutiert in vier Kapiteln die Einbettung der entwickelten Ähnlichkeitsansätze in die Varianten der ÖPNV-Planung und stellt die Ergebnisse dieser Arbeit abschließend zusammenfassend dar.

Kapitel 10 evaluiert die Umsetzung der entwickelten Modellierungs- und Lösungsansätze in eine sequenzielle Umlauf- und Dienstplanung. Dazu werden die vorgeschlagenen Modelle und Methoden zur Planung mit Ähnlichkeitszielen entsprechend angepasst und erweitert.

Kapitel 11 evaluiert auf gleiche Art eine Umsetzung für eine teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanung, *Kapitel 12* für eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung.

Kapitel 13 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten.

Kapitel 2

Operative Planung im ÖPNV

In diesem Kapitel wird kurz in die Domäne der Umlauf- und Dienstplanung im ÖPNV eingeführt und ein Überblick über die in dieser Arbeit bearbeiteten Themenkomplexe gegeben. Dazu werden zunächst die beiden Planungsaufgaben Umlaufplanung und Dienstplanung eines Verkehrsunternehmens im Zusammenhang mit den weiteren Schritten des Planungsprozesses im ÖPNV vorgestellt und genauer erläutert. Diese Vorstellung erfolgt in Abschnitt 2.1. Die Umlauf- und Dienstplanungsaufgaben im Planungsprozess können auf unterschiedlichste Art bewältigt werden. Die möglichen Ablaufvarianten der Umlauf- und Dienstplanung für die Planung der Fahrtenmenge eines Tages sind in Abschnitt 2.2 dargestellt. Verkehrsunternehmen planen Umläufe und Dienste nicht nur für die Fahrtenmenge eines Tages, sondern für verschiedene Tage mit variierenden Fahrtenmengen. Die Rolle der Regelmäßigkeit bzw. Ähnlichkeit als Qualitätsmerkmal in der Planung wird in Abschnitt 2.3 aufgegriffen. Die Aufgaben der Umlaufplanung und der Dienstplanung wurden im Laufe der Jahre vielfach als mathematische Optimierungsprobleme modelliert und mit entsprechenden Verfahren gelöst, die teilweise Eingang in kommerzielle Planungssoftware gefunden haben. Abschnitt 2.4 beschreibt übersichtsartig die Unterstützung der Planung durch Softwaresysteme mit mathematischen Optimierungsmethoden und gibt so einen Anhaltspunkt für den in dieser Arbeit zu behandelnden Forschungsbedarf.

2.1 Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV-Planungsprozess

Der Planungsprozess im ÖPNV lässt sich nach [Desaulniers und Hickman, 2007] grundlegend in die Phasen *strategische*, *taktische* und *operative Planung* unterteilen. Die in den einzelnen Phasen zu bewältigenden Planungsaufgaben betreffen unterschiedliche Planungszeiträume und Zielsetzungen. Für eine ausführlichere Darstellung der Planungsaufgaben der einzelnen Phasen sei auf [Desaulniers und Hickman, 2007] und [Bunte, 2009] verwiesen. Eine kurze Beschreibung der Aufgaben in An-

lehnung an diese Ausführungen findet sich im Folgendem. Abbildung 2.1 stellt den Planungsprozess im ÖPNV zusammenfassend dar basierend auf den Darstellungen von [Steinzen, 2007] und [Bunte, 2009].

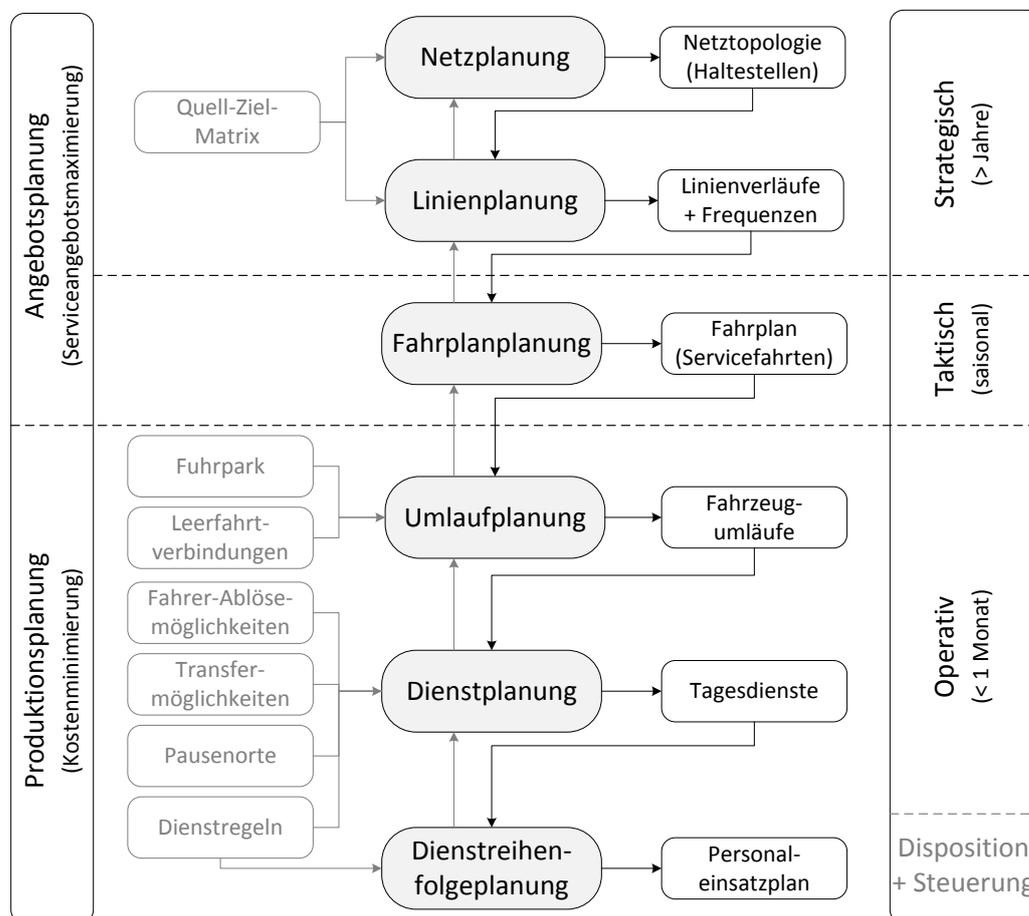


Abbildung 2.1: Operative Planung als Teil des Planungsprozesses im ÖPNV

In der strategischen Planung werden unter anderem der Beförderungsbedarf ermittelt und ein für die Beförderung geeignetes Nahverkehrsnetz festgelegt. Dabei wird in der *Netzplanung* auf Basis der erwarteten Passagierströme zwischen zwei Orten (*Quell-Ziel-Matrix*) die Netztopologie entworfen, d.h. das Streckennetz mit seinen Haltestellen. In der *Linienplanung* werden zu diesem Streckennetz *Verläufe* einzelner (Bus-)Linien festgelegt, sowie die *Frequenz* in welcher diese bedient werden sollen, um den Beförderungsbedarf erfüllen zu können.

In der taktischen Planung ist das primäre Ziel, ein hohes Serviceangebot zu erreichen. Zu den in der strategischen Planung definierten Linien und Frequenzen werden in der *Fahrplanplanung* die genauen Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den einzelnen

Haltestellen festgelegt. Ergebnis ist ein *Fahrplan*, der das Nahverkehrsangebot festlegt und die zur Personenbeförderung erforderlichen Fahrten (*Servicefahrten*) vorgibt.

In der operativen Planung besteht das Ziel eines Verkehrsunternehmens darin, das Nahverkehrsangebot mit möglichst geringen Betriebskosten umzusetzen. Die durch den Fahrplan eines Tages vorgegebenen Fahrten zur Personenbeförderung werden in der *Umlaufplanung* Fahrzeugen so zugewiesen, dass auf den entstehenden Fahrtrouten (*Fahrzeugumläufen*) alle Fahrten kostenminimal bedient werden. In die Planungsentscheidungen fließen dabei unter anderem der zur Verfügung stehende *Fuhrpark* sowie die möglichen *Leerfahrten* zwischen den Haltestellen ein. Um die Umläufe bedienen zu können, werden in der *Dienstplanung* unter Berücksichtigung gesetzlicher, tariflicher und betrieblicher Regelungen anonyme *Tagesdienste* erstellt. In dieser Planung müssen zusätzlich zu den Dienstregeln unter anderem die zur Verfügung stehenden *Pausenorte*, *Transfermöglichkeiten* zwischen den Haltestellen, sowie *Ablösemöglichkeiten* für Fahrer beachtet werden. Die erstellten Tagesdienste werden in der *Dienstreihenfolgeplanung* zu wöchentlichen oder monatlichen Sequenzen von Diensten zusammengefasst und in *Personaleinsatzplänen* tatsächlichem Fahrpersonal zugeordnet. Dabei sind weitere Regelungen wie z.B. Mindestruhezeiten zwischen Ende und Beginn zweier Dienste einzuhalten. Organisatorisch erfolgt die Zuordnung zu Fahrern in der Dispositions- und Steuerungs-Abteilung eines Verkehrsunternehmens.

Der Planungsprozess ist grundsätzlich geprägt von Rückkopplungen und Iterationen bei Bewältigung der einzelnen Planungsaufgaben, die eine intensive Kommunikation zwischen den jeweiligen Abteilungen bzw. Entscheidern erfordern. Aufgrund von Zielkonflikten zwischen einzelnen Schritten kann es passieren, dass das Ergebnis eines vorherigen Schrittes (in Teilen) revidiert werden muss. Eine gute Unterstützung des Planungsprozesses berücksichtigt idealerweise diese Zielkonflikte und sorgt so für eine Entschärfung der Rückkopplungen.

Die beiden in dieser Arbeit betrachteten Planungsschritte Umlaufplanung und Dienstplanung werden im Folgenden detaillierter vorgestellt.

2.1.1 Umlaufplanung

Im vorherigen Abschnitt wurde die Aufgabe der Umlaufplanung als Teil des Planungsprozesses im ÖPNV vorgestellt. Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten Begriffe der Umlaufplanung werden im Folgenden – orientiert an den Definitionen in [Kliwer, 2005] – genauer erläutert. Abbildung 2.2 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der benutzten Terminologie basierend auf der Darstellung von [Steinzen, 2007].

Die zur Bedienung von Fahrten einzusetzenden Fahrzeuge können sich in ihrer Größe, Geschwindigkeit oder Ausstattung unterscheiden. Jede Kombination unterschiedlicher Ausprägungen dieser Eigenschaften legt einen *Fahrzeugtypen* (engl. *vehicle type*) fest. In der Praxis sind diese Unterschiede zu berücksichtigen, wenn bestimmte Fahrten nur durch Fahrzeuge mit passenden Eigenschaften ausgeführt werden können. So können z.B. längere Busse wie Gelenkbusse nicht durch Straßen mit besonders engen Kurven fahren. Oder es sind für Fahrten im Bereich von Altenheimen und Krankenhäusern ausschließlich Busse mit barrierefreiem Einstieg wie Niederflerbusse einzusetzen. Abgestellt bzw. stationiert sind die Fahrzeuge an einem *Depot* (engl. *depot*) bzw. Betriebshof. In der Praxis ist die Anzahl von Stellplätzen für Fahrzeuge in einem Depot begrenzt. Die Begrenzung kann sich für unterschiedliche Fahrzeugtypen unterscheiden, z.B. bei Gelenkbussen und kürzeren Fahrzeugen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher eine Kombination aus Fahrzeugtyp und Abstellort bzw. Betriebshof als Depot bezeichnet. Ein Depot ist Ausgangs- und Endpunkt für die Fahrten eines Fahrzeuges an einem Tag. Eine *Service-* bzw. *Fahrgastfahrt* (engl. *service trip*) bezeichnet eine durch den Fahrplan vorgegebene Fahrt zur Personenbeförderung. Jede Servicefahrt besitzt eine Start- und Endhaltestelle sowie eine Anfangs- und Endzeit. Zwischen Start und Ende besteht eine Servicefahrt aus einer Folge von planmäßigen, ununterbrochenen Fahrten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Haltestellen einer Linie, an welchen Fahrgäste ein- bzw. aussteigen. Die Menge aller Servicefahrten eines Fahrplans wird in der Praxis oft als *Fahrplanmasse* bezeichnet. Als *Leerfahrt* (engl. *deadhead* oder *deadrun*) wird jede Fahrt bezeichnet, bei der keine Beförderungsmöglichkeit für Passagiere besteht. Sie wird zum Standortwechsel eines Fahrzeuges genutzt. Leerfahrten können in *Aus- und Einrückfahrten* sowie *Verbindungsfahrten* aufgeteilt werden. Als *Ausrückfahrt* (engl. *pull-out trip*) wird eine Leerfahrt bezeichnet, die ein Fahrzeug von einem Depot zur Starthaltestelle einer Servicefahrt führt. Analog bezeichnet *Einrückfahrt* (engl. *pull-in trip*) eine Leerfahrt von der Endhaltestelle einer Servicefahrt zu einem Depot. Zwei Servicefahrten werden als *kompatibel* bezeichnet, wenn sie nacheinander von demselben Fahrzeug ausgeführt werden können. Unterscheidet sich bei zwei kompatiblen Servicefahrten die Endhaltestelle der ersten Servicefahrt von der Starthaltestelle der zweiten Servicefahrt, können zwei Fahrten nur von demselben Fahrzeug bedient werden, wenn eine Leerfahrt zwischen diesen Haltestellen durchgeführt wird. Diese Leerfahrt wird als *Verbindungsfahrt* bezeichnet. In der Regel ist eine solche Fahrzeugaktivität für Linienerwechsel notwendig, also wenn die Haltestelle einer anderen als der gerade bedienten Linie angefahren wird. Alle Aktivitäten eines Fahrzeugs zwischen zwei Aufenthalten im Depot umfasst ein *Umlaufblock* (engl. *vehicle block*). Ein Umlaufblock beginnt

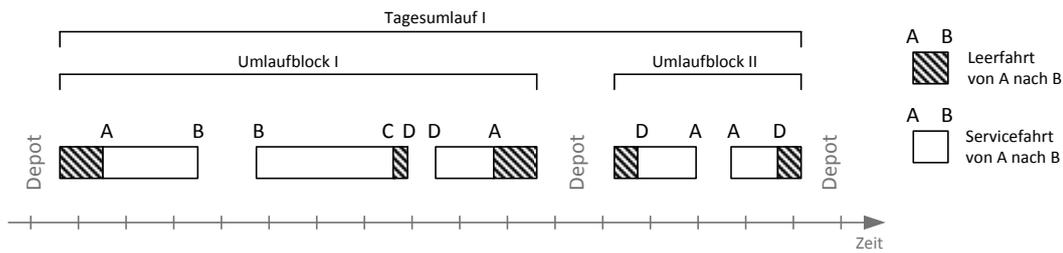


Abbildung 2.2: Grundbegriffe der Umlaufplanung am Beispiel einer Aufteilung von zu leistenden Servicefahrten auf zwei Umlaufblöcke

immer mit einer Ausrückfahrt und endet immer mit einer Einrückfahrt. Zwischen Aus- und Einrückfahrt liegt eine Sequenz aus Servicefahrten, Verbindungsfahrten und Wartezeiten. Die gesamte Aktivität eines Fahrzeuges an einem Tag wird durch einen *Fahrzeugumlauf* bzw. (*Tages-*)*Umlauf* (engl. *vehicle duty*) beschrieben. Er beschreibt also die Fahrtroute eines Fahrzeuges beginnend mit der ersten Ausrückfahrt aus einem Depot bis zur letzten Einrückfahrt in ein Depot. Ein Tagesumlauf besteht aus mindestens einem Umlaufblock. Alle an einem Tag auszuführenden (*Tages-*)Umläufe werden im *Umlaufplan* (engl. *vehicle schedule*) festgehalten.

Der Umlaufplan wird nach unterschiedlichsten Zielen von einem Verkehrsunternehmen gebildet. Primäres Ziel der Planung ist zumeist, die Servicefahrten eines Tages mit möglichst wenigen Fahrzeugen zu bedienen. Ein sekundäres Ziel ist dabei z.B. oft, die von den Fahrzeugen zu fahrenden Strecken so kurz wie möglich zu halten, um die anfallenden Spritkosten zu reduzieren. Weitere Ziele können sein, Linienwechsel innerhalb von Umläufen nach Möglichkeit zu vermeiden, um evtl. auftretende Verspätungen auf einer Linie nicht in das gesamte Liniennetz zu propagieren, oder auch, möglichst oft Aufenthalte der Fahrzeuge in den Depots zu planen, um so für die Dienstplanung z.B. einfach zu planende Ablösemöglichkeiten für Fahrer anzubieten.

2.1.2 Dienstplanung

Analog zur im vorherigen Abschnitt beschriebenen Umlaufplanung soll in diesem Abschnitt die im weiteren Verlauf der Arbeit genutzte Terminologie zur Dienstplanung erläutert werden. Dabei orientieren sich die Begriffsbeschreibungen und grafischen Erläuterungen an den Definitionen in [Steinzen, 2007] und [Gintner, 2008]. Abbildung 2.3 zeigt die benutzte Terminologie im Zusammenhang mit den in der Umlaufplanung verwendeten Begriffen.

Eine Verknüpfung zwischen Umlauf- und Dienstplanung ist durch einen *Ablösepunkt* (engl. *relief point*) gegeben. Er bezeichnet eine durch Zeit (Ablösezeitpunkt) und Ort (Ablösehaltestelle) bestimmte Möglichkeit, einen Fahrerwechsel auf einem Umlauf durchzuführen. Liegen Ablösepunkte innerhalb einer Servicefahrt, teilen sie diese Fahrt in mehrere *Teilfahrten* (engl. *subtrip*). Teilfahrten sind somit das Stück einer Servicefahrt von Beginn der Servicefahrt bis zum ersten Ablösepunkt innerhalb der Servicefahrt, alle Stücke innerhalb der Servicefahrt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ablösepunkten, sowie das Stück vom letzten Ablösepunkt innerhalb der Servicefahrt bis zum Ende der Servicefahrt. Enthält die Servicefahrt keinen inneren Ablösepunkt, besteht sie aus nur einer Teilfahrt. Ein Fahrer kann seine Arbeit an einer Teilfahrt innerhalb einer Servicefahrt beginnen oder beenden. Dahingegen muss ein Umlauf alle Teilfahrten einer Servicefahrt enthalten. Eine nicht mehr zu unterteilende Dienstätigkeit zwischen zwei Ablösepunkten wird als ein *Dienstelement* (engl. *task*) definiert. Ein Dienstelement umfasst also die Durchführung einer Folge von (Service- und/oder Leer-)Fahrten. Alle Teile eines Dienstelements, d.h. alle möglichen von einem Fahrer zu leistenden Aufgaben, die sich aus unterschiedlichen Aktivitäten mit einem Fahrzeug ergeben, werden als *Dienstelement-Abschnitt* (engl. *task-section*) bezeichnet: die Fahrtstücke bzw. Teilfahrten einer Servicefahrt, Leerfahrten und Warten auf einem Fahrzeug. Eine Servicefahrt, die keine Ablösepunkte enthält – weder zu Beginn oder Ende, noch mittendrin – stellt folglich wie bei [Gintner, 2008] beschrieben einen Dienstelement-Abschnitt dar. Ein *Dienststück* (engl. *piece of work*) ist eine Folge von Dienstelementen, die von einem Fahrer ununterbrochen (d.h. ohne gesetzlich vorgeschriebene Pause) auf einem Fahrzeug/Umlaufblock hintereinander durchgeführt werden kann. Ein *Dienst* (engl. *duty*) stellt die an einem Tag von einem (anonymen) Fahrer zu verrichtende Arbeit dar, d.h. die zu verrichtende Arbeit ohne eine Zuordnung zu einer tatsächlichen Person, und besteht aus einem oder mehreren Dienststücken, die durch (gesetzlich vorgeschriebene) Pausen voneinander getrennt sind. Definiert durch die Anzahl Dienststücke, Dauer der Pause(n) zwischen den Dienststücken und weitere Parameter (wie z.B. Zeit, die ein Fahrer auf einem Fahrzeug verbringt) werden in der Praxis verschiedene mögliche *Dienststarten* bzw. *Diensttypen* (engl. *duty types*) festgelegt. Ein Dienst ist nur dann gültig, wenn er einer Dienststart zuordbar ist. Alle an einem Tag zu leistenden Dienste sind im *Dienstplan* (engl. *crew schedule*) zusammengefasst.

Ein Dienstplan zur Bedienung aller durch den Fahrzeugeinsatz anfallenden Aufgaben durch das Fahrpersonal wird von einem Verkehrsunternehmen oft nach vielfältigen Zielen erstellt. Zum einen wird in der Regel versucht, die Dienstanzahl und damit das zur Ausführung der Aufgaben notwendige Personal so gering wie möglich zu hal-

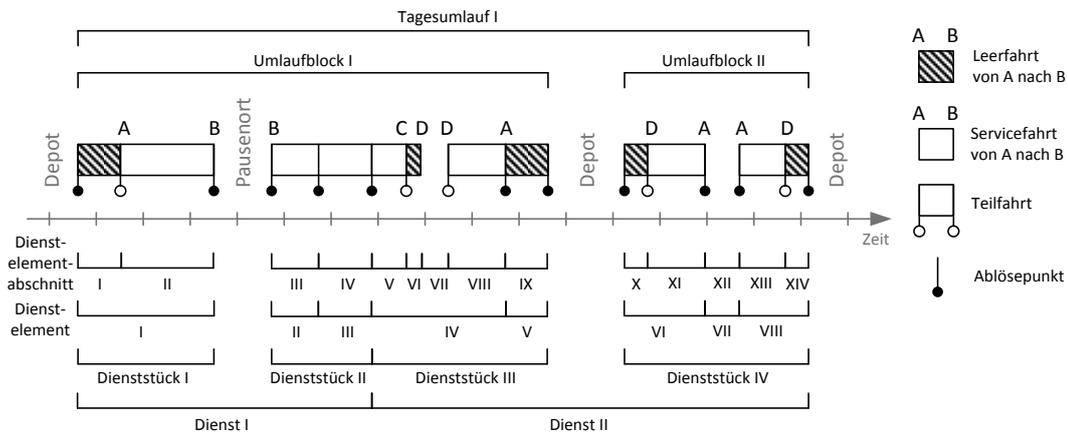


Abbildung 2.3: Grundbegriffe der Umlauf- und Dienstplanung am Beispiel einer Aufteilung von zu leistenden Servicefahrten auf zwei Umlaufblöcke und zwei Dienste

ten. Zum anderen sollen oftmals eine bestimmte Anzahl der Dienste nach bestimmten Diensttypen gebildet werden oder innerhalb definierter Zeiträume (sogenannter Schichtzeiten) liegen. Außerdem werden die Dienste häufig mit so wenig Pausen wie möglich gebildet, wodurch der Wirkungsgrad der eingesetzten Fahrer erhöht werden soll. Je nach Betrieb werden noch weitere Kriterien bei der Dienstplanung berücksichtigt, wie z.B. bestimmte Fahrtensequenzen innerhalb eines Dienstes zu vermeiden, weil diese besonders stressig für einen Fahrer sind, oder Pausen möglichst mit zusätzlichen Pufferzeiten für evtl. auftretende Störungen im Betriebsablauf zu versehen oder andere Qualitätskriterien zu beachten. Das Erstellen eines Dienstplans nach den im Unternehmen explizit oder implizit geltenden Kriterien geht dabei oft mit Anpassungen und Korrekturen am Umlaufplan einher. Welche Elemente in welchem Plan korrigiert werden, hängt von Art und Weise der Planung ab. Diese wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.2 Varianten der Umlauf- und Dienstplanung

Umlauf- und Dienstplanung können auf unterschiedliche Weise kombiniert durchgeführt werden. Je nach Kombination und Reihenfolge gibt es in den beiden Planungsschritten unterschiedliche Freiheitsgrade und eine andere Komplexität der Planung bzw. der zu lösenden Planungsprobleme. Im Folgenden werden die Möglichkeiten einer *Sequenziellen Planung* (Abschnitt 2.2.1), einer *Unabhängigen Planung* (Abschnitt

2.2.2), einer *Teilintegrierten Planung* (Abschnitt 2.2.3) und einer *Integrierten Planung* (Abschnitt 2.2.4) kurz dargestellt.

2.2.1 Sequenzielle Planung – Fahrplanbasierte Umlaufbildung und umlaufbasierte Dienstbildung

In der (traditionellen) *sequenziellen Planung* werden die beiden Schritte Umlaufplanung und Dienstplanung aufeinander aufbauend ausgeführt. Zu der gegebenen Fahrplanmasse eines Tages wird zunächst der Umlaufplan ermittelt. Die entstandenen Umläufe werden danach unter Berücksichtigung der Ablösepunkte in Dienste für das Fahrpersonal „geschnitten“. Diese Vorgehensweise findet sich oft in der städtischen Betriebsplanung. Abbildung 2.4 zeigt den schematischen Ablauf der sequenziellen Planung.

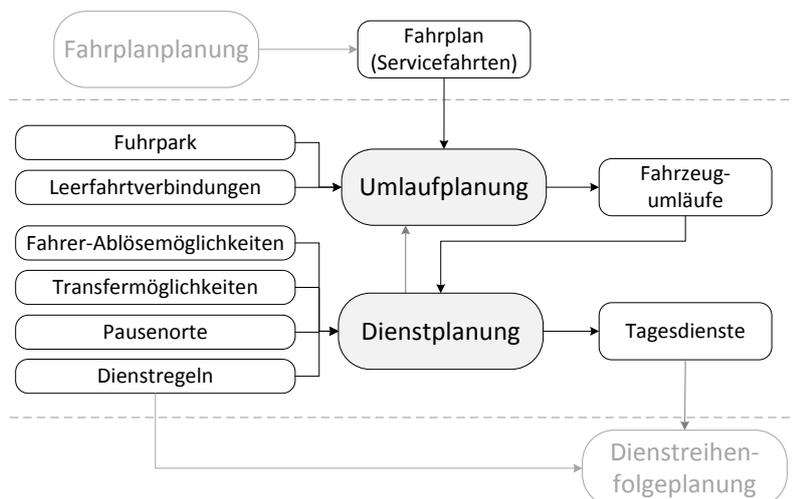


Abbildung 2.4: Sequenzielle Umlauf- und Dienstbildung

Ein Vorteil der sequenziellen Planung ist, dass die beiden Planungsaufgaben zur Umlaufbildung und zur Dienstbildung getrennt voneinander bearbeitet werden. Im Vergleich zu einer gemeinsamen (integrierten) Bearbeitung der Umlauf- und Dienstplanungsaufgaben können so Pläne in deutlich kürzerer Zeit bestimmt werden. Beispiele für zeitliche Unterschiede zwischen sequenzieller und integrierter Planung bei Betrachtung der Umlaufplanung und der Dienstplanung als mathematische Optimierungsprobleme sind unter anderem zu finden bei [Kliwer et al., 2012] und bei [Weider, 2007].

Nachteilig an der sequenziellen Vorgehensweise ist, dass durch sie die Flexibilität in der Dienstplanung eingeschränkt wird.

So kann eine isolierte Betrachtung der Umlaufplanung zu einer Dienstplanung führen, in der ungünstige Dienste zu bilden wären, um alle durch den Fahrzeugeinsatz anfallenden Aufgaben mit Fahrern bedienen zu können. Dies ist insbesondere bei der regionalen Betriebsplanung möglich. Im Gegensatz zum städtischen Nahverkehr gibt es dort üblicherweise wenige Ablösepunkte, die Ablösepunkte sind aufgrund ihrer Entfernungen nicht schnell zu erreichen und längere Servicefahrten sind zu bedienen. Ein kosteneffizienter Umlaufplan mit einer minimalen Fahrzeuganzahl kann dann aus Umläufen bestehen, die wenige Ablösemöglichkeiten enthalten. Die aus den Umläufen bildbaren Dienststücke können dann wie von [Borndörfer et al., 2002] beschrieben erfordern, dass Fahrer länger am Stück fahren müssen als es gesetzlich erlaubt ist oder dass Pausenregelungen nicht eingehalten werden können.

Außerdem kann die aufeinanderfolgende Bestimmung eines kostenoptimalen Umlaufplans und eines kostenoptimalen Dienstplans in der sequenziellen Planung dazu führen, dass die Gesamtkosten der ermittelten Pläne höher sind als bei der Bestimmung in einem gemeinsamen Schritt. [Freling, 1997] und [Huisman, 2004] veranschaulichen dies an einfachen Beispielen, bei denen das Hinzufügen von weiteren Leerfahrten zu einem optimalen Umlaufplan zwar die Kosten des Umlaufplans erhöht, aber die Gesamtkostenbewertung von Umlauf- und Dienstplan verringert: Durch das Hinzufügen von Leerfahrten wird die Flexibilität in der Dienstplanung erhöht, sodass im Dienstplan ein Dienst eingespart werden kann.

Potenziellen Nachteilen einer sequenziellen Planung kann versucht werden entgegenzuwirken, indem in der Umlaufplanung bereits Aspekte der Dienstplanung berücksichtigt werden. Eine solche Vorgehensweise wird als teilintegrierte Planung bezeichnet und wird in Abschnitt 2.2.3 genauer beschrieben. So besteht eine Möglichkeit darin, die Fahrzeugeinsatzzeiten, d.h. die Zeiten die Fahrzeuge außerhalb der Depots unterwegs sind, mit Kosten zu belegen, um bei der Planung von Umläufen bereits die zu vergütende Arbeitszeit der Fahrer abzubilden. Dadurch sollen Umläufe eine geeignete Struktur für die anschließende Dienstplanung bekommen. Werden allerdings zeitabhängige Kosten verglichen mit streckenabhängigen Kosten zu hoch gewählt, kann die Betrachtung von zeitabhängigen Kosten in der Umlaufplanung zu einer Mehrung von Leerkilometern führen, aufgrund unnötigerweise geplanter Leerfahrten (zu und von den Depots). Auf ein weiteres Problem weist [Beck, 2008] hin: Mit Berücksichtigung von zeitabhängigen Fahrzeugkosten bei der Suche nach einem optimalen Umlaufplan werden die Wendezeiten – d.h. Wartezeiten zwischen Ende einer Servicefahrt und Beginn der nächsten – minimiert, sodass diese dann oft zu kurz sind, um in der Dienstplanung als Pausenzeiten für Fahrer genutzt werden zu können. Da-

durch wird es schwieriger, kosteneffiziente Dienste mit (gesetzlich) gültigen Pausen zu erstellen.

2.2.2 Unabhängige Planung – Fahrplanbasierte Dienstbildung

Bei einer *unabhängigen Planung* gibt es mehr Freiheitsgrade für die Dienstbildung. Unter unabhängiger Planung wird eine Dienstbildung auf Basis der Fahrplanmasse verstanden. Dienste werden unabhängig von der Umlaufplanung erstellt. Dies kann z.B. in der regionalen Betriebsplanung der Fall sein, wenn nur ein Depot zur Verfügung steht und eine Fahrerablösung nur in diesem Depot möglich ist, ein Dienststück oder Dienst also direkt schon einem Umlaufblock entspricht.

Da in einer unabhängigen Planung Dienststücke bzw. Dienste nicht wie bei einer sequenziellen Planung entlang der Umläufe gebildet werden, gibt es mehr Möglichkeiten beim Erstellen der Dienste: Es existieren mehr Möglichkeiten, um Fahrten zu einer Aufgabensequenz für einen Dienst zu verbinden, was unter anderem von [Gintner, 2008] beschrieben wird. Dadurch können z.B. besser Qualitätsmerkmale beim Bilden von Diensten berücksichtigt und erfüllt werden.

Eine Schwierigkeit bei einer unabhängigen Planung besteht darin, zum Dienstplan einen kompatiblen Umlaufplan zu erstellen. Dies ist nicht der Fall, wenn nur ein Depot existiert und Ablösen nur in diesem Depot möglich ist. Denn dann entspricht ein Dienst bzw. Dienststück genau einem Umlaufblock, was die Bestimmung eines Umlaufplans vergleichsweise einfach gestaltet. Stehen allerdings mehrere Depots zur Verfügung und sind insbesondere die Kapazitäten beschränkt, kann nach [Gintner, 2008] der nachfolgend ermittelte Umlaufplan sehr schlecht oder unzulässig werden – z.B. aufgrund nicht beachteter Kapazitäten bei den tatsächlich zur Verfügung stehenden Fahrzeugen.

Oftmals wird durch eine unabhängige Planung ein Umlaufplan notwendig, der mehr Fahrzeuge enthält als die minimal zur Bedienung der Fahrplanmasse notwendige Fahrzeuganzahl. Z.B. dann, wenn der Dienstplan mit minimal möglicher Anzahl gültiger Dienste geplant ist und die Gültigkeit es erfordert, dass ein Fahrzeug oder mehr Fahrzeuge eingesetzt werden müssen als in einem Umlaufplan mit minimal möglicher Fahrzeuganzahl enthalten wären.

Dienste (zunächst) unabhängig von Umläufen zu planen, kann auch ein Schritt im Zuge einer teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanung sein – was im folgenden Abschnitt 2.2.3 genauer beschrieben wird.

2.2.3 Teilintegrierte Umlauf- und Dienstbildung

Bei einer *teilintegrierten Umlauf- und Dienstbildung* werden Umlauf- und Dienstplanung nicht gemeinsam in einem Schritt durchgeführt, sondern wie bei der sequenziellen Planung aufeinander folgend. Im Gegensatz zur rein sequenziellen Planung wird allerdings bei der zuerst durchgeführten Planungsaufgabe versucht, bereits Anforderungen der zweiten Planungsaufgabe zu berücksichtigen, um ein besseres Gesamtergebnis zu erhalten. Dabei existieren nach [Freling, 1997] grundsätzlich zwei Vorgehensweisen:

- *Erst Dienste – dann Umläufe*: Zunächst wird der Dienstplan erstellt, wobei bereits Anforderungen der Umlaufplanung berücksichtigt werden (z.B. durch eine Beschränkung der Ablösemöglichkeiten, sodass die Dienste einfacher zu Umläufen zusammengesetzt werden können). Auf Basis des Dienstplanes wird dann ein gültiger Umlaufplan erstellt.
- *Erst Umläufe – dann Dienste*: Der Umlaufplan wird unter Berücksichtigung von Anforderungen aus der Dienstplanung erstellt, wie z.B. Zeitrestriktionen, die die Länge eines Umlaufs so begrenzen, dass keine maximalen Dienstlängen verletzt werden wie bei [Borndörfer et al., 2002] beschrieben. Anschließend wird zu dem Umlaufplan ein gültiger Dienstplan ermittelt.

Nach [Borndörfer et al., 2002] können die künstlichen Zusatz- bzw. Hilfsregeln aber keinen Erfolg garantieren, da sie den Planungsspielraum bzw. die Planungsziele willkürlich einschränken oder verändern. Nachteilig ist also, dass viel probiert werden müsste, um für die Planung geeignete Ergebnisse zu bekommen. Auch deshalb, weil viele Ausnahmen von den Zusatzregeln gemacht werden müssten, falls eine strikte Befolgung ein besseres Ergebnis verhindert.

Die einzelnen Planungsschritte sind trotz zusätzlicher Hilfsregeln allerdings weniger kompliziert als eine gemeinsame (integrierte) Umlauf- und Dienstbildung.

2.2.4 Integrierte Umlauf- und Dienstbildung

Bei der *Integrierten Umlauf- und Dienstbildung* werden auf Basis der Fahrplanmasse eines Tages Umläufe und Dienste gemeinsam in einem Schritt erstellt. Diese Vorgehensweise wird oft in der regionalen Betriebsplanung genutzt, da dort wenige Ablösemöglichkeiten für Fahrer existieren und ein Fahrer seinen Dienst grundsätzlich auf einem Fahrzeug leistet. Bei einer integrierten Planung müssen Fahrzeug und Fahrer aber nicht zwangsläufig eine Einheit bilden. Neben einer regionalen Betriebsplanung ist eine integrierte Planung gegebenenfalls auch im Stadtverkehr sinnvoll, da

durch sie oftmals Kosteneinsparungen und Qualitätsverbesserungen realisiert werden können (vgl. Abschnitt 2.2.1). Der Ablauf der integrierten Umlauf- und Dienstbildung ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt.

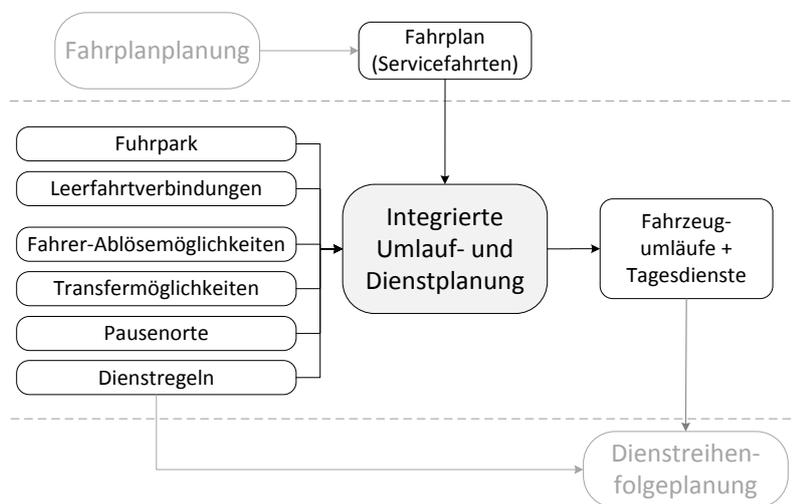


Abbildung 2.5: Integrierte Umlauf- und Dienstbildung

Die Vorteile einer integrierten Umlauf- und Dienstbildung ergeben sich aus der höheren Flexibilität für die Dienstplanung. Leerfahrten sind nicht wie in der sequenziellen Planung fest vorgegeben, sondern es stehen nach [Gintner, 2008] alle möglichen Fahrtenverknüpfungen als Freiheitsgrade beim Bilden von Diensten zur Verfügung. So können zusätzliche Leerfahrten zu Kosteneinsparungen führen, indem zwar Umlaufkosten erhöht werden, aber durch die möglichen Leerfahrten Dienste eingespart werden können, wozu unterem anderem [Freling, 1997], [Borndörfer et al., 2002] und [Huisman, 2004] Beispiele geben.

Neben der Möglichkeit Kosten einzusparen, sind mit einer integrierten Planung auch Qualitätsverbesserungen des Dienstplans möglich, wie z.B. bei [Beck, 2008] beschrieben weniger Fahrzeugwechsel innerhalb der Dienste.

Gegenüber anderen Planungsvarianten besteht bei einer integrierten Umlauf- und Dienstbildung allerdings ein sehr großer Nachteil: Aufgrund der gemeinsamen Betrachtung von Umläufen und Diensten entsteht eine wesentlich größere und kompliziertere Planungsaufgabe bzw. aus Sicht der mathematischen Optimierung ein wesentlich größeres und komplizierteres mathematisches Planungsproblem, was z.B. [Borndörfer et al., 2002] veranschaulichen. Spezielle unternehmensspezifische Anforderungen an die Qualität der Pläne können die Planung noch weiter verkomplizieren.

2.3 Ähnlichkeit bzw. Regelmäßigkeit in der Planung

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, werden bei der Umlauf- und Dienstplanung im ÖPNV Busumläufe und Dienste für die Fahrten bzw. Aufgaben eines Tages erstellt. Dabei werden die 365 Tage eines Jahres bzw. die entsprechende Anzahl Tage einer Saison üblicherweise nicht jeweils einzeln betrachtet, sondern zusammengefasste *Betriebstage*. In einem Betriebstag sind Wochentage mit gleichen Eigenschaften, d.h. mit identischen oder ähnlichen auszuführenden Servicefahrten bzw. einem ähnlichem Fahrplan zusammengefasst.

Die Fahrten, die an jedem in der Planung betrachteten Tag stattfinden, werden im Folgenden *regelmäßige Fahrten* (engl. *regular trips*) genannt. Analog dazu sind *regelmäßige Aufgaben* (engl. *regular tasks*) die Aufgaben, die an allen betrachteten Tagen durchzuführen sind. Fahrten, die an mindestens einem betrachteten Tag nicht auszuführen sind, werden als *unregelmäßige Fahrten* (engl. *irregular trips*) bezeichnet. Dies gilt entsprechend für *unregelmäßige Aufgaben* (engl. *irregular tasks*).

Wenn an unterschiedlichen Tagen variierende Fahrtenmengen zu verplanen sind, ist in Verkehrsunternehmen in der Regel eine Ähnlichkeit bzw. Regelmäßigkeit für die Ressourceneinsatzpläne dieser Tage gefordert. Auf diese Forderung soll im Folgenden genauer eingegangen werden. Dazu werden in Abschnitt 2.3.1 zunächst die Unterschiede zwischen Fahrplänen verschiedener Tage beschrieben. Warum für Fahrpläne verschiedener Tage von Verkehrsunternehmen ähnliche Umlauf- und Dienstpläne gewünscht sind, wird darauf folgend in Abschnitt 2.3.2 dargestellt. Der Wunsch nach Regelmäßigkeit ist auch durch andere Aufgaben in der ÖPNV-Planung motiviert. Abschnitt 2.3.3 beschreibt zur Regelmäßigkeit in der Planung verwandte Aufgaben.

2.3.1 Regelmäßigkeit von Fahrplänen

Die Fahrpläne der Werktage Montag bis Freitag unterscheiden sich generell deutlich von denen am Wochenende. An Werktagen werden typischerweise mehr Fahrten angeboten als am Wochenende. Dabei sind an Werktagen die Fahrpläne insbesondere durch Fahrten für Berufspendler und Schüler geprägt. Dahingegen werden an Wochenenden Fahrten größtenteils zum Einkaufen oder für das in der Region zur Verfügung stehende Erholungsangebot genutzt. Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft die Anzahl zu bedienender Servicefahrten einer mittelgroßen Stadt im Zeitverlauf für Montag bis Freitag, sowie für Samstag (– für Visualisierungsmöglichkeiten unterschiedlich zu bedienender Servicefahrten sei auf Abschnitt 8.2.1 verwiesen). Im Beispiel werden ca. 38% der Fahrten Montag bis Samstag angeboten, ca. 44% nur

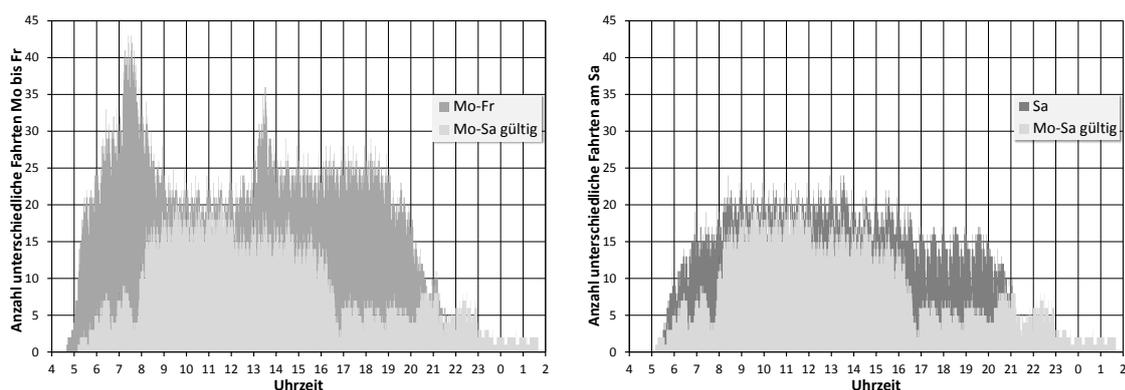


Abbildung 2.6: Ganglinien für Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer mittelgroßen Stadt an den Wochentagen Montag bis Freitag und bzw. oder Samstag zu bedienen sind

Montag bis Freitag und ca. 18% nur am Samstag. Aufgrund der Unterschiede in den Fahrplänen wird grundsätzlich zwischen den Betriebstagen „Werktag“ (Mo-Fr) und „Samstag“ bzw. „Sonntag“ unterschieden, siehe auch [Borndörfer et al., 2012].

Diese Betriebstage gibt es üblicherweise in weiteren Ausprägungen (vgl. [Borndörfer et al., 2012]). Beispielsweise unterscheiden sich die Fahrpläne von Werktagen in der Schulzeit zu denen in den Ferien, da in den Ferien weniger Schulfahrten notwendig sind. Dann wird zwischen den Betriebstagen „Werktag - Schule“ und „Werktag - Ferien“ unterschieden. Außerdem können spezielle Veranstaltungen wie z.B. Messen oder Fußballspiele mit mehreren tausend Zuschauern ein erhöhtes Fahrtenangebot erfordern, sodass z.B. Umläufe und Dienste für einen Tag „Samstag - Veranstaltung XY“ mit (zahlreichen) Sonderfahrten geplant werden müssen. Weitere Beispiele für notwendige Änderungen oder Ergänzungen von Fahrten eines Basis-Fahrplanes sind Bauarbeiten im Verkehrsnetz, sowie zusätzliche Fahrten für Schüler, z.B. um Schulklassen zum Schwimmunterricht zu bringen.

Darüber hinaus bestehen auch Unterschiede zwischen den Fahrplänen einzelner Wochentage. Zum Beispiel werden Freitag Abends und Nachts mehr Fahrten angeboten als an anderen Werktagen. Oder es sind spezielle Schulfahrten beispielsweise nur Dienstags durchzuführen, die aber nicht Mittwochs notwendig sind. Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft die in einem städtischen Fahrplan angebotenen Fahrten von Montag bis Freitag in der Schulzeit zusammengefasst als Ganglinie. Dargestellt wird die Anzahl gleicher und unterschiedlicher Fahrten je Uhrzeit. Fahrten werden an bis zu fünf Tagen angeboten. Tabelle 2.1 schlüsselt die in Abbildung 2.7 gezeigten Fahrpläne Montag bis Freitag auf und gibt weitere Informationen über Fahrtenvergleiche zwischen den einzelnen Tagen.

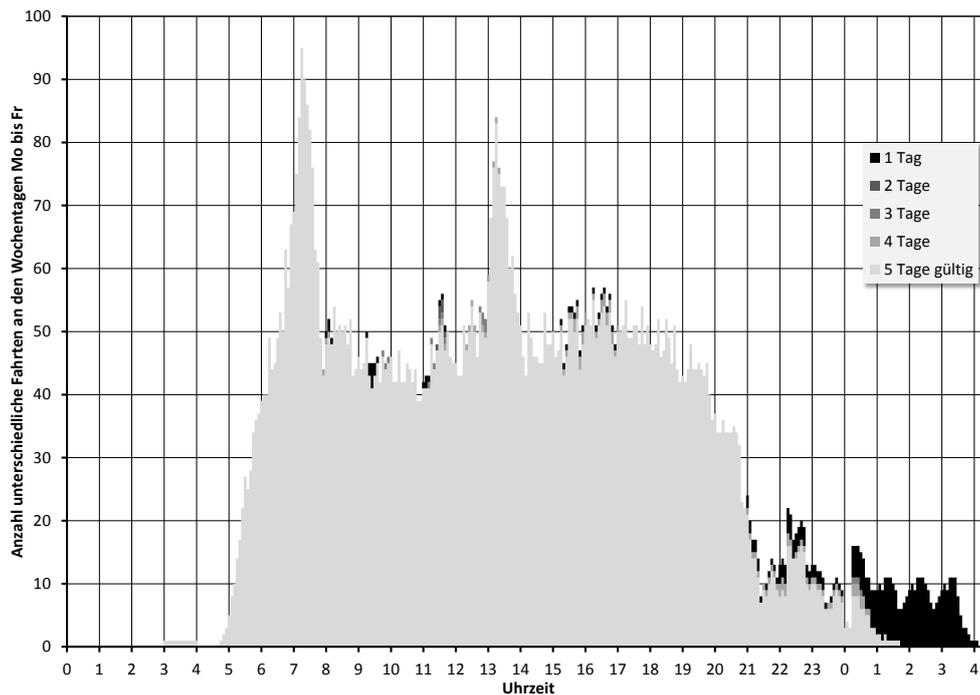


Abbildung 2.7: Ganglinie für gleiche und unterschiedliche Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer großen Stadt an den Wochentagen Montag bis Freitag zu bedienen sind

Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft, dass bei den Fahrten einer Woche von Montag bis Freitag ein Großteil der Fahrten an den fünf Tagen identisch ist bzw. sein kann. Unterschiedliche Fahrten sind dabei über den ganzen Tag verteilt. In diesem Beispiel in den Zeiträumen zwischen 7:45 und 10:00 Uhr, zwischen 11:00 und 13:30, von 15:00 bis 17:00 Uhr und insbesondere ab 21:00 Uhr. Zumindest für die Zeiträume bis 21:00 Uhr stellt sich in der Planung dann die Frage, wie diese am besten in Umläufe und Dienste eingeplant werden. Sollte versucht werden, die zusätzlich anfallenden Fahrten durch Modifikation eines Standardumlauf- bzw. Dienstplans zu verplanen, in welchem alle regelmäßigen Fahrten bedient sind? Z.B. indem Fahrten in Umläufe und Dienste eingebaut werden bzw. Fahrten zwischen bestehenden Ressourceneinsätzen vertauscht werden? Oder müssen diese zusätzlichen Fahrten auf jeden Fall neu auf zu den Standardplänen zusätzliche Umläufe und Dienste verteilt werden – wie es z.B. für die unregelmäßigen Fahrten ab 21:00 Uhr sinnvoll wäre?

Tabelle 2.1 veranschaulicht dies noch einmal auf eine andere Art. Die Tabelle zeigt, dass mehr als 90% aller Fahrten regelmäßig sind, also an jedem betrachteten Tag durchgeführt werden. Nur ein geringer Teil ist unregelmäßig, d.h. wird an weniger als fünf Tagen durchgeführt. Dabei findet ein Großteil der unregelmäßigen Fahrten nur

# Servicefahrten pro Wochentag					
Mo	Di	Mi	Do	Fr	Gesamt
1.380	1.381	1.377	1.383	1.449	1.478
# unterschiedliche Servicefahrten je Vergleich					
	Mo	Di	Mi	Do	Fr
Mo	0	7	9	9	113
Di	7	0	8	8	116
Mi	9	8	0	10	110
Do	9	8	10	0	114
Fr	113	116	110	114	0
Servicefahrten gültig an x Wochentagen (in %)					untersch. pro Tag (\emptyset)
5	4	3	2	1	
91,8	1,2	0,4	0,1	6,5	3,4

Tabelle 2.1: Verteilung der Fahrten zur Ganglinie aus Abbildung 2.7

an einem Tag statt. In diesem Beispiel vor allem deshalb, da sich der Fahrplan vom Freitag deutlich zu den Fahrplänen von Montag bis Donnerstag unterscheidet, was sich vor allem aus dem Mehrangebot an Fahrten in den Abend- und Nachtstunden begründet. Für die vielen zusätzlichen Fahrten für die Freitag Abend- und Nachtstunden könnten bei der Planung zusätzliche Umläufe und Dienste gebildet werden. Dahingegen könnte für die wenigen unregelmäßigen Fahrten von Montag bis Donnerstag versucht werden, diese durch Modifikation von Umläufen und Diensten in Ressourceneinsatzpläne einzuplanen, mit denen der Großteil aller Fahrten bedient werden kann. Die Bedienung der unregelmäßigen Fahrten von Montag bis Donnerstag könnte also in Ressourceneinsatzpläne eingebaut werden, die zur Bedienung aller regelmäßigen Fahrten erstellt wurden.

Zusammenfassend sei also festgehalten, wie unterschiedlich Fahrpläne verschiedener Tage zueinander sein können und dass diese Unterschiede bei Planungsentscheidungen von entscheidender Bedeutung sind. Dabei bestehen Unterschiede vor allem

- zwischen Werktagen und Tagen am Wochenende
- zwischen Schultagen und Tagen in der Ferienzeit
- aufgrund von speziellen Ausprägungen eines Tages (Ereignisse, Baumaßnahmen)
- aufgrund einiger, regelmäßiger Zusatzfahrten (z.B. Schulfahrten)

[Borndörfer et al., 2012] fassen die aufgrund von unterschiedlichen Fahrplänen existierenden Anforderungen an die Umlauf- und Dienstplanung wie folgt zusammen: Zumindest für ähnliche Tage, d.h. für Tage mit einem ähnlichen Fahrtenaufkommen sind bei Verkehrsunternehmen in der Praxis auch ähnliche Ressourceneinsatzpläne gewünscht. Die Vorteile, die ähnliche bzw. regelmäßige Busumlauf- und Dienstpläne gegenüber unregelmäßigen Plänen besitzen, werden im folgenden Abschnitt 2.3.2 dargestellt.

2.3.2 Ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne

Ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne bestehen aus Umläufen oder Diensten, die ohne große Modifikation an mehreren Tagen genutzt werden können. D.h. die Strukturen dieser Umläufe oder Dienste, also die in den Ressourceneinsätzen bedienten Fahrten und Aufgaben, bleiben an verschiedenen Tagen weitestgehend gleich. Solche Ressourceneinsätze werden auch als *gleichförmige* Umläufe bzw. Dienste bezeichnet. Verkehrsunternehmen bevorzugen ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne für ähnliche Fahrpläne, da sie gegenüber unregelmäßigen Plänen zahlreiche Vorteile besitzen. Aus Gesprächen mit Praktikern und aus der Literatur lassen sich vier generelle Vorteile ableiten: Ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne sind gewünscht, da gegenüber unregelmäßigen Plänen

- nach [Steinzen, 2007] die operative Zuverlässigkeit erhöht wird,
- nach [Borndörfer et al., 2012] der Arbeitsaufwand für die Prüfung der Pläne durch den Betriebsrat reduziert wird,
- die Erstellung von (monatlichen) Einsatzplänen für Fahrer in der Dienstreihenfolgeplanung vereinfacht wird,
- Fahrerwünsche nach sich wiederholenden Aufgaben an verschiedenen Arbeitstagen berücksichtigt werden.

Regelmäßige Ressourceneinsatzpläne sorgen also für eine Stabilität in Planung und Plan-Ausführung. Diese Stabilität soll für Tage mit ähnlichem Fahrtenaufkommen innerhalb einer Saison gelten, ebenso wie bei einem Wechsel des Fahrplans – wenn z.B. vom Sommerfahrplan auf den Winterfahrplan gewechselt wird. Um diese Stabilität zu erreichen, sollten Umläufe und Dienste unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten geplant werden.

2.3.3 Verwandte weitere Planungsaufgaben

Die Forderung nach ähnlichen bzw. regelmäßigen Ressourceneinsatzplänen beim Planen von Umläufen und Diensten ist wie im vorherigen Abschnitt beschrieben unter anderem durch eine der Ressourceneinsatzplanung nachfolgende Planungsaufgabe motiviert: der Dienstreihenfolgeplanung. Des Weiteren lässt sich eine Verwandtheit zur sogenannten robusten Umlauf- und Dienstplanung feststellen.

Beziehung zur Dienstreihenfolgeplanung

Eine Motivation für die Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten während der Ressourceneinsatzplanung besteht darin, dass das von ihr gelieferte Ergebnis entscheidend für die nachfolgende Dienstreihenfolgeplanung ist: durch ähnliche Dienstpläne für unterschiedliche Tage lässt sich die Dienstreihenfolgeplanung vereinfachen und der entstehende Personaleinsatzplan qualitativ verbessern (siehe Abschnitt 2.3.2).

Einige Autoren, insbesondere [Mesquita et al., 2011] bzw. [Mesquita et al., 2013], nehmen die enge Verknüpfung zwischen Dienstplanung und Dienstreihenfolgeplanung zum Anlass, diese beiden Planungsaufgaben als eine sehr große, gemeinsame Planungsaufgabe zu betrachten und mathematische Optimierungsmethoden zu ihrer gemeinsamen Unterstützung zu entwickeln. Allerdings ist zu beachten, dass die Planungsaufgaben häufig von unterschiedlichen Akteuren bewältigt werden: In der Organisation von Verkehrsunternehmen wird oft klar zwischen der Planungs- und der Dispositionsabteilung getrennt. Außerdem entsteht bei einer gemeinsamen Betrachtung ein nur mit vereinfachenden Annahmen lösbares Planungsproblem. Daher wird in dieser Arbeit auch weiterhin getrennt zwischen den Planungsschritten Dienstplanung und Dienstreihenfolgeplanung, d.h. dem Verteilen der an den betrachteten Tagen anfallenden Aufgaben auf Dienste und dem Zuweisen dieser Dienste zu personenbezogenen Einsatzplänen.

Dennoch gibt es – neben der Forderung nach Ähnlichkeit – Anforderungen aus der Dienstreihenfolgeplanung, die bereits in der Ressourceneinsatzplanung berücksichtigt werden können bzw. sollten. Dies sind größtenteils Aspekte, die die Gesamtheit der Dienste in den Dienstplänen betreffen. Z.B. die durchschnittliche Arbeitszeit der Dienste, eine bestimmte Anzahl bzw. ein bestimmter Anteil von Diensten eines speziellen Diensttyps oder eine bestimmte Anzahl Dienste innerhalb einer bestimmten Schichtlage (z.B. Früh-, Mittag-, Spät- und Nacht-Dienste). Für weitere Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Dienstreihenfolgeaspekten in der Ressourceneinsatzplanung, um die Fahrerezufriedenheit mit den Personaleinsatzplänen zu verbessern – u.a. indem Dienste möglichst ähnlich geplant werden – sei auf [Xie et al., 2012] verwiesen.

Verwandtheit zu robuster Umlauf- und Dienstplanung

Robuste Umlauf- und Dienstplanung wird unter anderem von [Amberg, 2014] in Anlehnung an [Scholl, 2001] als Planung verstanden, in welcher stabile und flexible Pläne erstellt werden. Diese sollen den während der Planausführung möglicherweise auftretenden Störungen möglichst wenig Einflussmöglichkeiten auf den Betriebsablauf bieten. Die Pläne sollen *stabil* sein, indem sie von Störungen verursachte Verspätungen möglichst gut absorbieren können, was auch als *Verspätungstoleranz* bezeichnet wird. Sie sollen *flexibel* sein, indem sie einfache Möglichkeiten bieten, auf Störungen angemessen reagieren zu können, z.B. durch einen Tausch der Fahrzeuge oder Fahrer. [Amberg, 2014] spricht zusätzlich von *robuster Effizienz* in der Planung, wenn Robustheitskriterien ergänzend zu einer Kosteneffizienz der Pläne gewährleistet werden sollen.

Im Bereich der robusten Umlauf- und Dienstplanung werden Unsicherheiten bei der Planausführung schon bei der Plangestaltung berücksichtigt. Bei einer Planung mit Ähnlichkeitsaspekten werden zwar keine Unsicherheiten in die Plangestaltung einbezogen, da die zu leistenden Fahrten und Aufgaben verschiedener Tage bei Planung bekannt sind. Die Berücksichtigung von Ähnlichkeit in der Planung kann aber als zu robuster Planung verwandter Bereich aufgefasst werden, da mit ihr auch eine Form der Robustheit bzw. eine Form der Stabilität erreicht werden soll.

Durch die Berücksichtigung von Ähnlichkeits- bzw. Regelmäßigkeitsaspekten in der Planung kann neben einer Stabilität bei Planung und Plan-Ausführung (vgl. Abschnitt 2.3.2) eine Stabilität auf übergeordneter Ebene gewährleistet werden. Z.B. indem durch eine ähnliche Planung positive Eigenschaften bestimmter Pläne oder von Teil-Plänen auf andere Pläne übertragen werden können und so beibehalten werden.

Eine andere Beziehung zwischen robuster Planung und einer Planung mit Ähnlichkeitsaspekten lässt sich beim Störungsmanagement eines Verkehrsunternehmens identifizieren: Während der Plan-Ausführung auftretende Störungen können zu notwendigen Änderungen eines ursprünglich gebildeten Plans führen. Verkehrsunternehmen sind dann zumeist bestrebt, die Änderungen am Ursprungsplan möglichst gering zu halten, um nicht allzu sehr vom (als kosteneffizient) geplanten Betriebsablauf abzuweichen. So sollen Überstunden oder Strafgeelder für einen zu großen Anteil nicht (pünktlich) eingehaltener Verbindungen möglichst vermieden werden. Das Störungsmanagement in den Ressourceneinsatzplänen ist während der Plan-Ausführung in der Regel lokal begrenzt. In dieser Arbeit soll hingegen in erster Linie die ganzheitliche Plangestaltung betrachtet werden. Maßnahmen des Störungsmanagements können auch das Verzögern oder Absagen von Fahrten sein. Die hier betrachtete Planung

mit Ähnlichkeitsaspekten grenzt sich insofern davon ab, als dass eine Änderung der (ähnlich) zu verplanenden Fahrpläne nicht erlaubt ist.

2.4 Unterstützung des Planungsprozesses durch Softwaresysteme mit mathematischen Optimierungsmethoden

Die Bewältigung der Aufgaben in der ÖPNV-Planung wird seit Jahrzehnten durch Softwaresysteme unterstützt. Durch die Formulierung einzelner Planungsaufgaben als (mathematische) Optimierungsprobleme und die Einbettung von Methoden zum Lösen dieser in Planungssysteme konnten dabei signifikante Verbesserungen erreicht werden: Planern können in vergleichsweise kurzer Zeit unterschiedliche Optionen für einen (kosteneffizienten) Ressourceneinsatz aufgezeigt werden (vgl. [Wren, 2004]).

Kern für diese Verbesserungen ist das Lösen einzelner Planungsaufgaben bzw. Kombinationen von Planungsaufgaben als mathematisch formulierte Optimierungsprobleme. Abschnitt 2.4.1 führt in die entsprechenden Problemdefinitionen zu den in dieser Arbeit betrachteten Planungsschritten Umlaufplanung und Dienstplanung ein. Ziel einer Formulierung als mathematisches Optimierungsproblem ist in erster Linie eine Minimierung der Kosten für den geplanten Einsatz von Fahrzeugen und Fahrern. Abschnitt 2.4.2 gibt einen kurzen Überblick über die in kommerzieller Planungssoftware realisierte Unterstützung beim Finden von kosteneffizienten Umlauf- und Dienstplänen durch mathematische Optimierungsmethoden. Die von Planungssysteme bereitgestellte Unterstützung beim Bilden von ähnlichen Plänen für ähnliche Tage wird in Abschnitt 2.4.3 vorgestellt.

2.4.1 Ressourceneinsatzplanung als Optimierungsprobleme betrachtet

Als Optimierungsprobleme formuliert, lassen sich die Aufgaben der Umlauf- und Dienstplanung etwas formaler beschreiben als in den Abschnitten 2.1 und 2.2. Im Folgenden sollen, noch mit Verzicht auf eine mathematische Notation, kurz die Optimierungsprobleme der Schritte Umlaufplanung und Dienstplanung, sowie einer integrierten Umlauf- und Dienstplanung definiert werden.

Umlaufplanungsproblem

In der Umlaufplanung soll das sogenannte *Umlaufplanungsproblem* (engl. *vehicle scheduling problem*, *VSP*) gelöst werden. Gegeben sind die Servicefahrten eines Tages, zur Verfügung stehende Depots, ein Fuhrpark mit Fahrzeugen evtl. unterschiedlichen Fahrzeugtyps und in evtl. unterschiedlich zur Verfügung stehender Anzahl, sowie mögliche Leerfahrtverbindungen zwischen den Haltestellen. Gesucht wird eine Zuordnung der Servicefahrten zu (Tages-)Umläufen, die die Gesamtkosten des Fahrzeugeinsatzes unter Berücksichtigung folgender Restriktionen minimiert (vgl. [Steinzen, 2007]):

- Jede Servicefahrt ist genau einem Umlaufblock zugeordnet.
- Jeder Umlaufblock ist zulässig, d.h. alle Fahrten eines Umlaufblocks sind von einem Fahrzeug mit passendem Fahrzeugtyp nacheinander ausführbar, ohne dass es zeitliche Überschneidungen gibt.
- Jeder (Tages-)Umlauf endet in dem Depot, aus dem er gestartet ist.

Die Gesamtkosten des Fahrzeugeinsatzes ergeben sich aus der Summe der Kosten der Tagesumläufe. Die Kosten eines Tagesumlaufes setzen sich aus anteiligen Anschaffungskosten eines Fahrzeuges (*Fixkosten*) und einem variablen Teil zusammen, der in Abhängigkeit von der tatsächlichen Fahrleistung gebildet wird (*operative Kosten*), z.B. auf Basis der Spritkosten pro gefahrenen Kilometer. Üblicherweise haben Verkehrsunternehmen das primäre Ziel, die Fixkosten zu minimieren – also die Anzahl der Tagesumläufe und damit die Anzahl der benötigten Fahrzeuge. Eine Minimierung der operativen Kosten wird oft nur als sekundäres Ziel verfolgt.

Falls genau ein Depot bei der Planung berücksichtigt wird, also alle Fahrzeuge vom identischen Fahrzeugtyp sind und nur ein Abstellort existiert, wird das Planungsproblem als *Eindepot-Umlaufplanungsproblem* (engl. *single-depot vehicle scheduling problem*, *SDVSP*) bezeichnet. Falls mehrere Depots berücksichtigt werden, handelt es sich um ein *Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem* (engl. *multiple-depot vehicle scheduling problem*, *MDVSP*). Dabei ist jedes Fahrzeug genau einem Depot zugeordnet und einige Servicefahrten dürfen unter Umständen nur von Fahrzeugen bestimmter Depots ausgeführt werden.

Das SDVSP lässt sich in polynomieller Zeit lösen. Das MDVSP ist dahingegen nach [Bertossi et al., 1987] ein \mathcal{NP} -schweres Problem.

Dienstplanungsproblem

In der Dienstplanung soll das *Dienstplanungsproblem* (engl. *crew scheduling problem*, *CSP*) gelöst werden. Dabei ist eine Zuordnung von Dienstelementen zu Diensten gesucht, die die Personalkosten minimiert und folgende Restriktionen erfüllt bei gegebenen Transfermöglichkeiten für Fahrer, sowie gegebenen Pausenorten (vgl. [Steinzen, 2007]):

- Jedes Dienstelement ist in genau einem Dienst enthalten.
- Jeder Dienst erfüllt die gesetzlichen, tariflichen und betrieblichen Vorgaben.

Die Personalkosten setzen sich aus der Summe der Kosten aller im Dienstplan enthaltenen Dienste zusammen. Die Kosten eines einzelnen Dienstes ergeben sich aus einem (evtl. von der Dienstart abhängigen) fixen Teil zuzüglich eines von der Arbeitszeit abhängigen variablen Teil. Werden die Fixkosten hoch gewählt, wird eine Minimierung der Dienstanzahl als primäres Optimierungsziel verfolgt. Sekundäres Ziel ist dann eine Minimierung der Gesamtarbeitszeit. Üblicherweise beeinflussen in der Praxis noch zahlreiche weitere Ziele die Dienstbildung (vgl. Abschnitt 2.1.2). Diese werden zumeist so im Optimierungsproblem abgebildet, dass eine Nichterreichung dieser Ziele zu einer höheren Kostenbewertung führt, da bei Nichterreichung Strafkosten berechnet werden.

Das CSP ist nach [Fischetti et al., 1987] bzw. [Fischetti et al., 1989] bereits dann ein \mathcal{NP} -schweres Problem, wenn als einzige bei der Dienstbildung zu erfüllende Regel eine Beschränkung der Dienstdauer bzw. Arbeitszeit zu berücksichtigen ist.

Integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem

Das *integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem* (engl. *integrated vehicle and crew scheduling problem*, *IVCSP*) enthält Umlaufplanungs- und Dienstplanungsprobleme als Unterprobleme. Gegeben sind die Servicefahrten eines Tages, zur Verfügung stehende Depots, ein Fuhrpark mit evtl. unterschiedlichen Fahrzeugtypen in evtl. unterschiedlicher Fahrzeuganzahl, mögliche Leerfahrtverbindungen zwischen den Haltestellen, mögliche Ablösepunkte für Fahrer, Transfermöglichkeiten, sowie Pausenorte. Gesucht werden kostenminimale (Tages-)Umläufe und Dienste unter Berücksichtigung folgender Restriktionen:

- Umlauf- und Dienstplan sind zulässig (nach den oben definierten Bedingungen).
- Umlauf- und Dienstplan sind *zueinander kompatibel*.

Umlauf- und Dienstpläne sind zueinander kompatibel, wenn jede Fahrt aus dem Fahrplan von einem Fahrzeug und einem Dienst bedient werden, jede Leerfahrt, die im Umlaufplan genutzt wird, genau auch einem Dienst im Dienstplan zugeordnet ist und die Dienste nur Leerfahrten enthalten, die im Umlaufplan enthalten sind.

Das integrierte (Mehrdepot-)Umlauf- und Dienstplanungsproblem ist \mathcal{NP} -schwer, da sowohl (Mehrdepot-)Umlaufplanungsproblem als auch das Dienstplanungsproblem \mathcal{NP} -schwer sind.

2.4.2 Unterstützung beim Finden von kosteneffizienten Ressourceneinsätzen

Zur Unterstützung der Ressourceneinsatzplanung werden von mehreren Anbietern von Planungssystemen Komponenten angeboten, mit denen die im vorherigen Abschnitt definierten Optimierungsprobleme zur Planung des Ressourceneinsatzes gelöst werden können. Die Komponenten lösen Umlaufplanungsprobleme, Dienstplanungsprobleme und integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme.

[Bunte, 2009] listet auch ältere Planungssysteme mit Komponenten zur Busumlaufoptimierung zusammenfassend auf. Aktuelle Systeme mit mathematische Optimierungsmethoden zur Umlaufplanung sind unter anderem die Systeme HASTUS (Minbus, siehe u.a. [Blais und Rousseau, 1988]), INTERPLAN/MOBILE-PLAN (siehe [Kliewer, 2005]), sowie IVU.plan (MICROBUS bzw. MICROBUS II, siehe [Bertram und Winckler, 1988] bzw. [Löbel, 1999]). Ein aktuelles Beispiel für die Entwicklung eines Optimierungswerkzeugs für die Umlaufplanung eines speziellen Verkehrsunternehmens geben [Dávid, 2010] und [Árgilán et al., 2010].

Eine Dienstplanoptimierung basierend auf (meta-)heuristischen Ansätzen ermöglicht das System GIST (siehe [Lourenço et al., 2001a]). Exakte Methoden zur Dienstplanoptimierung im ÖPNV bieten z.B. die aktuellen Systeme HASTUS (CrewOpt, siehe [Desrochers und Soumis, 1989]) und TRACS II (siehe [Fores et al., 2002]). In den der ÖPNV-Planung verwandten Bereichen der Planung im Flug- bzw. Bahnverkehr, werden oftmals die Systeme Carmen (siehe [Andersson et al., 1998]) bzw. TURNI (siehe [Abbink et al., 2005]) als Beispiele für erfolgreiche, kommerzielle Dienstplanungssysteme genannt, die auf Verfahren zur mathematischen Optimierung basieren, so z.B. bei [Weider, 2007] und [De Leone et al., 2011].

Hinweise auf eingesetzte exakte Optimierungsverfahren zur vollständig integrierten Umlauf- und Dienstplanung in ÖPNV-Planungssystemen finden sich zu GIROS System HASTUS (CrewOpt und Minbus, siehe [Fleurent und Rousseau, 2007]), zu

PTVs Interplan (bis 2008, siehe [Steinzen, 2007]), sowie zum System IVU.plan (siehe [Borndörfer et al., 2008] bzw. [Borndörfer et al., 2013]).

Nicht bei allen Anbietern ist klar, welche Techniken und Verfahren zum Lösen von Ressourceneinsatzplanungsproblemen genau eingesetzt werden. Es lässt sich aber erkennen, dass die Lösungsansätze führender Anbieter auf exakten Verfahren zum Lösen kombinatorischer Optimierungsprobleme basieren. Darüber hinaus existieren zahlreiche (in Fallstudien getestete) Tools, die von kleineren Gruppen zumeist im Rahmen von Kooperationsprojekten zwischen Forschung und Wirtschaft speziell für einzelne Verkehrsunternehmen entwickelt wurden. Verbreitet ist dabei auch der Einsatz (meta-)heuristischer Verfahren zum Lösen von Planungsproblemen bzw. das automatische Erstellen von Ressourceneinsätzen basierend auf bestimmten Regeln. Letztere Verfahren können auch als „Automatiken“ bezeichnet werden. Soweit Testergebnisse bzw. Fallstudien und Auftragszahlen angegeben werden, wird deutlich, dass die Systeme, die Einplanung von Servicefahrten in kosteneffiziente Umläufe und (Tages-)Dienste geeignet unterstützen können.

2.4.3 Unterstützung beim Finden von ähnlichen Ressourceneinsätzen

Verkehrsunternehmen bieten Servicefahrten üblicherweise an mehr als einem einzelnen Tag an. Auf die Unterschiede zwischen den Servicefahrten, d.h. die Unterschiede der Fahrpläne einzelner Tage wurde bereits in Abschnitt 2.3.1 hingewiesen. Warum zumindest für ähnliche Tage auch ähnliche Ressourceneinsatzpläne gewünscht sind, wurde in Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Welche Unterstützung Planungssysteme für eine ähnliche Planerstellung bieten und welche Grenzen existieren, wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

Referenzpläne

[Steinzen, 2007] veranschaulicht, dass es nicht funktioniert, ähnliche Pläne für unterschiedliche Tage zu ermitteln, wenn für die Planungsprobleme einzelner Tage mathematische Optimierungsmethoden eingesetzt werden, die kosteneffiziente Ressourceneinsatzpläne berechnen. Dazu gibt er ein Beispiel für die Ressourceneinsatzplanung zu zwei Fahrplänen der Tage Mittwoch und Donnerstag einer kleinen Stadt in Deutschland. An beiden Tagen werden 95% identische Fahrten ausgeführt. Abbildung 2.8 zeigt den auftretenden Effekt beim Lösen dieser entsprechenden Planungsprobleme im Zuge einer unabhängigen Dienstplanung (vgl. Abschnitt 2.2.2).

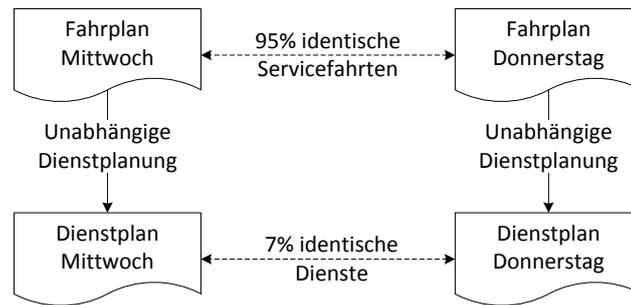


Abbildung 2.8: Auswirkungen von geringfügig unterschiedlichen Fahrplänen auf die Ähnlichkeit der Dienstpläne bei unabhängiger Dienstplanung mit dem Ziel Kosteneffizienz nach [Steinzen, 2007]

Wie aus Abbildung 2.8 ersichtlich wird, werden zwar kosteneffiziente Dienstpläne gebildet, wenn die Planungsprobleme einzeln gelöst werden, aber nur 7% der gebildeten Dienste sind identisch. Ein ähnlicher Input führt bei der Suche nach kosteneffizienten Ressourceneinsatzplänen mit Hilfe mathematischer Optimierungsmethoden also nicht automatisch auch zu einem ähnlichen Output, d.h. zu ähnlichen Plänen.

Auch heuristische Vorgehensweisen beim Einsatz von traditionellen Optimierungswerkzeugen, mit denen kosteneffiziente Pläne erstellt werden können, sind nach [Steinzen, 2007] nicht zielführend. Er beschreibt zwei mögliche Methoden:

- *All first - irregular second*: Zunächst wird das Planungsproblem mit allen im betrachteten Zeitraum gültigen Fahrten gelöst, d.h. ein gemeinsames Planungsproblem für alle regelmäßigen und für alle unregelmäßigen Fahrten. Dann werden die Dienste beibehalten, die im gesamten Zeitraum gültig sind, d.h. alle Dienste, die ausschließlich regelmäßige Fahrten enthalten. Die anderen Dienste werden verworfen und für die entsprechenden Fahrten wird jeweils (pro Tag) ein neues Planungsproblem gelöst.
- *Regular first - irregular second*: Zunächst werden nur die regelmäßigen Fahrten verplant. Danach werden Planungsprobleme (pro Tag) für die unregelmäßigen Fahrten gelöst.

Beide Vorgehensweisen garantieren nicht die gewünschten kosteneffizienten und ähnlichen Pläne. Entweder sind die im zweiten Schritt zu verplanenden Servicefahrten wenige, sodass viele Leerfahrten zwischen den Fahrten notwendig sind und die ermittelten Pläne hohe Kosten aufweisen würden. Oder im zweiten Schritt gibt es noch viele zu verplanende Servicefahrten, wodurch Pläne mit geringen Kosten, aber auch geringer Ähnlichkeit berechnet werden würden. Es entstehen also zumeist Pläne

mit hoher Ähnlichkeit aber auch hohen Kosten, oder mit geringer Ähnlichkeit und geringen Kosten.

Das traditionelle Vorgehen von Planern in der Praxis, um (ähnliche) Dienstpläne für mehrere Tage zu planen, beschreiben [Borndörfer et al., 2012] daher als Nutzen der „Kopier-Funktion“ innerhalb eines Planungssystems: Zunächst wird für einen Tag ein Plan erstellt. Dieser Plan wird für einen ähnlichen Tag kopiert. Je nach Planungssystem bleiben dann Dienste oder Teile von Diensten erhalten, die Fahrten bzw. Aufgaben enthalten, die auch an dem ähnlichen Tag genutzt werden. Das erste Ergebnis der Kopie ist also ein Teildienstplan und eine Menge an unverplanten Aufgaben. Diese unverplanten Aufgaben werden dann, falls möglich, in die beibehaltenen Dienste eingefügt, oder es werden für diese Aufgaben neue Dienste erstellt und ggf. bestehende Dienste modifiziert.

Ohne Unterstützung durch Optimierungsfunktionen kann bei einem solchen Vorgehen allerdings Potenzial für kosteneffizientere Pläne unentdeckt bleiben. In Planungssoftware für Verkehrsunternehmen wird daher zunehmend die Möglichkeit unterstützt, ähnliche Pläne zu generieren. Dabei soll durch ein mathematisch bewertetes Ausrichten des zu erstellenden Planes an einem Referenzplan ein Plan erstellt werden, der ähnlich zum gegebenen Referenzplan ist – idealerweise bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Kostenkriterien. Diese Möglichkeit basierend auf einem Referenzplan, einen zu diesem Plan ähnlichen Plan zu erstellen, bieten z.B. die Planungssoftware *Hastus-CrewOpt* (siehe [Dallaire et al., 2004]) und *IVU.Plan* (siehe [Borndörfer et al., 2012]). Für eine ausführliche Darstellung der wissenschaftlichen Literatur zur Planung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung sei auf Abschnitt 4.3 verwiesen.

Grenzen

Soll ein Referenzplan eingesetzt werden, um für mehr als zwei Tage ähnlich zu planen, gibt es allerdings ein grundlegendes Problem.¹ Es stellt sich die Frage, ob es einen Referenzplan geben kann, der geeignet ist, für alle betrachteten Tage gute ähnliche (und kosteneffiziente) Ressourceneinsatzpläne zu gewährleisten. Dies gilt insbesondere, wenn es keinen Tag gibt, der im Verkehrsunternehmen als Referenztag gilt. Die Eignung des gewählten Referenzplans bestimmt maßgeblich die Qualität des Gesamtergebnisses. Das globale Optimum bezüglich Gesamtkosten und Ähnlichkeit aller betrachteten Tage wird evtl. nicht erreicht, wenn die Ressourceneinsatzpläne dieser Tage separat betrachtet an einen (ungeeigneten) Referenzplan ausgerichtet werden.

¹ Eine Planung für zwei Tage kann z.B. wie folgt funktionieren: Ein Tag wird geplant und diese Planung bildet dann die Referenz für den anderen zu planenden Tag.

Abbildung 2.9 veranschaulicht diese Problematik. Gegeben sind die ähnlichen Fahrpläne mehrerer Tage und ein Referenzplan.

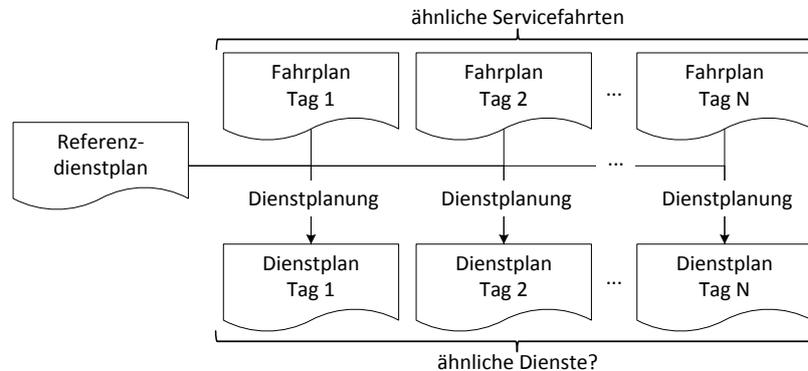


Abbildung 2.9: Dienstplanung mit Nutzen eines Referenzplanes zur Erstellung ähnlicher Dienste: Die Ähnlichkeit zwischen den Plänen einzelner Tagen ist abhängig von der Qualität des Referenzplans

Die schematische Darstellung in Abbildung 2.9 zeigt, dass bei der Planerstellung für mehrere Tage anhand eines Referenzplans grundsätzlich keine Interaktion zwischen einzelnen Tagen vorgesehen ist. D.h. ähnliche Tage werden nicht gemeinsam geplant. Wird der Referenzplan nicht während der Planung modifiziert, hängt die Ähnlichkeit und Kosteneffizienz des Ergebnisses von der Ausrichtung am ursprünglichen Referenzplan ab.

Als Referenzplan kann der Plan für die Fahrten eines bestimmten Tages ausgewählt werden. Bei einem Fahrplanwechsel z.B. der Plan aus dem letzten Jahr bzw. der letzten Saison. Oder es wird ein (künstlicher) Referenzplan für eine bestimmte Fahrtenmenge erstellt. Eine Schwierigkeit besteht darin, genau die Fahrtenmenge zu bestimmen, deren zugehöriger Referenzplan geeignet ist, ähnliche und kosteneffiziente Pläne für alle betrachteten Tage zu gewährleisten.

Wie problematisch die Ausrichtung der Ressourceneinsatzpläne mehrerer Tage an einem (ungeeigneten) Referenzplan sein kann, veranschaulicht folgendes Beispiel:

Gegeben sind die regelmäßigen Servicefahrten R_1 , R_2 , R_3 und R_4 , sowie eine unregelmäßige Servicefahrt U_1 , die sich wie folgt auf die Fahrpläne zweier Tage verteilen: Der Fahrplan T_1 enthält die Fahrten R_1 , R_2 , R_3 und R_4 . Der Fahrplan T_2 bedient zusätzlich zu den vier regelmäßigen Fahrten noch die Fahrt U_1 . Abbildung 2.10 fasst die zeitliche Lage der Fahrten sowie deren Start- und Endhaltstellen und Ablösepunkte zusammen. Um ähnliche Ressourcenpläne für die beiden Fahrpläne zu erstellen, ist der in Abbildung 2.11 dargestellte Referenzplan gegeben, an welchem sich die Ressourceneinsatzplanung orientieren soll. Im Referenzplan bedient Dienst I die Fahrten

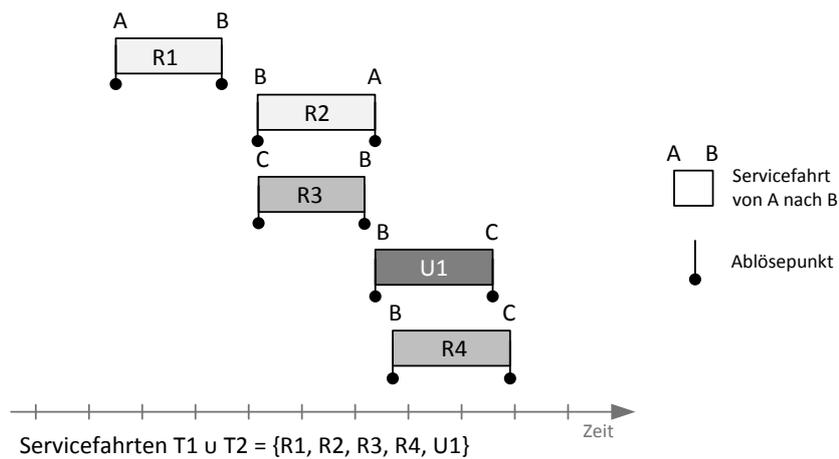


Abbildung 2.10: Zeitliche Lage, Start- und Endhaltestellen und Ablösepunkte der zu verplanenden regelmäßigen Servicefahrten R1, R2, R3, R4 und der unregelmäßigen Servicefahrt U1

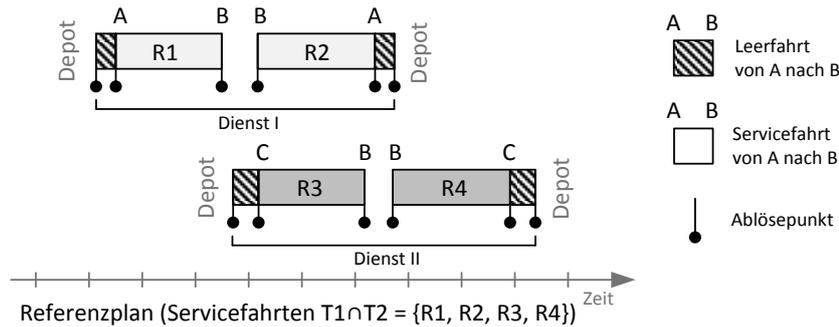


Abbildung 2.11: Referenzplan zur Planung der regelmäßigen Servicefahrten R1, R2, R3, R4

$R1, R2$ und Dienst II besteht aus den Fahrten $R3, R4$. Ein Umlauf enthält Dienst I und der zweite Umlauf enthält Dienst II.

Abbildung 2.12 zeigt die optimalen Ressourceneinsatzpläne für die beiden Fahrpläne $T1$ und $T2$, wenn die regelmäßigen Fahrten $R1, R2, R3, R4$ nach Referenzplan geplant werden. Dahingegen stellt Abbildung 2.13 die optimalen Ressourceneinsatzpläne ohne Ausrichtung am Referenzplan dar.

Wird nach Referenzplan geplant, sind die Ressourceneinsatzpläne an beiden Tagen für die regelmäßigen Fahrten $R1$ bis $R4$ ähnlich (siehe Abbildung 2.12). Wie im Referenzplan werden an beiden Tagen die Fahrten $R1, R2$ in einem Dienst bzw. Umlauf bedient und die Fahrten $R3, R4$ in einem zweiten Dienst bzw. Umlauf. Um die un-

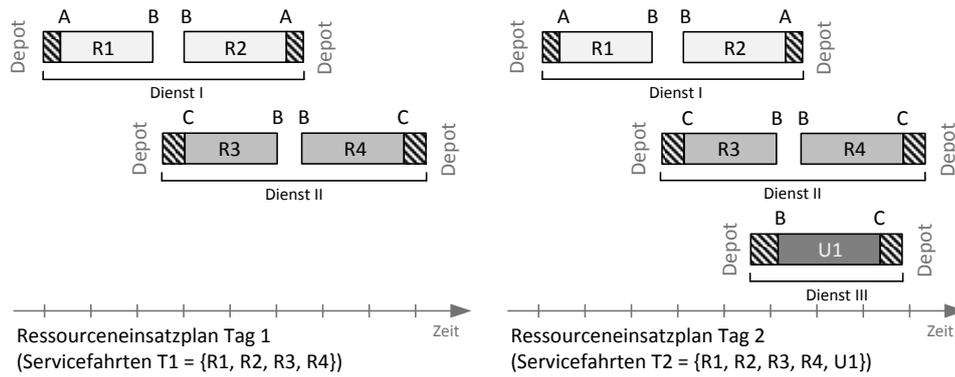


Abbildung 2.12: Optimale Lösung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems für Tag 1 und Tag 2 BEI Planung der regelmäßigen Fahrten R1, R2, R3, R4 nach Referenzplan aus Abbildung 2.11

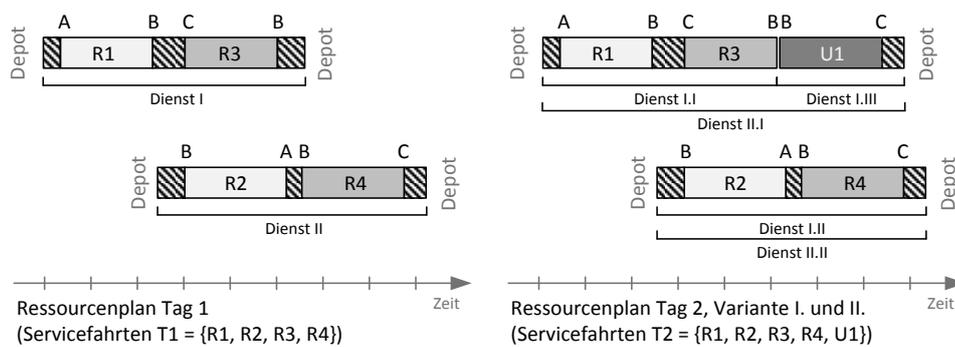


Abbildung 2.13: Optimale Lösung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems für Tag 1 und Tag 2 OHNE Planung der regelmäßigen Fahrten R1, R2, R3, R4 nach Referenzplan aus Abbildung 2.11

regelmäßige Fahrt U1 an Tag 2 bedienen zu können, ist ein zusätzlicher Dienst bzw. Umlauf notwendig.

Wird beim Lösen der Umlauf- und Dienstplanungsprobleme der Referenzplan ignoriert, können Ressourceneinsatzpläne gebildet werden, die ähnlich ähnlich zueinander sind wie bei einer Ausrichtung am Referenzplan. Zusätzlich sind sie auch kosteneffizienter (siehe Abbildung 2.13). Wenn an beiden Tagen die regelmäßigen Fahrten R1, R3 und R2, R4 als Fahrtensequenz ausgeführt werden, kann an Tag 2 je nach Planungsvariante ein Dienst und/oder ein Umlauf eingespart werden. Die Lösung dominiert also die oben vorgestellte Lösung mit Ausrichtung am Referenzplan. Im Beispiel führt also eine Ausrichtung am Referenzplan zu schlechteren Plänen bezogen auf Ähnlichkeit und Kosteneffizienz als möglich sind.

2.4.4 Zusammenfassung

Der kurze Überblick über die Unterstützung des Planungsprozesses durch Softwaresysteme mit mathematischen Optimierungskomponenten zeigt, dass eine kosteneffiziente Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV vielfach (erfolgreich) unterstützt wird. Allerdings gibt aus Wettbewerbsgründen kein Hersteller einen tieferen Einblick in sein System und so bleibt neben dem aktuellen Entwicklungsstand in der Regel offen, wie spezielle Anforderungen von Verkehrsunternehmen an Umläufe und Dienste in den Optimierungskomponenten berücksichtigt werden können. So bleibt auch offen, ob und welche Nachbearbeitungen an den vorgeschlagenen Plänen notwendig sind, damit diese von Planern und Fahrern vollständig akzeptiert werden.

Es wird aber deutlich, dass einige führende Anbieter den für Verkehrsunternehmen unerwünschten Effekt beseitigen wollen, dass ein ähnlicher Input unterschiedlicher Tage beim Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden nicht zwangsläufig auch zu einem ähnlichem Output führt. Daher bieten einige wenige Planungssysteme die Möglichkeit, eine ähnliche Planung beim Einsatz mathematischer Optimierung zu unterstützen, indem ein Referenzplan in die Planung einbezogen werden kann.

Die Verwendung eines Referenzplans für eine Planung von mehr als zwei Tagen kann allerdings dazu führen, dass ein Optimum bezüglich Gesamtkosten und Gesamtähnlichkeit aller betrachteten Tage verfehlt wird (vgl. Abschnitt 2.4.3). Daher stellt sich die Frage, ob umfassendere Möglichkeiten existieren, eine kosteneffiziente Planung mit Ähnlichkeitsaspekten durch mathematische Optimierungsmethoden zu unterstützen.

Kapitel 3

Mathematischer Hintergrund zur Optimierung von Umläufen und Diensten

Die im vorangehenden Kapitel in Abschnitt 2.4 vorgestellten Softwaresysteme zur Unterstützung der ÖPNV-Planung enthalten mathematische Optimierungskomponenten, die auf Modellierungen und Methoden der kombinatorischen Optimierung basieren. Die zum Verständnis dieser Techniken notwendigen Grundlagen werden in diesem Kapitel kurz erläutert und auf weiterführende Literatur verwiesen. Vor allem, da sie die Basis für die in dieser Arbeit entwickelten Lösungskonzepte zur Umlauf- und Dienstbildung bzw. zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitsaspekten sind. In Abschnitt 3.1 werden zunächst einige Optimierungsprobleme vorgestellt, die zur Modellierung von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen genutzt werden. Abschnitt 3.2 beschreibt Verfahren zum Lösen dieser Probleme.

3.1 Relevante Modellarten

In diesem Abschnitt werden Probleme der kombinatorischen Optimierung vorgestellt, die in der Regel zur Modellierung von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen genutzt werden. Sie sind grundlegend für die in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansätze.

3.1.1 Set-Partitioning/Covering-Problem

Das *Set-Partitioning-Problem* (SPP) ist wie folgt definiert (vgl. [Balas und Padberg, 1976]): Gegeben sind eine Menge M und eine Menge N , die Teilmengen von M enthält wobei den Teilmengen jeweils ein Gewicht bzw. Kostenwert zugeordnet ist. Gesucht sind die disjunkten Teilmengen aus N , die zusammen kostenminimal jedes Element aus M genau einmal enthalten.

Falls Element $i \in M$ in Teilmenge $j \in N$ enthalten ist, sei $a_{ij} = 1$, ansonsten sei $a_{ij} = 0$. Jeder Teilmenge $j \in N$ seien außerdem sowohl Kosten c_j zugeordnet, sowie eine binäre Entscheidungsvariable x_j , die beschreibt, ob j aus N gewählt ist ($x_j = 1$)

oder nicht ($x_j = 0$). Das mathematische Modell für das SPP lautet dann wie folgt:

$$\sum_{j \in N} c_j x_j \rightarrow \min \quad (3.1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in N} a_{ij} x_j = 1 \quad \forall i \in M \quad (3.2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (3.3)$$

Durch die Zielfunktion (3.1) werden kostenminimale Teilmengen gesucht. Abdeckungsbedingungen (3.2) garantieren, dass jedes Element genau einmal in den ausgewählten Teilmengen enthalten ist.

Im Gegensatz zum SPP ist beim *Set-Covering-Problem* (SCP) gefordert, dass jedes Element $i \in M$ mindestens einmal in den ausgewählten Teilmengen aus N enthalten sein muss, statt genau einmal. Für das mathematische Modell des SCP wird Nebenbedingung (3.2) also wie folgt umformuliert

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in M \quad (3.4)$$

Eine zulässige Lösung des SPP ist immer auch eine zulässige Lösung des entsprechenden SCP. Andersherum beschreibt eine optimale Lösung und jede untere Schranke des SCP eine untere Schranke der Lösung des entsprechenden SPP. SPP und SCP sind nach [Garey und Johnson, 1979] \mathcal{NP} -schwer.

Im Kontext von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen entspricht die Menge M üblicherweise Fahrten bzw. Aufgaben, die bedient werden müssen. Durch die Menge N sind Teilmengen an Fahrten bzw. Aufgaben definiert, die jeweils von einem Bus bzw. Dienst bedient werden können. Das entsprechende SPP bzw. SCP repräsentiert dann die Suche nach einer kostenminimalen Auswahl von Bussen bzw. Diensten, die die Fahrten bzw. Aufgaben bedienen können.

3.1.2 Netzwerkflussprobleme

Die in der Umlauf- und Dienstplanung zu verrichtenden Aufgaben, wie z.B. die Fahrten des der Planung zugrunde liegenden Fahrplans, lassen sich auch durch ein *gerichtetes Netzwerk bzw. einen gerichteten Graphen* $G = (N, A)$ darstellen, d.h. einer Menge von Knoten N und einer Menge von Kanten A . Dabei verbindet jede Kante jeweils zwei Knoten miteinander. Im Unterschied zu ungerichteten Netzwerken repräsentiert eine Kante in gerichteten Netzwerken eine Richtung, sodass eine Reihenfolge (Vorgänger- bzw. Nachfolgerknoten) zwischen Knoten abgebildet wird.

Grundsätzlich kann bei den genutzten Netzwerkmodellen in der Umlauf- und Dienstplanung unterschieden werden zwischen sogenannten *Connection-basierten Netzwerken* und sogenannten *Time-Space-* bzw. *Time-Line-basierten Netzwerken*.

- In einem *Connection-basierten Netzwerk* repräsentieren die Knoten jeweils eine einzelne Fahrt, während die Kanten kompatible Fahrten miteinander verbinden. Dabei werden explizit alle möglichen Verbindungen abgebildet. So enthält das Netzwerk vergleichsweise viele Kanten. Eigenschaften von Verbindungen zweier Fahrten wie z.B. mögliche Verspätungen zwischen zwei Fahrten können dadurch aber direkt auf einer Kante ausgedrückt werden.
- In einem *Time-Space-* oder *Time-Line-Netzwerk* repräsentieren die Knoten Ereignisse zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort, wie z.B. den Beginn einer Servicefahrt an einer Haltestelle und das Ende einer Servicefahrt an einer Haltestelle. Kanten zwischen den Knoten einer Servicefahrt bilden die entsprechende Fahrt ab. Außerdem werden die Ankunfts- und Abfahrtsereignisse an einem Ort auf der sogenannten *Zeitleiste* des Ortes durch Kanten verbunden. Ebenso werden durch Kanten Ereignisgruppen zweier Orte miteinander verknüpft, sodass im Netzwerk implizit alle möglichen Verbindungen zwischen kompatiblen Fahrten abgebildet sind. Durch die implizite Modellierung kann die zur Modellierung notwendige Kantenanzahl reduziert werden. Eigenschaften von Verbindungen zweier Fahrten können so aber nicht direkt modelliert werden.

Tabelle 3.1 zeigt einen Beispielfahrplan mit sieben Servicefahrten zwischen drei Haltestellen, zu welchem Abbildung 3.1 die entsprechende Repräsentation als Connection-basiertes Netzwerk und als Time-Space-Netzwerk darstellt.

Fahrt	Von	Nach	Abfahrtszeit	Ankunftszeit
1	A	B	8:00	8:15
2	C	B	8:00	8:20
3	C	B	8:20	8:40
4	B	A	9:00	9:15
5	B	C	9:20	9:40
6	A	B	9:20	9:35
7	A	B	9:30	9:45

Tabelle 3.1: Beispielfahrplan für Netzwerkmodelle

Diese Netzwerkmodelle bilden die Grundlage für die Formulierung von Optimierungsproblemen zur Umlauf- und Dienstplanung als Netzwerkflussprobleme. Die im

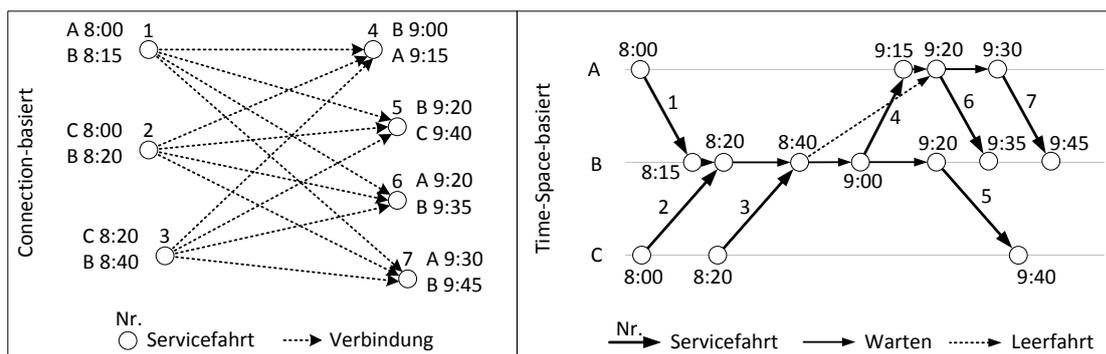


Abbildung 3.1: Beispiele für eine Connection-basierte und eine Time-Space-basierte Netzwerkrepräsentation

weiteren Verlauf der Arbeit genutzten Formulierungen als *Minimalkosten-Fluss-Problem* und *Kürzeste-Wege-Problem*, *Mehrgüter-Fluss-Problem* und *Ressourcenbeschränktes Kürzeste-Wege-Problem* sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

Minimalkosten-Fluss-Problem und Kürzeste-Wege-Problem

Das *Minimalkosten-Fluss-Problem* (engl. *minimum cost flow problem*, *MFP*) bildet die Grundlage für verschiedene andere Netzwerkflussprobleme: In einem Netzwerk ist für ein Gut ein kostenminimaler Fluss zu bestimmen, auf welchem die Bedarfe des Gutes in allen Knoten befriedigt werden (vgl. [Ahuja et al., 1993]).

Sei $G = (N, A)$ ein gerichteter Graph mit der Knotenmenge N und der Kantenmenge A . Jeder Kante $(i, j) \in A$ mit $i, j \in N$ sind Kosten c_{ij} zugeordnet, die für die Beförderung einer Einheit des Gutes über diese Kante anfallen, sowie eine Flussvariable $x_{ij} \in \mathbb{R}$, die die auf der Kante beförderten Flusseinheiten beschreibt. Des weiteren sei der Fluss auf jeder Kante $(i, j) \in A$ durch eine untere und obere Schranke l_{ij} bzw. u_{ij} begrenzt. Zu jedem Knoten $i \in N$ sei ein Bedarf b_i definiert, der einem Angebot entspricht, falls er negativ ist, und einer Nachfrage, falls der Bedarf positiv ist. Ist $b_i = 0$, repräsentiert i einen sogenannten Umladeknoten. Das mathematische Modell für das MFP kann dann wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (3.5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = b_i \quad \forall i \in N \quad (3.6)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.7)$$

Durch Zielfunktion (3.5) wird ein kostenminimaler Fluss im Netzwerk gesucht, wobei Flusserhaltungsbedingungen (3.6) garantieren, dass die Differenz zwischen Zufluss und Abfluss an jedem Knoten dem entsprechenden Bedarf dieses Knotens entspricht. Kapazitätsbedingungen (3.7) stellen sicher, dass der Fluss auf den Kanten dabei untere und obere Schranken einhält. Wenn alle Bedarfe und Schranken ganzzahlig sind, dann ist auch die Flusslösung ganzzahlig (vgl. [Wolsey, 1998]).

Gibt es genau einen Angebotsknoten s mit $b_s = -1$ (Quelle) und einen Nachfrageknoten t mit $b_t = 1$ (Senke) und gilt ferner $b_i = 0$ für alle anderen Knoten $i \in N \setminus \{s, t\}$, sowie $l_{ij} = 0$ und $u_{ij} = 1$ auf allen Kanten $(i, j) \in A$, dann wird das so formulierte Minimalkosten-Fluss-Problem auch als *Kürzeste-Wege-Problem* (engl. *shortest path problem, SP*) bezeichnet. In diesem wird ein kürzester, d.h. kostenminimaler, Weg vom (Quell-)Knoten s zum (Senke-)Knoten t gesucht.

Bei der Modellierung von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen werden Minimalkosten-Fluss-Probleme insbesondere dazu genutzt, den Umlaufplanungsteil darzustellen: Die Bedarfe an den Knoten (oder die Kapazitäten auf den Kanten) repräsentieren dann die geforderte Bedienung von Fahrten in einer bestimmten Anzahl und der Fluss entspricht den von Fahrzeugen zu absolvierenden Fahrtensequenzen.

Mehrgüter-Fluss-Problem

Das *Mehrgüter-Fluss-Problem* (engl. *multicommodity flow problem, MCFP*) ist eine Erweiterung des *Minimalkosten-Fluss-Problems* (vgl. [Ahuja et al., 1993]): Statt für ein Gut sind für mehrere Güter kostenminimale Flüsse in einem gemeinsamem Netzwerk zu finden. Dabei muss die Flusslösung für jedes Gut so bestimmt sein, dass die jeweiligen güterspezifischen Bedarfen in den Knoten des Netzwerkes erfüllt sind. Quell- und Senkeknoten eines Flusses können je Gut unterschiedlich sein. Verbunden sind die Flüsse der Güter dadurch, dass ihr gemeinsamer Fluss auf einer Kante über gemeinsame Kapazitätsrestriktionen eingeschränkt ist.

Zusätzlich zum gerichteten Graphen $G = (N, A)$ mit der Knotenmenge N und der Kantenmenge A sei D die Menge aller Güter. Zu jedem Gut $d \in D$ sei durch die ganzzahlige Variable x_{ij}^d der Fluss auf Kante $(i, j) \in A$ beschrieben, wobei die Kosten für jede Flusseinheit durch c_{ij}^d definiert seien. Außerdem sei der Fluss auf jeder Kante $(i, j) \in A$ für jedes Gut $d \in D$ durch eine untere und obere Schranke l_{ij}^d bzw. u_{ij}^d begrenzt. Des Weiteren sei der gemeinsame Fluss aller Güter je Kante durch eine minimale und maximale Kapazität L_{ij} bzw. U_{ij} beschränkt. Der Bedarf eines Gutes $d \in D$ ist für jeden Knoten $i \in N$ durch b_i^d vorgegeben. Das mathematische Modell für das MCFP kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$\sum_{d \in D} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^d x_{ij}^d \rightarrow \min \quad (3.8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij}^d - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji}^d = b_i^d \quad \forall i \in N, \forall d \in D \quad (3.9)$$

$$l_{ij}^d \leq x_{ij}^d \leq u_{ij}^d \quad \forall (i,j) \in A, \forall d \in D \quad (3.10)$$

$$L_{ij} \leq \sum_{d \in D} x_{ij}^d \leq U_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.11)$$

$$x_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall (i,j) \in A, \forall d \in D \quad (3.12)$$

Durch die Zielfunktion (3.8) sollen Flüsse mit minimalen Kosten gefunden werden. Flusserhaltungsbedingungen (3.9) und Kapazitätsbedingungen (3.10) stellen dabei einen gültigen Fluss für jedes Gut sicher. Die Kapazitätsbedingungen (3.11) für alle Güter garantieren, dass der gemeinsame Fluss aller Güter die vorgegebenen Kapazitäten einhält. Bedingung (3.12) stellt die Ganzzahligkeit der gefundenen Flusslösung sicher. Sind ganzzahlige Flussvariablen gefordert und werden mindestens zwei Güter betrachtet, ist das formulierte Problem nach [Garey und Johnson, 1979] \mathcal{NP} -vollständig.

Im Kontext von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen repräsentieren die unterschiedlichen Güter in der Regel unterschiedliche Fahrzeug- oder Diensttypen bzw. unterschiedliche Depots. Die Bedarfe an den Knoten oder die Kapazitäten auf den Kanten entsprechen dann der geforderten Bedienung von Fahrten oder Aufgaben in einer bestimmten Anzahl und der Fluss eines Gutes entspricht den Fahrten- oder Aufgabenfolgen von Fahrzeugen oder Diensten des entsprechenden Typs bzw. Depots. Dabei muss jede Fahrt oder Aufgabe nicht zwangsläufig von allen „Gütern“ bedient werden können und jede Fahrt oder Aufgabe soll insgesamt von allen „Gütern“ nur einmal bzw. in der vorgegebenen Anzahl abgedeckt werden.

Ressourcenbeschränktes Kürzeste-Wege-Problem

Das *ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Problem* (engl. *resource constrained shortest path problem*, *RCSP*) ist eine Erweiterung des klassischen *Kürzeste-Wege-Problems*: In einem Netzwerk wird der kostenminimale Weg von der Quelle zur Senke gesucht, auf dem Ressourcen nur in einem vorgegebenen Maße verbraucht werden (vgl. [Irnich und Desaulniers, 2004]).

Im gerichteten Graphen $G = (N, A)$ mit der Knotenmenge N und der Kantenmenge A sind jeder Kante $(i, j) \in A$ mit $i, j \in N$ Kosten c_{ij} zugeordnet. Zusätzlich ist auf

jeder Kante aus A pro Ressource $v \in V$ ein Ressourcenverbrauch $d_{ij}^v \geq 0$ definiert. Eine endliche Folge von Kanten aus A , bei denen der Startknoten der nächsten Kante der Endknoten der vorherigen Kante ist, bildet einen Pfad. Der Pfad ist zulässig, wenn der Ressourcenverbrauch jeder Ressource $r \in R$ für den gesamten Pfad zwischen einer unteren Schranke l^v und einer oberen Schranke u^v liegt.

Der Ressourcenverbrauch entlang eines Pfades ist durch sogenannte Ressourcenerweiterungsfunktionen bestimmt. Sei T_i^v der kumulierte Ressourcenverbrauch einer Ressource $v \in V$ auf einem Pfad vom Quellknoten bis zum Knoten i und sei d_{ij}^v der Verbrauch einer von i ausgehenden Kante (i, j) . Bei einer Erweiterung des Pfades um diese Kante wird T_i^v mit dem Verbrauch d_{ij}^v verrechnet. Im einfachsten Fall ist die Ressourcenerweiterungsfunktion linear und für die Verrechnung gilt $T_j^v = T_i^v + d_{ij}^v$. Für eine sehr gute generische Beschreibung komplizierterer Ressourcenerweiterungsfunktionen sei auf [Irnich und Desaulniers, 2004] verwiesen.

Eine binäre Entscheidungsvariable x_{ij} gibt an, ob Kante $(i, j) \in A$ auf dem kürzesten zulässigen Pfad zwischen Quellknoten s und Senke t liegt. Das mathematische Modell für das RCSP kann dann wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (3.13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} - \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = s \\ 0 & \text{falls } i \in N \setminus \{s, t\} \\ -1 & \text{falls } i = t \end{cases} \quad (3.14)$$

$$l^v \leq \sum_{(i,j) \in A} d_{ij}^v x_{ij} \leq u^v \quad \forall v \in V \quad (3.15)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.16)$$

Durch die Zielfunktion (3.13) wird ein kostenminimaler Pfad über die Kanten des Netzwerks gesucht. Dabei stellen die Flussserhaltungsbedingungen (3.14) sicher, dass die Kanten auf genau einem Weg von der Quelle zur Senke liegen. Restriktionen (3.15) garantieren, dass der Ressourcenverbrauch auf dem gefundenen Pfad für alle Ressourcen zulässig ist.

Wenn mindestens eine Ressource modelliert ist, ist das RCSP nach [Garey und Johnson, 1979] ein \mathcal{NP} -schweres Optimierungsproblem.

Statt Ressourcenverbräuche zur Modellierung von Zulässigkeitsbedingungen von Pfaden zu nutzen, können Zulässigkeitsbedingungen evtl. auch durch *strukturelle Pfadbeschränkungen* abgebildet werden. Dies ist dann möglich, wenn beim Netzwerkaufbau die Knoten so durch Kanten miteinander verbunden werden können, dass al-

le Pfade von der Quelle zur Senke diese Zulässigkeitsbedingungen nicht verletzen können.

Bei der Modellierung von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen werden RCSPs in der Regel zur Bestimmung zulässiger Dienste genutzt. In den als RCSP formulierten Optimierungsproblemen zur Diensterstellung werden dann über Ressourcenverbräuche (und auch über strukturelle Pfadbeschränkungen) Restriktionen zur Dienstzulässigkeit abgebildet. Dies können z.B. Restriktionen zu bestimmten Zeiten eines Dienstes sein, wie Beschränkungen zu minimalen und maximalen Arbeitszeiten.

3.2 Relevante Optimierungstechniken

Nachdem im vorherigen Abschnitt relevante Modellarten zur Modellierung von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen aufgegriffen wurden, sollen in diesem Abschnitt kurz entsprechende Optimierungstechniken zum Lösen der Modelle erläutert werden. Die Optimierungstechniken bilden eine Grundlage für die in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansätze.

3.2.1 Lagrange-Relaxation mit Subgradienten-Verfahren

Lagrange-Relaxation ist nach [Beasley, 1993] eine Technik, mit der für schwierig zu lösende (Minimierungs-)Probleme eine (untere) Schranke des optimalen Zielfunktionswertes bestimmt werden kann. Hierzu wird das Problem vereinfacht, indem Restriktionen aufgehoben werden und dann jeweils gewichtet mit einem Faktor, den sogenannten Lagrange-Multiplikatoren, in die Zielfunktion aufgenommen werden. Wird eine relaxierte Restriktion verletzt, verschlechtert sich der Zielfunktionswert in Abhängigkeit der Höhe der Verletzung und des Lagrange-Multiplikators.

Die Vorgehensweise soll nachfolgend an einem Beispiel verdeutlicht werden. Sei folgendes Problem P das zu lösende Optimierungsproblem:

$$P : \quad \sum_{j \in N} c_j x_j \rightarrow \min \quad (3.17)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} a_{ij} x_j = b_i \quad \forall i \in M_1 \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in N} d_{ij} x_j = e_i \quad \forall i \in M_2 \quad (3.19)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (3.20)$$

Falls das Problem P durch die Restriktionen (3.18) schwer zu lösen ist, wird für jede dieser Restriktionen ein Lagrange-Multiplikator $\pi_i \in \mathbb{R}$ definiert, mit dem sie in die Zielfunktion aufgenommen wird. Es ergibt sich folgendes *Lagrange-Unterproblem* $P(\pi)$:

$$P(\pi) : \sum_{j \in N} c_j x_j + \sum_{i \in M_1} \pi_i (b_i - \sum_{j \in N} a_{ij} x_j) \rightarrow \min \quad (3.21)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} d_{ij} x_j = e_i \quad \forall i \in M_2 \quad (3.22)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (3.23)$$

Das Lagrange-relaxierte Problem $P(\pi)$ liefert für jede Wahl des Vektors $\pi = (\pi_i)_{i \in M_1}$ eine untere Schranke zur optimalen Lösung des ursprünglichen Problems P (vgl. [Geoffrion, 1974]) – wird eine „ \leq “-Restriktion relaxiert bei $\pi_i \leq 0$, bei einer „ \geq “-Restriktion entsprechend mit $\pi_i \geq 0$. Da nicht irgendeine untere Schranke gesucht ist, sondern die beste untere Schranke, wird nach Lagrange-Multiplikatoren gesucht, die $P(\pi)$ maximieren. Das entsprechende Problem wird als *Lagrange-Duales-Problem* (LDP) bezeichnet und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\text{LDP: } P(\pi) \rightarrow \max_{\pi} \quad (3.24)$$

Im besten Fall können Multiplikatoren bestimmt werden, mit denen der Wert des LDP dem Optimalwert des Ursprungsproblems P entspricht. Nach [Geoffrion, 1974] liefert die optimale Lösung des LDP eine untere Schranke für das Ursprungsproblem, die immer mindestens so gut ist, wie der Wert einer *LP-Relaxation* des Ursprungsproblems, d.h. der Wert einer Vereinfachung eines (gemischt-)ganzzahligen Ursprungsproblems bei welchen auf die Ganzzahligkeitsbedingungen für Variablen verzichtet wird.

Da die Funktion $P(\pi)$ stückweise linear, konkav und nicht differenzierbar ist, ist das LDP ein nicht differenzierbares Optimierungsproblem. Ein geeignetes Lösungsverfahren, mit welchem es näherungsweise gelöst werden kann, ist das *Subgradienten-Verfahren*, welches im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

Subgradienten-Verfahren

Das *Subgradienten-Verfahren* ist ein iteratives Suchverfahren, um eine nicht differenzierbare konkave Funktion zu maximieren bzw. eine konvexe Funktion zu minimieren. Mit ihm können gute Lagrange-Multiplikatoren π bestimmt werden, die $P(\pi)$ approximativ maximieren (vgl. [Held und Karp, 1971]).

Algorithmus 3.2.1 fasst die nach [Beasley, 1993] notwendigen Schritte des Verfahrens zusammen. In jeder Iteration t wird abhängig von der aktuellen Lösung x^t des Lagrange-Unterproblems $P(\pi^t)$ der Subgradientenvektor s^t und damit die Suchrichtung δ^t bestimmt, sowie die Schrittweite w^t berechnet. Bei der Schrittweitenberechnung sorgt ein Skalierungsparameter λ für eine Konvergenz des Verfahrens, indem er verkleinert wird, wenn sich der Zielfunktionswert eine bestimmte Anzahl Iteration nicht ändert.

Algorithmus 3.2.1 : Grundversion Subgradienten-Verfahren

(Schritt 1) **Initialisierung**

Initialisiere Multiplikatoren π^0 , setze $t = 0$.
 Berechne obere Schranke UB .

(Schritt 2) **Löse Lagrange-Unterproblem**

Löse $P(\pi^t)$ und speichere optimale Lösung x^t .

(Schritt 3) **Berechne Suchrichtung δ^t**

Berechne Subgradienten $s_i^t = b_i - \sum_{j \in N} a_{ij} x_j^t$ für alle $i \in M_1$.
 Setze $\delta^t = s^t$.

(Schritt 4) **Berechne Schrittweite w^t**

$$w^t = \lambda \frac{UB - P(\pi^t)}{\|\delta^t\|^2}$$

(Schritt 5) **Aktualisiere Lagrange-Multiplikatoren π^{t+1}**

$$\pi_i^{t+1} = \pi_i^t + w^t \delta_i^t \text{ für alle } i \in M_1$$

(Schritt 6) **Überprüfe Abbruchkriterien**

Abbruch, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

$$s^t = 0,$$

$$w^t \leq \eta,$$

$$t \geq t_{max},$$

ansonsten setze $t = t + 1$ und gehe zu Schritt 2.

Das Verfahren bricht ab, wenn der Subgradientenvektor s^t gleich Null ist. Dann ist die dual optimale Lösung für das ursprüngliche Problem P primal zulässig und somit optimal. Andere Abbruchkriterien sind z.B. durch einen Parameter η nahe Null gegeben, sodass das Verfahren stoppt, wenn nur noch eine sehr geringe Schrittweite ermittelt wird, oder z.B. dadurch, dass eine maximale Anzahl Iterationen t_{max} erreicht ist.

3.2.2 Column Generation

Column Generation ist ein Verfahren zur Lösung linearer Optimierungsprobleme mit sehr vielen Variablen. Einen umfassenden Überblick über das Verfahren geben u.a. [Desrosiers und Lübbecke, 2005]. [Barnhart et al., 1998] diskutieren die Nutzung von

Column Generation zur Lösung gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, nur einen Teil aller möglichen Variablen des Problems zu betrachten, um so das Gesamtproblem in angemessener Zeit und mit akzeptablem Speicherbedarf lösen zu können.

Zu Beginn des Verfahrens werden deshalb nicht alle Variablen des zu lösenden Problems, *Master-Problem* genannt, aufgezählt, sondern es werden im Verlauf nur diejenigen generiert, die benötigt werden. Sei folgendes Problem MP das zu lösende Master-Problem mit sehr großer Spaltenanzahl $|N|$:

$$\text{MP: } \sum_{j \in N} c_j x_j \rightarrow \min \quad (3.25)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in N} a_{ij} x_j = b_i \quad \forall i \in M \quad (3.26)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (3.27)$$

Beginnend mit einer zulässigen Lösung von MP, die z.B. heuristisch bestimmt werden kann, werden im Algorithmusverlauf aus der Menge aller möglichen Variablen N nur die Variablen N'' zur aktuellen im Modell enthaltenen Variablen- bzw. Spaltenmenge N' hinzugefügt, mit deren Einbeziehung sich der aktuelle Zielfunktionswert verbessern kann. Ein solches partielles Problem bestehend aus einer Teilmenge aller möglichen Spalten wird dabei als *beschränktes Master-Problem* bezeichnet.

In jeder Iteration des Column Generation-Verfahrens wird ein beschränktes Master-Problem gelöst, und die Lösung wird daraufhin überprüft, ob sie eine optimale Lösung für das ursprüngliche Master-Problem darstellt. Sei Vektor x die optimale primale Lösung für das jeweilige beschränkte Master-Problem und Vektor π die duale. Um die Optimalität von x für das ursprüngliche Master-Problem zu überprüfen, ist ein weiteres Optimierungsproblem zu lösen. Bei diesem wird nach Spalten $j \in N$ mit negativen *reduzierten Kosten* gesucht. Dabei berechnen sich die reduzierten Kosten \bar{c}_j einer Spalte j als $\bar{c}_j = c_j - \sum_{i \in M} a_{ij} \pi_i$, wobei π_i die jeweils zu den Restriktionen (3.26) zugehörige duale Variable ist. Das zu lösende Problem wird als *Pricing-Problem* bezeichnet und kann abgekürzt mit PP wie folgt formuliert werden:

$$\text{PP: } \left\{ c_j - \sum_{i \in M} a_{ij} \pi_i \right\} \rightarrow \min_{j \in N} \quad (3.28)$$

Solange Variablen mit negativen reduzierten Kosten existieren, werden diese im Pricing-Problem generiert und können dem beschränkten Master-Problem hinzugefügt werden. Das mit einer oder mehreren Spalten erweiterte beschränkte Master-Problem

wird dann erneut gelöst. Column Generation endet, wenn keine Spalten mehr mit negativen reduzierten Kosten existieren, die Lösung des aktuellen Pricing-Problems also $\min_{j \in N} \{c_j - \sum_{i \in M} a_{ij} \pi_i\} \geq 0$ ist. Dann kann die optimale Lösung x des aktuellen beschränkten Master-Problems nicht mehr verbessert werden und x ist eine optimale Lösung des Ursprungsproblems MP. Algorithmus 3.2.2 fasst die Schritte des Verfahrens zusammen.

Algorithmus 3.2.2 : Column Generation-Verfahren

(Schritt 1) Initialisierung

Bestimme initiale Spaltenmenge N^0 .
Setze $t = 0$ und $N' = N^0$.

(Schritt 2) Löse (beschränktes) Master-Problem

Löse LP-Relaxation von MP mit aktueller Spaltenmenge N'
und speichere Dualwerte π^t .

(Schritt 3) Löse Pricing-Problem

Löse Pricing-Problem $PP(\pi^t)$ und erhalte neue Spalten N''
mit negativen reduzierten Kosten.
Falls $|N''| = 0$ terminiere.

(Schritt 4) Füge neue Spalte(n) zum Master hinzu

Setze $N' = N' \cup N''$ und $t = t + 1$.
Gehe zu Schritt 2.

Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation

Column Generation kann auch mit Lagrange-Relaxation kombiniert werden, siehe z.B. bei [Freling, 1997]. Im Verfahren werden die jeweiligen beschränkten Master-Probleme dann nicht mehr optimal als LP bzw. als LP-Relaxation gelöst, um Informationen über die dualen Variablen zu erhalten, sondern als Lagrange-Duales-Problem mit Hilfe eines Subgradienten-Verfahren (siehe Abschnitt 3.2.1). Die dabei ermittelten Lagrange-Multiplikatoren entsprechen dann einer Approximation der optimalen Werte der dualen Variablen des beschränkten Master-Problems.

Da die Lagrange-Multiplikatoren nur eine Approximation der optimalen dualen Variablen liefern, müssen sie vor Lösen des Pricing-Problems noch angepasst werden, um zu verhindern, dass Spalten generiert werden, die bereits Teil des beschränkten Master-Problems sind. [Freling, 1997] und [Huisman, 2004] nutzen dazu beim Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mittels Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation eine Greedy-Heuristik, mit der die Multiplikatoren so modifiziert werden, dass alle Spalten des beschränkten Master-Problems

nicht-negative reduzierte Kosten haben und sich der Wert der Lagrange-Lösung nicht verändert. Algorithmus 3.2.3 beschreibt dieses Vorgehen.

Algorithmus 3.2.3 : Heuristik zur Anpassung von Lagrange-Multiplikatoren

```

foreach Spalte  $f \in N'$  mit  $c_f - \sum_{i \in M} \pi_i a_{if} < 0$  do
   $\delta = \frac{c_f - \sum_{i \in M} a_{if} \pi_i}{\sum_{i \in M} a_{if}}$ 
  foreach  $i \in M$  mit  $a_{if} = 1$  do
    // Aktualisiere Multiplikatoren
     $\pi_i = \pi_i + \delta$ 
  foreach Spalte  $g \in N'$  und  $g > f$  do
    // Aktualisiere reduzierte Kosten
     $\bar{c}_g = c_g - \sum_{i \in M} a_{ig} \pi_i$ 

```

Mehrere Autoren berichten von einigen Vorteilen, die sich aus der Kombination von Column Generation und Lagrange-Relaxation ergeben. So stellt u.a. [Huisman, 2004] fest, dass die Berechnung der Lagrange-Multiplikatoren mit einem Subgradienten-Verfahren weniger Rechenzeit benötigt als das optimale Lösen der LP-Relaxation. Außerdem kann so auf den Einsatz eines kommerziellen LP-Solvers verzichtet werden.

3.2.3 Branch-and-Bound

Branch-and-Bound ist ein exaktes Lösungsverfahren, mit welchem gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme gelöst werden können, indem das Ursprungsproblem hierarchisch in einfacher zu lösende Teilprobleme zerlegt wird. Auf Basis der Lösungen der Teilprobleme kann dann die optimale Lösung des Hauptproblems bestimmt werden. Detaillierte Erläuterungen zum Verfahren finden sich u.a. bei [Wolsey, 1998].

Mit *Branching* wird die Strategie beschrieben, in welcher das Originalproblem bzw. Teilprobleme in weitere Teilprobleme zerlegt werden. Dabei wird der Lösungsraum jeweils in zwei oder mehrere kleinere Lösungsräume aufgeteilt. Eine Strategie besteht z.B. darin, die LP-Relaxation des Problems zu lösen, eine Variable mit einem fraktionalem Wert auszuwählen und die Teilprobleme so zu bilden, dass der fraktionale Wert ausgeschlossen wird, indem der Wert der Variable je Teilproblem auf einen ganzzahligen Wert gesetzt wird. Durch wiederholtes Branching entsteht so ein Suchbaum, in welchem jeder Knoten ein Teilproblem repräsentiert.

Ohne *Bounding* würde dieses Vorgehen einer vollständigen Enumeration möglicher Lösungen entsprechen. Daher wird Bounding dazu genutzt, Knoten des Suchbaums bzw. Teilbäume unter Knoten von der weiteren Betrachtung auszuschließen, wenn in diesen keine Lösung erreicht werden kann als die bisher beste bekannte zulässige

Lösung. Der optimale Zielfunktionswert einer zulässigen Lösung eines Teilproblems wird bei Minimierungsproblemen durch eine relaxierte Lösung des Teilproblems nach unten beschränkt. Eine weitere Bearbeitung des Knotens kann beispielsweise dann ausgeschlossen werden, wenn diese untere Schranke größer oder gleich der bisher besten bekannten zulässigen Lösung ist.

Branch-and-Bound kann mit verschiedenen Techniken erweitert werden. In einem *Branch-and-Cut*-Algorithmus werden durch Hinzufügen von sogenannten Schnittebenen (engl. *cuts*) in den Knoten, die Lösungsräume der relaxierten Probleme eingegrenzt, sodass engere, d.h. bessere (untere) Schranken berechnet werden können. In einem *Branch-and-Price*-Algorithmus wird in den Knoten des Suchbaums die Relaxation des Problems jeweils mit Hilfe eines Column Generation-Verfahrens gelöst (siehe Abschnitt 3.2.2). Ein *Branch-and-Price-and-Cut*-Algorithmus kombiniert beide Techniken.

Kapitel 4

Stand der Forschung

Für die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Planungsprobleme zur Umlauf- und Dienstbildung existieren geeignete Modellierungen und leistungsfähige Lösungsansätze mit denen kosteneffiziente Ressourceneinsatzpläne berechnet werden können. Ein Überblick über diese Ansätze, die keine Ähnlichkeitsaspekte bei der Planung berücksichtigen, wird in Abschnitt 4.1 gegeben. Inwieweit in diesen Ansätzen spezielle (Dienst-)Regeln aus der Praxis abgebildet werden, die die Voraussetzung für einen praktischen Einsatz der Modelle und Methoden geben, wird zusätzlich in Abschnitt 4.2 untersucht. Dabei liegt der Fokus der Betrachtung auf Ansätzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung. In Abschnitt 4.3 dieses Übersichtskapitels wird die Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen in der Ressourceneinsatzplanung diskutiert.

4.1 Modelle und Methoden für einen kosteneffizienten Ressourceneinsatz

Mathematische Optimierungsmethoden zur Unterstützung der ÖPNV-Planung beim Bilden von kosteneffizienten Ressourceneinsätzen werden seit vielen Jahren erforscht. Abschnitt 4.1.1 beleuchtet Modelle und Methoden zur Ein- und Mehr-Depot-Busumlaufplanung. Abschnitt 4.1.2 fasst den aktuellen Stand der Forschung zu Modellierung und Lösung von Dienstplanungsproblemen zusammen, Abschnitt 4.1.3 den zu einer partiell integrierten Umlauf- und Dienstplanung. Abschnitt 4.1.4 untersucht in der wissenschaftlichen Literatur vorgeschlagene Ansätze zur (vollständigen) integrierten Umlauf- und Dienstplanung.

4.1.1 Ein- und Mehr-Depot-Busumlaufplanung

Für eine Übersicht über unterschiedliche Lösungsansätze zu Eindepot-Umlaufplanungsproblemen sei auf [Daduna und Paixão, 1995] und [Bunte und Kliwer, 2009] verwiesen. Heuristische Ansätze zu Mehr-Depot-Umlaufplanungsproblemen werden

u.a. von [Dell’Amico et al., 1993], [Löbel, 1997] und [Pepin et al., 2009] vorgestellt. Einen Überblick über unterschiedliche Modelle zu Mehr-Depot-Umlaufplanungsproblemen geben [Bunte und Kliwer, 2009]. Die Autoren teilen die genutzten Modellierungen nach [Fischetti et al., 2001] ein in *Eingüter-Fluss-Formulierungen*, *Mehrgüter-Fluss-Formulierungen*, und Formulierungen als *Set-Partitioning-Problem*.

Bei den Formulierungen besteht die größte Schwierigkeit darin, die große Anzahl potenzieller Leerfahrtsverbindungen zwischen kompatiblen Fahrten effizient zu berücksichtigen (kompatibel, siehe Abschnitt 2.1.1). In den meisten Problemformulierungen werden explizit alle möglichen Verbindungen zwischen allen kompatiblen Fahrten modelliert, wodurch die Probleme bzw. genutzte Unterprobleme sehr schwer oder nur heuristisch lösbar sind, z.B. mit Hilfe von Column Generation-Ansätzen. [Kliwer et al., 2002] bzw. [Kliwer et al., 2006b] bezeichnen diese Modellierungen als *connection-basierte* und schlagen eine *Time-Space-Netzwerk-basierte (TSN)* Modellierung für eine Mehrgüter-Fluss-Formulierung vor. In dieser Netzwerkformulierung werden Verbindungen zwischen Gruppen kompatibler Fahrten aggregiert, sodass sich die Kantenanzahl im Netzwerk drastisch zwischen 97-99% reduziert. Dadurch können auch große Mehr-Depot-Umlaufplanungsprobleme aus der Praxis in vernünftiger Zeit mit einem Standard-MIP-Solver mittels eines Branch-and-Cut-Algorithmus gelöst werden.

Für eine Formulierung des Umlaufplanungsproblems als Set-Partitioning-Problem, das mit Column Generation gelöst wird, testen [Benchimol et al., 2012] eine dynamische Zusammenfassung von Restriktionen. Dadurch kann ein Problem bei dieser Formulierung behoben werden: Die Konvergenz des Column Generation-Verfahrens für stark degenerierte Problemstellungen kann verbessert werden.

Implikationen für diese Arbeit

Aufgrund der Vorteile der Time-Space-Mehrgüter-Fluss-Formulierung von [Kliwer et al., 2002] bzw. [Kliwer et al., 2006b] ist es sinnvoll, diese soweit möglich im Rahmen dieser Arbeit bei sequenziellen, teilintegrierten und integrierten Lösungsansätzen zur Umlauf- und Dienstplanung zu nutzen. Allerdings besitzt die Leerfahrt-aggregierende Time-Space-Formulierung einen entscheidenden Nachteil: spezielle Eigenschaften bestimmter Fahrtenverknüpfungen können nicht berücksichtigt werden, da im Netzwerkmodell zwei Fahrten nicht eindeutig explizit sondern implizit (evtl. durch Pfade über mehrere Kanten) miteinander verknüpft sind. Wenn es im Rahmen einer Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten darum geht, ähnliche Sequenzen von Fahrten für mehrere Tage ermitteln zu können, ist aber entscheidend, Verknüpfungen zwischen zwei Fahrten auch genau bewerten zu können. Für eine Umlaufplanung

mit Ähnlichkeitszielen bieten sich daher andere Formulierungen als Set-Partitioning-Problem (oder spezielles Netzwerkflussproblem) an, bei denen Fahrtenverknüpfungen in (Tages-)Umläufen explizit berücksichtigt werden können. Aufgrund der Vielzahl möglicher (Tages-)Umläufe sollten diese Modelle dann mit einem Column Generation-Ansatz gelöst werden.

4.1.2 Dienstplanung

Das Dienstplanungsproblem ist in der Regel als Set-Partitioning- oder Set-Covering-Problem formuliert, in welchem alle Aufgaben oder Dienstelemente von genau einem bzw. mindestens einem Dienst, also einer Variable bzw. Spalte im Modell, abgedeckt werden müssen. Aufgrund der enormen Anzahl möglicher zulässiger Dienste werden Dienstplanungsprobleme üblicherweise mit Column Generation-Ansätzen gelöst. Die Ansätze unterscheiden sich in Art und Weise der Lösung der relaxierten Problemstellung als beschränktes Master-Problem (LP- oder Lagrange-relaxiert), bei den Modellen und Lösungsverfahren zur Bestimmung zulässiger Dienste in den Pricing-Problemen und bei den Verfahren zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen (vgl. [Weider, 2007]). Restriktionen, die die Zusammensetzung des Dienstplans betreffen, wie z.B. eine bestimmte Anzahl Dienste eines Diensttyps, lassen sich dabei im Master-Problem abbilden, während Restriktionen, die die Zulässigkeit von Diensten regeln, in den Pricing-Problemen abgebildet werden können.

[Steinzen, 2007] und [Gintner, 2008] fassen die Entwicklung von Modellen und Methoden zur Dienstplanung insbesondere im ÖPNV ausführlich zusammen. Eine umfangreiche Sammlung zu Ansätzen zur Dienstplanung in diversen Anwendungsfeldern haben außerdem [Ernst et al., 2004] zusammengestellt. Neben exakten Modellen und Methoden zur Dienstplanung existieren noch zahlreiche (meta-)heuristische Ansätze. Ein Überblick über diese findet sich ebenfalls bei den erwähnten Autoren.

Implikationen für diese Arbeit

Viele Ansätze in der Literatur nutzen eine Set-Covering-Formulierung des Dienstplanungsproblems. Da eine durch eine Set-Covering-Formulierung mögliche Mehrfachüberdeckung von Aufgaben in der Praxis von Verkehrsunternehmen oftmals nicht erlaubt ist, sollen im Rahmen dieser Arbeit zu lösende Dienstplanungsprobleme in erster Linie als Set-Partitioning-Probleme formuliert werden. Für einen Ansatz, der Unter- und Überdeckung von Aufgaben bzw. Dienstelementen erlaubt, sei z.B. auf [Portugal et al., 2009] verwiesen. Dort sollen durch Unter- und Überdeckungen in den vorgeschlagenen Dienstplänen, diese einfacher von Planern angepasst und fertigge-

stellt werden können. In dieser Arbeit sollen allerdings vollständige, finale Vorschläge für Dienstpläne ermittelt werden. Da die dafür zulässigen Dienste in der Regel aufgrund ihrer Komplexität und enormen Anzahl nicht enumerierbar sind, sollten die Dienstpläne mit Hilfe von Column Generation-Ansätzen erstellt werden (- in der Regel werden in der Praxis Dienste genutzt, die aus mehr als in der Literatur oft verwendeten zwei Dienststücke bestehen). Dabei sollen die Pricing-Probleme zur Diensterstellung als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme formuliert werden, da sich so zahlreiche Restriktionen zur Dienstzulässigkeit modellieren lassen, siehe z.B. bei [Desrochers und Soumis, 1989] und [Desrochers et al., 1992].

4.1.3 Partielle Integration von Umlauf- und Dienstplanung

Sequenziell Umläufe und Dienste zu planen, also eine Umlaufplanung ohne Berücksichtigung von Dienstplanungsaspekten durchzuführen, wird von [Bodin et al., 1983] kritisiert, da der Anteil der operativen Dienstkosten in der Regel deutlich größer als der der Fahrzeuge sei. [Ball et al., 1983] schlagen daher ein Modell für eine gleichzeitige, d.h. integrierte Umlauf- und Dienstplanung vor. Allerdings ist dieses mit den damaligen Optimierungsmethoden und der Computertechnik nicht lösbar. So wird es in einem mehrstufigem heuristischen Verfahren partiell integriert gelöst.

Bei partiell integrierten Ansätzen werden Umlauf- und Dienstplanung so aufeinander aufbauend durchgeführt, dass in den Modellen und bzw. oder Lösungsverfahren Aspekte des darauffolgenden Planungsschrittes berücksichtigt werden. Unterschieden werden kann zwischen *Dienstplanungsbasierten Ansätzen* (Erst Dienste - dann Umläufe) und *Umlaufplanungsbasierten Ansätzen* (Erst Umläufe - dann Dienste) (vgl. Abschnitt 2.2.3). Für eine umfangreiche Darstellung von Ansätzen zur partiellen Integration von Umlauf- und Dienstplanung sei auf [Huisman, 2004], [Steinzen, 2007] oder [Gintner, 2008] verwiesen.

Dienstplanungsbasierte Ansätze

Im oben erwähnten Ansatz von [Ball et al., 1983] ist das integrierte Modell als Partitionsproblem auf einem azyklischen Graphen definiert, der sowohl ein Planungsnetzwerk für das Umlaufplanungsproblem, als auch ein Planungsnetzwerk für das Dienstplanungsproblem darstellt. Im Graphen sind als Knoten ein Quell- und ein Senke-Knoten gegeben, die Anfang bzw. Ende eines Umlaufs oder Dienstes oder Dienststücks an einem Depot modellieren, sowie weitere Knoten, die Dienstelemente repräsentieren. Kompatible Knoten/Dienstelemente sind durch Kanten miteinander verbunden. Dabei wird unterschieden zwischen Kanten, die eine Fahrzeugaktivität

darstellen und Kanten, die reine Fahreraktivitäten wie Warten und Nutzen eines Fußwegs beschreiben. Jeder Pfad von Quelle zur Senke bei Nutzung der Fahrzeugkanten repräsentiert einen Umlauf. Analog beschreibt jeder Pfad von Quelle zur Senke bei Nutzung beider Kantenkategorien einen Dienst. Gesucht ist die Menge knotendisjunkter Umlaufpfade und die Menge knotendisjunkter Dienstpfade mit minimalen Kosten, die zulässig und zueinander kompatibel sind. Die Pfadmengen sind u.a. dann zueinander kompatibel, wenn jede Fahrzeugkante aus den Umläufen auch in einem Dienst enthalten ist. Da das integrierte Modell mit der damaligen Computertechnik für praxisnahe Probleme nicht gelöst werden kann, wird ein heuristischer Lösungsansatz vorgeschlagen, der aus drei Phasen besteht. In diesen Phasen werden initiale Dienststücke erstellt, verbessert, z.B. indem zwei Dienststücke zusammengefasst werden können, sodass Leerfahrten zum/vom Depot zwischen diesen entfallen, und durch Lösen eines Zuordnungsproblems zu zulässigen Diensten zusammengefasst. In jeder Phase lässt sich ein zulässiger Umlaufplan ableiten.

Mehrere partiell integrierte Ansätze bauen auf der beschriebenen Netzwerkstruktur auf. So nutzen z.B. die Ansätze von [Falkner und Ryan, 1992] und [Patrikalakis und Xerocostas, 1992] für das Grundmodell eine ähnliche Netzwerkstruktur.

Umlaufplanungs-basierte Ansätze

Gute Beispiele für eine typische partiell integrierte Umlauf- und Dienstplanung, bei denen die Umlaufplanung bereits Aspekte der Dienstplanung berücksichtigen soll, geben [Borndörfer et al., 2002]. Eine Möglichkeit, das Ergebnis der Umlaufplanung geeigneter für die anschließende Dienstplanung zu gestalten besteht darin, im erstellten Umlaufplan mehr Ablösemöglichkeiten anzubieten. Dies kann durch eine Veränderung der Kostenstruktur in der Umlaufplanung erreicht werden: So können z.B. durch eine künstliche Verringerung der Kosten für Ein-/Ausrückfahrten mehr Aufenthalte im Depot und somit mehr Ablösemöglichkeiten erzwungen werden. Außerdem können Kosten für die Verbindung zwischen weit entfernten Fahrten erhöht werden, sodass weniger lange Leerfahrten in der Dienstplanung zu verplanen sind, Dienste also flexibler erstellt werden können. Eine weitere Idee besteht darin, in der Umlaufplanung die Dauer eines Umlaufs auf die maximal erlaubte Dienstlänge zu beschränken. So soll die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass jeder Umlauf von einem Dienst abgedeckt werden kann.

Ein ähnliches Beispiel geben [Árgilán et al., 2012]. Mit einer heuristischen Vorgehensweise sollen zunächst in der Umlaufplanung „Fahrer-freundliche“ Umläufe gebildet werden, die es ermöglichen, einfacher Dienstpläne zu erstellen. Dies soll dadurch erreicht werden, indem die Umläufe eines kostenoptimal berechneten Umlaufplans,

modifiziert werden: Umläufe, die länger als die für Dienste erlaubte Schichtdauer sind, werden gekürzt, kürzere Umläufe werden zusammengefasst und aus den so modifizierten Umläufen werden einzelne Fahrten gelöscht, um Pausenmöglichkeiten für Fahrer zu bieten. Für die „frei“ gewordenen bzw. unverplanten Servicefahrten wird versucht, wieder neue Umläufe zu bilden, bis alle Servicefahrten in „Fahrer-freundlichen“ Umläufen verplant sind.

[Gintner et al., 2006] bzw. [Gintner, 2008] schlagen eine andere Vorgehensweise vor. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen werden beim Lösen des Umlaufplanungsproblems keine Dienstplanungsaspekte berücksichtigt. Stattdessen wird der Vorteil des als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss formulierten Umlaufplanungsproblems auf einem Time-Space-Netzwerk genutzt: Da die (Fluss-)Lösung statt eines kostenoptimalen Umlaufplans implizit eine Menge kostenoptimaler Umlaufpläne repräsentiert, gibt es bei einer anschließenden Dienstplanung auf Basis der Menge kostenoptimaler Umlaufpläne mehr Flexibilität, um kostengünstigere Pläne zu erstellen als bei einer Dienstplanung auf Basis eines vorgegebenen „festen“ Umlaufplans – also als bei einer sequenziellen Planung. Zu den erstellten Diensten können dann im Anschluss die entsprechenden Umläufe gebildet werden. Als Ergebnisse sind Einsparungen auf realen Instanzen von 0,5-6% an Diensten verglichen mit einem sequenziellen Ansatz angegeben.

Implikationen für diese Arbeit

Partiell integrierte Ansätze zur Umlauf- und Dienstplanung ermöglichen kostengünstigere Umlauf- und Dienstpläne als eine sequenzielle Planung. Zwar kann nicht garantiert werden, dass mit partiell integrierten Ansätzen stets gute Ergebnisse im Bezug auf die Gesamtkosten erreicht werden können – wie es prinzipiell bei vollständig integrierten Ansätzen der Fall ist. Allerdings können bei partiell integrierten Ansätzen Lösungen in der Regel schneller ermittelt werden. Daher ist es sinnvoll, im Rahmen dieser Arbeit beim Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen auch die Performanz partiell integrierter Ansätze zu evaluieren. Dabei sollte beim Einsatz von partiell- bzw. teil-integrierten Ansätzen z.B. bei einer Planung mit Ähnlichkeitszielen auf die Idee von [Gintner et al., 2006] bzw. [Gintner, 2008] zurückgegriffen werden. Bei diesem Ansatz wird die für Verkehrsunternehmen wichtige Kostenoptimalität der Umlaufplanung nicht beeinträchtigt und dennoch ist mehr Flexibilität für die Planung z.B. ähnlicher Dienste gegeben als bei einer sequenziellen Planung.

4.1.4 Vollständige Integration von Umlauf- und Dienstplanung

Vollständig integrierte Ansätze unterscheiden sich von partiell integrierten dadurch, dass zum einen ein gemeinsames Modell für das Umlauf- und Dienstplanungsproblem formuliert ist, und dass zum anderen im Lösungsverfahren Umlauf- und Dienstplanungsproblem gleichzeitig betrachtet werden. Ausführliche Darstellungen zur Entwicklung der Ansätze für eine vollständige Integration von Umlauf- und Dienstplanung finden sich z.B. bei [Steinzen, 2007], [Weider, 2007] und [Gintner, 2008]. Generell kann zwischen integrierten Ansätzen für den Eindepotfall und für den Mehrdepotfall unterschieden werden.

Problemdefinition

Für die Problemstellung der integrierten Umlauf- und Dienstplanung hat [Huisman, 2004] einige Annahmen getroffen, die danach zur besseren Vergleichbarkeit auch in anderen Ansätzen aus der Literatur berücksichtigt wurden. [Steinzen, 2007] fasst diese Annahmen wie folgt zusammen:

1. Jedes Fahrzeug ist genau einem Depot zugeordnet an welchem es seinen Fahrzeugumlauf startet und beendet. Dabei hat jedes Depot eine unbeschränkte Aufnahmekapazität an Fahrzeugen.
2. Jeder Dienst ist genau einem Depot zugeordnet und darf nur die Dienstelemente beinhalten, die von Fahrzeugen dieses Depots auszuführen sind.
3. Ein Dienststück ist nur in seiner Dauer beschränkt. Es muss eine minimale und eine maximale Dienststückdauer einhalten.
4. Jede Servicefahrt hat genau zwei Ablösepunkte: Einen am Beginn der Servicefahrt und einen am Ende.
5. Ein Fahrer darf sein Fahrzeug nur während einer Pause wechseln, d.h. zwischen zwei Dienststücken.
6. Ein Fahrzeug muss außerhalb des Depots stets von einem Fahrer besetzt sein. Im Depot ist dies nicht notwendig.
7. Ein Fahrzeug kehrt in sein Depot zurück und startet von dort zur nächsten Servicefahrt, falls die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Servicefahrten dafür ausreicht.

Eindepotfall

[Freling, 1997] schlägt den ersten Ansatz für eine vollständig integrierte Umlauf- und Dienstplanung vor. Betrachtet wird ein Depot. Das Modell besteht aus drei Teilen: einem Umlaufplanungsteil, der als Quasi-Assignment-Problem formuliert ist, bei welchem jede Servicefahrt genau einem Fahrzeug zugeordnet werden muss; einem Dienstplanungsteil, das als Set-Partitioning-Problem modelliert ist, bei welchem jedes Dienstelement, das eine Servicefahrt repräsentiert von genau einem Dienst abgedeckt werden muss; sowie einem Teil, der die Kopplung zwischen Umlauf- und Dienstplanung sicherstellt, indem die Leerfahrten jedes Fahrzeugs in den ausgewählten Diensten vorhanden sein müssen. Gelöst wird das Modell mit einer Kombination aus Lagrange-Relaxation und Column Generation: Die Set-Partitioning-Formulierung und die Kopplungsbedingungen werden relaxiert, sodass zwei einfach zu lösende Lagrange-Unterprobleme entstehen. Das mit den Unterproblemen assoziierte Lagrange-Duale-Problem wird mit einem Subgradienten-Algorithmus gelöst und die Dualwerte werden dann im Column Generation Pricing-Problem verwendet, um neue Spalten im Modell, also neue zulässige Dienste, zu generieren. Dazu werden zunächst über eine Netzwerkstruktur basierend auf dem Umlaufplanungsteil Dienststücke generiert. Diese werden dann zu einem Dienstgenerierungsnetzwerk mit Dienststücken als Knoten aufgebaut, in welchem jeder Pfad von der Quelle zur Senke einem Dienst entspricht. Zulässige Dienste werden durch Lösen des entstandenen ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problems generiert. So kann mit Column Generation eine untere Schranke für die Lösung des integrierten Problems bestimmt werden. Zulässige Lösungen werden anschließend durch Heuristiken abgeleitet. Der Ansatz bildet die Basis für einen großen Teil der Publikationen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung.

[Friberg und Haase, 1999] schlagen eine andere Formulierung vor, die die Modellierung des Umlaufplanungsproblems nach [Ribeiro und Soumis, 1994] mit der Modellierung des Dienstplanungsproblems nach [Desrochers und Soumis, 1989] kombiniert: Umlaufplanungsproblem und Dienstplanungsproblem sind als Set-Partitioning-Probleme zur Abdeckung der Servicefahrten bzw. der aus den Servicefahrten ableitbaren Dienstelemente formuliert. Beide Teile sind dadurch miteinander gekoppelt, dass Leerfahrten vor und nach Servicefahrten von der gleichen Anzahl Fahrzeuge und Dienste abgedeckt werden müssen. Als Lösungsverfahren wird eine exakte Branch-and-Price-and-Cut-Methode vorgeschlagen, wobei in jedem Knoten des Branch-and-Bound-Baumes die LP-Relaxation des Modells mit Column Generation gelöst wird.

[Haase et al., 2001] formulieren für den Eindepotfall ein integriertes Modell als Set-Partitioning-Problem mit zusätzlichen Nebenbedingungen, welches auf einer Netzwerkformulierung für das Dienstplanungsproblem basiert. Flusserhaltungsbedingun-

gen stellen sicher, dass zu jeder Servicefahrt und von jeder Servicefahrt eine Fahrt mit einem Fahrzeug erfolgt. Weitere Restriktionen sorgen dafür, dass zu jedem Zeitpunkt die entsprechende Anzahl Fahrzeuge aus dem Depot zur Verfügung steht. So kann zu jeder Lösung ein zulässiger Umlaufplan abgeleitet werden. Gelöst wird das Modell mit einem Branch-and-Price-Verfahren, wobei das beschränkte Master-Problem als LP-Relaxation formuliert ist. Als Column Generation Pricing-Probleme werden zur Dienstgenerierung ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme gelöst.

[Borndörfer et al., 2002] entwickeln ein integriertes Modell, das die Mehrgüter-Fluss-Formulierung von [Löbel, 1998] für das Umlaufplanungsproblem mit der Set-Partitioning-Formulierung von [Borndörfer et al., 2001] für das Dienstplanungsproblem kombiniert. Umlauf- und Dienstplanungsteil sind dabei dadurch gekoppelt, dass für jede Leerfahrt die Anzahl der für diese Fahrt eingesetzten Fahrzeuge mit der Anzahl der dafür eingeplanten Fahrer identisch sein muss. Gelöst wird das Modell mit einer Kombination aus Column Generation und Lagrange-Relaxation, sowie primalen Heuristiken zur Bestimmung zulässiger Lösungen: Zur Bestimmung einer unteren Schranke werden die Kopplungsbedingungen relaxiert, das Lagrange-Duale-Problem wird mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst und mit Hilfe der so ermittelten Dualwerte werden in den Column Generation Pricing-Problemen neue zulässige Dienste generiert. Zulässige Lösungen werden ermittelt, indem z.B. der aktuelle Umlaufplan fixiert wird und für diesen eine (sequenzielle) Dienstplanung durchgeführt wird.

Mehrdepotfall

[Gaffi und Nonato, 1999] schlagen das erste integrierte Modell zur Umlauf- und Dienstplanung mit mehreren Depots vor. Allerdings stellen sie kein generelles Modell auf, sondern behandeln einen Sonderfall für den Regionalverkehr: Ablösemöglichkeiten existieren nur am Depot der jeweiligen Ortschaft, sodass ein Umlauf einem Dienststück gleich gesetzt werden kann. Modelliert wird eine Quasi-Assignment-Formulierung, in welcher jede Servicefahrt durch ein Fahrzeug abgedeckt werden muss. Dabei garantieren zusätzliche (Kopplungs-)Bedingungen, dass zu den Servicefahrten passend Leerfahrten genutzt werden. Das Modell wird mit einer Kombination aus Column Generation und Lagrange-Relaxation gelöst, wobei die Kopplungsbedingungen relaxiert werden. Mit einem heuristischen Vorgehen werden anschließend Dienstplan (bzw. Dienststücke) und ein kompatibler Umlaufplan berechnet.

[Huisman, 2004] bzw. [Huisman et al., 2005] erweitern das Eindepot-Modell von [Freling, 1997] für den Mehrdepot-Fall und formulieren so das erste generelle mathematische Modell für eine integrierte Umlauf und Dienstplanung mit mehreren Depots. Dabei wird das Umlaufplanungsproblem als Mehrgüter-Fluss-Problem aufgestellt, bei

welchem jede Servicefahrt von einem Fahrzeug aus einem beliebigen Depot bedient werden soll. Das Dienstplanungsproblem ist weiterhin als Set-Partitioning-Problem modelliert. Eine Kopplung zwischen Umlauf- und Dienstplanungsproblem wird durch zusätzliche Restriktionen sichergestellt, die garantieren, dass (nur) Leerfahrten aus dem Umlaufplan auch im Dienstplan vorhanden sind. Als Lösungsverfahren wird das von [Freling, 1997] beschriebene adaptiert, welches in einer ersten Phase eine untere Schranke mit Hilfe von Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation berechnet, und in einer zweiten Phase heuristisch einen zulässigen Umlauf- und Dienstplan ableitet.

[Borndörfer et al., 2004] nutzen das von [Huisman, 2004] vorgeschlagene Modell. Gelöst wird das Modell mit einer Modifikation des von [Borndörfer et al., 2002] beschriebenen Lösungsverfahrens für den Eindepotfall. Statt das Lagrange-Duale-Problem mit einem Subgradienten-Verfahren zu lösen, wird eine *Proximal-Bundle-Method* (siehe [Kiwiel, 1995]) genutzt, die gleichzeitig primale und duale Informationen zur Lösung liefert. Das Lösungsverfahren ist in einer Backtracking-Methode eingebunden, die die Nutzung von Leerfahrten fixiert (bzw. wieder freigibt) bis ein zulässiger Umlaufplan bestimmt ist. Ein zulässiger Dienstplan wird mit einem Column Generation-Verfahren berechnet. [Weider, 2007] bzw. [Borndörfer et al., 2008] verbessern den Lösungsansatz, indem sie zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen die sogenannte Heuristik „Rapid Branching“ entwickeln. Mit dieser speziellen Branch-and-Bound-Methode können bei Branching-Entscheidungen in den Knoten des Suchbaums mehrere Variablen auf einmal fixiert werden. Getestet werden reale und künstliche Instanzen auf einem Dell Precision 650 PC mit 4 GB Hauptspeicher und einem Intel Xeon 3,0 GHz Prozessor unter SuSE Linux 9.0. Die größte getestete reale Instanz im Regionalverkehr mit 1.414 Servicefahrten (3.666 Dienstelemente) und 3 Fahrzeugtypen kann in ca. 125 Stunden gelöst werden. Als Lösungszeit für die größte reale städtische Instanz mit 634 Servicefahrten (1.022 Dienstelemente), 3 Depots und 5 Fahrzeugtypen sind 17 Stunden angegeben.

[Gintner, 2008] schlägt einen Ansatz für die integrierte Umlauf- und Dienstplanung mit mehreren Depots vor, der die von [Kliwer et al., 2002], [Kliwer, 2005] und [Kliwer et al., 2006b] vorgestellte Formulierung des Umlaufplanungsproblems als Time-Space-Netzwerk nutzt. Dadurch sind für das integrierte Modell deutlich weniger Variablen im Umlaufplanungsteil notwendig und die Kopplung von Umlaufplanung und Dienstplanung kommt ebenfalls mit weniger Bedingungen aus als die bisher in der Literatur vorgeschlagenen Ansätze.

[Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2010] entwickeln weitere Ansätze für das von [Gintner, 2008] genutzte Lösungsverfahren, das auf den zweiphasigen Ansätzen von

[Freling, 1997] und [Huisman, 2004] basiert und Column Generation mit Lagrange-Relaxation kombiniert. So werden u.a. für die Column Generation Pricing-Probleme Dienstgenerierungsnetzwerke aus Dienststücken genutzt, wobei die Netzwerkstruktur auf einer Time-Space-Struktur basiert. Gelöst werden die als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme formulierten Pricing-Probleme mit einem Algorithmus auf Basis Dynamischer Programmierung. Außerdem werden verschiedene Strategien entwickelt, um zulässige Umlauf- und Dienstpläne zu bestimmen. Als Ergebnisse werden die bis dahin besten in der Literatur erreichten Lösungen für eine vollständig integrierte Umlauf- und Dienstplanung mit mehreren Depots dokumentiert. Künstliche und reale Probleminstanzen mit über 640 Servicefahrten und vier Depots können gelöst werden. Als Rechenzeit für die größte angegebene reale Instanz mit 653 Servicefahrten und vier Depots sind 19,5 Stunden angegeben. Getestet wird unter Windows XP auf einem Dell OptiPlex GX620 PC mit Intel Pentium IV 3,4 GHz Prozessor und 2 GB Hauptspeicher.

[Mesquita und Paias, 2008] entwickeln zwei integrierte Modelle auf Basis der Formulierung von [Huisman, 2004]. Die Modelle enthalten weniger Kopplungsbedingungen zwischen Umlaufplanungsteil und Dienstplanungsteil als das Original-Modell, da u.a. Leerfahrten eines Fahrzeugs nicht von einem Dienst bedient werden müssen, der dem gleichen Depot zugeordnet ist wie das Fahrzeug. Außerdem wird für den Dienstplanungsteil eine Kombination aus Set-Partitioning und Set-Covering vorgeschlagen. Dabei dürfen Verbindungen zwischen kompatiblen Servicefahrten und diese selbst mehrfach abgedeckt werden. Insgesamt werden einige Annahmen aus Abschnitt 4.1.4 nicht angewendet und es werden neue angenommen, sodass die Ergebnisse auf bekannten Benchmark-Instanzen nicht ganz vergleichbar mit den anderen Ansätzen sind. Gelöst wird das Modell mit einem Column Generation-Ansatz, wobei als beschränktes Master-Problem die LP-Relaxation des Modells betrachtet wird. Die Column Generation Pricing-Probleme zur Dienstgenerierung sind als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme formuliert und werden mit einem Algorithmus auf Basis Dynamischer Programmierung gelöst. Ganzzahlige Lösungen werden über einen MIP-Solver per Branch-and-Bound aus einer Menge zulässiger Dienste bestimmt. [Mesquita et al., 2009] beschreiben und vergleichen weitere Branching-Strategien, mit denen das integrierte Modell gelöst werden kann.

Zusätzliche Freiheitsgrade durch Zeitfenster für geplante Fahrten

[Kliwer et al., 2012] erweitern den Ansatz zur integrierten Mehr-Depot-Umlauf- und Dienstplanung von [Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2010], indem Verschiebungen von Servicefahrten innerhalb gegebener Zeitfenster erlaubt werden. Durch

mögliche zeitliche Verschiebungen von Servicefahrten im Fahrplan werden so die Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den Fahrten und die Möglichkeiten zur Pausenbildung innerhalb von Diensten erhöht. Diese zusätzlichen Freiheitsgrade ermöglichen noch effizientere Ressourceneinsatzpläne verglichen mit einer reinen integrierten Planung. Das integrierte Modell basiert dabei auf einer Time-Space-Netzwerk-Formulierung für den Umlaufplanungsteil, in welcher die möglichen Fahrtenverschiebungen explizit als zusätzliche Kanten modelliert sind. Diese Formulierung des Umlaufplanungsteil nach [Kliwer et al., 2006a] erlaubt im Gegensatz zu früheren Formulierungen von [Mingozi et al., 1995] und [Desaulniers et al., 1998] als Set-Partitioning-Problem ein exaktes Lösen von Umlaufplanungsproblemen mit Zeitfenstern mit einem Standard-MIP-Solver, statt mit einem Column Generation-Verfahren. Gelöst wird das integrierte Modell mit Lagrange-Relaxation in Kombination mit Column Generation ähnlich dem Ansatz für eine integrierte Planung ohne Zeitfenster von [Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2010]. In den Pricing-Problemen werden durch Lösen von ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen zulässige Dienste generiert. Statt als Grundlage für die Pricing-Probleme Dienststück-basierte Dienstgenerierungsnetzwerke zu nutzen, wird zur Dienststückbildung eine Dienstelement-basierte Netzwerkstruktur mit expliziten Netzwerkebenen vorgeschlagen, die jeweils unterschiedliche Dienststücke repräsentieren. So können die integrierten Planungsprobleme mit Zeitfenstern insgesamt deutlich schneller gelöst werden. Getestet werden reale und Benchmark-Instanzen mit bis zu 661 Servicefahrten und bis zu 4 Depots. Die Ergebnisse zeigen große Einsparungen bei Fahrzeug- und Dienstanzahl schon bei kleinen Zeitfenstern – erlaubt werden Verschiebungen von einer Minute bis zu vier Minuten. Je nach Zeitfenstergröße betragen die Einsparungen zwischen 1-30% im Vergleich zu sequenziell berechneten Lösungen ohne Zeitfenstern, sowie bis zu 5% gegenüber integriert berechneten Lösungen ohne Zeitfenstern. Die steigende Problemkomplexität bei Berücksichtigung von Zeitfenstern für alle Servicefahrten führt zu insgesamt höheren Rechenzeiten. Daher werden Heuristiken vorgeschlagen, die diejenigen Servicefahrten bestimmen, deren zeitliche Verschiebung vermutlich zu einer besseren Lösung führen wird. So werden in kürzerer Zeit vergleichbar gute Ergebnisse erzielt.

Implikationen für diese Arbeit

Da vollständig integrierte Modellierungs- und Lösungsansätze zur Umlauf- und Dienstplanung aufgrund ihrer Flexibilität für die Dienstplanung für insgesamt kosteneffizientere Ressourceneinsatzpläne sorgen können, sollte ihre Performanz im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, wenn es darum geht, Ähnlichkeitsaspekte in der Ressourceneinsatzplanung zu berücksichtigen.

Zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung dokumentiert die Arbeit von [Weider, 2007] einige der besten bis dahin beschriebenen Ergebnisse. Dennoch sollte im Rahmen dieser Arbeit bei Modellierung und Lösung von integrierten Planungsproblemen der Ansatz von [Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2010] näher betrachtet werden. Da dort das integrierte Modell auf einer Time-Space-Netzwerk-Formulierung für den Umlaufplanungsteil basiert, ist so eine bessere Vergleichbarkeit mit sequenziellen und teilintegrierten Ansätzen gewährleistet, die auf einem ähnlichen Umlaufplanungsmodell basieren – nachdem in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.3 eine Umlaufplanung nach [Kliwer et al., 2006b], sowie eine teilintegrierte Planung nach [Gintner, 2008] als geeignete Ansätze zur näheren Untersuchung einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitsaspekten bestimmt wurden.

In der Regel sind bei praktischen Problemstellungen nicht alle Annahmen aus Abschnitt 4.1.4 gegeben, die die meisten Autoren ihren Ansätzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung im Mehrdepotfall zu Grunde legen. Oft sind außerdem zusätzliche praktische Anforderungen zu berücksichtigen, deren Realisierbarkeit in integrierten Ansätzen es zu untersuchen gilt.

4.2 Behandlung praktischer Anforderungen zur Dienstbildung in Ansätzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung

Die simultane Umlauf- und Dienstplanung durch Lösen von integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen stellt die aktuell weitreichenste Möglichkeit zur Unterstützung der Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV dar, zu der von verschiedenen Autoren unterschiedliche Modellierungs- und Lösungsansätze vorgeschlagen sind. Im vorherigen Abschnitt wurden Ansätze zum Lösen integrierter Umlauf- und Dienstplanungsprobleme aus der Literatur vorgestellt. Einige Autoren dieser Ansätze beschreiben, wie bestimmte Anforderungen aus der (Betriebs-)Praxis in ihren Ansätzen abgebildet sind oder aufgenommen werden können. Eine Voraussetzung für eine gelungene Unterstützung der Ressourceneinsatzplanung eines Verkehrsunternehmens durch mathematische Optimierungsmethoden ist, inwieweit diese Methoden komplizierte gesetzliche, tarifliche und betriebsspezifische Regelungen abbilden können (vgl. Kapitel 1). Oder anders formuliert: Eine Voraussetzung für eine gelungene Unterstützung ist die Lösbarkeit praktischer Problemstellungen. [Borndörfer et al., 2008] weisen darauf hin, dass Planungssysteme eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung eher eingeschränkt unterstützen. Planer müssten beim Lösen von integrierten Planungsproble-

men größtenteils Umlaufpläne von Hand erstellen und dabei die Auswirkungen auf die Dienstplanung mit ihrer Erfahrung und ihrem Können antizipieren. Die Umsetzung von praktischen Anforderungen zur Dienstbildung in integrierten Modellierungs- und Lösungsansätzen zur Unterstützung der Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV wird daher im Folgenden genauer untersucht.

Abschnitt 4.2.1 geht auf die sogenannten Ressourcen(verbräuche) eines Dienstes ein. Abschnitt 4.2.2 betrachtet die Umsetzung von Pausenregeln, Abschnitt 4.2.3 die Berücksichtigung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten und Abschnitt 4.2.4 den Umgang mit Ablösemöglichkeiten für Fahrer. Abschnitt 4.2.5 untersucht den sogenannten Dienstmix.

4.2.1 Ressourcen(verbräuche) eines Dienstes

Eine Vielzahl der Restriktionen eines Dienstes sind Minimum- oder Maximum-Restriktionen auf Zeiten zu bestimmten Aktivitäten oder Eigenschaften von Diensten. Diese werden auch als *Ressourcen* bezeichnet, die ein Dienst „verbraucht“ (vgl. [Weider, 2007] und siehe auch Abschnitt 3.1.2). [Weider, 2007] listet einige grundsätzliche Ressourcenverbräuche eines Dienstes auf. Ressourcen sind gegeben durch die *Dienstdauer*, die *Arbeitszeit*, die *Lenkzeit*, die *Pausenzeit*, die *bezahlte Zeit* und die *Anzahl der Dienststücke* eines Dienstes. Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Begriffen der Dienstplanung sollen zunächst zum besseren Verständnis die Begriffe der zeitabhängigen Ressourcenverbräuche kurz erläutert werden, die in der Praxis in den gesetzlich, tariflich und betrieblich einzuhaltenen Vorschriften und Regelungen Verwendung finden.

Die *Dienstdauer* (engl. *spread time* oder *duty length*) umfasst den Zeitraum von Beginn des ersten Dienststückes eines Dienstes bis zum Ende des letzten Dienststückes. Der Zeitraum wird eventuell um eine Aufrüst- oder Wegezeit vor Beginn des ersten Dienststückes ergänzt, sowie eventuell eine Abrüst- oder Wegezeit nach Ende des letzten Dienststückes. Als *Arbeitszeit* (engl. *working time*) wird die Zeit bezeichnet, die vergütet wird. Das ist mindestens die Zeit, die ein Fahrer planmäßig auf Fahrzeugen verbringt. Als Arbeitszeit gelten üblicherweise die im Folgenden beschriebenen Zeiten *Lenkzeit*, *Wendezeit*, *Auf- und Abrüstzeit*, *Transfer- bzw. Wegezeit*. Die *Lenkzeit* (engl. *driving time*) umfasst die Zeit eines Fahrers, in welcher er ein Fahrzeug steuert. Die *maximal erlaubte Lenkzeit*, die ein Fahrer *ohne Unterbrechung* leisten darf, ist gesetzlich begrenzt. Alle Zeiten, in denen ein Fahrer ein Fahrzeug nicht steuert, werden als *Lenkzeitunterbrechungen* bezeichnet. Die *Wendezeit* (engl. *layover time*) umfasst die Zeit zwischen zwei Servicefahrten, in welcher ein Fahrer mit einem Fahrzeug auf den Beginn der nächsten Servicefahrt wartet. Wendezeiten können nicht

innerhalb einer Servicefahrt liegen. Wendezeit kann als Lenkzeitunterbrechung gelten, wenn sie eine bestimmte Mindestlänge erreicht. Wendezeit wird als *anrechenbar* bezeichnet (engl. *chargeable layover time*), wenn sie zur Berechnung von Pausenzeiten berücksichtigt werden kann. Vor Beginn des ersten Dienstelementes auf einem neuen Fahrzeug erhält der Fahrer eine *Aufrüstzeit* (engl. *sign-on time*), um das Fahrzeug zu kontrollieren oder sich über den anstehenden Dienst zu informieren. Analog erhält der Fahrer nach dem Ende des letzten Dienstelementes auf einem Fahrzeug eine *Abrüstzeit* (engl. *sign-off time*). Die Zeit, die ein Fahrer benötigt, um zu Fuß oder als Fahrgast mit einem Verkehrsmittel von einem Ablöseort (Depot, Haltestelle) zu einem anderen zu gelangen, wird als *Transfer- oder Wegezeit* (engl. *transfer time*) bezeichnet.

[Steinzen, 2007] und [Weider, 2007] beschreiben, dass für die Berücksichtigung von in der Praxis wichtigen **Regelungen zur Lenkzeit** innerhalb eines Dienstes eine Lenkzeit-Ressource beim Lösen von ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen zur Diensterstellung genutzt werden muss, z.B. für die Gesamtlenkzeit. So kann die maximal am Stück, d.h. ohne Pause, geleistete Lenkzeit und die maximal erlaubte Gesamtlenkzeit eines Dienstes geprüft werden.

Um Dienste mit bestimmten Ressourcenverbräuchen wie z.B. einer bestimmten Dauer/Länge zu erhalten und so Wünsche eines Verkehrsunternehmens bezüglich der zu planenden Dienste zu berücksichtigen, bildet [Weider, 2007] **Abweichungen von gewünschten Zielwerten** in den Kostenbewertungen eines Dienstes ab. Z.B. werden beim Überschreiten der gewünschten Dienstlänge Strafkosten hinzugefügt, sodass Dienste bevorzugt werden, die weniger vom gewünschten Wert abweichen. [Borndörfer et al., 2002] fügen für Abweichungen von der Ziellarbeitszeit $1/5$ der Abweichung als Kosten zum Dienst dazu.

Implikationen für diese Arbeit

Die Modellierung von Ressourcen bzw. Ressourcenverbräuchen ist also ein geeignetes und vielfach genutztes Hilfsmittel, um auch komplizierte Dienstregeln wie z.B. eine Berücksichtigung von Lenkzeiten in Dienstgenerierungsnetzwerken abbilden zu können. Sind Dienstregeln als Minimum/Maximum-Restriktion (mit Ressourcenverbräuchen) formulierbar, sind sie grundsätzlich in effizienten Optimierungsverfahren zur Umlauf- und Dienstplanung realisierbar. Beispiele dazu finden sich u.a. bei [Huisman, 2004], [Borndörfer et al., 2004], [Mesquita und Parias, 2008], [Steinzen, 2007] und [Weider, 2007].

4.2.2 Pausenregeln

Pausenzeiten für Busfahrer sind gesetzlich und tariflich geregelt. Die gesetzlichen Spielräume zu Lenk- und Ruhezeiten sind für Fahrer im ÖPNV in Deutschland in der *Verordnung zur Durchführung des Fahrpersonalgesetzes (FPersV*, siehe [Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2005]) festgelegt. Zu diesen Pausen-Regelungen existieren in unterschiedlichen Verkehrsunternehmen in der Regel unterschiedliche Spezifikationen bzw. Betriebsvereinbarungen. Dabei wird in Deutschland grundsätzlich zwischen zwei Pausentypen unterschieden: Block-Pausen und Verhältnis-Pausen.

Bei *Block-Pausen* wird ein Dienst durch eine oder mehrere Lenkzeitunterbrechungen bzw. Pausen zwischen den Dienststücken unterbrochen. Dabei ist die geforderte Mindestlänge der Pause abhängig von der Anzahl der Block-Pausen innerhalb eines Dienstes. Z.B. sind bei einem Dienst mit einer Pause mindestens 30 Minuten für diese Pause gefordert, bei zwei Pausen müssen diese jeweils mindestens 20 Minuten dauern, und bei drei Pausen jeweils mindestens 15 Minuten. Bei *Verhältnis-Pausen* muss ein bestimmtes Verhältnis zwischen Lenkzeitunterbrechungen bzw. zur Pause anrechenbaren Wendezeiten zur Gesamt-Lenkzeit eines Dienstes sichergestellt sein. Das Verhältnis kann 1 : 6 oder 1 : 5 betragen. Die Mindestlänge der dafür anrechenbaren Wendezeiten beträgt dabei zehn bzw. acht Minuten.

Das Erstellen/Auffinden von Block-Pausen ist dabei einfacher in Optimierungsverfahren zur Dienstbildung realisierbar als Verhältnis-Pausen. Block-Pausen werden standardmäßig strukturell über Kanten in entsprechenden Netzwerken zur Dienstgenerierung modelliert, die Pausenmöglichkeiten repräsentieren. Z.B. bei [Mesquita und Paias, 2008], wobei dort zwischen Pausen bzw. Kanten mit und ohne Fahrzeugwechsel unterschieden wird, oder bei [Steinzen, 2007], der (Block-)Pausenkanten (mit Fahrzeugwechsellmöglichkeit) in als Time-Space-Netzwerken formulierten Dienststellungsnetzwerken nutzt. [Weider, 2007] bildet Fahrzeugwechsel mit Pausen über mehrere Kanten und Knoten in sogenannten Timelines ab. Diese repräsentieren u.a. den Aufenthalt an Pausenorten. Kanten repräsentieren dabei den Transfer vom Fahrzeug zum Pausenort bzw. vom Pausenort zum Fahrzeug. Mit Kanten verbundene Knoten in der Timeline beschreiben den Aufenthalt am Pausenort in diskreten 1-Minute-Zeiteinheiten.

[Steinzen, 2007] geht darauf ein, *Pausen an bestimmte Positionen* innerhalb eines Dienstes zu setzen. Dazu wird bei der Diensterstellung eine minimale Arbeitszeit vor der ersten Pause eines Dienstes, sowie eine minimale Arbeitszeit nach der letzten Pause beachtet. Diese Mindestzeiten werden strukturell über zusätzliche Dienst-

Beginn- und Dienst-Ende-Knoten sowie entsprechenden Kanten zu bzw. von geeigneten Dienststücken im Dienststück-basierten Diensterstellungsnetzwerk berücksichtigt.

[Steinzen, 2007] und [Weider, 2007] beschreiben, wie ein Dienstyp mit ***Verhältnis-Pausen-Regel*** in ihren Lösungsverfahren abgebildet werden kann. Beim Erstellen von Diensten durch Lösen von ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen, müssen als zusätzliche Ressourcen die Gesamt-Wendezeit und die Gesamt-Lenkzeit berücksichtigt werden. Ist ein Dienst für diesen Dienstyp vollständig erstellt, muss dann (im Senke-Knoten) geprüft werden, ob das Verhältnis von Gesamt-Wendezeit zu Gesamt-Lenkzeit im Sinne der 1/6- bzw. 1/5-Regel eingehalten ist.

Implikationen für diese Arbeit

Eine genaue Berücksichtigung der betriebsspezifischen Auslegungen von Pausenregeln ist existenziell für die Zulässigkeit der von Optimierungsverfahren vorgeschlagenen Dienstpläne. Eine manuelle Korrektur von in Dienstplänen vereinzelt unzulässig gesetzten Pausen bedarf eines großen Aufwandes, da die gesamte Abstimmung zwischen Fahrzeugen und Fahrern betroffen wäre und modifiziert werden müsste.

In der Literatur sind grundlegende Pausenmodellierungsmöglichkeiten unter verschiedenen Bedingungen (z.B. als Pausen mit Fahrzeugwechsel des Fahrers) beschrieben. Bei einigen Modellierungen bleibt allerdings offen, wie die Pausen im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Fahrzeugwechsellmöglichkeiten realisiert werden können. Fahrzeugwechsellmöglichkeiten sind z.B.: Fahrer „besetzt“ während der Pause das Fahrzeug, da Fahrzeugwechsel erst am Dienstende möglich sind, Fahrer gibt das Fahrzeug frei oder Fahrer kann optional das Fahrzeug freigeben. Insbesondere offen ist, wie unterschiedliche Pausenmöglichkeiten in Netzwerkstrukturen abgebildet und beim Lösen der entsprechenden Optimierungsprobleme zur Dienstgenerierung erkannt werden können, die auf TSN-Strukturen mit aggregierten Leerfahrtmöglichkeiten basieren, wie z.B. die TSN-basierten Dienststück- bzw. Dienstgenerierungsnetzwerke, die z.B. von [Steinzen, 2007] und [Steinzen et al., 2010] verwendet werden.

4.2.3 Fahrzeugwechsel

Betriebsspezifisch ist festgelegt, ob ein Fahrer während seines Dienstes das genutzte Fahrzeug wechseln darf bzw. muss. Üblicherweise hängt dies mit der Pausengestaltung zusammen: Entweder darf bzw. muss während einer Pause im Depot oder an anderen Pausenorten das Fahrzeug gewechselt werden, oder nicht. In der Regel wird in der Literatur der Fall beschrieben für Fahrzeugwechsel in Pausen, also ***Fahrzeugwechsel***

zwischen zwei Dienststücken, unter anderem bei [Huisman, 2004], [Steinzen, 2007] und [Gintner, 2008] (vgl. Abschnitt 4.2.2).

[Mesquita und Paias, 2008] bilden in ihrem Modell zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung ab, dass Fahrer nicht nur in der Pause ihr Fahrzeug wechseln dürfen, sondern auch am Ende jeder Servicefahrt, also *Fahrzeugwechsel innerhalb von Dienststücken* erlaubt sind. [Steinzen, 2007] schlägt ebenfalls ein Modell vor, welches *unbeschränkte Fahrzeugwechsel* (engl. *unrestricted changeovers*) im Sinne von [Mesquita und Paias, 2008] zulässt. Dies kann aus praktischer Sicht sinnvoll sein, um durch mehr Freiheitsgrade für die Dienstplanung kosteneffizientere Pläne bilden zu können. Allerdings muss in der Praxis dann in den Plänen genug Zeit vorhanden sein, dass nach Beendigung einer Servicefahrt ein Fahrer einen anderen Fahrer auf einem Fahrzeug ablösen kann, z.B. für das Umräumen der persönlichen Dinge wie Taschen, das Einstellen der Sitzposition etc. Ansonsten kann es vorkommen, dass Verspätungen aufgebaut werden oder Verspätungen eines Dienstes auf einem Fahrzeug auf Verspätungen auf andere Fahrzeuge und Dienste übertragen werden.

In einigen Ansätzen ist eine ähnliche Möglichkeit des Fahrzeugwechsels indirekt gegeben. Um *(Praxis-)Probleme einfacher lösen* zu können, sind die Dienstplanungsprobleme als Set-Covering-Probleme formuliert, die Mehrfachüberdeckungen von Dienstelementen bzw. Service- und Leerfahrten mit Diensten erlauben, z.B. bei [Huisman, 2004], [Mesquita und Paias, 2008], [Steinzen, 2007] und [Gintner, 2008]. Mehrfachüberdeckungen werden z.B. bei [Gintner, 2008] aufgelöst, indem sie nur in einem Dienst als auszuführende Arbeit gelten und in den anderen Diensten als Transfer, d.h. Mitfahrt als Fahrgast, betrachtet werden. So werden prinzipiell Fahrzeugwechsel als Passagier ohne Pause durchgeführt.

Eine mit Fahrzeugwechseln in der Praxis auftretende Störanfälligkeit von Plänen betrachtet [Weider, 2007] näher. Er beschreibt eine Möglichkeit, den Dienstplan *robuster gegen Störungen durch Verspätungen* eines einzelnen Fahrers zu gestalten. Dazu sollen Fahrzeugwechsel eines Dienstes mit Strafkosten belegt werden. So werden Dienste bevorzugt, die weniger Fahrzeugwechsel beinhalten. Bei weniger Fahrzeugwechseln wird die mögliche Verspätung eines Dienstes auf einem Fahrzeug nicht auf andere Fahrzeuge übertragen.

Implikationen für diese Arbeit

In der Literatur sind also grundlegende Fahrzeugwechselmodellierungsmöglichkeiten unter verschiedenen Bedingungen und Annahmen, z.B. in Kombination mit Pausen, beschrieben. Analog zur Feststellung im vorherigen Abschnitt bleibt bei einigen

Modellierungen allerdings offen, wie das Zusammenspiel von Pausen und unterschiedlichen bzw. anderen Fahrzeugwechsellmöglichkeiten realisiert werden kann.

4.2.4 Ablösemöglichkeiten

Ablösemöglichkeiten für Fahrer sind ähnlich zu Fahrzeugwechsellmöglichkeiten betriebsspezifisch festgelegt. Im sequenziellen Planungsfall bestimmen Ablösepunkte auf den Umläufen orts- und zeitabhängig, wann ein Fahrer von seinem Fahrzeug abgelöst werden kann (siehe Abschnitt 2.1.2). Im integrierten Planungsfall sind keine Umläufe gegeben, sodass ein Ablösepunkt nicht nur eine orts- und zeitabhängige Möglichkeit zum Ablösen eines Fahrers beschreiben kann, sondern auch rein ortsabhängige Möglichkeiten, z.B.: Ablösen ist immer an einem Depot möglich.

[Huisman, 2004] weist darauf hin, dass Ablösen eines Fahrers in der Praxis an sogenannte *Ablöseorte* (engl. *relief-locations*) gebunden ist. [Gaffi und Nonato, 1999] und [Weider, 2007] geben Beispiele für die Ressourceneinsatzplanung im Regionalverkehr, bei welcher ***Ablösen nur in Depots/Garagen*** möglich ist bzw. an sehr wenigen zusätzlichen Endhalttestellen.

[Gintner, 2008] geht ausführlich auf eine wesentliche Anforderung aus der Praxis ein, die die Ablösemöglichkeiten von Fahrern betreffen. Unter anderem bei [Huisman, 2004] und [Steinzen, 2007] ist die Annahme getroffen, dass jede Servicefahrt zu Beginn und am Ende eine Ablösemöglichkeit besitzt, also genau einem Dienstelement entspricht. Im allgemeinen Fall können Fahrer aber evtl. auch während einer Servicefahrt ablösen, siehe z.B. bei [Friberg und Haase, 1999] und [Haase et al., 2001]. Außerdem kann es sein, dass Start- und Endpunkte einer Servicefahrt gar nicht als Ablösemöglichkeiten zugelassen sind. Um ***beliebige Ablösemöglichkeiten in Servicefahrten*** zulassen zu können, erweitert [Gintner, 2008] das genutzte integrierte Modell, indem er die Kopplungsbedingungen zwischen Umlauf- und Dienstplanungsteil statt für Dienstelemente für Dienstelement-Abschnitte definiert (Dienstelement-Abschnitte, siehe Abschnitt 2.1.2). Im Modell erfolgt die Kopplung zwischen Umlauf- und Dienstplanung dann nicht mehr pro Kante des Umlaufplanungsnetzwerkes, sondern pro Dienstelement-Abschnitt.

Implikationen für diese Arbeit

In der Literatur wird sowohl der Fall der Modellierung „beliebiger“ Ablösemöglichkeiten in Servicefahrten beschrieben, als auch der Fall Depot-abhängiger Ablösemöglichkeiten. Ansonsten ähnelt die Berücksichtigung von Ablösemöglichkeiten der Berücksichtigung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten: Wenn ein Fahrer sein Fahrzeug wech-

selt, wird der vorher auf diesem Fahrzeug befindliche Fahrer auch immer „abgelöst“, wobei Ablösen im weiteren Sinne auch die Neubesetzung eines vorher freien Fahrzeugs meinen kann. Anders herum gilt, wenn ein Fahrer „abgelöst“ wird, wechselt er nicht zwingend auch das Fahrzeug. Dies ist zu Dienstbeginn und am Dienstende der Fall. Offen bleibt, wie z.B. individuelle zeitliche Restriktionen wie Transferzeiten, die sich aus unterschiedlichen Ablöseorten ergeben, geeignet zu berücksichtigen sind.

4.2.5 Dienstmix

Neben den in Abschnitt 4.2.2 aufgeführten Block- und Verhältnis-Pausen wird ein Diensttyp auch durch die sogenannte *Teilungsgrenze* bzw. Dienstunterbrechung bestimmt. Dienste, deren längste Pause diese Teilungsgrenze nicht überschreitet, werden als *zusammenhängende Dienste* bezeichnet. Dahingegen bestehen *geteilte Dienste* aus zwei Dienstteilen, die durch eine Unterbrechung voneinander getrennt sind, die mindestens die Länge der Teilungsgrenze besitzt (meistens eine Stunde). Jeder Dienstteil besteht dabei aus mindestens einem Dienststück. Geteilte Dienste werden oft zur Bedienung der Hauptverkehrszeiten genutzt. In den Hauptverkehrszeiten werden ebenfalls häufig *Kurzdienste* eingesetzt. Kurzdienste sind Halbtags-Dienste, deren Dienstdauer deutlich kürzer ist als die anderer Dienste, da sie oft keine Pause beinhalten.

[Steinzen, 2007] ergänzt das von ihm genutzte Modell zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit einer globalen Restriktion, die die **Anzahl bzw. den Anteil von Diensten eines bestimmten Diensttyps** beschränken soll. Solche Restriktionen werden als *Dienstmix-Restriktionen* bezeichnet.

[Weider, 2007] schlägt vor, bei Diensten, die einer für Fahrer unbeliebten Dienstart angehören, wie z.B. geteilte Dienste, die Fixkosten mit Strafkosten zu erhöhen. So soll im Optimierungsverfahren eine **bevorzugte Erstellung von Diensten beliebiger Diensttypen** ermöglicht werden.

Implikationen für diese Arbeit

Eine betriebsspezifisch gewünschte Zusammensetzung von Diensten unterschiedlicher Diensttypen im Dienstplan ist im Modell also vergleichsweise leicht realisierbar. Z.B. indem direkt Restriktionen in das zugrunde liegend Modell eingefügt werden, oder indirekt über Anpassung der Kostenbewertungen der im Modell befindlichen Dienste/Dienstvariablen.

4.3 Modelle und Methoden zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeit

Während die wissenschaftliche Literatur zur kosteneffizienten Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV äußerst umfangreich ist, wird die Unterstützung einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen durch mathematische Optimierungsmethoden weitaus weniger behandelt. Dennoch existieren vereinzelt Ansätze, deren Analyse ein erster Schritt zur Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit bietet: (Wie) Können sowohl kosteneffiziente als auch ähnliche Pläne berechnet werden? Im Folgenden soll ein Überblick über die in der Literatur vorgeschlagenen Modelle und Lösungsverfahren zur Planung mit einem Ähnlichkeitsziel gegeben werden. Dabei werden neben Ansätzen aus der ÖPNV-Planung auch Ansätze aus den Anwendungsfeldern Bahn- und Flugverkehr einbezogen. Um eine gute Grundlage für eine fundierte Analyse zu bieten, werden insbesondere die Konzepte zur Ähnlichkeitsberücksichtigung und ihre Einbettung in die vorgeschlagenen Methoden, sowie die in numerischen Tests erreichten Ergebnisse ausführlich dargestellt. Anders als in den vorherigen Abschnitten werden die sich aus der Analyse ergebenden Implikationen für diese Arbeit nicht direkt im Anschluss an die einzelnen Ansätze formuliert, sondern zur besseren Übersicht zusammengefasst im Handlungsbedarf in Kapitel 5.

Generell können die existierenden Ansätze in zwei Kategorien eingeteilt werden: In Abschnitt 4.3.1 dieses Kapitels werden Ansätze vorgestellt, bei denen ein Referenzplan gegeben ist und das Ziel darin besteht, einen Plan zu erstellen, der möglichst ähnlich zum gegebenen Referenzplan ist (*Referenzplan-basierte Ansätze*). Abschnitt 4.3.2 enthält eine Übersicht über Ansätze, bei denen kein Referenzplan gegeben ist. Ziel dieser Ansätze ist es, für mehrere Planungsprobleme Pläne zu erstellen, die aufgrund von in den Plänen regelmäßig enthaltenen Fahrtensequenzen, d.h. durch regelmäßige Muster, zueinander ähnlich sind (*Regelmäßigkeit-basierte Ansätze*). Eine Schwierigkeit bei einer Planung mit Ähnlichkeitszielen für unterschiedliche Tage ist die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Tage, da schon die kosteneffiziente Planung eines Tages (einer Planungsperiode) sehr komplex ist (vgl. Kapitel 2). In Abschnitt 4.3.3 wird daher zusätzlich ein Überblick über Ansätze gegeben, die nicht unmittelbar ein Ähnlichkeitskriterium zum Ziel haben, Planungsprobleme mehrerer Tage aber aus anderen Gründen zusammengefasst lösen.

4.3.1 Ähnlichkeit für einen Tag – Referenzplan-basierte Ansätze

Das Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Ansätze besteht darin, zu einem gegebenen Referenzplan einen Plan mit möglichst wenig Abweichung zu erstellen. Diese Ansätze sind insbesondere für das sogenannte *Rescheduling* zu finden, bei welchem Änderungen an einem bestehenden Plan durchgeführt werden.

In der Literatur wird im Rescheduling zwischen geplantem (proaktivem) und ungeplantem (reaktiven) Rescheduling unterschieden, z.B. bei [Steinzen, 2007]: Im proaktiven Rescheduling sind die Änderungen im zugrunde liegenden Fahrplan im Voraus bekannt. Beim reaktiven Rescheduling (auch als *Recovery* bezeichnet) wird das Rescheduling notwendig aufgrund von Störungen während der Planausführung des Ursprungsplanes. Ist die Ausführung des Originalplans gestört, wird versucht einen Plan zu erstellen, der ab der Störung die Fahrten des Fahrplans mit möglichst wenig Änderung zum Originalplan bedient.

Nach [Steinzen, 2007] eignen sich Recovery-Ansätze nicht für das Erstellen von ähnlichen Plänen für unterschiedliche Fahrpläne. Recovery-Maßnahmen sind u.a. das Verzögern oder Absagen von Fahrten. Eine solche Änderung des Fahrplans ist bei der Erstellung eines ähnlichen Plans für einen ähnlichen Fahrplan aber nicht erlaubt. Außerdem werde meistens eine lokale Störung im Plan betrachtet, wohingegen die unregelmäßigen Fahrten in den in dieser Arbeit betrachteten Problemstellungen oftmals über den gesamten Fahrplan verteilt sind. Für eine umfassende Übersicht über Konzepte, Modelle und Methoden von Recovery-Ansätzen im Flugverkehr sei auf [Clausen et al., 2010] verwiesen. Aktuelle Ansätze im Bahnverkehr werden z.B. von [Potthoff, 2010], [Potthoff et al., 2010] und [Veelenturf et al., 2012] vorgeschlagen.

ÖPNV

[Dallaire et al., 2004] betonen für die Dienstplanung im ÖPNV, dass es in der Praxis von Verkehrsunternehmen wichtig sei, auf Basis eines vorhandenen Dienstplanes einen ähnlichen Plan erstellen zu können. Sehr allgemein und ohne Angabe vieler Details wird dargestellt, dass dies mit ihrem Ansatz möglich ist, der Teil der kommerziellen Planungssoftware HASTUS/CrewOpt (siehe [GIRO Inc., 2014]) ist.

In einem Set-Partitioning-Problem wird die kostenminimale Zuordnung von Diensten zu Fahrten bzw. Aufgaben gesucht. Dabei geht das Ähnlichkeitsziel über die Kosten von erstellten Diensten in die Zielfunktion des Dienstplanungsproblems ein: Die Ähnlichkeit von erstellten Diensten zu initial gegebenen Diensten wird quantitativ mit einem Distanzmaß bewertet, z.B. über Depotzugehörigkeit, Dienstyp, Anzahl

Pausen, Anteil Lenkzeit. Die Kosten des erstellten Dienstes werden in der Zielfunktion um diesen Betrag reduziert.

Das zugrunde liegende als Set-Partitioning-Modell formulierte Dienstplanungsproblem wird dann – wie ein „normales“ Dienstplanungsproblem weiterhin – mit einem Column Generation-Ansatz gelöst. Im mathematischen Modell werden lediglich noch lineare Restriktionen für jeden initial gegebenen Dienst hinzugefügt, die verhindern sollen, dass zu einem gegebenen Dienst in der berechneten Lösung mehrere ähnliche Dienste assoziiert werden. Testergebnisse werden nicht präsentiert.

[Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2009] präsentieren die ersten Testergebnisse zu einer ÖPNV-Planung unter Beachtung von Ähnlichkeitsaspekten. Die Autoren stellen einen Ähnlichkeitsansatz für ein unabhängiges bzw. fahrplanbasiertes Dienstplanungsproblem vor: Betrachtet wird ein außerstädtisches Planungsszenario mit einem Depot, bei welchem nur im Depot das Fahrzeug gewechselt werden darf. Ein Dienst entspricht in diesem Planungsproblem somit einem Umlaufblock (vgl. Abschnitt 2.2.2). Üblicherweise gibt es für ein solches Dienstplanungsproblem eine Vielzahl an optimalen Lösungsmöglichkeiten. Aus dieser Vielzahl soll die optimale Lösung ausgewählt werden, die ähnlich zu einem gegebenen Referenzplan ist.

Als Ähnlichkeitsziel wird die Unähnlichkeit zum gegebenen Referenzplan minimiert. Dazu wird die (Un-)Ähnlichkeit erstellter Dienste mit einer Distanzfunktion gemessen, die Abweichungen in Fahrtenpaaren bzw. Fahrtensequenzen zum Referenzplan ermittelt.

Das Planungsproblem ist als Set-Covering-Problem formuliert, in welchem alle Fahrten kostenminimal von Diensten abgedeckt werden müssen. In einer ersten Phase werden mit Column Generation mögliche Dienste für eine kosteneffiziente Lösung erstellt. In einer zweiten Phase werden in der degenerierten Lösungsmenge die Dienste ausgewählt, die zum gegebenen Referenzplan ähnlich sind. Dazu wird ein Branching-Schema vorgeschlagen, dass *Local Branching* (siehe [Fischetti und Lodi, 2003]) mit *Follow-On Branching* (siehe [Ryan und Foster, 1981] und [Vance et al., 1997]) kombiniert: Zunächst wird die Zielfunktion modifiziert und zusätzlich zu den Kosten auch die Abweichung eines Dienstes vom Referenzplan gewichtet als Strafkosten in die Zielfunktion aufgenommen. Das so modifizierte Problem wird standardmäßig bis zur Optimalität gelöst. Diese Lösung wird dann dazu genutzt, um mittels Local Branching den Lösungsraum für das ursprüngliche Problem in Lösungen ähnlich dem Referenzplan und unähnlich einzuteilen. Ein Großteil der Ähnlichkeit kann also schon durch eine modifizierte Zielfunktion, also durch Berücksichtigung von Unähnlichkeit als Strafkosten in der Zielfunktion erreicht werden. Durch Follow-On Branching auf

Aufgabenpaaren bzw. -sequenzen aus dem Referenzplan wird der Lösungsraum durchsucht.

Künstlich erstellte und reale Instanzen mit 320-800 Fahrten und ca. 95% regelmäßigen Fahrten werden auf einem PC mit Intel Pentium IV 2,2 GHz Prozessor und 2 GB Hauptspeicher gelöst. Dabei ist die Zeit auf zwei Stunden für die zweite Phase – das Finden einer guten ganzzahligen Lösung – beschränkt. Im Schnitt ist diese Lösung in ca. 1,5h gefunden. Die Gesamtrechenzeit ist nicht angegeben.

Als Lösungswerte sind Durchschnittswerte über alle Instanzen aufgeführt. Die Lösungen enthalten im Schnitt ca. 80% der Fahrtenpaare aus dem vorgegebenen Referenzplan bzw. 30% Dienste des Referenzplanes, bei durchschnittlich 1,5% Gap zu den optimalen Lösungen. Dabei bleibt offen, wie ähnlich der jeweils genutzte Referenzplan zu den zu planenden Tagen ist, da z.B. die Verteilungen der unregelmäßigen Fahrten im Tagesverlauf nicht angegeben sind.

Die Ergebnisse zeigen aber, dass es möglich ist, unter kosteneffizienten Lösungen eine Lösung zu finden, die ähnlichere Dienste enthält, als es in anderen Lösungen der Fall wäre. Es stellt sich die Frage, ob ein solches Ergebnis auch bei anderen, weniger speziellen Problemstellungen in der ÖPNV-Planung möglich ist. Eine weitere Frage wird dadurch aufgeworfen, dass jeweils nur zwei Fahrpläne betrachtet werden: der Referenzfahrplan und ein weiterer. Wie ähnlich zueinander könnten die anhand des Referenzplans berechneten Dienstpläne gebildet werden, wenn zusätzliche Tage ähnlich geplant werden sollen?

[Steinzen, 2007] beschreibt für das obige Planungsszenario – die außerstädtische Dienstplanung mit einem Depot – ebenfalls bi-kriterielle Metaheuristiken. In der Set-Covering-Problemformulierung sollen dann Dienste ausgewählt werden, die sowohl die Kosten minimieren als auch als Ähnlichkeitsziel die Distanz zum gegebenen Referenzplan.

Gelöst wird das Modell in zwei Phasen. In der ersten Phase werden mit einem Column Generation-Ansatz kosteneffiziente Dienste generiert. In der zweiten Phase wird das bi-kriterielle Problem aufgestellt und mit einer der vier folgenden Metaheuristiken gelöst: SPEA2, Tabu Search, Simulated Annealing oder Ant Colony Optimization. Für Details zu den genutzten Metaheuristiken sei auf die jeweiligen Autoren verwiesen: [Zitzler et al., 2002], [Lourenço et al., 2001b], [Serafini, 1994] und [Guntsch und Middendorf, 2003].

Getestet werden künstliche Instanzen mit 320 bis 800 Fahrten auf einem PC mit Intel Pentium IV 3,0 GHz Prozessor und 2 GB Hauptspeicher. Die Lösungszeit ist auf zehn Minuten beschränkt, da die Ansätze dazu dienen sollen, schnell einen Trade-Off

zwischen Ähnlichkeit und Kosteneffizienz in der Lösungsmenge aufzeigen zu können. Dabei liefert der SPEA2 die besten Lösungen. Verglichen werden die Lösungen mit dem von [Steinzen, 2007] und [Steinzen et al., 2009] beschriebenen Branching-Schema.

Insgesamt werden mit dem SPEA2 Lösungen ermittelt, die bereits sehr hohe Kosten benötigen, um eine vergleichbare (geringe) Distanz zum Referenzplan zu erreichen wie die mit dem Branching-Schema ermittelten kosteneffizienten Lösungen. Bei der angegebenen Instanz mit 320 Fahrten erreicht die Metaheuristik z.B. bei ihrer kosteneffizientesten Lösung Vergleichswerte von ca. 103% Kosten bei 100% Distanz und bei ihrer zum Referenzplan ähnlichsten Lösung ca. 125% Kosten bei 50% Distanz, d.h. mit einer Kostensteigerung auf 125% verglichen zu den mit dem Branching-Schema ermittelten Kosten verringert sich die Distanz auf 50% der mit dem Branching-Schema erreichten Distanz. Die Ergebnisse auf den anderen Instanzen verhalten sich ähnlich.

Die beschriebenen Metaheuristiken sind also weniger geeignet, praktisch verwendbare Lösungen zu generieren, da die Kostensteigerungen verglichen zu kosteneffizienten Dienstplänen zu hoch sind. Beim SPEA2 betragen die Kostensteigerungen mindestens 3-5%.

In [Amberg et al., 2011] wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Planung mit einem Referenzplan bereits in Teilen beschrieben. Dieser wird in in Abschnitt 9.2 genauer erläutert. Im Vergleich zu den bisher vorgestellten Ansätzen wird dort ein Referenzplan genutzt, um ähnliche Ressourceneinsatzpläne für mehr als einen Tag zu erstellen.

[Borndörfer et al., 2012] schlagen vor, sogenannte *Dienst-Vorlagen/Schablonen* (engl. *duty templates*) zu nutzen, um zu einem gegebenem Referenzplan einen ähnlichen Dienstplan zu erstellen. Dieser Ansatz ist Bestandteil der kommerziellen Planungssoftware IVU.PLAN (siehe [IVU Traffic Technologies AG, 2014]). Dienst-Vorlagen sind als künstliche Dienstypen zu verstehen, die einen echten Dienstyp beschreiben (Diensttyp siehe Abschnitt 2.1.2), sowie zusätzliche Restriktionen, die die Zulässigkeit eines Dienstes definieren.

Zusätzliche Restriktionen sind einerseits bestimmte Aufgaben, die ein nach einer Schablone erstellter Dienst abdecken muss. Falls der nach der Vorlage gebildete Dienst mindestens eine Aufgabe der Vorlage abdecken muss, wird diese Forderung als *Aufgaben-Ähnlichkeit* (engl. *task-similarity*) bezeichnet bzw. als *exakte Aufgaben-Ähnlichkeit* (engl. *exact task similarity*), falls alle Aufgaben der Vorlage abgedeckt werden müssen. Vorlagen werden dabei aus jedem Dienst des Referenzplans erstellt, der mindestens eine Aufgabe enthält, die auch für das aktuelle Planungsproblem gültig

ist. Somit könnte grundsätzlich für jeden Dienst aus dem Referenzplan bzw. der darin bedienten Aufgabenfolge individuell bestimmt werden, wie wichtig dieser für die Ähnlichkeit des zu erstellenden Plans ist.

Alternativ werden als zusätzliche Restriktionen eines Diensttyps in einer Dienst-Schablone ein bestimmter Zeitraum gefordert, in welchem ein nach dieser Schablone gebildeter Dienst starten darf, z.B. 4-Stunden-Intervalle, in Kombination mit einer nicht überschreitbaren maximalen Länge bzw. Schichtdauer. Dies wird als *Zeitraahmen-Ähnlichkeit* bezeichnet (engl. *time window similarity*).

Das Ähnlichkeitsziel besteht darin, in der Lösung eine bestimmte Anzahl Dienste zu haben, die nach den Dienst-Schablonen erstellt wurden. Dabei ist das Dienstplanungsproblem als Set-Partitioning-Modell formuliert, in welchem jede Fahrt/Aufgabe kostenminimal von einem Dienst abgedeckt werden soll. Zusätzlich enthält das Modell Restriktionen, die die Anzahl der Dienste eines bestimmten Diensttyps nach oben und/oder unten beschränken sollen.

Gelöst werden die Modelle mit einem Column Generation-Ansatz. Als Startlösung werden u.a. die Dienste des gegebenen Referenzplanes verwendet, was die Konvergenz des Verfahrens verbessern kann und dazu führt, dass ein Großteil der Ähnlichkeit schon durch die im Referenzplan enthaltenen Dienste erreicht werden kann: In den Testinstanzen können ca. 75-95% der zu verplanenden Aufgaben allein mit Diensten aus dem Referenzplan bedient werden. Im Pricing werden neue Dienste erzeugt, indem pro Diensttyp-Depot-Kombination Kürzeste-Wege-Probleme mit zusätzlichen Ressourcenbeschränkungen in Dienstgenerierungsnetzwerken gelöst werden. Details dazu sind beschrieben von [Borndörfer et al., 2001] und [Weider, 2007].

Testergebnisse werden präsentiert für zwei reale städtische Dienstplanungsprobleme mit 504 bzw. 2.320 Aufgaben, sowie einem realen regionalen integriertem Umlauf- und Dienstplanungsszenario mit insgesamt 526 Servicefahrten (1.026 Aufgaben). Im regionalen Szenario sind die Fahrten an einem Donnerstag und einem Freitag zu bedienen, bei fünf Depots und vier Fahrzeugtypen. Der Anteil regelmäßiger Fahrten beträgt ca. 95%, da 19 Fahrten nur am Donnerstag bedient werden und 15 Fahrten nur am Freitag. Die unregelmäßigen Fahrten sind kurze Schul- und Bäder-Fahrten mit einem Lenkzeitbedarf von im Schnitt 10 und maximal 25 Minuten und können dadurch vergleichsweise leichter zusätzlich eingeplant werden. Für die beiden städtischen Instanzen ist nicht angegeben, wie ähnlich der Fahrplan bzw. die Aufgaben des Tages zu denen des Referenztages sind. Getestet wurde auf einem Intel Xeon CPU E31280 mit 3,5 GHz unter 32 Bit.

Dabei werden mit exakter Aufgaben-Ähnlichkeit und Teil-Ähnlichkeit annähernd gleich gute Ergebnisse erreicht, wobei Teil-Ähnlichkeit mehr Spielraum für etwas kos-

teneffizientere Pläne erlaubt und Zeitrahmen-Ähnlichkeit noch einmal mehr Möglichkeiten beim Bilden effizienterer Pläne bieten kann: Im ersten städtischen Szenario werden verglichen mit der kosteneffizienten Lösung bestehend aus 42 Diensten bei einem Referenzplan mit 44 Diensten bei exakter Aufgaben-Ähnlichkeit 2,4-4,8% mehr Dienste notwendig, bei Teil-Ähnlichkeit bis zu 2,4%, bei Zeitrahmen-Ähnlichkeit 4,8%. Die Arbeitszeit erhöht sich leicht bis zu 0,4%, 0,3% und 0,9%.¹ Im zweiten städtischen Szenario sind die Ergebnisse ähnlich. Verglichen mit der kosteneffizienten Lösung mit 227 Diensten werden bei einem Referenzplan mit 194 Diensten zwischen ca. 0,9-2,6%, zwischen ca. 0,4-3,1%, sowie 0% mehr Dienste benötigt. Die bezahlte Zeit wird erhöht zwischen ca. 0,6-1,0%, 0,5-1,1% und verringert um 0,02%.² Im regionalen Szenario werden verglichen mit einer kosteneffizienten Lösung für den Freitag bestehend aus 45 Diensten und 36 Fahrzeugen bei einem Referenzplan mit 45 Diensten bei Teil-Ähnlichkeit 0% mehr Dienste und 2,8 bis 0% weniger Fahrzeuge benötigt, bei Zeitrahmen-Ähnlichkeit 0% mehr Dienste und 2,8% weniger Fahrzeuge. Die bezahlte Zeit erhöht sich zwischen 0-2,4% bzw. wird um 0,6% verringert. Die Rechenzeit für das erste städtische Szenario beträgt ca. 20 Minuten für eine kosteneffiziente Lösung, ca. 10 Minuten für Aufgaben-Ähnlichkeit und weniger als zwei Minuten für Zeitrahmen-Ähnlichkeit. Beim zweiten städtischen Szenario sind es (in gleicher Reihenfolge) ca. 120 Minuten, zwischen ca. 10-50 Minuten und ca. 39 Stunden, beim regionalen Szenario 6,5 Stunden, zwischen 4,5-6,5 Stunden, sowie 15 Stunden.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem vorgeschlagenem Dienst-Vorlagen-Konzept bei städtischen und regionalen Dienstplanungsproblemen effizient ähnliche und kosteneffiziente Dienstpläne berechnet werden können ohne groß die entwickelten Methoden zur „Standard-Dienstplanung“ ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung ändern zu müssen. Allerdings bleibt noch die Frage offen, wie ähnlich Dienstpläne zueinander werden können, wenn ein Referenzplan für das Erstellen ähnlicher Dienstpläne für mehr als einen Tag genutzt werden soll.

Bahnverkehr

[Huisman, 2007] schlägt einen anderen Ansatz für das (im Voraus geplante) Rescheduling von Diensten im Bahnverkehr vor. Er beschreibt dies für die Planung bei NS, dem größten Passagierbeförderungsunternehmen im Bahnverkehr in den Niederlanden. Bei NS wird in zwei Schritten geplant. Im ersten Schritt werden Dienstpläne erstellt, die für das gesamte Jahr gültig sind, also für einen generellen Montag, für einen generellen Dienstag etc. Im zweiten Schritt werden dann die generellen Pläne

¹ Gefordert sind 32, 38 oder 40 ähnliche Dienste.

² Gefordert sind 170, 180, 187 oder 188 ähnliche Dienste.

für spezifische Tage angepasst, wenn z.B. bekannt ist, dass Servicefahrten aufgrund von Wartungsarbeiten auf der Strecke ausfallen.

Das Dienst-Rescheduling-Problem wird als Set-Covering-Problem modelliert, in welchem alle originalen Dienste von mindestens einem neuen ähnlichen Dienst ersetzt werden sollen und alle Aufgaben des modifizierten Fahrplans kostenminimal abzudecken sind. Gelöst wird das Modell mit einer Heuristik basierend auf Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation, wobei die Abdeckung aller Fahrten relaxiert wird.

Das Ähnlichkeitsziel besteht dabei dann darin, falls möglich Referenzdienste bzw. die Dienststücke der Referenzdienste zu nutzen. Dazu werden alle möglichen Dienststücke und sogenannte „Look-Alike“-Dienste enumeriert. Bei Look-Alike Diensten werden ungültige Dienststücke, d.h. Dienststücke, die mindestens eine entfallene Fahrt enthalten, so durch andere Dienststücke ersetzt, dass Start-/Endort des Dienstes weiterhin dem Originaldienst entsprechen und die Start-/Endzeit nur gering im Vergleich zum Original variiert. Im Pricing werden dann entweder Dienste aus der Menge der Look-Alike-Dienste ausgewählt und zum Master-Problem hinzugefügt. Oder für eine bestimmte Anzahl Original-Dienste wird versucht, neue Dienste zu erstellen über Dienstgenerierungsnetzwerke basierend auf den enumerierten Dienststücken. Eine zulässige ganzzahlige Lösung wird mit einer Set-Covering-Heuristik ermittelt.

Präsentiert werden Testergebnisse zu zwei realen Instanzen. Getestet wurde auf einem Pentium IV 3.0 GHz mit 512 MB Hauptspeicher. Von ursprünglich 5.683 Fahrten und 7.740 Fahrten entfallen in den Szenarien 6,2% (355) bzw. 10,6% (827). Bei der ersten Instanz sind von den Änderungen 12,2% (72) der 586 Originaldienste betroffen und mit dem vorgestellten Ansatz können beim Rescheduling 87,4% (512) der Referenzdienste komplett erhalten bleiben. Lediglich 12,6% (74) müssen modifiziert werden, 0,7% (4) neue zusätzliche Dienste sind notwendig und 8 der bereit stehenden Ersatzdienste werden genutzt. Bei der zweiten Instanz bleiben noch 70,9% (548) der gegebenen 773 Dienste erhalten. Modifiziert werden 29,1% (225) der Dienste, 0,4% (3) zusätzliche Dienste sind notwendig und 16 Ersatzdienste werden genutzt. Das erste Rescheduling-Szenario kann in ca. 9h gelöst werden und das zweite in ca. 16h.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei aus einem (Referenz-)Plan wegfallenden Aufgaben nicht nur die bestehenden Dienste zu modifizieren sind, um die verbleibenden Aufgaben ähnlich und effizient zu bedienen. In beiden Rescheduling-Szenarien kann ein Großteil der Ursprungsdienste erhalten bleiben und vergleichsweise wenige müssen modifiziert werden. Für eine effiziente Bedienung werden aber auch (wenige) zusätzliche neue Dienste benötigt. Szenarien bei denen im Rescheduling mehr Fahrten als im Ausgangsplan zu bedienen sind, sind nicht aufgeführt. Der vorgeschlagene Ansatz

ermöglicht prinzipiell, für jeden Referenzdienst individuell vorzugeben, wie wichtig eine Übernahme dieses Dienstes in einen neuen Plan ist. Des Weiteren wirft er die Frage auf, wie gut die Ergebnisse werden können, wenn im Lösungsprozess nicht alle Dienststücke bzw. Look-Alike-Dienste enumeriert werden können.

Flugverkehr

Soweit bekannt, existiert im Anwendungsfeld des Flugverkehrs kein Ansatz, der (im Voraus) geplantes Rescheduling durchführt. Die in der Literatur vorgestellten Ansätze können als für eine ähnliche Planung weniger geeignete Recovery-Ansätze klassifiziert werden (vgl. Einleitung zu Abschnitt 4.3.1).

4.3.2 Ähnlichkeit für mehrere Tage – Regelmäßigkeit-basierte Ansätze

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modellierungen und Lösungsansätze zielen darauf ab, die Planungsprobleme mehrerer Tage gleichzeitig zu lösen, um ähnliche Lösungen für die unterschiedlichen Planungsprobleme zu ermitteln. Dabei soll eine Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Plänen durch sich wiederholende, regelmäßige Sequenzen von Fahrten- bzw. Aufgaben in den Ressourceneinsatzplänen unterschiedlicher Tage erreicht werden.

ÖPNV

Für den ÖPNV-Bereich existiert in der Literatur kein Ansatz bei welchem mehrere Tage gleichzeitig gelöst werden, um durch regelmäßige Lösungen für unterschiedliche Planungsprobleme ähnliche Pläne zu berechnen. In dieser Arbeit wird dazu ein Ansatz entwickelt, der auch in Teilen in [Amberg et al., 2011] und [Amberg et al., 2012] beschrieben ist. Der Ansatz wird in Abschnitt 9.3 genauer ausgeführt.

Bahnverkehr

[**Borndörfer et al., 2011**] schlagen einen Hypergraph-basierten Ansatz vor, um Zugumläufe und Zugzusammenstellungen zur Bedienung von (Service-)Fahrten unter Berücksichtigung von Regelmäßigkeitsaspekten bilden zu können. Dabei wird ein zyklischer Planungshorizont über eine Woche betrachtet. Fast alle Fahrten eines Tages finden jeden Tag statt.

Basierend auf einem Hypergraphen wird das sogenannte *Vehicle Rotation Planning Problem* als IP-Netzwerkflussmodell aufgestellt. Dabei besteht das Regelmäßigkeits-

ziel darin, Fahrtenpaare nach Möglichkeit jeden Tag gleich in einem Zugumlauf aufeinander folgen zu lassen. Im Hypergraphmodell werden gleiche Verbindungen durch sogenannte regelmäßige Hyperkanten repräsentiert. Diese verbinden aufeinanderfolgende Fahrten an allen Tagen miteinander, an denen diese Fahrten vorkommen. Wird in der Lösung statt einer regelmäßigen Hyperkante eine andere (unregelmäßige) Verbindungskante zwischen den Fahrten genutzt, wird diese Unregelmäßigkeit mit einem konstanten Wert bestraft.

Gelöst wird das Modell mit einem heuristischen Ansatz: Kanten und Knoten für die IP Formulierung des Hypergraphenmodells werden per Column Generation nach [Löbel, 1997] und *Rapid Branching* nach [Weider, 2007] bestimmt. Im Anschluss wird das so generierte Modell mit Cplex 12.2 gelöst.

Der Ansatz wird an 30 realen Instanzen getestet. Die Instanzen haben zwischen 8 und 556 Fahrten, die an bis zu sieben Tagen vorkommen und benötigen zwischen 7 und 230 Fahrzeuge. Informationen über die Regelmäßigkeit der Fahrten werden nicht gegeben. Getestet wird auf Rechnern mit Intel Core 2 Extreme CPU X9650 mit 3 GHz, 6 MB Cache und 16 GB RAM.

Alle Instanzen werden fast optimal gelöst. Der Gap zwischen bester ganzzahliger Lösung und bester unterer Schranke liegt bis auf bei einer Instanz immer unter 1%. Fünf Instanzen können bewiesen optimal gelöst werden. Dabei liegt die Rechenzeit zwischen 16 Sekunden für die einfacheren Instanzen bis zu ca. 20 Stunden für die schwereren.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mit dem Hyperkanten-basiertem Ansatz für zyklische (Bahn-)Umlaufplanungsprobleme Lösungen von sehr guter Qualität (d.h. fast optimal bzw. bewiesen optimal) erreicht werden können. Allerdings werden über die erreichte Regelmäßigkeit der erstellten Zugumläufe keine näheren Angaben gemacht. Generell gilt, dass die Regelmäßigkeit einer Verbindung zwischen aufeinanderfolgenden Fahrten entweder gezielt für alle Tage gilt, an denen die Fahrten vorkommen, oder für keinen. Eine teilweise Ähnlichkeit wird nicht explizit berücksichtigt. Die Autoren betonen daher, dass die Regelmäßigkeitsaspekte noch weiter erforscht werden sollen.

Flugverkehr

[Tajima und Misono, 1997] beschreiben den ersten Ansatz in der Verkehrsliteratur der darauf zielt, durch sich wiederholende (Flug-)Muster ähnliche Pläne für mehrere Tage zu erstellen. Für ein Dienstplanungsproblem im Flugverkehr erstellen sie anonyme, d.h. nicht personenbezogene Dienst-Sequenzen (engl. *Pairings*), die nur aus regelmäßig stattfindenden Flügen bestehen und versuchen heuristisch, unre-

regelmäßig stattfindende Flüge in diese Pairings einzufügen. Die Dauer bzw. Gültigkeit eines Pairing reicht von einem bis zu drei Tagen.

Dabei ist ein Ähnlichkeitsziel nicht direkt formuliert. Die unregelmäßigen Flüge sollen lediglich so mit den regelmäßigen Flügen kombiniert werden, dass die Anzahl der zur Bedienung benötigten Pairings minimiert wird.

Die Heuristik besteht aus fünf Schritten: Im ersten Schritt wird ein Set-Partitioning-Problem mit dem Ziel Minimierung der Pairing-Anzahl über alle 30 Tage für alle unregelmäßigen Flüge mit einem Column Generation-Ansatz gelöst. Das Pricing wird auf Basis vorher enumerierter sogenannter *One-Day-Pairings* durchgeführt, d.h. Pairings, die einen Dienst enthalten. Das Ergebnis sind Pairings, die nur aus unregelmäßigen Flügen bestehen. Im zweiten Schritt werden aus diesen Pairings Sequenzen aus unregelmäßigen Flügen gebildet. Außerdem werden alle möglichen One-Day-Pairings aus regelmäßigen Flügen enumeriert. Falls in einen regelmäßigen Pairing eine der unregelmäßigen Flugsequenzen eingefügt werden könnte, werden die Kosten des regelmäßigen Pairings um einen fixen Wert reduziert, um so das Potenzial auszudrücken, dass gut unregelmäßige Flüge aufgenommen werden können. Auf Basis der so generierten regelmäßigen One-Day-Pairings wird im dritten Schritt ein Set-Partitioning-Problem zur Minimierung der Pairing-Anzahl über drei Tage mit Column Generation gelöst. Das Ergebnis sind regelmäßige Pairings für ein, zwei oder drei Tage. In diese Pairings werden im vierten Schritt unregelmäßige Flugsequenzen eingefügt. Dazu wird ein sogenanntes Multi-Step-Insertion-Vorgehen genutzt, das über einen Graphen abgebildet wird, welcher als Knoten unregelmäßige Flugsequenzen und Pairings enthält, die über Kanten, die die Einfügemöglichkeiten darstellen, verbunden sind. Für alle dann noch übrig gebliebenen unregelmäßigen Flüge wird wie im ersten Schritt ein über 30 Tage formuliertes Set-Partitioning-Problem gelöst, um Pairings zu bilden, die diese Flüge enthalten.

Numerische Ergebnisse sind angegeben für zwei reale Probleminstanzen, die auf einem IBM RS/6000 Modell 990 gelöst werden. Für eine Instanz mit 192x30 regelmäßigen Flügen und 3316 unregelmäßigen Flügen (35% Anteil unregelmäßiger Flüge an den Gesamtflügen) werden in 40 Minuten Rechenzeit Pläne erstellt mit ca. 81% täglich identischer Pairings. Für eine Instanz mit 291x30 regelmäßigen Flügen und 774 unregelmäßigen Flügen (8% Anteil unregelmäßiger Flüge an den Gesamtflügen) sind in den errechneten Plänen mehr als 90% der täglichen Pairings identisch bei 92 Minuten Rechenzeit.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein heuristisches Vorgehen mit wechselseitiger Berücksichtigung von regelmäßigen und unregelmäßigen Flügen auch bei vielen unregelmäßigen Aufgaben bzw. Flügen geeignet ist, Pläne mit einem hohen Grad täglich identi-

scher Pairings zu erstellen – wenn Dienste bzw. One-Day-Pairings enumeriert werden können. Allerdings geben die Autoren keine Informationen über die Höhe der operativen Kosten ihrer berechneten Lösungen, sodass schwer abzuschätzen ist, wie kosteneffizient diese ähnlichen Lösungen sind. Ebenso ist offen, wie die unregelmäßigen Flüge über die betrachteten Tage verteilt sind.

[Klabjan et al., 2001] beschreiben den zweiten Ansatz im Flugverkehr, der Muster aus Flugsequenzen nutzt, um ähnlichere Dienstpläne für mehrere Tage zu berechnen. Dabei wird ein Dienstplanungsproblem über eine Woche im Flugverkehr betrachtet, bei welchem Flüge kostenminimal zu Dienst-Sequenzen (engl. *Pairings*) zugeordnet werden sollen. Als zusätzliches Ziel im mathematischen Modell wird explizit eine Regelmäßigkeit der Pairings gefordert. Ein Pairing kann Flüge von bis zu vier aufeinanderfolgenden Arbeitstagen umfassen.

Die Grundidee des Ansatzes besteht darin, die Flüge in sogenannte *g-Regelmäßigkeitsgruppen* einzuordnen. Eine *g-Regelmäßigkeitsgruppe* enthält die Flüge, die an $g = 4, \dots, 7$ aufeinanderfolgenden Tagen in der Woche wiederholt werden können. Dabei gilt, dass ein regelmäßiger Flug i einer Gruppe g in der betrachteten Woche $g_i \geq g$ mal aufeinanderfolgend stattfindet. Aus den Flügen jeder *g-Regelmäßigkeitsgruppe* können dann Pairings gebildet werden, die über die g Tage gleich sind. Wenn ein Flug nicht in eine der *g-Regelmäßigkeitsgruppen* eingeordnet werden kann, wird dieser Flug als unregelmäßig bezeichnet und in die Gruppe der unregelmäßigen Flüge einsortiert. Für diese Gruppe müssen dann gesondert unregelmäßige Pairings erstellt werden. Die Zuordnung eines Fluges in eine Gruppe wird mit Kosten gewichtet, um einen Trade-Off zwischen Gesamtkosten und Regelmäßigkeit abbilden zu können. Wird ein Flug in die Gruppe mit den unregelmäßigen Flügen einsortiert, wird das in der Zielfunktion des mathematischen Modells entsprechend höher bestraft. Je weniger Flüge dort einsortiert sind, desto regelmäßiger ist der Wochendienstplan.

Das Ähnlichkeitsziel besteht also darin, möglichst viele Flüge in möglichst hohe Regelmäßigkeitsgruppen einzuordnen. Da das Gesamtmodell sehr schwierig zu lösen ist, wird ein approximativer Modellierungs- und Lösungsansatz genutzt.

Getestet wird der heuristische Ansatz auf drei realen Instanzen mit 119, 380 und 492 unterschiedlichen Flügen in einer Woche. Bei der kleinen Instanz finden ca. 76% der Flüge an jedem der sieben Tage statt, ca. 20% an sechs Tagen und ca. 4% an fünf Tagen bei insgesamt 799 Flügen. Bei der mittelgroßen Instanz sind es ca. 72%, 17%, 1%, sowie 10%, die nur an einem Tag bedient werden, sodass insgesamt 2.358 Flüge anfallen. Bei der großen Instanz sind es ca. 67%, 21%, 3%, sowie 9%, womit insgesamt 3.058 Flüge durchzuführen sind. Genutzt werden zwei PC-Cluster mit insgesamt 160

Prozessoren. Das erste Cluster enthält 16 200 MHz Quad Pentium Pro und das zweite 48 300 MHz Dual Pentium II.

Die Lösungen verbessern existierende Lösungen einer Fluglinie sowohl bezüglich der Kosten als auch der Regelmäßigkeit. Die Anzahl der Flüge, die von unregelmäßigen Pairings bedient werden, die nur an 1-3 Tagen genutzt werden, wird halbiert. Für die regelmäßigen Pairings ist ihr Anteil an der Gesamtflugzeit angegeben. Je nach gewählten Ansatz bestehen 30-50% der Flugzeit aus regelmäßigen Pairings, die an 7 Tagen stattfinden, 0-15% aus Pairings für 6 Tage, 35-50% aus Pairings für 5 Tage, 0% aus Pairings für 4 Tage und 15-20% aus Pairings für 1 bis 3 Tage. Die Lösungszeit für die kleine Instanz liegt unter einer Stunde. Die mittelgroße Instanz wird in 10 bzw. 39 Stunden gelöst und die große in 16 bzw. 47 Stunden.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass mit einer Bewertung der Ähnlichkeit durch die Einsortierung von Flügen/Aufgaben in Regelmäßigkeitsgruppen, praxistaugliche ähnliche und kosteneffiziente Dienstpläne erstellt werden können. Allerdings ist dafür auch mit einem approximativen Ansatz ein sehr hoher Rechenaufwand notwendig.

4.3.3 Verwandte Planung für mehrere Tage ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeit

Neben Ansätzen in der Literatur, die mehrere Tage betrachten, um zu den Tagen ähnliche Pläne zu erstellen, gibt es auch Ansätze, die aus anderen Gründen mehrere Planungsprobleme zusammen lösen oder zur Lösungserstellung von mehreren Planungsproblemen ausgehen. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt, da eine effiziente gleichzeitige Betrachtung mehrerer Tage auch für eine effiziente Planung mit Ähnlichkeitszielen für unterschiedliche Tage relevant sein kann.

Bahnverkehr

[Abbink et al., 2007] schlagen für Dienstplanungsprobleme im Bahnverkehr verschiedene iterativ nutzbare Strategien zur Aufteilung von großen Planungsproblemen in mehrere kleinere vor. Aufgeteilt in einfacher zu lösende, kleinere Probleme, sollen so die Dienstplanungsprobleme mehrerer Wochentage gemeinsam gelöst werden.

Beim gemeinsamen Lösen sollen dann bereits Restriktionen aus der Dienstreihenfolgeplanung während der Dienstplanung berücksichtigt werden, sodass idealerweise insgesamt eine bessere Lösung erreicht werden kann als bei einer jeweils einzelnen Betrachtung eines gesamten täglichen Planungsproblems. Beispiele für solche Restriktionen, die dann über die Dienstplanungsprobleme einer Woche statt eines einzelnen Tages beachtet werden, sind die durchschnittliche Dienstlänge, die Anzahl von Nacht-

diensten und eine faire Verteilung der Gesamtarbeit über die verschiedenen Depots, denen Fahrer bzw. Lokführer zugeordnet sind.

Ein weiterer Grund für die Entwicklung von Aufteilungsstrategien ist, dass die eingesetzte Planungssoftware TURNI (siehe [Double-Click s.a.s, 2014]) beim Lösen kleinerer Probleme für z.B. ein (Crew-)Depot bessere Ergebnisse liefert, als bei einer Berücksichtigung aller Depots.

Die Dienstplanungsprobleme sind als Set-Covering-Problem formuliert und werden ggf. um gemeinsame Restriktionen für mehrere Tage erweitert. Aufteilungsstrategien sind eine Aufteilung in die einzelnen Wochentage, eine Aufteilung in Gruppen von Depots, die aufgrund ihrer geographischen Lage oder dem angeschlossenen Liniennetz gemeinsam betrachtet werden, sowie eine Aufteilung der Aufgabenmenge anhand in guten Diensten gemeinsam abgedeckter Aufgaben.

Getestet wurden die Aufteilungsstrategien auf einem Pentium IV, 3 GHz mit 1 GB RAM. Die Laufzeit wurde auf 6x24h beschränkt. Als Beispiel werden Ergebnisse zur einer realen Probleminstanz mit 14.000 Fahrten und 29 Crew-Basen angegeben.

Unter Einsatz aller Aufteilungsstrategien kann die bisher zur Bedienung der Fahrten notwendige Dienstanzahl um 2% verringert werden. Arbeitszeiten oder Kosten werden nicht angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass Zielsetzungen für die Planung mehrerer Tage (hier: Forderungen aus der Dienstreihenfolgeplanung) erreicht werden, wenn das Planungsproblem problemspezifisch aufgeteilt werden kann, und so die gleichzeitig zu bearbeitende Problemgröße verringert wird. Trotz dieser Aufteilung bedarf es zum Lösen der Planungsprobleme für eine Woche aber noch einer langen Rechenzeit (sechs Tage).

[Abbink et al., 2011] stellen einen Algorithmus vor, um die Dienstplanungsprobleme einer Woche im Bahnverkehr gemeinsam statt pro Tag getrennt zu lösen. Damit sollen Dienstrestriktionen für Zugführer und Schaffner berücksichtigt werden, die nicht nur an einem speziellen Tag gültig sind, sondern über eine Woche. Beispielhafte Restriktionen, die Dienste über eine Woche betreffen, sind die durchschnittliche Dienstlänge, z.B. 8h, der Anteil langer Dienste >9h, und eine anteilig gerechte Zuteilung von bevorzugten Fahrten zu verfügbaren Crew-Basen. Dabei wird nicht ein generischer Wochentag betrachtet, der für alle Tage von Montag bis Freitag gilt und für den tatsächlichen Wochentag noch angepasst werden muss, sowie einer für Samstag und einer für Sonntag. Betrachtet wird eine Woche mit sieben (leicht) unterschiedlichen Fahrtenmengen.

Das Dienstplanungsproblem ist als Set-Covering-Problem formuliert und wird mit zusätzlichen Wochenrestriktionen ergänzt. Gelöst wird das Problem mit einer Heu-

ristik, die Lagrange-Relaxation mit Column Generation kombiniert, sowie mit Fixierungstechniken wie das Zusammenfassen aufeinanderfolgender Aufgaben in den Pricing-Netzwerken zur Diensterstellung. Die Dienststellungsnetzwerke werden mit den Aufgaben einer Woche erstellt. Im Lösungsprozess wird aber nur jeweils ein Teil des Gesamtnetzwerkes genutzt, da Pricing-Probleme pro Wochentag gelöst werden.

Beispielhaft sind Ergebnisse für eine nicht näher beschriebene Testinstanz angegeben (Dienstanzahl pro Woche: zwischen 5.000 und 6.000), die auf einem Intel Octo Core (2x 4 Kerne) mit 3,0 GHz und 8 GB RAM berechnet wurden. Die Rechenzeit ist pro Planungsproblem eines Tages auf 30h beschränkt bzw. 7x30h, falls die Tage der Woche gemeinsam geplant werden.

Grundsätzlich können Pläne mit ca. 1% weniger Diensten ermittelt werden, wenn die Probleme einer Woche zusammen statt einzeln gelöst werden und zusätzliche die Woche betreffende Restriktionen zu berücksichtigen sind.³ Werden keine zusätzlichen Restriktionen berücksichtigt, sind die Ergebnisse für eine ganze Woche schlechter als beim tageweisen Lösen einzelner Instanzen. Es werden dann ca. 0,5% mehr Dienste benötigt.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass das Aufstellen eines wöchentlichen Gesamtmodells zu insgesamt besseren Plänen führen kann – wenn wöchentliche Restriktionen zu berücksichtigen sind. Auch wenn das Gesamtmodell für eine Woche aufgestellt ist, lassen sich dabei die Pricing-Probleme effizient pro Wochentag lösen.

Flugverkehr

[Saddoune et al., 2013] beschreiben für die Dienstplanung im Flugverkehr bei Planungsproblemen mit vielen unregelmäßigen Flügen mehrere Möglichkeiten zur Planung. Neben einem typischen heuristischen Drei-Phasen Ansatz (*three-phase approach, 3P*) zur Erstellung von Dienst-Sequenzen (engl. *Pairings*) für einen Monat, wird als Alternative ein sogenannter *Rollender-Horizont Ansatz* (engl. *rolling horizon approach, RH*) vorgestellt. Dabei besteht das Hauptziel nicht darin, regelmäßige Pairings durch sich wiederholende Flugmuster zu erstellen wie in den Ansätzen, die in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurden. Vielmehr ist das Ziel die Erstellung kosteneffizienter Pläne. Indem das monatliche Planungsproblem in sich überlappende Zeitscheiben geteilt wird, die jeweils einzeln gelöst werden, z.B. Zeitscheiben von je 3 Tagen Länge inklusive Überlappung von 1,5 Tagen, sollen kosteneffizientere Dienste erstellt werden können als in den traditionellen drei Phasen⁴.

³ Die Wochenrestriktionen werden auch beim Lösen der tageweisen Probleme gefordert.

⁴ Drei-Phasen Ansatz: In der ersten Phase wird das Dienstplanungsproblem eines typischen Tages gelöst. Die Lösung wird als Startlösung für die zweite Phase verwendet, in welcher ein Planungsproblem für eine typische Woche gelöst wird. Die Lösung der zweiten Phase wird als Input für

Das Dienstplanungsproblem wird dabei grundsätzlich als Set-Partitioning-Problem mit zusätzlichen Restriktionen modelliert, in welchem jeder Flug kostenminimal von einem Pairing bedient werden soll. Je nach gewähltem Ansatz unterscheiden sich lediglich die einbezogenen Flüge, abhängig davon wie das gesamte Planungsproblem in Einzelprobleme zerlegt wird.

Gelöst werden die Einzelprobleme mit einem Column Generation-Ansatz, der über die GENCOL Bibliothek Version 4.5 von [Ad Opt, 2014] realisiert wurde. Die beschränkten Master-Probleme werden dort mit dem primalen Simplex des ILOG Cplex LP Solvers gelöst. Um über die Dualwerte den Zielfunktionswert verbessernde Pairings zu erstellen, werden im Pricing ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme gelöst. Dabei sind beim zum Vergleich aufgeführten 3P-Ansatz die jeweils in der vorherigen Phase berechneten Dienste und Pairings über zusätzliche Kanten in den entsprechenden Pairing-Generierungsnetzwerken abgebildet. Eine Nutzung dieser Kanten wird mit einem Bonuswert versehen, damit diese Kanten bevorzugt im Lösungsprozess ausgewählt werden. So soll durch Wiederverwendung der bereits erstellten Dienste/Pairings die Erstellung regelmäßiger Pairings gefördert werden.

Getestet werden sieben Instanzen, die aus dem Oktober-Flugplan einer Nordamerikanischen Fluglinie abgeleitet wurden. In den Instanzen werden 1.011 bis 7.527 Flüge im monatlichen Problem verplant bzw. 21 bis 206 in einem Tagesproblem und 175 bis 1.637 in einem Wochenproblem. Berücksichtigt werden drei Crew-Basen bei 26-54 Flughäfen/Haltestellen. Für die größte Instanz lässt sich die Frequenz der Flüge einer Woche wie folgt angeben: Ca. 18% wird an einem Tag bedient, ca. 7% an zwei Tagen, ca. 13% an drei Tagen, ca. 2% an vier Tagen, ca. 2% an fünf Tagen, ca. 12% an sechs Tagen und ca. 46% an allen sieben Tagen. Über den Monat verteilt sollen ca. 30% der Flüge nur an einem Tag stattfinden und jeweils ca. 10% an 25 und 26 Tagen. Allerdings decken sich die angegebenen Daten für den Monat nicht mit den angegebenen Instanzengrößen. Eine Angabe über die zeitliche Lage der unregelmäßigen Flüge im Monat oder in der Woche oder am Tag wird nicht gemacht. Getestet wurden die Instanzen auf einem Linux PC mit 2,8 GHz Prozessor.

Bewertet werden die Lösungen, indem der sogenannte *solution fat* gemessen wird, also die Mehrkosten einer Lösung bezogen auf die unvermeidbaren Kosten, die durch die Flüge vorgegeben sind, sowie durch die garantiert bezahlte Mindestzeit je Dienst. Bei den unregelmäßigen Instanzen werden gegenüber dem 3P-Ansatz durch den RH-Ansatz die Mehrkosten um 23-52% reduziert, im Schnitt um 34%. Dabei

die dritte Phase genommen. In der dritten Phase wird ein Planungsproblem über einen Monat gelöst, das die tatsächlichen Flüge der einzelnen Tage enthält. Um regelmäßige Pläne zu bilden, wird dabei jeweils über Bonuswerte versucht, die in der vorangegangenen Phase erstellten Pairings zu erhalten. Dies führt bei unregelmäßigen Flugplänen zu hohen Kosten.

dauert die Berechnung einer Lösung mit dem 3P-Ansatz zwischen ca. 3 Minuten bis ca. 17 Stunden und mit dem RH-Ansatz zwischen ca. 3 Minuten bis ca. 13 Stunden. Im Schnitt ist der RH-Ansatz 28% schneller.

Aus den Ergebnissen wird zum einen deutlich, wie zu viel Regelmäßigkeit bzw. eine ungeeignete Behandlung unregelmäßiger Fahrten bzw. Flüge zu hohen Mehrkosten in den Dienstplänen führen kann. Zum anderen wird gezeigt, dass eine Aufteilung des Gesamtproblems (im RH-Ansatz) Lösungszeit und Lösungsqualität deutlich verbessern kann.

Kapitel 5

Handlungsbedarf und Zielsetzung

Als Hauptzielsetzung dieser Arbeit wurde in Kapitel 1 festgehalten, Regelmäßigkeits- bzw. Ähnlichkeitsaspekte beim Bilden von Ressourceneinsatzplänen für verschiedene Tage in Optimierungsverfahren zur Umlauf- und Dienstbildung zu untersuchen, um die Frage beantworten zu können, ob und mit welchen Modellen und Methoden sich sowohl kosteneffiziente als auch zueinander ähnliche Pläne bestimmen lassen. Wie Kapitel 2 bis 4 gezeigt haben, können entsprechend dem bestehenden Stand der Forschung durch geeignete Modellierungen und leistungsfähige Lösungsverfahren auch praxisnahe Optimierungsprobleme zur kosteneffizienten Umlauf- und Dienstplanung annähernd optimal gelöst werden. Das Lösen der Planungsprobleme erfolgt dabei üblicherweise pro Betriebstag. Wenn die Fahrpläne der Betriebstage sich bereits nur geringfügig voneinander unterscheiden, kann eine tageweise Vorgehensweise allerdings den Effekt haben, dass die Lösungen für die einzelnen Betriebstage stark voneinander abweichen. Da der Einsatz traditioneller Optimierungsmethoden also zu stark unterschiedlichen Ressourceneinsatzplänen führen kann, ergeben sich unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung in Kapitel 4 mehrere Handlungsbedarfe. Diese werden in diesem Kapitel genauer aufgeführt. Ebenso wird eine geeignete Vorgehensweise zur Erfüllung der Handlungsbedarfe abgeleitet.

Handlungsbedarf I – Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten in der Planung (mehrerer Tage)

Obwohl regelmäßige Ressourceneinsatzpläne gemäß der Ausführungen in Abschnitt 2.3 von Relevanz für Verkehrsunternehmen sind, hat der Überblick über den Stand der Forschung in Abschnitt 4.3 dokumentiert, dass unterschiedliche Modellierungs- und Lösungsansätze für eine (kosteneffiziente) Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitsaspekten zur Unterstützung der ÖPNV-Planung bisher kaum erforscht sind. In den verwandten Bereichen der Ressourceneinsatzplanung im Bahn- und im Flugverkehr wurden bisher ebenfalls wenige Ansätze entwickelt, um mit mathematischen Opti-

mierungsmethoden gezielt die Konstruktion ähnlicher (und kosteneffizienter) Ressourceneinsatzpläne für mehrere Tage zu unterstützen.

Tabelle 5.1 stellt die Möglichkeiten zur Unterstützung einer ähnlichen Planung und einer Planung für mehrere Tage in den vorgestellten existierenden Ansätzen vergleichend gegenüber. Der Vergleich erfolgt darüber, ob der *Ähnlichkeitsgrad beeinflussbar* ist (abgekürzt mit „Ähnl. beeinfl.“), ob *partielle Ähnlichkeit* gezielt möglich ist (abgekürzt „Part. Ähnl.“), ob *Umläufe* und/oder *Dienste* betrachtet werden, und ob das Planungsproblem als *Set-Partitioning-Problem* gelöst wird, d.h. ob in der Praxis unübliche Mehrfachbedienungen von Fahrten bzw. Aufgaben vermieden werden. Die Ansätze sind jeweils entsprechend der *Anwendungsdomäne* gekennzeichnet (*O*, *B*, *F* für ÖPNV, Bahnverkehr und Flugverkehr) und dem betrachteten *Planungshorizont* (*T*, *W*, *M* für Tag, Woche und Monat).

	Anwen- dung	Plan.- horizont	Ähnl. beeinfl.	Part. Ähnl.	Um- läufe	Dienste	SPP
[Dallaire et al., 2004]	O	T	+	+	-	+	+
[Steinzen, 2007], [Steinzen et al., 2009]	O	T	-	+	-	+	-
[Steinzen, 2007] ¹	O	T	+	+	-	+	-
[Borndörfer et al., 2012]	O	T	+	+	-	+	+
[Huisman, 2007]	B	T	-	+	-	+	-
[Abbink et al., 2007]	B	W	-	-	-	+	-
[Abbink et al., 2011]	B	W	-	-	-	+	-
[Borndörfer et al., 2011]	B	W	+	-	+	-	+
[Klabjan et al., 2001]	F	W	+	+	-	+	+
[Tajima und Misono, 1997]	F	M	+	+	-	+	+
[Saddoune et al., 2013] 3P ²	F	M	+	-	-	+	+
Kapitel 9ff dieser Arbeit	O	W	+	+	+	+	+

¹ Bi-kriterielle Metaheuristiken

² [Saddoune et al., 2013] beschreiben zwei Ansätze; aufgeführt ist der Drei-Phasen Ansatz (3P) in welchem Ähnlichkeitsziele berücksichtigt sind

Tabelle 5.1: Möglichkeiten zur Konstruktion ähnlicher Pläne in Ansätzen aus der Literatur

Die Übersicht in Tabelle 5.1 zeigt deutlich, dass für die Planung einzelner Tage im ÖPNV zwar Ähnlichkeitskriterien beim Lösen eines Planungsproblems berücksichtigt werden können, wie bei [Dallaire et al., 2004], [Steinzen, 2007] und [Borndörfer et al., 2012]. Für die Planung im ÖPNV existiert aber kein Modellierungs- und Lösungsansatz, der zum Ziel hat, für die Planungsprobleme mehrerer Tage ähnliche Ressourceneinsatzpläne zu erstellen. Dies soll mit dieser Arbeit geleistet werden.

Weiterhin lassen sich in den vorgestellten Ansätzen einige wesentliche Ideen zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten identifizieren, ebenso wie Verbesserungsmöglichkeiten. Die Tabellen 5.2 und 5.3 fassen die identifizierten Potenziale und Grenzen der beschriebenen Ansätze zusammen. Für eine detaillierte Bewertung der einzelnen Ansätze sei auf die jeweiligen Bewertungen in Abschnitt 4.3 verwiesen.

Potenzial	Ansatz
(P1) Quantitative Bewertung von (Un-)Ähnlichkeit über ein Distanzmaß	[Dallaire et al., 2004], [Steinzen, 2007]
(P2) Intuitiv verständliche Bewertung der Distanz als Abweichung in regelmäßigen Fahrtensequenzen	[Steinzen, 2007]
(P3) Bewertung von Ähnlichkeit über die Einsortierung von Fahrten/Aufgaben in sogenannte Regelmäßigkeitsgruppen	[Klabjan et al., 2001]
(P4) (Steuerung der) Ähnlichkeit je vorgegebenem Referenzdienst möglich	[Huisman, 2007], [Borndörfer et al., 2012]
(P5) Verkürzung der Rechenzeit durch Initialisierung des Planungsproblems mit gegebenen Referenzdiensten	[Borndörfer et al., 2012]
(P6) Bewertung der Ähnlichkeit der getesteten Planungsprobleme durch Angabe des Anteils regelmäßiger Fahrten	[Tajima und Misono, 1997], [Klabjan et al., 2001], [Steinzen, 2007], [Huisman, 2007], [Saddoune et al., 2013]

Tabelle 5.2: Potenziale aus Ansätzen in der Literatur für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

Eine wesentliche Idee der in der Literatur beschriebenen Ansätze betrifft die Formulierung und Abbildung eines möglichen Ähnlichkeitsziels in mathematischen Optimierungsmodellen: Als eine Möglichkeit ist z.B. eine quantitative Bewertung über ein Distanzmaß vorgeschlagen, bei welchem Abweichungen in z.B. Fahrtensequenzen gezählt werden (siehe Potenziale P1 und P2 in Tabelle 5.2). Eine andere beschriebene Möglichkeit ist eine Einsortierung (von Fahrten) in sogenannte Regelmäßigkeitsgruppen (P3). Die Einordnung kann dann in der Zielfunktion eines mathematischen Modells entsprechend ihrer Regelmäßigkeit bewertet werden. In den vorgeschlagenen Ansätzen ist es allerdings nicht oder nur sehr schwer möglich, einen möglichen Zielkonflikt zwischen Regelmäßigkeit bzw. Ähnlichkeit und Kosteneffizienz zu steuern (Grenzen G2 und G3 in Tabelle 5.3). In neu entwickelten Ansätzen sollte dies berücksichtigt werden.

Ebenso sollte berücksichtigt werden, neue Regelmäßigkeits-Ansätze nicht allein für eine spezifische Problemstellung in der ÖPNV-Planung zu entwickeln (G1). So soll eine Übertragbarkeit auf die in Abschnitt 2.2 beschriebenen unterschiedlichen Varianten der Umlauf- und Dienstplanung gewährleistet werden.

Die Anwendbarkeit von Ähnlichkeitsansätzen sollte zusätzlich nicht nur anhand von Testrechnungen für die Pläne eines Tages validiert werden (G4), sondern für mehrere. So kann überprüft werden, inwiefern ein Optimum bezüglich Gesamtkosten

Grenze	Ansatz
(G1) Methodik für eine spezielle Problemstellung	[Steinzen, 2007]
(G2) Kein Trade-Off zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit möglich	[Steinzen, 2007]
(G3) Trade-Off zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit schwer steuerbar	[Tajima und Misono, 1997], [Klabjan et al., 2001], [Dallaire et al., 2004], [Saddoune et al., 2013]
(G4) Testergebnisse nur für die Anwendung auf einen Tag	[Steinzen, 2007], [Borndörfer et al., 2012]
(G5) Hoher Rechenaufwand	[Klabjan et al., 2001]
(G6) Unklare Verteilung der unregelmäßigen Aufgaben über einen Tag bei Tests	[Tajima und Misono, 1997], [Klabjan et al., 2001], [Steinzen, 2007], [Borndörfer et al., 2011], [Borndörfer et al., 2012], [Saddoune et al., 2013]

Tabelle 5.3: Grenzen aus Ansätzen in der Literatur zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

und Gesamtähnlichkeit mehrerer Tage erreicht oder verfehlt wird, wie es beispielhaft in Abschnitt 2.4.3 dargestellt wurde.

Sind Referenzdaten bekannt, die zur Orientierung beim Bilden von ähnlichen Plänen genutzt werden können, könnte statt einer Gesamtähnlichkeit für die Dienstpläne zweier oder mehrerer Tage ein anderes Kriterium zur Bestimmung guter Dienstpläne genutzt werden: Wenn es möglich ist, die Ähnlichkeit einzelner Dienste gezielt zu beeinflussen (P4), kann die Ähnlichkeit bestimmter Dienste, die für ein Verkehrsunternehmen besonders wichtig sind, als Optimierungsziel abgebildet werden. Allerdings muss dazu vom Planer festgelegt sein, welche Dienste für mehrere Tage besonders wichtig sind und welche nicht.

Die Testergebnisse der vorgestellten Ansätze haben außerdem gezeigt, dass das Lösen von Planungsproblemen mehrerer Tage mit einem hohen Rechenaufwand und langen Rechenzeiten verbunden ist (G5). Zwar ist die Planung in der Regel nicht zeitkritisch, wie es u.a. beim Störungsmanagement eines Verkehrsunternehmens während der Planausführung der Fall ist (siehe z.B. [Cadarso et al., 2013]). Bei kürzeren Rechenzeiten können zur Planungsunterstützung aber mehr Vorschläge mit z.B. unterschiedlich gewichteten oder unterschiedlich einbezogenen Kosten berechnet werden. Neu entwickelte Ansätze sollten also die zum Lösen der Planungsprobleme notwendige Rechenzeit verkürzen. Dabei kann soweit möglich auch auf bereits vorhandene (Teil-)Pläne zurückgegriffen werden (P5).

Des Weiteren wird bei numerischen Tests der in der Literatur beschriebenen Ansätze mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen zwar oftmals der Anteil der (un)regelmäßigen Fahrten in den berechneten Szenarien aufgeführt (P6), die Verteilung der Fahrten über den Planungszeitraum wird aber nicht dargestellt (G6). Eine solche Darstellung könnte bei der Beurteilung der Lösungsansätze verwendet werden. So ließe sich einschätzen, ob ein Ansatz eher dafür geeignet ist, mit (mehreren) zeitlich begrenzten Unregelmäßigkeiten in den Planungsproblemen umzugehen, oder eher mit Unregelmäßigkeiten, die über den gesamten Planungszeitraum verteilt sind. Für neu entwickelte Ansätze sollte also auch die Verteilung der Unregelmäßigkeiten in den Planungsproblemen aufgeführt werden.

Handlungsbedarf II – Vergleich von Basiskonzepten zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

Neben Potenzialen und Grenzen lassen sich aus den bestehenden Ansätzen zur Ressourceneinsatzplanung mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten zwei Basiskonzepte für eine Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen für mehrere Tage ableiten. Die bestehenden Ansätze mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten wurden bei ihrer Vorstellung in Abschnitt 4.3 in zwei Kategorien eingeteilt: *Referenzplan-* und *Regelmäßigkeits-Ansätze*. Dabei unterscheiden sie sich in der Anzahl der Fahrpläne, die gleichzeitig berücksichtigt werden sollen und der Nutzung von Referenzdaten. Abbildung 5.1 stellt die beiden abgeleiteten Basiskonzepte schematisch da.

- Bei einer *tageweisen Ähnlichkeit mit einem Referenzplan* sind für das Planungsproblem eines Tages die regelmäßigen Fahrten/Aufgaben, sowie die unregelmäßigen Fahrten/Aufgaben des Tages und ein Referenzplan gegeben. Ziel eines solchen Ansatzes ist es dann, pro Tag einen Plan zu erstellen, der ähnlich zur gegebenen Referenz ist.
- Bei einer *tagesübergreifenden Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster* sind die regelmäßigen und unregelmäßigen Fahrten/Aufgaben aller berücksichtigten Tage gegeben. Ziel eines solchen Ansatzes ist es, (Fahrten-)Muster zu finden, die in Plänen von verschiedenen Tagen genutzt werden können. Das Ziel sind also ähnliche Pläne durch sich wiederholende Muster.

Der Vorteil einer tageweisen Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen über einen Referenzplan besteht darin, dass die Planungsprobleme verschiedener Tage für jeden Tag getrennt voneinander gelöst werden können. Die Problemkomplexität wird

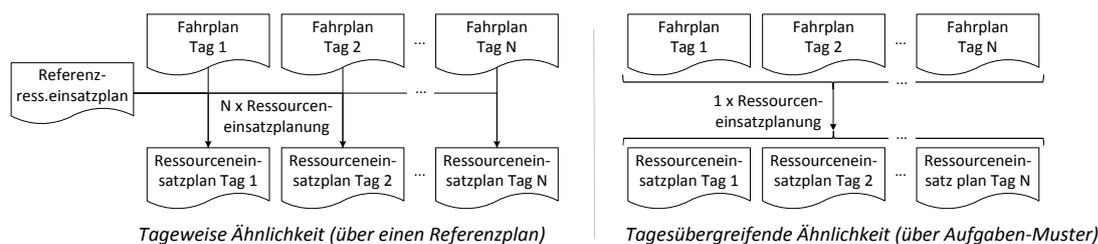


Abbildung 5.1: Tageweise und tagesübergreifende Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

im Vergleich zu klassischen Umlauf- und Dienstplanungsproblemen also nicht zu sehr erhöht. Nachteilig ist, dass bei dieser Planung die Ähnlichkeit der Pläne vom Referenzplan abhängt.

Die mögliche Ähnlichkeit wird nicht durch einen Referenzplan eingeschränkt, wenn die Umlauf- und Dienstplanungsprobleme tagesübergreifend mit einem Ähnlichkeitsziel betrachtet und gleichzeitig gelöst werden. Das gleichzeitige Lösen von Planungsproblemen verschiedener Tage erhöht allerdings die Problemkomplexität. Um Vor- und Nachteile der Konzepte verifizieren zu können, sollten vergleichbare Modelle und Lösungsansätze für beide Konzepte entwickelt werden.

Handlungsbedarf III – Schaffung von Voraussetzungen für den Einsatz einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

Damit Konzepte zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen auch praktisch umsetzbar sind, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Um bei einer Planung mit Ähnlichkeitszielen die Planungsprobleme verschiedener Tage (gleichzeitig) lösen zu können, müssen Optimierungsverfahren existieren, die zumindest die Planprobleme eines einzelnen Tages bereits effizient lösen können. Außerdem sind ähnlich erstellte Pläne für die Praxis nur dann sinnvoll, wenn bei der Planerstellung auch in der Praxis bestehende Regelungen einbezogen werden können und die Pläne somit direkt für den Praxiseinsatz verwendbar sind.

Ein Überblick über die Literatur in den Abschnitten 4.1 und 4.2 zeigt, dass sowohl einige effiziente Optimierungsmethoden für die Planung eines einzelnen Tages existieren, als auch unternehmensspezifische Regeln umgesetzt werden können. Dabei liegt die Vermutung nahe, dass nicht jede Berücksichtigung spezieller unternehmensspezifischer Anforderungen auch veröffentlicht ist. Für die Lösbarkeit praktischer Problemstellungen entscheidend ist neben der Problemgröße (Anzahl Servicefahrten, Endhaltestellen, Depots etc.) aber vor allem die in einem Verkehrsunternehmen durch

Regeln bestimmte Interaktion zwischen Umläufen und Diensten. Da diese Interaktion insbesondere geprägt ist durch die im Unternehmen geltenden Pausenregeln, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten, sollte die Realisierbarkeit unterschiedlicher Ausprägungen solcher Regeln verifiziert werden.

Beiträge der Arbeit und Vorgehen in den weiteren Kapiteln

Die zur Erfüllung der herausgearbeiteten Handlungsbedarfe notwendigen Schritte werden nachfolgend aufgeschlüsselt. Sie stellen die Teil-Ziele bzw. Beiträge dieser Arbeit dar.

Als Voraussetzung für eine praktisch umsetzbare Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen, soll Folgendes beigetragen werden, womit die Lösbarkeit praxisnaher Problemstellungen zur Umlauf- und Dienstplanung verbessert werden kann:

- *Schritt 1 (S1)*: Zur praktischen Anwendbarkeit sollen effiziente Verfahren zur Umlauf- und Dienstbildung in einem Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung realisiert werden. Dabei soll ein Einblick in den Aufbau eines solchen Optimierungssystems gegeben werden (siehe Handlungsbedarf III).
- *Schritt 2 (S2)*: Die Lösbarkeit praxisnaher Problemstellungen hängt unter anderem davon ab, ob und wie sich unternehmensspezifische Regeln modellieren lassen. Daher soll die Berücksichtigung spezieller unternehmensspezifischer Regeln in effizienten Verfahren zur Umlauf- und Dienstbildung exemplarisch an einen Modellierungs- und Lösungsansatz gezeigt werden (siehe Handlungsbedarf III).

Für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen (im ÖPNV) sollen folgende Beiträge geleistet werden:

- *Schritt 3 (S3)*: Da die Auffassung von Ähnlichkeit verschiedener Fahrpläne bzw. verschiedener Ressourceneinsatzpläne in der Praxis sehr betriebs- und planerspezifisch sein kann, sollen allgemeingültige Möglichkeiten zur Bewertung der Ähnlichkeit in Planungsproblemen vorgeschlagen werden. Diese sollen die Planung durch eine generelle Ähnlichkeitsbewertung geeignet unterstützen können (siehe Handlungsbedarf I).
- *Schritt 4 (S4)*: Da für die Ressourceneinsatzplanung im ÖPNV kein Ansatz existiert, der kosteneffiziente und ähnliche Umlauf- und Dienstpläne für mehrere Tage zum Ziel hat, sollen Modelle und Methoden entwickelt werden, die

dies berücksichtigen. Dabei soll zusätzlich der Zielkonflikt zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit durch Vorgabe von Parametern steuerbar sein (siehe Handlungsbedarf I).

- *Schritt 5 (S5)*: Da zwei grundlegende Konzepte zur Planung mit Ähnlichkeitszielen denkbar sind (tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan und tagesübergreifende Ähnlichkeit durch sich wiederholende Muster), sollen Modelle und Lösungsverfahren für beide Konzepte entwickelt werden, um diese miteinander vergleichen zu können. Dabei soll der Vergleich erfolgen, hinsichtlich ihrer Eignung kosteneffiziente und ähnliche Ressourceneinsatzpläne für mehrere Tage zu erstellen und bezüglich des notwendigen Rechenaufwands (siehe Handlungsbedarf II).
- *Schritt 6 (S6)*: Um geeignet vergleichen zu können, sollen die entwickelten Modelle und Lösungsverfahren zur Planung mit Ähnlichkeitszielen für die Varianten der Umlauf- und Dienstplanung in einem Optimierungssystem umgesetzt werden (siehe Handlungsbedarf I+II).

Aufbau der weiteren Ausarbeitung

Der Aufbau der weiteren Arbeit ist entsprechend der formulierten Schritte wie folgt: In *Teil II* der Arbeit werden *Schritte S1* und *S2* durchgeführt. Mit der Lösbarkeit von einzelnen Optimierungsproblemen ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten wird so die Voraussetzung für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen geschaffen. Anschließend erfolgen in *Teil III* konzeptionelle Beiträge zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen, die die *Schritte S3, S4* und *S5* realisieren. Aufbauend auf den Konzepten, umfasst *Teil IV* die Realisierung von *Schritt S6* und somit die Einbettung der konzipierten Ansätze in das entwickelte Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Planungsvarianten einer sequenziellen, einer teilintegrierten und einer vollständig integrierten Umlauf- und Dienstplanung.

Teil II

Lösbarkeit einzelner Ressourceneinsatzplanungsprobleme ohne fahrplanübergreifende Optimierung

Kapitel 6

Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung

Grundlegende Voraussetzung für eine fahrplanübergreifende Planung mehrerer Tage ist die Fähigkeit, effizient Problemstellungen zur traditionellen Umlauf- und Dienstplanung für einen Tag lösen zu können. In diesem Kapitel wird daher entsprechend Schritt S1 aus Kapitel 5 das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Optimierungssystem zur (traditionellen) Umlauf- und Dienstplanung in seinen Grundzügen erläutert. Die eingesetzten Modelle und Methoden bilden die Basis für die in den späteren Kapiteln vorgeschlagene Ressourceneinsatzplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten.

In Abschnitt 6.1 wird zunächst die modelltechnische und methodische Grundlage für das entwickelte Optimierungssystem *MDIVCS-Opt (Multiple Depot (Integrated) Vehicle and Crew Scheduling - Optimizer)* vorgestellt. Für weitere Details zu grundlegend eingesetzten Modellen und Methoden sei auf die Ausführungen in [Steinzen, 2007], [Steinzen et al., 2010] und [Kliwer et al., 2012] verwiesen. Abschnitt 6.2 gibt einen Überblick über die einzelnen Module des in C# implementierten und mit dem .NET Framework Version 2.0.5027 SP2 kompilierten Optimierungssystems. Abschnitt 6.3 fasst das Kapitel kurz zusammen.

6.1 Modelltechnische und methodische Grundlage

Mit dem Verständnis über eine integrierte Modellierung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems und einen integriertem Lösungsansatz lassen sich auch entsprechende Ansätze zur sequenziellen und teilintegrierten Planung verstehen, da diese als Unterprobleme im integrierten Ansatz behandelt werden können. Die grundlegende integrierte Modellierung und der grundlegende integrierte Lösungsansatz sollen daher kurz in Abschnitt 6.1.1 und in Abschnitt 6.1.2 vorgestellt werden.

6.1.1 Modellierung

Zur Fundierung des Verständnisses wird zunächst der Modellierungsansatz zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung von [Gintner, 2008] genauer erläutert, auf welchem diese Arbeit in Teilen aufbaut. Der Ansatz basiert auf einer Formulierung des Umlaufplanungsproblems als Mehrgüter-Fluss-Problem in einem Time-Space-Netzwerk, in welchem jede Servicefahrt genau einmal bedient werden muss. Das Umlaufplanungsproblem wird mit der Dienstplanung gekoppelt, indem verlangt wird, dass die in der Umlaufplanung genutzten Fahrzeugaktivitäten entsprechend von Fahrern durchgeführt werden, d.h. in Diensten enthalten sind. Dabei ist das Dienstplanungsproblem als Set-Partitioning-Problem formuliert, in welchem jede Fahrzeugaktivität als Dienstelement von genau einem Dienst abzudecken ist.

Für eine detaillierte Herleitung des mathematischen Modells aus der Time-Space-Netzwerk-Formulierung des Umlaufplanungsproblems sei auf [Gintner, 2008] bzw. [Steinzen, 2007] verwiesen. Die nachfolgende zusammenfassende Darstellung erfolgt in Anlehnung an [Gintner, 2008] und [Kliwer et al., 2012].

Für den als Mehrgüter-Fluss-Problem formulierten Umlaufplanungsteil wird für jedes Depot (d.h. für jede Betriebshof-Fahrzeugtyp-Kombination) ein Netzwerk in einer Netzwerkschicht angelegt. Jedes Netzwerk bzw. jede Schicht enthält mögliche Fahrzeugaktivitäten wie Servicefahrten, Aus- und Einrückfahrten, Verbindungsfahrten und Warten abgebildet als Kanten zwischen Time-Space-Knoten. Jeder Time-Space-Knoten stellt mögliche Ankünfte oder Abfahrten an bzw. von einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. Dabei liegen Knoten mit gleicher Ortsrepräsentation auf einer gemeinsamen Zeitleiste bzw. Zeitlinie. Die Orte werden je Netzwerkschicht durch die (End-)Haltestellen und das entsprechende Depot vorgegeben. Ankünfte und Abfahrten an einer Haltestelle bzw. dem Depot werden durch *Wartekanten* miteinander verbunden, die die Wartezeit zwischen den Ereignissen repräsentiert. Servicefahrten werden als *Servicefahrtekanten* abgebildet, die die entsprechende Abfahrt an der Starthaltestelle der Servicefahrt mit der Ankunft an der Endhaltestelle der Servicefahrt verbinden. In jeder Netzwerkschicht sind nur die Servicefahrten abgebildet, die von den Fahrzeugen des entsprechenden Depots bedient werden können. Gruppen kompatibler Servicefahrten an unterschiedlichen Haltestellen werden durch Kanten miteinander verbunden, die Leerfahrtmöglichkeiten repräsentieren (*Verbindungsfahrtekanten*) (siehe z.B. Abbildung 3.1 in Abschnitt 3.1.2 als Beispiel für eine solche Netzwerkrepräsentation). Je Netzwerkschicht werden mögliche Fahrten vom bzw. zum Depot durch Aus- und Einrückkanten abgebildet. *Ausrückkanten* verbinden Abfahrten von der jeweiligen Depot-Zeitlinie mit den Startpunkten der Servicefahr-

ten. *Einrückkanten* verbinden die Endpunkte der Servicefahrten mit entsprechenden Ankünften an der jeweiligen Depot-Zeitlinie.

Der letzte Knoten jeder Depot-Zeitlinie wird jeweils durch eine *Zirkulationsflusskante* mit dem ersten Knoten auf dieser Zeitlinie verbunden. In diesem gerichteten azyklischem Time-Space-Netzwerk entspricht also jeder Pfad vom ersten bis zum letzten Knoten auf der Depot-Zeitlinie einem Fahrzeugumlauf.

Kostenwerte auf den Kanten repräsentieren fixe Kosten sowie beim Fahrzeugeinsatz anfallende variable Kosten. Dabei werden die fixen Kosten eines Fahrzeugs auf der Zirkulationsflusskante abgebildet. Die anderen Kanten erhalten Werte für die variablen Kosten, die von der operativen Einsatzzeit eines Fahrzeugs und/oder von den zu leistenden Fahrt-Kilometern abhängen.

Die in den Netzwerken durch Kanten repräsentierten Aktivitäten der Fahrzeuge beschreiben gleichzeitig Teile des Dienstplanungsproblems. So ist für jede Fahrzeugaktivität außerhalb des Depots ein Fahrer notwendig, der diese Aktivität bedient.

Das integrierte Modell zur Umlauf- und Dienstplanung kann für die Annahmen aus Abschnitt 4.1.4 mathematisch wie folgt beschrieben werden. Sei $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, m\}$ die Menge aller Depots und sei $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge aller zu bedienenden Servicefahrten eines Tages. Die Menge der Servicefahrten, die von Fahrzeugen aus Depot $d \in \mathcal{D}$ durchgeführt werden können, sei durch \mathcal{T}^d definiert. Für jedes Depot d wird ein Umlaufplanungsnetzwerk $G^d = (N^d, A^d)$ definiert, das wie oben beschrieben aufgebaut ist und die Knotenmenge N^d und die Kantenmenge A^d enthält. Die Menge aller Kanten, die Aktivitäten darstellen, die sowohl ein Fahrzeug als auch einen Fahrer erfordern, sei durch $\tilde{A}^d \subset A^d$ definiert. \tilde{A}^d umfasst also alle Kanten außer den Wartekanten auf der Zeitlinie eines Depots d und der Zirkulationsflusskante. Sei $A^d(t) : \mathcal{T} \rightarrow A^d$ eine Funktion, die für Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ und Depot $d \in \mathcal{D}$ die zugehörige Servicefahrtskante $(i, j) \in A^d$ liefert. Kann t nicht aus Depot d bedient werden, dann ist $A^d(t) = \emptyset$.

Jeder Kante $(i, j) \in A^d$ werden Fahrzeugkosten c_{ij}^d zugeordnet. Wenn (i, j) die Zirkulationsflusskante ist, erhält sie fixe Fahrzeugkosten, die bei einem Einsatz eines Fahrzeuges aus Depot d anfallen. Alle anderen Kanten (i, j) erhalten variable Fahrzeugkosten, die sich aus Fahr- oder Wartezeit der durch die jeweilige Kante beschriebenen Aktivität ableiten. Die maximale Flusskapazität u_{ij}^d auf einer Kante $(i, j) \in A^d$ wird in der Grundversion für alle Aus-/Einrückfahrtskanten und Servicefahrtskanten auf 1 gesetzt und entspricht für alle anderen Kanten der maximal pro Depot d verfügbaren Fahrzeuganzahl u^d .

Zusätzlich werden zwei verschiedene Arten von Entscheidungsvariablen definiert: Flussvariablen und Dienstvariablen. Ganzzahlige Flussvariablen y_{ij}^d für jede Kante

$(i, j) \in A^d$ geben an, inwiefern ein Fluss über Kante (i, j) verläuft. Dabei entspricht jede Flusseinheit einem Fahrzeug, das die durch Kante (i, j) beschriebene Aktivität ausführt. Binäre Entscheidungsvariablen x_k^d mit $k \in K^d$ und zugehörigen Kosten f_k^d geben an, ob Dienst k für Depot $d \in \mathcal{D}$ ausgewählt wird oder nicht. Dabei sei K^d die Menge aller gültigen Dienste, die von Depot d aus durchgeführt werden können. Des Weiteren sei $K^d(i, j) \subset K^d$ die Menge aller Dienste, die das Dienstelement enthalten, das durch Kante $(i, j) \in \tilde{A}^d$ beschrieben ist. Das *integrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit mehreren Depots* (engl. *multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling problem, MD-IVCSP*) kann dann wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d \rightarrow \min \quad (6.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (6.2)$$

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (6.3)$$

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (6.4)$$

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (6.5)$$

$$x_k^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (6.6)$$

Mit der Zielfunktion (6.1) werden die Fahrzeug- und Dienstkosten minimiert. Die Nebenbedingungen (6.2)-(6.3) entsprechen der Mehrgüter-Fluss-Formulierung für das Umlaufplanungsproblem und stellen einen gültigen Umlaufplan sicher. Dabei garantieren die Nebenbedingungen (6.2), dass jede Fahrgastfahrt von genau einem Fahrzeug aus einem Depot bedient wird. Die Nebenbedingungen (6.3) stellen sicher, dass an jedem Knoten Flusserhaltung gilt. Für die korrekte Kopplung von Umlauf- und Dienstplan sorgen Nebenbedingungen (6.4): Für jede Kante, die von einem Fahrzeug(fluss) abgedeckt wird, muss das zugehörige Dienstelement in ebenso vielen Diensten enthalten sein. Dabei müssen die Dienste dem Depot zugeordnet sein, aus dem auch das jeweilige Fahrzeug stammt. Durch Nebenbedingungen (6.5) wird das maximale Flussvolumen auf den Kanten eingehalten.

Jede zulässige Lösung für das MD-IVCSP besteht aus einer Flusslösung auf den Umlaufplanungsnetzwerken und einer dazu passenden Menge ausgewählter Dienste. Dabei repräsentiert eine Lösung der Mehrgüter-Fluss-Formulierung (6.2)-(6.3) mehrere gültige bestmögliche Umlaufpläne. Um aus der Flusslösung einen Umlaufplan zu erhalten, muss die Lösung so in Pfade zerlegt werden, dass jeder Pfad einem

Fahrzeugumlauf entspricht. Dabei ist zu beachten, dass diese Pfade aufgrund der Time-Space-Formulierung nicht zwangsläufig disjunkt sind, und daher gemeinsame Knoten und/oder Kanten enthalten können. [Gintner, 2008] leitet daher durch eine geeignete Dekomposition des Netzwerkflusses einen eindeutigen Umlaufplan ab, der zum gefundenen Dienstplan kompatibel ist.

6.1.2 Lösungsansatz

Als Lösungsansatz für Modell (6.1)-(6.6) (MD-IVCSP) schlagen [Gintner, 2008] und [Steinzen, 2007] basierend auf den Überlegungen von [Freling, 1997] und [Huisman, 2004] ein zwei-phasiges Vorgehen vor. Dabei wird Column Generation und Lagrange-Relaxation kombiniert. Algorithmus 6.1.1 fasst das vorgeschlagene Vorgehen beim Lösen von Modell MD-IVCSP zusammen. Für Details zu den in den einzelnen Schritten verwendeten Verfahren sei auf [Gintner, 2008] und [Steinzen, 2007] verwiesen. Eine kurze Darstellung erfolgt in Anlehnung an die beiden Autoren, sowie die Ausführungen in [Kliewer et al., 2012].

Um für das Column Generation-Verfahren eine initiale Spaltenmenge zu erzeugen, wird zunächst sequenziell eine Lösung für das gegebene Umlauf- und Dienstplanungsproblem bestimmt (Schritt 1). Das Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem (MDVSP) wird mit Hilfe eines Standard-MIP-Solvers gelöst. Für die so pro Depot(-Fahrzeugtyp-Kombination) bestimmten Umlaufpläne werden anschließend entsprechende Dienstplanungsprobleme (CSP) gelöst, ebenfalls mit einem Column Generation-Verfahren.

Die erste Phase des Algorithmus, der Hauptteil des Lösungsverfahrens, besteht darin, eine untere Schranke zur optimalen Lösung durch Kombination von Column Generation und Lagrange-Relaxation zu berechnen (Schritt 2-5). Dazu werden im Modell MD-IVCSP Kopplungsbedingungen (6.4), sowie Fahrtenabdeckungsbedingungen (6.2) relaxiert und mit einem Lagrange-Multiplikator gewichtet in die Zielfunktion aufgenommen. Dadurch zerfällt das ursprüngliche Problem in zwei Teile: einen Umlaufplanungsteil, in welchem je Depot ein Eindepot-Umlaufplanungsproblem in polynomieller Zeit gelöst werden kann, sowie einen einfach zu lösenden Dienstplanungsteil, in welchem jeder Dienst mit negativen reduzierten Kosten in die Lösung gewählt werden kann. Umlaufplanungs- und Dienstplanungsteil sind dadurch miteinander verbunden, dass inkompatible Umlauf- und Dienstplanungslösungen in der Zielfunktion entsprechend durch die jeweiligen Lagrange-Multiplikatoren bestraft werden. Zur Bestimmung der bestmöglichen Lagrange-Multiplikatoren/Dualwerte für die aktuelle Spaltenmenge wird das mit assoziierte Lagrange-Duale-Problem mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst (vgl. Abschnitt 3.2.1). Dabei werden die Multiplika-

Algorithmus 6.1.1 : Lösungsschema für Modell MD-IVCSP (6.1)-(6.6)

- (Schritt 1) **Initialisierung**
 Löse MDVSP und danach CSP für jede Depot-Fahrzeugtyp-Kombination.
 Nimm Dienste aus CSP Lösung als initiale Spaltenmenge K' .
 Setze $i = 0$.
- (Schritt 2) **Löse (beschränktes) Master-Problem**
 Löse Lagrange-Dual-Problem mit aktueller Spaltenmenge K' .
 Speichere untere Schranke z_{LB} für aktuelle Spaltenmenge und Dualwerte.
- (Schritt 3) **Löse Pricing-Problem**
 Erstelle neue Spalten/Dienste K'' mit negativen reduzierten Kosten.
 Falls $|K''| = 0$ gehe zu Schritt 6.
- (Schritt 4) **Führe Spaltenmanagement durch**
 Füge neue Spalten zum Master hinzu: $K' := K' \cup K''$.
 Falls $|K'| \geq K_{\max}$ lösche Spalten mit hohen positiven reduzierten Kosten von K' .
- (Schritt 5) **Prüfe Abbruchkriterien**
 Gehe zu Schritt 6, falls eins folgender Kriterien erfüllt ist:
 $i \geq i_{\max}$
 Keine signifikante Verbesserung von z_{LB}
 Andernfalls setze $i = i + 1$ und gehe zu Schritt 2.
- (Schritt 6) **Bestimme eine zulässige Lösung**
 Erstelle zulässigen Umlauf- und Dienstplan mit einer Lagrange-Heuristik.
-

toren in der ersten Column Generation-Iteration mit Null initialisiert und ansonsten mit den Werten aus der vorherigen Iteration.

Zur Verbesserung der unteren Schranke werden mit Hilfe der Dualwerte im Pricing-Problem neue Spalten bzw. Dienste gesucht. Diese werden durch Lösen von ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen in Dienstgenerierungsnetzwerken bestimmt. [Steinzen, 2007] bzw. [Steinzen et al., 2010] verwenden dazu ein zweigeteiltes Pricing-Verfahren, in welchem zunächst Dienststücke generiert werden, die dann als Elemente in den Netzwerken zur Diensterstellung genutzt werden.

In der zweiten Phase wird mit Hilfe einer Lagrange-Heuristik eine zulässige Lösung bestimmt (Schritt 6). Die Heuristik geht ähnlich einer sequenziellen Planung von Umläufen und Diensten vor. Zunächst werden nur noch Kopplungsbedingungen (6.4) von Modell MD-IVCSP Lagrange-relaxiert. Im Gegensatz zur ersten Phase entspricht das Umlaufplanungsunterproblem keinem einfach zu lösendem Eindepot-Umlaufpla-

nungsproblem mehr, sondern einem Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem. Das Lagrange-Duale-Problem wird wie in der ersten Phase mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst, mit dem Unterschied, dass eben pro Iteration statt mehrerer SDVSPs ein MDVSP gelöst werden muss. Die Konvergenz des Verfahrens kann aber dadurch verbessert werden, dass das Subgradienten-Verfahren mit den zuletzt in der ersten Phase berechneten Lagrange-Multiplikatoren initialisiert wird. Zu den (in jeder Iteration) berechneten zulässigen Umlaufplänen können dann sequenziell Dienstpläne durch Lösen der entsprechenden Dienstplanungsprobleme bestimmt werden. Nach Beendigung des Subgradienten-Verfahrens wird dann für eine bestimmte Anzahl der zuletzt berechneten Umlaufpläne ein zulässiger und kompatibler Dienstplan berechnet. Die kostenbewertungsmäßig beste Kombination aus Umlaufplan und Dienstplan bildet schließlich die finale Lösung des ursprünglich gegebenen integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblems. Statt basierend auf Umlaufplänen, können die Dienstpläne auch zu den Flusslösungen des Mehrdepot-Umlaufplanungsproblems ermittelt werden. Eine solche teilintegrierte Vorgehensweise im Sinne von [Gintner, 2008] (siehe auch Abschnitt 4.1.3) führt nach [Gintner, 2008] und [Steinzen, 2007] zu einer besseren Lösungsqualität im Vergleich zu einer sequenziellen Planung.

6.2 Basis-Column-Generation-Framework

Mit den modelltechnischen und methodischen Grundlagen aus Abschnitt 6.1 im Hintergrund lässt sich ein flexibles Optimierungssystem für verschiedene Fragestellungen der Umlauf- und Dienstplanung entwickeln. Abbildung 6.1 fasst die einzelnen Module des entstandenen Optimierungssystems schematisch zusammen. Den Input des Systems bilden der Fahrplan eines bestimmten Betriebstages, u.a. mit seinen zu bedienenden Servicefahrten, möglichen Ablösepunkten und Pausenorten, sowie der bei der Dienstbildung zu berücksichtigende Regelmenge, die neben den den Dienstplan betreffenden Regeln größtenteils über eine Vielzahl von Parametern je Diensttyp-Schichttyp-Kombination übergeben wird. Als Output soll ein Umlaufplan und ein dazu kompatibler Dienstplan ermittelt werden.

Abhängig von der ausgewählten bzw. der während des Lösungsverlaufs genutzten Planungsmethode werden die Modelle zur Umlauf- und Dienstplanung aufgestellt. Ausgangspunkt dafür ist die entsprechende Netzwerkrepräsentation des Umlaufplanungsproblems, von der sich Aufgaben für das Dienstplanungsproblem ableiten lassen. Abschnitt 6.2.1 geht auf einige Details zur Netzwerkmodellierung bei Umläufen und bei Diensten ein.

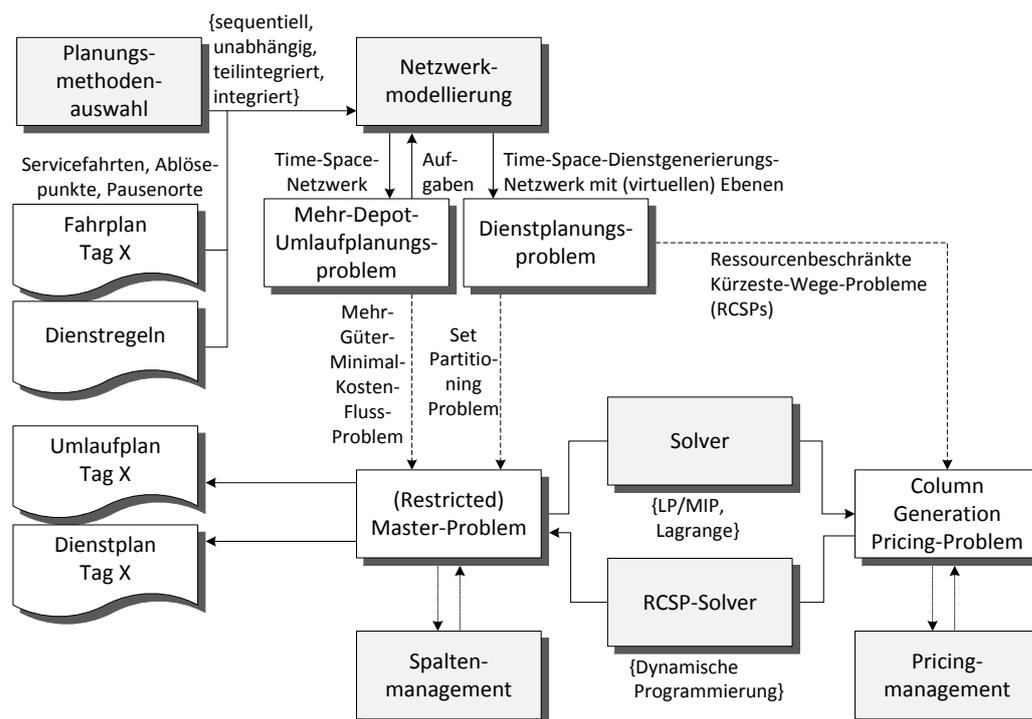


Abbildung 6.1: Schematische Übersicht über MDIVCS-Opt als Beispiel für ein System zur Umlauf- und Dienstplanoptimierung

Da die Anzahl möglicher Umläufe und möglicher Dienste schon für kleine Problemstellungen zu groß ist, um alle möglichen zu enumerieren, werden die Problemstellungen mit Hilfe von Column Generation gelöst, wodurch implizit alle möglichen Dienste (und gegebenenfalls auch alle Umläufe) berücksichtigt werden können. Dabei können neben LP-relaxierten Problemstellungen, auch Lagrange-relaxierte Formulierungen gelöst werden, z.B. bei integrierten Planungsproblemen. Abschnitt 6.2.2 beschreibt das Solver-Modul für (beschränkte) Master-Probleme im Hinblick auf die Lösung von Lagrange-relaxierten Problemstellungen. Das für das (beschränkte) Master-Problem notwendige Spaltenmanagement wird in Abschnitt 6.2.3 überblicksartig dargestellt.

Unterschiedliche Pricing-Probleme werden durch den RCSP-Solver gelöst, dessen grundlegende Funktionsweise in Abschnitt 6.2.4 zusammengefasst erläutert wird. Dabei wird das Lösen der Pricing-Probleme im Pricing-Management koordiniert, wozu in Abschnitt 6.2.5 einige Funktionalitäten beschrieben sind.

Wie generell zur gegebenen Problemstellung ganzzahlige bzw. zulässige Umlauf- und Dienstpläne ermittelt werden, wird in Abschnitt 6.2.6 kurz dargestellt.

6.2.1 Netzwerkepräsentation der zu planenden Ressourcen

Umläufe sind durch Flüsse/Pfade in einem Time-Space-Netzwerk definiert, welches basierend auf Fahrten aufgebaut ist (vgl. Abschnitt 6.1.1). Dienste sind ebenfalls als Pfade in einer Time-Space-Netzwerkstruktur abgebildet. Statt auf Fahrten basieren hier die Netzwerkkomponenten auf Dienstelement-Abschnitten, also auf allen möglichen von einem Fahrer zu leistenden Aufgaben, die sich aus Aktivitäten mit einem Fahrzeug ergeben (vgl. dazu die Definitionen aus Abschnitt 2.1.2).

Fahrten-basierte Time-Space-Netzwerke für Umläufe

Die Definition des Umlaufplanungsproblems als Mehr-Güter-Minimaler-Kostenfluss-Problem auf einem TSN hat den Vorteil, dass eine Flusslösung implizit mehrere Umlaufpläne liefert. So kann ein finaler Umlaufplan nach Kriterien gewählt werden, die am besten zu einem ermittelten Dienstplan passen. Dies kann unter anderem bei der in dieser Arbeit untersuchten Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten in der (Umlauf- und Dienst-)Planung sinnvoll sein, wenn aus einer Menge kostentechnisch gleichwertiger Pläne ein Plan mit besonders guten Ähnlichkeitseigenschaften identifiziert werden sollte. Dieser Gedanke wird in den späteren Kapiteln 10, 11 und 12 detailliert aufgegriffen.

In der Netzwerkepräsentation des Umlaufplanungsproblems sind bei erweiterten Problemstellungen im Vergleich zur in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Grundversion einige Änderungen notwendig. Einige wesentliche werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Kantenkapazitäten. In der Grundversion beträgt die maximale Flusskapazität u_{ij}^d auf einer Kante $(i, j) \in A^d$ für Servicefahrt- und Aus- bzw. Einrückkanten 1. Diese Kapazitätsbeschränkung gilt nur, falls pro Endhaltestelle und Zeitpunkt maximal eine Servicefahrt starten kann. Im allgemeinen Fall können an der gleichen Haltestelle mehrere Servicefahrten zum gleichen Zeitpunkt starten. Daher wird die Flusskapazität einer Ausrückkante auf die Anzahl der vom Endknoten der Kante ausgehenden Servicefahrten gesetzt. Analoges gilt für Einrückkanten.

Zeitintervallabhängige Kosten. Die Dauer für die Ausführung von Leerfahrten (Ausrücken, Einrücken, Verbindungsfahrt) kann tageszeitabhängig sein, insbesondere bedingt durch das Verkehrsaufkommen. Zu Tageszeiten mit hohem Verkehrsaufkommen sollten längere Zeiten bzw. höhere Kosten für die Durchführung einer Leerfahrt eingeplant werden, als zu Tageszeiten mit niedrigerem Verkehrsaufkommen. Im

Netzwerkmodell können also z.B. zwei mit kurzen Abstand nacheinander endende Servicefahrten an einer Haltestelle nicht immer aggregiert über eine Verbindungskante mit startenden Servicefahrten an einer anderen Haltestelle verbunden werden. Vielmehr muss bei Gruppen miteinander verknüpfbarer Fahrten für jedes Zeitintervall geprüft werden, ob eine zusätzliche Verbindungskante eingefügt werden muss. So wird der Vorteil einer TSN-Modellierung vergleichsweise sehr wenige Leerfahrtskanten im Modell betrachten zu müssen, ein wenig eingeschränkt. Abbildung 6.2 gibt ein Beispiel für die Verknüpfung zwischen kompatiblen Servicefahrten zweier Haltestellen, bei denen die Verknüpfung über Verbindungsfahrten unterschiedlicher Länge realisiert wird, um unterschiedliche für die Dienstplanung relevante Zeiten abbilden zu können, wie z.B. Zeiten für die Durchführung einer Leerfahrt und gegebenenfalls pausenfähige Wartezeiten.

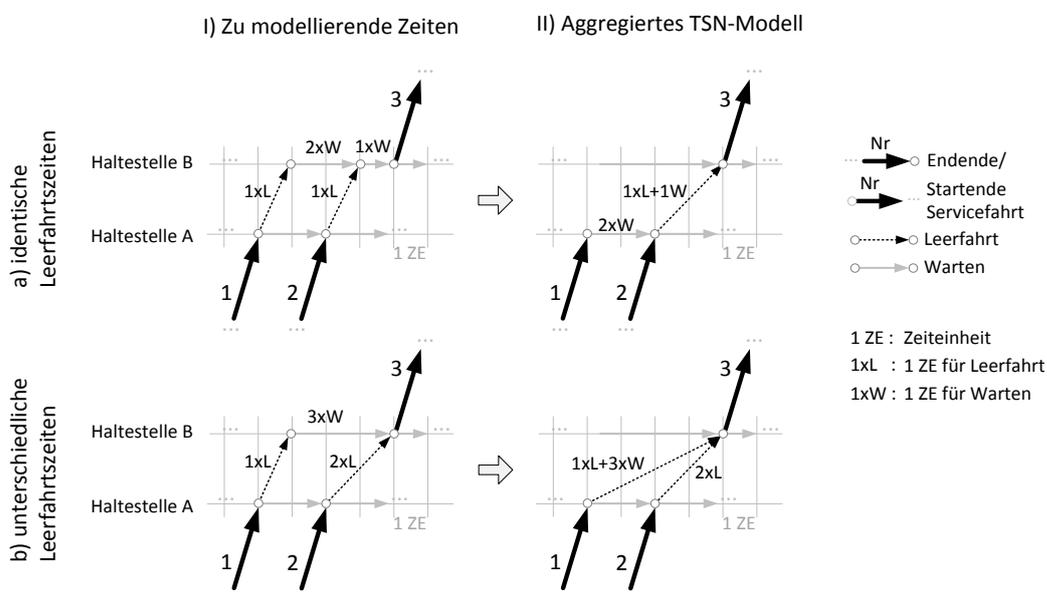


Abbildung 6.2: Durch unterschiedliche tageszeitabhängige Leerfahrten notwendige zusätzliche Modellierung von Verbindungskanten im Vergleich zu einer Modellierung mit identischen Leerfahrtszeiten

Verkürzung bei Mindestwartezeiten. Bei der Bedienung von Servicefahrten können bestimmte Mindest-Aufenthaltszeiten an der Endhaltestelle nach Beendigung der Servicefahrt gefordert sein (siehe Layover time, Abschnitt 4.2.1). Diese Mindest-Aufenthaltszeit muss nicht zwangsläufig eingehalten werden, wenn das Fahrzeug nach Bedienung der Fahrt ins Depot einrücken soll. Im Netzwerkmodell sind die Servicefahrten abgebildet mit ihrer ursprünglichen Dauer zuzüglich einer Mindest-Aufent-

haltszeit nach Beendigung der Fahrt. Die Dauer der mit dem Ende der Servicefahrt assoziierte Pull-In-/Einrückfahrt-Kante wird dementsprechend um die Mindest-Aufenthaltszeit der Servicefahrt reduziert. Analog kann auch eine Mindest-Aufenthaltszeit vor Beginn der Fahrt gelten.

Dienstelement-Abschnitt basierte Time-Space-Dienstgenerierungsnetzwerke mit (virtuellen) Ebenen

Analog zur Netzwerkrepräsentation von Umläufen basierend auf Fahrten sind die Netzwerkmodelle zur Dienstgenerierung basierend auf aus Fahrten ableitbaren Aufgaben aufgebaut. [Kliewer et al., 2012] zeigen, dass es bei größeren Planungsproblemen sinnvoll sein kann, zur Dienstgenerierung Netzwerkmodelle zu verwenden, die auf einzelnen Aufgaben bzw. Dienstelementen statt auf Dienststücken basieren. So kann durch den Einsatz von heuristischen Techniken die Rechenzeit zum Lösen der assoziierten ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme reduziert werden, ohne dass im Vergleich zu einer zweigeteilten Dienstgenerierung (d.h. erst werden Dienststücke erstellt, darauf aufbauend dann Dienste) relevant von der erreichbaren Lösungsqualität abgewichen wird.

Außerdem kann eine Diensterstellung basierend auf Dienstelementen statt auf Basis von Dienststücken vorteilhaft für eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten sein: Wenn für die Planungsprobleme unterschiedlicher Tage die Dienste so erstellt werden sollen, dass verschiedene Dienste ähnliche Aufgabensequenzen enthalten, kann dies kleinschrittiger in Dienstelement-basierten Netzwerken realisiert werden, statt einer zweischrittigen Betrachtung von Sequenzen zunächst nur in Dienststücken und erst in einem zweiten Schritt beim Bilden der Dienste.

Zur Dienstgenerierung werden daher Netzwerkmodelle genutzt, die aus Dienstelement-Abschnitten aufgebaut sind (Dienstelement-Abschnitte, siehe Abschnitt 2.1.2). Im Gegensatz zur verwandten Modellierung in [Kliewer et al., 2012], in welcher das Netzwerk noch in Ebenen aufgeteilt ist, die explizit einzelne mögliche Dienststücke repräsentieren, werden die Ebenen in dieser Modellierung allerdings nur virtuell betrachtet. Bei einer Netzwerkmodellierung mit explizit modellierten Ebenen wiederholen sich einzelne Netzwerkabschnitte und der Speicherbedarf für die Netzwerkmodelle steigt. Um den Speicherbedarf zu verringern und so mehrere Dienstgenerierungen (auf Mehr-Kern/Thread-Rechnern) gleichzeitig durchführen zu können, werden Ebenen daher rein virtuell beim Lösen der mit den Netzwerken assoziierten ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen genutzt. (Teil-)Dienste werden dann je nach bereits enthaltener Dienststückanzahl auf unterschiedlichen Ebenen durch das Netzwerk aufgebaut (siehe auch Abschnitt 6.2.4).

Dabei besteht in für jeden Diensttyp bzw. jede Diensttyp-Schichttyp-Kombination t definierten Dienstgenerierungsnetzwerk $G^t = (N^t, A^t)$ die Knotenmenge N^t aus einem Quellknoten, einem Senkeknoten und *Ereignisknoten*, die Anfang oder Ende eines Dienstelement-Abschnittes darstellen. Einige dieser Ereignisknoten stellen Ablösepunkte für einen Fahrer dar, abhängig davon, ob die vom Knoten repräsentierte Zeit-Ort-Kombination eine Ablösemöglichkeit bietet. Abschnitt 7.1 greift die Berücksichtigung von Ablösemöglichkeiten für Fahrer in den Modellen zur Dienstgenerierung noch einmal ausführlicher auf. Die Kantenmenge A^t besteht aus vier Kantentypen: *Aufrüst-, Abrüst-, Dienstelement-Abschnitt-* und *Pausenkanten* (engl. *sign-on-, sign-off-, task-section-, and break-edges*).

- *Aufrüstkanten* repräsentieren den Beginn eines Dienstes. Sie verbinden den Quellknoten mit Ereignisknoten, die eine Ablösemöglichkeit beschreiben.
- *Abrüstkanten* bilden analog das Ende eines Dienstes ab. Sie verbinden Ereignisknoten die Ablösepunkte darstellen, mit dem Senkeknoten.
- *Dienstelement-Abschnitt-Kanten* stellen Aufgaben eines Fahrers auf einem Fahrzeug dar. Die Aufgaben ergeben sich aus den Fahrzeugaktivitäten (also aus Servicefahrten und Teilfahrten, Leerfahrten, sowie Warten bzw. Standzeiten). Die Kanten verbinden die Ereignisknoten miteinander, die Anfang und Ende einer solchen Aktivität repräsentieren.
- *Pausenkanten* modellieren Pausen zwischen Dienststücken. Da Dienststücke im Dienstelement-Abschnitt basierendem Netzwerk nur implizit abgebildet sind, verbinden die Kanten Ereignisknoten miteinander, die potenziell Ende und Beginn eines Dienststücks, d.h. Beginn und Ende einer Pause beschreiben können: Pausenkanten verbinden die Knoten miteinander, die zeitlich mindestens so weit auseinander liegen, wie die vom Diensttyp vorgegebene Pausenlänge. Zusätzlich können auf den Kanten dabei noch Zeiten für den Transfer eines Fahrers zu oder von einem bestimmten Ort z.B. per Fußweg oder als Passagier in einem anderen Fahrzeug berücksichtigt werden. Solche Kanten werden dann als *Transfer-* bzw. *Transfer-Pausenkanten* bezeichnet. Für Unterschiede in der Modellierung von Pausen in Abhängigkeit von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten sei auf die späteren Ausführungen in Abschnitt 7.1 verwiesen.

Über die Kanten lassen sich bereits einige Restriktionen, die die Zulässigkeit eines Dienstes betreffen, strukturell im Netzwerk abbilden. Z.B. lassen sich Zeitfenster für Start und Ende eines Dienstes über Aufrüst- und Abrüstkanten zu bzw. von Knoten realisieren, deren Zeitrepräsentation im entsprechenden erlaubtem Zeitraum liegt.

Neben der strukturellen Abbildung von Restriktionen zur Dienstbildung können in der Regel viele weitere Restriktionen über Ressourcenverbräuche modelliert werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Tabelle 6.1 fasst die wesentlichen Ressourcenverbräuche zusammen, die auf den Kanten der genutzten Dienstgenerierungsnetzwerke abgebildet sind. Die dadurch formulierten Optimierungsprobleme zur Dienstgenerierung können dann als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme gelöst werden (siehe auch später Abschnitt 6.2.4).

Typ der Kante $(i, j) \in A^t$	Kosten	AZ	LZ	DZ	WZ	#Service	#Dh	#Dienststücke
Aufrüsten	$F^t + l_{ij}v^t$	l_{ij}	0	l_{ij}	0	0	0	0
Abrüsten	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	0	l_{ij}	0	0	0	1
DA Service	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	$lot(i, j)$	1	0	0
DA Ausrücken	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	$lot(i, j)$	0	0	0
DA Einrücken	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	0	0	0	0
DA Verb.fahrt	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	$lot(i, j)$	0	1	0
DA Warten	$l_{ij}v^t$	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	l_{ij}	0	0	0
Pause	$l_{ij}b^t$	0	0	l_{ij}	l_{ij}	0	0	1
Pause+Transfer	$l_{ij}b^t$ $+t(i, j)v^t$	$t(i, j)$	0	l_{ij}	$l_{ij} - t(i, j)$	0	0	1

Tabelle 6.1: Generelle Ressourcenverbräuche auf den Kanten im Dienstelement-Abschnitt basierten Time-Space-Dienstgenerierungsnetzwerk

In der tabellarischen Übersicht bezeichnet F^t die Fixkosten von Dienstyp t , v^t die variablen (Arbeitszeit-)Kosten pro Minute, b^t die variablen Pausenzeitkosten pro Minute und l_{ij} die Länge bzw. Dauer der Kante $(i, j) \in A^t$ in Minuten. Als auf den einzelnen Kanten abgebildete Zeiten sind angegeben die Arbeitszeit *AZ*, die Lenkzeit *LZ*, die Dienstdauer bzw. Dienstzeit *DZ* und evtl. pausenfähige Wendezeiten bzw. Wartezeiten *WZ*. Weitere Zeiten auf den Kanten sind gegeben durch die (evtl. pausenfähigen) Aufenthaltszeiten $lot(i, j)$ am Ende einer Service- oder Leerfahrt zwischen den Orten, die durch die Knoten i und j repräsentiert sind, sowie eine mögliche Transferzeit $t(i, j)$. Kanten die Dienstelement-Abschnitte repräsentieren sind in Tabelle 6.1 mit *DA* abgekürzt. Damit eine diensttypspezifische Anzahl an minimalen und maximalen Dienststücken eingehalten werden kann, wird im Modell zur Überprüfung dieser Restriktionen eine Ressource *#Dienststücke* genutzt. Um zu gewährleisten, dass nur Dienste mit Dienststücken erstellt werden, in denen mindestens eine Servicefahrt bedient wird, ist noch eine zusätzliche Ressource *#Service* zur Überprüfung der Servicefahrtenanzahl notwendig. Außerdem sollten in einem Dienst Leerfahrten bzw. Verbindungsfahrten nur nach Durchführung einer Servicefahrt genutzt werden, um zwei aufeinanderfolgende Leerfahrten beim Erstellen eines Dienstes zu vermeiden. Statt zwei Leerfahrten zu nutzen, um zu einer Haltestelle zu gelangen, sollte in

einem Dienst jeweils nur die direkte Verbindung genutzt werden, was den Aufwand zur Berechnung zulässiger Dienste reduzieren kann; eine Ausnahme bilden dabei die Leerfahrten von und zu Pausenorten, zwischen denen keine Servicefahrt liegen muss. Dazu wird die Ressource $\#Dh$ eingefügt, mit welcher gezählt werden kann, ob aktuell bereits eine Leerfahrt absolviert ist. Die Tabelle führt den Ressourcenverbrauch für den generellen Fall von explizit modellierten Pausen durch Pausenkanten auf. Sind Pausen implizit modelliert, kann z.B. die Dienststückanzahl nicht mehr über Pausenkanten bestimmt werden, sondern muss über den kumulierten Verbrauch der Ressource Wartezeit ermittelt werden (siehe auch später in Abschnitt 7.1.2).

6.2.2 Lösen von Master-Problemen mit Lagrange-Relaxation

Werden oben beschriebene Netzwerkrepräsentationen im Kontext von Column Generation-Verfahren eingesetzt, sind u.a. auf den Kanten statt der Kostenbewertungen die reduzierten Kosten zur Bestimmung zielfunktionswertverbessernder Ressourceneinsätze abgebildet. Die zur Bestimmung notwendigen Dualwerte werden dann durch Lösen des entsprechenden (beschränkten) Master-Problems ermittelt. Neben dem Einsatz von LP-Solvern beim Lösen einer linear relaxierten Formulierung des Master-Problems, können auch Lagrange-relaxierte Formulierungen gelöst werden. Zur Ermittlung der Dualwerte/Lagrange-Multiplikatoren wird das entsprechende Lagrange-Duale-Problem dann mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst. Für Details zum Einsatz eines Subgradienten-Verfahrens sei z.B. auf [Steinzen et al., 2010] verwiesen und auf die grundlegende Beschreibung in Abschnitt 3.2.1.

Für die Berechnung mit Hilfe des eingesetzten Subgradienten-Verfahrens muss eine obere Schranke, also eine zulässige Lösung, bekannt sein. Da die Berechnung einer oberen Schranke sehr aufwändig sein kann, wird diese statt für jede Iteration des Subgradienten-Verfahrens nur zu wenigen Column Generation Iterationen ermittelt. Statt statisch in bestimmten Iterationszyklen eine obere Schranke zu berechnen, kann die Konvergenz des Gesamtverfahrens verbessert werden, wenn die Berechnung dynamisch in Abhängigkeit der Berechnung der unteren Schranke erfolgt. Hat sich die untere Schranke in einer bestimmten Anzahl Iterationen nur zu einem bestimmten Anteil verbessert, wird versucht, eine neue obere Schranke zu bestimmen. Dies sollte allerdings davon abhängig gemacht werden, wie aufwändig die Berechnung einer (guten) oberen Schranke ist, da sonst ein möglicher Laufzeitvorteil durch die zur Berechnung notwendigen Zeit egalisiert wird.

Falls während der Bestimmung einer oberen Schranke Ressourceneinsätze generiert werden, die nicht Teil des (beschränkten) Master-Problems sind (z.B. Dienste, um die Kompatibilität zu einem ermittelten Umlaufplan sicherzustellen), werden diese

als neue Spalten zum (beschränkten) Master-Problem hinzugefügt. Dadurch ist die obere Schranke gültig für die aktuelle Spaltenmenge.

6.2.3 Spalten-Management

Das Spalten-Management verwaltet sowohl die Spalten, die aktuell beim Lösen des (beschränkten) Master-Problem genutzt werden können, als auch ungenutzte (z.B. vordefinierte) Spalten in einem sogenannten *Column Pool*. Auf diesen Pool kann im Pricing zurückgegriffen werden (siehe auch Abschnitt 6.2.5).

Die Hauptaufgabe besteht darin, die jeweils im (beschränkten) Master-Problem betrachtete Spaltenmenge nicht zu groß werden zu lassen, um eine gute Lösbarkeit der LP- oder Lagrange-relaxierte Problemstellungen zu ermöglichen, d.h. eine Lösung in möglichst wenig Rechenzeit. So wird ab einer bestimmten Anzahl Spalten, ein bestimmter Anteil mit hohen reduzierten Kosten aus dem (beschränkten) Master-Problem entfernt. Dabei werden nur Spalten entfernt, die nicht Bestandteil der aktuell oberen Schranke der Problemstellung ist, sodass Set-Partitioning-Formulierungen stets lösbar bleiben.

Des Weiteren koordiniert das Spalten-Management den Zugriff auf problemspezifische Charakteristika aus der „Realwelt“. So wird (über Spalten-IDs) auf Informationen zu Spalten zurückgegriffen, d.h. Diensten (oder auch Umläufen), die nicht im mathematischen Modell hinterlegt sind. Dies können z.B. bei der Ausgabe des Dienstplans benötigte Informationen zu Pausen-, Vor- und Nachbereitungszeiten sein.

6.2.4 Lösen von Column Generation Pricing-Problemen als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege- Probleme mit Dynamischer Programmierung

Die Pricing-Probleme zur Bestimmung neuer Spalten bzw. Ressourceneinsätze sind wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme formuliert. Gelöst werden diese mit einem *Label Setting* Algorithmus auf Basis Dynamischer Programmierung nach [Desrosiers et al., 1995]. Grundsätzlich werden also Kosten und Ressourcenverbräuche von (Teil-)Pfad über die Knoten des Netzwerkes propagiert, indem sogenannte (nicht dominierte) *Label* bzw. *States* genutzt werden. Diese fassen Informationen über den bis zu einem Knoten propagierten (Teil-)Pfad zusammen. Da die Anzahl möglicher (Teil-)Pfade zu groß ist, um alle betrachten bzw. im Speicher abbilden zu können, wird der Algorithmus mit einigen einfachen Beschleunigungstechniken ergänzt. Für Beispiele zu Beschleunigungstechniken sei auf [Steinzen,

2007] verwiesen. Zwar schränken diese den Suchraum teilweise künstlich ein, sogenanntes *Partial Pricing*, aber die Ergebnisse zeigen, dass trotz dieser Einschränkungen gute Resultate erzielt werden können.

Eine Beschleunigungstechnik besteht darin, *dominierte* Label an den Knoten nicht weiter zu propagieren. Sei $l \in L_i$ ein Label aus der Menge aller Label an Knoten i , seien $\bar{f}(l)$ die kumulierten reduzierten Kosten dieses (Teil-)Pfades, sei V die Menge der betrachteten Ressourcen(verbräuche) und beschreibe $d^v(l)$ den kumulierten Verbrauch des Labels je Ressource $v \in V$. Dann dominiert Label l_1 Label l_2 mit $l_1, l_2 \in L_i$, wenn gilt $\bar{f}(l_1) < \bar{f}(l_2)$ und $d^v(l_1)$ ist besser, d.h. je nach Ressource „<“ oder „>“, als $d^v(l_2)$ für alle in den Dominanztest einbezogenen Ressourcen $v \in V' \subseteq V$. Sinnvollerweise werden nur die Label miteinander verglichen, die vergleichbare Ressourceneinsätze repräsentieren, da sonst weniger fortgeschrittene Label/(Teil-)Pfade andere dominieren könnten, die bereits einen fast vollständigen zulässigen Ressourceneinsatz beschreiben. Bei Label, die (Teil-)Dienste repräsentieren, können dies z.B. diejenigen sein, die bereits die gleiche Anzahl Pausen enthalten oder den gleichen Startort oder andere Kriterien identisch erfüllen. Welche Ressourcen geeigneterweise in einen Dominanztest einbezogen werden sollten, wird in unterschiedlichen Stufen in mehreren *Dominanztestleveln* festgelegt. Unterschiedlich exakte Dominanztestlevel beim Lösen von integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen basierend auf TSN-Modellen werden z.B. von [Steinzen, 2007] und [Kliwer et al., 2012] beschrieben.

Eine weitere effektive Technik ist, die Anzahl an einem Knoten berücksichtigter (Teil-)Pfade bzw. States künstlich zu begrenzen (siehe dazu Ergebnisse bei [Kliwer et al., 2012]). Dazu werden an jedem Knoten jeweils nur die $k \in \mathbb{N}$ besten (nicht dominierten) States betrachtet.

Damit beim Speichern und Weiterleiten der k besten States bzw. Label nicht nur ähnliche Ressourceneinsätze (Dienste oder Umläufe) erstellt werden, kann an jedem Knoten diversifiziert werden. Dazu werden die Label zunächst mit einem *Label Categorizing-Verfahren* an den Knoten gemäß ihrer vorher besuchten Kanten kategorisiert. Gespeichert und weitergeleitet werden dann nicht diejenigen Label mit den besten reduzierten Kosten, sondern die Anzahl wird gleichmäßig über die verschiedenen Kategorien verteilt. Ein ähnliches Verfahren zur Diversifikation wird auch von [Dück, 2010] eingesetzt. Die Kategorisierung ist zwar vergleichsweise speicherintensiv. Die Konvergenz des Column Generation-Verfahrens beim Einsatz heuristischer Lösungstechniken kann dadurch aber so verbessert werden, dass insgesamt bessere Lösungen erreicht werden können.

Tabelle 6.2 zeigt dies exemplarisch für eine teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanung auf künstlichen und realen Instanzen. Zur Berechnung wurde ein Sony Vaio

SVS1513Z9EB genutzt mit Intel Core i7-3632QM @ 2,20 GHz und 8 GB RAM, sowie Windows 8 Professional. Diese Rechnerkonfiguration wird auch für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit verwendet, sofern nicht explizit eine andere Konfiguration angegeben ist. LP-Relaxation und MIP werden mit ILOG Cplex in der Version 12.2.0.2 gelöst, wobei die Interior-Point bzw. Barrier-Methode zur Lösung der LP-Relaxationen verwendet wird. Soll die LP-Relaxation im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baums heuristisch mit Column Generation gelöst werden, wird das Verfahren gestoppt, wenn 1) keine neuen Spalten mit negativen reduzierten Kosten mehr gefunden werden, oder 2) die Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb der letzten 15 Iterationen weniger als 0,1% beträgt, oder 3) eine Verbesserung des Zielfunktionswertes mit den neu gefundenen Spalten von weniger als 0,5% erwartet wird. Im exakten Fall gilt nur Abbruchkriterium 1. In den Pricing-Problemen werden im exakten Fall an jedem Knoten alle möglichen States betrachtet. Je Diensttyp-Schichttyp-Depot-Kombinationen werden pro Column Generation Iteration maximal 20.000 Spalten mit negativen reduzierten Kosten zum (beschränkten) Master-Problem hinzugefügt. Im heuristischen Fall ist die je Knoten zugelassene State-Anzahl unterschiedlich begrenzt. Zusätzlich wird im heuristischen Fall das Label Categorizing statisch und dynamisch eingesetzt. Spalte k in Tabelle 6.2 zeigt die Anzahl erlaubter States pro Knoten in den ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen zur Diensterstellung an, mit $k = \infty$ im exakten Fall. Spalte LC gibt die erste Column Generation Iteration an, in welcher Label Categorizing eingesetzt wird (– bei einem Wert größer als 1 ist dieser Einsatz dynamisch in Abhängigkeit der Dominanztestlevel; Label Categorizing wird dann im exakten Dominanztestlevel eingesetzt), Spalte $\#It$ die Anzahl benötigter Column Generation-Iterationen bis zur Bestimmung einer ganzzahligen Lösung. Des weiteren sind angegeben die Gesamtrechenzeit für das Lösen der Pricing-Probleme (Cpu_Pr), des Master-Problems (Cpu_Ma) und zur Berechnung einer ganzzahligen Lösung (Cpu_IP), sowie die Anzahl erzeugter Spalten ($\#cols$), der finale Zielfunktionswert der LP-Relaxation bzw. die untere Schranke (LB), der Zielfunktionswert der ganzzahligen Lösung (UB) und der prozentuale Unterschied der ermittelten Lösung im Vergleich zum exakten Fall ($\Delta\%$).

Tabelle 6.2 zeigt, dass bei einer heuristischen Lösung der Pricing-Probleme durch Beschränkung der States-Anzahl in der Regel Ergebnisse erzielt werden können, die nur gering von optimalen Ergebnissen abweichen. Die Ergebnisse können in kürzerer Laufzeit ermittelt werden, sodass sich der mit der Beschränkung der States einhergehende Sortieraufwand im Pricing insgesamt lohnt. Eine zusätzliche Diversifikation der beschränkten States im Pricing benötigt zwar zusätzliche Rechenzeit sowohl im Pricing selbst, als auch beim Lösen der (beschränkten) Master-Probleme, da dann mehr

k	LC	#It	Cpu_Pr	Cpu_Ma	Cpu_IP	#cols	LB	UB	$\Delta\%$
<i>Künstliche Instanz mit 400 Servicefahrten und 979 Aufgaben/Zeilen</i>									
∞	–	23	00:00:16	00:00:11	00:00:04	83.766	161.237	161.237	–
400	–	19	00:00:17	00:00:08	00:00:09	80.666	161.237	161.237	+0,000
200	–	17	00:00:12	00:00:06	00:00:04	76.864	161.237	161.237	+0,000
100	–	20	00:00:12	00:00:07	00:00:04	77.852	161.237	161.237	+0,000
50	–	19	00:00:08	00:00:05	00:00:08	65.752	161.237	161.237	+0,000
400	1	16	00:00:14	00:00:05	00:00:04	82.816	161.237	161.237	+0,000
200	1	16	00:00:12	00:00:04	00:00:04	82.816	161.237	161.237	+0,000
100	1	16	00:00:11	00:00:05	00:00:04	82.816	161.237	161.237	+0,000
50	1	16	00:00:12	00:00:07	00:00:04	82.816	161.237	161.237	+0,000
<i>Künstliche Instanz mit 640 Servicefahrten und 1.456 Aufgaben/Zeilen</i>									
∞	–	194	00:15:55	00:24:47	00:00:44	362.933	311.611	311.611	–
400	–	31	00:01:47	00:02:42	00:03:32	229.135	312.003	312.046	+0,001
200	–	29	00:01:07	00:02:47	00:02:31	230.686	312.003	312.021	+0,001
100	–	31	00:00:42	00:03:13	00:01:04	220.317	312.041	312.156	+0,002
50	–	39	00:00:26	00:04:00	00:01:22	191.240	312.103	312.166	+0,002
400	1	32	00:02:54	00:03:27	00:00:48	269.422	311.611	311.611	+0,000
200	1	32	00:02:52	00:03:26	00:00:49	269.422	311.611	311.611	+0,000
100	1	32	00:02:48	00:03:29	00:00:49	269.422	311.611	311.611	+0,000
50	1	32	00:02:46	00:03:36	00:00:49	269.422	311.611	311.611	+0,000
400	27	32	00:02:54	00:03:15	00:00:31	254.751	311.611	311.611	+0,000
200	25	29	00:02:52	00:02:44	00:00:52	263.632	311.611	311.611	+0,000
100	25	29	00:02:07	00:03:02	00:00:27	268.218	311.611	311.611	+0,000
50	34	38	00:02:13	00:03:32	00:00:22	202.709	311.611	311.611	+0,000
<i>Reale Instanz mit 580 Servicefahrten und 1.296 Aufgaben/Zeilen</i>									
∞	–	96	00:15:38	00:15:56	00:02:21	572.490	122.731	122.734	–
400	–	25	00:03:43	00:01:43	00:01:01	308.322	123.349	123.364	+0,005
200	–	25	00:01:20	00:01:44	00:00:41	280.070	123.349	123.364	+0,005
100	–	26	00:00:49	00:01:42	00:01:22	286.204	123.349	123.364	+0,005
50	–	34	00:00:22	00:02:11	00:02:12	231.557	123.582	124.704	+0,016
400	1	33	00:05:13	00:03:29	00:01:03	428.176	122.731	122.734	+0,000
200	1	33	00:05:12	00:03:26	00:01:06	428.176	122.731	122.734	+0,000
100	1	33	00:05:02	00:03:59	00:00:55	428.176	122.731	122.734	+0,000
50	1	33	00:05:22	00:03:18	00:01:06	428.176	122.731	122.734	+0,000
400	23	28	00:07:01	00:02:02	00:00:44	330.768	122.731	122.734	+0,000
200	23	30	00:06:05	00:02:16	00:00:48	342.292	122.731	122.734	+0,000
100	22	33	00:06:55	00:03:17	00:01:13	405.089	122.731	122.734	+0,000
50	24	32	00:04:04	00:02:01	00:00:56	361.695	122.731	122.734	+0,000

Tabelle 6.2: Unterschiede von heuristischer Lösung der Pricing-Probleme zu exakter Lösung

Spalten erzeugt werden, die zu den Master-Problemen hinzugefügt werden können. Durch diese Diversifikation kann die Lösungsqualität aber noch weiter verbessert werden. Dabei bleibt die notwendige Rechenzeit (bei Beschränkung auf wenige States) stabil, da die States-Anzahl bei genutztem Label Categorizing keine feste Grenze darstellt: Sind an einem Knoten im Netzwerk mehr Kategorien vorhanden, als States erlaubt sind, wird mindestens der beste State jeder Kategorie im Netzwerk weiterpropagiert. Einen guten Kompromiss aus Lösungsqualität und benötigter Rechenzeit bildet dann das Nutzen einer geringen States-Anzahl bei dynamischem Label Categorizing.

6.2.5 Pricing-Management

Das Pricing-Management koordiniert die Lösung der Pricing-Probleme in unterschiedlicher Weise und trägt insbesondere dazu bei, die zum Lösen der Problemstellung benötigte Rechenzeit zu verkürzen. Einige wesentliche Aufgaben werden im Folgenden vorgestellt.

Steuerung der RCSP-Parameter. Beim Lösen der ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung im Column Generation-Pricing wird nicht der Dienst mit den besten (negativen) reduzierten Kosten gesucht (*Dantzig-Pricing*), sondern es werden zur Beschleunigung der Konvergenz des Column Generation-Verfahrens mehrere sehr gute gesucht (*Multiple-Pricing*). [Steinzen, 2007] beschreibt eine vergleichbare Erfahrung, was die Performanz des eingesetzten Column Generation-Verfahrens betrifft. Dabei bestimmt je Pricing-Problem, d.h. je (Depot-)Diensttyp-Schichttyp-Kombination unter anderem ein Schwellenwert, welche reduzierten Kosten ein die Lösung verbessernder Dienst mindestens erreichen muss, um ins beschränkte Master-Problem aufgenommen zu werden. Der Suchraum wird ausgeweitet, d.h. der Schwellenwert erhöht, wenn für die Kombination keine Dienste/Spalten mit mindestens solchen negativen Kosten gefunden werden bzw. die Anzahl ermittelter Dienste unter einem bestimmten Wert liegen. Weitere Steuerungsmöglichkeiten wie z.B. die Anzahl der maximal in einer Iteration zum beschränkten Master-Problem hinzuzufügenden Spalten oder die Wahl geeigneter Dominanztestlevel (vgl. Abschnitt 6.2.4) sind z.B. bei [Steinzen, 2007] beschrieben.

Parallelisierung der Bearbeitung. Ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme zur Bestimmung zulässiger Dienste werden pro (Depot-)Diensttyp-Schichttyp-Kombination aufgestellt. Da das Lösen der einzelnen ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme unabhängig voneinander ist, können die Probleme auf Mehr-

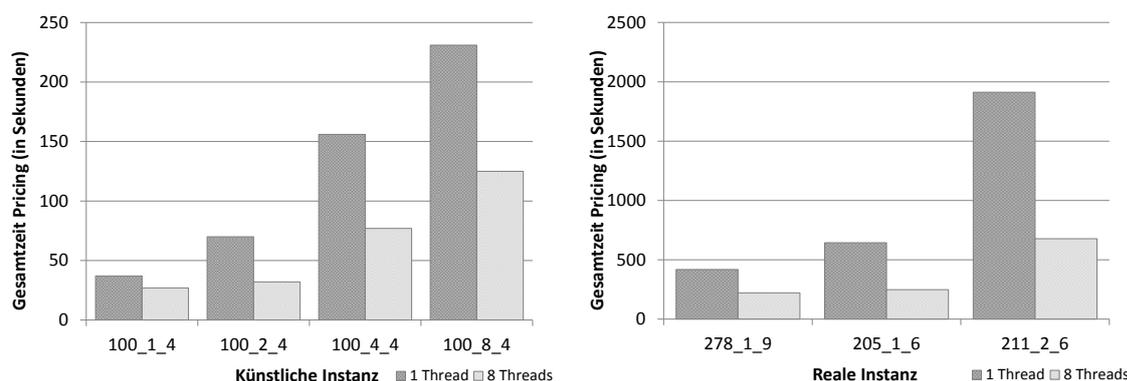


Abbildung 6.3: Reduktion der zur Dienstzeugung notwendigen Rechenzeit durch paralleles Pricing auf mehreren Threads

Kern/Thread-Rechnern parallel bearbeitet werden. Zur Dienstgenerierung wird dann pro Kombination ein Thread verwaltet. So kann die benötigte Rechenzeit für das Lösen der Pricing-Probleme deutlich verkürzt werden.

Abbildung 6.3 veranschaulicht dies anhand von Rechenbeispielen auf der in dieser Arbeit eingesetzten Rechnerkonfiguration. Exemplarisch werden zu künstlichen und realen Instanzen die Gesamtrechenzeiten gegenübergestellt, die für ein sequenzielles und ein paralleles Pricing beim Lösen der entsprechenden integrierten Umlauf- und Dienstplanungsprobleme benötigt wurden. Dabei zeigt der Instanzenname die Anzahl zu verplanender Servicefahrten, die Anzahl Depot-Fahrzeugtypkombinationen und die Anzahl Diensttyp-Schichttyp-Kombinationen an. Bei der künstlichen Instanz 100_2_4 sind also beispielsweise 100 Fahrten bei zwei Depots und vier Diensttyp-Schichttyp-Kombinationen zu verplanen. Für diese Instanz sind also je Column Generation Pricing Iteration $2 * 4 = 8$ ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung zu lösen. Die bei der Berechnung verwendeten Dienst- und Schichttypen sind abhängig von der Instanz und unterscheiden sich daher in ihren Ausprägungen.

Ansprechen des Column Pools. Statt im Pricing in den Dienstgenerierungsnetzwerken zulässige Dienste neu zu erstellen, die den Zielfunktionswert verbessern können, kann auf einen Pool mit bereits erstellten Diensten zurückgegriffen werden, z.B. von Planern bereits vordefinierte Dienste. Befinden sich in diesem Pool Dienste mit negativen reduzierten Kosten, können sie dem beschränkten Master-Problem hinzugefügt werden (vgl. [Steinzen, 2007]). Abhängig von der Anzahl in einer Iteration übernommener Dienste aus dem Pool, kann dann gegebenenfalls auf eine Generierung neuer Dienste einer bestimmten (Depot-)Diensttyp-Schichttyp-Kombination verzichtet wer-

den, falls die zum Lösen von Pricing-Problemen benötigte Laufzeit reduziert werden soll.

6.2.6 Bestimmung ganzzahliger Lösungen

[Steinzen, 2007] zeigt, dass mit dem Einsatz einer Lagrange-Heuristik für integrierte Problemstellungen, wie sie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben ist, bessere Ergebnisse erreicht werden, als mit verschiedenen getesteten Branching-Strategien zur Bestimmung ganzzahliger bzw. zulässiger Lösungen. Bei der verwendeten Lagrange-Heuristik werden zu den beim Lösen des Lagrange-Dualen-Problems mit einem Subgradienten-Verfahren zuletzt berechneten zulässigen Umlaufplänen bzw. Umlaufplanungsflusslösungen, zulässige Dienstpläne mit einem Column Generation-Verfahren bestimmt.

In kürzerer Rechenzeit können mehr solcher Lösungen bestimmt werden, wenn ein zusätzliches heuristisches Abbruchkriterium beim Column Generation-Einsatz berücksichtigt wird: Auf eine weitere (rechenintensive) Berechnung eines zulässigen Dienstplans zur aktuellen Umlaufplanungslösung v wird verzichtet, wenn die aktuell ermittelte untere Schranke LB_v zu einem bestimmten Anteil α über der aktuell bekannten besten zulässigen Lösung UB^* des ursprünglichen Problems liegt, also wenn gilt $\frac{LB_v}{UB^*} > 1 + \alpha$. Der Anteil kann dabei je Column Generation-Iteration vorgegeben werden. Die Idee basiert auf der Beobachtung, dass insbesondere bei realen Planungsproblemen aufgrund restriktiver Dienstregeln möglicherweise keine zulässigen Dienstpläne zur aktuellen Umlaufplanungslösung bestimmt werden können. Strafkosten für als Initiallösung erstellte unzulässige Dienste werden dann so hoch gesetzt, dass in der Regel innerhalb der ersten Column Generation Iterationen vorhergesagt werden kann, ob doch ein zulässiger Dienstplan ermittelt werden kann. Aber auch falls stets zulässige Pläne bestimmt werden können, lässt sich innerhalb der ersten Iterationen gut abschätzen, ob zur aktuellen Umlaufplanungslösung eine bessere Lösung als die aktuell bekannte beste gefunden werden kann.

Abbildung 6.4 veranschaulicht die Unterschiede in der Rechenzeit mit und ohne Nutzen des zusätzlichen heuristischen Abbruchkriteriums auf künstlichen und realen Testinstanzen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung, abgekürzt als *art* und *real* unter Angabe der zu bedienenden Servicefahrtenanzahl. Die ermittelten Umlauf- und Dienstpläne sind dabei je Instanz identisch. Mit den gewählten Parametereinstellungen werden also keine Lösungen abgeschnitten. In der Lagrange-Heuristik werden zu den letzten ermittelten 50 Umlaufplanungsflusslösungen geeignete Dienstpläne erstellt. Terminierungskriterien beim Lösen der jeweiligen (beschränkten) Master-Probleme mit Column Generation sind: Kein weiteres Auffinden von neuen Spalten/Diensten mit negativen reduzierten Kosten (abgekürzt als *No neg rc cols*), eine

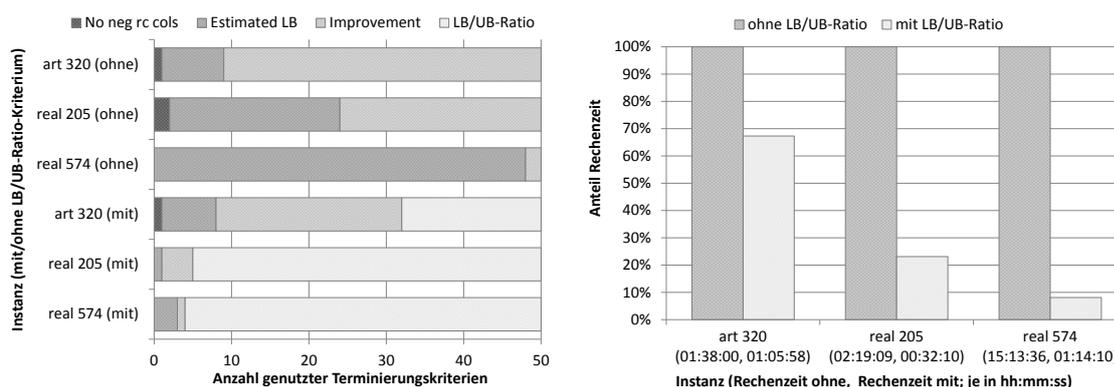


Abbildung 6.4: Reduktion der notwendigen Rechenzeit bei der Bestimmung zulässiger Lösungen für integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit einem zusätzlichen heuristischen Abbruchkriterium LB/UB-Ratio

mögliche Verbesserung des Zielfunktionswertes liegt unter 0,5% (*Estimated LB*), die Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb der letzten 15 Iterationen liegt unter 0,1% (*Improvement*), sowie der erlaubte Anteil von unterer Schranke zu bisher bekannter bester oberer Schranke wird überschritten (*LB/UB-Ratio*). Dabei entspricht die aufgeführte Reihenfolge der Abfragereihenfolge im Verfahren. Für das Kriterium *LB/UB-Ratio* werden folgende Werte α_{iter} in Iteration *iter* berücksichtigt: $\alpha_3 = 1, 3$; $\alpha_5 = 0, 25$; $\alpha_8 = 0, 15$; $\alpha_{11} = 0, 10$; $\alpha_{14} = 0, 08$. Abbildung 6.4 zeigt, dass durch Nutzen des zusätzlichen Abbruchkriteriums in den jeweiligen Column Generation-Verfahren, die Rechenzeit drastisch reduziert werden kann. Je öfter das Kriterium greift, desto mehr kann die zur Bestimmung der bestmöglichen Lösung notwendige Zeit verkürzt werden, was insbesondere bei den betrachteten realen Problemstellungen der Fall ist. Durch eine Verschärfung der Heuristik, d.h. durch geringer erlaubte LB/UB-Anteile, könnte die Rechenzeit weiter verkürzt werden. In durchgeführten Experimenten konnte z.B. mit $\alpha_3 = 0, 4$ die Rechenzeit in der Regel noch bis zu 60% gesenkt werden. Allerdings besteht bei zu scharfen Grenzen die Gefahr darin, auch die Bestimmung der eigentlich besten Lösung vorzeitig abubrechen.

Eine alternative Strategie zur Verringerung der notwendigen Rechenzeit kann dann darin bestehen, die Grenzen sehr scharf zu setzen und die im Lagrange-Verfahren zuletzt ermittelten Umlaufplanungslösungen so zu sortieren, dass Lösungen, zu denen vermutlich ein sehr guter Dienstplan bestimmt werden kann, zuerst zur Dienstplanberechnung herangezogen werden. Die scharfen Grenzen sorgen dann für einen vorzeitigen Abbruch bei der Berechnung lediglich „guter“, Dienstpläne ohne dass die Gefahr besteht, die besten Lösungen nicht bestimmt zu haben. Allerdings ist es schwierig anhand der Umlaufplanungslösungen direkt die potenzielle Qualität der Dienstpläne

abzuschätzen. Experimente haben gezeigt, dass die beste Vorhersagemöglichkeit darin besteht, jeweils einige Column Generation-Iterationen zu rechnen. Die modifizierte Strategie wäre aber nur dann vorteilhaft, wenn eine Abschätzung möglichst ohne Berechnung von Diensten in (einigen wenigen) Column Generation Iterationen auskommt, wenn also stets weniger gerechnet werden muss als mit der ursprünglichen Strategie.

6.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat gezeigt, mit welchen Komponenten ein effizientes Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung entwickelt werden kann. Grundlage bilden dabei Erkenntnisse aus Modellen und Lösungsverfahren für integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme. So ist die Voraussetzung geschaffen, unterschiedliche Varianten von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen lösen zu können.

Bevor im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Frage beantwortet wird, wie Ähnlichkeitsaspekte beim Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen geeignet berücksichtigt werden können, sollte zunächst noch untersucht werden, wie betriebsspezifische Regelungen zur Umlauf- und Dienstbildung in Modellen und Methoden des Optimierungssystem abgebildet werden können, um so eine praktische Einsetzbarkeit der Verfahren zu ermöglichen.

Kapitel 7

Umsetzung unternehmensspezifischer Regelungen

Im vorherigen Kapitel wurde das effiziente Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen für einen Tag als eine grundlegende Voraussetzung für eine Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen untersucht. Als weitere Voraussetzung für eine praktische Umsetzbarkeit einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen ist entsprechend Schritt S2 aus Kapitel 5 ebenso zu untersuchen, inwiefern in der Praxis bestehende Regelungen zur Umlauf- und Dienstbildung beim Lösen der Planungsprobleme einbezogen werden können. Denn eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitskriterien beim Lösen der Planungsprobleme hilft einem Verkehrsunternehmen nur dann weiter, wenn die vorgeschlagenen Pläne im Unternehmen direkt umsetzbar, d.h. zulässig sind. In diesem Kapitel wird daher untersucht, wie weit sich (komplizierte) betriebsspezifische Regelungen in den beschriebenen Optimierungsverfahren abbilden lassen.

Abschnitt 7.1 beschreibt die modelltechnische Umsetzung spezieller betrieblicher Regelungen, die von unterschiedlichen Verkehrsunternehmen bezüglich Umläufen und Diensten gefordert sind. Abschnitt 7.2 zeigt Ergebnisse aus einer Fallstudie zur Umlauf- und Dienstbildung. Abschnitt 7.3 fasst die Erkenntnisse dieses Kapitels zusammen.

7.1 Anforderungen an die Dienstbildung

Die Lösbarkeit praktischer Problemstellungen zur Umlauf- und Dienstbildung ist neben der Problemgröße insbesondere bestimmt durch die mögliche Interaktion zwischen Umläufen und Diensten. Diese Interaktion wird geprägt durch die in einem Verkehrsunternehmen geltenden *Pausenregeln*, *Fahrzeugwechsel*- und *Ablösemöglichkeiten* (vgl. Kapitel 5), d.h. durch die betriebsspezifische Umsetzung gesetzlich und tariflich vorgegebener Regeln zur Dienstbildung. Zu unterschiedlichen Ausprägungen dieser betriebsspezifischen Umsetzung wird im Folgenden die modelltechnische und methodische Realisierbarkeit untersucht.

Abschnitt 7.1.1 gibt einen Überblick über unterschiedliche Ausprägungen und deren generelle Realisierbarkeit. Abschnitt 7.1.2 veranschaulicht Möglichkeiten zur Realisierung von pausenbezogenen Regeln, Abschnitt 7.1.3 zur Realisierung von fahrzeugwechselbezogenen Regeln und Abschnitt 7.1.4 zeigt Möglichkeiten zur Realisierung von ablösebezogenen Regeln. Ein weiterer Aspekt zur Dienstbildung wird anschließend in Abschnitt 7.1.5 aufgegriffen. Dort wird die Besetzung von Fahrzeugen außerhalb des Depots untersucht.

7.1.1 Katalog individueller Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten

Die betriebsspezifische Umsetzung von Dienstregeln stellt mehrere Anforderungen an die Abbildung von Pausen, Fahrzeugwechseln und Ablösemöglichkeiten in Modellen und Methoden zur Umlauf- und Dienstplanung. Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten sind sowohl *orts-* als auch *zeitabhängig*: Orte können sein Depots, Haltestellen und Haltepunkte, Endhaltestellen oder andere spezifische Orte, die nicht direkter Bestandteil des Liniennetzes sind, die aber per Leerfahrt oder Transfer bzw. zu Fuß erreicht werden können, wie z.B. Pauseneinrichtungen, von [Kliwer, 2005] auch Pausendepots genannt. Zeitliche Restriktionen können abhängig gemacht werden von der Tageszeit, von den „verbrauchten“ Zeiten in einem Dienst, also von Arbeits-, Lenk- und Dienstzeit (siehe Abschnitt 4.2.1), und von der Lage innerhalb eines Dienstes, d.h. dem Beginn und Ende eines Dienstes oder Dienststücks, sowie dem Beginn und Ende eines Dienstelements. Abbildung 7.1 fasst die verschiedenen Ausprägungen und individuellen Möglichkeiten von Pausenregeln (P), Fahrzeugwechseln (F) und Ablösemöglichkeiten (A) zusammen.

Generelle Berücksichtigung ortsabhängiger Restriktionen

Grundsätzlich ist in Depots die Möglichkeit gegeben, dass Fahrer dort ihre Pause verbringen können (vgl. Ausprägung P1 in Abbildung 7.1). Können Fahrzeuge nur im Depot gewechselt und abgelöst werden ($F1$, $A1$), wird das entsprechende Umlauf- und Dienstplanungsproblem in der Regel als unabhängiges bzw. fahrplanbasiertes Dienstplanungsproblem gelöst (siehe Abschnitt 2.2.2), welches als Set-Partitioning- oder Set-Covering-Problem formuliert ist. Dabei wird zwar häufig die Anzahl zur Bedienung aller Servicefahrten benötigter Dienste minimiert. Nebenbei auch die Fahrzeuganzahl zu minimieren, ist so allerdings oftmals nicht gewährleistet. Um die Fahrzeuganzahl einzubeziehen, kann im implementierten System zur Umlauf- und Dienstbildung das Hauptproblem als Netzwerkflussproblem modelliert werden, in welchem Kosten für

<i>Wo?</i>	<i>Pausen</i>	<i>Fahrzeug- wechsel</i>	<i>Ablösen</i>
Depot	P1	F1	A1
Haltestellen/-punkte (alle oder ausgewählte)		F2	A2
Endhaltestellen (alle oder ausgewählte)	P3	F3	A3
Andere spezifische Orte	P4	F4	A4
<i>Wann?</i>			
Tageszeitabhängig	P5	F5	A5
von Zeiten im Dienst abhängig (Arbeits-, Lenk-, Dienstzeit)	P6	F6	A6
Ende/Beginn Dienststück (in Pause)		F7	A7
Beginn/Ende Dienststück (Beginn/Ende Dienst)			A8
im Dienststück, Beginn/Ende Dienst- element (ohne Pause)		F9	A9

Abbildung 7.1: Katalog möglicher Ausprägungen und Kombinationen von Pausen (P), Fahrzeugwechseln (F) und Ablösen (A)

die minimale Fahrzeuganzahl berücksichtigt werden können. Ansonsten ähnelt eine modelltechnische Umsetzung von Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten im Depot einer Berücksichtigung dieser Möglichkeiten an „normalen“ Haltestellen bzw. Endhaltestellen.

Für die beim Lösen von Dienstplanungsproblemen zu bewältigende Problemgröße besteht ein entscheidender Unterschied darin, ob alle Endhaltestellen oder Haltepunkte für Pausen, Fahrzeugwechsel oder Ablösemöglichkeiten in Betracht kommen oder nur ausgewählte Haltestellen (P2-3, F2-3, A2-3). Zwar bedeutet die Berücksichtigung von ausgewählten Endhaltestellen oder ausgewählten Haltepunkten weniger zu modellierende Kanten und Knoten in den Netzwerkrepräsentationen eines Dienstplanungsproblems. Aufgrund eingeschränkter Freiheitsgrade ist es dann allerdings auch schwieriger, zulässige Dienste zu generieren.

Des weiteren kann es notwendig sein, zusätzlich zu Depots und den im Liniennetz abgebildeten Haltestellen in den Netzwerkrepräsentationen zur Umlauf- und Dienstbildung andere Orte als Möglichkeiten für Pausen oder Fahrzeugwechsel oder Ablösen abzubilden (P4, F4, A4). Die Einbeziehung unterschiedlicher ortsbezogener Restriktionen für Pausen, Fahrzeugwechsel und Ablösemöglichkeiten wird in den nachfolgenden Abschnitten noch genauer aufgegriffen.

Generelle Berücksichtigung zeitabhängiger Restriktionen

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die zeitliche Lage für Pausen, Fahrzeugwechsel und Ablösemöglichkeiten. Tageszeitabhängige Restriktionen bezüglich Pausen oder Fahrzeugwechsel oder Ablösemöglichkeiten lassen sich durch die Berücksichtigung *großer Zeitfenster* realisieren (P5, F5, A5). Solche tageszeitabhängigen Restriktionen können z.B. sein, dass eine Pause zwischen 11-13 Uhr liegen muss, dass die erste Pause in einem bestimmten Zeitraum liegen muss, oder dass alle Pausen nur in bestimmten Zeiträumen liegen dürfen. Entweder werden nur in diesen Zeiträumen beim Aufbau von Dienstgenerierungsnetzwerken durch z.B. Pausenkanten strukturell Pausenmöglichkeiten (analog Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten) gegeben und/oder beim Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstbildung wird sichergestellt, dass Pausen oder Fahrzeugwechsel oder Ablösemöglichkeiten nur dann in einem Dienst durchgeführt werden, wenn diese in die vorher bestimmten Zeitfenster fallen.

Ebenso können durch im Dienst verbrauchte Zeiten bedingte Pausen-, Fahrzeugwechsel-, Ablöserestriktionen berücksichtigt werden (P6, F6, A6), wie z.B.: erste Pause nach mindestens 1h Arbeitszeit oder Fahrzeugwechsel nach 5h Arbeitszeit oder eine Pause mit mindestens x Minuten muss innerhalb der ersten y Arbeitsstunden liegen etc. Beim Lösen der ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstbildung wird anhand der Ressourcenverbräuche dann die entsprechende Restriktion geprüft.

Sowohl in Pausen zwischen Dienststücken können Fahrzeugwechsel und Ablösen erlaubt sein (F7, A7) als auch ohne Pause, z.B. je Dienstelement (F9, A9). Ablösen ist generell zu Beginn und am Ende eines Dienstes, d.h. bei Beginn des ersten Dienststücks und am Ende des letzten Dienststücks möglich (A8). Die entsprechenden Möglichkeiten werden strukturell durch Kanten in den Dienstgenerierungsnetzwerken sichergestellt und/oder durch Prüfung beim Lösen der ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme. Dabei ist insbesondere von Bedeutung, wo Pausen, Fahrzeugwechsel und Ablösemöglichkeiten gegeben sind (siehe oben).

7.1.2 Berücksichtigung von Pausenmöglichkeiten

Bei der Berücksichtigung von Pausenmöglichkeiten spielt für eine geeignete Modellierung neben einem möglichen Ortswechsel des Fahrers vor und oder nach der Pause, vor allem die Kombination von Pause und Fahrzeugwechsellmöglichkeiten eine entscheidende Rolle. Im Betriebsablauf von Verkehrsunternehmen wird die Zuordnung von Fahrern zu Fahrzeugen unterschiedlich gehandhabt. Entweder darf während eines Dienstes das *Fahrzeug gewechselt werden* oder das *Fahrzeug darf nicht gewechselt werden* und Fahrer und Fahrzeug bilden während eines Dienstes eine Einheit (siehe auch nächster Abschnitt 7.1.3).

Dabei sind Fahrzeugwechsellmöglichkeiten in der Pause lokal vorgegeben durch die zur Verfügung stehenden Ablöse- oder Pausenorte, also z.B. durch Depots, bestimmte Haltestellen oder spezielle andere Orte. Im Netzwerkmodell werden spezielle andere Orte, die nicht Depot oder Bestandteil des Liniennetzes sind, dann durch eine zusätzliche Zeitleiste und entsprechende Leerfahrtverbindungen berücksichtigt.

Abbildung 7.2 veranschaulicht schematisch die Möglichkeiten zur Pausenbildung in Abhängigkeit von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten und unterschiedlichen Orten. Zur besseren Übersichtlichkeit sind keine Transfermöglichkeiten eines Fahrers abgebildet, also Ortswechsel zu Fuß oder als Passagier in einem anderen Fahrzeug. Um diese Transfermöglichkeiten zu berücksichtigen, werden lediglich zusätzliche Transferkanten bzw. kombinierte Transfer-Pausenkanten in das Modell eingefügt.

Abbildung 7.2 macht deutlich, wie eventuelle Fahrzeugwechsellmöglichkeiten die Modellierung von Pausenmöglichkeiten für Dienste beeinflussen. In den formulierten ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen zur Dienstgenerierung, in welchem jeder zulässige Pfad einem zulässigen Dienst entspricht, lassen sich die unterschiedlichen Pausenmöglichkeiten durch strukturelle Pfadbeschränkungen und/oder durch Ressourcenverbräuche modellieren. Ist ein Fahrzeugwechsel während bzw. nach der Pause erlaubt, dann steht das zur Pausenzeit unbenutzte Fahrzeug anderen Diensten zur Verfügung. Ist kein Fahrzeugwechsel erlaubt, werden Pausen „auf einem Fahrzeug“ geleistet.

Wie Pausen beim Bilden von Diensten, also beim Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung, identifiziert werden können, wird im Folgenden näher erläutert. Dabei wird unterschieden zwischen Pausen mit erlaubten Fahrzeugwechseln und Pausen ohne erlaubte Fahrzeugwechsel.

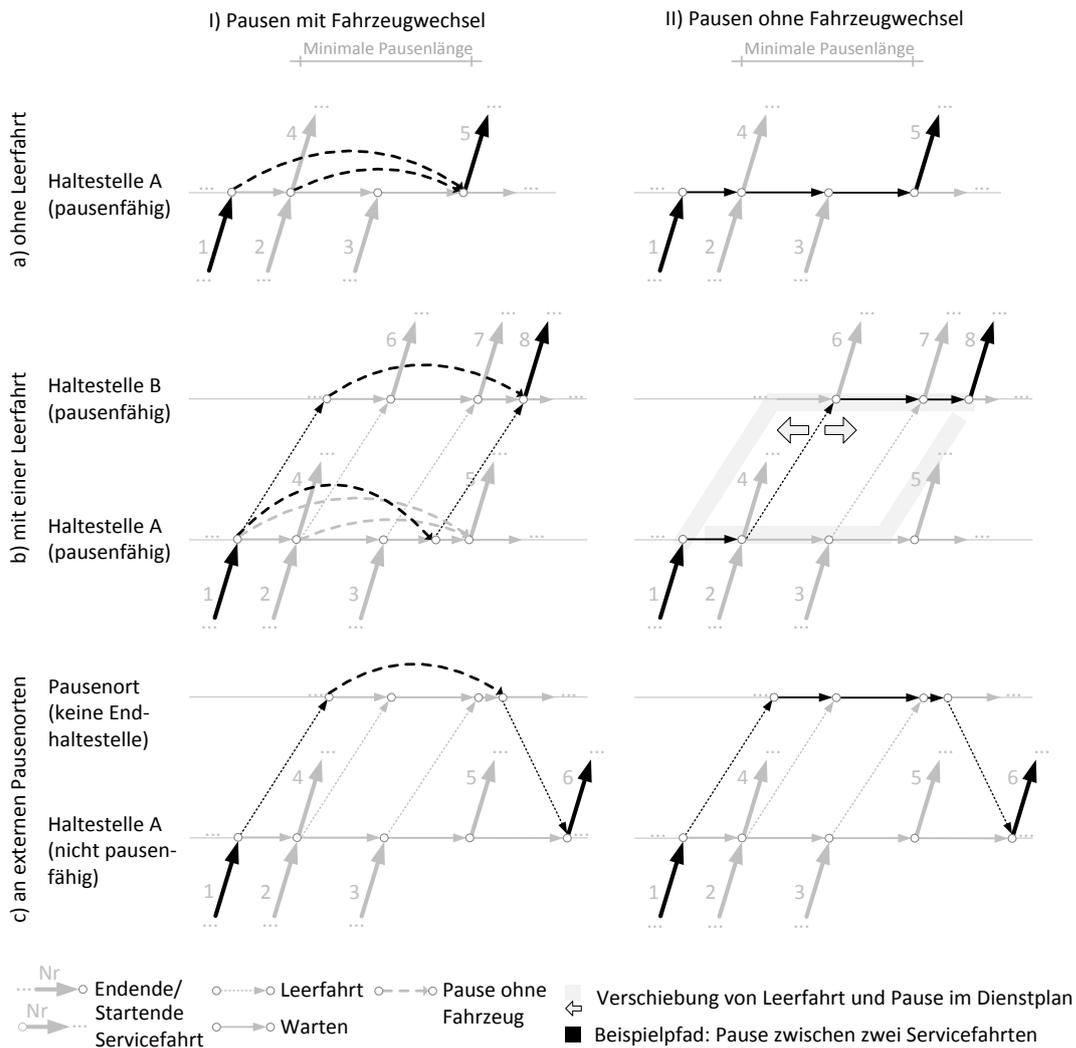


Abbildung 7.2: Explizite und implizite Pausenrepräsentation

Pausen mit erlaubten Fahrzeugwechseln

Sind Fahrzeugwechsel in einer Pause erlaubt, gestaltet sich die Identifikation von Pausen beim Lösen der ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung vergleichsweise einfach. Pausen sind explizit strukturell durch Pausenkanten im Dienstgenerierungsnetzwerk abgebildet, wie es die Bilder Ia, Ib und Ic in Abbildung 7.2 zeigen, sowie die Darstellung in Abschnitt 6.2.1. Für einen (Teil-)Dienst bzw. (Teil-)Pfad von Quellknoten zu einem Knoten, von welchem eine Pausenkante ausgeht, muss lediglich geprüft werden, ob alle Dienstyp-spezifischen Voraussetzungen für die Nutzung dieser Pausenkante gegeben sind, wie z.B. eine minimale Arbeits-

zeit in dem vor der Pause liegenden Dienststück. Dann kann der (Teil-)Dienst bzw. (Teil-)Pfad über diese Kante weitergeführt werden.

In der Regel gilt, dass ein Fahrzeug außerhalb des Depots oder einem Pausenort mit Depot-Eigenschaften immer von einem Fahrer besetzt sein muss. Verabschiedet sich der Fahrer eines Fahrzeugs also in die Pause, muss das Fahrzeug – bei erlaubten Fahrzeugwechseln – von einem anderen Fahrer besetzt werden. Modellierungen für den Fall, dass diese Restriktion aufgehoben ist, ein Fahrzeug bei längeren Standzeiten außerhalb eines Depots also nicht zwingend mit einem Fahrer besetzt sein muss, werden später in Abschnitt 7.1.5 beschrieben.

Pausen auf Wendezeiten ohne erlaubte Fahrzeugwechsel

Sind Fahrzeugwechsel in einer Pause nicht erlaubt aber auch Pausen außerhalb von Depots möglich, kann die Identifikation von Pausen in Dienstgenerierungsnetzwerken nicht einfach über die Struktur des Netzwerkes erfolgen. Denn Pausen sind in diesem Fall nicht explizit über Pausenkanten modelliert, sondern implizit über Wendezeiten bzw. Wartezeiten: Pausen sind dann durch alle Wege im Netzwerk beschrieben, deren Summe pausenfähiger Wartezeiten auf den Kanten mindestens der minimalen Pausenlänge des entsprechenden Diensttyps entspricht und die maximale Pausenlänge nicht überschreitet, und die nicht durch eine zeitlich unverschiebbare Aktivität ohne pausenfähige Wartezeit unterbrochen werden. Bild IIb in Abbildung 7.2 gibt ein Beispiel für eine verschiebbare Aktivität.

Die Pausenidentifikation erfolgt also über die Bestimmung kumulierter Ressourcenverbräuche (siehe Tabelle 6.1 in Abschnitt 6.2.1 für die generell abgebildeten Ressourcenverbräuche auf den Kanten der verwendeten Dienstgenerierungsnetzwerke), wobei aufgrund der TSN-Struktur noch eine Schwierigkeit umgangen werden muss: Über Verbindungsfahrkanten abgebildete Aktivitäten wie die Ausführung von Leerfahrten sorgen zwar dafür, dass zwischen Gruppen von Servicefahrten alle möglichen Verknüpfungen dieser Servicefahrten implizit im Modell abgebildet sind, der genaue Zeitpunkt der Leerfahrtsdurchführung ist aber nicht modelliert. Insbesondere bei der Suche nach Pausenmöglichkeiten sollte nicht statisch der Zeitpunkt aus der TSN-Modellierung genutzt werden, d.h. die Zeitrepräsentation des Knotens, von welchem die Verbindungsfahrkante ausgeht. Der Suchraum wäre sonst eingeschränkt und mögliche zulässige Pausen könnten nicht ermittelt werden. Zur Veranschaulichung sei noch einmal auf Bild IIb in Abbildung 7.2 verwiesen: Ohne zeitliche Verschiebung der Leerfahrt wäre es nicht möglich, am Stück die minimale notwendige Pausenlänge zu erreichen. Leerfahrtmöglichkeiten müssen also beim Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung

flexibel in Abhängigkeit von Pausenmöglichkeiten auf den (Teil-)Pfadern gehandhabt werden. Je nach Vorgabe des Verkehrsunternehmens muss dabei zusätzlich auch auf die tageszeitliche Lage der Pause und die Lage im Dienst geachtet werden, wie es in den Anforderungen an die Pausenbildung in Abschnitt 7.1.1 formuliert ist.

Algorithmus 7.1.1 fasst die wesentlichen notwendigen Schritte zur Bestimmung von im Modell implizit abgebildeten Pausen beim Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung zusammen. Die Struktur eines Dienstgenerierungsnetzwerkes $G = (N, A)$ ist dabei durch die Knotenmenge N mit dem Quellknoten s und die Kantenmenge A vorgegeben. Ferner bezeichnet $E = \{1, \dots, n\}$ die Menge möglicher Ebenen des Netzwerkes, wobei jede Ebene einem möglichen Dienststück des mit dem Netzwerk assoziierten Dienstyps entspricht (vgl. Abschnitt 6.2.1). Mit $L_{i,e}$ ist dann die Menge aller Label an Knoten $i \in N$ auf Ebene $e \in E$ beschrieben. Auf jeder Kante $(i, j) \in A$ von Knoten i zu Knoten j sind (reduzierte) Kosten \bar{f}_{ij} abgebildet, sowie pro Ressource $v \in V$ ein Ressourcenverbrauch d_{ij}^v . Eine untere Schranke für den Verbrauch einer Ressource v ist mit l^v definiert und mit u^v für die obere Schranke. Die unteren Schranken für den Ressourcenverbrauch auf einer Ebene e sind durch $l^{v,e}$ beschrieben. Einige zeitliche Ressourcenverbräuche sind zum besseren Verständnis extra angegeben. Dies sind die aktuell (pausenfähige) Wartezeit WZ , die Arbeitszeit AZ , die Lenkzeit LZ und die Dienstdauer bzw. Dienstzeit DZ . Für ein Label $l \in L_{i,e}$ bezeichnet $\bar{f}(l)$ die reduzierten Kosten und $d^v(l)$ den kumulierten Ressourcenverbrauch je Ressource v des bisherigen (Teil-)Pfades. Ein aus Label l an Knoten j auf Ebene e gebildetes Label m ist dann definiert durch $L_{i,e}^m = (l, \bar{f}(l) + \bar{f}_{ij}, d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$. Permanente Label an Knoten j sind mit $\bar{L}_j \subseteq L_j$ beschrieben bzw. mit $\bar{L}_{j,e} \subseteq \bar{L}_j$ für Ebene e . Des Weiteren sei $f(x) : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, die Kostenwerte in Abhängigkeit des gegebenen Ressourcenverbrauchs x ermittelt. Außerdem beschreibt $\text{Aufgabe}(i,j) : A \rightarrow T$ eine Funktion, die den mit einer Kante $(i, j) \in A$ assoziierten Aktivitätstyp liefert, mit $T = \{\text{service}, \text{pull-out}, \text{pull-in}, \text{deadhead}, \text{waiting}, \text{sign-on}, \text{sign-off}\}$. Verbindungsfahrten sind dabei mit *deadhead* bezeichnet. Weitere Funktionen geben den durch einen Knoten $i \in N$ repräsentierten Ort bzw. die repräsentierte Zeit an (Funktionen $\text{Ort}(i)$ bzw. $\text{Zeit}(i)$), sowie ob es sich um den aktuellen Ort um einen Pausenort handelt (Funktion IstPausenort), und ob Start- und Endzeit einer Pause im für dieses Dienststück bzw. dieser Ebene e gültigen tageszeitabhängigem Zeitfenster liegen (Funktion $\text{IstImPausenfenster}$). Zur besseren Übersichtlichkeit sind noch einige Hilfsvariablen eingefügt: wt beschreibt die aktuell kumulierte pausenfähige Wartezeit; e_{neu} beschreibt die Ebene, auf welcher ein neu erstelltes Label einsortiert werden soll.

Algorithmus 7.1.1 : Label Setting unter Berücksichtigung verschiebbarer Verbindungsfahrten bei im TSN-Modell implizit modellierten Pausen

```

// Schritt 1: Initialisierung
Setze  $L_{i,e} = \bar{L}_{i,e} = \emptyset \forall e \in E, \forall i \in N$ 
Setze  $L_{s,1} = \bar{L}_{s,1} = \{(nil, 0, \dots, 0)\}$ 
// Schritt 2: Pfaderweiterungen und Dominanztests
// Wähle Knoten j
foreach  $j \in N \setminus \{s\}$  do
  // Betrachte alle Vorgängerknoten i von Knoten j
  foreach  $i \in \{i : (i, j) \in A\}$  do
    // Betrachte alle Ebenen e
    foreach  $e \in E$  do
      // Betrachte alle Label an Knoten i auf Ebene e
      foreach  $l \in \bar{L}_{i,e}$  do
        // Prüfe Ressourcenverbräuche
        if  $\exists v \in V : d^v(l) + d_{ij}^v > u^v$  then
          next  $l$ 

        // Prüfe pausenfähige Zeiten und erstelle neue Label m1 und m2
         $wt = 0$ 
         $e_{neu} = e$ 
        if  $Aufgabe(i, j) = service$  then
          // ggf. pausenfähige Wendezeit am Ende der Servicefahrt
           $wt = d_{ij}^{WZ}$ 
        else
           $wt = d^{WZ}(l) + d_{ij}^{WZ}$ 
        if  $e < |E| - 1$  then
          // Prüfe zeitliche Zulässigkeit einer möglichen Pause
          if  $wt \geq l^{WZ}$  AND  $(\exists v \in \{AZ, LZ, DZ\} : d^v(l) < l^{v,e}$ 
            OR  $not\ IstImPausenFenster(e, Zeit(j) - wt, Zeit(j))$ ) then
            next  $l$ 

          // Prüfe mögliches Pausenende
          if  $not\ Aufgabe(i, j) = waiting$  AND  $d^{WZ}(l) \geq l^{WZ}$  then
            // Prüfe örtliche Zulässigkeit einer möglichen Pause
            if  $not\ IstPausenOrt(Ort(i))$ 
              AND  $not\ (Aufgabe(i, j) = deadhead$  AND  $IstPausenOrt(Ort(j))$ ) then
                next  $l$ 

             $e_{neu} = e + 1$ 
            // Erstelle Label m1 mit aktueller WZ = 0 und entsprechend
            // modifizierten Kosten, sowie modifizierter AZ, LZ etc.
             $L_{j,e_{neu}}^{m1} = (l, \bar{f}(l) + \bar{f}_{ij} - f(d^{WZ}(l)), d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, 0, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
             $L_{j,e_{neu}} = L_{j,e_{neu}} \cup L_{j,e_{neu}}^{m1}$ 
            if  $Aufgabe(i, j) = deadhead$  then
               $e_{neu} = e$ 

          else
            // Maximale Pausenanzahl erreicht, keine weitere Pause zulässig
            if  $d^{WZ}(l) > 0$  AND  $wt \geq l^{WZ}$  then
              next  $l$ 

          if  $e_{neu} = e$  then
            if  $d_{ij}^{WZ} = 0$  AND  $not\ Aufgabe(i, j) = deadhead$  then
               $wt = 0$ 

            // Erstelle Label m2 mit aktueller WZ = wt und ohne vorherige Pause
             $L_{j,e_{neu}}^{m2} = (l, \bar{f}(l) + \bar{f}_{ij}, d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, wt, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
             $L_{j,e_{neu}} = L_{j,e_{neu}} \cup L_{j,e_{neu}}^{m2}$ 

        // Entferne dominierte Label an Knoten j
         $\bar{L}_j = \text{EffizienteLabel}(L_j \cup \bar{L}_j)$ 

```

Die Zusammenfassung in Algorithmus 7.1.1 macht deutlich, dass sich auch in als TSN modellierten Dienstgenerierungsnetzwerken mit aggregierenden Leerfahrtskanten bzw. genauer mit aggregierenden Verbindungsfahrtskanten alle implizit abgebildeten Pausen berücksichtigen lassen. Im Rahmen einer Pause stattfindende Leerfahrten, d.h. sich auf einem „Pausenpfad“ befindliche Leerfahrten, müssen vom Algorithmus lediglich als flexibel in Umlauf und Dienst verschiebbare Leerfahrten interpretiert werden können. Dabei müssen im Algorithmusverlauf auch (Teil-)Dienste, die zunächst evtl. aufgrund einer Verletzung einer Arbeits- oder Lenkzeitrestriktion als unzulässig erscheinen, so lange weiter propagiert werden, bis feststeht, ob sich Teile dieser Zeiten durch eine Verschiebung von Leerfahrten evtl. in gültige Pausenzeiten umwandeln lassen, sodass der (Teil-)Dienst zulässig wäre. Die bisher in der Literatur beschriebenen TSN basierten Dienstgenerierungsnetzwerke in [Steinzen, 2007], [Steinzen et al., 2010] oder [Kliewer et al., 2012] decken jeweils den Fall für explizit modellierbare Pausen ab, d.h. für Fahrzeugwechsel innerhalb einer Pause. Der Fall nicht erlaubter Fahrzeugwechsel und Ablösemöglichkeiten auch an Orten außerhalb des Depots ist mit den dort vorgeschlagenen Dienstgenerierungsnetzwerken und Lösungsansätzen nicht modellierbar.

7.1.3 Berücksichtigung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten

Die generelle Realisierbarkeit von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten in Modellen und Methoden zur Umlauf- und Dienstplanung wurde allgemein im Abschnitt 7.1.1 aufgezeigt und im Zusammenhang mit Pausen- und Ablösemöglichkeiten im vorherigen Abschnitt 7.1.2 dargestellt. Dabei kann differenziert werden zwischen *Fahrzeugwechseln basierend auf Umläufen* und *Fahrzeugwechseln basierend auf potenziellen Umläufen*, d.h. auf Flusslösungen eines Netzwerkmodells, welches das betrachtete Umlaufplanungsproblem repräsentiert. Außerdem ist zu unterscheiden zwischen *Fahrzeugwechseln auf Fahrzeugen eines Depots* oder *mehrerer Depots*. Auf diese Unterschiede wird nachfolgend eingegangen.

Umlaufgrundlage vs. Flusslösungsgrundlage

Im *sequenziellen Planungsfall* sind die Umläufe vor der Dienstberechnung bekannt und bilden somit die Grundlage für diese. Die Modellierung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten lässt sich dann leicht realisieren, indem Pausen- bzw. Pausen- und Transferkanten Ablösepunkte der Umläufe miteinander verbinden.

Im *teilintegrierten und integrierten Planungsfall* sind keine expliziten Umläufe gegeben, zu welchen Dienste generiert werden können. Gegeben sind (Teil-)Netzwerke,

die mögliche Verkettungen von aus Fahrzeugaktivitäten ableitbaren Aufgaben für Fahrer beschreiben (vgl. Abschnitt 6.2.1) bzw. eine Netzwerkflusslösung im entsprechenden Umlaufplanungsnetzwerk. Auch hier sind in den Dienstgenerierungsnetzwerken über Pausen- und Transferkanten zwischen Ablösepunkten explizit Fahrzeugwechsel modellierbar.

Allerdings muss bei der Verwendung von Dienstelement(-Abschnitt)-basierten Netzwerken zur Dienstgenerierung darauf geachtet werden, dass nicht Fahrzeugwechsel durchgeführt werden, die zwar im Modell möglich sind, in der Realität aber nicht sinnvoll wären: Ablösepunkte können Servicefahrten in mehrere Teilfahrten aufteilen. Dabei entspricht eine Teilfahrt dann einem Dienstelement oder einem Dienstelement-Abschnitt. Es gilt, dass Fahrer ihre Arbeit an einer Teilfahrt innerhalb einer Servicefahrt beginnen und beenden können, ein Umlauf aber immer stets alle Teilfahrten einer Servicefahrt enthalten muss (vgl. Abschnitt 2.1.2). D.h. beendet ein Fahrer sein Dienst oder Dienststück nicht am Ende einer Teilfahrt und überlässt das Fahrzeug einem anderen Fahrer, sollte er mit seinem Fahrzeug auch noch den Rest der Servicefahrt bedienen. Ansonsten wären Passagiere in einem Bus gezwungen, nach einer vom Fahrer absolvierten Teilfahrt auf einer Linie aus- und in einen anderen Bus umzusteigen, was die Zufriedenheit der Kunden mit der ihnen angebotenen Leistung nicht zwingend erhöhen dürfte.

In den ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problemen zur Dienstgenerierung ist daher in der Netzwerkrepräsentation auf jeder Kante hinterlegt, die mit einer Servicefahrt assoziiert ist, ob es sich um die erste Teilfahrt dieser Servicefahrt handelt bzw. die letzte Teilfahrt dieser Servicefahrt. Im Algorithmus zur Dienstgenerierung aus Abschnitt 6.2.4, werden (Teil-)Pfade bzw. (Teil-)Dienste nur dann weitergeführt, wenn a) die letzte Kante auf dem bisherigen (Teil-)Pfad eine Teilfahrt der gleichen Servicefahrt beschreibt wie die aktuelle Kante, sowie wenn b) die letzte Kante auf dem bisherigen (Teil-)Pfad eine SignOn- oder Pausenkante war oder die aktuelle Kante eine erste Teilfahrt beschreibt und c) die letzte Kante auf dem bisherigen (Teil-)Pfad eine letzte Teilfahrt repräsentiert hat oder die aktuell betrachtete Kante eine SignOff- oder Pausenkante ist (vgl. Abschnitt 6.2.1 für eine Definition der unterschiedlichen Kantentypen). So wird garantiert, dass a) Teilfahrten einer Servicefahrt nacheinander bedient werden, sowie dass b) Fahrer nur unmittelbar nach Dienstbeginn bzw. Pausenende in die Bedienung einer Servicefahrt wechseln, und dass c) Fahrer die Bedienung einer Servicefahrt nur dann unterbrechen, wenn sie ihren Dienst beenden oder in die Pause wechseln. Dann lassen sich zu den ermittelten Diensten Umläufe ableiten, die stets alle Teilfahrten einer Servicefahrt enthalten.

Eindepot-Wechsel vs. Mehrdepot-Wechsel

In mehreren Ansätzen zur (integrierten) Umlauf- und Dienstplanung sind die Dienste bzw. Fahrer einem Depot zugeordnet, und die Fahrer dürfen nur Fahrzeugaktivitäten bedienen, die von Fahrzeugen ausgehen, die diesem Depot zugeordnet sind (vgl. die Annahmen zu Problemstellungen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung in Abschnitt 4.1.4). Fahrzeugwechsel in einem Dienst erfolgen dann auch bei mehreren Depots nur zwischen den Fahrzeugen dieses bestimmten Depots.

Nicht nur bei geteilten Diensten kann es in der Praxis aus Flexibilitätsgründen sinnvoll sein, dass Fahrer in einem Dienst die Fahrzeuge unterschiedlicher Depots bedienen dürfen, also zwischen Fahrzeugen verschiedener Depots wechseln können. Für ein Wechseln zwischen Fahrzeugen mehrerer Depots sind bei der Dienstbildung einige Änderungen zur bisher beschriebenen Vorgehensweise notwendig.

Bei *sequenziellen Planungsproblemen* besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen einer Eindepot-abhängigen Modellierung von Fahrzeugwechsellmöglichkeiten und einer Mehrdepot-abhängigen Modellierung. Statt in Dienstgenerierungsnetzwerken nur zwischen den Ablösemöglichkeiten der Umläufe eines Depots Verbindungen zu modellieren, werden Pausen- und Transferkanten zwischen den Ablösepunkten aller Umläufe einer Depotmenge eingefügt.

Bei *teilintegrierten Planungsproblemen* werden Dienstgenerierungsnetzwerke nicht nur von den Umlaufplanungsnetzwerken eines Depots abgeleitet, sondern von allen Depots, zwischen welchen Fahrzeugwechsel erlaubt sein sollen. Im Pricing ist dann beim Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme auf Dienstelement-Abschnitt-basierten Dienstgenerierungsnetzwerken darauf zu achten, dass bei der Diensterstellung je Dienststück nur Fahrzeugaktivitäten nacheinander bedient werden, die aus dem gleichen Depot stammen. Dazu wird auf den Kanten hinterlegt, mit welchen Depots die durch die Kante repräsentierte Aktivität assoziiert sein kann.

Alternativ können mit einem zweistufigen Pricing im Sinne von [Huisman, 2004] oder [Steinzen, 2007] zunächst je Depot Dienststücke erstellt werden. Statt mit den Dienststücken danach Dienstgenerierungsnetzwerke je Depot aufzubauen, können Dienststücke mehrerer Depots, über die Fahrzeugwechsel erlaubt sein sollen, in einem Dienststücknetzwerk kombiniert genutzt werden.

Bei *integrierten Planungsproblemen* ändert sich neben der Dienstbildung auch die Formulierung des Master-Problems. In Formulierung (6.1)-(6.6) (MD-IVCSP) mit Fahrzeugwechseln je Depot garantieren Kopplungsbedingungen (6.4), dass je Depot und Kante des zugehörigen Umlaufplanungsnetzwerkes die durch die Kante repräsen-

tierte Aktivität von der passenden Anzahl Fahrer durchgeführt wird. Dabei müssen Fahrer und Fahrzeug demselben Depot zugeordnet sein.

Sei \mathcal{D} die Menge aller Depots und sei D^u die Menge aller Depots mit deren Fahrzeugen Fahrer ihren Dienst ausführen dürfen, mit $D^u \subseteq \mathcal{D}$ und $u \in \mathcal{U}$. Dabei sei $\mathcal{U} = \{1, \dots, m\}$ eine Menge, in welcher Depots in Gruppen D^u aufgeteilt sind, die aus einzelnen und mehreren Depots bestehen, je nachdem zwischen welchen Fahrzeugen aus welchem Depot gewechselt werden darf. Dazu sei K^u die Menge aller Dienste für Gruppe $u \in \mathcal{U}$ und x_k^u mit $k \in K^u$ die dazugehörige binäre Entscheidungsvariable, die aussagt, ob Dienst k in Gruppe u ausgewählt ist oder nicht. Die Fahrzeugaktivitäten, die in mehreren Umlaufplanungsnetzwerken vorkommen, müssen nicht je Depot sondern je Gruppe bedient werden. Abbildung 7.3 gibt dazu ein Beispiel für die Umlaufplanungsnetzwerke zweier Depots. Kopplungsbedingungen können dann statt

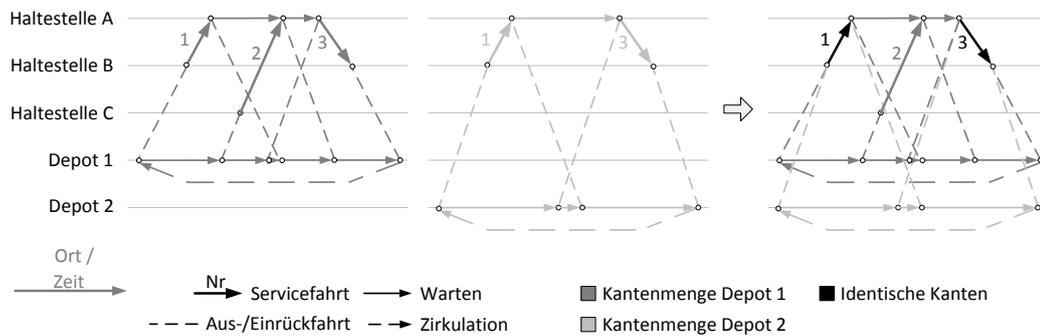


Abbildung 7.3: Identische Kantenmenge aus den Umlaufplanungsnetzwerken zweier Depots

pro Depot und Kante für eine Kantenmenge über alle Depots in einer Gruppe formuliert werden. Die Menge aller Kanten, die sowohl ein Fahrzeug als auch einen Fahrer erfordert, sei je Gruppe u durch $\tilde{A}^u = \bigcup_{d \in D^u} \tilde{A}^d$ definiert. Dabei sind Kanten aus zwei Umlaufplanungsnetzwerken genau dann identisch, wenn sie die gleiche Fahrzeugaktivität repräsentieren, d.h. ihre Start- und Endknoten die gleiche Zeit-Ort-Kombination abbilden und der Kantentyp (Service-, Leerfahrt- oder Wartekante) identisch ist. Es gilt dann für die Kantenanzahl und somit auch für die Anzahl der Kopplungsbedingungen: $\sum_{u \in \mathcal{U}} |\tilde{A}^u| \leq \sum_{d \in \mathcal{D}} |\tilde{A}^d|$. Kopplungsbedingungen (6.4) aus Formulierung (6.1)-(6.6) werden wie folgt geändert:

$$\sum_{k \in K^u(i,j)} x_k^u - \sum_{d \in D^u} y_{ij}^d = 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^u \quad (7.1)$$

Nebenbedingungen (7.1) stellen dann sicher, dass jede durch eine Kante repräsentierte Fahrzeugaktivität von der passenden Anzahl Fahrer durchgeführt wird, wobei Fahrer und Fahrzeug derselben Gruppe von Depots zugeordnet sein müssen.

Eine ähnliche Formulierung für sogenannte „unbeschränkte Fahrzeugwechsel“ ist bei [Steinzen, 2007] beschrieben. Dort werden die Fahrzeugwechsel allerdings über alle Depots erlaubt. Außerdem werden dort die Dienste so erstellt, dass Fahrzeugwechsel wie bei [Mesquita und Paiais, 2008] auch ohne Pause innerhalb eines Dienststücks erlaubt sind (vgl. auch Abschnitt 4.2.3).

Die Pricing-Probleme zur integrierten Dienstgenerierung können wie im teilentegrierten Fall modelliert werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass jeweils alle möglichen Fahrzeugaktivitäten der Depots betrachtet werden und nicht nur wie im teilentegrierten Fall die Teilmenge der sich in der aktuellen Flusslösung des Umlaufplanungsproblems befindenden Aktivitäten. Die Netzwerkmodelle zur Dienstgenerierung enthalten also mehr Kanten und Knoten, sodass die entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme schwerer zu lösen sind.

Mehrdepot-Wechsel in Depotgruppen

Oben beschriebene Fahrzeugwechsel zwischen den Fahrzeugen eines oder mehrerer Depots erfolgen unter der Bedingung, dass Fahrzeuge bzw. Umläufe immer in dem Depot enden, aus welchem sie gestartet sind. So wird garantiert, dass für den folgenden Tag ebenso viele Fahrzeuge am Abend im Depot stehen wie am Morgen. Um unnötige Leerfahrten zur Sicherstellung der Fahrzeuganzahl zu vermeiden, werden die Umläufe daher pro Tag so gebildet, dass die Restriktion schon während des Tages eingehalten wird.

Um kostengünstigere Umlaufpläne zu ermöglichen, schlägt [Kliwer, 2005] das sogenannte *Depotgruppen-Konzept* vor: Aus der Menge \mathcal{D} aller Depots werden Untermengen \mathcal{D}_u gebildet, die *Depotgruppen* genannt werden. Diese Untermengen müssen nicht zwingend disjunkt sein. Für Depotgruppen gilt dann, dass ein Fahrzeug, das in einem Depot $d \in \mathcal{D}_u$ gestartet ist, seinen Tagesumlauf in jedem anderen Depot aus \mathcal{D}_u beenden bzw. für Pausen in einem Depot unterbrechen darf. So werden in jedem Depot $d \in \mathcal{D}_u$ zwar über Nacht nicht zwingend dieselben Fahrzeuge stationiert, aber stets stehen am Morgen genügend Fahrzeuge zur Bedienung aller Servicefahrten aus der gleichen Depotgruppe zur Verfügung.

In der Netzwerkrepräsentation des Umlaufplanungsproblems wird dazu eine Netzwerkschicht je Depotgruppe \mathcal{D}_u mit $u \in \mathcal{U} = \{1, \dots, m\}$ angelegt bzw. je Depotgruppen-Fahrzeugtyp-Kombination, wobei \mathcal{U} die Menge aller Depotgruppen bezeichnet. Die Netzwerkschicht einer Depotgruppe \mathcal{D}_u enthält dann für jedes Depot $d \in \mathcal{D}_u$

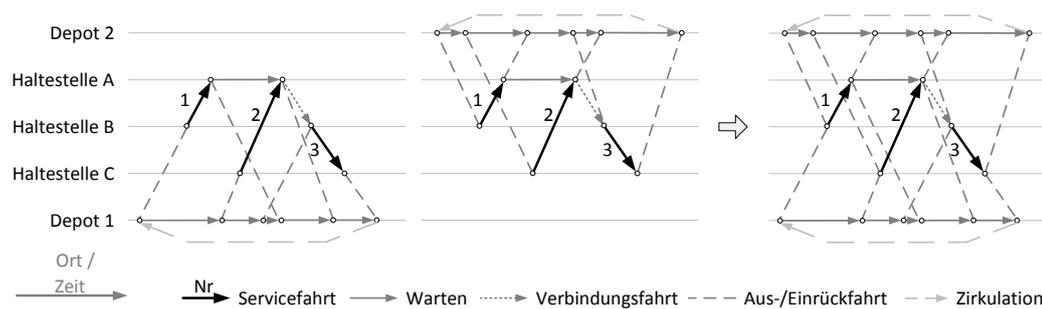


Abbildung 7.4: Aufbau der Netzwerkschicht einer Depotgruppe bestehend aus zwei Depots

eine Zeitleiste mit Zirkulationsflusskante, sowie Aus-/Einrückfahrten zu/von allen in dieser Netzwerkschicht bedienbaren Servicefahrten. Abbildung 7.4 stellt eine solche Netzwerkschicht exemplarisch für zwei Depots einer Depotgruppe dar. Außerdem muss im Modell eine Restriktion ergänzt werden, die garantiert, dass Kapazitätsrestriktionen eines Depots über alle Depotgruppen eingehalten wird. Für Details zu einer entsprechenden Formulierung des Mehrdepot-Umlaufplanungsproblems sei auf [Kliwer, 2005] verwiesen.

Wenn für Dienste Fahrzeugwechsel zwischen den Fahrzeugen einer Depotgruppe erlaubt sind, ändert sich für die Dienstbildung nicht viel verglichen mit der beschriebenen Modellierung für Fahrzeugwechsel zwischen mehreren Depots. Eine Änderung besteht lediglich darin, dass (im teilintegrierten und integrierten Fall) in einem Dienst Aus-/Einrückmöglichkeiten zu/von anderen Depots mit jedem Fahrzeug einer Depotgruppe erlaubt sind.

7.1.4 Berücksichtigung von Ablösemöglichkeiten

Die Realisierbarkeit unterschiedlicher Ablösemöglichkeiten für Fahrer in Modellen und Methoden zur Umlauf- und Dienstbildung wurde allgemein in Abschnitt 7.1.1 beschrieben und in Kombination mit Pausen- und Fahrzeugwechsellmöglichkeiten in den vorherigen Abschnitten 7.1.2 und 7.1.3 beleuchtet. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt bei der Umsetzung von Ablösemöglichkeiten betrifft Beginn und Ende eines Dienstes.

Abhängig vom Verkehrsunternehmen können Dienste entweder nur in einem Depot starten und enden oder auch an beliebigen durch Ablösepunkte vorgegebenen (End-)Haltestellen im Liniennetz. In der Regel werden bei Start oder Ende eines Dienstes an einer Haltestelle mit Ablösemöglichkeit außerhalb eines Depots noch Transferzeiten

zu bzw. von dieser Haltestelle als Arbeits- und Schichtzeit im Dienst eingeplant. Diese können in den Dienstgenerierungsnetzwerken strukturell durch Auf- und Abrüstkanten (siehe Abschnitt 6.2.1) mit entsprechender Dauer abgebildet werden.

Transferzeiten zu Beginn oder am Ende eines Dienstes müssen aber nicht zwangsweise von Depot oder Haltestelle abhängig sein. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass für einen Dienst Transferzeiten einzuplanen sind, sobald sich Start- und Endort des Dienstes unterscheiden, und keine Transferzeiten, falls Start- und Endort identisch sind. Im Fall unterschiedlicher Orte wird dann in der Regel im Dienst eine haltestellenabhängige Transferzeit von und zum Depot ergänzt.

Transferzeiten können im Dienstgenerierungsnetzwerk dann also nicht mehr auf Auf- und Abrüstkanten abgebildet werden, sondern sind pfadabhängig zu berücksichtigen. Im Algorithmus zum Lösen der entsprechenden ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme zur Dienstgenerierung (siehe Abschnitt 6.2.4) werden zu ergänzende Transferzeiten und damit zusammenhängende Arbeits- und Schichtzeiten sowie Kosten dann im Senkeknoten behandelt.

7.1.5 Besetzbarkeit von Fahrzeugen außerhalb der Depots

Bei einigen Verkehrsbetrieben müssen Fahrzeuge außerhalb der Depots nicht immer zwangsläufig mit einem Fahrer besetzt sein, z.B. bei längeren Standzeiten. Die Modellierung der Master-Probleme für Umlauf- und Dienstplanung wird dann entsprechend dieser Anforderung angepasst.

Im *sequenziellen und teilintegrierten Fall* ändert sich im Master-Problem lediglich die Abdeckungsbedingung für Aufgaben. Die gesamte von Diensten $k \in K$ zu leistende Aufgabenmenge \mathcal{T} wird unterteilt in Aufgaben \mathcal{T}^+ , die zwingend die Anwesenheit eines Fahrers erfordern (z.B. Servicefahrten und Leerfahrten und ggf. Wendezeiten), sowie Aufgaben \mathcal{T}^- bei denen kein Fahrer ein Fahrzeug besetzen muss (z.B. Wendezeiten oder längere Standzeiten), sodass gilt $\mathcal{T} = \mathcal{T}^+ \cup \mathcal{T}^-$. Sei b_t der Bedarf an Fahrern je Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ bzw. die Anzahl der für Fahrer für eine Aufgabe zu nutzenden Busse, dann lassen die Aufgaben-Abdeckungsbedingungen für das sequentielle bzw. teilintegrierte Planungsproblem wie folgt formulieren:

$$\sum_{k \in K(t)} x_k = b_t \quad \forall t \in \mathcal{T}^+ \quad (7.2)$$

$$\sum_{k \in K(t)} x_k \leq b_t \quad \forall t \in \mathcal{T}^- \quad (7.3)$$

mit den binären Entscheidungsvariablen für Dienste

$$x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (7.4)$$

Aufgabenabdeckungsbedingungen (7.2) garantieren, dass jede Aufgabe, die zwingend einen Fahrer erfordert, entsprechend bedient wird. Restriktionen (7.3) stellen sicher, dass für die optional zu besetzenden Aufgaben auf Fahrzeugen nicht mehr Fahrer bereit stehen, als Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Im *integrierten Planungsproblem* MD-IVCSP ändern sich im Master-Problem die Kopplungsbedingungen (6.4) zwischen Umlauf- und Dienstplanungsproblem. Unterschieden wird dabei im Umlaufplanungsnetzwerk von Depot $d \in \mathcal{D}$ zwischen der Kantenmenge $\tilde{A}^{+,d}$, die Aufgaben repräsentiert, die zwingend einen Fahrer $k \in K^d$ erfordern, und der Kantenmenge $\tilde{A}^{-,d}$ mit den Aufgaben, die nicht zwingend einen Fahrer vorschreiben. Die Kopplungsbedingungen werden dann folgendermaßen definiert:

$$-y_{ij}^d + \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i, j) \in \tilde{A}^{+,d} \quad (7.5)$$

$$-y_{ij}^d + \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d \leq 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i, j) \in \tilde{A}^{-,d} \quad (7.6)$$

wobei für die Entscheidungs-Flussvariablen y und die Entscheidungsvariablen für Dienste x nach wie vor bei Flusskapazitäten u gilt

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i, j) \in A^d \quad (7.7)$$

$$x_k^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (7.8)$$

Kopplungsbedingungen (7.5) garantieren, dass die durch Kanten im Umlaufplanungsnetzwerk repräsentierten Aufgaben mit zwingender Fahrerbeteiligung so oft abgedeckt werden, wie ein Fahrzeug dafür bereit gestellt wurde. Durch Kopplungsbedingungen (7.6) werden für die Kanten, die Aufgaben ohne zwingende Fahrerbeteiligung repräsentieren, höchstens so viele Fahrer zugelassen, wie der Netzwerkfluss hoch ist, also die Anzahl der bereit gestellten Fahrzeuge.

Für die Erstellung von zulässigen Diensten sind im Column Generation-Pricing keine Änderungen notwendig. Das in Abschnitt 6.2.4 beschriebene Verfahren kann ohne Modifikation eingesetzt werden.

7.2 Fallstudie zur Umlauf- und Dienstplanung

In den vorherigen Abschnitten wurden einige Modellierungs- und Lösungsansätze vorgestellt, mit denen unterschiedliche Anforderungen zur Umlauf- und Dienstbildung berücksichtigt werden können. Zu den entwickelten Modellen und Methoden soll in diesem Abschnitt die Anwendbarkeit beispielhaft anhand eines Planungsszenarios eines Verkehrsunternehmens einer europäischen Großstadt untersucht werden. Dieses Szenario zeichnet sich durch ein vergleichsweise komplexes Regelwerk bezüglich betriebsspezifischer Regelungen zur Dienstbildung aus. Grundlage für das zu untersuchende Szenario bildet ein Ausschnitt aus den Daten eines Betriebstages aus dem Fahrplan des Jahres 2010. Neben einer Validierung der Anwendbarkeit besteht ein weiteres Ziel der Untersuchung darin, das mögliche Einsparpotenzial beim Einsatz von Optimierungssoftware in der Planung zu evaluieren. Dabei soll überprüft werden, ob und wie sich die Dienstplanstruktur des Verkehrsunternehmens bei einer annähernd kostenoptimalen Lösung des Umlauf- und Dienstplanungsproblems ändern würde.

Abschnitt 7.2.1 beschreibt zunächst die zur Untersuchung zur Verfügung gestellte Datenbasis. Die bei der Umlauf- und Dienstbildung zu beachtenden betriebsspezifischen Regelungen sind darauf folgend in Abschnitt 7.2.2 aufgeführt. Einen Überblick über die Ergebnisse der Untersuchung gibt Abschnitt 7.2.3.

7.2.1 Datenbasis des zu untersuchenden Szenarios

Das zu untersuchende Szenario umfasst die für einen Werktag zu verplanenden Fahrten dreier Linien. An diesem Werktag werden mit den drei Linien insgesamt 530 Servicefahrten angeboten mit einer Gesamtlastzeit von 588h 54min. Die erste Auslastungsspitze liegt im morgendlichen Zeitraum von 7:40 Uhr und 9:40 Uhr in welchem stets 40 bis 46 Servicefahrten parallel durchzuführen sind. Eine zweite Auslastungsspitze wird nachmittags zwischen 13:00 Uhr und 15:00 Uhr erreicht mit zwischen 40 und 47 parallel durchzuführenden Servicefahrten. Zwischen 7:30 Uhr und 18:00 Uhr sind durchgehend mindestens 35 Servicefahrten gleichzeitig zu bedienen. Abbildung 7.5 fasst den zeitlichen Verlauf der Fahrten während des Tages zusammen.

An diesem Tag werden vom Verkehrsunternehmen fünf verschiedene Fahrzeugtypen genutzt. Da jede Servicefahrt mit jedem Fahrzeugtyp durchgeführt werden darf und die Kostenbewertungen der Typen gleich sind, erübrigt sich eine Unterscheidung der Fahrzeuge für die Untersuchung. Fahrzeuge können nur am Betriebshof des Verkehrsunternehmens stationiert werden. Pausen- und Ablösemöglichkeiten sind aber auch an einigen Endhaltestellen außerhalb des Betriebshofes gegeben. Die 530 Fahrten haben insgesamt 425 Ablösemöglichkeiten innerhalb der Fahrt und/oder zu Beginn

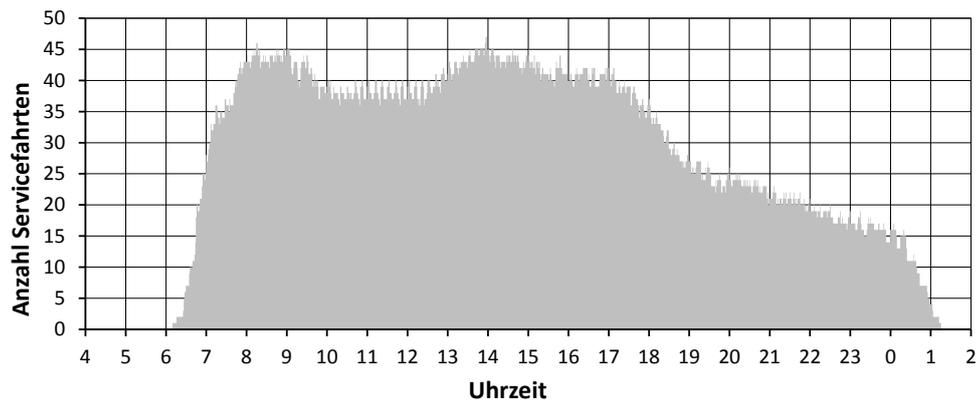


Abbildung 7.5: Ganglinie der Servicefahrten des zu untersuchenden Werktages

und/oder am Ende. Von den Servicefahrten sind 223 Fahrten ohne Ablösemöglichkeit. Da keine Unterscheidung zwischen Fahrzeugtypen notwendig ist und nur ein Betriebs- hof zur Verfügung steht, kann der Umlaufplanungsteil des Szenarios als Eindepot- Planungsproblem betrachtet werden. Für die Fahrzeuge sind Leerfahrten während des gesamten Tages zwischen allen einbezogenen Haltestellen, sowie jederzeit vom und zum Depot möglich. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Eck- daten des betrachteten Szenarios.

	Werktag
# Depots	1
# Servicefahrten	530
# Teilfahrten	892
Dauer Servicefahrten (Gesamt)	588h 54min
Dauer Servicefahrten (Durchschnitt)	1h 7min
Dauer Teilfahrten (Durchschnitt)	40min
Max # paralleler Servicefahrten	47
# Linien	3
# Haltestellen	11

Tabelle 7.1: Szenarioübersicht

7.2.2 Zu berücksichtigende betriebsspezifische Regelungen

Für die Dienstplanung sind die im folgenden beschriebenen Regeln vorgegeben. Die grundsätzlichen Regeln lassen sich in den zusammengefassten Katalog unterschiedlicher Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten aus Abbildung 7.1 einord-

nen (siehe Abschnitt 7.1.1). Vor einer Einordnung werden noch einige Details zu den genutzten Diensttypen und Schichtlagen gegeben.

Im Dienstplan können als Diensttypen bzw. Dienstarten *zusammenhängende Dienste* und *geteilte Dienste* eingeplant werden, wobei der Dienstplan maximal 18 geteilte Dienste enthalten soll. Die Eigenschaften der verwendbaren Dienstarten fasst Tabelle 7.2 zusammen. Zusammenhängende Dienste müssen in sieben definierten Schichtzeiträumen liegen. Geteilte Dienste dürfen für den Zeitraum von 0:00 Uhr bis 19:00 Uhr geplant werden. Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Schichtlagen.

Darüber hinaus sind *Kurzdienste* mit bis zu 5:30h Schichtdauer und Arbeitszeit erlaubt. Kurzdienste müssen nicht zwingend einen bestimmten Schichtzeitraum ausfüllen.

Generell müssen in Diensten bei 4:30h Lenkzeit 45 Minuten Ruhe- bzw. Pausenzeit gewährt werden. Diese müssen aber nicht am Stück gewährt werden, sondern können auch aufgeteilt in Pausen bzw. Lenkzeitunterbrechungen mit mindestens 15 Minuten Länge abgegolten werden. Dabei reichen zwei Lenkzeitunterbrechungen mit mindestens 15 Minuten aus, wenn diese insgesamt mindestens 35 Minuten umfassen und der Anteil pausenfähiger Wendezeiten im Dienst mindestens 11% der Gesamtlenkzeit des Dienstes entspricht. Lenkzeitunterbrechungen werden als Arbeitszeit angesehen.

	zusammenh. Dienst		geteilter Dienst	
	Min	Max	Min	Max
Dienstdauer	05:30	09:15	05:30	13:00
Arbeitszeit	05:30	09:15	05:30	09:00
Lenkzeit	04:30	08:45	00:10	08:45
Ununterbrochene Lenkzeit	00:10	04:30	00:10	04:30
Lenkzeitunterbrechung	00:15	00:45	00:15	00:45
Dienstunterbrechung	–	–	01:00	06:30
# Dienststücke/-teile	3	5	2	2

Tabelle 7.2: Generelle Eigenschaften der Dienstarten (mit Zeiten in hh:mm)

Pausenmöglichkeiten für Dienste sind am Depot, sowie an zwei Endhaltstellen gegeben (siehe Ausprägungen P1 und P3 in Abbildung 7.1). Die erste Pause für Dienste, die einer Spät- oder Nachtschicht zuordenbar sind, muss tageszeitabhängig im Zeitraum von 17:30 Uhr und 20:00 Uhr liegen (P5). Generell muss vor Beginn der ersten Pause in einem Dienst mindestens eine Stunde Arbeitszeit geleistet werden, sowie mindestens eine Stunde nach Ende der letzten Pause (P6). Bei Diensten, die einer Tages-Schicht zuordbar sind, müssen vor der ersten Pause dahingegen nur 30 Minuten geleistete Arbeitszeit liegen.

Schicht	Beginn		Ende	
	frühester	spätester	frühestes	spätestes
Nacht-Früh	00:00	05:59	00:00	15:59
Früh	06:00	09:59	06:00	16:39
Tag	08:00	09:59	16:40	18:39
Tag (Geteilt)	00:00	19:00	00:00	19:00
Übergang	10:00	20:00	16:40	20:00
Zwischen	11:00	20:00	16:41	23:00
Spät	14:30	24:00	23:01	24:00
Nacht-Spät	15:30	24:00	24:00	03:00

Tabelle 7.3: Schichtlagen (mit Zeiten in hh:mm)

Fahrzeugwechsel sind grundsätzlich nur bei geteilten Diensten erlaubt. Die beiden Dienstteile können auf unterschiedlichen Fahrzeugen absolviert werden. Ein möglicher Fahrzeugwechsel erfolgt also in der Dienstteilung (F7). Bei geteilten Diensten kann das Fahrzeug somit im Depot „gewechselt“ werden (F1), sowie an den (End-)Haltestellen, die Ablösemöglichkeiten bieten. In zusammenhängenden Diensten darf das nicht Fahrzeug gewechselt werden. Allerdings werden vom Verkehrsunternehmen vereinzelt Ausnahmen von dieser Regelung gemacht. Um „gute“ zulässige Dienstpläne bilden zu können, werden in die Dienstpläne oftmals einige wenige Dienste mit Fahrzeugwechseln eingeplant, sodass in den Dienstplänen bei ca. 3% der zusammenhängenden Dienste Fahrzeugwechsel erlaubt sind. Für den Einsatz des entwickelten Optimierungssystems bedeutet das, dass neben Diensten ohne erlaubte Fahrzeugwechsel auch Dienste mit erlaubten Fahrzeugwechseln erstellt werden sollten, um „gute“ zulässige Lösungen des Umlauf- und Dienstplanungsproblems finden zu können. Die Fixkostenbewertung der Dienste mit erlaubten Fahrzeugwechseln ist dabei mit hohen Strafkosten zu versehen, sodass diese nur in Ausnahmefällen in die Lösung aufgenommen werden. Für diese möglichen Ausnahmefälle gelten ähnliche lokale und temporale Ausprägungen der Fahrzeugwechsellmöglichkeiten wie bei geteilten Diensten, d.h. Fahrzeugwechsel sind in diesen Ausnahmediensten in der Pause am Depot zulässig, sowie an den Endhaltestellen, die Pausenmöglichkeiten bieten.

Ablösemöglichkeiten für alle Dienste existieren zusätzlich zum Depot an sieben weiteren Orten bzw. (End-)Haltestellen (A1, A2, A3). Eine dieser Endhaltestellen zeichnet sich dadurch aus, dass sie wie das Depot sowohl Pausen- als auch Ablöseort ist. Abgelöst werden darf nach einer minimalen Dienstdauer bzw. verrichteten Arbeitszeit eines Dienstes (A6). Details dazu können aus Tabelle 7.2 über die für Fahrer verwendeten Dienst- und Schichttypen entnommen werden. Ein Fahrer löst also zu

Beginn seines Dienstes ab bzw. kann am Ende seines Dienstes abgelöst werden (A8). Bei geteilten Diensten gilt die Ablösemöglichkeit natürlich je Dienstteil.

Zusätzlich gelten noch einige weitere zeitliche Vorgaben. Für die *Fahrzeugvorbereitung* und die *-nachbereitung im Depot* sind zehn Minuten einzuplanen. Diese Vor- und Nachbereitungszeiten am Fahrzeug werden zur Lenkzeit gezählt.

Vor- und Nachbereitungszeiten für Fahrer werden abhängig gemacht vom Standort und von *Transferzeiten*: Endet ein Dienst an dem Ort, an welchem er begonnen hat, wird jeweils eine Zeitpauschale von fünf Minuten als Vor- und Nachbereitungszeit zur Arbeitszeit gezählt und es fallen keine Transferzeiten an. Unterscheiden sich Start- und Endort, entfällt die Zeitpauschale und stattdessen ist eine Transferzeit vom Depot zum Startort und vom Endort zum Depot als Arbeitszeit im Dienst zu berücksichtigen, sodass der Fahrer seinen Dienst am Depot starten und enden kann. Bei geteilten Diensten gilt diese Regelung je Dienstteil. Dabei sind die Transferzeiten je Ablösepunkt abhängig gemacht von der Mitnahmemöglichkeit als Passagier in einem Bus gegebenenfalls ergänzt um die Dauer eines Fußweges oder – falls es zeitlich kürzer ist – nur von der Dauer eines Fußweges. Die im betrachteten Szenario zu berücksichtigenden Transferzeiten variieren dabei zwischen 5 und 32 Minuten.

Außerdem sind im Fahrplan für jede Fahrt bis zu fünf Minuten *Mindest-Wendezeit* eingeplant. Dabei sind zwei Minuten dieser Wendezeit nicht pausenfähig, d.h. nicht für eine Pause nutzbar. Die Mindest-Wendezeit einer Servicefahrt kann entfallen, falls nach Beendigung der Fahrt ins Depot eingerückt werden soll. Wird vor der Mindest-Wendezeit abgelöst, startet der neue Dienst logischerweise dann mit der Mindest-Wendezeit.

7.2.3 Ergebnisse

Alle im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anforderungen lassen sich auf die im Rahmen des entwickelten Optimierungssystems umgesetzten Anforderungen zurückführen. Für Details zu generellen Modellierungen und eingesetzten Lösungsverfahren, sowie die Umsetzungen einzelner Anforderungen sei auf die Ausführungen in Kapitel 6 und Abschnitt 7.1 verwiesen.

Obwohl es sich beim betrachteten Szenario um ein Planungsproblem im städtischem Bereich handelt, können mit einer im Stadtverkehr üblichen sequenziellen Planung von Umläufen und Diensten keine guten zulässigen Umlauf- und Dienstpläne gebildet werden: Durch die geforderte enge Kopplung von Fahrzeug und Fahrer müssten in den Umläufen bereits Pausenmöglichkeiten für einen Dienst geschaffen werden. Nur so können im Dienstplanungsschritt zum Umlaufplan kompatible (und kosteneffiziente) Dienste bestimmt werden, in welchem der Fahrer während des gesamten Dienstes

inklusive Pause an ein Fahrzeug „gebunden“ ist. In den durch das Lösen des Umlaufplanungsproblems ermittelten kostenoptimalen Umläufen sind diese Pausenmöglichkeiten allerdings nicht gegeben, da dort die Fahrten möglichst effizient, d.h. ohne größere Wartezeiten zwischen der Bedienung, hintereinander ausgeführt werden. Eine alternative „künstliche“ Schaffung von Pausenzeiträumen in den Umläufen führt zu ineffizienten Umläufen, bei denen außerdem nicht garantiert ist, dass zu diesen auch gute Dienste erstellt werden können (vgl. auch Abschnitt 2.2.1 zu den genannten Problemen bei einer sequenziellen Planungsweise). Das im Szenario betrachtete Planungsproblem wird daher als integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem modelliert und gelöst.

Die Berechnung wird auf einem Dell OptiPlex 755 PC mit Intel Pentium Dual-Core 3,0 GHz und 4 GB Hauptspeicher unter Windows XP Professional durchgeführt. Um im Rahmen des Lösungsverfahrens lineare und gemischt ganzzahlige Optimierungsprobleme zu lösen, wird Cplex in der Version 11.0.1.0 eingesetzt.

Tabelle 7.4 stellt die errechneten Ergebnisse dem vom Verkehrsunternehmen genutzten Dienstplan gegenüber. Unterschieden wird zwischen zwei Berechnungsszenarien: Einmal soll die Anzahl geteilter Dienste nicht erhöht werden (*Opt A*) und einmal darf sich die Anzahl im erlaubtem Rahmen bewegen (vgl. Abschnitt 7.2.2) (*Opt B*). Die Ergebnisse zeigen ein Einsparpotenzial an Diensten von gut 5%, sowie die Einsparmöglichkeit eines Fahrzeuges, was ca. 2% der eingesetzten Fahrzeuge entspricht.

	Original	Opt A	$\Delta\%$	Opt B	$\Delta\%$
Anzahl Dienste	93	88	-5,4	88	-5,4
davon geteilte Dienste	15 (16,1%)	15 (17,1%)	+0,0	17 (19,3%)	+13,3
davon Kurzdienste	7 (7,5%)	8 (9,1%)	+14,3	8 (9,1%)	+14,3
davon zusammenh. Dienste mit Fahrzeugwechsel	2 (2,2%)	0 (0,0%)	-100,0	0 (0,0%)	-100,0
Anzahl Fahrzeuge	48	48	+0,0	47	-2,1
Zeit auf Fahrzeugen (Gesamt)	712:26	703:30	-1,3	702:17	-1,4
Wirkungsgrad	82,7%	83,7%	+1,2	83,9%	+1,5
Arbeitszeit (Gesamt)	742:07	727:25	-2,0	725:46	-2,2
Arbeitszeit (Durchschnitt)	07:59	08:16	+3,6	08:15	+3,4
Wirkungsgrad	79,3%	81,0%	+2,1	81,1%	+2,3
Schichtdauer (Gesamt)	785:11	769:48	-2,0	763:12	-2,8
Schichtdauer (Durchschnitt)	8:27	8:44	+3,6	8:40	+2,7
Wirkungsgrad	75,0%	76,5%	+2,0	77,2%	+2,9
Rechenzeit	–	4:58	–	4:36	–

Tabelle 7.4: Ergebnisübersicht über das Werktagszenario mit Zeiten in hh:mm

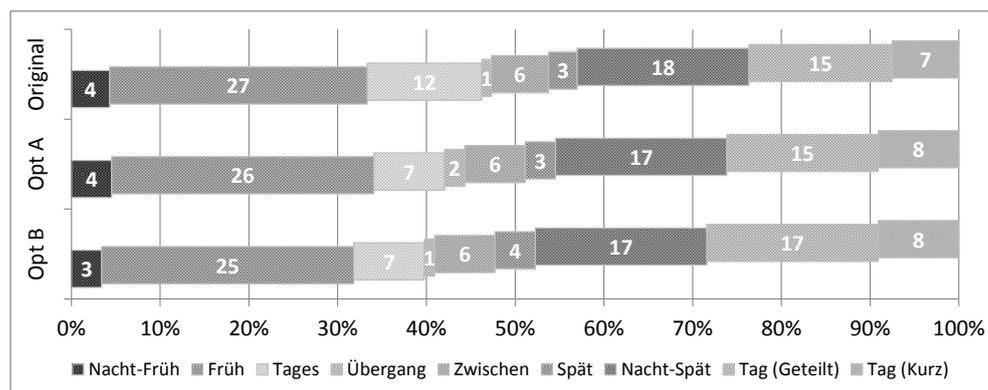


Abbildung 7.6: Vergleich der Dienstplanstrukturen – Unterschiedliche Dienst- und Schichttypen je Dienstplan absolut und anteilig zusammengefasst

Wie erwartet, lässt sich ein Einsparpotenzial allerdings nur mit einer leichten Strukturänderung des Dienstplans erkaufen. Abbildung 7.6 veranschaulicht diese Änderung der Dienstplanstrukturen: Damit die Anzahl einzusetzender Fahrzeuge reduziert werden kann, muss die Arbeit einiger zusammenhängender Dienste zur Tages-Schicht auf geteilte Dienste umverteilt werden. Durch eine Verlängerung der Arbeitszeit in den Frühdiensten kann noch mehr Arbeit der Tages-Dienste aufgenommen werden. So kann zwar insgesamt die zu leistende Arbeitszeit um ca. 16 Stunden gesenkt werden, d.h. um ca. 2%. Dies liegt u.a. an weniger anfallende Transferzeiten. Aufgrund der Verringerung der Dienstanzahl erhöht sich aber konsequenterweise die durchschnittliche in einem Dienst zu verrichtende Arbeitszeit. Die Ergebnisse zeigen somit in erster Linie die theoretischen Verbesserungsmöglichkeiten aus Kostensicht auf. Ein kritisch zu betrachtender Aspekt höchst kosteneffizienter Umlauf- und Dienstpläne in diesem Szenario kann also sein, dass durch die Anhebung der durchschnittlichen Arbeitszeit die Sozialverträglichkeit der Dienste nicht zwingend gewährleistet ist.

7.3 Zusammenfassung

Mit diesem Kapitel wurde verdeutlicht, dass sich individuelle betriebsspezifische Anforderungen an die Umlauf- und Dienstbildung in den eingesetzten Optimierungsmethoden umsetzen lassen. Mit den beschriebenen Methoden ist also eine Voraussetzung geschaffen, um unterschiedliche Umlauf- und Dienstplanungsprobleme (aus der Praxis) lösen zu können.

Im Planungsszenario eines Verkehrsunternehmens einer europäischen Großstadt konnten so für einen bestehenden Umlauf- und Dienstplan Einsparmöglichkeiten in

einer Höhe von 5% der ursprünglich geplanten Dienste und 2% der ursprünglich eingesetzten Fahrzeuge ermittelt werden. Außerdem wurde anhand der durchgeführten Fallstudie noch einmal deutlich, dass gewünschte Kriterien wie z.B. die Sozialverträglichkeit von Diensten explizit in Modellen zur Umlauf- und Dienstbildung (z.B. bei der Kostenbewertung) zu berücksichtigen sind – ebenso, wie Ähnlichkeitsaspekte beim Wunsch nach ähnlichen Ressourceneinsatzplänen explizit abgebildet werden müssen.

Teil III

Neue Ansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen

Kapitel 8

Bewertung von Ähnlichkeit

Entsprechend der Schritte S1 und S2 aus Kapitel 5 wurden in den vorherigen beiden Kapiteln die grundlegenden Voraussetzungen für eine Umlauf- und Dienstplanung mit einer Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten geschaffen, indem die Lösbarkeit von (praktischen) Problemstellungen zur Umlauf- und Dienstplanung aufgezeigt wurde. In diesem Teil der Arbeit wird untersucht, wie Ähnlichkeitsziele in der Ressourceneinsatzplanung geeignet berücksichtigt werden können. Eine entscheidende Frage dabei ist, wie solche Ähnlichkeitsziele definiert werden können. Gemäß Schritt S3 aus Kapitel 5 werden daher in diesem Kapitel mögliche Bewertungen von Ähnlichkeit in der Umlauf- und Dienstplanung vorgeschlagen.

Von Verkehrsunternehmen sind zur Bedienung von Servicefahrten (kosteneffiziente) Umläufe und/oder Dienste gewünscht, die ohne große Modifikationen an mehreren Tagen genutzt werden können. Ein wesentlicher Aspekt der Bewertung ist also die *Wiederholbarkeit* geplanter Ressourceneinsätze.

Die Wiederholbarkeit wird grundsätzlich bereits durch die in der Planung einbezogenen Fahrpläne bestimmt. Ist eine Servicefahrt nur in einem der betrachteten Fahrpläne zu bedienen, führt die Einplanung dieser Fahrt in einen Umlauf oder Dienst zu einem Ressourceneinsatz, der in dieser Form nur an diesem bestimmten Tag nutzbar ist. Für welche Tage ein ähnlicher Ressourceneinsatz angestrebt werden soll, ist in der Praxis zwar in der Regel klar. So sollen z.B. Wochentage ähnlich geplant werden, während Pläne für das Wochenende nicht zwingend ähnlich zu den an einem Wochentag sein müssen bzw. sein können (siehe Abschnitt 2.3). Allerdings fehlen in der wissenschaftlichen Literatur Hilfsmittel, die anzeigen können, für welche Fahrpläne eine gemeinsame, ähnliche Planung des Ressourceneinsatzes geeignet ist und für welche nicht. Dazu sollen Hilfsmittel vorgeschlagen werden, die die Wiederholbarkeit des Inputs von Planungsproblemen bewerten. Ein Teil dieses Kapitels beschäftigt sich daher mit der *Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen*.

Im anderen Teil dieses Kapitels wird dann die Bewertung des Outputs von Planungsproblemen, also die *Bewertung der Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen* dis-

kutiert. Vorgeschlagen werden Möglichkeiten zur Bewertung der Wiederholbarkeit einzelner Ressourceneinsätze, sowie zur Bewertung gesamter Ressourceneinsatzpläne.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Abschnitt 8.1 definiert zunächst ein grundlegendes Merkmal für eine Bewertung von Ähnlichkeit in der Planung. Abschnitt 8.2 beschreibt Möglichkeiten, wie die Ähnlichkeit des Inputs von Planungsproblemen, d.h. die betrachteten Fahrpläne bewertet werden können. Abschnitt 8.3 stellt Möglichkeiten vor, wie die Ähnlichkeit des Outputs von Planungsproblemen, d.h. die berechneten Ressourceneinsätze bzw. Ressourceneinsatzpläne beurteilt werden können. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der vorgeschlagenen Bewertungsmöglichkeiten und deren Eigenschaften ist in Abschnitt 8.4 zu finden.

8.1 Definition r -regelmäßiger Fahrten bzw. Aufgaben

Da Verkehrsunternehmen unterschiedliche Auffassungen besitzen, wann ein Umlauf oder Dienst als ähnlich gilt, sollen unterschiedliche Kriterien zur Ähnlichkeit bewertet werden können. Neben den Kriterien, die die Gleichheit zweier Ressourceneinsätze definieren wie z.B. bei Diensten der Diensttyp, die Arbeitszeit, oder Anfangs-/Endzeiten etc., bestimmen vor allem die in einem Ressourceneinsatz bedienten Fahrten die Ähnlichkeit. Bei einigen Unternehmen sollen regelmäßige Ressourceneinsätze nur für die regelmäßigen Fahrten gebildet werden. Bei anderen Unternehmen sollen möglichst auch die Fahrten in weitestgehend regelmäßige Umläufe/Dienste eingeplant werden, die zwar nicht an allen Tagen vorkommen, aber an mehreren. Um diese unterschiedlichen Bewertungsmaßstäbe zu berücksichtigen, wird die zur Ähnlichkeitsbewertung genutzte Fahrten-/Aufgabenmenge genauer spezifiziert. So wird nicht nur zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Fahrten unterschieden. Aus den Fahrplänen und den geplanten Ressourceneinsätzen werden alle Fahrten zur Ähnlichkeitsbewertung einbezogen, die mindestens an $r \in \mathbb{N}$ betrachteten Tagen zu bedienen sind. Die entsprechenden Fahrten werden im weiteren Verlauf als *r -regelmäßige Fahrten* (engl. *r -regular trips*) bezeichnet. Damit wird eine bei [Klabjan et al., 2001] formulierte Idee aufgegriffen, Fahrten (bzw. dort Flüge) in Gruppen einzusortieren, die etwas über die Regelmäßigkeit der auszuführenden Fahrten/Flüge aussagen (- wobei dort gilt, dass ein regelmäßiger Flug einer Gruppe in der betrachteten Woche mindestens so oft aufeinanderfolgend stattfindet, wie durch diese Gruppe angegeben ist; vgl. Abschnitt 4.3.2).

Als Notation gilt: Für die Menge aller betrachteten Tage $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$ und die für einen Tag $l \in \mathcal{L}$ gültige Menge an Servicefahrten $\mathcal{T}^l = \{1, \dots, m^l\}$ sei $Q(= Q^n) = \mathcal{T}^1 \cap \dots \cap \mathcal{T}^n$ die Menge aller regelmäßigen Fahrten. Die Menge aller r -regelmäßigen

Servicefahrten, also aller Fahrten, die an mindestens $r = 1..n$ Tagen gültig sind, sei durch Q^r beschrieben mit $Q^1 \supseteq \dots \supseteq Q^{n-1} \supseteq Q^n$.

8.2 Ähnlichkeit von Fahrplänen

Die Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen kann eine Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen unterstützen, indem erste Anhaltspunkte gegeben werden, wie unterschiedlich Ressourceneinsatzpläne für unterschiedliche Fahrpläne werden können. So kann beurteilt werden, für welche Fahrpläne aufgrund ihrer Ähnlichkeit eine gemeinsame Ressourceneinsatzplanung sinnvoll sein könnte und für welche besser nicht.

Dabei erfolgt die Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen über die Bewertung der Gleichheit von Servicefahrten. Bewertet werden die Servicefahrten, die in den Fahrplänen bedient werden müssen, die in einen Ähnlichkeitsvergleich einbezogen werden. Zwei Servicefahrten zweier Fahrpläne werden als *gleich bzw. identisch* aufgefasst, wenn ihre Start- und Endhaltestelle, ihre Anfangs- und Endzeit, sowie die verwendbaren Fahrzeugtypen und die Pausenmöglichkeiten an Start- und Endhaltestelle übereinstimmen.

Zur Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen werden im Folgenden in den Abschnitten 8.2.1 und 8.2.2 einige Visualisierungsmittel und Kennzahlen vorgeschlagen. Mit diesen soll ein Schritt in die Richtung gemacht werden, zukünftig abschätzen zu können, wie schwierig es für die zu lösenden Problemstellungen bzw. die zu bedienenden Fahrpläne ist, ähnliche (und kosteneffiziente) Ressourceneinsatzpläne zu bilden.

8.2.1 Visualisierungsmittel und qualitative Beurteilung

Ein naheliegendes Hilfsmittel zur Beurteilung der Ähnlichkeit unterschiedlicher Fahrpläne ist eine Visualisierung dieser. Dabei ist sowohl die Visualisierung örtlicher Komponenten der Servicefahrten (wie Start- und Endhaltestellen), als auch die Visualisierung zeitlicher Komponenten (wie Anfangs- und Endzeiten) nützlich für eine geeignete Beurteilung.

Ortsbezogene Darstellung

Schematische Darstellungen von regelmäßigen und unregelmäßigen Servicefahrten unterschiedlicher Fahrpläne im Liniennetz bzw. genauer noch im Straßennetz können bereits dazu beitragen, die Ähnlichkeit der betrachteten Fahrpläne zu beurteilen.

Schnell wird ersichtlich, ob eine (unregelmäßige) Fahrt von den regelmäßig bedienten Strecken abweicht. Anhand der Lage kann dann abgeschätzt werden, welche Planung für diese unregelmäßige Fahrt geeignet ist. Liegt die unregelmäßige Fahrt vergleichsweise weit außerhalb, sodass unter Umständen ein Zusatzdienst/-umlauf zu ihrer Bedienung notwendig ist? Oder lässt sich die unregelmäßige Fahrt durch Modifikation regelmäßiger Ressourceneinsätze bedienen?

Allerdings kann bei einer rein ortsbezogenen Darstellung logischerweise keine Aussage über die zeitliche Lage der Servicefahrten getroffen werden. Somit ist schwer zu beurteilen, ob und wie regelmäßige Ressourceneinsätze evtl. modifiziert werden müssten, um eine unregelmäßige Fahrt in diese Ressourceneinsätze einzuplanen.

Zeitbezogene Darstellung

Zur zeitlichen Analyse eines Fahrplans werden üblicherweise Auslastungskurven bzw. sogenannte *Tagesganglinien* verwendet, die die Anzahl (Service-)Fahrten darstellen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt aus dem entsprechenden Fahrplan eines Tages bedient werden müssen. Um für einen einzelnen Tag aufzuzeigen, welcher Fahrtenanteil im betrachteten Planungszeitraum regelmäßig oder unregelmäßig ist, bietet sich an, dies entsprechend in der Darstellung hervorzuheben. Beispiele dazu zeigen die Bilder I bis V in Abbildung 8.1, sowie die Bilder I bis III in Abbildung 8.2 für Fahrpläne von Montag bis Freitag. In den Beispielen zeigt eine Klammer in der Legende an, dass Servicefahrten dieser Kategorie nicht im Bild vorkommen. Um für mehrere Tage Unterschiede in Fahrplänen aufzuzeigen, bietet sich eine zusammengefasste Darstellung über die betrachteten Tage an. Bild VI in Abbildung 8.1 und Bild IV in Abbildung 8.2 geben jeweils ein Beispiel dazu.

Anhand dieser Visualisierungen lässt sich die zeitliche (Un-)Regelmäßigkeit von Fahrplänen unterschiedlicher Tage qualitativ bewerten: Verlaufen die Unregelmäßigkeiten durchgehend über einen gesamten Tag? Oder sind diese lokal begrenzt? Liegen Unregelmäßigkeiten in den Auslastungsspitzen? In den Tagesrandlagen? Oder nur in der Nacht? Zusätzlich mit linien- bzw. ortsbezogenen Informationen / Darstellungen kann so entschieden werden, ob die unregelmäßigen Fahrten der betrachteten Fahrpläne zusammen mit den regelmäßigen Fahrten zu planen sind oder separat.

Abbildung 8.1 zeigt beispielhaft Tagesganglinien für die Fahrpläne der Tage Montag bis Freitag einer mittelgroßen Stadt. Zu erkennen ist, dass die unregelmäßigen Fahrten in den Fahrplänen durchgehend im Tagesverlauf auszuführen sind. Diese durchgehenden Unregelmäßigkeiten sind zwar auf einen Zeitraum zwischen 6 Uhr und 17 Uhr begrenzt. Über die ganze Woche betrachtet, fallen allerdings in diesem Zeitraum

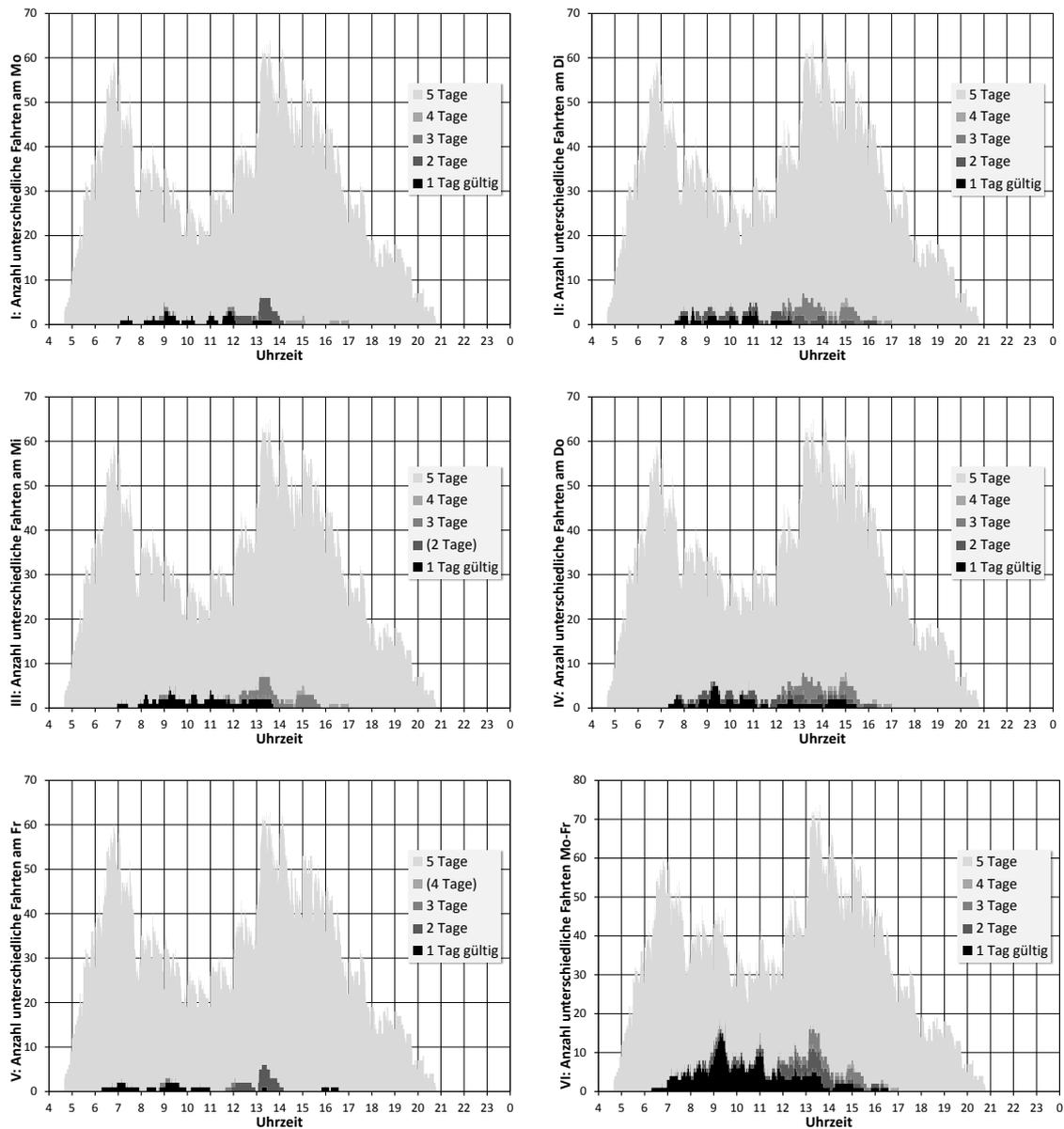


Abbildung 8.1: Beispiel A - Ganglinien zu unregelmäßigen Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer mittelgroßen Stadt von Montag bis Freitag bedient werden sollen und durchgehend über den Tag verteilt sind

viele unterschiedliche Servicefahrten, sodass vermehrt unterschiedliche Umläufe und Dienste zu planen sind.

Dahingegen gibt Abbildung 8.2 ein Beispiel für (im Tagesverlauf) lokal begrenzt stattfindende unregelmäßige Servicefahrten. Dargestellt sind die Tagesganglinien für die Fahrpläne von Montag bis Freitag einer Großstadt. Unregelmäßige Servicefahrten fallen nur in den Abend- und Nachtstunden an. Die Ressourceneinsatzpläne der einzelnen Wochentage können also sehr ähnlich zueinander geplant werden: Für die unregelmäßigen Servicefahrten in den Abendstunden müssen über die ganze Woche betrachtet maximal drei nur einmal auszuführende Dienststücke geplant werden (vier für Mo-Mi und Fr, und maximal sieben am Do). Die unregelmäßigen Fahrten in den Nachtstunden können gesondert in Umläufe und Dienste eingeplant werden und haben keinen Einfluss auf die Ähnlichkeit der Pläne, die für den Zeitraum der regelmäßigen Fahrten von 5 Uhr morgens bis 2 Uhr nachts erstellt werden können.

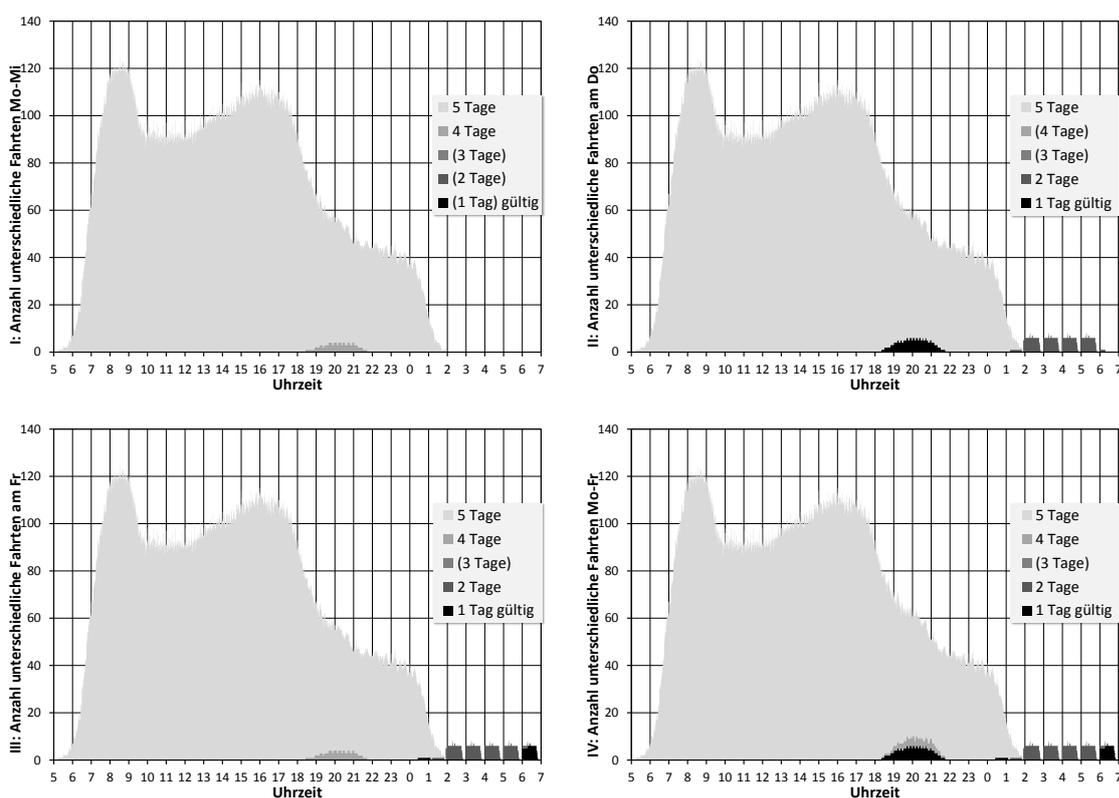


Abbildung 8.2: Beispiel B - Ganglinien zu lokal begrenzten unregelmäßigen Servicefahrten, die in den Fahrplänen einer Großstadt von Montag bis Freitag bedient werden sollen und nur in den Abend- und Nachtstunden anfallen

Kombinierte orts- und zeitbezogene Darstellung

Der Einfluss unregelmäßiger Servicefahrten auf die Planung von Umläufen und Diensten lässt sich ebenso gut abschätzen, wenn örtliche und zeitliche Informationen gleichzeitig in einer Darstellung gegeben werden. Z.B. indem die zu bedienenden regelmäßigen und unregelmäßigen Servicefahrten im Linien-/Straßennetz im Zeitverlauf dargestellt werden.

Bei einer solchen komplexen Darstellung bieten sich für eine bessere Übersichtlichkeit interaktive Betrachtungsmöglichkeiten an, wie z.B. das Verkleinern/Vergrößern von Ausschnitten entsprechender Darstellungen am Computermonitor oder Möglichkeiten zum Drehen der Darstellung. Wenn in dieser Arbeit regelmäßige und unregelmäßige Fahrten in verschiedenen Fahrplänen visualisiert werden, wird daher die oben beschriebene zeitbezogene Darstellung der kombinierten Darstellung bevorzugt.

8.2.2 Kennzahlen und quantitative Beurteilung

Noch etwas prägnanter als mit einer Visualisierung der Fahrpläne lässt sich die Ähnlichkeit unterschiedlicher Fahrpläne quantitativ durch Kennzahlen bewerten. Dabei kann sowohl die Anzahl r -regelmäßiger Fahrten am Gesamtfahrtenaufkommen, als auch die Dauer r -regelmäßiger Fahrten an der Gesamtdauer aller Fahrten erste Anhaltspunkte geben, wie ähnlich bzw. unterschiedlich die Ressourceneinsatzpläne zu unterschiedlichen Fahrplänen werden können und ob eine gemeinsame Planung sinnvoll ist.

Anteile r -regelmäßiger Fahrten am Gesamtfahrtenaufkommen

Über die Bestimmung des Anteils regelmäßiger bzw. r -regelmäßiger Servicefahrten am Gesamtfahrtenaufkommen wird schnell deutlich, welcher Anteil an Servicefahrten mindestens unterschiedlich geplant werden muss.

Tabelle 8.1 fasst die Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen über die Anteile gleicher Fahrten in den Fahrplänen beispielhaft für die Fahrpläne aus den Abbildungen 8.1 und 8.2 zusammen. Neben dem Beinamen (*Set*) sind aufgeführt der *Tag*, an welchem ein Fahrplan gültig ist, die jeweilige Gesamtanzahl der Servicefahrten ($\#$), die (*Gültigkeit*) an bestimmten Tagen und der durchschnittliche Wert zum paarweisen Vergleich aller Pläne (*P-Vergleich*). Dieser Wert zeigt an, welcher Anteil der Servicefahrten im Mittel unterschiedlich ist, wenn die auszuführenden Servicefahrten zweier Tage miteinander verglichen werden.

Im Beispiel wären also für die Fahrpläne A (B) über die Woche verteilt ca. 20% (5%) aller Servicefahrten einzuplanen, die nicht an allen Tagen auszuführen sind.

Dabei werden die Ressourceneinsatzpläne jeweils mindestens in ca. 10% (2%) der zu bedienenden Fahrten voneinander abweichen. Für jeden Tag könnten aber auch bis zu 92-97% (96-99%) der an diesem Tag zu verplanenden Servicefahrten gleich geplant werden. Eine gemeinsame, ähnliche Planung zu den Fahrplänen ist also sinnvoll, wobei im Szenario A aufgrund der größeren Unähnlichkeit eine kosteneffiziente ähnliche Planung deutlich schwieriger sein wird, als für Szenario B.

Anteile r -regelmäßiger Fahrten an der Gesamtdauer aller Fahrten

Mehr noch als die Anzahl regelmäßiger und unregelmäßiger Servicefahrten ist die Dauer dieser Fahrten entscheidend für die Planung von ähnlichen Umläufen und Diensten. Insbesondere da Dienste aufgrund gesetzlicher, tariflicher und betrieblicher Regelungen in ihrer Dauer bzw. in der am Stück ohne Pause durchführbaren Arbeit beschränkt sind. So können kurze unregelmäßige Servicefahrten grundsätzlich eher in Umläufe/Dienste mit regelmäßigen Fahrten eingefügt werden als lange. Mit einer Bestimmung von Anteilen von unregelmäßigen Servicefahrtenzeiten wird schnell ersichtlich, für welchen Anteil der auszuführenden Servicefahrtenzeit auf jeden Fall unterschiedliche (Teil-)Umläufe und (Teil-)Dienste erstellt werden müssen.

In Tabelle 8.1 ist die Ähnlichkeitsbewertung von Fahrplänen über die Anteile der Dauer regelmäßiger und unregelmäßiger Fahrten beispielhaft für die Fahrpläne aus den Abbildungen 8.1 und 8.2 zusammengefasst. Dabei entspricht die Notation der Spalten der Notation von Tabelle 8.1. Statt der Anzahl ist die Dauer der Servicefahrten angegeben in *hh:mm*.

Für die Fahrpläne A (B) fallen also über die gesamte Woche ca. 14% (3%) der Gesamtservicefahrtenzeit auf unregelmäßig stattfindende Fahrten. Im Schnitt werden dabei die Ressourceneinsatzpläne zweier Tage ca. 7% (1%) Zeit enthalten, die zur Ausführung unterschiedlicher Servicefahrten notwendig ist. In den Ressourceneinsatzplänen der einzelnen Tage entfallen ca. 93-97% (98-99%) der Zeit zur Bedienung von Servicefahrten auf regelmäßige Servicefahrten. Die Zahlen verdeutlichen noch einmal die im vorherigen Abschnitt gewonnene Erkenntnis.

Berücksichtigung von Zeiträumen

Teilweise beeinflussen unregelmäßige Servicefahrten eines Fahrplans die Regelmäßigkeit der Ressourceneinsatzpläne nur in geringem Maße. Unregelmäßige Fahrten haben generell dann wenig Einfluss auf die Regelmäßigkeit von Ressourceneinsatzplänen anderer Tage, wenn in dem Zeitraum, der von den unregelmäßigen Servicefahrten abgedeckt wird, nur diese unregelmäßigen Fahrten stattfinden. Als Beispiel dazu sei an

Servicefahrten:			Gültigkeit an x Tagen (%)					P-Ver- gleich
Set	Tag	#	5	4	3	2	1	
A		979	80,69	0,51	1,53	3,17	14,10	9,81
	Mo	830	95,18	0,60	0,24	0,96	3,01	
	Di	858	92,07	0,58	1,52	2,68	3,15	
	Mi	853	92,61	0,59	1,76	0	5,04	
	Do	857	92,18	0,58	1,52	2,68	3,03	
	Fr	817	96,70	0	0,24	0,98	2,08	
B		2.334	95,20	0,86	0	2,14	1,80	2,15
	Mo	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Di	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Mi	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Do	2.302	96,52	0	0	2,17	1,30	
	Fr	2.304	96,44	0,87	0	2,17	0,52	

Tabelle 8.1: Gültigkeit der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen A und B aus den Abbildungen 8.1 und 8.2

Servicefahrten:			Gültigkeit an x Tagen (%)					P-Ver- gleich
Set	Tag	hh:mm	5	4	3	2	1	
A		497:21	86,21	0,34	1,93	3,13	8,38	6,89
	Mo	443:18	96,73	0,38	0,21	1,24	1,44	
	Di	455:30	94,13	0,37	1,91	2,21	1,38	
	Mi	451:35	94,95	0,38	2,13	0	2,54	
	Do	460:54	93,03	0,37	1,88	2,18	2,53	
	Fr	441:06	97,21	0	0,21	1,25	1,33	
B		1.501:30	96,87	0,58	0	1,35	1,21	1,40
	Mo	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Di	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Mi	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Do	1.487:42	97,77	0	0	1,36	0,88	
	Fr	1.488:27	97,72	0,58	0	1,36	0,34	

Tabelle 8.2: Gültigkeit der Dauer der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen A und B aus den Abbildungen 8.1 und 8.2

Abbildung 8.2 erinnert und die dort zu bedienenden unregelmäßigen Servicefahrten in den Nachtstunden.

Für diese Fahrten bietet es sich an, sie nicht zusammen mit den regelmäßigen Fahrten zu planen, sondern über zusätzliche Umläufe und Dienste. Bei einer modifizierten quantitativen Bewertung der Ähnlichkeit sollen daher die Fahrten nicht einbezogen werden, die vermutlich nur einen geringen Einfluss auf die Regelmäßigkeit der zu erstellenden Ressourceneinsatzpläne besitzen. Es werden nur die unregelmäßigen Fahrten bewertet, die im Zeitraum anfallen, in denen auch regelmäßige Fahrten zu bedienen sind. Tabelle 8.3 zeigt zu den Beispielfahrplänen B aus Abbildung 8.2 die Anteile unregelmäßiger Fahrten mit Berücksichtigung der Zeiträume, in denen regelmäßige Fahrten stattfinden. Analog dazu fasst Tabelle 8.4 den zeitlichen Umfang dieser unregelmäßigen Fahrten zusammen.

Servicefahrten:			Gültigkeit an x Tagen (%)					P-Ver- gleich
Set	Tag	#	5	4	3	2	1	
B		2.279	97,50	0,88	0	0,26	1,36	1,23
	Mo	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Di	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Mi	2.242	99,11	0,89	0	0	0	
	Do	2.258	98,41	0	0	0,27	1,33	
	Fr	2.249	98,80	0,89	0	0,27	0,04	

Tabelle 8.3: Gültigkeit der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen B aus Abbildung 8.2 in Zeiträumen mit regelmäßigen Servicefahrten

Servicefahrten:			Gültigkeit an x Tagen (%)					P-Ver- gleich
Set	Tag	hh:mm	5	4	3	2	1	
B		1.479:40	98,30	0,59	0	0,19	0,93	0,83
	Mo	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Di	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Mi	1.463:07	99,41	0,59	0	0	0	
	Do	1.470:18	98,92	0	0	0,19	0,89	
	Fr	1.466:37	99,17	0,59	0	0,19	0,05	

Tabelle 8.4: Gültigkeit der Dauer der Servicefahrten in den Beispielfahrplänen B aus Abbildung 8.2 in Zeiträumen mit regelmäßigen Servicefahrten

In diesem Beispiel wird verglichen mit den Kennzahlen aus den Tabellen 8.1 und 8.2 so noch deutlicher, dass die Pläne vorraussichtlich sehr ähnlich geplant werden können.

8.3 Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen

Nach Vorschlägen zur Ähnlichkeitsbewertung des Inputs von Planungsproblemen sollen nun Möglichkeiten zur Ähnlichkeitsbewertung des Outputs entwickelt werden. In einigen Ansätzen in der Literatur zur Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen wird vorgeschlagen, zur Ähnlichkeitsbestimmung von Ressourceneinsätzen die Fahrtensequenzen eines Umlaufes oder Dienstes zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.3 und Kapitel 5). [Borndörfer et al., 2012] verwenden dabei die Begriffe *Aufgabenähnlichkeit* (engl. *task similarity*) und *exakte Aufgabenähnlichkeit* (engl. *exact task similarity*), um auszudrücken, ob ein Dienst mindestens eine Fahrt/Aufgabe oder alle Aufgaben enthält, die vom zum Vergleich herangezogenen Dienst ausgeführt werden.

Verallgemeinernd sollen in dieser Arbeit die Begriffe *partielle Ähnlichkeit* (engl. *partial similarity*) und *vollständige Ähnlichkeit* (engl. *complete similarity*) verwendet werden, um den Umfang bzw. den *Genauigkeitsgrad* der Ähnlichkeitsbewertung zu beschreiben. Eine solche Unterteilung ist generell aus praktischer Sicht sinnvoll. Verkehrsunternehmen benötigen nicht zwingend komplett identische Ressourceneinsätze für mehrere Tage. Es sollen lediglich allzu große Unterschiede vermieden werden. Dies kann über eine partielle Wiederholbarkeit von Umläufen/Dienstes bewertet werden. Andererseits bieten vollständig wiederholbare Umläufe/Dienste große Vorteile. Sie sind in z.B. den Datenmodellen der Planungssysteme besser handhabbar und für einen Planer besser für unterschiedliche Tage zu verplanen. Ressourceneinsätze sollten also sowohl anhand ihrer partiellen als auch anhand ihrer vollständigen Ähnlichkeit bewertet werden können.

Neben der Bewertbarkeit einzelner Ressourceneinsätze stellt sich die Frage, wie die Ähnlichkeit einer Menge von Ressourceneinsätzen, d.h. die Ähnlichkeit gesamter Ressourceneinsatzpläne geeignet bewertet werden kann. Als Unterscheidungsmöglichkeit bei einer Ähnlichkeitsbewertung kann also auch der betrachtete *Ressourcenumfang* bzw. die betrachtete *Ressourcenanzahl* angesehen werden.

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit bildet der Zweck der Ähnlichkeitsbewertung, der genauer auch als *Vergleichsrahmen* bezeichnet werden kann: Soll die *Wiederverwendbarkeit* bzw. *potenzielle Ähnlichkeit* eines einzelnen Ressourceneinsatzes oder Einsatzplans bestimmt werden, also das Potenzial, einzelne Ressourceneinsätze an mehreren Tagen nutzen zu können? Oder sollen mehrere Ressourceneinsätze/-einsatzpläne miteinander verglichen werden und so die *(Lösungs-)Regelmäßigkeit* dieser Einsätze bzw. Pläne bestimmt werden?

Insgesamt kann bei einer Ähnlichkeitsbewertung in der Ressourceneinsatzplanung folglich in drei Dimensionen differenziert werden: in der betrachteten *Ressourcenan-*

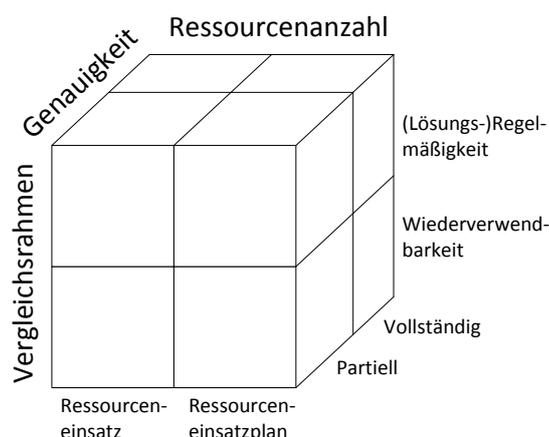


Abbildung 8.3: Dimensionen zur Bewertung der Ähnlichkeit in der Ressourceneinsatzplanung

zahl, in der betrachteten *Genauigkeit* und im einbezogenen *Vergleichsrahmen*. Abbildung 8.3 stellt diese Differenzierbarkeit zusammenfassend dar.

Im Folgenden werden zunächst in Abschnitt 8.3.1 Ähnlichkeitsbewertungen zur Wiederverwendbarkeit von Ressourceneinsätzen vorgeschlagen. Abschnitt 8.3.2 beschreibt Bewertungsmöglichkeiten der (Lösungs-)Regelmäßigkeit.

8.3.1 Wiederverwendbarkeit von Ressourceneinsätzen

Um die Wiederverwendbarkeit eines einzelnen Ressourceneinsatzes oder Ressourceneinsatzplanes für andere Tage bewerten zu können, reicht es generell aus, die bedienten Servicefahrten zu untersuchen. Das Potenzial an anderen Tagen eingesetzt werden zu können, hängt davon ab, welche Fahrten verplant sind und welche Fahrten in den Fahrplänen bzw. Planungsproblemen bedient werden sollen, für welche die Wiederverwendbarkeit bestimmt wird. Zusätzliche Kriterien müssen gegebenenfalls bei der Planung von Diensten einbezogen werden. Dort bestimmen auch die verwendeten und verwendbaren Dienst- und Schichttypen die Wiederverwendbarkeit.

Die in dieser Arbeit genutzten Maße zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Umläufen bzw. Diensten werden nachfolgend näher beschrieben. Dabei wird unterschieden zwischen Maßen zur Bewertung der vollständigen Wiederverwendbarkeit gesamter Umläufe/Dienste und Maßen zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Teilen von Umläufen/Diensten. Als Kennzahl zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Umlauf- oder Dienstplänen kann dann z.B. intuitiv der jeweilige

Durchschnittswert aus der Wiederverwendbarkeit einzelner Ressourceneinsätze gebildet werden.

Für die Beschreibung werden folgende Mengen und Funktionen genutzt: Sei $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$ die Menge aller betrachteten Tage und sei $\mathcal{T}^l = \{1, \dots, m^l\}$ die Menge aller Servicefahrten eines Tages $l \in \mathcal{L}$. Dann sei $\mathcal{T} = \mathcal{T}^1 \cup \dots \cup \mathcal{T}^n$ die Menge aller betrachteten Servicefahrten. Für die Servicefahrten \mathcal{T}^l eines Tages $l \in \mathcal{L}$ sei K^l der Ressourcenplan, in welchem die Servicefahrten in Ressourceneinsätzen verplant sind. Sei $T(k) : K^l \rightarrow \mathcal{T}$ eine Funktion, die zum Ressourceneinsatz $k \in K^l$ die Menge aller im Ressourceneinsatz enthaltenen Servicefahrten liefert. Ferner sei $\mathcal{T}^l(t) : \mathcal{L} \times \mathcal{T} \rightarrow \{0, 1\}$ eine Funktion, die angibt, ob Servicefahrt t im Fahrplan \mathcal{T}^l des Tages l bedient werden muss oder nicht, mit $\mathcal{T}^l(t) = 0$, falls $t \notin \mathcal{T}^l$, und $\mathcal{T}^l(t) = 1$, falls $t \in \mathcal{T}^l$. Außerdem sei Q^r die Menge aller r -regelmäßigen Fahrten in den Fahrplänen $\mathcal{T}^1, \dots, \mathcal{T}^{|\mathcal{L}|}$ und sei $Q^r(k)$ eine Funktion, die für einen Ressourceneinsatz k eines Ressourceneinsatzplans K^l mit $l \in \mathcal{L}$, die Menge aller von diesem Ressourceneinsatz bedienten r -regelmäßigen Fahrten liefert.

Vollständige Wiederverwendbarkeit von Umläufen/Diensten

Für einen einzelnen Ressourceneinsatz lässt sich anhand der von ihm bedienten Fahrten ohne großen Aufwand bestimmen, an wie vielen Tagen der gesamte geplante Umlauf bzw. Dienst möglicherweise einsetzbar ist. Enthält er z.B. eine unregelmäßige Servicefahrt, die nur an einem Tag bedient werden muss, kann er offensichtlich auch nur an einem Tag vollständig eingesetzt werden.

Für die in der Einleitung zu Abschnitt 8.3.1 definierten Mengen und Funktionen, also die Mengen Tage \mathcal{L} , Servicefahrten aller Tage \mathcal{T} , Servicefahrten eines Tages \mathcal{T}^l , die r -regelmäßigen Servicefahrten Q^r , den Ressourcenplan eines Tages K^l , sowie die Funktionen $Q^r(k)$ und $\mathcal{T}^l(t)$ ist die *vollständige Wiederverwendbarkeit* v' eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ dann definiert als

$$v'(k, r) = \min \left\{ \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t) \mid t \in Q^r(k) \right\} \quad (8.1)$$

wobei $\sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t)$ die Anzahl aller Tage beschreibt, an welchen Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ in den Fahrplänen bedient werden muss und generell $v'(k, r) \geq r$ ist, falls k mindestens eine r -regelmäßige Fahrt enthält.

Für $r = 1$ wird mit dieser Bewertung nur ein erster Anhaltspunkt über die Einsetzbarkeit eines geplanten Umlaufes oder Dienstes an anderen Tagen geliefert. Möglicherweise ist z.B. in einem geplanten Ressourceneinsatz lediglich eine Fahrt am Ende

unregelmäßig und verhindert so einen kompletten Einsatz der Ressource an mehr als einem Tag. Würde diese Fahrt aus dem Ressourceneinsatz entfernt, könnte sie also sehr wohl an mehreren Tagen eingesetzt werden – in der Dienstplanung allerdings nur, wenn davon betroffene Dienstregeln durch die Wegnahme der Fahrt nicht verletzt werden, wie z.B. Dienstregeln bezüglich z.B. minimaler Arbeitszeit und minimaler Arbeitszeit nach der letzten Pause. Andere Aussagen über die potenzielle Wiederholbarkeit eines Umlaufes oder Dienstes können mit unterschiedlichen Werten für r , sowie mit partiellen Ähnlichkeitsbewertungen getroffen werden.

Partielle Wiederverwendbarkeit von Umläufen/Diensten – Fahrtenanteile

Für Teile von geplanten Ressourceneinsätzen lässt sich die Wiederverwendbarkeit ebenfalls wie für gesamte Umläufe oder Dienste anhand der bedienten Servicefahrten bestimmen. Einfache Maße zur Bewertung der partiellen Wiederverwendbarkeit von Ressourceneinsätzen werden an folgendem Beispiel veranschaulicht:

Betrachtet werden ein Planungszeitraum von fünf Tagen und zwei Ressourceneinsätze k_1 und k_2 . Ressourceneinsatz k_1 bedient insgesamt 10 Servicefahrten, davon 4 Fahrten, die an allen fünf Tagen angeboten werden, 1 Fahrt, die an vier Tagen angeboten wird, 2 Fahrten, die an drei Tagen gültig sind, 1 Fahrt gültig an zwei Tagen und 2 Fahrten, die nur an einem Tag bedient werden müssen. Die Anzahl von Ressourceneinsatz k_1 bedienter Fahrten, die für eine bestimmte Anzahl Tage gültig sind, wird abgekürzt geschrieben als Fahrtenvektor $\vec{t}_1 = (4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2)^T$. Ressourceneinsatz k_2 bedient ebenfalls 10 Servicefahrten wobei die Fahrten gemäß dem Fahrtenvektor $\vec{t}_2 = (1 \ 7 \ 0 \ 0 \ 2)^T$ bedient werden.

Im Hinblick auf die partielle Wiederverwendbarkeit der Ressourceneinsätze stellt sich die Frage: Welcher Anteil an bedienten Servicefahrten des geplanten Ressourceneinsatzes ist auch an anderen Tagen verwendbar? Für oben beschriebenes Beispiel gilt dann:

*Die Wiederholbarkeit der Fahrten sei für obiges Beispiel mit fünf Tagen abgekürzt geschrieben als Gewichtungvektor $(5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1)^T$. Der Servicefahrtenanteil, der an anderen Tagen wiederholt werden kann, beträgt also für Ressourceneinsatz k_1 $(4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2)^T * (5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1)^T / (10*5) = 0,68$, also 68 %. Für Ressourceneinsatz k_2 beträgt der an anderen Tagen wiederholbare Fahrtenanteil dann $(1 \ 7 \ 0 \ 0 \ 2)^T * (5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1)^T / (10*5) = 0,7$ d.h. 70%.*

Statt als Skalarprodukt wird die Kennzahl zur Bewertung der partiellen potenziellen Ähnlichkeit mit den in Einleitung von Abschnitt 8.3.1 definierten Mengen und Funktionen auch wie folgt geschrieben: Es gelten die Definitionen für die Menge der Tage \mathcal{L} , die Servicefahrten aller Tage \mathcal{T} , die Servicefahrten \mathcal{T}^l eines Tages $l \in \mathcal{L}$, die

r -regelmäßigen Servicefahrten Q^r , die Ressourceneinsätze eines Planes K^l , sowie die Funktionen $Q^r(k)$ und $\mathcal{T}^l(t)$. Falls $|Q^r(k)| > 0$, ist die *partielle Wiederverwendbarkeit* w' eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ dann definiert als

$$w'(k, r) = \frac{\sum_{t \in Q^r(k)} \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t)}{|Q^r(k)| * |\mathcal{L}|} \quad (8.2)$$

wobei $\sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t)$ die Anzahl aller Tage beschreibt, an denen Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ ausgeführt werden soll und $|Q^r(k)| * |\mathcal{L}|$ die maximale Anzahl an r -regelmäßigen Fahrten des Ressourceneinsatzes $k \in K^l$, die über alle betrachteten Tage ausgeführt werden könnte.

Partielle Wiederverwendbarkeit von Umläufen/Diensten – Distanzen

Die partielle Wiederverwendbarkeit, also das Potenzial von Teilen eines Ressourceneinsatzes, an mehreren Tagen eingesetzt werden zu können, kann auch auf eine andere Art beschrieben werden. Abhängig von den mit einem Ressourceneinsatz bedienten Servicefahrten und den im betrachteten Planungszeitraum zu bedienenden Servicefahrten, stellt sich die Frage: Wie viele Fahrten(wiederholungen) ist ein Umlauf oder Dienst davon entfernt, an allen betrachteten Tagen eingesetzt werden zu können? Bzw. anders gefragt: Wie viele Fahrten werden zu viel bedient, wenn ein geplanter Ressourceneinsatz an allen betrachteten Tagen genutzt wird? Es soll also eine Distanz zur Einsetzbarkeit an allen Tagen bewertet werden. Um diese Distanz zu bewerten, muss bestimmt werden, wie oft eine zusätzliche Wiederholung der eingesetzten Fahrt in den betrachteten Fahrplänen notwendig wäre, damit der Ressourceneinsatz an allen Tagen gültig ist. Werden fünf Tage betrachtet und ist eine Fahrt an allen fünf Tagen zu bedienen, ist sie an allen Tagen gültig und müsste nicht noch einmal zusätzlich zu den Fahrten eines Fahrplans hinzugefügt werden. Ist eine Fahrt an vier Tagen gültig, müsste sie in noch einem Fahrplan zusätzlich ergänzt werden. Bei drei Tagen, zwei mal etc. Zur Veranschaulichung sei obiges Beispiel aufgegriffen:

*Die zusätzlich notwendigen Wiederholungen seien abgekürzt geschrieben als Gewichtungsvektor: $(0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4)^T$. D.h. 0 zusätzliche Wiederholungen für Fahrten, die bereits an allen fünf Tagen bedient werden, 1 zusätzliche Wiederholung für Fahrten die nur an vier Tagen bedient werden, usw. Für die Bewertung eines Ressourceneinsatzes wird für gegebene Fahrtenvektoren das Skalarprodukt mit dem Gewichtungsvektor gebildet. Die Distanz zur Einsetzbarkeit an allen Tagen beträgt mit Gewichtungsvektor $(0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4)^T$ also für den beispielhaften Ressourceneinsatz $k_1 \ (4 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2)^T * (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4)^T = 16$ und für Ressourceneinsatz $k_2 \ (1 \ 7 \ 0 \ 0 \ 2)^T * (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4)^T = 15$. Würde Ressourceneinsatz k_1 für alle betrachteten Tage genutzt werden, würden also 16 Fahrten*

mehr bedient, als von den Fahrplänen her benötigt. Bei Ressourceneinsatz k_2 wären es 15 Fahrten zu viel.

Neben der Schreibweise als Skalarprodukt kann das Distanzmaß zur Bestimmung der partiellen Wiederholbarkeit allgemein auch wie folgt beschrieben werden: Mit den in der Einleitung zu Abschnitt 8.3.1 definierten Mengen und Funktionen, für Tage \mathcal{L} , Servicefahrten aller Tage \mathcal{T} , Servicefahrten eines Tages \mathcal{T}^l , den r -regelmäßigen Servicefahrten Q^r , den Ressourceneinsatzplan eines Tages K^l , sowie die Funktionen $Q^r(k)$ und $\mathcal{T}^l(t)$ sei die *partiell bestimmte Distanz d' zur Wiederverwendbarkeit* eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ an allen betrachteten Tagen dann definiert als

$$d'(k, r) = \sum_{t \in Q^r(k)} \left(\sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t) * (|\mathcal{L}| - \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t)) \right) \quad (8.3)$$

wobei $\sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t)$ die Anzahl aller Tage ist, an denen Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ bedient werden muss und $(|\mathcal{L}| - \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l(t))$ die Differenz zur maximal möglichen Einsatzanzahl.

8.3.2 Regelmäßigkeit unterschiedlicher Ressourceneinsätze

Im vorherigen Abschnitt 8.3.1 wurden Maße beschrieben, die die Wiederverwendbarkeit von Ressourceneinsätzen eines einzelnen Ressourceneinsatzplanes an mehreren Tagen ausdrücken können. In diesem Abschnitt sollen Maße zum Vergleich der Ähnlichkeit mehrerer Ressourceneinsätze bzw. Ressourceneinsatzpläne vorgestellt werden, also Maße zur Bewertung der Regelmäßigkeit von Umläufen bzw. Diensten. Unterschieden wird zwischen Kennzahlen, die die Regelmäßigkeit gesamter Umläufe/Dienste ausdrücken, sowie Maßen, die die Regelmäßigkeit von Teilen beschreiben.

Vollständige Regelmäßigkeit von Umläufen/Diensten

Eine mögliche Bewertung der Regelmäßigkeit von unterschiedlichen Umlauf- und Dienstplänen basiert auf der Frage, wie oft in den verglichenen Ressourceneinsatzplänen Ressourceneinsätze vollständig ähnlich sind. Dazu muss lediglich die Anzahl gleicher Ressourceneinsätze bestimmt werden. Je nach betrachtetem Ressourceneinsatzplan erfolgt die Bestimmung der Gleichheit zweier Ressourceneinsätze nach unterschiedlichen Kriterien. Zwei Umläufe werden als gleich definiert, wenn folgende Kriterien der beiden Umläufe übereinstimmen:

- Zugeordnetes Depot
- Bediente (Service-)Fahrten (regelmäßige und unregelmäßige)

Zwei Dienste werden als gleich verstanden, wenn die beiden Dienste zusätzlich zu den oben aufgezählten Kriterien „zugeordnetes Depot“ und „bediente Servicefahrten“ folgende identische Eigenschaften besitzen:

- Diensttyp
- Anfangs- und Endzeit
- Zeiten (Schichtdauer, Arbeitszeit, Lenkzeit, Pausenanzahl und -zeit)

Eine Kennzahl zur Bewertung der Lösungsregelmäßigkeit auf Basis gleicher Ressourceneinsätze sei dann wie folgt definiert: Für die Menge aller Tage $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$ und den je für Tag $l \in \mathcal{L}$ gültigen Ressourceneinsatzplan K^l bzw. den Ressourceneinsatzplan $K^l(r)$, in welchem nur die r -regelmäßigen Fahrten Q^r betrachtet werden mit $K^l(r) \subseteq K^l$ wird, falls $|\bigcup_{l \in \mathcal{L}} K^l(r)| > 0$ ist, die *durchschnittliche Wiederholrate* v der in den Plänen K^1, \dots, K^n genutzten Ressourceneinsätze definiert als

$$v(K^1, \dots, K^{|\mathcal{L}|}, r) = \frac{\sum_{l \in \mathcal{L}} |K^l(r)|}{|\bigcup_{l \in \mathcal{L}} K^l(r)|} \quad (8.4)$$

wobei $\sum_{l \in \mathcal{L}} |K^l(r)|$ die Anzahl aller eingesetzten Ressourcen mit r -regelmäßigen Fahrten beschreibt und $|\bigcup_{l \in \mathcal{L}} K^l(r)|$ die Anzahl unterschiedlicher Ressourceneinsätze mit r -regelmäßigen Fahrten in allen Plänen.

Sollen Kriterien zur Überprüfung der Gleichheit nicht oder relaxiert einbezogen werden, wird prinzipiell eine durchschnittliche Wiederholrate von partiell ähnlichen Ressourceneinsätzen bestimmt. Statt eines Vergleichs aller regelmäßigen und unregelmäßigen Fahrten, die von zwei Umläufen/Diensten bedient werden (bei $r = 1$), können z.B. relaxiert die r -regelmäßigen Fahrten verglichen werden (bei $r > 1$). Spezielle Maße zur Bewertung einer partiellen Ähnlichkeit von Umläufen und Diensten bzw. zur Ähnlichkeit von Fahrtensequenzen werden nachfolgend beschrieben.

Partielle Regelmäßigkeit von Umläufen/Diensten – Fahrtenanteile

Mit Einbeziehung einer möglichen teilweisen Ähnlichkeit zwischen Umläufen bzw. Diensten in eine Ähnlichkeitsbewertung, können Aussagen über die Regelmäßigkeit weiter differenziert werden. So kann z.B. eine Aussage darüber getroffen werden, wie hoch der Anteil gleich verplanter Fahrten in unterschiedlichen Ressourceneinsätzen ist.

Für zwei Ressourceneinsätze $k_a \in K^a$ und $k_b \in K^b$ mit $a, b \in \mathcal{L}$ und der Funktion $Q^r(k)$, die für den Ressourceneinsatz $k \in K$ eines Ressourceneinsatzplanes K die Menge aller bedienten r -regelmäßigen Fahrten liefert, ist der *Anteil gleich bedienter*

r -regelmäßiger Fahrten w , falls r -regelmäßige Fahrten enthalten sind, dann definiert als:

$$w(k_a, k_b, r) = \frac{|Q^r(k_a) \cap Q^r(k_b)|}{|Q^r(k_a) \cup Q^r(k_b)|} \quad (8.5)$$

wobei $|Q^r(k_a) \cap Q^r(k_b)|$ die Anzahl aller identischen r -regelmäßigen Fahrten in den Ressourceneinsätzen k_a und k_b ist, und $|Q^r(k_a) \cup Q^r(k_b)|$ die Menge aller unterschiedlichen in beiden Ressourceneinsätzen bedienten Fahrten.

Soll statt für zwei Ressourceneinsätze der Anteil gleich bedienter Fahrten in zwei Ressourceneinsatzplänen bestimmt werden, muss zunächst ein Zuordnungsproblem gelöst werden. Dadurch ist bestimmbar, zwischen welchen beiden Ressourceneinsätzen der beiden Pläne jeweils ein Vergleich über die Fahrtenanteile erfolgt.

Für die Menge aller r -regelmäßigen Fahrten Q^r und zwei Ressourceneinsatzpläne K^a und K^b mit $a, b \in \mathcal{L}$ ist der Anteil gleich bedienter Fahrten w dann beschrieben durch:

$$w(K^a, K^b, r) = \frac{a(K^a, K^b, r)}{\max\{|K^a|, |K^b|\}} \quad (8.6)$$

wobei $a(K^a, K^b, r)$ die Lösung des Zuordnungsproblems repräsentiert, das in Modell (8.7)-(8.10) beschrieben wird, und $\max\{|K^a|, |K^b|\}$ die maximal zuordbare Anzahl von Ressourceneinsätzen.

Um eine Zuordnung der einzelnen Ressourceneinsätze in den beiden Plänen zu bestimmen, wird das wie folgt definierte Zuordnungsproblem gelöst: Binärvariablen x_{ij} mit $(i, j) \in K^a \times K^b$ geben an, ob Umlauf/Dienst $i \in K^a$ dem Umlauf/Dienst $j \in K^b$ zugeordnet ist. Die Zuordnung wird entsprechend dem oben definierten Maß $w(i, j, r)$ bewertet. Das Zuordnungsproblem zur Ähnlichkeitsmaximierung gemessen an allen r -regelmäßigen Fahrten Q^r kann dann beschrieben werden als:

$$\sum_{(i,j) \in K^a \times K^b} x_{ij} w(i, j, r) \rightarrow \max \quad (8.7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in K^b} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in K^a \quad (8.8)$$

$$\sum_{i \in K^a} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in K^b \quad (8.9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in K^a \times K^b \quad (8.10)$$

Die Zielfunktion (8.7) sorgt für eine Auswahl der Zuordnungen, die die Ähnlichkeitsbewertung maximieren. Zuordnungsbedingungen (8.8)-(8.9) garantieren, dass jedem Element eines Ressourceneinsatzplans ein entsprechendes Element aus dem anderen Ressourceneinsatzplan zugeordnet wird. Dabei sei darauf hingewiesen, dass bei unterschiedlicher Anzahl Elementen in den Ressourceneinsatzplänen zusätzliche (leere) Elemente eingefügt werden, deren Zuordnung dann einen Ähnlichkeitswert von 0 ergibt.

Partielle Regelmäßigkeit von Umläufen/Diensten – Distanzen

Statt jeweils einzelne Ressourceneinsätze zweier Ressourceneinsatzpläne miteinander zu vergleichen, kann eine partielle Regelmäßigkeit zwischen zwei Ressourceneinsatzplänen auch direkt über ein Distanzmaß ausgedrückt werden. [Steinzen, 2007] beispielsweise verwendet für den Vergleich eines Dienstplans mit einem Referenzdienstplan ein Distanzmaß basierend auf Fahrtensequenzen. Es wird die Anzahl von Sequenzen aus Servicefahrten gezählt, die nicht vom gegebenen Referenzplan in den zu erstellenden Ressourceneinsatzplan übernommen werden. Dabei werden in den Fahrtensequenzen nur die regelmäßigen Fahrten betrachtet. Findet sich in einer Sequenz eine unregelmäßige Fahrt, hat diese keine Einfluss auf das Distanzmaß. Geklärt wird also die Frage, wie sich die Sequenzen (regelmäßig) bedienter Fahrten in den Ressourceneinsätzen unterscheiden.

In dieser Arbeit wird zur Bewertung der Unterschiede von Fahrtensequenzen das in Teilen von [Amberg et al., 2011] beschriebene Distanzmaß genutzt, welches für jede (regelmäßige) Servicefahrt die unterschiedlichen Vorgänger- und Nachfolgefahrten in den Ressourceneinsatzplänen zählt. Es werden sowohl Vorgänger- als auch Nachfolgefahrten untersucht, da im Vergleich zu [Steinzen, 2007] in den Fahrtensequenzen zusätzlich zu Servicefahrten auch Aus- und Einrückfahrten betrachtet werden. Mit einer Einbeziehung von Aus- und Einrückfahrten lassen sich auf Fahrtenebene genauere Aussagen über die Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen treffen. So macht es bei Ausführung eines Plans unter anderem einen Unterschied, ob ein Dienst z.B. im Depot mit einer Ausrückfahrt zu seiner ersten Servicefahrt startet, oder ob der Dienst außerhalb des Depots ein Fahrzeug an einer Haltestelle übernimmt, um mit der (gleichen) ersten Servicefahrt zu starten.

Für die Menge aller Tage \mathcal{L} und die für einen Tag $l \in \mathcal{L}$ gültige Menge an Servicefahrten \mathcal{T}^l sowie die Menge Q^r aller r -regelmäßigen Servicefahrten sei die (*Sequenz-*)Distanz d zwischen zwei Ressourceneinsatzplänen K^a und K^b der Tage a und $b \in \mathcal{L}$

gemessen an allen r -regelmäßigen Fahrten definiert als

$$d(K^a, K^b, r) = \sum_{q \in Q^r} s(K^a, K^b, q) + \sum_{q \in Q^r} p(K^a, K^b, q) \tag{8.11}$$

wobei $s(K^a, K^b, q) = 0$ ist, falls die r -regelmäßige Fahrt q in Ressourceneinsatzplan K^a und Ressourceneinsatzplan K^b die gleiche nachfolgende (engl. *succeeding*) r -regelmäßige Fahrt oder Ausrückfahrt besitzt, und 1, falls nicht. Analog dazu ist $p(K^a, K^b, q) = 0$, falls die r -regelmäßige Fahrt q in Ressourceneinsatzplan K^a und Ressourceneinsatzplan K^b die gleiche vorangehende (engl. *preceding*) r -regelmäßige Fahrt oder Einrückfahrt besitzt, und 1, falls nicht.

Abbildung 8.4 gibt ein Beispiel für die Bestimmung des Distanzmaßes (8.11) zwischen zwei Ressourceneinsatzplänen. Verglichen werden Sequenzen von regelmäßigen Fahrten unter Einbeziehung von Aus- und Einrückfahrten.

Bei den in Abbildung 8.4 gezeigten Fahrtensequenzen in den Ressourceneinsatzplänen K^1 und K^2 unterscheiden sich bei den regelmäßigen Fahrten $Q(= Q^2) = \{1, 2, \dots, 5\}$ drei vorangehende Fahrten (bei den regelmäßigen Fahrten 2, 3 und 5), sowie vier nachfolgende Fahrten (bei den regelmäßigen Fahrten 1, 3, 4 und 5). Das nach (8.11) bestimmte Distanzmaß $d(K^1, K^2, 2)$ hat für das Beispiel folglich den Wert 7.

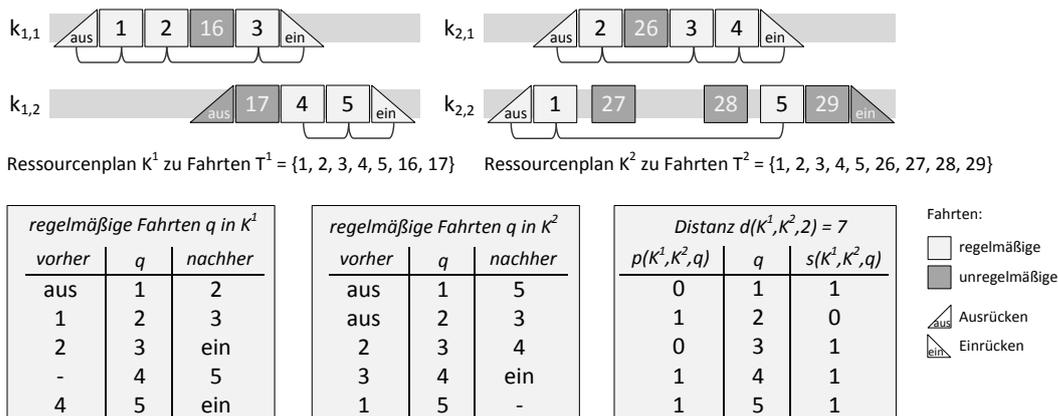


Abbildung 8.4: Beispiel zum Distanzmaß (8.11) basierend auf regelmäßigen Fahrtensequenzen und Berücksichtigung von Aus- und Einrückfahrten mit zwei Ressourceneinsatzplänen

8.4 Zusammenfassung

Mit diesem Kapitel wurde eine Basis zur Bewertung von Ähnlichkeitsaspekten in der Ressourceneinsatzplanung gelegt, indem Möglichkeiten zur Bewertung der Ähnlichkeit von Fahrplänen und von Ressourceneinsatzplänen aufgezeigt wurden. Bewertungsgrundlage bildet die Definition von *r-regelmäßigen Fahrten*, also eine Einteilung der zu verplanenden Fahrten-/Aufgabenmenge in Fahrten/Aufgaben, die an mindestens r der in der Planung betrachteten Tage bedient werden.

Mit qualitativen und quantitativen Hilfsmitteln zur *Bewertung des Inputs von Planungsproblemen*, d.h. Hilfsmittel zur Bewertung von Fahrplänen, soll auf einfache Art abgeschätzt werden können, welche Fahrpläne bei einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen sinnvollerweise zusammen geplant werden sollten und welche besser nicht. Dies kann sowohl vergleichsweise einfach mit Hilfe der Anzahl von r -regelmäßigen Fahrten am Gesamtfahrtenaufkommen festgestellt werden, als auch mit einer Berücksichtigung von zeitlichen Aspekten wie der Dauer dieser Fahrten oder das Auftreten in bestimmten Zeiträumen.

Bei quantitativen Hilfsmitteln zur *Bewertung des Outputs von Planungsproblemen*, d.h. Kennzahlen zur Bewertung des Ressourceneinsatzes, wird grundsätzlich zwischen zwei Maß-Typen unterschieden: Zum einen fahrplanbasierte Maße, die für einen einzelnen Ressourceneinsatz angeben, wie oft dieser in betrachteten Fahrplänen wieder verwendet werden kann. Zum anderen vergleichende Maße, die Unterschiede zwischen verschiedenen Ressourceneinsätzen bewerten.

Tabelle 8.5 fasst die in dieser Arbeit vorgeschlagenen und verwendeten Maße zur Bewertung der Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen und Ressourceneinsatzplänen zusammen. Die Kennzahlen sind größtenteils angegeben für eine Bewertung einzelner Ressourceneinsätze/-einsatzpläne oder für paarweise Vergleiche. Werden mehr als zwei Ressourceneinsätze oder Ressourceneinsatzpläne betrachtet, wird ein Durchschnittswert über die einzelnen Bewertungen bzw. über die paarweisen Betrachtungen ermittelt.

Dabei geben Anteilsmaße allgemeinverständliche Aussagen über gleiche oder unterschiedliche Fahrtenanteile in Ressourceneinsätzen. Distanzmaße eignen sich besser, in mathematischen Modellen zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen das Ähnlichkeitsziel quantifiziert in der Zielfunktion abzubilden.

Da jede Kennzahl eine andere Fragestellung beantwortet, sollten zur abschließenden Beurteilung der Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen immer mehrere Kennzahlen gemeinsam betrachtet werden. Dies gilt insbesondere für unterschiedliche Aussagen,

Fragestellung	Kennzahl			
<i>Wiederverwendbarkeit eines einzelnen Ressourceneinsatzes</i>				
Wie oft könnte ein Umlauf/Dienst im betrachteten Zeitraum eingesetzt werden?	(V)	Vollständige Wiederverwendbarkeit	$v'(k, r)$	(8.1)
Welcher Anteil Fahrten eines Umlaufes/Dienstes ist auch an anderen Tagen einsetzbar?	(P)	Partielle Wiederverwendbarkeit	$w'(k, r)$	(8.2)
Wie viele Fahrten werden zu viel bedient, wenn ein Umlauf/Dienst an allen Tagen eingesetzt wird?	(P)	Partiell bestimmte Distanz zur Wiederverwendbarkeit	$d'(k, r)$	(8.3)
<i>Ähnlichkeit/Regelmäßigkeit zwischen mehreren Ressourceneinsätzen</i>				
Wie oft wird in Ressourceneinsatzplänen ein Umlauf/Dienst komplett wiederholt?	(V)	Durchschnittliche Wiederholrate	$v(K^1, \dots, K^{ \mathcal{L} }, r)$	(8.4)
Wie hoch ist der Anteil gleich verplanter Fahrten?	(P)	Gleicher Fahrtenanteil	$w(k_1, k_2, r),$	(8.5),
			$w(K^1, K^2, r)$	(8.6)
Wie unterscheiden sich die Fahrtensequenzen bei Umläufen/Diensten?	(P)	(Sequenz-)Distanz	$d(K^1, K^2, r),$	(8.11)

Tabelle 8.5: Kennzahlen zur Ähnlichkeitsbewertung von Ressourceneinsätzen (k) und Ressourceneinsatzplänen (K) auf Basis der vollständigen Wiederholbarkeit von Umläufen bzw. Diensten (V) oder auf Basis einer partiellen Wiederholbarkeit (P), unter Berücksichtigung (r)-regelmäßiger Fahrten

die sich durch eine Betrachtung der vollständigen und der partiellen Wiederholbarkeit von Umläufen/Diensten ergeben.

Neben den vorgestellten Maßen sind eine Vielzahl weitere Ähnlichkeitsmaße denkbar. Der Fokus dieser Arbeit liegt aber auf Maßen, die von Planern in Verkehrsbetrieben intuitiv als Ausdruck von Regelmäßigkeit von Fahrplänen bzw. Ressourceneinsatzplänen aufgefasst werden. Die in den folgenden Kapiteln entwickelten Lösungskonzepte zum Bilden von regelmäßigen Ressourceneinsatzplänen funktionieren auch mit anderen Ähnlichkeitsbewertungen – sofern eine Bewertung als Optimierungsziel im Lösungsansatz verwendet wird.

Kapitel 9

Ressourceneinsatzplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen

In Kapitel 5 wird verdeutlicht, dass für die Planung im ÖPNV kein Modellierungs- und Lösungsansatz existiert, der die Zielsetzung verfolgt, ähnliche Ressourceneinsatzpläne für die Planungsprobleme mehrerer Tage zu bilden. In diesem Kapitel werden entsprechend Schritt S4 aus Kapitel 5 geeignete Ansätze für eine solche Ressourceneinsatzplanung entwickelt. Zusätzlich werden gemäß Schritt S5 die beiden identifizierten Basiskonzepte (*tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan* und *tagesübergreifende Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster*) in den zu entwickelnden Ansätzen aufgegriffen.

Der Aufbau dieses Kapitels ist wie folgt: Bevor geeignete Modellierungs- und Lösungsansätze für eine Planung mit Ähnlichkeitszielen entwickelt werden, wird zunächst die dabei zu lösende Problemstellung genau spezifiziert. Dazu wird in Abschnitt 9.1 die allgemeine Problembeschreibung zur (ÖPNV-)Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen aus Abschnitt 2.3 konkretisiert. Daran anschließend werden neue Ansätze zur Planung mit Ähnlichkeitszielen entworfen. Ansätze für eine tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan werden in Abschnitt 9.2 beschrieben. Ansätze für eine tagesübergreifende Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster werden in Abschnitt 9.3 diskutiert. Techniken zur Verkleinerung der zu betrachtenden Problemgrößen bei Planung mit Ähnlichkeitszielen werden in Abschnitt 9.4 ausgearbeitet.

9.1 Problemdefinition

Das *klassische Umlauf- und Dienstplanungsproblem* (engl. *vehicle and crew scheduling problem*, *VCSP*) aus Abschnitt 2.1 kann wie folgt zusammengefasst werden: Für den Fahrplan eines Tages mit einer Menge von Servicefahrten, Ablösepunkten, Leerfahrt- und Transfermöglichkeiten zwischen den Haltestellen, sowie Fahrzeugtypen, die bestimmten Depots zugeordnet sind, sind Umläufe und Dienste so zu finden,

dass Umlauf- und Dienstplan zulässig und zueinander passend sind, und die entstehenden Kosten minimal.

In Abschnitt 2.3.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass für ähnliche Umlauf- und Dienstplanungsprobleme, d.h. für ähnliche Fahrpläne, von Verkehrsunternehmen auch ähnliche bzw. regelmäßige Ressourceneinsatzpläne gewünscht sind. Gegenüber unregelmäßigen Ressourceneinsatzplänen kann so die Zuverlässigkeit erhöht und der Arbeitsaufwand reduziert werden (siehe Abschnitt 2.3.2).

Werden an verschiedenen Tagen klassische Umlauf- und Dienstplanungsprobleme betrachtet, ist nicht gewährleistet, dass für ähnliche Planungsprobleme auch ähnliche Ressourceneinsatzpläne erstellt werden. Der Hauptgrund ist, dass in einem klassischen Umlauf- und Dienstplanungsproblem nur ein einzelner Tag berücksichtigt wird. Durch die isolierte Betrachtung einzelner Tage mit dem Ziel, die Kosten für den Ressourceneinsatz des jeweiligen Tages zu minimieren, werden unter Umständen völlig unterschiedliche Pläne erstellt. Um für mehrere Tage kosteneffiziente und ähnliche Pläne erstellen zu können, muss das klassische Umlauf- und Dienstplanungsproblem also erweitert werden. In dem erweiterten Problem müssen mehrere Planungsprobleme gemeinsam betrachtet werden.

Das *Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten/Aufgaben von verschiedenen Fahrplänen* (engl. *vehicle and crew scheduling problem with irregular tasks from various timetables, VCSP-IT*) kann wie folgt definiert werden: Für eine *Menge von Fahrplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge von Servicefahrten, Ablösepunkte, Leerfahrt- und Transfermöglichkeiten zwischen Haltestellen und Depots mit zugeordneten Fahrzeugtypen sind *Mengen von Umlauf- und Dienstplänen* zu finden, die zulässig, zueinander passend, kostenminimal und *möglichst ähnlich zueinander* sind.

Das Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten/Aufgaben von verschiedenen Fahrplänen enthält also zwei Kernelemente. Erstens, eine *Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen* während der Planung. Zweitens, eine *gemeinsame Planung* für die Planungsprobleme eines größeren Planungszeitraums.

Vorschläge zur Bewertung von Ähnlichkeit wurden in Kapitel 8 für die in der Planung involvierten Fahr- und Ressourceneinsatzpläne beschrieben. Mögliche Strategien zur gemeinsamen Bearbeitung mehrerer Planungsprobleme eines größeren Planungszeitraums werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

9.2 Neue Ansätze für tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan

Eine Möglichkeit, einen ähnlichen Plan für das Planungsproblem eines Tages zu erstellen, ist der Einsatz eines Referenzplanes (vgl. Abschnitte 2.4.3 und 4.3.1). Der Referenzplan wird verwendet, um beim Lösen des Planungsproblems, die Lösung, d.h. den neuen Ressourceneinsatzplan, am gegebenen Referenzplan auszurichten, sodass der neu erstellte Plan dem Referenzplan ähnlich ist.

Auf die Problematiken beim Einsatz eines Referenzplanes zur Erstellung ähnlicher Pläne für mehr als einen Tag wurde bereits in Abschnitt 2.4.3 hingewiesen. Zwar könnten die Planungsprobleme pro Tag einzeln gelöst werden, wobei der Referenzplan indirekt die Ähnlichkeit zwischen den Lösungen/Plänen sicherstellt. Allerdings ist dann nicht garantiert, dass das bestmögliche Ergebnis bezüglich Kosteneffizienz und Ähnlichkeit der ermittelten Pläne erreicht wird.

In der Literatur sind bereits einige Möglichkeiten beschrieben, wie ein Referenzplan verwendet werden kann, um für einen Tag einen ähnlichen Ressourceneinsatzplan zu ermitteln (vgl. Abschnitt 4.3.1 und Kapitel 5). Jedoch bleiben dort noch Fragen zur Nutzbarkeit eines Referenzplans für die Erstellung ähnlicher Ressourceneinsatzpläne für verschiedene Tage offen. Diese Fragen können beantwortet werden, wenn die in Kapitel 5 formulierte Zielsetzung weiter spezifiziert wird und zur Planung mit einem Referenzplan folgende Beiträge in dieser Arbeit geleistet werden:

- In der wissenschaftlichen Literatur zur Erstellung von ähnlichen Plänen mit einem Referenzplan ist jeweils nur die Anwendung eines Referenzplanes für einen einzelnen Tag beschrieben. Es sollen daher Ergebnisse für die Anwendung eines Referenzplanes bei mehreren Tagen gezeigt werden (*Referenzplan Ziel 1*).
- Insbesondere wenn kein Referenzplan zur Verfügung steht und mehrere Tage ähnlich geplant werden sollen, ist es schwierig einen Plan zu bestimmen, der als Referenzplan (für mehrere Tage) geeignet ist. Aus diesem Grund sollen Hilfestellungen zur Planauswahl gegeben werden (*Referenzplan Ziel 2*).
- Die Ausrichtung eines Ressourceneinsatzplanes an einen Referenzplan kann dazu führen, dass die Kosteneffizienz des neu erstellten Planes nicht gewährleistet ist. Dies gilt insbesondere bei der Ausrichtung mehrerer Pläne (siehe Beispiel in Abschnitt 2.4.3, Abbildungen 2.11-2.13) Daher soll ein Modellierungs- und Lösungsansatz entwickelt werden, bei welchem der Trade-Off zwischen Kosten und Ähnlichkeit bei der Planerstellung durch Vorgabe eines Kostenrahmens steuerbar ist (*Referenzplan Ziel 3*).

In Abschnitt 9.2.1 wird zunächst erläutert, wie ein (geeigneter) Referenzplan ermittelt werden kann. Abschnitt 9.2.2 stellt ein MIP-Modell vor, mit welchem ein zu einem Referenzplan ähnlicher Plan erstellt werden soll – unter Beachtung eines Kostenrahmens. Der Lösungsansatz zum entwickelten Modell wird in Abschnitt 9.2.3 dargelegt. Auswirkungen unterschiedlicher Parameter werden anhand numerischer Ergebnisse in Abschnitt 9.2.4 aufgezeigt.

9.2.1 Bestimmung eines Referenzplanes

In der Praxis ist selten ein Tag als Referenztag definiert. D.h. es ist kein Tag vorgegeben, dessen Pläne als Referenzlösung für die anderen Tage gelten sollen. Eine Ausnahme sind z.B. Fahrplanwechsel, bei denen „neue“ Fahrpläne nach Möglichkeit wie die „alten“ Fahrpläne bedient werden sollen, sodass der Referenzressourceneinsatzplan zur Bedienung des neuen Fahrplans dabei jeweils immer durch den entsprechenden Ressourceneinsatzplan zum alten Fahrplan vorgegeben sein kann. Ist kein Referenztag vorgegeben, dessen Plan genutzt werden kann, um die Planung anderer Tage an diesen auszurichten, gibt es mehrere Möglichkeiten einen „künstlichen“ Referenzplan zu erstellen. Dazu wird ein traditionelles Planungsproblem mit einem der folgenden Fahrten-/Aufgabenmengen \mathcal{T} als Input gelöst:

- die Fahrten/Aufgaben \mathcal{T}^l eines beliebigen Betriebstages $l \in \mathcal{L}$
- alle r -regelmäßigen Fahrten/Aufgaben Q^r , d.h. die Fahrten/Aufgaben, die an mindestens $r \leq |\mathcal{L}|$ der betrachteten Tage vorkommen, mit den Spezialfällen:
- alle regelmäßigen Fahrten/Aufgaben $Q = Q^{|\mathcal{L}|} = \mathcal{T}^1 \cap \dots \cap \mathcal{T}^{|\mathcal{L}|}$, sowie
- alle regelmäßigen und alle unregelmäßigen Fahrten/Aufgaben, d.h. die Fahrten/Aufgaben aller Betriebstage $Q^1 = \mathcal{T}^1 \cup \dots \cup \mathcal{T}^{|\mathcal{L}|}$

Mathematisch formuliert, ist das traditionelle Planungsproblem dabei wie folgt: Die zu bedienende Fahrten-/Aufgabenmenge sei mit \mathcal{T} definiert. Für jede Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ sei mit b_t beschrieben, wie oft diese bedient werden muss. Binärvariablen x_k mit $k \in K$ und entsprechenden Zielfunktionskoeffizienten c_k geben an, ob Umlauf bzw. Dienst k ausgewählt ist oder nicht. K sei die Menge aller zulässigen Umläufe bzw. Fahrer-Dienste und $K(t) \subset K$ sei die Menge aller Umlauf-/Fahrer-Dienste, die Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ enthalten. Das traditionelle *Ressourceneinsatzplanungsproblem*

(engl. *resource scheduling problem*, *RSP*) ist dann:

$$\sum_{k \in K} x_k c_k \rightarrow \min \quad (9.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K(t)} x_k = b_t \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (9.2)$$

$$x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (9.3)$$

Die Zielfunktion (9.1) minimiert das für das Planungsproblem definierte Ziel. Abdeckungsbedingungen (9.2) garantieren, dass jede Fahrt/Aufgabe so oft bedient wird, wie vorgegeben ist.

Im Hinblick auf die Auswahl eines geeigneten Referenzplan für die Planung mehrerer Tage kann das Ziel des Modells variiert werden. Die Ressourceneinsätze K können bewertet werden über

- die *Kosteneffizienz*, d.h. der Zielfunktionskoeffizient c_k eines Ressourceneinsatzes $k \in K$ entspricht dann den Kosten f_k des geplanten Ressourceneinsatzes, oder
- *potenzielle Ähnlichkeitsmaße*, d.h. der Zielfunktionskoeffizient c_k eines Ressourceneinsatzes $k \in K$ entspricht dann einer in Abschnitt 8.3.1 vorgestellten Kennzahl, die eine Wiederverwendbarkeit an anderen Tagen angibt, wobei diese dann zu maximieren ist.

Um einen Referenzplan zu erhalten, der geeignet sein kann, für mehrere Tage ähnliche Pläne zu erstellen, kann statt einem reinen Kostenziel z.B. die Maximierung der Wiederverwendbarkeit an mehreren Tagen das Ziel sein. Damit der gut wiederverwendbare Plan dabei nicht zu kostenintensiv wird bzw. ein Kostenlimit nicht überschreitet, kann eine zusätzliche Restriktion hinzugefügt werden, die die Kosten begrenzt. In Modell (9.1)-(9.3) (RSP) kann dann eine sogenannte ϵ -*constraint* eingefügt werden (siehe [Ehrgott, 2005]). Dabei beschreibt ϵ die maximal erlaubten Kosten und f_k seien die Kosten eines Umlaufes bzw. Dienstes $k \in K$:

$$\sum_{k \in K} x_k f_k \leq \epsilon \quad (9.4)$$

Die ϵ -constraint (9.4) gibt so einen Kostenrahmen für die ausgewählten Ressourceneinsätze vor. Eine weitere Möglichkeit, einen Kostenrahmen vorzugeben, wird im folgenden Abschnitt anhand eines anderen Modells beschrieben, das die Ausrichtung eines Ressourceneinsatzplans an einen Referenzplan beschreibt.

Welche Referenzpläne geeignet sein können, um ähnlich Pläne für mehrere Betriebs-tage zu erstellen, zeigen die späteren Ergebnisse in Abschnitt 9.2.4. Die eingangs formulierte Zielsetzung über eine Hilfestellung bei der Wahl eines Referenzplanes (siehe *Referenzplan Ziel 2*) ist damit erfüllt.

9.2.2 Modellierung RSP-IT-RS: Verknüpfen von Referenzplan und Elastic Cost Constraint

In der mathematischen Modellformulierung für die Planung mit Nutzung eines Referenzplanes sollen als Zielkriterien sowohl Kosteneffizienz als auch Ähnlichkeit abgebildet werden. Es wird also ein bi-kriterielles Entscheidungsproblem modelliert. Gesucht wird eine Modellierung, mit welcher gut *effiziente*, also *Pareto-optimale* Lösungen für die Ziele Kosteneffizienz und Ähnlichkeit bestimmt werden können. Eine Lösung heißt *effizient*, wenn es keine weitere Lösung gibt, die mindestens genauso gute Werte für die betrachteten Ziele besitzt und der Wert für eines der Ziele dabei besser ist.

Eine gut geeignete Formulierung zur Bestimmung effizienter Lösungen für ein bi-kriterielles Entscheidungsproblem schlagen [Ehrgott und Ryan, 2002] vor. Für einen Anwendungsfall aus dem Flugverkehr wird das Kostenziel als sogenannte *elastische Kostenrestriktion* (engl. *elastic cost constraint*) modelliert. D.h. die zur Erreichung eines Ziels erlaubten/gewünschten Kosten sind als Rahmen vorgegeben. (Geringe) Überschreitungen der Kostenrestriktion sind dabei zulässig. Eine solche Modellierung hat nach [Ehrgott und Ryan, 2002] und z.B. [Tam, 2011] gegenüber anderen möglichen Modellierungen wie z.B. der ϵ -constraint, die die gewünschten Kosten eines Plans hart nach oben begrenzt, einen entscheidenden Vorteil: Gute ganzzahlige Lösungen für das Modell sind rechentechnisch einfacher bestimmbar. Für eine ausführliche Begründung sei auf die Darstellung der Autoren verwiesen sowie auf [Ehrgott, 2006].

Mit Hilfe der elastischen Kostenrestriktion kann in einem Modell mit Ähnlichkeitsziel und Berücksichtigung eines Referenzplans sichergestellt werden, dass der Trade-Off zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit der berechneten Pläne beeinflusst werden kann: Die Unähnlichkeit bzw. Distanz zu einem Referenzplan soll minimiert werden, während die elastische Kostenrestriktion die Kosten des berechneten Planes begrenzt. Die oben an eine geeignete Modellformulierung gestellte Anforderung bezüglich des Trade-Offs (siehe *Referenzplan Ziel 3*) wäre somit also erfüllt. Die entsprechende Modellformulierung wird nachfolgend in zwei Varianten mit unterschiedlichen Kostenrahmen beschrieben, wobei sich die Beschreibung an der Darstellung in [Amberg et al., 2011] orientiert.

Kostenrahmen je Tag

Im entsprechenden Basismodell wird die Abdeckung der Servicefahrten bzw. Aufgaben durch eine Set-Partitioning-Formulierung sichergestellt. Sei die Menge der zu bedienenden Fahrten des Fahrplans bzw. der Aufgaben eines Tages mit \mathcal{T} bezeichnet. Für jede Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ sei mit b_t definiert, wie oft diese bedient werden muss. Binärvariablen x_k mit $k \in K$ und entsprechenden Zielfunktionskoeffizienten a_k , die die Distanz zum Referenzplan repräsentieren, geben an, ob Umlauf bzw. Dienst k in der Lösung ausgewählt ist oder nicht. K sei die Menge aller zulässigen Umlauf bzw. Fahrer-Dienste und sei $K(t) \subset K$ die Menge aller Umlauf-/Fahrer-Dienste, die die Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ enthalten. Zusätzlich seien jeder Variable x_k Kosten f_k zugeordnet.

Sei ϵ das Kostenlimit, berechnet als Produkt aus Kostenwert einer kosteneffizienten Lösung und einem Kostenerhöhungsfaktor, der die erlaubte Erhöhung an Kosten darstellt (z.B. 1,01 für 1% erlaubte Mehrkosten gegenüber der kosteneffizienten Lösung). Eine nicht negative *Schlupfvariable* s und eine *Surplus-Variable* u sind notwendig, um sicher zu stellen, dass die Kostenrestriktion immer erfüllt ist. Ein zur Variable u zugeordneter Faktor p_u bestraft jegliches Überschreiten des Kostenrahmens. Wie der Kostenfaktor gesetzt werden kann, dass dabei ein Trade-Off zwischen Kosten und genutztem zweiten Ziel geeignet abgebildet ist, beschreiben [Ehrgott, 2006] sowie [Weide, 2009] für eine robuste Planung von Diensten im Flugverkehr.

Das *Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und Benutzung eines Referenzplanes* (engl. *resource scheduling problem with irregular tasks using a reference schedule, RSP-IT-RS*) kann dann wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{k \in K} x_k a_k + u p_u \rightarrow \min \quad (9.5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K} x_k f_k + s - u = \epsilon \quad (9.6)$$

$$\sum_{k \in K(t)} x_k = b_t \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (9.7)$$

$$x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (9.8)$$

$$s, u \geq 0 \quad (9.9)$$

Die Zielfunktion (9.5) minimiert die Distanz zum gegebenen Referenzplan während die elastische Kostenrestriktion (9.6) die Kosten der Lösung beschränkt. Fahrt-/Aufgabenabdeckungsbedingungen (9.7) stellen sicher, dass jede Fahrt/Aufgabe genau so oft ausgeführt wird wie benötigt.

Wenn für die Planungsprobleme mehrerer Tage mit Hilfe eines Referenzplans ähnliche Pläne erstellt werden sollen, wird das Modell für jeden dieser Tage aufgestellt und gelöst. Pro betrachtetem Tag ist also eine elastische Kostenrestriktion definiert. D.h. eine Abweichung von den Kosten einer kostenoptimalen bzw. kosteneffizienten Lösung kann pro Tag gesteuert werden. Ein Gesamt-Modell über alle betrachteten Tage wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Kostenrahmen über alle Tage

Alternativ zu dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und Benutzung eines Referenzplanes in Modell (9.5)-(9.9) kann ebenso eine Variante formuliert werden, die die Kosten über alle betrachteten Tage begrenzt.

Zusätzlich zu den Definitionen von Modell (9.5)-(9.9) sei $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, m\}$ die Menge der betrachteten Tage. Dann sei die Menge der Fahrten/Aufgaben die an Tag $l \in \mathcal{L}$ ausgeführt werden müssen mit \mathcal{T}^l definiert, wobei b_t^l die Anzahl an Ausführungen von Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}^l$ festlegt. Außerdem sei dann K^l die Menge aller zulässigen Umlauf bzw. Fahrer-Dienste für Tag $l \in \mathcal{L}$ und $K^l(t) \subset K^l$ sei die Menge aller Umlauf-/Fahrer-Dienste die für Tag $l \in \mathcal{L}$ die Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}^l$ enthalten. Binärvariablen x_k^l mit $k \in K^l$ und zugeordneter Distanz zum Referenzplan a_k^l und Kosten f_k^l geben an, ob Umlauf bzw. Dienst k^l in der Lösung ausgewählt ist oder nicht.

Dann kann das *Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und Benutzung eines Referenzplanes gleichzeitig für mehrere Tage* (engl. *resource scheduling problem with irregular tasks using a reference schedule simultaneously for several days, RSP-IT-RS-SD*) wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l a_k^l + up_u \rightarrow \min \quad (9.10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l f_k^l + s - u = \epsilon \quad (9.11)$$

$$\sum_{k \in K^l(t)} x_k^l = b_t^l \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l \quad (9.12)$$

$$x_k^l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall k \in K^l \quad (9.13)$$

$$s, u \geq 0 \quad (9.14)$$

Für eine Beschreibung zu Zielfunktion und Restriktionen sei auf die entsprechende Darstellung zu Modell RSP-IT-RS (siehe Formulierung (9.5)-(9.9)) verwiesen. In Modell RSP-IT-RS-SD ist lediglich die Anzahl gleichzeitig einbezogener Tage verändert.

Variante RSP-IT-RS-SD wird im weiteren Verlauf der Arbeit aber nicht weiter betrachtet, da ein Lösen mehrerer Planungsprobleme mit dem vorher vorgestellten Modell RSP-IT-RS überlegen ist. Denn die vorherige Variante RSP-IT-RS ist besser pro Tag steuerbar: Evtl. stehen an einem Tag mehr freie Ressourcen zur Verfügung als an anderen Tagen, sodass für diesen Tag eine höhere Abweichung von einer kostenoptimalen Lösung möglich ist, um für ihn einen ähnlicheren Plan zu bilden. Dies kann dann explizit beim Lösen der einzelnen Planungsprobleme so vorgegeben werden. Außerdem hat Variante RSP-IT-RS den Vorteil, dass die Planungsprobleme der betrachteten Probleme nacheinander gelöst werden können. Die Problemgröße ist also geringer als bei einem gemeinsamen Lösen, wodurch die zum Lösen notwendige Rechenzeit verkürzt wird.

9.2.3 Lösungsansatz: Column Generation und ressourcenbeschränkte kürzeste Wege

Grundsätzlich wird Modell RSP-IT-RS (siehe Formulierung (9.5)-(9.9)) mit einem Column Generation-Ansatz gelöst (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dabei wird zur Lösung des beschränkten Master-Problems in der Basisversion ein LP-Solver eingesetzt. Die Dualwerte werden genutzt, um neue Ressourceneinsätze zu generieren, die als Spalten dem Modell hinzugefügt werden. Neue Spalten werden ermittelt, indem ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme gelöst werden. Ganzzahlige Lösungen können mit der Branch-and-Bound-Methode eines MIP-Solvers bestimmt werden bzw. im Rahmen einer Branch-and-Price-Prozedur.

Wird das Modell zur Planung mit einem Referenzplan im Rahmen einer sequentiellen, teilintegrierten und integrierten Umlauf- und Dienstplanung verwendet, sind einige Unterschiede und Besonderheiten beim Lösen zu beachten. Auf diese wird in den entsprechenden Kapiteln 10, 11 und 12 eingegangen. Im Folgenden wird das generelle Vorgehen beim Lösen von Master- und Pricing-Problem vorgestellt.

(Beschränktes) Master-Problem

Um Modell RSP-IT-RS aufstellen und lösen zu können, mit dem Ziel die Ähnlichkeit zum Referenzplan innerhalb eines gegebenen Kostenrahmens zu maximieren, muss sowohl ein Kostenrahmen vorgegeben werden (– im mathematischen Modell der Wert ϵ), als auch eine initiale Spaltenmenge bestimmt sein. Details dazu werden in diesem Unterabschnitt gegeben ebenso wie Anmerkungen zur wechselnden Elastizität des Kostenrahmens und zu Terminierungsmöglichkeiten für das Column Generation-Verfahren.

Initialisierung. Zur Initialisierung des (beschränkten) Master-Problems wird zunächst die Lösung für ein „normales“ Ressourceneinsatzplanungsproblem ohne Ähnlichkeitsziel berechnet (vgl. Modell RSP, (9.1)-(9.3)), dessen Ziel es ist, die zur Bedienung von Fahrten/Aufgaben notwendigen Kosten von Umläufen/Diensten zu minimieren. Im Gegensatz zu z.B. [Tam, 2011] wird dabei nicht nur das LP des RSPs gelöst, sondern auch das MIP. So ist sichergestellt, dass der Kostenrahmen für Modell RSP-IT-RS korrekt basierend auf einem zulässigen kosteneffizienten Ressourceneinsatzplan festgelegt wird. Zum anderen ist so eine zulässige ganzzahlige Lösung des bikriteriellen Planungsproblems garantiert. Die Umläufe/Dienste des kosteneffizienten Ressourceneinsatzplanes werden als initiale Spaltenmenge für das Master-Problem genutzt.

Erweiterte (initiale) Spaltenmenge. Abhängig vom Kontext in welchem das RSP-IT-RS gelöst wird, können noch zusätzliche Spalten initial hinzugefügt werden, um die Konvergenz des Verfahrens zu beschleunigen. Vor dem Hinzufügen derjenigen Spalten, die nicht während des Verfahrens erstellt werden, wird dann noch der jeweilige Zielfunktionswert, die Distanz zum Referenzplan, ermittelt.

Zusätzlich zu den Umläufen/Diensten aus dem kosteneffizienten Ressourceneinsatzplan des aktuellen Planungsproblems können Spalten aus dem Referenzplan abgeleitet werden. Vom Referenzplan werden ähnlich wie bei [Borndörfer et al., 2012] die Umläufe/Dienste vollständig als initiale Spalten übernommen, die nur Fahrten/Aufgaben enthalten, die im aktuellen Planungsproblem, d.h. für den aktuellen Tag, bedient werden müssen. Ressourceneinsätze aus dem Referenzplan, die neben Fahrten/Aufgaben, die nicht am aktuellen Tag bedient werden müssen, auch mindestens eine Fahrt/Aufgabe enthalten, die für den aktuellen Tag verplant werden muss, werden modifiziert übernommen: Unter Einhaltung der durch (z.B. Diensttypen) vorgeschriebenen Zulässigkeitskriterien werden Fahrten/Aufgaben, die nicht am aktuellen Tag bedient werden müssen, aus diesen Ressourceneinsätzen entfernt oder in eine Kombination aus Leerfahrten und Warten umgewandelt.

Zur initialen Spaltenmenge bzw. während des Column Generation-Verfahrens können noch weitere bereits bekannte Umläufe/Dienste aus den Lösungen anderer Tage hinzugefügt werden, wenn das RSP-IT-RS im Kontext mehrerer Tage gelöst wird. Dazu kann zum einen auf die bereits ermittelten Umlauf-/Dienstpläne zurück gegriffen werden oder auf „gute“ Umläufe/Dienste, die im Column Pool (siehe z.B. Abschnitt 6.2.3) abgelegt sind und vollständig bzw. modifiziert übernommen werden können.

Gleiches gilt, wenn das RSP-IT-RS im Kontext mehrerer Varianten von ϵ gelöst wird. D.h. wenn z.B. zum Referenzplan ähnliche Ressourceneinsatzpläne erstellt wer-

den sollen, deren Kosten im Rahmen von 100%, 101%, 102% und 103% zum kosteneffizienten Ressourceneinsatzplan liegen soll.

Elastizität des Kostenrahmens. Für den Kostenrahmen ϵ gilt generell: Während des Column Generation-Verfahrens (im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Baumes) wird beim Lösen des LPs von Modell (9.5)-(9.9) die Surplus-Variable u auf 0 gesetzt, sodass die Kostenrestriktion nicht elastisch, sondern hart ist, wie u.a. auch bei [Weide, 2009] beschrieben. Im assoziierten Dualwert ist dann die Einhaltung der Restriktion entsprechend abgebildet. Kostenrestriktion (9.6) ist damit nur beim Lösen des MIPs elastisch.

Terminierung. Das Column Generation-Verfahren kann zusätzlich zu den u.a. in Abschnitt 6.2.6 erwähnten Abbruchkriterien abgebrochen werden, wenn mit der vorhandenen Spaltenmenge ein Plan erzeugt werden kann, der ähnlich dem Referenzplan ist. D.h. als zusätzliches Kriterium kann überprüft werden, ob die Distanz zum Referenzplan überwunden werden konnte, also ob $\sum_{k \in K} x_k a_k = 0$ ist.

Column Generation Pricing-Problem

Um die (LP-)Lösung des beschränkten Master-Problems zu verbessern, werden mit Hilfe der Dualwerte aus der Lösung neue Spalten mit negativen reduzierten Kosten, d.h. neue mögliche Ressourceneinsätze, erzeugt. Dabei setzt sich die duale Lösung wie folgt zusammen: Sei λ die duale Variable, die der Kostenrestriktion (9.6) zugeordnet ist, und sei π_t die duale Variable für Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ aus den Abdeckungsbedingungen (9.7). Die reduzierten Kosten \bar{a}_k eines Umlaufes/Dienstes $k \in K$ werden dann ermittelt als:

$$\bar{a}_k = a_k - f_k \lambda - \sum_{t \in \mathcal{T}(k)} \pi_t \quad (9.15)$$

wobei a_k die Distanz des Ressourceneinsatzes zum Referenzplan ist, f_k die Kosten des Ressourceneinsatzes und $\mathcal{T}(k)$ die Menge der durch den Ressourceneinsatz abgedeckten Fahrten/Aufgaben.

Umläufe/Dienste mit negativen reduzierten Kosten können wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, bei Bedarf während des Lösungsprozesses aus einen Column Pool bestimmt werden, in welchem bereits für eine gute Lösung potenziell geeignete Umläufe/Dienste abgelegt sind. Für diese in vorherigen Lösungen berechneten Ressourceneinsätze müssen lediglich im Pricing-Schritt die reduzierten Kosten aktua-

liert werden, um zu prüfen, ob sie zum beschränkten Master-Problem hinzugefügt werden sollten.

Neue Umläufe/Dienste mit negativen reduzierten Kosten werden über Umlauf- bzw. Dienstgenerierungsnetzwerke ermittelt, die implizit alle möglichen Fahrten-/Aufgabenkombinationen beinhalten. Für eine vereinfachte Darstellung wird in diesem Abschnitt der Fall von Dienstgenerierungsnetzwerken betrachtet (siehe Abschnitt 6.2.1). Für eine Beschreibung der Besonderheiten von Umlaufgenerierungsnetzwerken sei auf Abschnitt 10.4.1 verwiesen. Wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben ist ein Dienstgenerierungsnetzwerk $G = (N, A)$ aus der Knotenmenge N und der Kantenmenge A aufgebaut, wobei die Knoten Ereignisse zu bestimmten Zeiten an bestimmten Orten repräsentieren und die Kanten Aufgaben, Dienstanfänge, -enden, Pausen und andere Aktivitäten. Auf den Kanten sind sowohl (reduzierte) Kosten, als auch Ressourcenverbräuche (wie z.B. die Arbeitszeit) abgelegt, die neben strukturellen Pfadbeschränkungen die Zulässigkeitskriterien eines speziellen Diensttyps abbilden. Jeder Pfad zwischen dem Quell- und dem Senkeknoten entspricht einem Dienst. Jeder Pfad zwischen Quell- und Senkeknoten, auf dem die Ressourcenverbräuche eingehalten werden, entspricht einem zulässigen Dienst.

Das so modellierte ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Problem zum Auffinden von Pfaden mit negativen reduzierten Kosten wird mit einem Label-Setting-Algorithmus gelöst (siehe Abschnitt 6.2.4). Für eine Berücksichtigung von elastischer Kostenrestriktion und Minimierung der Distanz zum Referenzplan sind einige Anpassungen notwendig, die im Folgenden dargestellt werden.

Zu jeder Kante $(i, j) \in A$ sind (fixe oder variable Dienst-)Kosten f_{ij} definiert. Zur Bestimmung der reduzierten Kosten eines Pfades kann bereits auf jeder Kante neben den Dualwerten π der Aufgabenabdeckungsbedingungen, auch der Dualwert λ der elastischen Kostenrestriktion berücksichtigt werden. Für die reduzierten Kosten \bar{f}_{ij} einer Kante $(i, j) \in A$ gilt dann:

$$\bar{f}_{ij} = \begin{cases} f_{ij} - f_{ij}\lambda - \pi_t & \text{für } : \exists t \in \mathcal{T} : (i, j) \in A(t) \\ f_{ij} - f_{ij}\lambda & \text{für } : \neg \exists t \in \mathcal{T} : (i, j) \in A(t) \end{cases} \quad (9.16)$$

wobei $A(t) : \mathcal{T} \rightarrow A$ eine Funktion sei, die für jede Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ die zugehörige Kante $(i, j) \in A$ liefert.

Der andere Teil der reduzierten Kosten eines Dienstes/Pfades $k \in K$, die Distanz a_k zum Referenzplan, wird nicht auf den Kanten des Dienstgenerierungsnetzwerk abgebildet. Wie in Abschnitt 8.3.2 ausgeführt wurde, basiert das in dieser Arbeit genutzte Distanzmaß grundsätzlich auf der Messung von Unterschieden in Fahrten-

/Aufgabensequenzen. Dabei werden in die Sequenzbetrachtung nicht zwangsläufig alle regelmäßigen und unregelmäßigen Aufgaben eingezogen. Es wird die Aufgabemenge Q^r betrachtet, also r -regelmäßige Aufgaben, d.h. Aufgaben, die an mindestens $r = 1 \dots n$ der betrachteten Tage ausgeführt werden. Daher kann es sein, dass in einer Aufgabensequenz zwischen den in die Distanzmessung einbezogenen Aufgaben eine Aufgabe liegt, die nicht einbezogen werden soll (- eine Fahrt, die an $1 \dots r-1$ Tagen zu bedienen ist). Über die in einer Sequenz direkt aufeinanderfolgenden Aufgaben muss also nicht unbedingt auch eine Aussage über die Distanz zu den entsprechenden Sequenzen aus dem Referenzplan gegeben werden können. Die Distanz lässt sich also nicht über zusätzliche Informationen auf den Kanten einer Netzwerkstruktur abbilden, wie z.B. über Informationen auf einer (Leerfahrt-)Kante in einem Connection basiertem Netzwerk (siehe z.B. Abschnitt 3.1.2), die zwei aufeinanderfolgende Servicefahrt-Kanten miteinander verknüpft.

Um die Distanz eines (Teil-)Pfades erfassen zu können, wird sie daher im Label-Setting-Algorithmus gemessen. Die Distanz wird erhöht, wenn Fahrten-/Aufgabenfolgen eines (Teil-)Pfades nicht den Folgen im Referenzplan entsprechen. Die Distanzmessung wird dadurch ermöglicht, dass Label eine zusätzliche Information über die für eine Distanzmessung letzte relevante Aufgabe auf dem bisherigen (Teil-)Pfad besitzen. Eventuelle pfadabhängige Distanzen (z.B. die Arbeitszeit im Vergleich zur Arbeitszeit im Referenzplan) werden im Senke-Knoten bestimmt und entsprechend gewichtet quantifiziert in die Distanz mit aufgenommen. In den Dominanztests zur Identifikation von (Teil-)Pfaden, die nicht zu einer guten Lösung führen können, werden als zusätzliches Kriterium die (Dienst-)Kosten berücksichtigt (für Dominanztests siehe Abschnitt 6.2.4).

Algorithmus 9.2.1 zeigt die Änderungen im Vergleich zur Basisversion (siehe Abschnitt 6.2.4). Wenn L_i die Menge aller Label an Knoten i bezeichnet, (i, j) eine Kante von Knoten i zu Knoten j im Netzwerk $G = (N, A)$ darstellt, auf der unter anderem (reduzierte) Kosten \bar{f}_{ij} und pro Ressource $v \in V$ ein Ressourcenverbrauch d_{ij}^v definiert sind, $\bar{a}(l)$ die kumulierten reduzierten Kosten, $t(l)$ die für eine Distanzmessung letzte relevante Aufgabe auf dem bisherigen (Teil-)Pfad und $d^v(l)$ den kumulierten Ressourcenverbrauch pro Ressource v eines Labels $l \in L_i$ beschreibt, dann ist ein daraus gebildetes Label m an Knoten j durch $L_j^m = (l, t(l), \bar{a}(l) + \bar{f}_{ij}, \dots, d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ definiert. Die Menge permanenter Label an Knoten j , also die Menge der Label, die im Algorithmusverlauf nicht mehr geändert werden müssen, sind mit $\bar{L}_j \subseteq L_j$ bezeichnet. Des weiteren bezeichne s den Quellknoten des Dienstgenerierungsnetzwerkes G und sei u^v die obere Schranke für den Verbrauch der Ressource $v \in V$. Außerdem sei $\mathcal{T}(i, j) : A \rightarrow \mathcal{T}$ eine Funktion, die für jede Kante $(i, j) \in A$ die Aufgabe $t \in \mathcal{T}$

liefert, die mit der Kante (i, j) im Netzwerk assoziiert ist, und $\text{Distanz}(t_1, t_2)$ sei eine Funktion, die eine mögliche Abweichung der Aufgabenfolge (t_1, t_2) vom gegebenen Referenzplan bewertet.

Algorithmus 9.2.1 : Label Setting mit Distanzberücksichtigung zu einem gegebenen Referenzplan

```

// Schritt 1: Initialisierung
Setze  $L_s = \bar{L}_s = \{\text{nil}, 0, \dots, 0\}$ 
Setze  $L_i = \bar{L}_i = \emptyset \forall i \in N \setminus \{s\}$ 
// Schritt 2: Pfaderweiterungen und Dominanztests
// Wähle Knoten j
foreach  $j \in N \setminus \{s\}$  do
    // Betrachte alle Vorgängerknoten i von Knoten j
    foreach  $i \in \{i : (i, j) \in A\}$  do
        // Betrachte alle Label an Knoten i
        foreach  $l \in \bar{L}_i$  do
            // Prüfe Ressourcenverbräuche
            if  $\exists v \in V : d^v(l) + d_{ij}^v > u^v$  then
                next  $l$ 
            // Prüfe Aufgabenfolge und erstelle neues Label m
            if  $\mathcal{T}(i, j) \in Q^r$  then
                 $L_j^m = (l, \mathcal{T}(i, j), \bar{a}(l) + \bar{f}_{ij} + \text{Distanz}(t(l), \mathcal{T}(i, j)), \dots, d^1(l) +$ 
                 $d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
            else
                 $L_j^m = (l, t(l), \bar{a}(l) + \bar{f}_{ij}, \dots, d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
             $L_j = L_j \cup L_j^m$ 
        // Entferne dominierte Label an Knoten j
         $\bar{L}_j = \text{Effiziente\_Label}(L_j \cup \bar{L}_j)$ 

```

Bestimmung ganzzahliger Lösungen: Branch-and-Bound vs. Branch-and-Price

Nach Abbruch des Column Generation-Verfahren für das LP von Modell (9.5)-(9.9) ist diese Lösung zwar optimal für die kontinuierlichen Spalten/Variablen, allerdings können in einer optimalen MIP-Lösung des Modells auch (ganzzahlige) Variablen enthalten sein, die noch nicht Teil des (beschränkten) Master-Problems sind. Um die optimale Lösung des MIPs zu garantieren, schlagen [Barnhart et al., 1998] das Branch-and-Price-Verfahren vor, in welchem im Suchbaum des Branch-and-Bound neue verbessernde Spalten/Variablen nachgeneriert werden.

Allerdings haben die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Experimente gezeigt, dass die Lücke zwischen optimaler LP-Lösung des (beschränkten) Master-Problems und MIP-Lösung desselbigen je nach Abbruch des Column Generation-Verfahrens sehr gering ist: zwischen 0-1,5%. Statt eines (rechenintensiveren) Branch-and-Price-Verfahrens wird Modell (9.5)-(9.9) daher in der Basisversion mit dem Branch-and-Bound-Verfahren eines MIP-Solvers gelöst, in welchem im Wurzelknoten des Suchbaumes das LP optimal mittels Column-Generation gelöst wird. Mit den ermittelten Umläufen/Diensten startet dann das Branch-and-Bound-Verfahren zur Bestimmung einer ganzzahligen Lösung.

9.2.4 Analyse numerischer Ergebnisse

Bei der Formulierung und Lösung des Ressourceneinsatzplanungsproblems mit Ähnlichkeitszielen als RSP-IT-RS ist insbesondere die Wahl des Referenzplans von entscheidender Bedeutung für die Lösungsqualität der ermittelten Ressourceneinsatzpläne (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die in diesem Abschnitt vorgestellten Testrechnungen veranschaulichen, wie sich die Qualität bei Wahl unterschiedlicher Referenzpläne voneinander unterscheiden kann. Dabei werden die Effekte bei Nutzung eines Referenzplans für die Planung mehrerer Tage gezeigt (vgl. auch *Referenzplan Ziel 1* zu Beginn des Abschnitts 9.2).

Testumgebung

Getestet wird auf einem Sony Vaio SVS1513Z9EB mit Intel Core i7-3632QM @ 2,20 GHz und 8 GB RAM unter Windows 8 Professional. Das Optimierungssystem zur Umlauf- und Dienstplanung (mit Ähnlichkeitsberücksichtigung) ist in C# implementiert und wurde kompiliert mit dem .NET Framework Version 2.0.5027 SP2. Zum Lösen von LPs und MIPs, wird ILOG Cplex in der Version 12.2.0.2 eingesetzt.

Das in dieser Arbeit genutzte Gesamttestset besteht aus vier Instanzenmengen, die jeweils fünf Fahrpläne zu den Wochentagen Montag bis Freitag enthalten. Betrachtet werden reale Instanzen (*Testset A*, *Testset B*, *Testset D*) und künstlich erstellte Instanzen (*Testset C*). Für eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Instanzenmengen u.a. mit den in Abschnitt 8.2 vorgestellten Beurteilungsmöglichkeiten zur Ähnlichkeit sei auf Anhang A.2 verwiesen.

Die Effekte unterschiedlicher Referenzpläne werden exemplarisch an den Testsets A, B, C und D dargestellt. Abbildung 9.1 zeigt den Verlauf der an unterschiedlichen Tagen zu bedienenden Fahrten der Woche im Tagesverlauf.

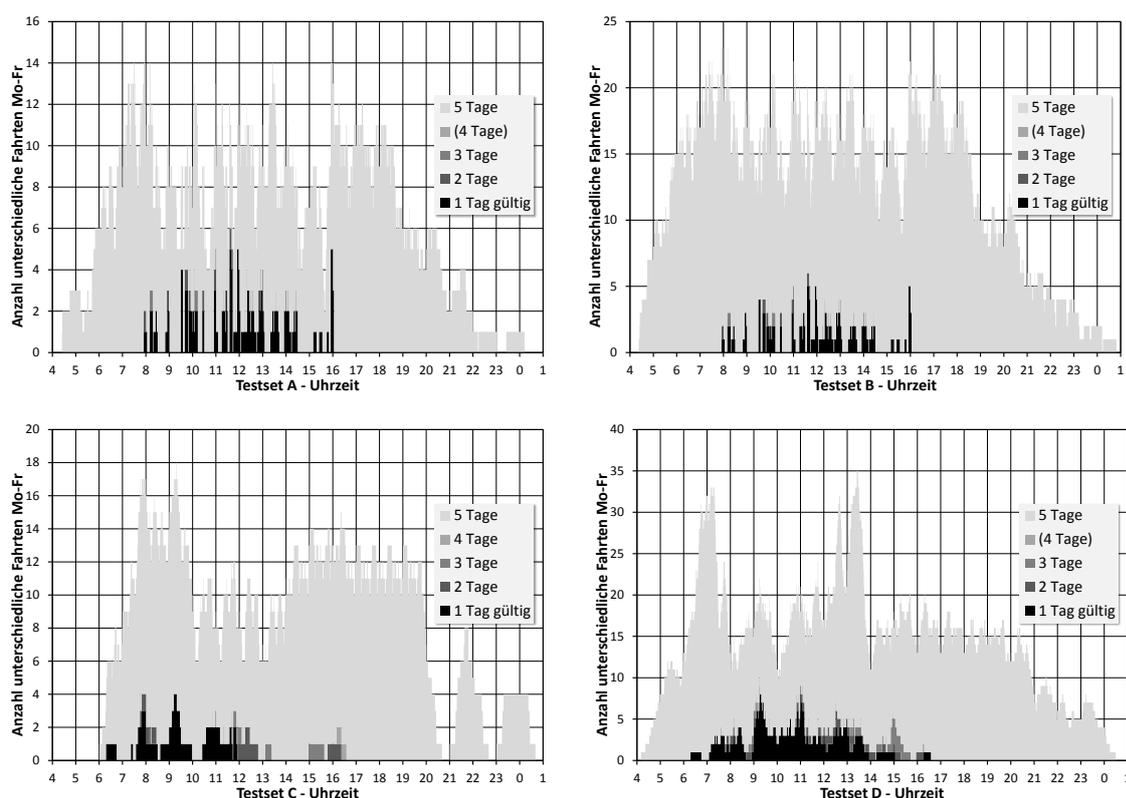


Abbildung 9.1: Verlauf der (un-)regelmäßigen Fahrten an den betrachteten Tagen

Die Auswirkungen unterschiedlicher Referenzplänen lassen sich gut an einer teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen demonstrieren, deren Umsetzung im späteren Kapitel 11 noch genauer erläutert wird. Für Unterschiede in den Planungsvarianten sei auf Teil IV dieser Arbeit verwiesen.

Zur Diensterstellung werden fünf Diensttypen erlaubt, die die Zulässigkeit der zu erstellenden Dienste bestimmen: Kurzdienste, drei unterschiedliche Arten zusammenhängender Dienste und geteilte Dienste. Eine ausführliche Übersicht über die Typen findet sich in Anhang A.1.

Effekte unterschiedlicher Referenzpläne

Als Referenzpläne werden die als kosteneffizient ermittelten Ressourceneinsatzpläne der einzelnen Wochentage $\mathcal{L} = \{Mo, Di, Mi, Do, Fr\}$ genutzt sowie die Pläne, die durch Lösen von Planungsproblemen bestimmt werden, in denen jeweils die r -regelmäßigen Fahrten Q^r zu bedienen sind, mit $r = 1..5$.

Tabelle 9.1 fasst die Ergebnisse zusammen. Dabei sind angegeben die Art des genutzten Referenzplans (*ref*), die benötigte Rechenzeit vom Einlesen der Daten bis zum Ausgeben der ermittelten Pläne (*runtime*), die Kostenbewertungen der Lösun-

gen (*costs*), die Gesamtanzahl der verwendeten Ressourceneinsätze ($\# res$), die durchschnittliche Wiederholrate der Ressourceneinsätze samt der Gültigkeit der Einsätze aufgelistet von einem bis zu fünf Tagen (*rate*), der durchschnittliche Anteil gleich bedienter Fahrten mit dem Minimal- und Maximalwert (*ratio*) sowie die durchschnittliche Distanz zwischen den erstellten Plänen ebenfalls mit Minimal- und Maximalwert (*distance*).

Tabelle 9.1 zeigt, dass sich bei Einbeziehung eines Referenzplans in die Planerstellung im Vergleich zu einer reinen kosteneffizienten Planung sowohl die vollständige als auch die partielle Ähnlichkeit der Pläne verbessern kann. So kann die Wiederholrate der Ressourceneinsätze um bis zu 5-66% gesteigert werden, der Anteil gleich bedienter Fahrten um bis zu 10-90% und die Distanz der Pläne zueinander kann um bis zu 18-80% gesenkt werden.

Die Tabelle veranschaulicht außerdem die wesentlichen Unterschiede in der Ergebnisqualität, die durch Nutzung unterschiedlicher Referenzpläne entstehen. Die ermittelten Kennzahlen zur Ähnlichkeitsbewertung weichen für die Instanzen aus Testset A, B und C mindestens bis zu 6% voneinander ab und maximal bis zu 20%. Insbesondere deutlich werden diese Abweichungen an den Instanzen aus Testset D, bei welchem sich die Ähnlichkeitsbewertungen der erstellten Pläne bis zu 30% in der Wiederholrate und anteiligen Ähnlichkeit unterscheiden und bis 70% bei der Distanzbewertung. So können beispielsweise im besten Fall Pläne für eine Woche erstellt werden, in denen 25 Dienste an allen fünf Tagen gültig sind, wohingegen im ungünstigsten Fall mit Hilfe eines anderen Referenzplans Pläne gebildet werden, die nur vier solcher Dienste enthalten.

In der Regel können dann kosteneffiziente Ressourceneinsatzpläne mit guten Ähnlichkeitsbewertungen ermittelt werden, wenn als Referenzplan ein künstlicher Plan genutzt wird, der nicht nur regelmäßige, sondern auch unregelmäßige Fahrten enthält. Im Beispiel gilt dies abhängig je Instanz insbesondere bei Nutzung eines Plans, der Fahrten bedient, die an mindestens zwei oder drei Tagen durchzuführen sind. Diese Pläne sind dann allgemeingültig genug, dass bei der Ausrichtung anderer Pläne daran die jeweiligen Eigenheiten der spezifischen Tage, d.h. andere unregelmäßige Fahrten, ebenfalls bei der Planerstellung berücksichtigt werden können.

Die Pläne einzelner (Wochen-)Tage sorgen als Referenzplan zumeist dann für ähnliche andere Ressourceneinsatzpläne, wenn sie unregelmäßige Fahrten enthalten, die über den Tag verteilt sind und diese zeitlich nicht zu dicht zusammen liegen bzw. sich nicht überschneiden (z.B. Di in Testset D). Zeitliche Überschneidungen unregelmäßiger Fahrten in den Referenzplänen haben keinen größeren störenden Effekt, wenn die Fahrten mehrere Male im Wochenverlauf zu bedienen sind.

ref	run-time	costs	# res	rate \varnothing (#diff by days)	ratio \varnothing (min-max)	distance \varnothing (min-max)
<i>Testset A</i>						
–	00:01:54	244.769	179	1,58 (81;13;10;3;6)	59,6 (52,3-67,6)	46,0 (34-57)
Mo	00:00:42	244.769	179	1,61 (79;13;8;5;6)	63,3 (55,7-69,0)	32,8 (18-44)
Di	00:00:31	244.705	179	1,67 (74;12;9;6;6)	66,1 (60,7-73,4)	30,4 (10-43)
Mi	00:00:50	244.708	179	1,70 (70;15;8;5;7)	64,3 (56,5-72,5)	32,3 (22-42)
Do	00:00:43	244.749	179	1,66 (71;20;7;3;7)	63,8 (54,3-69,3)	32,6 (18-45)
Fr	00:00:59	244.720	179	1,66 (73;17;7;4;7)	64,8 (58,3-70,6)	36,2 (18-48)
r=5	00:01:35	244.706	179	1,61 (74;22;5;4;6)	63,3 (54,1-70,1)	35,5 (10-50)
r=3	00:00:38	244.640	179	1,75 (67;15;5;8;7)	65,6 (55,1-71,8)	33,6 (18-45)
r=2	00:00:49	244.739	179	1,60 (79;16;6;5;6)	63,3 (55,3-70,2)	30,4 (10-43)
r=1	00:01:19	244.768	179	1,66 (73;16;8;5;6)	63,9 (57,8-72,1)	32,5 (10-46)
<i>Testset B</i>						
–	00:22:35	336.890	236	1,36 (139;18;7;5;4)	52,4 (46,0-62,5)	92,2 (65-120)
Mo	01:24:38	336.893	236	1,43 (128;17;11;4;5)	56,0 (49,6-68,0)	75,5 (43-95)
Di	01:19:21	336.879	236	1,40 (135;16;8;5;5)	54,5 (47,7-63,5)	81,3 (60-98)
Mi	00:55:14	336.881	236	1,40 (131;22;6;2;7)	55,4 (46,6-63,5)	78,3 (48-113)
Do	01:09:58	336.867	236	1,39 (133;21;7;5;4)	54,1 (48,3-65,5)	85,6 (53-112)
Fr	00:46:26	336.840	236	1,42 (130;18;7;6;5)	56,5 (51,3-68,3)	75,9 (49-94)
r=5	01:12:17	336.871	236	1,39 (132;23;7;3;5)	55,6 (50,6-64,7)	75,2 (57-100)
r=3	01:38:02	336.877	236	1,44 (127;21;5;3;8)	57,5 (51,8-69,6)	73,0 (53-85)
r=2	01:02:23	336.889	236	1,36 (139;20;5;3;6)	54,1 (47,8-61,7)	90,9 (69-116)
r=1	00:40:03	336.855	236	1,35 (141;19;7;4;4)	52,4 (42,1-62,9)	89,0 (65-124)
<i>Testset C</i>						
–	00:00:43	351.271	274	1,51 (127;29;14;8;3)	51,1 (44,0-65,4)	116,3 (83-137)
Mo	00:00:27	351.174	274	1,62 (115;25;13;10;6)	54,4 (41,7-73,4)	105,0 (55-142)
Di	00:00:20	351.261	274	1,58 (120;26;15;8;5)	53,7 (44,5-65,8)	108,9 (73-137)
Mi	00:00:28	351.191	274	1,64 (115;24;11;7;10)	55,1 (48,1-67,4)	101,2 (80-119)
Do	00:00:18	351.207	274	1,67 (103;31;16;9;5)	54,6 (45,8-73,2)	110,3 (53-134)
Fr	00:00:21	351.252	274	1,64 (114;19;21;6;7)	55,3 (43,5-82,5)	104,0 (36-142)
r=5	00:00:31	351.271	274	1,51 (130;27;14;7;4)	50,7 (42,9-67,0)	114,5 (67-144)
r=4	00:00:30	351.170	274	1,56 (123;27;12;9;5)	52,0 (41,5-70,6)	112,3 (56-142)
r=3	00:00:28	351.162	274	1,62 (115;26;13;7;8)	54,9 (45,6-71,4)	105,6 (59-134)
r=2	00:00:19	351.259	274	1,70 (105;27;8;14;7)	58,3 (47,2-71,5)	95,9 (52-127)
r=1	00:00:21	351.156	274	1,51 (130;26;12;9;4)	51,8 (44,1-64,8)	112,4 (83-137)
<i>Testset D</i>						
–	00:36:10	476.778	348	1,22 (242;29;10;2;2)	37,4 (33,4-44,4)	212,2 (174-227)
Mo	00:52:03	476.767	348	1,58 (159;24;20;9;9)	55,8 (48,4-64,7)	103,8 (77-129)
Di	00:31:36	476.724	348	2,03 (99;26;13;8;25)	71,4 (65,2-80,0)	42,6 (12-58)
Mi	01:06:38	476.791	348	1,41 (195;20;15;12;4)	48,8 (39,9-62,4)	142,7 (69-176)
Do	00:52:31	476.734	348	1,63 (155;23;7;19;10)	58,4 (44,1-73,4)	95,1 (36-146)
Fr	00:51:58	476.705	348	1,69 (134;38;11;10;13)	58,7 (51,5-71,7)	105,3 (54-128)
r=5	00:45:36	476.734	348	1,81 (127;17;18;17;13)	64,5 (57,8-72,3)	71,0 (36-102)
r=3	00:47:52	476.802	348	1,91 (117;16;13;20;16)	68,2 (60,3-76,6)	63,2 (37-96)
r=2	01:11:59	476.793	348	1,79 (135;21;9;6;24)	64,7 (57,2-71,2)	71,0 (37-105)
r=1	00:42:12	476.750	348	1,77 (133;23;21;9;11)	62,9 (53,3-71,6)	71,2 (36-104)

Tabelle 9.1: Ähnlichkeitbewertungen zu mit Referenzplänen ermittelten Ressourceneinsatzplänen für fünf Tage ohne Erhöhung der Kosten

9.3 Neue Ansätze für tagesübergreifende Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster

Ein Nachteil der ähnlichen Planerstellung bei mehreren Tage mit Hilfe eines Referenzplans ist, dass die Planungsprobleme verschiedener Tage getrennt voneinander gelöst werden, sodass keine direkte Interaktion zwischen den Planungsproblemen erfolgt, mit der eine gute Ähnlichkeit zwischen den Plänen erreicht werden könnte (vgl. Abschnitt 2.4.3 und Kapitel 5). Die Ähnlichkeit der berechneten Pläne zueinander hängt somit stark von der Qualität des genutzten Referenzplanes ab.

Es ist anzunehmen, dass sich noch bessere Pläne ermitteln lassen, wenn bei der Planerstellung zwischen den Planungsproblemen einzelner Tage interagiert wird. Eine solche Interaktion bietet mehr Freiheitsgrade bei der Bestimmung ähnlicher Pläne. Sie kann mit einer tagesübergreifenden Planung realisiert werden. Ziel einer solchen tagesübergreifenden Planung ist es, Fahrten-/Aufgabenmuster zu finden, die in den Plänen gemeinsam betrachteter Tage genutzt werden können. Muster, die sich in den Plänen verschiedener Tage wiederholen, sorgen dann für ähnliche Pläne.

Dabei kann zwischen zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen unterschieden werden: Durch geschicktes Vorgehen beim Verteilen der zu verplanenden Fahrtenmenge auf Ressourceneinsätze, werden *implizit* Muster gefunden, die für die Ressourceneinsätze verschiedener Tage gelten. Bei diesen Vorgehensweisen ist es aber schwer möglich, gezielt Muster zu bestimmen, die die Ähnlichkeit unterschiedlicher Ressourceneinsatzpläne maximieren. Daher sind Modellierungen notwendig, die *explizit* Muster berücksichtigen und entsprechende Ähnlichkeitsbewertungen für diese Muster abbilden können. Die Entwicklung einer solchen Modellierung konkretisiert die in Kapitel 5 formulierte Zielsetzung bezüglich einer tagesübergreifenden Planung durch regelmäßige Muster und bildet somit das vorrangige Ziel dieses Abschnittes (*Muster Ziel 1*).

Heuristische Verfahren, die implizit Muster generieren, werden in Abschnitt 9.3.1 vorgestellt. Eine Modellierung, die explizit Muster als Ähnlichkeitsziel berücksichtigt, wird in Abschnitt 9.3.2 vorgeschlagen. Der entsprechende Lösungsansatz zu dieser Modellierung wird in Abschnitt 9.3.3 beschrieben, Auswahlmöglichkeiten für explizite Fahrten-/Aufgabenmuster in Abschnitt 9.3.4.

9.3.1 Implizite Muster durch heuristische Verfahren

Durch bestimmte Vorgehensweisen beim Verplanen der Fahrtenmenge verschiedener Tage werden implizit (Fahrten-)Muster in den Plänen generiert, die für ähnliche Res-

sourceneinsatzpläne sorgen. Allerdings ist es bei diesen Vorgehensweisen schwierig, die Ähnlichkeit der Pläne (kosteneffizient) zu maximieren, da die Muster nicht gezielt entstehen.

Extremheuristiken

Die unter *Extremheuristiken* zusammengefassten Vorgehensweisen eignen sich in der Grundform nicht besonders gut, kosteneffiziente und ähnliche Pläne zu erstellen. Sie werden aufgeführt, da mit ihnen unter Umständen sehr ähnliche Pläne erstellt werden (allerdings verbunden mit hohen Kosten), zu denen die Ähnlichkeit anderer Vorgehensweisen, Modellierungen und Lösungsansätze verglichen werden kann.

[Steinzen, 2007] beschreibt zwei solcher heuristischen Vorgehensweisen beim Einsatz von „Standard-Optimierung“ zur Ermittlung ähnlicher Pläne, die nach ihm nicht besonders zielführend sind, um kosteneffiziente und ähnliche Pläne zu erstellen (Begründung siehe Abschnitt 2.4.3). Zum einen die sogenannte *Regular-First-Irregular-Second-Heuristik*, bei welcher zunächst ein Planungsproblem für alle regelmäßigen Fahrten gelöst wird und in einem zweiten Schritt (pro Tag) je ein Planungsproblem für die unregelmäßigen Fahrten. Zum anderen die sogenannte *All-First-Irregular-Second-Heuristik*, bei welcher im ersten Schritt ein Planungsproblem mit allen Fahrten gelöst wird und die Umläufe/Dienste fixiert werden, die nur regelmäßige Fahrten enthalten, und im zweiten Schritt (pro Tag) je ein Planungsproblem mit den unfixierten regelmäßigen und unregelmäßigen Fahrten gelöst wird.

Variationsmöglichkeiten ergeben sich dadurch, im ersten Schritt der Heuristiken nicht alle regelmäßigen oder alle Fahrten/Aufgaben zu berücksichtigen, sondern die r -regelmäßige Fahrtenmenge, also alle Fahrten/Aufgaben, die an mindestens $r \in \mathbb{N}$ der betrachteten Tage eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 8.3).

All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik

Eine bessere heuristische Vorgehensweise ist die *All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik*. Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Vorgehensweisen werden nicht gesamte Ressourceneinsätze für die Planung mehrerer Tage fixiert, sondern nur Teile, d.h. Fahrten- bzw. Aufgabenketten. Dadurch können mit weniger Kosten Pläne ermittelt werden, die ähnlicher sind, als beim tageweisen Lösen traditioneller Ressourceneinsatzplanungsprobleme.

Algorithmus 9.3.1 stellt das Vorgehen zusammenfassend dar. Abbildung 9.2 zeigt ein einfaches Beispiel für die Bestimmung von Fahrtenketten. Im Beispiel können die einzelnen regelmäßigen Fahrten 2, 3 und 4 zu einer Fahrtenkette zusammengefasst

Algorithmus 9.3.1 : All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik

-
- (Schritt 1) **Löse Planungsproblem RSP mit den Fahrten T aller N Tage:**
 Löse $\text{RSP}(T^1 \cup T^2 \cup \dots \cup T^n)$
- (Schritt 2) **Fixiere Sequenzen (regelmäßiger) Fahrten zu Ketten:**
 Identifiziere aus Fahrtenketten fixierbare Fahrten Q^{FIX}
 Fixiere Fahrtenketten zu neuen Fahrten T^{FIX}
 Bestimme zu verplanende Fahrten S für jeden Tag:
for $i \leftarrow 1$ **to** n **do**
 $S^i \leftarrow T^i \setminus Q^{FIX} \cup T^{FIX}$
end
- (Schritt 3) **Löse Planungsprobleme mit den Fahrten für jeden Tag:**
for $i \leftarrow 1$ **to** n **do**
 Löse $\text{RSP}(S^i)$
end
-

werden, da keine unregelmäßige Fahrt die Sequenz unterbricht. Diese Fahrtenkette kann dann in den Planungsproblemen der unterschiedlichen Tage als einzelne Fahrt behandelt werden.

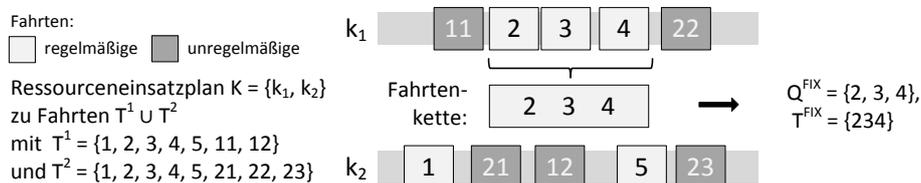


Abbildung 9.2: Fixieren von Fahrtenketten bei der All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik nach [Amberg et al., 2011]

Auch hier lässt sich die Vorgehensweise variieren, wenn im ersten Schritt statt aller regelmäßigen und unregelmäßigen Fahrten die Menge aller r -regelmäßigen Fahrten genutzt wird. Allerdings ist es auch mit dieser heuristischen Vorgehensweise nicht möglich, gezielt Pläne zu erstellen, bei denen die Ähnlichkeit maximiert wird. Es können lediglich mit unterschiedlichen Parametern unterschiedliche Lösungen generiert werden, von denen dann die beste bezüglich Kosteneffizienz und Ähnlichkeit ausgesucht werden muss. Ein (exakter) Modellierungs- und Lösungsansatz, bei welchem ein solches Ausprobieren entfällt, da das Ähnlichkeitsziel durch sich wiederholende (Fahrten-)Muster explizit abgebildet ist, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

9.3.2 Modellierung S-RSP-IT-RP: Verknüpfen von expliziten Mustern und Regelmäßigkeitsgruppen

Um ein geeignetes MIP-Modell für eine gleichzeitige Betrachtung der Ressourceneinsatzplanungsprobleme unterschiedlicher Tage mit den Zielen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit zu formulieren, muss eine entscheidene Fragestellung gelöst werden: Wie kann in einer MIP-Formulierung die Ähnlichkeit über die Planungsprobleme mehrerer Tage effizient bewertet werden?

Die Herleitung dieser Modellierung wird zunächst beschrieben. Dabei wird von einer üblichen Formulierung des Ressourceneinsatzplanungsproblems als Set-Partitioning-Problem ausgegangen (vgl. Modell (9.1)-(9.3)). Im Anschluss erfolgt dann die mathematische Formulierung.

Herleitung der Modellierung – Herausforderungen bei der gleichzeitigen Bewertung der Ähnlichkeit mehrerer Tage

Die Schwierigkeit für eine geeignete MIP-Formulierung besteht darin, im Modell die Ähnlichkeit der Ressourceneinsätze mehrerer Tage bewerten zu können. Die Auswahl eines Ressourceneinsatzes in der Lösung für einen Tag beeinflusst die Ähnlichkeit des Planes verglichen mit allen anderen Tagen.

Eine Bewertung zweier Elemente (Umläufe oder Dienste bzw. Variablen/Spalten im Modell) kann dabei direkt erfolgen, indem ein Element mit einem anderen verglichen wird. D.h. der Ressourceneinsatz eines Tages wird mit einem Ressourceneinsatz eines anderen Tages verglichen. Diese Bewertung liefert dann einen (Un-)Ähnlichkeitswert der als Zielkriterium im Modell berücksichtigt werden könnte. Es sollen aber nicht nur zwei Elemente zweier Tage miteinander verglichen werden, sondern mehrere Elemente mehrerer Tage.

Vor einem Lösen der Planungsprobleme mehrerer Tage müssten also alle Kombinationsmöglichkeiten der Ressourceneinsätze aller Tage bezüglich ihrer Ähnlichkeit bewertet werden, um dann die auswählen zu können, die den bestmöglichen Ähnlichkeitswert liefern können. Dies wäre auf unterschiedliche Weisen möglich:

Zum einen, indem mehrere Zuordnungsprobleme, die alle Kombinationsmöglichkeiten abbilden, miteinander kombiniert und gelöst werden. Allerdings entstehen so sehr große, sehr schwer zu lösende Optimierungsprobleme. Eine solche Modellierung ist also nicht praktikabel. Insbesondere, da neben einer Auswahl der bestmöglichen Kombination auch noch sichergestellt sein muss, dass die Fahrten/Aufgaben aller Tage in richtiger Anzahl (kosteneffizient) von den ausgewählten Ressourceneinsätzen bedient werden.

Zum anderen wäre eine direkte Bewertung und Abbildung der Ähnlichkeit unterschiedlicher Ressourceneinsätze möglich, wenn Ressourceneinsätze d.h. Variablen/Spalten in einem Set-Partitioning-Modell, nicht nur Umläufe bzw. Dienste für einen Tag repräsentieren, d.h. Fahrten/Aufgaben/Zeilen für einen bestimmten Tag abdecken, sondern für alle Tage. Für die Abdeckung mehrerer Tage könnte dann ein (Un-)Ähnlichkeitswert bestimmt werden, der mit der Spalte assoziiert in die Zielfunktion eingehen könnte. Allerdings ist es nicht zweckmäßig, Spalten über mehrere Tage abzubilden. Schon für das Planungsproblem eines Tages existieren extrem viele Kombinationsmöglichkeiten von Fahrten/Aufgaben zu Umläufen bzw. Diensten, sodass nicht alle enumeriert werden, sondern implizit im Rahmen von Column Generation Ansätzen betrachtet werden müssen. Werden dann noch Ressourceneinsätze mehrerer Tage miteinander kombiniert, werden die Kombinationsmöglichkeiten bzw. die Modelle extrem groß und kaum in vernünftiger Zeit lösbar. Außerdem führen diese Kombinationsmöglichkeiten dazu, dass das Modell sehr viele ähnliche Spalten beinhaltet, die jeweils viele Zeilen abdecken. Je mehr Fahrten/Aufgaben eine Spalte, d.h. ein Umlauf/Dienst abdeckt, desto schlechter lassen sich mit den Dualwerten geeignete (neue) Spalten finden, die für eine gute Konvergenz in einem Column Generation basierten Ansatz sorgen. Für ein vernünftig lösbares MIP-Modell ist es also *nicht direkt* möglich, eine Ähnlichkeitsbewertung zwischen den Ressourceneinsätzen verschiedener Tage abzubilden.

Die Ähnlichkeitsbewertung bzw. der Vergleich einzelner Ressourceneinsätze kann also nicht schon direkt im Voraus bestimmt werden. Eine Bewertung kann erst beim Bestimmen der Lösung des Modells erfolgen. Ein Vergleich der Ähnlichkeit von Umläufen/Diensten muss also *indirekt* über ein (flexibles) Hilfskonstrukt erfolgen.

Das Hilfskonstrukt sollte dabei eine wesentliche Eigenschaft von Ressourceneinsätzen abbilden, über welche eine Ähnlichkeit gemessen werden kann. Diese wesentliche Eigenschaft sind die bedienten Fahrten/Aufgaben bzw. Fahrten-/Aufgabensequenzen eines Ressourceneinsatzes. Je öfter eine Fahrtensequenz in den Ressourceneinsätzen mehrerer Tage enthalten ist, desto ähnlicher sind die Ressourceneinsatzpläne der verschiedenen Tage (vgl. dazu auch die Ähnlichkeitsmaße in Abschnitt 8.3.2).

Ein gleichzeitiger, indirekter Vergleich der Ähnlichkeit von Ressourceneinsätzen mehrerer Tage kann also über Hilfskonstrukte erfolgen, die Fahrten(sequenzen) repräsentieren. Diese Fahrten(sequenzen) können explizit als Muster vorgegeben werden, über die dann das Ähnlichkeitsziel im Modell entsprechend abgebildet werden kann.

Mathematische Formulierung mit expliziten Mustern und Regelmäßigkeitsgruppen

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Argumentation kann eine geeignete mathematische Formulierung, um die Ressourceneinsatzplanungsprobleme mehrerer Tage gleichzeitig zu betrachten und dabei die Ziele Kosteneffizienz und Ähnlichkeit einzubeziehen, also wie folgt beschrieben werden: Im Basismodell werden Belohnungen für genutzte Fahrten-/Aufgabenmuster mit einer Set-Partitioning-Formulierung für die Fahrten-/Aufgabenabdeckung jedes Tages kombiniert. Sei $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, m\}$ die Menge der betrachteten Tage und sei $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, q\}$ die Menge aller Fahrten der betrachteten Fahrpläne bzw. die Menge aller zu erfüllenden Aufgaben. Die Menge der Fahrten/Aufgaben die an Tag $l \in \mathcal{L}$ ausgeführt werden müssen seien mit \mathcal{T}^l definiert. Alle berücksichtigten Fahrten-/Aufgabenmuster seien durch die Menge \mathcal{P} repräsentiert. Jedes Muster $p \in \mathcal{P}$ besteht aus einer Teilmenge $\mathcal{T}(p)$ der Fahrten \mathcal{T} . Ferner sei \mathcal{G} eine Menge an Fahrtenmustergruppen, die die Regelmäßigkeit der Muster anzeigen.

Zwei Typen von Entscheidungsvariablen sind definiert: Binäre Ressourceneinsatz-Variablen x und binäre Variablen z für die Zuordnung zu Fahrtenmustergruppen. Binärvariablen x_k^l mit $k \in K^l$ und zugeordneten Kosten f_k^l zeigen an, ob Ressourceneinsatz k an Tag l ausgewählt ist oder nicht. Dabei bezeichne K^l die Menge aller zulässigen Ressourceneinsätze, die an Tag l ausgeführt werden können, $K^l(t) \subset K^l$ sei die Menge aller Ressourceneinsätze, die an Tag l Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}^l$ enthalten, und $K^l(p) \subset K^l$ sei die Menge, die an Tag l Fahrt-/Aufgaben-Muster $p \in \mathcal{P}$ enthalten. Binärvariablen z_p^g zeigen an, ob für Muster $p \in \mathcal{P}$ die Gruppe $g \in \mathcal{G}$ ausgewählt ist. Jede Fahrtenmustergruppe $g \in \mathcal{G}$ repräsentiert eine Menge von Mustern, die mit der gleichen Häufigkeit in der Lösung vorkommen. Die Anzahl an Vorkommen die von Gruppe g repräsentiert wird, sei mit $C(g)$ bezeichnet.

Jeder Gruppe g sei ein Belohnungswert r^g zugeordnet. Mit dem Belohnungswert kann der Trade-Off zwischen Kosten und Ähnlichkeitsziel beeinflusst werden. Der Belohnungswert drückt aus, was an Mehrkosten akzeptiert werden würde, um ein Fahrtenmuster an einer bestimmten Anzahl an Tagen in der Lösung zu haben. Dabei werden nur dann zusätzliche Kosten erlaubt, wenn ein Muster nicht sowieso ausgewählt werden muss, d.h. wenn auch Ressourceneinsätze existieren, die nicht dieses Muster beinhalten. Werden Fahrten-/Aufgabenmuster mit unterschiedlicher Länge verwendet, sollte neben der Anzahl an Vorkommen auch die Länge des Musters beim Setzen des Belohnungswertes berücksichtigt werden. Je länger ein Fahrtenmuster, desto besser ist die Ähnlichkeit, die durch Nutzung des Musters erreicht werden kann, und desto höher sollte auch der Belohnungswert sein. Für die Gruppe g mit $C(g) = 1$, also die

Gruppe, die Muster enthält, die nur an einem Tag vorkommen, wird die Belohnung r^g auf 0 gesetzt, da nur Vorkommen größer als 1 die Regelmäßigkeit verbessern und belohnt werden sollten. Dabei sei darauf hingewiesen, dass Fahrten-/Aufgabemuster nicht zwingend nur regelmäßige Fahrten/Aufgaben enthalten müssen. Es wird die Menge r -regelmäßiger Fahrten/Aufgaben genutzt, also alle Fahrten/Aufgaben, die an mindestens $r \leq |\mathcal{L}|$ der betrachteten Tage \mathcal{L} vorkommen.

Die Zuordnung zu den einzelnen Gruppen wird pro Muster über Binärvariablen statt z.B. über eine einzelne ganzzahlige Variable geregelt. So können unter anderem bei der Definition von Belohnungswerten beliebige Funktionen genutzt werden und eine Belohnungsbewertung ist nicht nur auf lineare Funktionen beschränkt.

[Klabjan et al., 2001] schlagen eine andere, aber vergleichbare bzw. verwandte Modellierung vor, indem sie Fahrten (bzw. Flüge) in sogenannte Regelmäßigkeitsgruppen einsortieren. Eine Einsortierung in eine Gruppe, die eine hohe Regelmäßigkeit repräsentiert, wird dabei entsprechend besser bewertet als eine Einsortierung in eine Gruppe mit niedriger Regelmäßigkeit (vgl. Abschnitt 4.3.2)

Das *tagesübergreifende Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und regelmäßigen Mustern* (engl. *simultaneous resource scheduling problem with irregular tasks and regular patterns*, *S-RSP-IT-RP*) kann dann wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l f_k^l - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r_p^g \rightarrow \min \quad (9.17)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(t)} x_k^l = b_t^l \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l \quad (9.18)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(p)} x_k^l - \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.19)$$

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.20)$$

$$x_k^l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall k \in K^l \quad (9.21)$$

$$z_p^g \in \{0, 1\} \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.22)$$

Die Zielfunktion (9.17) minimiert die Gesamtkosten des Ressourceneinsatzes während die Belohnung für die Ähnlichkeit – die Nutzung von Fahrten-/Aufgabensequenzen an möglichst vielen Tagen – maximiert wird. Fahrtabdeckungsbedingungen (9.18) stellen sicher, dass jede Fahrt/Aufgabe genau so oft ausgeführt wird wie benötigt. Eine Verknüpfung zwischen den Plänen mehrerer Tage wird durch die Verknüpfungsbedingungen (9.19) und die Gruppenzuordnungsbedingungen (9.20) sichergestellt. Restriktionen (9.19) garantieren, dass die Anzahl an Vorkommen eines Musters in

der Lösung der ausgewählten Fahrtenmustergruppe entspricht. Restriktionen (9.20) garantieren, dass jedes Muster maximal einmal zu einer Fahrtenmustergruppe zugeordnet wird.

Folgendes in Abbildung 9.3 dargestellte Beispiel soll Modell (9.17)-(9.22) veranschaulichen. Gegeben ist die Menge der Tage $\mathcal{L} = \{Mo, Di, Mi\}$. Die Menge aller zu bedienenden Fahrten an den drei Tagen ist $\mathcal{T} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Für die einzelnen Tage sind die entsprechenden zu bedienenden Fahrtenmengen $\mathcal{T}^{Mo} = \{1, 2, 3\}$, $\mathcal{T}^{Di} = \{1, 2, 4\}$ und $\mathcal{T}^{Mi} = \{1, 2, 5\}$. Die Menge der Fahrten die an allen Tagen stattfinden ist $Q(= Q^3) = \mathcal{T}^{Mo} \cap \mathcal{T}^{Di} \cap \mathcal{T}^{Mi} = \{1, 2\}$.

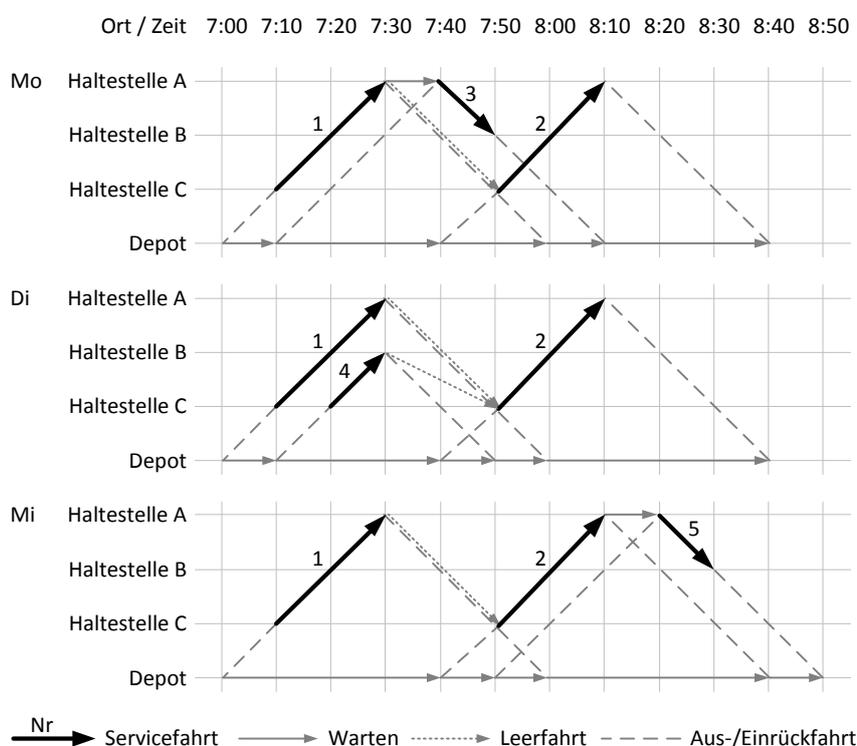


Abbildung 9.3: Unterschiedliche Time-Space-Netzwerke zur Ressourceneinsatzplanung bei drei Tagen mit zwei regelmäßig stattfindenden Fahrten 1 und 2, sowie drei unregelmäßig stattfindenden Fahrten 3, 4 und 5

Für das Beispiel werden folgende einfache Regeln zum Bilden von Diensten angenommen: Jeder Dienst muss mindestens eine Servicefahrt enthalten. Ablösepunkte sind zu Beginn und am Ende einer Servicefahrt möglich und die Start- und Endhaltestelle, sowie die Länge eines Dienstes ist beliebig. Zulässige Dienste $k \in K^{Mo}$ für den ersten Tag enthalten also folgende Fahrtensequenzen $K^{Mo} = \{(1), (1, 2), (1, 3), (2), (3)\}$. Für den zweiten Tag gibt es zulässige Dienste $k \in K^{Di}$ mit folgenden Fahr-

(9.17)		f_1^{Mo}	f_2^{Mo}	f_3^{Mo}	f_4^{Mo}	f_5^{Mo}	f_1^{Di}	f_2^{Di}	f_3^{Di}	f_4^{Di}	f_5^{Di}	f_1^{Mi}	f_2^{Mi}	f_3^{Mi}	f_4^{Mi}	f_5^{Mi}	f_6^{Mi}	$r_1^1 (=0)$	r_1^2	r_1^3	
(9.18)	Mo	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
		2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
		3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
	Di	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
		2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
		4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
	Mi	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	= 1
		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	= 1
		5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	= 1
(9.19)	1,2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-1	-2	-3	= 0
(9.20)	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	≤ 1

Abbildung 9.4: Mögliche Dienste und Muster bei drei Tagen mit zwei regelmäßig stattfindenden Fahrten 1 und 2, sowie drei unregelmäßig stattfindenden Fahrten 3, 4 und 5 in Modell (9.17)-(9.22)

tensequenzen $K^{Di} = \{(1), (1, 2), (2), (4), (4, 2)\}$. Am dritten Tag sind zulässige Dienste $k \in K^{Mi}$ mit folgenden Fahrtensequenzen möglich $K^{Mi} = \{(1), (1, 2), (1, 2, 5), (2), (2, 5), (5)\}$. Abbildung 9.4 veranschaulicht das Beispiel für Modell (9.17)-(9.22).

In einer kosteneffizienten Lösung würden für den Plan am ersten Tag der Dienst ausgewählt werden, der die Fahrtensequenz (1, 3) enthält, da es günstiger ist an der Endhaltestelle von Fahrt 1 zu warten bis Fahrt 3 beginnt, um diese dann ebenfalls zu bedienen, als eine Leerfahrt zur Starthaltestelle von Fahrt 2 durchzuführen, um Fahrt 2 nach Fahrt 1 auszuführen. Fahrt 2 würde vom Dienst (2) abgedeckt werden. Kosteneffiziente Dienste für den zweiten Tag enthalten die Fahrtensequenzen (1, 2) und (4). Der dritte Tag könnte mit dem Dienst, der die Fahrtensequenz (1, 2, 5) enthält, durchgeführt werden.

Es sollen aber nicht die kosteneffizientesten Pläne für die drei Tage, sondern auch die möglichst ähnlichen Pläne gebildet werden. Die einzige Fahrtensequenz die an allen Tagen zu bedienen ist, ist die Sequenz (1, 2). Die Menge aller Muster, die die Ähnlichkeit der Pläne erhöhen können ist also $\mathcal{P} = \{(1, 2)\}$. Dem Muster (1, 2) können verschiedene Bonuswerte zugeordnet werden, abhängig davon in welche Gruppe $g \in \mathcal{G}$ es einsortiert wird. Die Menge aller Gruppen sei durch $\mathcal{G} = \{1, 2, 3\}$ beschrieben mit $C(1) = 1, C(2) = 2, C(3) = 3$. Wenn jeder Gruppe $g \in \mathcal{G}$ ein Belohnungswert r^g zugeordnet ist mit $r^1 = 0 < r^2 < r^3$, wird die höchste Belohnung vergeben, wenn für alle drei Tage die Dienste ausgewählt werden, die Fahrtenmuster (1, 2) enthalten. Wenn der Belohnungswert hoch genug gesetzt wird, wird statt der kosteneffizientesten Lösung am ersten Tag, der Dienst ausgewählt, mit welchem mit den anderen Tagen das ähnlichste Ergebnis erreicht werden kann. Die Lösungsmengen K^{*l} für die einzelnen Tage $l \in \mathcal{L}$ enthalten dann Dienste mit folgenden Fahrtensequenzen:

$K^{*Mo} = \{(1, 2), (3)\}$, $K^{*Di} = \{(1, 2), (4)\}$ und $K^{*Mi} = \{(1, 2, 5)\}$. Mit der entwickelten Modellierung ist also das oben formulierte Ziel bezüglich einer expliziten Abbildung und Bewertung von Mustern in einem Modell zur Ressourceneinsatzplanung (siehe *Muster Ziel 1*) erfüllt.

Varianten in der Modellierung – Elastic Cost Constraint

Im beschriebenen Basismodell für eine tagesübergreifende Planung durch regelmäßige Muster sind die beiden Ziele Kosteneffizienz und Ähnlichkeit gemeinsam (gewichtet) in der Zielfunktion abgebildet. Wie schon bei der Modellierung mit einem Referenzplan (siehe Abschnitt 9.2.2), bietet sich an, bei diesem bi-kriteriellen Entscheidungsproblem einen Kostenrahmen über eine (elastische) Kostenrestriktion anzugeben, mit der ein möglicher Trade-Off zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit der berechneten Pläne beeinflusst werden kann.

Zusätzlich zu den oben definierten Mengen und Variablen sei ϵ^l das Kostenlimit für einen Tag $l \in \mathcal{L}$. Schlupfvariablen s^l und Surplus-Variablen u^l stellen sicher, dass die Kostenrestriktion je Tag $l \in \mathcal{L}$ erfüllt werden kann. Jeder Surplus-Variablen u^l ist ein Faktor p_u^l zugeordnet, der eine Überschreitung des Kostenrahmens in der Zielfunktion bestrafen soll.

Dann ist das *tagesübergreifende Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben, regelmäßigen Mustern und Kostenrahmen* (engl. *simultaneous resource scheduling problem with irregular tasks, regular patterns, and cost constraint, S-RSP-IT-RP-CC*) formuliert als:

$$- \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r_p^g + \sum_{l \in \mathcal{L}} u^l p_u^l \rightarrow \min \quad (9.23)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l f_k^l + s^l - u^l = \epsilon^l \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (9.24)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(t)} x_k^l = b_t^l \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l \quad (9.25)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(p)} x_k^l - \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.26)$$

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.27)$$

$$x_k^l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall k \in K^l \quad (9.28)$$

$$z_p^g \in \{0, 1\} \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.29)$$

$$s^l, u^l \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (9.30)$$

Die Zielfunktion (9.23) maximiert die Belohnung für die Ähnlichkeit, d.h. für das Nutzen von Fahrten-/Aufgabensequenzen an möglichst vielen Tagen. Dabei stellen die (elastischen) Kostenrestriktionen (9.24) sicher, dass der pro Tag vorgegebene Kostenrahmen eingehalten wird. Abdeckungsbedingungen (9.25) garantieren, dass jede Fahrt/Aufgabe genau so oft ausgeführt wird wie benötigt. Durch Restriktionen (9.26) entspricht die Anzahl an Vorkommen eines Musters in der Lösung der ausgewählten Fahrtenmustergruppe. Dabei garantieren Restriktionen (9.27), dass jedes Muster maximal einmal zu einer Fahrtenmustergruppe zugeordnet wird.

Als weitere Variante kann ein Modell mit einer gemeinsamen (elastischen) Kostenrestriktion über alle betrachteten Tage aufgestellt werden statt mit einer Restriktion je Tag. Zielfunktion (9.23), sowie Kostenrestriktion (9.24) und die Definition von Slack- und Surplus-Variablen (9.30) werden dann entsprechend angepasst.

Mit den zusätzlichen Restriktionen lässt sich ein möglicher Zielkonflikt zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit gut steuern. Allerdings hat sich in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Testrechnungen, die Modellierungsvariante ohne zusätzliche (elastische) Kostenrestriktion(en) als rechentechnisch besser zu handhaben erwiesen, da in kürzerer Zeit ganzzahlige Lösungen bestimmt werden können. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher immer von der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Modellvariante (9.17)-(9.22) ausgegangen, bei der Kosten und Ähnlichkeitsziel (gewichtet) in der Zielfunktion abgebildet sind.

9.3.3 Lösungsansatz: Column Generation, ressourcenbeschränkte kürzeste Wege, Branching-Prioritäten, Lagrange-Heuristiken und Variablen-Fixierung

Modell S-RSP-IT-RP (siehe Formulierung (9.17)-(9.22)) wird grundsätzlich mit einem Column Generation-Ansatz gelöst (vgl. Abschnitt 3.2.2). In der Basisversion wird das beschränkte Master-Problem mit einem LP-Solver gelöst, um mit den Dualwerten neue Ressourceneinsätze zu generieren, die als Spalten hinzugefügt werden.

Neue Spalten werden durch das Lösen ressourcenbeschränkter Kürzeste-Wege-Probleme bestimmt. Ganzzahlige Lösungen werden im Rahmen einer Branch-and-Bound-Methode eines MIP-Solvers ermittelt.

Wird das Modell im Kontext einer sequenziellen, teilintegrierten oder integrierten Umlauf- und Dienstplanung eingesetzt, ergeben sich einige Unterschiede und Besonderheiten beim Lösen. Diese werden in den entsprechenden Kapiteln 10, 11 und 12 erläutert. Nachfolgend wird das generelle Vorgehen beim Lösen von Master- und Pricing-Problem vorgestellt sowie ergänzende Vorgehensweisen, die das Bestim-

men ganzzahliger Lösungen vereinfachen sollen (– durch den Einsatz von Branching-Prioritäten, Lagrange-Heuristiken und einer Fixierungsstrategie für Variablen).

(Beschränktes) Master-Problem: LP-Relaxation und Lagrange-Relaxation

Um Modell S-RSP-IT-RP im Rahmen eines Column Generation-Verfahrens zu lösen, muss zunächst eine initiale Spaltenmenge bestimmt sein. Dann kann das (beschränkte) Master-Problem sowohl als LP-Relaxation, als auch mit Hilfe einer Lagrange-Relaxation gelöst werden, um Dualwerte für die Bestimmung von den Zielfunktionswert verbessernden Ressourceneinsätzen zu ermitteln. Details zur Initialisierung und zu einer Lösung mit Hilfe einer Lagrange-Relaxation werden in diesem Unterabschnitt gegeben.

Initialisierung. Die Initialisierung des beschränkten Master-Problems ist vergleichsweise einfach: Entweder kann die initiale Spaltenmenge heuristisch je Planungsproblem eines Tages bestimmt werden, z.B. durch eine heuristische Aufteilung der zu bedienenden Fahrten/Aufgaben auf „künstliche“ Ressourceneinsätze. Abhängig von der Verletzung von Zulässigkeitskriterien, z.B. im Rahmen einer Dienstplanung, werden diese Ressourceneinsätze dann ggf. mit hohen Strafkosten versehen. Oder es können als initiale Spaltenmenge die Ressourceneinsätze zum (beschränkten) Master-Problem hinzugefügt werden, die in kosteneffizienten Ressourceneinsatzplänen der einzeln betrachteten zu verplanenden Tage ermittelt wurden.

Relaxierung – Lagrange-Variante. Aufgrund der Kopplungsbedingungen (9.19) der Muster-Nutzung über alle Tage und der Fahrten-/Aufgabenabdeckungsbedingungen (9.18) muss ein großes Optimierungsproblem gelöst werden, bei welchem die Ressourceneinsatzplanungsprobleme der einzelnen Tage gemeinsam betrachtet werden. Die gemeinsame Betrachtung kann in zwei Schritten vereinfacht werden.

Zum einen, indem die Kopplungsbedingungen für jedes Muster $p \in \mathcal{P}$ aufgehoben werden und je mit einem Lagrange-Multiplikator ν_p gewichtet in die Zielfunktion aufgenommen werden. Zum anderen, indem die Fahrten-/Aufgabenabdeckungsbedingungen für jede Fahrt $t \in \mathcal{T}^l$ eines Tages $l \in \mathcal{L}$ aufgehoben werden und mit dem entsprechenden Multiplikator π_t^l gewichtet in die Zielfunktion eingehen.

Das Modell ist dann in Ressourceneinsatzauswahlproblem für einzelne Tage und ein Muster-Auswahlproblem aufgeteilt, bei welchen die relaxierten Restriktionen dadurch eingehalten werden, dass jede Verletzung zu einer Verschlechterung des Zielfunktions-

wertes führt. Die Zielfunktion (9.17) wird dabei wie folgt modifiziert:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l f_k^l - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g \bar{r}_p^g \\
& + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}^l} \pi_t^l \left(b_t^l - \sum_{k \in K^l(t)} x_k^l \right) \\
& + \sum_{p \in \mathcal{P}} \nu_p \left(- \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(p)} x_k^l + \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g \right)
\end{aligned} \tag{9.31}$$

Das Lagrange-Unterproblem kann formuliert werden als:

$$\Phi(\pi, \nu) = \Phi_x(\pi, \nu) + \Phi_z(\nu) + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}^l} \pi_t^l b_t^l \tag{9.32}$$

mit dem Ressourceneinsatzplanungs-Unterproblem

$$\Phi_x(\pi, \nu) = \left\{ \min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l \bar{f}_k^l \mid \right. \tag{9.33}$$

$$\left. x_k^l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall k \in K^l \right\} \tag{9.34}$$

und dem Muster-Auswahlproblem

$$\Phi_z(\nu) = \left\{ \min \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g \bar{r}_p^g \mid \right. \tag{9.35}$$

$$\left. \sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \right. \tag{9.36}$$

$$\left. z_p^g \in \{0, 1\}, \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \right\} \tag{9.37}$$

Dabei gilt für die reduzierten Kosten \bar{f}_k^l eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ mit der Menge $\mathcal{T}^l(k)$ aller von k bedienten Fahrten und der Menge $\mathcal{P}(k)$ aller von k beinhalteten Fahrtenmuster:

$$\bar{f}_k^l = f_k^l - \sum_{t \in \mathcal{T}^l(k)} \pi_t^l - \sum_{p \in \mathcal{P}(k)} \nu_p \tag{9.38}$$

Die reduzierten Kosten \bar{r}_p^g für die Gruppierung $g \in \mathcal{G}$ eines Musters $p \in \mathcal{P}$ sind beschrieben durch:

$$\bar{r}_p^g = -r_p^g + C(g)\nu_p \quad (9.39)$$

Mit gegebenen Lagrange-Multiplikatoren π und ν können $\Phi_x(\pi, \nu)$ und $\Phi_z(\nu)$ als Auswahlprobleme gelöst werden. Bei $\Phi_x(\pi, \nu)$ wird jede Spalte $k \in K^l$ mit negativen reduzierten Kosten ausgewählt und bei $\Phi_z(\nu)$ wird die Gruppenzuordnung $g \in \mathcal{G}$ zu Muster $p \in \mathcal{P}$ ausgewählt, die die besten negativen reduzierten Kosten besitzt. Um für die im Modell befindliche Spaltenmenge eine gute untere Schranke zur nicht relaxierten Formulierung zu liefern, werden die Lagrange-Multiplikatoren π und ν bestimmt, die den Wert von $\Phi(\pi, \nu)$ maximieren. Dazu wird das Lagrange-Duale-Problem mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird eine Lagrange-Relaxation einer LP-Relaxation dann vorgezogen, wenn Modell S-RSP-IT-RP mit hohen Bonuswerten zu lösen ist. Die benötigte Rechenzeit zum Lösen des beschränkten Master-Problems kann so extrem reduziert werden, wohingegen mit einer LP-relaxierten Formulierung in der Regel bessere Ergebnisse erreicht werden können.

Column Generation Pricing-Problem

Die Lösung des beschränkten Master-Problems wird verbessert, indem über die Dualwerte (bzw. die Lagrange-Multiplikatoren) der Lösung neue Spalten – also neue Ressourceneinsätze – mit negativen reduzierten Kosten generiert werden. Die duale Lösung ist bestimmt durch die dualen Variablen π_t^l für Fahrt/Aufgabe $t \in \mathcal{T}^l$ aus den Abdeckungsbedingungen (9.18) für Tag $l \in \mathcal{L}$, die dualen Variablen ν_p für Muster $p \in \mathcal{P}$ aus den Verknüpfungsbedingungen (9.19) zwischen den Ressourceneinsätzen aller Tage und den Mustern, sowie durch die dualen Variablen ρ_p für die Zuordnung von Mustern $p \in \mathcal{P}$ zu einer Regelmäßigkeitsgruppe aus Bedingungen (9.27). Die reduzierten Kosten \bar{f}_k^l eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ sind dann definiert durch

$$\bar{f}_k^l = f_k^l - \sum_{t \in \mathcal{T}^l(k)} \pi_t^l - \sum_{p \in \mathcal{P}(k)} \nu_p \quad (9.40)$$

wobei f_k^l die Kosten des Ressourceneinsatzes sind, $\mathcal{T}^l(k)$ die Menge der vom Ressourceneinsatz bedienten Fahrten/Aufgaben für Tag $l \in \mathcal{L}$ und $\mathcal{P}(k)$ die Menge der Fahrtenmuster, die der Ressourceneinsatz beinhaltet (vgl. auch oben Definition (9.38)).

Ressourceneinsätze mit negativen reduzierten Kosten werden durch Ressourceneinsatzgenerierungsnetzwerke bestimmt, in denen implizit alle möglichen Fahrten-

/Aufgabenkombinationen abgebildet sind. Wie in Abschnitt 9.2.3 soll hier zur Veranschaulichung und vereinfachten Darstellung der Fall von Dienstgenerierungsnetzwerken behandelt werden. In einem Dienstgenerierungsnetzwerk $G = (N, A)$ repräsentieren die Knoten N Ereignisse zu bestimmten Zeiten und an bestimmten Orten und die Kanten der Menge A Aufgaben, Dienstanfänge, -enden, Pausen und andere Aktivitäten (vgl. Abschnitt 6.2.1). Auf den Kanten sind sowohl (reduzierte) Kosten abgebildet, als auch Ressourcenverbräuche (wie z.B. die Arbeitszeit), mit denen neben strukturellen Pfadbeschränkungen die Zulässigkeitskriterien eines bestimmten Dienstyps modelliert werden. So bildet jeder Pfad zwischen Quell- und Senkeknoten, auf welchem die Ressourcenverbräuche eingehalten werden, einen zulässigen Dienst.

Um im so modellierten ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Problem Pfade mit negativen reduzierten Kosten zu bestimmen, sind einige Anpassungen an einen Basis-Label-Setting-Algorithmus notwendig (siehe Abschnitt 6.2.4). Die Anpassungen ergeben sich dadurch, dass die reduzierten Kosten der Fahrten-/Aufgabenmuster nicht direkt auf einer Kante abgebildet werden können, da sie (teil-)pfadabhängig sind. Die Möglichkeit, Kanten zu nutzen, die bereits (Teil-)Pfade repräsentieren, also Kanten die mehrere Fahrten/Aufgaben abbilden, ist nicht gegeben, da in den Mustern die Menge r -regelmäßiger Fahrten betrachtet wird, d.h. alle Fahrten, die an mindestens $r \in \mathbb{N}$ der betrachteten Tage vorkommen. Dadurch müssten pro Muster mehrere Zusatzkanten gebildet werden, um im Netzwerk alle möglichen Fahrtenkombinationen abzubilden, die zwischen zwei in einem Muster aufeinanderfolgenden r -regelmäßigen Fahrten denkbar sind. Das so entstehende ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Problem ist dann aufgrund der sehr großen Kantenmenge nicht mehr effizient lösbar. Ohne Einfügen solcher (Zusatz-)Kanten in die Dienstgenerierungsnetzwerke, können Informationen über die reduzierten Kosten eines Musters also erst bei Vervollständigung eines (Teil-)Pfades genutzt werden. Generell könnten diese (teil-)pfadabhängigen reduzierten Kosten dann berücksichtigt werden, wenn ein Dienst „fertig“ gebaut wurde, d.h. der Pfad den Senke-Knoten erreicht. Allerdings kann der Label-Setting-Algorithmus beschleunigt werden, wenn beim Lösen der ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme vorrausschauend nur die (Teil-)Pfade weiterverfolgt werden, die auch zu Pfaden mit (hohen) negativen reduzierten Kosten führen. Dazu sollten Informationen über die reduzierten Kosten der Fahrten-/Aufgabenmuster bereits vor dem Senke-Knoten berücksichtigt werden.

Im Label-Setting-Algorithmus wird daher direkt überprüft, ob Sequenzen von Fahrten/Aufgaben auf einem (Teil-)Pfad abgeschlossen sind (um entsprechend die reduzierten Kosten des Teil-Pfades zu aktualisieren). In Dominanztests zum Ausschluss der (Teil-)Pfade, die nicht zu einer guten Lösung führen können, werden dann nur

die (Teil-)Pfade miteinander verglichen, die keine offenen oder die gleichen noch nicht abgeschlossenen Fahrtenmuster enthalten.

Algorithmus 9.3.2 zeigt die Änderungen im Vergleich zur Grundversion (siehe Abschnitt 6.2.4). Dabei bezeichnet L_i die Menge aller Label an Knoten $i \in N$ und $(i, j) \in A$ eine Kante von Knoten i zu j auf der (reduzierte) Kosten \bar{f}_{ij} und pro Ressource $v \in V$ ein Ressourcenverbrauch d_{ij}^v definiert sind. Des weiteren beschreiben $\bar{f}(l)$ die reduzierten Kosten, $\mathcal{P}(l)$ die Menge (noch nicht abgeschlossener) Muster des bisherigen (Teil-)Pfad, P' die Menge erweiterter Muster und $d^v(l)$ den kumulierten Ressourcenverbrauch je Ressource v eines Labels $l \in L_i$. Dann ist ein aus Label l gebildetes Label m an Knoten j definiert durch $L_j^m = (l, P', \bar{f}(l) + \bar{f}_{ij}, d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$. Permanente Label an Knoten j sind mit $\bar{L}_j \subseteq L_j$ bezeichnet. Der Quellknoten des Netzwerkes G sei mit s bezeichnet und u^v sei die obere Schranke für den Verbrauch der Ressource $v \in V$. Außerdem sei $\mathcal{T}(i, j) : A \rightarrow \mathcal{T}$ eine Funktion, die für jede Kante $(i, j) \in A$ die Aufgabe $t \in \mathcal{T}$ liefert, die durch Kante (i, j) im Netzwerk repräsentiert wird.

Bestimmung ganzzahliger Lösungen: Branching-Prioritäten

Grundsätzlich lassen sich ganzzahlige Lösungen zu Modell S-RSP-IT-RP (siehe Formulierung (9.17)-(9.22)) für kleine bis mittlere Instanzen in akzeptabler Laufzeit mit einer exakten Branch-and-Bound- bzw. Branch-and-Cut-Methode bestimmen. Im Rahmen dieser Methoden kann die Laufzeit verbessert werden, wenn beim Branching die Gruppen-Zuordnungsvariablen (9.29) der Fahrtenmuster priorisiert werden.

Da diese Variablen die Nutzung von Fahrtensequenzen (bzw. Fahrtenpaaren) repräsentieren, die in den Ressourceneinsätzen bedient werden, wird durch das Branching auf einer solchen Variable indirekt auch ein Branching auf den Zeilen der repräsentieren Fahrten eingeleitet, ähnlich einem Follow-On-Branching (vgl. dazu [Vance et al., 1997]). Dabei sei aber unter anderem darauf hingewiesen, dass es sich bei Fahrtenmustern nicht um Follow-Ons im engeren Sinne (also als Paar aufeinanderfolgender, bedienter Fahrten) handelt, sondern um erweiterte Sequenzen. Fahrtenmustern bestehen aus r -regelmäßigen Fahrten Q^r , sodass in einem Ressourceneinsatz, der dieses Fahrtenmuster beinhaltet, noch andere Fahrten $t \in \mathcal{T}$ dazwischen bedient werden können mit $t \notin Q^r$.

Bestimmung ganzzahliger Lösungen: Lagrange-Heuristiken

Größere Planungsprobleme über mehrere Tage sind schwer in vernünftiger Zeit mittels einer exakten Branch-and-Bound-Methode lösbar. Daher soll im Folgenden eine

Algorithmus 9.3.2 : Label Setting mit Berücksichtigung von Fahrten-/Aufgabenmustern

```

// Schritt 1: Initialisierung
Setze  $L_s = \bar{L}_s = \{(nil, 0, \dots, 0)\}$ 
Setze  $L_i = \bar{L}_i = \emptyset \forall i \in N \setminus \{s\}$ 
// Schritt 2: Pfaderweiterungen und Dominanztests
// Wähle Knoten j
foreach  $j \in N \setminus \{s\}$  do
  // Betrachte alle Vorgängerknoten i von Knoten j
  foreach  $i \in \{i : (i, j) \in A\}$  do
    // Betrachte alle Label an Knoten i
    foreach  $l \in \bar{L}_i$  do
      // Prüfe Ressourcenverbräuche
      if  $\exists v \in V : d^v(l) + d_{ij}^v > u^v$  then
        next  $l$ 
      // Prüfe Muster und erstelle neues Label m
       $\bar{f}' = \bar{f}_{ij}$ 
      if  $\exists p \in \mathcal{P} : \mathcal{T}(i, j) \in p$  then
        // Betrachte alle Muster von Label l
         $P' = \emptyset$ 
        foreach  $p' \in \mathcal{P}(l)$  do
           $p' = p' \cup \mathcal{T}(i, j)$ 
          if  $p' \in \mathcal{P}$  then
            // Sequenz p' ist Muster
             $\bar{f}' = \bar{f}' + \nu_{p'}$ 
            if  $\exists p \in \mathcal{P} : p' \subset p$  then
              // Sequenz p' ist Teil von Muster(n)
               $P' = P' \cup p'$ 
           $L_j^m = (l, P', \bar{f}(l) + \bar{f}', d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
        else
           $L_j^m = (l, \mathcal{P}(l), \bar{f}(l) + \bar{f}', d^1(l) + d_{ij}^1, \dots, d^{|V|}(l) + d_{ij}^{|V|})$ 
         $L_j = L_j \cup L_j^m$ 
  // Entferne dominierte Label an Knoten j
   $\bar{L}_j = \text{Effiziente\_Label}(L_j \cup \bar{L}_j)$ 

```

heuristische Vorgehensweise vorgeschlagen werden, mit welcher in kürzerer Laufzeit gute Lösungen zu Modell S-RSP-IT-RP bestimmt werden können. Basis bildet eine Lagrange-Relaxation zu S-RSP-IT-RP. Diese Lagrange-Relaxation unterscheidet sich von der oben beschriebenen Lösungsvariante für das (beschränkte) Master-Problem dadurch, dass nur eine Restriktionsgruppe Lagrange-relaxiert wird.

Voraussetzung. In Modell S-RSP-IT-RP (siehe (9.17)-(9.22)) sorgen die Kopplungsbedingungen (9.19) über die Anzahl gemeinsam ausgewählter Fahrten-/Aufgabenmuster an unterschiedlichen Tagen dafür, dass ein großes, schweres Planungsproblem gelöst werden muss, bei welchem die Ressourceneinsatzplanungsprobleme aller Tage simultan betrachtet werden. Die simultane Behandlung wird vereinfacht, wenn die Kopplungsbedingungen von jedem Muster $p \in \mathcal{P}$ aufgehoben werden und jeweils mit einem Lagrange-Multiplikator ν_p gewichtet in die Zielfunktion aufgenommen werden. Das Modell zerfällt dann in Ressourceneinsatzplanungsprobleme einzelner Tage und ein Muster-Auswahlproblem. Die Kopplung zwischen den Ressourceneinsatzplanungsproblemen und dem Muster-Auswahlproblem wird dadurch eingehalten, dass jede Verletzung der relaxierten Kopplungsbedingungen den Zielfunktionswert entsprechend gewichtet mit dem zugeordneten Lagrange-Multiplikator verschlechtert. Zielfunktion (9.17) wird dann wie folgt modifiziert:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l f_k^l - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r_p^g \\ & + \sum_{p \in \mathcal{P}} \nu_p \left(- \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l(p)} x_k^l + \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g \right) \end{aligned} \quad (9.41)$$

Das Lagrange-Unterproblem kann geschrieben werden als:

$$\Phi(\nu) = \Phi_x(\nu) + \Phi_z(\nu) \quad (9.42)$$

Ein Unterproblem ist dann das Ressourceneinsatzplanungs-Unterproblem

$$\Phi_x(\nu) = \left\{ \min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^l} x_k^l \bar{f}_k^l \mid \right. \quad (9.43)$$

$$\left. \sum_{k \in K^l} x_k^l = b_t^l, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l, \right. \quad (9.44)$$

$$\left. x_k^l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall k \in K^l \right\} \quad (9.45)$$

das die nun einzeln lösbaren Planungsprobleme der betrachteten Tage zusammenfasst, und bei welchem für die reduzierten Kosten \bar{f}_k^l für Ressourceneinsatz $k \in K^l$ mit der Menge $\mathcal{P}(k)$ aller von k beinhalteten Fahrtenmuster gilt:

$$\bar{f}_k^l = f_k^l - \sum_{p \in \mathcal{P}(k)} \nu_p \quad (9.46)$$

Das andere Unterproblem, das Muster-Auswahlproblem $\Phi_z(\nu)$ entspricht der Formulierung (9.35)-(9.37) mit den reduzierten Kosten $\bar{r}_p^g = -r_p^g + C(g)\nu_p$ für Gruppierung $g \in \mathcal{G}$ eines Musters $p \in \mathcal{P}$.

Zu gegebenen Lagrange-Multiplikatoren ν bildet der Wert von $\Phi(\nu)$ eine untere Schranke der nicht relaxierten Formulierung. Dabei kann der Wert von $\Phi_x(\nu)$ durch Lösen von $|\mathcal{L}|$ einzelnen Set-Partitioning-Problemen ermittelt werden. Der Wert von $\Phi_z(\nu)$ kann bestimmt werden, indem für jedes Muster $p \in \mathcal{P}$ ein Auswahl-Problem gelöst wird, bei welchem eine Gruppe $g \in \mathcal{G}$ ausgewählt wird, mit der negative reduzierte Kosten assoziiert sind. Es wird die Gruppe ausgewählt, die die geringsten Kosten $\bar{r}_p^g < 0$ besitzt. Um den Wert von $\Phi(\nu)$ zu maximieren, d.h. um eine gute untere Schranke zu finden, werden die Lagrange-Multiplikatoren ν gesucht, die $\Phi(\nu)$ maximieren. Diese Multiplikatoren können dadurch gefunden werden, dass das Lagrange-Duale-Problem mit einem mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst wird (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Lagrange-Heuristik X. Im Subgradienten-Verfahren ergibt jede Lösung des Ressourceneinsatzplanungs-Unterproblems zulässige Ressourceneinsatzpläne für die betrachteten Tage. Werden zu den Ressourceneinsatzplänen die Bonuswerte ermittelt, die für eine Nutzung von Fahrten-/Aufgabenmustern in den Plänen vergeben werden, kann eine gute obere Schranke für den optimalen Zielfunktionswert des primalen Problems ermittelt werden.

Diese Vorgehensweise, die auf Ergebnissen der Unterprobleme $\Phi_x(\nu)$ basiert, sei im weiteren Verlauf als *Lagrange-Heuristik X* bezeichnet und abgekürzt mit LH_x .

Lagrange-Heuristik Z. Da die mit LH_x berechneten oberen Schranken auf den Lösungen der Unterprobleme $\Phi_x(\nu)$ basieren, wird ein Bonus für ähnliche Muster bei Auswahl der Ressourceneinsätze nur indirekt berücksichtigt. So können zwar zulässige Ergebnisse ermittelt werden, es werden aber nicht zwingend auch sehr ähnliche Ressourceneinsatzpläne für mehrere Tage ermittelt.

Der Ähnlichkeitsbonus fließt ein über die reduzierten Kosten bzw. genauer über die Lagrange-Multiplikatoren ν , die mit den Restriktionen (9.19) zur Kopplung al-

ler Tage über die verwendeten Fahrten-/Aufgabenmuster assoziiert sind. Eine andere Möglichkeit obere Schranken zu bestimmen, basiert daher auf der Auswahl von Mustern.

Dazu werden die Lösungen der Muster-Auswahl-Unterprobleme $\Phi_z(\nu)$ betrachtet. Die bei der Lösung des Auswahlproblems gewählten Muster werden dann genutzt, um ein verkleinertes Modell von S-RSP-IT-RG über alle Tage aufzustellen, das als Muster nur die im Unterproblem ausgewählten Muster enthält. Das so verkleinerte unrelaxierte Modell wird dann mit einer (exakten) Branch-and-Bound-Methode gelöst. Die obere Schranke wird nach dem Lösen des verkleinerten unrelaxierten Modells dann entsprechend der in der Lösung enthaltenen Muster des Gesamtproblems angepasst.

Da für die Ergebnisse Lösungen der Unterprobleme $\Phi_z(\nu)$ maßgeblich sind, sei diese Vorgehensweise zur Bestimmung einer oberen Schranke als *Lagrange-Heuristik Z* bzw. LH_z bezeichnet. Abschnitt 9.3.5 zeigt vergleichende Ergebnisse zu den unterschiedlichen Lösungsstrategien.

Bestimmung ganzzahliger Lösungen: Variablen-Fixierung mit Lagrange-Heuristik Fix

Die Lösungen von Lagrange-Unterproblemen nutzen [Holmberg und Yuan, 2005] im Kontext eines *Netzwerk-Design-Problems mit Kapazitäten* (engl. *capacitated network design problem*), um Variablen des unrelaxierten Modells zu fixieren. Die Lagrange-Dual-Probleme werden mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst und zur Fixierung von Variablen zwei unterschiedliche Strategien vorgeschlagen: α - und β -Fixierung (engl. α -/ β -fixing).

[Steinzen, 2007] passt diese Fixierungsstrategien auf ein Modell für das integrierte Mehr-Depot-Umlauf- und Dienstplanungsproblem an. Dort wird zum einen die Zuordnung von Servicefahrten zu einem Depot fest fixiert, sodass eine Fahrt nur von mit diesem Depot assoziierten Umläufen/Diensten bedient werden sollen. Zum anderen werden Verbindungen zwischen Servicefahrten fixiert (engl. *follow-ons*).

Übertragen auf Modell S-RSP-IT-RP, besteht die Idee der Fixierungsstrategien darin, die Variablen zu fixieren, die oft in den Lösungen der Lagrange-Unterprobleme $\Phi_x(\pi, \nu)$ bzw. $\Phi_x(\nu)$ und $\Phi_z(\nu)$ vorkommen (siehe Formulierungen (9.33)-(9.34) bzw. (9.43)-(9.45) und (9.35)-(9.37) für die entsprechenden Lagrange-Unterprobleme). Falls in den Lösungen zu Unterproblem $\Phi_x(\pi, \nu)$ bzw. $\Phi_x(\nu)$ die Variable x_k^l für den Ressourceneinsatz $k \in K^l$ eines Tages $l \in \mathcal{L}$ auf 1 gesetzt ist, ist diese Variable möglicherweise auch Teil einer optimalen Lösung. Ist Variable x_k^l dahingegen oft auf 0 gesetzt, ist sie wahrscheinlich nicht Teil einer optimalen Lösung. Gleiches gilt für die

Lösungen zu Unterproblem $\Phi_z(\nu)$ mit den Variablen z_p^g zur Zuordnung eines Musters $p \in \mathcal{P}$ in eine Gruppe $g \in \mathcal{G}$.

Bei der α -Fixierung wird statt die Variablen auf 1 (0) zu fixieren, die in allen (keinen) Lösungen vorkommen, ein Parameter $\alpha \in [0; 0,5]$ eingeführt, der Abweichungen erlaubt. Werden I Iterationen im Subgradienten-Verfahren benötigt, um das Lagrange-Duale-Problem zu lösen, werden die Variablen x_k^l dann wie folgt fixiert:

$$x_k^l = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum_{i=1}^I x_k^{l,(i)} \geq (1 - \alpha)I \\ 0 & \text{falls } \sum_{i=1}^I x_k^{l,(i)} < \alpha I \end{cases} \quad (9.47)$$

wobei $x_k^{l,(i)}$ dem Wert von Variable x_k^l in der i -ten Subgradienten-Iteration entspricht. Ähnliches Vorgehen gilt für die Variablen z_p^g .

Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Tests haben gezeigt, dass es effizienter ist, Variablen nur auf 1 zu fixieren: Eine Fixierung auf 0 sollte nicht von den Unterproblem-Lösungen im Subgradienten-Verfahren abhängig gemacht werden. Die Fixierung auf 0 führt schnell zu unlösbaren Modellen und schränkt die Freiheitsgrade für das Finden einer guten Lösung stark ein. Da Variablen x_k^l und z_p^g gleichzeitig fixiert werden können, kann bei 1- und 0-Fixierung zusätzlich durch Überprüfung der wechselseitigen Beziehungen sichergestellt werden, dass eine gleichzeitige Fixierung nicht unmittelbar zu einem unlösbaren Modell führt.

Bei der β -Fixierung werden nicht die Anzahl Vorkommen in den Lösungen betrachtet, sondern die reduzierten Kosten. Variablen x_k^l mit hohen negativen reduzierten Kosten \bar{f}_k^l sowie Variablen z_p^g mit hohen negativen reduzierten Kosten \bar{r}_p^g werden wahrscheinlicher in einer Lösung ausgewählt, als diejenigen mit positiven reduzierten Kosten. Über Parameter $\beta_x \in [0; 1]$ und $\beta_z \in [0; 1]$ werden dabei die Anteile an Variablen festgelegt, die auf 1 fixiert werden. Es werden dabei jeweils immer die Variablen mit den kleinsten reduzierten Kosten fixiert. Wie bei [Holmberg und Yuan, 2005] und [Steinzen, 2007] sollen bei Bestimmung der reduzierten Kosten die reduzierten Kosten einen größeren Einfluss geben, die mit den Lagrange-Multiplikatoren berechnet wurden, mit denen sich im Fortschritt des Subgradienten-Verfahrens die untere Schranke verbessert hat. Je weiter der Fortschritt des Subgradienten-Verfahrens, desto zuverlässigere Angaben sind über die reduzierten Kosten möglich. Die (kumulierten) reduzierten Kosten $\bar{f}_k^{l,*}$ eines Ressourceneinsatzes $k \in K^l$ des Tages $l \in \mathcal{L}$ werden daher bestimmt als

$$\bar{f}_k^{l,*} = \begin{cases} \bar{f}_k^l & \text{in der ersten Iteration,} \\ \gamma \bar{f}_k^{l,*} + \bar{f}_k^l & \text{falls die untere Schranke verbessert wurde,} \end{cases} \quad (9.48)$$

wobei $\gamma \in [0; 1]$ der Parameter ist, der den Einfluss bestimmt. Ähnliches Vorgehen gilt für die reduzierten Kosten der Variablen z_p^g .

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Lösungsstrategien werden in Abschnitt 9.3.5 verglichen. Die Fixierungsstrategien werden dabei mit *Lagrange-Heuristik Fix* bzw. abgekürzt als LH_{fix} bezeichnet.

9.3.4 Auswahl expliziter Fahrten- bzw. Aufgabenmuster

Die in Modell S-RSP-IT-RG explizit abgebildeten und in der Zielfunktion bewerteten Muster bestimmen die Ähnlichkeit der zu erstellenden Ressourceneinsatzpläne. Als Fahrten-/Aufgabenmuster können einzelne Fahrten-/Aufgabensequenzen verwendet werden, Sequenzen aus Teilen von Ressourceneinsätzen (wie z.B. einzelne Umlaufblöcke oder Dienststücke), sowie Sequenzen gesamter Ressourceneinsätze (wie z.B. gesamte Umläufe oder Dienste). Sind bereits Sequenzen bekannt bzw. gewünscht, die nach Möglichkeit an mehreren Tagen ausgeführt werden sollen, können diese dann als Muster mit einer entsprechenden Bewertung vorgegeben werden.

In diesem Abschnitt und im weiteren Verlauf der Arbeit soll allerdings vorrangig ein anderes Szenario behandelt werden: Betrachtet wird der Fall, dass keine Wunschsequenzen vorgegeben sind oder die gegebenen Wunschsequenzen mit möglichen anderen Sequenzen ergänzt werden sollen.

Sind keine Muster vorgegeben, dann existieren grundsätzlich sehr viele Möglichkeiten, mehrere Fahrten/Aufgaben zu Sequenzen bzw. Mustern zu kombinieren. Die Kombinationsmöglichkeiten erhöhen sich exponentiell pro erlaubter Sequenzlänge: Bei n Fahrten/Aufgaben und einer Länge von k Fahrten/Aufgaben in einem Muster gibt es prinzipiell $n^k = \frac{n!}{(n-k)!}$ Möglichkeiten - abzüglich der Kombinationsmöglichkeiten von Fahrten/Aufgaben die inkompatibel zueinander sind, d.h. nicht zeitlich nacheinander ausgeführt werden können. Tabelle 9.2 veranschaulicht die Kombinationsmöglichkeiten kompatibler Fahrten für einen Beispielfahrplan mit 211 Fahrten und variierter Sequenzlänge.

Die in Modell (9.17)-(9.22) zu berücksichtigenden Variablen für Muster können stark reduziert werden, wenn als Muster jeweils die kleinste Fahrten-/Aufgabenfolge betrachtet wird: Folgen, die aus zwei r -regelmäßigen Fahrten/Aufgaben bestehen, also Fahrten-/Aufgabenpaare. Die in einem Paar zusammengefassten Fahrten/Aufgaben müssen dabei nicht zwangsläufig direkt hintereinander ausgeführt werden. Es ist möglich, in den gebildeten Ressourceneinsätzen auch Fahrten/Aufgaben zwischen zwei r -regelmäßigen zu bedienen, die an weniger als r der betrachteten Tage vorkommen. Durch die Paare sind dann außerdem auch längere Sequenzen r -regelmäßiger Fahrten/Aufgaben im Modell abgebildet. Sind z.B. $p_1 = (1, 2)$ und $p_2 = (2, 3)$ mit

Anzahl Fahrten in Sequenz	Anzahl möglicher Fahrtensequenzen
1	211
2	20.167
3	1.146.146
4	43.894.049

Tabelle 9.2: Kombinationsmöglichkeiten von kompatiblen Fahrten zu Fahrtensequenzen für 211 Fahrten eines Beispielfahrplans bei unterschiedlicher Sequenzlänge

$p_1, p_2 \in \mathcal{P}$ zwei Muster, in denen die Fahrten 1 und 2 sowie die Fahrten 2 und 3 enthalten sind, ist ebenso Fahrtenfolge (1,2,3) berücksichtigt.

Welche Fahrtenkombinationen als Muster in Frage kommen, kann sowohl aus dem gegebenen Input (also z.B. den gegebenen Fahrplänen) als auch aus einem gegebenen oder berechneten Ressourceneinsatzplan (also z.B. einem Umlauf- oder Dienstplan) ermittelt werden. Diese Möglichkeit wird nachfolgend am Beispiel von Fahrtenpaaren genauer beschrieben. Eine weitere Möglichkeit kann darin bestehen, geeignete Fahrtenmuster während des Lösungsprozesses des Modells (9.17)-(9.22) mittels Row- und Column-Generation zu erzeugen. Diese Möglichkeit wird im Rahmen der Arbeit nicht weiter ausführlich behandelt und eröffnet das Feld für zukünftige Forschungsarbeit auf methodischer Seite.

Bilden von Fahrtenpaaren

Die Möglichkeiten (aus den Fahrplänen) Fahrtenpaare zu bilden, ergeben sich aus den nach Ende einer Fahrt betrachteten Haltestellen und den an den einbezogenen Haltestellen betrachteten Fahrten: Für jede Fahrt muss zunächst bestimmt sein, von welchen Haltestellen nachfolgende Fahrten berücksichtigt werden sollen. Eine Fahrt kann mit den nächsten Nachfolgerfahrten verknüpft werden, die sich an allen Haltestellen befinden die...

- (A) ...(per Leerfahrt) erreichbar sind.
- (B) ...in einem bestimmten Zeitraum (per Leerfahrt) erreichbar sind.

An den betrachteten Haltestellen können Nachfolgerfahrten die Fahrten sein, die erreichbar sind...

- (I) ...in einer bestimmten Anzahl nächster Nachfolgerfahrten.
- (II) ...in einem bestimmten Zeitraum ab der nächsten Fahrt.

- (III) ...in einem bestimmten Wartezeitraum ab Ende der ersten Fahrt.
- (IV) ...in einem bestimmten Zeitraum ab Ende der ersten Fahrt.

In Abbildung 9.5 werden die Möglichkeiten (I), (II), (III) und (IV) zur Bildung von Fahrtensequenzen anhand von Fahrplaninformationen am Beispiel von Fahrtenpaarbildung veranschaulicht. Wird eine bestimmte Anzahl Nachfolger bei der Fahrten-

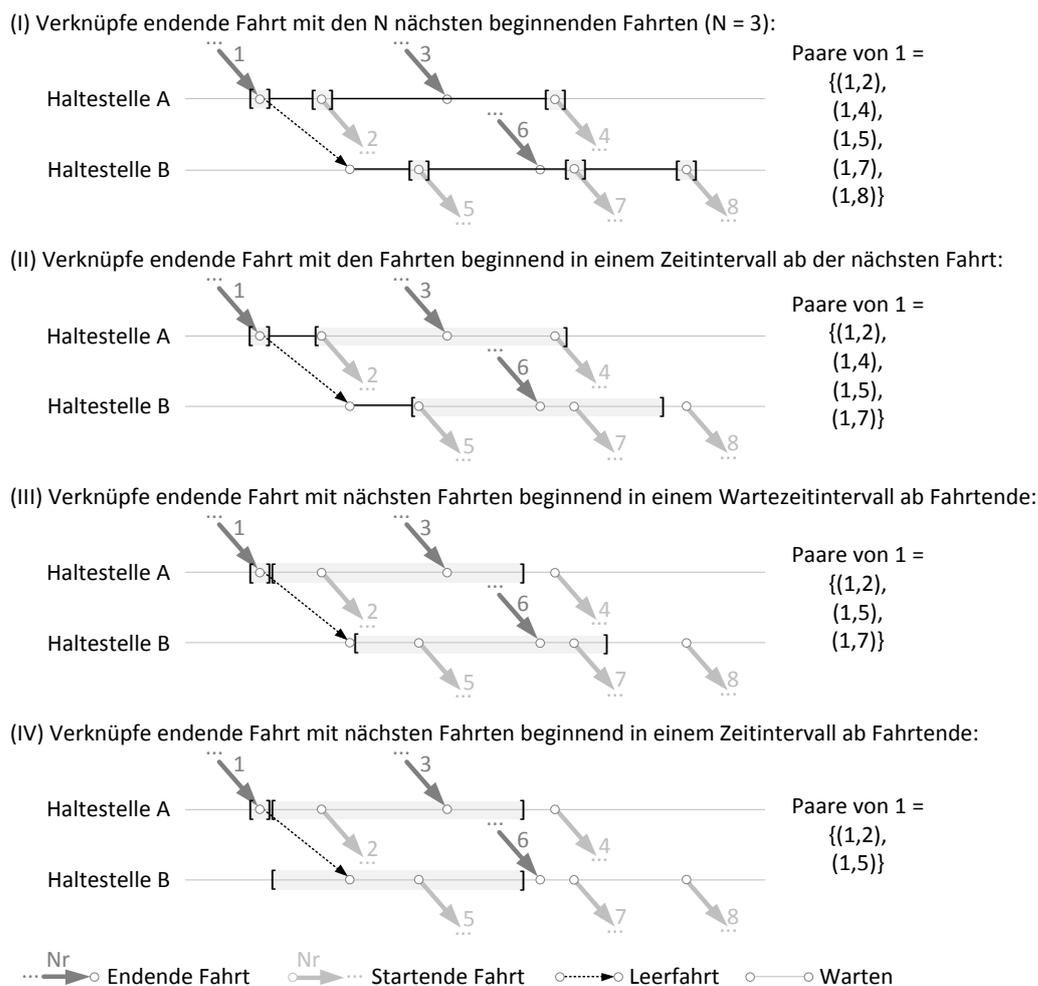


Abbildung 9.5: Möglichkeiten zur Bildung von Fahrtensequenzen anhand von Fahrplaninformationen am Beispiel einer Bestimmung von Fahrtenpaaren ausgehend von Fahrt 1

paarbildung erlaubt, lässt sich ausgehend von Fahrt 1 die Fahrtenpaarmenge $\{(1,2), (1,4), (1,5), (1,7), (1,8)\}$ bilden (vgl. Bild I). Werden von jeder Haltestelle die nächste Nachfolgefahrt und die in einem bestimmt Zeitraum ab Beginn der Fahrt startenden Fahrten einbezogen, reduziert sich die Fahrtenpaarmenge auf $\{(1,2), (1,4), (1,5),$

$(1, 7)\}$, da Fahrt 8 nicht im erlaubten Zeitraum startet (Bild II). Wenn der Zeitraum nicht ab Beginn der nächsten Fahrt, sondern ab Erreichen der Haltestelle definiert ist (Wartezeitraum), ist die Fahrtenpaarmenge $\{(1, 2), (1, 5), (1, 7)\}$ und ist um ein Paar kleiner, da die Fahrten 4 und 8 nicht im Wartezeitraum liegen (Bild III). Ist der Zeitraum ab dem Ende von Fahrt 1 definiert, ist die erstellbare Fahrtenpaarmenge $\{(1, 2), (1, 5)\}$, da die Fahrten 4, 7 und 8 außerhalb des erlaubten Zeitraums beginnen (Bild IV). Für Beispiele basierend auf einem realen Fahrplan sei auf Anhang B verwiesen.

9.3.5 Analyse numerischer Ergebnisse

Für das tagesübergreifende Ressourceneinsatzplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und regelmäßigen Mustern S-RSP-IT-RP existieren neben der Auswahl expliziter Fahrten-/Aufgabenmuster mehrere Möglichkeiten, Ergebnisqualität, d.h. Kosten und Ähnlichkeit der Ressourceneinsatzpläne, sowie die zum Lösen notwendige Rechenzeit zu beeinflussen. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter und Lösungsverfahren erläutert. Testumgebung ist dabei die in Abschnitt 9.2.4 beschriebene.

Ganzzahlige Lösungen für Modell S-RSP-IT-RP

Für Modell (9.17)-(9.22) wurden in Abschnitt 9.3.3 sowohl exakte, als auch heuristische Lösungsansätze vorgestellt. Die von den Lösungsverfahren erreichbare Ergebnisqualität und benötigte Rechenzeit wird anhand variierender Problemgrößen veranschaulicht. Dabei wird sowohl die Anzahl der von Ressourceneinsätzen zu bedienenden Fahrten variiert, als auch die Anzahl der im Modell explizit berücksichtigten Fahrten-/Aufgabenmuster.

Zusätzlich werden die Ergebnisse für unterschiedliche Gewichtungen der Bonuswerte für die Nutzung von ähnlichen Fahrten-/Aufgabenmustern beurteilt. Die Testinstanzen umfassen jeweils fünf Tage und die Menge der Gruppen, in die Muster einsortiert werden können, ist beschrieben durch $\mathcal{G} = \{1, 2, \dots, 5\}$ mit $C(1) = 1, C(2) = 2, \dots, C(5) = 5$. Jeder Gruppe $g \in \mathcal{G}$ ist der Belohnungswert r^g zugeordnet mit $r^g = 10(C(g) - 1)$. Die Bonuswerte werden variiert, indem zusätzlich eine fünffach höhere Gewichtung genutzt wird.

Die Vergleiche erfolgen jeweils über die identische Spaltenmenge, d.h. über die gleichen, möglichen zur Verfügung stehende Ressourceneinsätze. Diese wurden beim Lösen eines LP-relaxierten Modells (im Wurzelknoten des Branch-and-Bound-Suchbaumes) bestimmt. Für eine bessere Vergleichbarkeit sollen also keine Spalten im

Rahmen eines Branch-and-Price- (oder eines Fix-and-Price-)Verfahrens nachgeneriert werden.

Als exaktes Verfahren wird die Branch-and-Bound bzw. Branch-and-Cut-Methode eines MIP-Solvers genutzt, hier ILOG Cplex in der Version 12.2. (*Cplex 12.2*). Die Laufzeit wird auf eine Stunde sowie auf zwölf Stunden begrenzt.

Als ein heuristisches Verfahren wird die in Abschnitt 9.3.3 beschriebene Lagrange-Heuristik LH_x eingesetzt (LH_x). Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Abbruchkriterien für das dabei genutzte Subgradienten-Verfahren, werden zwei weitere eingeführt: Das Verfahren wird abgebrochen, wenn sich die obere Schranke in den letzten 90 Iterationen nicht verbessert hat. Ebenso wird abgebrochen, wenn die Verbesserung der unteren Schranke in den letzten 20 Iterationen weniger als 0,01% beträgt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass mit einer längeren Laufzeit – d.h. ohne diese Abbruchkriterien – bessere Ergebnisse mit dieser Heuristik bezüglich Kosteneffizienz und Ähnlichkeit ermittelt werden können. Hier soll mit LH_x allerdings eine Ausgangsbasis für die anderen vorgestellten heuristischen Vorgehensweisen bilden, die nicht zu viel Rechenzeit beansprucht.

Des Weiteren werden Lösungen verglichen, die mit der ebenfalls in Abschnitt 9.3.3 vorgestellten Lagrange-Heuristik LH_z bestimmt wurden. Dazu werden jeweils die letzten 15 Lösungen des Unterproblems im Subgradienten-Verfahren genutzt, bei welchem mit LH_x die obere Schranke ermittelt wird ($LH_x + LH_z$).

Außerdem werden die Lösungen in den Vergleich einbezogen, die mit Lagrange-Heuristik LH_{Fix} bestimmt werden (siehe ebenso Abschnitt 9.3.3). Auch hier werden die Lösungen der Unterprobleme im Subgradienten-Verfahren genutzt, bei welchem mit LH_x die obere Schranke berechnet wurde ($LH_x + LH_{\text{Fix}}$). Als Fixierung wird α -Fixierung für Ressourceneinsätze und für Fahrtenmuster angewandt, mit $\alpha_x = 0,2$ und $\alpha_z = 0,1$. Wird ein MIP-Solver während der Heuristiken eingesetzt, so ist die jeweilige Laufzeit auf zehn Minuten beschränkt.

Tabelle 9.3 vergleicht beispielhaft die vorgestellten Lösungsansätze auf unterschiedlich großen Modellen (mit Identifikationsnummer *no*). Bei der Modellgröße sind angegeben die Anzahl Variablen und Restriktionen (*columns* und *rows*). Dabei wird zum einen unterschieden zwischen der Anzahl Variablen (9.21) von Ressourceneinsätzen ($\# \text{ res}$), und der Anzahl von Muster-Zuordnungsvariablen (9.22) ($\# \text{ pat}$). Zum anderen wird unterschieden zwischen der Anzahl Restriktionen (9.18) zur Abdeckung von Aufgaben mit Ressourceneinsätzen ($\# \text{ cov}$), und Restriktionen (9.19)-(9.20) zur Kopplung der Muster über über die betrachteten Tage ($\# \text{ link}$). Als Ergebnisse (*solution*) sind aufgeführt die jeweils berechnete untere Schranke (LB), sowie die obere Schranke (UB). Zur oberen Schranke sind die Kosten für den Ressourceneinsatz

(*costs*) und die Bonuswerte (*bonus*) aufgeschlüsselt. Außerdem ist die Laufzeit (*runtime*) des jeweiligen Ansatzes (*approach*) angegeben. Bewiesene optimale Lösungen sind mit einem „*“ gekennzeichnet. Beschränkte Laufzeiten sind mit einem „'“ markiert.

Tabelle 9.3 zeigt, dass generell jeweils mit zunehmender Anzahl abzudeckender Fahrten, sowie mit zunehmender Anzahl explizit berücksichtigter Muster, und ebenso mit höheren Belohnungen für die eingesetzten Muster (die Varianten *b*), der benötigte Rechenaufwand zum Lösen des Modells steigt. Von den drei vorgeschlagenen Lagrange-Heuristiken erreicht dabei $LH_x + LH_{fix}$, das auf den Lösungen der Ressourceneinsatzplanungs- und der Musterauswahl-Unterprobleme basiert die besten Zielfunktionswerte.

Aus den Ergebnissen wird außerdem deutlich, dass für die kleineren Modellgrößen 1a-2b der MIP-Solver bezüglich Ergebnisqualität und Laufzeit, die Heuristik $LH_x + LH_{fix}$ dominiert, die von den drei Heuristiken Ergebnisse mit geringster Abweichung vom optimalen Zielfunktionswert berechnet. In kürzerer Zeit werden vom MIP-Solver bewiesene (kosten)optimale Ergebnisse bestimmt. Mit der besten Heuristik werden allerdings Werte berechnet, die kaum von diesen Ergebnissen abweichen (maximal wird mit 0,04% abgewichen). Ca. 90% der Laufzeit werden in der Heuristik für den ersten Teil verwendet (Teil LH_x), dem Lösen des relaxierten Problems mit gleichzeitiger Bestimmung der oberen Schranke.

Bei den Modellen 3a-3b mit mehr abzudeckenden Aufgaben als in 1a-2b, können mit der besten Heuristik in weniger als 2/3 der Laufzeit des MIP-Solvers, Ergebnisse mit maximal 0,02% Abweichung vom optimalen Zielfunktionswert bestimmt werden. Dabei wird deutlich, dass durch die Fixierung aufgrund der Lösungen der Lagrange-Unterprobleme aus Teil LH_x , das Modell so stark vereinfacht werden kann, dass für den verbliebenen Teil in wenigen Sekunden eine insgesamt annähernd optimale Lösung bestimmt werden kann – statt wie nur mit dem MIP-Solver in wenigen Minuten.

Die Werte zu den größeren Modellen 4a-6b zeigen dies noch einmal deutlicher. In wenigen Minuten werden mit $LH_x + LH_{fix}$ vergleichsweise gute Ergebnisse zum MIP-Solver erreicht, dessen Laufzeit durch das angegebene Zeitlimit von einer und zwölf Stunden beschränkt wird. Durch den Vergleich der Zeitbeschränkung auf eine und auf zwölf Stunden wird aber auch deutlich, dass gutes Ergebnis schon in kürzerer Zeit erreicht wird, das Finden der (bewiesene) optimalen Lösung allerdings sehr lange dauert.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse also so beurteilen, dass zum Lösen des Modells S-RSP-IT-RP eine Kombination aus MIP-Solver und heuristischer Va-

no	columns		rows		solution		costs	bonus	runtime	approach
	# res	# pat	# cov	# link	LB	UB				
1a	166.046	8.145	2.470	3.258	246.875	*248.158	253.698	5.540	00:00:35	Cplex 12.2
					247.137	248.193	253.703	5.510	00:00:51	LH _x
					247.137	248.178	253.698	5.520	00:01:32	LH _x +LH _z
					247.137	248.163	253.703	5.540	00:00:54	LH _x +LH _{fix}
1b	165.768	8.145	2.470	3.258	224.563	*226.068	253.718	27.650	00:00:33	Cplex 12.2
					224.831	226.323	253.723	27.400	00:00:49	LH _x
					224.831	226.318	253.718	27.400	00:01:28	LH _x +LH _z
					224.831	226.073	253.723	27.650	00:00:51	LH _x +LH _{fix}
2a	175.482	41.490	2.470	16.596	246.375	*247.828	253.718	5.890	00:00:57	Cplex 12.2
					245.789	247.993	253.713	5.720	00:00:53	LH _x
					245.789	247.963	253.713	5.750	00:01:39	LH _x +LH _z
					245.789	247.863	253.713	5.850	00:01:01	LH _x +LH _{fix}
2b	171.984	41.490	2.470	16.596	221.063	*224.223	253.723	29.500	00:01:02	Cplex 12.2
					222.064	225.013	253.713	28.650	00:00:55	LH _x
					222.064	224.773	253.723	28.950	00:01:39	LH _x +LH _z
					222.064	224.318	253.718	29.400	00:01:04	LH _x +LH _{fix}
3a	347.968	8.215	4.623	3.286	365.249	*366.329	375.849	9.520	00:04:02	Cplex 12.2
					365.303	366.394	375.844	9.450	00:02:34	LH _x
					365.303	366.344	375.844	9.500	00:04:20	LH _x +LH _z
					365.303	366.339	375.839	9.500	00:02:36	LH _x +LH _{fix}
3b	370.437	8.215	4.623	3.286	324.902	*328.184	375.884	47.700	00:04:18	Cplex 12.2
					324.498	328.469	375.869	47.400	00:02:40	LH _x
					324.498	328.259	375.859	47.600	00:04:28	LH _x +LH _z
					324.498	328.244	375.844	47.600	00:02:46	LH _x +LH _{fix}
4a	354.141	123.795	4.623	49.518	361.371	*363.234	375.864	12.630	00:25:36	Cplex 12.2
					360.170	363.804	375.904	12.100	00:02:31	LH _x
					360.170	363.609	375.849	12.240	00:03:51	LH _x +LH _z
					360.170	363.304	375.874	12.570	00:03:43	LH _x +LH _{fix}
4b	351.811	123.795	4.623	49.518	305.366	*312.789	375.889	63.100	06:13:07	Cplex 12.2
					305.366	312.824	375.874	63.050	01:00:00	Cplex 12.2
					302.382	315.304	375.904	60.600	00:02:32	LH _x
					302.382	314.339	375.889	61.550	00:03:52	LH _x +LH _z
					302.382	312.849	375.899	63.050	00:07:06	LH _x +LH _{fix}
5a	500.134	18.185	4.730	7.274	339.433	341.708	354.048	12.340	12:00:00	Cplex 12.2
					339.433	341.763	354.073	12.310	01:00:00	Cplex 12.2
					341.230	342.013	354.073	12.060	00:09:23	LH _x
					341.230	341.883	354.063	12.180	00:36:08	LH _x +LH _z
					341.230	341.803	354.073	12.270	00:19:33	LH _x +LH _{fix}
5b	519.258	18.185	4.730	7.274	289.036	292.343	354.143	61.800	12:00:00	Cplex 12.2
					289.036	292.433	354.133	61.700	01:00:00	Cplex 12.2
					289.813	294.153	354.153	60.000	00:06:31	LH _x
					289.813	292.993	354.143	61.150	00:29:44	LH _x +LH _z
					289.813	292.503	354.153	61.650	00:07:36	LH _x +LH _{fix}
6a	503.888	67.080	4.730	26.832	338.012	340.708	354.068	13.360	12:00:00	Cplex 12.2
					338.012	340.723	354.073	13.350	01:00:00	Cplex 12.2
					336.951	341.208	354.118	12.910	00:06:07	LH _x
					336.951	341.048	354.078	13.030	00:13:53	LH _x +LH _z
					336.951	340.743	354.063	13.320	00:16:17	LH _x +LH _{fix}
6b	531.300	67.080	4.730	26.832	281.958	287.703	354.103	66.400	12:00:00	Cplex 12.2
					281.958	288.163	354.113	65.950	01:00:00	Cplex 12.2
					280.722	289.803	354.203	64.400	00:07:40	LH _x
					280.722	288.648	354.148	65.500	00:14:31	LH _x +LH _z
					280.722	287.678	354.128	66.450	00:17:55	LH _x +LH _{fix}

Tabelle 9.3: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen für Modell S-RSP-IR-RP

riablenfixierung ($LH_x + LH_{\text{fix}}$) für größere Planungsprobleme sinnvoll ist, da so die Rechenzeit stark verkürzt werden kann, ohne die Ergebnisqualität zu beeinträchtigen. Wenn nicht anders beschrieben, wird diese Vorgehensweise daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt.

Effekte unterschiedlich umfangreicher Fahrtenmuster-Auswahl

Bei der Modellierung zur tagesübergreifenden Planung mit Ähnlichkeitsziel nach Modell (9.17)-(9.22) bestimmt die Anzahl explizit abgebildeter Muster sowohl die Ergebnisqualität, als auch die zum Lösen notwendige Rechenzeit. Je mehr Fahrten-/Aufgabenmuster explizit berücksichtigt werden, desto ähnlicher können die Ergebnisse werden. Durch eine Erhöhung der Musteranzahl erhöht sich allerdings auch die Problemgröße, sodass längere Laufzeiten zu erwarten sind. Um einen Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und Laufzeit finden zu können, soll gezeigt werden, welcher Einfluss von einer umfangreicheren Musterberücksichtigung ausgeht. Veranschaulicht wird das Verhalten anhand der in Abschnitt 9.2.4 in Abbildung 9.1 beschriebenen Instanzen aus Testset A und Testset B.

Als Muster werden r -regelmäßige Fahrtenpaare genutzt mit $r = 5$. Diese werden wie in Abschnitt 9.3.4 beschrieben generiert, basierend auf Verbindungsmöglichkeiten innerhalb bestimmter Zeiträume und mit bestimmter Anzahl Nachfolger (für Testset A sind das: Zeitraum von 30 bis 480 Minuten und 1 bis 40 kompatible Nachfolgefahrten, und für Testset B: Zeiträume von 30 bis 180 Minuten mit 5 bis 40 kompatiblen Nachfolgefahrten). Als Muster werden Fahrtenpaare genutzt, da so implizit auch beliebig lange Fahrtensequenzen als mögliche Muster abgedeckt sind.

In den Tests werden die Ressourcenplanungsprobleme für jeweils fünf Tage gelöst. Dabei ist die Menge der Gruppen, in die Muster einsortiert werden können, beschrieben durch $\mathcal{G} = \{1, 2, \dots, 5\}$ mit $C(1) = 1, C(2) = 2, \dots, C(5) = 5$. Als Belohnungswert wird jeder Gruppe $g \in \mathcal{G}$ der Wert r^g zugeordnet mit $r^g = 10(C(g) - 1)$.

Tabelle 9.4 stellt die Ergebnisse der beiden Testmengen zusammenfassend dar. Je Testmenge sind aufgelistet die Identifikationsnummer des Tests (no), die Anzahl explizit berücksichtigter Muster ($\# pat$), die benötigte Rechenzeit vom Einlesen der Daten bis zur Ausgabe der berechneten Pläne ($runtime$), der Zielfunktionswert (UB) mit den Kosten für den Ressourceneinsatz ($costs$) und dem Bonus für die Nutzung von Fahrten-/Aufgabenmustern ($bonus$), die durchschnittliche Wiederholrate eines kompletten Dienstes in den erstellten Ressourceneinsatzplänen ($rate$), der durchschnittliche Anteil identisch bedienter Fahrten ($rate$) sowie die durchschnittliche Distanz zwischen den ermittelten Plänen ($dist$).

no	# pat	runtime	UB	costs	bonus	rate ($\Delta\%$)	ratio ($\Delta\%$)	dist ($\Delta\%$)
<i>Testset A</i>								
1	0	00:07:18	253.683	253.683	0	1,44 (+ 0,0)	55,0 (+ 0,0)	53,8 (- 0,0)
2	440	00:02:13	248.393	253.683	5.290	1,50 (+ 4,2)	57,9 (+ 5,3)	40,9 (-24,0)
3	1.302	00:03:14	248.208	253.698	5.490	1,52 (+ 5,6)	59,0 (+ 7,3)	40,0 (-25,7)
4	3.240	00:03:18	247.988	253.698	5.710	1,64 (+13,9)	60,4 (+ 9,8)	42,3 (-21,4)
5	6.707	00:04:36	247.843	253.713	5.870	1,77 (+22,9)	63,1 (+14,7)	40,8 (-24,2)
6	8.298	00:05:15	247.828	253.718	5.890	1,74 (+20,8)	63,4 (+15,3)	40,3 (-25,1)
7	12.163	00:06:19	247.823	253.703	5.880	1,74 (+20,8)	63,4 (+15,3)	40,3 (-25,1)
<i>Testset B</i>								
1	0	00:39:25	354.038	354.038	0	1,25 (+ 0,0)	52,9(+ 0,0)	82,0 (- 0,0)
2	1.639	00:25:26	342.213	354.073	11.860	1,37 (+ 9,6)	59,0 (+11,5)	45,1 (-45,0)
3	4.875	00:27:59	341.428	354.098	12.670	1,56 (+24,8)	65,8 (+24,4)	52,7 (-35,7)
4	7.695	00:27:19	341.003	354.103	13.100	1,76 (+40,8)	71,5 (+35,2)	49,7 (-39,4)
5	13.774	00:40:25	340.798	354.088	13.290	1,90 (+52,0)	72,6 (+37,2)	51,6 (-37,1)
6	18.532	00:47:17	340.848	354.088	13.240	1,82 (+45,6)	70,8 (+33,8)	55,6 (-32,2)
7	22.054	00:53:47	340.748	354.118	13.370	1,68 (+34,4)	68,0 (+28,5)	56,4 (-31,2)

Tabelle 9.4: Ergebnisse zur Auswahl expliziter Fahrtenpaare in unterschiedlichem Umfang

Aus den Ergebnissen in Tabelle 9.4 ist zu erkennen, dass sich bei Einbeziehung von mehr Fahrten-/Aufgabenmustern aufgrund der mehr zu berücksichtigenden Variablen und Restriktionen die zum Lösen notwendige Rechenzeit langsam erhöht. Der Großteil der Erhöhung wird dabei durch den Mehraufwand beim Lösen des (beschränkten) Master-Problems verursacht.

Neben der Erhöhung der Rechenzeit wird außerdem deutlich, dass mit mehr explizit einbezogenen Mustern auch die Ähnlichkeit erhöht werden kann. Beispielsweise kann die durchschnittliche Wiederholrate der berechneten Ressourceneinsätze in beiden Testsets stark um ca. 20% bzw. 50% gesteigert werden.

Abbildung 9.6 schlüsselt die Ergebnisse aus Tabelle 9.4 weiter auf und gibt Details über den Anteil vollständig identischer Dienste (unter Berücksichtigung des Dienstyps) bei unterschiedlich umfangreicher Berücksichtigung von Mustern. Angegeben ist der Anteil an Diensten, der in den Ressourceneinsatzplänen der fünf Tage mit einer bestimmten Anzahl wiederholt wird. Außerdem wird die Anzahl genutzter Muster dargestellt, die an bestimmten Tagen in den Plänen wiederholt werden.

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die besten Ähnlichkeitsbewertungen dann erreichen lassen, wenn Dienste bzw. Ressourceneinsätze möglichst viele Muster enthalten, die aus Aufgaben bestehen, die an allen betrachteten Tagen durchzuführen sind. Mehr Möglichkeiten, solche Muster zu finden, sind dann gegeben, wenn die Anzahl explizit betrachteter Muster erhöht wird.

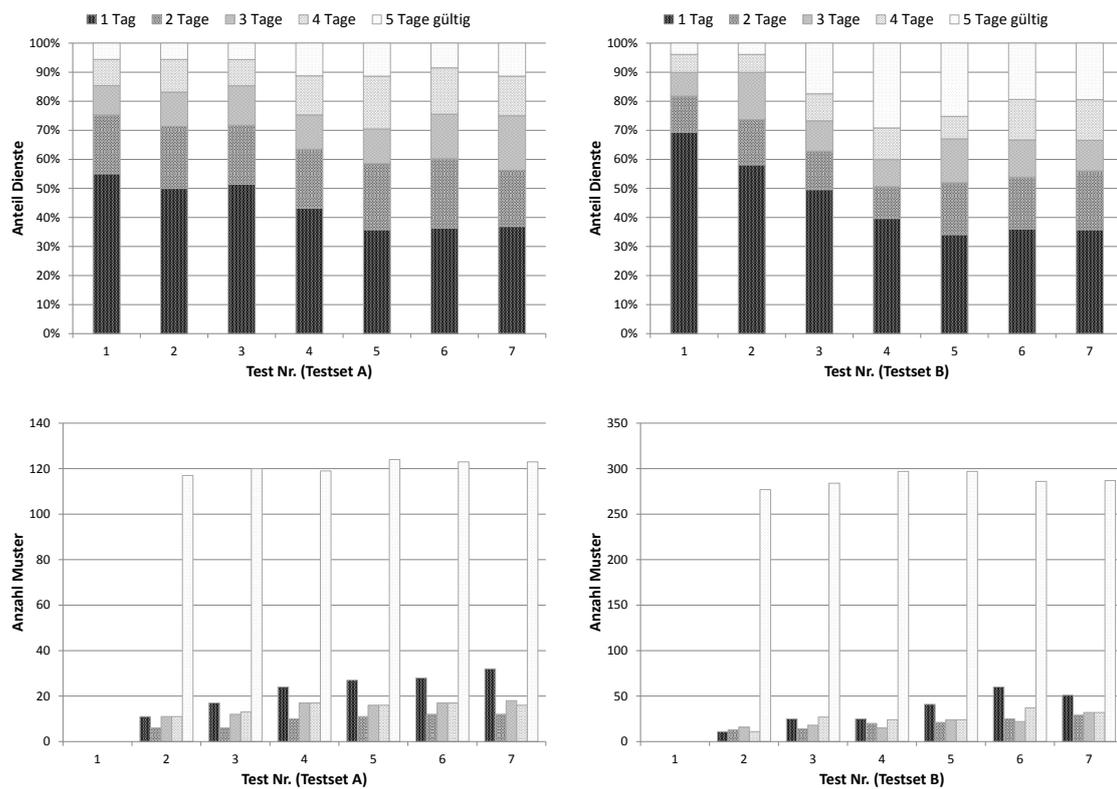


Abbildung 9.6: Anteile vollständig identischer Dienste und Anzahl genutzter Muster in den Ressourcenplänen bei zunehmender Auswahl expliziter Fahrten-/Aufgabenmuster

Effekte unterschiedlicher Belohnungsfunktionen für Fahrtenmuster

Mehr noch als die Anzahl explizit im Modell berücksichtigter Fahrten-/Aufgabenmuster, bestimmt die Belohnungsfunktion für das Vorkommen eines Musters in den Plänen unterschiedlicher Tage die Ähnlichkeit der berechneten Ressourceneinsätze. In diesem Abschnitt soll anhand unterschiedlicher Gewichtungen der Bonuswerte veranschaulicht werden, in welchem Maße eine höhere Gewichtung des Ähnlichkeitsziels über die Bonuswerte die Kosteneffizienz und die Ähnlichkeit der Pläne beeinflusst.

Zur Veranschaulichung werden wieder aus den in Abbildung 9.1 vorgestellten Instanzenmengen die Instanzen aus Testset A und Testset B genutzt. Dabei sind die Muster jeweils gemäß der Test-Nr. 5 aus Tabelle 9.4 ausgewählt.

Planungsverfahren und Lösungsmethoden sind mit den im vorherigen Abschnitt beschriebenen identisch. Die Ressourceneinsatzplanungsprobleme werden also teilintegriert gelöst. Dabei werden ganzzahlige Lösungen zu Testset A mit der kleineren Fahrtenmenge mit einem MIP-Solver (Cplex 12.2) bestimmt, und zu Testset B mit ei-

ner Kombination aus den vorgestellten Lagrange-Heuristiken X und Fix ($LH_x + LH_{fix}$, siehe Abschnitt 9.3.3).

Tabelle 9.5 fasst die Ergebnisse zusammen. Angegeben sind neben den aus Tabelle 9.4 bekannten Spalten die Gewichtungen der Bonuswerte (w), wobei $w = 0$ einer Planung ohne Berücksichtigung eines Ähnlichkeitsziels entspricht und den Referenzwert markiert. Abbildung 9.7 gibt zusätzliche Details zu den Ergebnissen analog zu Abbildung 9.6.

w	runtime	costs ($\Delta\%$)	bonus	rate ($\Delta\%$)	ratio ($\Delta\%$)	dist ($\Delta\%$)
<i>Testset A</i>						
0	00:07:18	253.683 (+0,000)	0	1,44 (+ 0,0)	55,0 (+ 0,0)	53,8 (- 0,0)
1	00:05:22	253.683 (+0,000)	588	1,90 (+31,9)	66,3 (+20,5)	40,0 (-25,7)
10	00:04:36	253.713 (+0,012)	5.870	1,77 (+22,9)	63,1 (+14,7)	40,8 (-24,2)
100	00:05:31	253.718 (+0,014)	58.800	1,86 (+29,2)	65,2 (+18,5)	40,3 (-25,1)
1000	00:19:12	255.758 (+0,818)	595.000	1,83 (+27,1)	64,1 (+16,5)	39,7 (-26,2)
<i>Testset B</i>						
0	00:39:25	354.038 (+0,000)	0	1,25 (+ 0,0)	52,9 (+ 0,0)	82,0 (- 0,0)
1	00:43:13	354.043 (+0,001)	1.329	1,91 (+52,8)	72,3 (+36,7)	51,4 (-37,3)
10	00:40:25	354.088 (+0,014)	13.290	1,90 (+52,0)	72,6 (+37,2)	51,6 (-37,1)
100	00:58:34	354.103 (+0,018)	132.200	1,92 (+53,6)	69,5 (+31,4)	48,4 (-41,0)
1000	01:26:21	361.288 (+2,048)	1.362.000	2,23 (+78,4)	76,9 (+36,2)	36,2 (-55,9)

Tabelle 9.5: Ergebnisse zur Belohnung expliziter Fahrtenpaare mit unterschiedlicher Gewichtung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Modell (9.17)-(9.22) ohne bzw. schon bei einem marginalen Kostenzuwachs deutlich ähnlidere Pläne bestimmt werden können, als bei einer kosteneffizienten Planung ohne Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen. Für Testset A kann z.B. die durchschnittliche Wiederholrate der Ressourceneinsätze um ca. 30% gesteigert werden, für Testset B um mindestens 50%. Werden die Boni für eine Nutzung von Aufgaben-Mustern höher gewichtet, steigt die Anzahl der in den Plänen genutzten Muster an, die an allen Tagen verwendet werden. So wird die Ähnlichkeit der Pläne mit zunehmender Gewichtung verbessert.

Neben einer (leichten) Erhöhung der Kosten, kann sich mit der Gewichtung auch die zur Lösung des Modells notwendige Rechenzeit erhöhen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich mit einer höheren Gewichtung auch der Zielkonflikt verstärkt, zwischen der Auswahl möglichst kosteneffizienter Ressourceneinsätze in der Lösung und der Auswahl von Ressourceneinsätzen, die aufgrund ihrer bedienten Aufgaben-Muster zu möglichst hohen Boni beitragen.

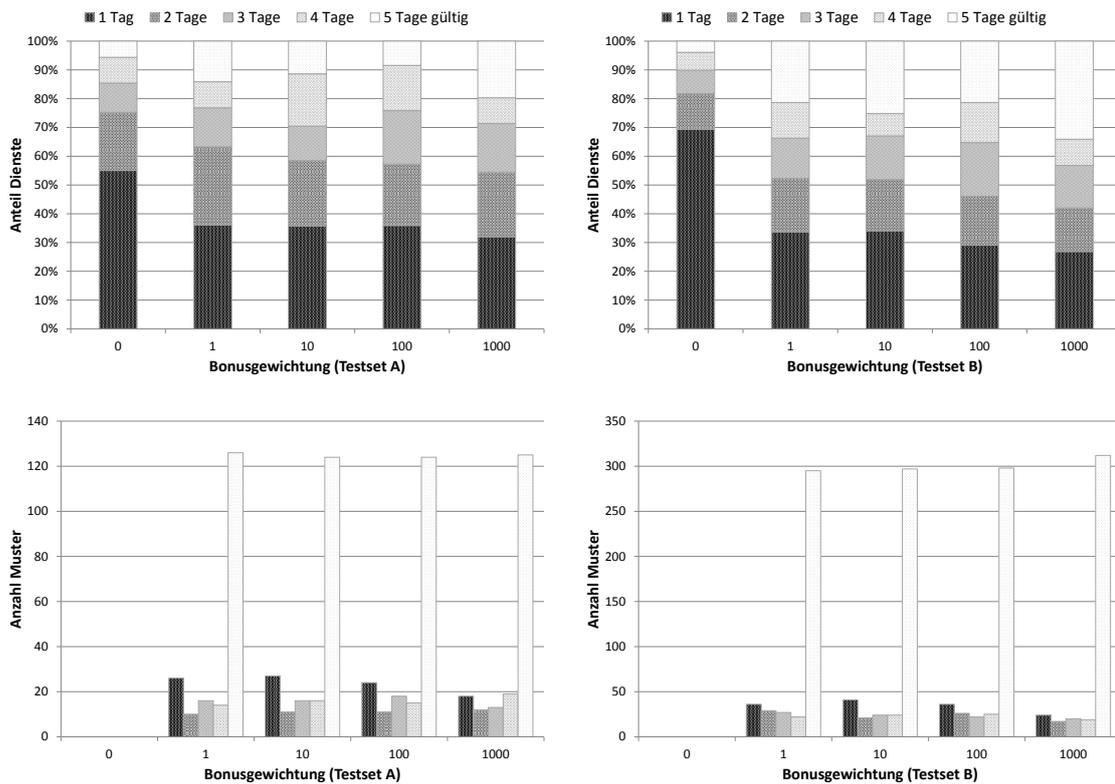


Abbildung 9.7: Anteile vollständig identischer Dienste und Anzahl genutzter Muster in den Ressourcenplänen bei zunehmender Gewichtung der Bonuswerte für explizite Fahrten-/Aufgabenmuster

9.4 Preprocessing für ähnliche Pläne: Fixieren von Fahrten- bzw. Aufgabensequenzen

Um zielgerichtet kosteneffiziente und ähnliche Pläne für unterschiedliche Tage erstellen zu können, müssen Ressourceneinsatzplanungsprobleme mehrerer Tage (gemeinsam) betrachtet werden. Die Modellgröße der zu lösenden Ressourceneinsatzplanungsprobleme und damit der Aufwand für das Lösen kann dabei reduziert werden, wenn die Menge der in diesen Planungsproblemen einzeln zu verplanenden Fahrten/Aufgaben verkleinert werden kann. Ebenso kann das Lösen der Planungsprobleme vereinfacht werden, wenn die Freiheitsgrade zur Bestimmung ähnlicher Pläne gezielt eingegrenzt werden.

[Kliwer, 2005] und [Gintner, 2008] schlagen für Umlauf- bzw. Dienstplanungsprobleme Heuristiken vor, die die zu verplanende Fahrtenmenge reduzieren, indem sogenannte *stabile Fahrtenketten* identifiziert werden. Dabei handelt es sich um Sequenzen von Fahrten, die in unterschiedlichen Lösungen vereinfachter Planungspro-

bleme des ursprünglichen Planungsproblems enthalten sind. Die Annahme ist, dass diese Sequenzen dann auch mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer optimalen Lösung des ursprünglichen Planungsproblems vorkommen. Beim Lösen des ursprünglichen Planungsproblems ersetzt eine solche identifizierte Kette dann die in ihr enthaltenen Fahrten und ist dann als einzelne Fahrt zu verplanen.

Abschnitt 9.4.1 stellt das Grundschema für ein heuristisches Vorgehen vor, das die Problemgrößen für eine Planung unterschiedlicher Tage mit Ähnlichkeitszielen reduziert, indem Fahrten-/Aufgabensequenzen fixiert werden, die an allen betrachteten Tagen gleich bedient werden sollen. Erweiterte Fixierungsmöglichkeiten, die sich bei einer Planung mit Fahrten-/Aufgabenmustern ergeben, werden in Abschnitt 9.4.2 beschrieben.

9.4.1 Grundschema

Die Grundidee für eine Fixierung von Fahrten/Aufgaben zu Fahrtensequenzen besteht darin, die Sequenzen aus Fahrten zu fixieren, die in unterschiedlichen Lösungen vereinfachter Planungsprobleme gleich bedient werden. Zunächst müssen also vereinfachte Planungsprobleme bestimmt und gelöst werden.

In Abschnitt 9.3.1 wurde mit der *All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik* bereits eine Vorgehensweise vorgestellt, mit der basierend auf einem einzelnen Planungsproblem implizit (Fahrten-)Muster generiert werden, die als stabile Fahrtenketten beim Lösen der Planungsprobleme mehrerer Tage genutzt werden können. So kann die Problemgröße der zu lösenden Ressourceneinsatzplanungsprobleme verringert werden.

Eine bessere Vorgehensweise basiert auf dem in Abschnitt 9.3.2 vorgestellten Ansatz, bei welchem (Fahrten-)Muster explizit modelliert sind und so neben Kostenzielen auch quantitative Ähnlichkeitsziele beim Lösen der Planungsprobleme mehrerer Tage berücksichtigt werden können. Das dabei zu lösende tagesübergreifende Planungsproblem über mehrere Tage S-RSP-IT-RP (siehe Modell (9.17)-(9.22)) ist aufgrund der simultanen Betrachtung mehrerer Tage schwer lösbar. Allerdings entstehen deutlich einfacher lösbare Planungsprobleme, wenn für S-RSP-IT-RP nicht alle Tage gleichzeitig betrachtet werden, sondern jeweils immer nur zwei Tage. Werden alle paarweisen Kombinationen der Ressourceneinsatzplanungsprobleme unterschiedlicher Tage gelöst, können die Lösungen genutzt werden, um stabile Fahrten-/Aufgabensequenzen für das Ursprungsproblem zu identifizieren. Algorithmus 9.4.1 fasst das Vorgehen zusammen.

Im ersten Schritt wird für alle paarweisen Kombinationen $\{(i, j) \in \mathcal{L} \times \mathcal{L} | i < j\}$ der betrachteten Tage $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$ das jeweilige Ressourceneinsatzplanungsproblem S-RSP-IT-RP über die beiden Tage i und j mit den Fahrtenmengen \mathcal{T}^i und

Algorithmus 9.4.1 : Heuristik zur Fixierung von Fahrtenketten

(Schritt 1) **Löse vereinfachte Planungsprobleme für Fahrten** $\mathcal{T}^i, \mathcal{T}^j \in \mathcal{T}$:
 Bilde paarweise Kombinationen aus den Tagen $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$:
for $i \leftarrow 1$ **to** $n - 1$ **do**
 for $j \leftarrow i + 1$ **to** n **do**
 Löse S-RSP-IT-RP($\mathcal{T}^i, \mathcal{T}^j$)
 end
end

(Schritt 2) **Fixiere Sequenzen (regelmäßiger) Fahrten zu Ketten:**
 Identifiziere aus Fahrtenketten fixierbare Fahrten Q^{FIX}
 Fixiere Fahrtenketten zu neuen Fahrten \mathcal{T}^{FIX}
 Bestimme zu verplanende Fahrten \mathcal{S} für jeden Tag:
for $i \leftarrow 1$ **to** n **do**
 $\mathcal{S}^i \leftarrow \mathcal{T}^i \setminus Q^{FIX} \cup \mathcal{T}^{FIX}$
end

\mathcal{T}^j gelöst. Im zweiten Schritt werden die Lösungen der paarweisen Kombinationen auf Fahrtenketten/-sequenzen untersucht, die in allen Lösungen enthalten sind. Diese Fahrtensequenzen werden dann zu neuen Fahrten zusammengefasst und die zu verplanende Fahrtenmenge der einzelnen Tage entsprechend modifiziert. Dabei ist zu beachten, dass nur die Fahrtensequenzen zusammengefasst werden, die ununterbrochen aus regelmäßigen Fahrten $t \in Q (= Q^{|\mathcal{L}|}) = \mathcal{T}^1 \cap \dots \cap \mathcal{T}^n$ bestehen.

Nachdem durch das Zusammenfassen von Fahrtensequenzen die Problemgröße des ursprünglichen Planungsproblems für mehrere Tage reduziert wurde, können die in Abschnitt 9.2.2 und Abschnitt 9.3.2 vorgestellten Ansätze für eine tageweise Ähnlichkeitsplanung mit einem Referenzplan bzw. für eine tagesübergreifende Ähnlichkeitsplanung durch Muster genutzt werden, um für eine verringerte Fahrten-/Aufgabemenge kosteneffiziente und ähnliche Pläne zu erstellen. Für die tagesübergreifende Planung mit Mustern bietet sich zusätzlich eine weitere Fixierungsstrategie an, die nachfolgend beschrieben wird.

9.4.2 Erweiterte Fixierungsmöglichkeiten durch Fahrten- bzw. Aufgabenmuster

Stabile Fahrten-/Aufgabenketten, die an allen betrachteten Tagen eingesetzt werden können, dürfen nur aus regelmäßigen Fahrten/Aufgaben bestehen. So wird vermieden, dass unnötige Leeraktivitäten in Ressourceneinsätze eingebaut werden, wie z.B. Leerfahrten und Standzeiten in Umläufe und Dienste. Enthält eine Kette zwischen zwei regelmäßigen Fahrten eine unregelmäßige Fahrt, würde diese unregelmäßige an

den Tagen entfallen, an denen sie nicht bedient werden muss. Zeit- und Ortswechsel zwischen den regelmäßigen Fahrten müssten im Umlauf/Dienst dann durch (kostenintensive) Leerfahrten und Standzeiten überbrückt werden.

Für das in Abschnitt 9.3.2 beschriebene Modell S-RSP-IT-RP zur tagesübergreifenden Planung mit Mustern können neben regelmäßigen Fahrten-/Aufgabensequenzen, auch Sequenzen berücksichtigt werden, die aus r -regelmäßigen Fahrten bestehen, also aus Fahrten, die an mindestens $r \leq |\mathcal{L}|$ der Tage $\mathcal{L} = \{1, \dots, n\}$ zu bedienen sind. Im Modell sind explizit (Fahrten-)Muster abgebildet, die r -regelmäßige Fahrten beinhalten. Die Fahrtenmuster, die in allen Lösungen der paarweisen Kombinationen zweier Tage genutzt werden, können vor Lösen des gesamten Modells über alle Tage fixiert, d.h. bereits in der Lösung ausgewählt werden.

9.4.3 Analyse numerischer Ergebnisse

Mögliche Vorteile der Strategien zur Fixierung von Fahrten-/Aufgabensequenzen sollen mit den im folgenden beschriebenen Ergebnisse veranschaulicht werden. Untersucht werden die notwendige Rechenzeit und die Qualität der Ressourceneinsatzpläne, die durch den Einsatz der Fixierungsstrategien ermittelt werden können. Verglichen werden die Ergebnisse mit den in Abschnitt 9.2 und 9.3 vorgestellten Lösungsansätzen (ohne Fixierungsstrategie). Dabei entspricht die Testumgebung der in Abschnitt 9.3.5 beschriebenen.

Reduktion der zu verplanenden Fahrtenanzahl

Tabelle 9.7 zeigt die Reduktion der Fahrtenmenge am Beispiel des Testsets B aus den Abschnitten 9.2.4 und 9.3.5. Dabei wird die Reduktion der Fahrtenmenge mit Hilfe der Fixierungsstrategie (f) verglichen mit den ursprünglichen Fahrplänen und theoretischen Fixierungen, die aus ermittelten Ressourceneinsatzplänen ableitbar sind. Diese Ressourceneinsatzpläne wurden mit einer kosteneffiziente Planung ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung berechnet (c) sowie mit einer kosteneffizienten Planung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung ($c.s$).

Die entsprechenden Ergebnisse geben zusätzliche Details zu den Einträgen 1 und 5 im Testset B aus Tabelle 9.4. Zu den ermittelten Ressourceneinsatzplänen ist angegeben, inwieweit sich in den berechneten Plänen Fahrten-/Aufgabenketten bilden lassen, die an allen Tagen gleich verplant werden. In der Tabelle ist die Reduktion für die gesamte Fahrtenmenge angegeben. Zusätzlich zur Gültigkeit für bestimmte Tage ist der durchschnittliche Anteil unterschiedlicher Fahrten bei den paarweisen Vergleichen der Fahrtenmengen aller Tage angegeben (P -Vergleich).

Servicefahrten: Fixierung	#	Reduk- tion (%)	Gültigkeit an x Tagen (%)					P-Ver- gleich
			5	4	3	2	1	
–	494	–	82,79	0,00	0,40	1,21	15,59	7,97
c	267	45,95	68,16	0,00	0,75	2,25	28,84	16,24
c.s	215	56,48	60,47	0,00	0,93	2,79	35,81	21,28
f	243	50,81	65,02	0,00	0,82	2,47	31,69	18,22

Tabelle 9.6: Reduktion der Fahrtenmenge im Testset B durch Fixierung stabiler Fahrtenketten (f) verglichen mit Fahrtenketten in einer kosteneffizienten Lösung ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung (c) und einer kosteneffizienten Lösung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung (c.s)

Aus Tabelle 9.7 lässt sich erkennen, dass bei Einsatz der Fixierungsstrategie, die Fahrtenmenge um 50% reduziert werden kann. Nach der Fixierung sind Planungsprobleme für die einzelnen Tage zu lösen, bei denen ca. 2/3 aller Fahrten an allen Tagen zu bedienen sind und 1/3 nur an einem einzigen. So kann bei nachfolgender (manueller) Planung für mehrere Tage der Fokus dann darauf gelegt werden, diese unregelmäßigen Fahrten so zu verplanen, dass die Pläne möglichst ähnlich sind (- in den ursprünglichen Fahrplänen sind insgesamt 80% der Fahrten an allen Tagen zu bedienen und ca. 15% an einem Tag).

Mit Hilfe der vorgeschlagenen Fixierungsstrategie lässt sich der Aufwand für eine Planung mehrerer Tage stark reduzieren, da die Planungsprobleme vereinfacht werden. Welche Auswirkungen die Reduktion auf die benötigte Rechenzeit und auf die Qualität der Ressourceneinsatzpläne hat, sei nachfolgend im Vergleich zu kosteneffizienter Planung ohne und mit Ähnlichkeitsberücksichtigung dargestellt.

Planerstellung mit fixierten Fahrten

Tabelle 9.7 fasst exemplarisch die bei Anwendung der Fixierungsstrategie benötigte Rechenzeit und die erreichte Ergebnisqualität zusammen. Verglichen werden die Ergebnisse mit einer kosteneffizienten Planung ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung (c), sowie mit Ähnlichkeitsberücksichtigung über die tagesübergreifende Planung mit Bonus für mehrfach verwendete Fahrten-/Aufgabensequenzen aus Abschnitt 9.3.2 (c.s). Diese Art der Ähnlichkeitsberücksichtigung wird ebenso genutzt, um für die nach Fixierung von Fahrtensequenzen modifizierte Fahrtenmenge das Ressourceneinsatzplanungsproblem über alle Tage zu lösen (f.c.s). Angegeben sind die Anzahl (Haupt-)Ressourceneinsatzplanungsprobleme, die während des Preprocessings und im Hauptteil gelöst werden (je bezeichnet mit $\# rp$), sowie die dazu benötigte Zeit vom Einle-

sen der Daten bis zur Ausgabe der Pläne (je bezeichnet mit *runtime*), die Gesamtzeit (*total runtime*), die Kosten für den geplanten Ressourceneinsatz (*costs*), die durchschnittliche Distanz der ermittelten Ressourceneinsatzpläne der einzelnen Tage zueinander (*dis*), die Wiederholrate der eingesetzten Dienste in den Plänen (*rate*) und der durchschnittliche Anteil in einzelnen Ressourceneinsätzen für verschiedene Tage gleich verplanter Fahrten (*ratio*) (siehe auch die Ähnlichkeitsmaße in Abschnitt 8.3.2).

	preprocessing		main part		total	costs	solution		
	# rp	runtime	# rp	runtime	runtime		dis	rate	ratio
c	0	00:00:00	5	00:39:25	00:39:25	354.038	82,0	1,24	52,9
c.s	0	00:00:00	1	00:40:25	00:40:25	354.088	51,6	1,90	72,6
f.c.s	10	00:44:38	1	00:01:29	00:46:07	354.088	53,6	1,46	65,9

Tabelle 9.7: Ergebnisse zur Ressourceneinsatzplanung für mehrere Tage mit und ohne Preprocessing durch Fixierung von Fahrten-/Aufgabensequenzen

Die Werte in Tabelle 9.7 zeigen, dass der zeitliche Aufwand für das Preprocessing auf dem betrachteten Testset höher ist als die Gesamtlaufzeit ohne. Allerdings werden die einzelnen Probleme innerhalb weniger Minuten gelöst (im Schnitt in ca. 4 Minuten) und die Laufzeit für eine Lösung des Problems über alle Tage lässt sich mit fixierten Fahrtensequenzen auf 1,5 Minuten um mehr als ein Drittel reduzieren. Die Rechenzeit kann also sehr deutlich reduziert werden, wenn etwas weniger Zeit für das Preprocessing aufgewendet wird. Z.B. indem die Vorarbeit für das Haupt-Problem auf mehr als einen Rechner verteilt wird und parallel bearbeitet wird oder gegebenenfalls Parameter so verändert werden, dass für das Preprocessing weniger exakte Lösungen gefordert sind.

Die Kostensteigerung der Lösungen mit Ähnlichkeitsberücksichtigung (und Fixierung von Fahrtensequenzen) ist mit 0,01% gegenüber der reinen kosteneffizienten Lösung vernachlässigbar (- die Steigerung entspricht ca. 10 Arbeitszeitminuten in den Dienstplänen je Tag). Die vollständige Wiederholbarkeit der in den Plänen eingesetzten Dienste, d.h. die Anzahl komplett identischer Dienste, ist ohne Fixierung höher als mit Fixierung. Allerdings zeigen die partiellen Ähnlichkeitsbewertungen der Distanz und des Anteils identisch verplanter Fahrten, dass mit einer Fixierung von ähnlichen Fahrtensequenzen dennoch vergleichsweise ähnliche Pläne erreicht werden können.

Zusammenfassung der Fixierungs-Ergebnisse

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Fixierungsstrategie in ihrer Grundversion geeignet ist, insbesondere die Erstellung partiell ähnlicher Ressourceneinsatzpläne zu vereinfachen. Grundsätzlich ist mit Einsatz der Fixierungsstrategie ebenfalls eine Rechenzeitreduktion möglich – vor allem wenn das für die Fixierungsstrategie notwendige Preprocessing verkürzt wird. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Fixierungsstrategie dennoch nicht weiter eingesetzt, damit die dann ermittelten numerischen Ergebnisse nicht in ihrer Aussage beeinflusst werden.

9.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden geeignete Modellierungen und Lösungsansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen untersucht. Zu den in vorherigen Kapiteln identifizierten zwei Basiskonzepten *tageweise Ähnlichkeit mit einem Referenzplan* und *tagesübergreifende Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster* wurden mathematische Modellformulierungen entwickelt und entsprechende Lösungsstrategien vorgestellt.

Kernelement der Formulierung RSP-IT-RS zur tageweisen Ähnlichkeit ist dabei eine elastische Kostenrestriktion, die es ermöglicht, einen möglichen Zielkonflikt zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit zu berücksichtigen (siehe Modell (9.5)-(9.9)). Kernelement der Formulierung S-RSP-IT-RP zur tagesübergreifenden Ähnlichkeit ist die explizite Abbildung und Ähnlichkeitsbewertung von Fahrten-/Aufgabenmustern durch Einordnung in sogenannte Regelmäßigkeitsgruppen (siehe Modell (9.17)-(9.22)). Zur Lösung wurde jeweils ein Column Generation-Ansatz beschrieben. Ebenfalls wurden Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf Rechenzeit und Lösungsqualität beispielhaft veranschaulicht.

Außerdem wurden Preprocessing-Techniken vorgestellt, mit denen sich die bei einer Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen zu bewältigenden Planungsprobleme vereinfachen lassen, indem z.B. Fahrtensequenzen fixiert werden.

Nun soll entsprechend Schritt S6 aus Kapitel 5 untersucht werden, wie die entwickelten generellen Modellierungs- und Lösungskonzepte zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen in den Varianten der ÖPNV-Planung (siehe Abschnitt 2.2) eingesetzt werden können, die unterschiedliche Flexibilitäten bei der Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten bieten.

Teil IV

Einbettung der Ähnlichkeitsansätze in Planungsvarianten

Kapitel 10

Sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der entwickelten Basis-Ansätze zur Erstellung ähnlicher Ressourceneinsatzpläne aus Kapitel 9 in einer sequenziellen Vorgehensweise bei der Planung von Umläufen und Diensten dargestellt. Die sich dabei ergebenden Möglichkeiten für eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten sollen dann untersucht werden hinsichtlich ihrer Eignung, kosteneffiziente und ähnliche Umlauf- bzw. Dienstpläne zu ermöglichen.

Dazu wird zunächst in Abschnitt 10.1 das sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsproblem für eine ähnliche Planung über mehrere Tage definiert und darauf folgend in Abschnitt 10.2 das allgemeine Lösungsschema für dieses Problem vorgestellt. Details zum Lösungsschema sind in den Abschnitten 10.3 bis 10.6 beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer ersten Bewertung der Lösungsmöglichkeiten von sequenziellen Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen anhand numerischer Ergebnisse in Abschnitt 10.7.

10.1 Problemdefinition – VSP-CSP-IT

Sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen enthalten die Umlaufplanungsprobleme mehrerer Tage und darauf aufbauend die Dienstplanungsprobleme mehrerer Tage. Unter Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten kann analog zur allgemeinen Problemdefinition in Abschnitt 9.1 das *sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten und Aufgaben von verschiedenen Fahrplänen* (engl. *sequential vehicle and crew scheduling problem with irregular trips and tasks from various timetables, VSP-CSP-IT*) wie folgt in zwei Schritten definiert werden:

Im ersten Schritt ist für eine *Menge von Fahrplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge von Servicefahrten, Leerfahrtmöglichkeiten zwischen Haltestellen, und Depots mit zugeordneten Fahrzeugtypen, eine *Menge von Umlaufplänen* zu finden, die zulässig und kostenminimal sind, und *zueinander ähnliche Dienstpläne* ermöglichen.

Im zweiten Schritt ist für eine *Menge von Umlaufplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge zu leistender Aufgaben, Ablösepunkten und Transfermöglichkeiten zwischen Haltestellen, eine *Menge von Dienstplänen* zu finden, die zulässig, kostenminimal und möglichst ähnlich zueinander sind.

Ziel des Problems ist dabei in erster Linie, anfallende Aufgaben so auf Dienstpläne zu verteilen, dass diese Pläne ähnlich zueinander sind. Dabei existieren unterschiedliche Möglichkeiten, das Problem so zu lösen, dass ähnliche Dienstpläne für unterschiedliche Tage gebildet werden.

10.2 Lösungsschema für VSP-CSP-IT

Da in einer sequenziellen Planung die Dienstbildung auf bereits erstellten Umläufen aufbaut, besitzt diese Planungsvariante vergleichsweise geringe Freiheitsgrade bei der Erstellung von (ähnlichen) Diensten (vgl. Abschnitt 2.2.1). Es ist daher sinnvoll, bereits in der Umlaufplanung darauf zu achten, die Umläufe so zu erstellen, dass auch möglichst ähnliche Dienste gebildet werden können.

Abbildung 10.1 skizziert das Lösungsschema zu sequenziellen Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit den in dieser Arbeit entwickelten Möglichkeiten zur Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen. Dabei besteht auf Umlaufplanungsebene zum einen die Möglichkeit, eine kostenoptimale Umlaufplanungslösung mit möglichst ähnlichen Umläufen zu erstellen. Zum anderen kann beim Lösen von Umlaufplanungsproblemen ein (geringer) Kostenzuwachs erlaubt werden, um noch ähnlichere Umläufe zu bilden. Basierend auf der Lösung aus der Umlaufplanung werden Dienste unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitskriterien gebildet.

Für die Fahrpläne mehrerer Tage werden Umlaufplanungsprobleme (engl. *vehicle scheduling problems*, *VSPs*) als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Probleme auf Basis von Time-Space-Netzwerkmodellen formuliert (vgl. Abschnitte 6.1.1 und 6.2.1). Nach Lösen der Flussprobleme mit einem LP/MIP-Solver müssen die kostenoptimalen Flüsse zur Erstellung von Umlaufplänen in Pfade zerlegt werden, wobei jeder Pfad einem Umlauf entspricht. Dabei werden die Flusslösungen so zerlegt, dass die entstehenden Pfade möglichst ähnlich zueinander sind (A).

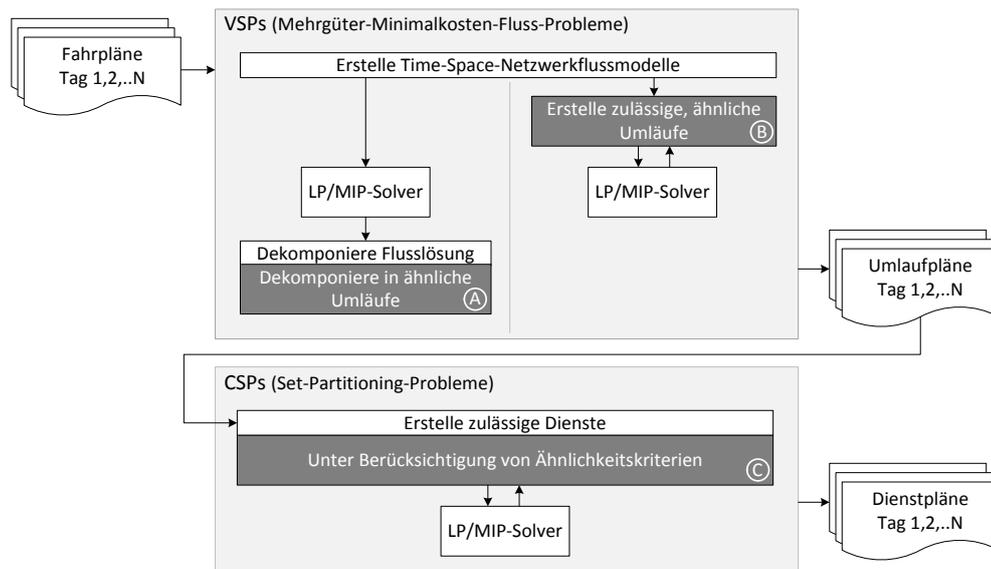


Abbildung 10.1: Sequenzielle Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung

Alternativ zu einer kostenoptimalen Lösung werden basierend auf den Time-Space-Netzwerkmodellen im Rahmen eines Column Generation-Verfahrens zulässige und ähnliche Umläufe erzeugt. Bei dieser Alternative können im Vergleich zur kostenoptimalen Lösung Mehrkosten zugelassen werden, um ähnlichere Umläufe zu erzeugen (B).

Die ermittelten Umlaufpläne bilden dann den Ausgangspunkt für die Dienstplanung. Basierend auf den Umlaufplänen werden Dienstplanungsprobleme (engl. *crew scheduling problems*, *CSPs*) zur Abdeckung der in den Umlaufplänen enthaltenen Aufgaben als Set-Partitioning-Probleme formuliert und unter Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen mit einem Column Generation-Ansatz gelöst (C).

Auf die einzelnen Lösungsschritte soll im weiteren Verlauf wie folgt eingegangen werden: In Abschnitt 10.3 werden Möglichkeiten zum Bilden von kostenoptimalen und ähnlichen Umläufen mittels einer globalen Dekomposition der ermittelten Flusslösungen entwickelt (siehe A). Abschnitt 10.4 beschreibt Möglichkeiten zur Erstellung von ähnlichen Umläufen bei erlaubten Mehrkosten verglichen mit einer kostenoptimalen Umlaufplanungslösung (siehe B). In Abschnitt 10.5 wird (als eine Grundmethode für A und B) das Erstellen von ähnlichen Umläufen auf Basis von Umlaufblöcken vorgestellt. Das Bilden ähnlicher Dienste auf Basis der erstellten (ähnlichen) Umläufe wird in Abschnitt 10.6 erläutert (siehe C).

10.3 Bilden von kostenoptimalen, ähnlichen Umlaufplänen mittels globaler Flussdekomposition über mehrere Umlaufplanungsnetzwerke

Zur Modellierung von Umlaufplanungsproblemen wird die aggregierte Time-Space-Netzwerk Struktur von [Kliwer et al., 2006b] genutzt (siehe Abschnitte 6.1.1 und 6.2.1). Ein Umlaufplanungsproblem wird als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Problem modelliert mit einer Netzwerkschicht pro Depot-Fahrzeugtyp-Kombination. Jede Netzwerkschicht enthält mögliche Fahrzeugaktivitäten, die als Kanten zwischen Time-Space Knoten modelliert sind. Die Time-Space Knoten entsprechen möglichen Abfahrten und Ankünften an einer Haltestelle bzw. einem Depot. Statt alle möglichen Paare kompatibler Servicefahrten – also Fahrten, die nacheinander von einem Fahrzeug ausgeführt werden können – mit expliziten Kanten zu berücksichtigen, werden mögliche Verbindungen zwischen Gruppen von kompatiblen Fahrten aggregiert. Kompatible Fahrten sind also implizit über Pfade durch das Netzwerk miteinander verbunden.

Innerhalb der Time-Space-Netzwerk Struktur repräsentiert eine kostenoptimale Flusslösung eine Menge an kostenoptimalen Umlaufplänen. Um aus der Flusslösung Umläufe für einen Umlaufplan zu bestimmen, muss die Lösung in disjunkte Pfade zerlegt werden, wobei jeder Pfad einem Umlauf entspricht. [Kliwer, 2005] beschreibt unterschiedliche Strategien zur Zerlegung des Netzwerkflusses in Pfade. Unterschieden wird zwischen *lokalen Dekompositionsstrategien*, die Flusseinheiten an einzelnen Haltestellen bzw. Time-Space Knoten miteinander verknüpfen und einer *globalen Dekompositionsstrategie*. Abbildung 10.2 zeigt zwei Beispiele für die lokale Dekomposition eines Flusses. Bei der globalen Dekompositionsstrategie werden (gleichzeitig)

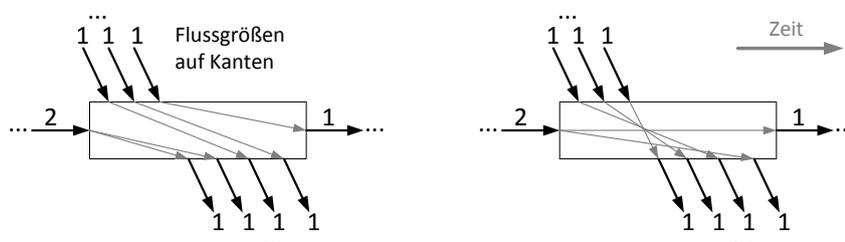


Abbildung 10.2: Lokale Dekomposition eines Flusses nach FIFO, First In First Out und LIFO, Last In First Out nach [Kliwer, 2005]

die Verknüpfungsmöglichkeiten innerhalb des gesamten Netzwerkes betrachtet, indem der Fluss durch Lösen eines Set-Partitioning-Problems zerlegt wird. Dabei muss der Fluss so auf Spalten bzw. Umläufe verteilt werden, dass der gesamte Fluss in den ausgewählten Spalten abgedeckt ist, und das formulierte Ziel bestmöglich erfüllt ist. D.h. es wird aus allen möglichen Umlaufplänen der Plan ausgewählt, der das im Set-Partitioning-Problem formulierte Ziel am besten erfüllt. Bei [Kliwer, 2005] ist das Ziel, Umläufe mit möglichst wenig Linienwechseln zu erhalten.

Ziel dieser Arbeit sind ähnliche Pläne für mehrere Tage. Dazu sollten aus der Lösungsmenge die Umlaufpläne ausgewählt werden, die ähnlich zueinander sind. Um dies leisten zu können, müssen bei der Flussdekomposition nicht nur alle Verknüpfungsmöglichkeiten innerhalb der Netzwerkrepräsentation eines Umlaufplanungsproblems berücksichtigt werden, sondern auch die Verknüpfungsmöglichkeiten in den Umlaufplanungsnetzwerken anderer Tage. Es muss also eine globale Dekompositionsstrategie über alle Verknüpfungsmöglichkeiten mehrerer Netzwerke entwickelt werden. Neu für eine globale Flussdekomposition ist also nicht nur das Ziel „Ähnlichkeit“, sondern auch die netzwerkübergreifende globale Zerlegung des Lösungsflusses.

Abbildung 10.3 zeigt ein Beispiel für eine globale Flussdekomposition des kostenoptimalen Netzwerkflusses an zwei Tagen. Im Beispiel werden an beiden Tagen die regelmäßigen Servicefahrten 1, 2 und 3 ausgeführt. Am zweiten Tag muss zusätzlich eine unregelmäßige Fahrt 4 bedient werden. Für den ersten Tag existiert eine Möglichkeit, den kostenoptimalen Fluss in Pfade, d.h. in Umläufe zu zerlegen: Ein Umlauf u_1 , der Servicefahrt 1 enthält, und ein Umlauf u_2 , der Servicefahrten 2 und 3 bedient. Für den zweiten Tag gibt es zwei Möglichkeiten zur Dekomposition des Netzwerkflusses: Entweder werden in einem Umlauf u_1 die Fahrten 1 und 3 ausgeführt und in einem zweiten Umlauf u_2 die Fahrten 2 und 4. Oder der Umlauf u_1 enthält die Fahrten 1 und 4, während Umlauf u_2 die Fahrten 2 und 3 bedient. Offensichtlich liefert hier die zweite Flussdekomposition für den zweiten Tag eine Lösung, die ähnlicher zu den Umläufen des ersten Tages ist.

Nachfolgend werden Ansätze für eine globale netzwerkübergreifende Flussdekomposition mit Ähnlichkeitszielen entwickelt (vgl. Vorgehen A im Lösungsschema zum VSP-CSP-IT in Abbildung 10.1). Die Entwicklung entsprechender Modelle basiert dabei auf dem in Abschnitt 9.2 beschriebenen Basis-Konzept zur Erstellung von ähnlichen Ressourceneinsatzplänen anhand eines Referenzplans sowie dem in Abschnitt 9.3.2 dargestellten Konzept zur Planung mit regelmäßigen Mustern. Bei der Flussdekomposition kann dann in den genutzten Modellen ein Kostenziel entfallen. Da die Kosten schon durch die Flusslösung vorgegeben sind und bei der Dekomposition des Lösungsflusses keine Rolle mehr spielen, müssen die Modelle lediglich noch ein

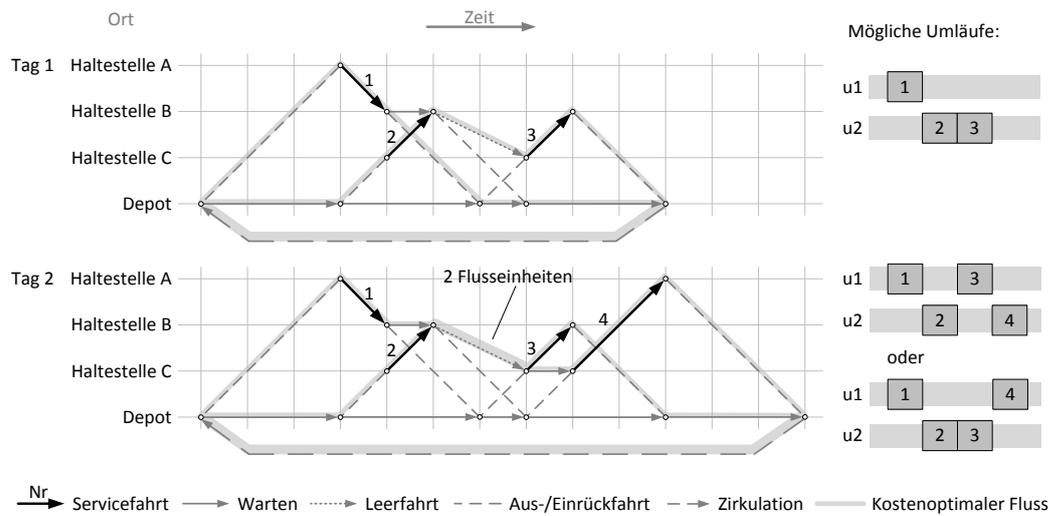


Abbildung 10.3: Möglichkeiten zur Bestimmung von ähnlichen Umläufen bei einer globalen Flussdekomposition über mehrere Netzwerke nach [Amberg et al., 2011]

Ähnlichkeitsziel enthalten. Die Modelle sollten jeweils mit einem Column Generation-Ansatz gelöst werden, da die Anzahl möglicher Pfade/Umläufe in der Flusslösung schon bei kleineren Planungsproblemen extrem hoch ist.

In Abschnitt 10.3.1 wird die Umsetzung einer globalen Flussdekomposition über mehrere Netzwerke mittels Referenzplan genauer erläutert. Abschnitt 10.3.2 behandelt eine globale Flussdekomposition über mehrere Netzwerke durch regelmäßige (Fahrten-)Muster.

10.3.1 Flussdekomposition auf Basis von RSP-IT-RS

Voraussetzung für eine globale Flussdekompositionen über mehrere Umlaufplanungsnetzwerke auf Basis eines Referenzplanes ist ein erstellter Referenzplan, an dem die Dekomposition des Lösungsflusses der Umlaufplanungsprobleme verschiedener Tage ausgerichtet werden kann. Für Details über die Bestimmung eines geeigneten Referenzplanes sei auf Abschnitt 9.2.1 verwiesen. Modellierung und Lösungsansatz für eine globale Flussdekomposition sind nachfolgend beschrieben.

Modellierung

Im Gegensatz zu Modell RSP-IT-RS (siehe Formulierung (9.5)-(9.9)) entfällt beim Modell zur Bestimmung einer globalen Flussdekomposition mit einem Referenzplan die elastische Restriktion (9.6), die die Kosten beschränkt. Sie kann entfallen, da die

Kosten bereits feststehen und nicht bei der Zerlegung des Flusses in Pfade berücksichtigt werden müssen.

Die globale Dekomposition des Lösungsflusses erfolgt je Netzwerkschicht. Wie u.a. in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, wird im zugrunde liegenden Netzwerkmodell für die Umlaufplanung jede Kombination aus Depot und Fahrzeugtyp durch eine Netzwerkschicht repräsentiert, die als Kanten die möglichen Fahrzeugaktivitäten enthält, die von der Kombination durchgeführt werden können, und als Knoten mögliche Abfahrten und Ankünfte an einer Haltestelle bzw. Depot. Da ein Umlauf einen Pfad innerhalb einer einzelnen Netzwerkschicht darstellt und nicht über mehrere Schichten wechselt, kann der Lösungsfluss je Netzwerkschicht in Pfade zerlegt werden.

Mathematisch kann das Modell zur globalen Flussdekomposition einer Netzwerkschicht mit einem Referenzplan dann wie folgt beschrieben werden. Sei $\mathcal{D} = \{1, \dots, n\}$ die Menge aller Kombinationen aus Depot und Fahrzeugtyp. Je Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ ist ein Umlaufplanungsnetzwerk $G^d = (N^d, A^d)$ definiert, mit der Knotenmenge N^d und der Kantenmenge A^d . Der Lösungsfluss auf einer Kante $(i, j) \in A^d$ mit $i, j \in N^d$ sei durch b_{ij}^d ausgedrückt. Für die Zerlegung des Flusses muss nur der Teil des Umlaufplanungsnetzwerkes G^d betrachtet werden, auf welchem ein Lösungsfluss vorhanden ist. Das sind alle Kanten $(i, j) \in A_B^d \subseteq A^d$ mit $b_{ij}^d > 0$ und alle Knoten $i \in N_B^d \subseteq N^d$ mit $\{j : (j, i) \in A_B^d\} \neq \emptyset$ bzw. $\{j : (i, j) \in A_B^d\} \neq \emptyset$.

Für einen Umlauf sind in erster Linie die Fahrzeugaktivitäten außerhalb des Depots entscheidend. Die globale Flussdekomposition wird dahingehend vereinfacht, dass nur Aktivitäten außerhalb des Depots berücksichtigt werden. Warten innerhalb des Depots und der Fluss auf der Zirkulationsflusskante muss nicht einbezogen werden. Dadurch wird die Anzahl möglicher Pfade aus der Flusslösung deutlich reduziert. An den Kosten der Lösung ändert sich aber nach wie vor nichts. Eine z.B. minimal ermittelte Fahrzeuganzahl wird also nicht erhöht. Auch bei den verwendeten Ähnlichkeitsmaßen gibt es durch die Pfadreduzierungen keine Einschränkungen im Lösungsraum (vgl. Ähnlichkeitsmaße in Abschnitt 8.3.2).

Sei $\tilde{A}^d \subset A^d$ die Menge aller Kanten, die Fahrzeugaktivitäten außerhalb des Depots beschreiben, d.h. alle Kanten des Umlaufplanungsnetzwerkes G^d ohne Wartekanten im Depot und ohne Zirkulationsflusskante. Dann sei $\tilde{A}_B^d = \tilde{A}^d \cap A_B^d$ die Menge aller Kanten bei denen Fahrzeugaktivitäten außerhalb des Depots mit einem Lösungsfluss belegt sind. Für die globale Flussdekomposition einer Netzwerkschicht ist also der Teilgraph $\tilde{G}_B^d = (N_B^d, \tilde{A}_B^d)$ relevant.

Binäre Entscheidungsvariablen x_k^d für die Umläufe mit $k \in K^d$ und zugeordneten Zielfunktionskoeffizienten a_k^d geben an, ob Umlauf k für die Lösung ausgewählt wird oder nicht. Dabei sei K^d die Menge aller möglichen Umläufe für den gegebene

nen Lösungsfluss und a_k^d die Distanz des Umlaufs zum gegebenen Referenzplan. Alle Umläufe, die Kante $(i, j) \in A^d$ enthalten, seien durch die Menge $K^d(i, j)$ definiert. Dann wird das Flussdekompositionsproblem zur Erstellung von ähnlichen Umläufen für eine Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ mit Hilfe eines Referenzplanes als allgemeines SPP formuliert:

$$\sum_{k \in K^d} x_k^d a_k^d \rightarrow \min \quad (10.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K^d(i, j)} x_k^d = b_{ij}^d \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}_B^d \quad (10.2)$$

$$x_k^d \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K^d \quad (10.3)$$

Die Zielfunktion (10.1) minimiert die Distanz zum gegebenen Referenzplan. Flussabdeckungsbedingungen (10.2) stellen sicher, dass in der dekomponierten Flusslösung jede durch eine Kante repräsentierte Fahrt genau so oft ausgeführt wird wie benötigt.

Column Generation-Lösungsansatz

Die Möglichkeiten aus einer Flusslösung Pfade zu generieren, sind schon bei den Netzwerkrepräsentationen kleiner Umlaufplanungsprobleme zu groß, um alle möglichen Pfade zu enumerieren. Zur Lösung des Modells (10.1)-(10.3) bietet sich daher ein Column Generation-basierter Ansatz an, bei welchem alle möglichen Pfade implizit betrachtet werden.

Um eine bekannte Problematik beim Lösen von Umlaufplanungsproblemen mit Column Generation zu umgehen, die u.a. bei [Benchimol et al., 2012] festgehalten ist, werden keine (Tages-)Umläufe erstellt, sondern Umlaufblöcke, d.h. Pfade, die mit einer Ausrückfahrt starten und bei der ersten Einrückfahrt beendet sind. Diese Pfade werden nach Lösen des Modells in einem weiteren Schritt zu Tagesumläufen zusammengesetzt. So wird vermieden, dass das Bilden langer Pfade im Column Generation Pricing zu einer schlechten Konvergenz des Verfahrens führen kann.

Algorithmus 10.3.1 fasst das Vorgehen bei der globalen Flussdekomposition mit Hilfe eines Referenzplans für die Fahrpläne mehrerer Tage zusammen. Für eine vereinfachte Notation wird auf eine Unterscheidung der einzelnen Netzwerkschichten $d \in \mathcal{D}$ und möglichen Umlaufblöcken K^d verzichtet und die allgemeinere Bezeichnung K verwendet.

Algorithmus 10.3.1 : Globale Flussdekomposition über die Umlaufplanungsnetzwerke mehrerer Tage bei Nutzung eines Referenzplans

(Schritt 0) **Bestimme Flusslösung für Tage \mathcal{L}**

Löse MDVSP für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$
und speichere Flusslösung x^{l*} .

Für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$ bestimme ähnliche Umlaufblöcke auf der Flusslösung x^{l*} :

(Schritt 1) **Initialisierung**

Zerlege Flusslösung x^{l*} lokal in Umlaufblöcke.
Nimm Umlaufblöcke als initiale Spaltenmenge K^l .
Setze $i = 0$.

(Schritt 2) **Löse (beschränktes) Master-Problem**

Löse LP-Relaxation mit aktueller Spaltenmenge K^l .
Speichere Zielfunktionswert z_{lp} und Dualwerte μ .

(Schritt 3) **Löse Pricing-Problem**

Erstelle neue Spalten/Umlaufblöcke K'' mit negativen reduzierten Kosten.
Falls $|K''| = 0$ gehe zu Schritt 6.

(Schritt 4) **Führe Spaltenmanagement durch**

Füge neue Spalten zum Master hinzu: $K' := K^l \cup K''$.
Falls $|K'| \geq K_{\max}$ lösche Spalten mit hohen positiven reduzierten Kosten von K' .

(Schritt 5) **Prüfe Abbruchkriterien**

Gehe zu Schritt 6, falls eins folgender Kriterien erfüllt ist:
 $i \geq i_{\max}$
Keine signifikante Verbesserung von z_{lp}
Andernfalls setze $i = i + 1$ und gehe zu Schritt 2.

(Schritt 6) **Bestimme eine ganzzahlige Lösung**

Löse Modell (10.1)-(10.3) mit aktueller Spaltenmenge K' .
Speichere die ausgewählten Umlaufblöcke.

(Schritt 7) **Bilde zulässige Umlaufpläne**

Bilde für alle Tage $l \in \mathcal{L}$ ähnliche Umläufe aus den ermittelten Umlaufblöcken.

Ausgangssituation sind die Flusslösungen zu den als MDVSP formulierten Umlaufplanungsproblemen der Tage \mathcal{L} (Schritt 0). Diese Tage können bei Nutzung eines Referenzplans dann zunächst einzeln bearbeitet werden.

Für die Flusslösungen werden dann je Tag $l \in \mathcal{L}$ ähnliche Umlaufblöcke bestimmt (Schritt 1-6). Um eine initiale Spaltenmenge $K' \subset K$ für das Master-Problem eines Tages zu bekommen, wird die gegebene Flusslösung nach [Kliwer, 2005] lokal in Umläufe dekomponiert. Das (beschränkte) Master-Problem wird als LP-Relaxation mit einem LP-Solver gelöst. Die Dualwerte μ der Flussabdeckungsbedingungen (10.2) aus der Lösung des Master-Problems werden dazu genutzt, im Column Generation Pricing die Umläufe/ Umlaufblöcke zu finden, die den aktuellen Zielfunktionswert – die Distanz zum Referenzplan – verbessern können.

Um das Verfahren zu beschleunigen, wird dabei pro Iteration nicht nur im Sinne eines *Dantzig-Pricings* der Umlauf bzw. Umlaufblock mit den besten reduzierten Kosten gesucht, sondern mehrere Umlaufblöcke im Sinne eines *Multiple-Pricings*: Umlaufblöcke $k \in K'' \subset K$ mit $\bar{a}_k = a_k - \sum_{\{(i,j) \in k(i,j)\}} \mu_{ij} < 0$. Dabei sei mit $k(i, j)$ die Menge aller Kanten bezeichnet, die Umlaufblock k von der oben definierten Kantenmenge \tilde{A}_B beinhaltet, also von allen Kanten, auf denen ein Fluss fließt und die Fahrzeugaktivitäten außerhalb der Depots darstellen. Zur Bestimmung solcher (zulässigen) Umlaufblöcke wird je Netzwerkschicht basierend auf dem für die Flusslösung relevanten Teil \tilde{G}_B des Umlaufplanungsnetzwerkes G ein Umlaufgenerierungsnetzwerk aufgestellt. Im Umlaufgenerierungsnetzwerk sind zusätzlich zum Basis-Netzwerk ein Quellknoten und ein Senkeknoten sowie zusätzliche Kanten eingefügt. Diese zusätzlichen Kanten modellieren den Beginn bzw. das Ende eines Umlaufblockes. Sie verbinden den Quellknoten mit allen Time-Space-Knoten auf der Depot-Zeitlinie, von denen mindestens eine Ausrückfahrtkante ausgeht. Analog dazu werden alle Time-Space-Knoten auf der Depot-Zeitlinie mit dem Senkeknoten verbunden, in die mindestens eine Einrückfahrtkante eingeht. Jeder Pfad von Quellknoten zu Senkeknoten beschreibt dann einen Umlaufblock.

Die reduzierten Kosten eines Umlaufblockes setzen sich dabei aus kanten- und pfadabhängigen (reduzierten) Kosten zusammen. Zum einen müssen die Dualwerte μ_{ij} der Kanten $(i, j) \in \tilde{A}_B$ entlang des Pfades berücksichtigt werden. Zum anderen ist der Distanzwert zu berücksichtigen, der nicht direkt auf den Kanten abgebildet werden kann, da er abhängig von den bedienten Fahrtensequenzen ist (zum gewählten Distanzmaß siehe 8.11). Daher kann das Pricing-Problem nicht als einfaches Minimal-Kostenfluss-Problem mit z.B. einem MIP-Solver gelöst werden.

Als Pricing-Problem werden ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme mit der Ressource „Anzahl bedienter Servicefahrten“ formuliert, in welchen auf jedem

zulässigen Pfad mindestens eine Servicefahrt bedient werden muss. Die Probleme werden mit dem in Abschnitt 9.2.3 beschriebenen Algorithmus 9.2.1 auf Basis Dynamischer Programmierung gelöst. Werden vom Algorithmus mehrere Umläufe mit negativen reduzierten Kosten gesucht, wird zur Diversifikation der erstellten Umläufe/Spalten das in Abschnitt 6.2.4 vorgestellte Label Categorizing-Verfahren genutzt.

Ganzzahlige Lösungen werden in diesem Column Generation-Verfahren mit einem MIP-Solver ermittelt.

Wenn für jeden Tag zum Referenzplan ähnliche Umlaufblöcke bestimmt sind, können die Umlaufblöcke der einzelnen Tage zu Tagesumläufen zusammengestellt werden. Je nach Vorgehensweise können die Lösungen der einzelnen Tage dabei einzeln oder zusammen betrachtet werden. Die Möglichkeiten zur Vorgehensweise sind in Abschnitt 10.5 genauer erläutert.

10.3.2 Flussdekomposition auf Basis von S-RSP-IT-RP

Für eine globale Flussdekomposition, die auf Basis sich wiederholender (Fahrten-)Muster ähnliche Pfade in den Lösungsflüssen verschiedener Netzwerke generiert, müssen geeignete (Fahrten-)Muster bestimmt werden. Eine generelle Bestimmung geeigneter Muster wurde bereits in Abschnitt 9.3.4 beschrieben. Ergänzend dazu werden nur die Fahrtenverbindungen berücksichtigt, die im gegebenen Lösungsfluss möglich sind. Modellierung und Lösungsansatz für eine globale Flussdekomposition mit Hilfe sich wiederholender (Fahrten-)Muster in den Planungsproblemen mehrerer Tage sind nachfolgend genauer erläutert.

Modellierung

Im Gegensatz zur im vorherigen Abschnitt 10.3.1 beschriebenen Vorgehensweise bei einer globalen Flussdekomposition je Planungsproblem mit Hilfe eines Referenzplans werden bei einer planungsproblemübergreifenden globalen Flussdekomposition die Lösungsflüsse der Umlaufplanungsprobleme mehrerer Tage gleichzeitig betrachtet. Die gleichzeitige Betrachtung erfolgt dabei aber ebenso jeweils für eine Netzwerkschicht, da ein Umlauf bzw. Umlaufblock einen Pfad innerhalb einer einzelnen Netzwerkschicht darstellt und nicht über mehrere Netzwerkschichten verläuft. Im Modell werden also gleichzeitig Teile von Umlaufplanungsnetzwerken verschiedener Tage berücksichtigt.

Im Vergleich zu Modell S-RSP-IT-RP (siehe Formulierung (9.17)-(9.22)) ändert sich beim mathematischen Modell zur globalen Dekomposition der Lösungsflüsse mehrerer Tage lediglich die Definition der Fahrtenabdeckungsbedingung (9.18). Für

die berücksichtigten Tage $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, m\}$ einer Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ sei $\tilde{G}_B^{l,d} = (N_B^{l,d}, \tilde{A}_B^{l,d})$ der wie im vorherigen Abschnitt definierte, für die Flussdekomposition relevante Teil des jeweiligen Umlaufplanungsnetzwerkes $G^{l,d}$. Die Flusslösung auf einer Kante $(i, j) \in A^{l,d}$ sei durch $b_{ij}^{l,d}$ beschrieben.

Für Umläufe bzw. Umlaufblöcke $k \in K^{l,d}$ sind Binärvariablen x_k^l definiert, die anzeigen, ob ein Umlauf k in der Lösung ausgewählt ist oder nicht. Dabei bezeichnet $K^{l,d}$ die Menge aller möglichen Umläufe für Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ des Tages $l \in \mathcal{L}$. Außerdem sei $K^{l,d}(i, j) \subset K^{l,d}$ die Menge aller Umläufe, die die Fahrzeugaktivität enthalten, die durch Kante $(i, j) \in A^{l,d}$ repräsentiert wird. Die neu formulierten Fahrtenabdeckungsbedingungen für das Modell zur globalen Dekomposition des Lösungsflusses der Netzwerkschicht d für mehrere Tage $l \in \mathcal{L}$ sind dann wie folgt beschrieben:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in K^{l,d}(i,j)} x_k^{l,d} = b_{ij}^{l,d} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall (i, j) \in \tilde{A}_B^{l,d} \quad (10.4)$$

Die Fahrtenabdeckungsbedingungen (10.4) garantieren, dass jede durch eine Kante im Lösungsfluss repräsentierte Fahrt so oft in der Lösung vorkommt, wie durch den Fluss vorgegeben ist.

Für die in (9.17) definierte Zielfunktion gilt außerdem, dass die Kosten f_k^l eines Umlaufs $k \in K^l$ des Tages $l \in \mathcal{L}$ jeweils 0 betragen. Da die Kosten des (kostenoptimalen) Umlaufplans bereits durch den Lösungsfluss vorgegeben sind, müssen sie nicht mehr bei der Dekomposition des Flusses in Umläufe berücksichtigt werden.

Column Generation-Lösungsansatz

Die Möglichkeiten aus einer Flusslösung Pfade zu generieren, sind schon bei den Umlaufplanungsnetzwerken kleiner Planungsprobleme zu groß, um alle möglichen Pfade zu enumerieren. Analog zu Modell (10.1)-(10.3) bietet sich daher für obiges Modell mit der modifizierten Fahrten-/Flussabdeckungsbedingung (10.4) eine implizite Berücksichtigung aller möglichen Pfade durch einen Column Generation-basierten Ansatz an.

Dabei werden Pfade nicht als (Tages-)Umläufe bestimmt, sondern als Umlaufblöcke, also als Pfade, die mit einer Ausrückfahrt starten und beim ersten Wieder-Einrücken beendet sind. Nachdem das Modell mit den Umlaufblöcken gelöst ist, werden diese im nächsten Schritt zu Tagesumläufen zusammengesetzt. Wie in Abschnitt 10.3.1 bereits gesagt wurde, wird so die Problematik umgangen, dass beim Lösen von Umlaufplanungsproblemen mit Column Generation das Bilden langer Pfade zu „schlechten“ Dualwerten bzw. einer schlechten Konvergenz des Verfahrens führen

kann. Das Bilden von (ähnlichen) Umläufen basierend auf den ermittelten Umlaufblöcken wird in Abschnitt 10.5 genauer erläutert.

Algorithmus 10.3.2 zeigt zusammenfassend das Vorgehen bei der globalen Flussdekomposition mit Hilfe von regelmäßigen Mustern für die Fahrpläne mehrerer Tage. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum in Abschnitt 10.3.1 beschriebenen Vorgehen bei Nutzung eines Referenzplans sind nachfolgend aufgeführt. Bei der Notation wird zur Vereinfachung auf eine Unterscheidung der einzelnen Netzwerkschichten $d \in \mathcal{D}$ und möglichen Umlaufblöcken $K^{l,d}$ der Tage $l \in \mathcal{L}$ verzichtet und die allgemeinere Bezeichnung K genutzt.

Der größte Unterschied liegt in der gemeinsamen Bearbeitung der Netzwerkflusslösungen unterschiedlicher Tage. Gegeben sind die Flusslösungen der Umlaufplanungsprobleme aller Tage \mathcal{L} . Aus diesen lassen sich r -regelmäßige Sequenzen möglicher Fahrtenmuster bestimmen, also Fahrtenmuster mit Fahrten, die an mindestens r aller $|\mathcal{L}|$ Tage in den Flusslösungen zu finden sind (Schritt 0).

Über Bonuswerte für gemeinsam genutzte Fahrtenmuster werden dann ähnliche Umlaufblöcke für alle Tage \mathcal{L} ermittelt (Schritt 1-6). Dabei werden wie bei Nutzung eines Referenzplans die initialen Spalten $K' \subset K$ für das Master-Problem durch eine lokale Dekomposition der Flusslösungen der einzelnen Tage generiert. Das (beschränkte) Master-Problem wird als LP-Relaxation gelöst und die Dualwerte μ der Fahrten- bzw. Flussabdeckungsbedingungen (10.4) sowie die Dualwerte ν der Muster-Kopplungsbedingungen (9.19) werden verwendet, um in den Column Generation Pricing-Problemen Umlaufblöcke zu finden, die den aktuellen Zielfunktionswert – den Bonus für gemeinsam genutzte Fahrtenmuster – verbessern.

Die Umlauf- bzw. Umlaufblockgenerierungsnetzwerke sind dabei aufgebaut wie in Abschnitt 10.3.1 beschrieben und die reduzierten Kosten eines Umlaufblocks setzen sich aus kanten- und pfadabhängigen (reduzierten) Kosten zusammen. Die Dualwerte μ auf den Kanten eines Pfades sind zu berücksichtigen, sowie die pfadabhängigen Dualwerte ν der genutzten Muster.

Die Pricing-Probleme werden dann als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme mit der Ressourcen „Anzahl bedienter Servicefahrten“ gelöst, bei welchen jeder zulässige Pfad mindestens eine Servicefahrt enthalten muss. Verwendet wird dazu der in Abschnitt 9.3.3 beschriebene Algorithmus 9.3.2 auf Basis Dynamischer Programmierung, der Muster aus Fahrtensequenzen auf (Teil-)Pfadern der Netzwerke berücksichtigt. Um bei einem *Multiple-Pricing* die je Column Generation Pricing-Schritt erstellten Spalten zu diversifizieren, wird wie bei der Nutzung eines Referenzplans zusätzlich das in Abschnitt 6.2.4 erläuterte Label-Categorizing-Verfahren verwendet.

Algorithmus 10.3.2 : Globale Flussdekomposition über die Umlaufplanungsnetzwerke mehrerer Tage mit Hilfe von regelmäßigen Mustern

(Schritt 0) **Bestimme Flusslösung und Muster für Tage \mathcal{L}**

Löse MDVSP für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$
und speichere Flusslösung x^{l*} .
Bestimme mögliche Muster \mathcal{P} aus den Flusslösungen.

(Schritt 1) **Initialisierung**

Zerlege Flusslösung x^{l*} für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$ lokal in Umlaufblöcke.
Nimm Umlaufblöcke als initiale Spaltenmenge K' .
Setze $i = 0$.

(Schritt 2) **Löse (beschränktes) Master-Problem**

Löse LP-Relaxation mit aktueller Spaltenmenge K' .
Speichere Zielfunktionswert z_{lp} , sowie Dualwerte μ und ν .

(Schritt 3) **Löse Pricing-Problem**

Erstelle neue Spalten/Umlaufblöcke K'' mit negativen reduzierten Kosten.
Falls $|K''| = 0$ gehe zu Schritt 6.

(Schritt 4) **Führe Spaltenmanagement durch**

Füge neue Spalten zum Master hinzu: $K' := K' \cup K''$.
Falls $|K'| \geq K_{\max}$ lösche Spalten mit hohen positiven reduzierten Kosten von K' .

(Schritt 5) **Prüfe Abbruchkriterien**

Gehe zu Schritt 6, falls eins folgender Kriterien erfüllt ist:
 $i \geq i_{\max}$
Keine signifikante Verbesserung von z_{lp}
Andernfalls setze $i = i + 1$ und gehe zu Schritt 2.

(Schritt 6) **Bestimme eine ganzzahlige Lösung**

Löse Modell (9.17),(10.4),(9.19)-(9.22) mit aktueller Spaltenmenge K' .
Speichere die ausgewählten Umlaufblöcke.

(Schritt 7) **Bilde zulässige Umlaufpläne**

Bilde für alle Tage $l \in \mathcal{L}$ ähnliche Umläufe aus den ermittelten Umlaufblöcken.

Da die Pricing-Probleme je Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ und je Tag $l \in \mathcal{L}$ unabhängig voneinander sind, können nicht nur die Pricing-Probleme je Netzwerkschicht, sondern zusätzliche auch die unterschiedlichen Tage parallel auf mehreren Threads verteilt gelöst werden. So kann die Gesamt-Rechenzeit je nach Anzahl zur Verfügung stehender Threads deutlich reduziert werden (ein ähnliches Beispiel für eine solche Rechenzeitreduktion findet sich in Abbildung 6.3 in Abschnitt 6.2.5).

Ganzzahlige Lösungen können mit einem MIP-Solver bestimmt werden, indem das Modell mit der aktuellen Spaltenmenge bzw. der aktuellen Menge an Umlaufblöcken gelöst wird.

Nachdem die ähnlichen Umlaufblöcke ermittelt sind, können aus den Blöcken der einzelnen Tage Tagesumläufe gebildet werden. Für die Vorgehensweise dabei sei auf Abschnitt 10.5 verwiesen.

10.4 Bilden von ähnlichen Umlaufplänen mit erlaubten Mehrkosten

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, wie bei einer kostenoptimalen Umlaufplanung für mehrere Tage ähnliche Umläufe gebildet werden können. Womit zu den in der Literatur bekannten Qualitätskriterien beim Bilden von (kostenoptimalen) Umläufen wie *Linienreinheit* bei z.B. [Kliewer, 2005] oder *Störungstoleranz* bei [Amberg, 2014] die *Ähnlichkeit* als weiteres Qualitätskriterium beim Erstellen von Umläufen vorgestellt wurde. Beim Planen von Umläufen ist generell das Hauptziel eines Verkehrsunternehmens, die Kosten so gering wie möglich zu halten. Die Bereitschaft, deutlich höhere Mehrkosten im Vergleich zu einer kostenoptimalen Lösung zu tragen, um ähnlichere Umläufe zu bekommen, ist also nicht gegeben.

Es stellt sich aber die Frage, bis zu welchem Grad die Ähnlichkeit der Umläufe verbessert werden kann, wenn (geringe) Mehrkosten beim Bilden der Umläufe erlaubt sind. Dies ist insbesondere für die bei einer sequenziellen Planung von Umläufen und Diensten nachfolgende Dienstplanung von Interesse. Dort ist durch die vorher festgelegten Umläufe die Flexibilität beim Planen von (ähnlichen) Diensten eingeschränkt, sodass die Vermutung nahe liegt, dass mehr Ähnlichkeit in den Umläufen zu mehr Ähnlichkeit bei den Diensten führen kann. Um dies zu untersuchen, wird in diesem Abschnitt das Umlaufplanungsproblem als bi-kriterielles Optimierungsproblem mit den Zielen „Minimiere Kosten“ und „Maximiere Ähnlichkeit“ formuliert (vgl. Vorgehen B im Lösungsschema zum VSP-CSP-IT in Abbildung 10.1).

Zum Lösen dieser Formulierung werden in den Abschnitten 10.4.1 und 10.4.2 Lösungsansätze vorgestellt, die auf den umgesetzten Basis-Ähnlichkeitskonzepten aus Abschnitt 9.2 und 9.3 basieren, also der Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen mit Hilfe eines Referenzplans und mit Hilfe von regelmäßigen Mustern.

10.4.1 Umlaufplanung auf Basis von RSP-IT-RS

Für eine bi-kriterielle Ressourceneinsatzplanung mit den Zielen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit wurde in Abschnitt 9.2.2 das Basis-Modell RSP-IT-RS (siehe Formulierung (9.5)-(9.9)) vorgestellt. In diesem wird die Distanz der Ressourceneinsätze zu einem gegebenen Referenzplan minimiert, während eine (elastische) Restriktion den dafür erlaubten Kostenrahmen vorgibt. Das Modell ist als Set-Partitioning-Problem formuliert, in welchem die Ressourceneinsätze den Variablen bzw. den Spalten entsprechen und alle Fahrten/Aufgaben bzw. Zeilen entsprechend ihrer Anzahl abdecken müssen. Die möglichen Kombinationen von Fahrten/Aufgaben zu Ressourceneinsätze/Variablen sind schon für kleine Planungsprobleme zu viele, um diese vollständig zu enumerieren und das Modell mit allen möglichen Variablen zu lösen. Daher wird RSP-IT-RS generell mit einem Column Generation-Ansatz gelöst, in welchem alle möglichen Variablen implizit betrachtet werden. Wird das (pfadbasierte) Modell RSP-IT-RS zur Formulierung von Umlaufplanungsproblemen genutzt, entspricht eine Spalte einem (Tages-)Umlauf.

Wie schon in den Abschnitten 10.3.1 und 10.3.2 betont wurde, ist diese Formulierung für einen Column Generation-basierten Lösungsansatz in der Umlaufplanung vergleichsweise ungeeignet: Es existieren sehr viele Kombinationsmöglichkeiten von Fahrten zu (Tages-)Umläufen, sodass extrem große Modelle mit vielen ähnlichen Spalten entstehen. Das Bilden langer Pfade (in den Pricing-Problemen), also von Spalten die viele Zeilen abdecken können, kann zu „schlechten“ Dualwerten bzw. zu einer schlechten Konvergenz des Verfahrens führen.

Besser ist es, Modelle mit kürzeren Pfaden zu lösen, d.h. Modelle mit Spalten, die weniger Zeilen abdecken, z.B. indem wie bei [Benchimol et al., 2012] Zeilen aggregiert werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, nicht komplette (Tages-)Umläufe zu berücksichtigen, sondern lediglich Umlaufblöcke, also Fahrtensequenzen zwischen zwei Aufenthalten in einem Depot. Diese Möglichkeit wurde bereits beim Bilden von ähnlichen Umläufen im Rahmen einer globalen Dekomposition der Lösungsflüsse genutzt (siehe Abschnitt 10.3.1 und 10.3.2). Der Nachteil beim Nutzen von Umlaufblöcken statt (Tages-)Umläufen ist, dass dann im ursprünglichen Modell die Fahrzeuganzahl nicht berücksichtigt ist. So können evtl. Lösungen gebildet werden, die zwar zum Referenzplan ähnliche Umlaufblöcke enthalten, aber über den gesamten Tag be-

trachtet mehr Fahrzeuge benötigen als die minimal notwendige Fahrzeuganzahl. Also Lösungen, die ein Verkehrsunternehmen nicht verwenden möchte.¹

Um die Fahrzeuganzahl in eine für einen Column Generation-basierten Ansatz geeignete Modellierung miteinbeziehen zu können, muss also die Basis-Formulierung verändert werden. Modellierung und Lösungsansatz werden nachfolgend genauer erläutert.

Modellierung

Damit die zur Bedienung aller Fahrten benötigte Fahrzeuganzahl im Modell mit Umlaufblöcken mitberücksichtigt werden kann, wird eine (Time-Space-)Flussformulierung verwendet: Im Netzwerk repräsentieren Kanten dann einzelne Umlaufblöcke und Knoten beschreiben Start bzw. Ende eines Umlaufblocks in einem Depot. Aufeinanderfolgende Knoten (auf der Zeitlinie) eines Depots werden über Wartekanten miteinander verbunden. Je Depot wird der letzte Knoten über eine Zirkulationsflusskante mit dem ersten Knoten verbunden. Mit der Zirkulationsflusskante kann dann die Anzahl eingesetzter Fahrzeuge im Modell berücksichtigt werden. Abbildung 10.4 zeigt ein einfaches Beispiel für ein solches Netzwerk.

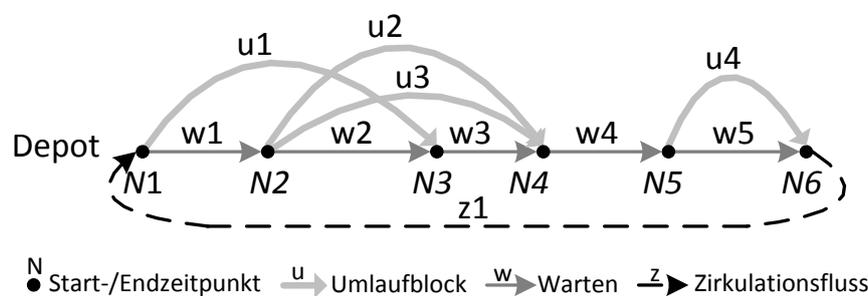


Abbildung 10.4: Flussmodell zur Umlaufplanung mit Umlaufblöcken als Kanten und einem Depot

In der mathematischen Formulierung für das Planungsproblem eines Tages sei dann $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge aller Kombinationen aus Depots und Fahrzeugtypen und $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, m\}$ die Menge aller zu bedienenden Servicefahrten. Zu jeder Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ ist ein Umlaufplanungsnetzwerk $G_U^d = (N_U^d, A_U^d)$ definiert mit der

¹ Bei der Dekomposition des Lösungsflusses in den in den Abschnitten 10.3.1 und 10.3.2 vorgestellten zwei-schrittigem Verfahren, in dem zuerst Umlaufblöcke gebildet werden und dann Umläufe, muss die Fahrzeuganzahl beim Bilden der Umlaufblöcke nicht berücksichtigt werden. Die zur Bedienung aller Fahrten benötigte minimale Fahrzeuganzahl ist bereits durch den Lösungsfluss vorgegeben und wird bei einer Zerlegung des Lösungsflusses nicht verändert.

Knotenmenge N_U^d und der Kantenmenge A_U^d . Die Knotenmenge N_U^d repräsentiert Start- oder Endzeitpunkte von Umlaufblöcken aus bzw. in das Depot, das Netzwerkschicht d zugeordnet ist. In der Kantenmenge A_U^d sind enthalten *Umlaufblockkanten*, *Wartekanten* und eine *Zirkulationsflusskante*. Jede Kante sei identifiziert durch ihre Anfangs- und Endknoten $i, j \in N_U^d$ sowie eine eindeutige Nummer $n \in \mathbb{N}$ für jede unterschiedliche Kante zwischen dem gleichen Knotenpaar. Sei $A_U^d(t) : \mathcal{T} \rightarrow A_U^d$ eine Funktion, die zu Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ und Depot $d \in \mathcal{D}$ die Menge aller Umlaufblockkanten $(i, j, n) \in A_U^d$ liefert, die Umlaufblöcke repräsentieren, in denen Servicefahrt t bedient wird.

Jeder Kante $(i, j, n) \in A_U^d$ werden abhängig von ihrem Typ fixe und variable Kosten zugeordnet. Jeder Umlaufblockkante ist ein Kostenwert c_{ijn} zugeordnet, der sich aus den (variablen) Einsatzkosten für die Ausführung der in diesem Umlaufblock enthaltenen Fahrten ergibt. Außerdem ist ein Distanzwert a_{ijn} assoziiert, der als Distanz des Umlaufblocks zum gegebenen Referenzplan ermittelt wird. Für die Wartekanten betragen die Kosten 0 und der Zirkulationsflusskante sind die fixen Fahrzeugkosten zugeordnet. Die Flusskapazitäten u_{ijn} auf den Kanten sind ebenfalls typabhängig: Dabei ist die maximale Flusskapazität auf einer Umlaufblockkante auf 1 gesetzt, während die Kapazität bei Wartekanten und Zirkulationsflusskante die jeweils maximal mögliche einsetzbare Fahrzeuganzahl von Depot-Fahrzeugkombination $d \in \mathcal{D}$ beträgt.

Als Entscheidungsvariablen ist je Kante $(i, j, n) \in A_U^d$ eine ganzzahlige Flussvariable y_{ijn}^d definiert, die die Höhe des Flusses angibt, der über diese Kante verläuft. Jede Flusseinheit repräsentiert dabei ein Fahrzeug, das die durch die Kante repräsentierten Aktivitäten ausführt.

Mit ϵ sei der erlaubte Kostenrahmen für die Ausführung aller in der Lösung ausgewählten Aktivitäten bezeichnet. Damit dieser immer eingehalten wird, sind eine nicht negative Schlupfvariable s und eine Surplus-Variable u notwendig. Eine Überschreitung des Kostenrahmens wird über einen der Variable u zugeordneten Faktor p_u bestraft.

Dann kann das *Umlaufplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten und Benutzung eines Referenzplanes als Mehrgüter-Flussmodell* (engl. *multi commodity flow vehicle scheduling problem with irregular trips using a reference schedule*, *VSP-IT-*

RS-MCFP) wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^d} a_{ijn}^d y_{ijn}^d + p^u u \rightarrow \min \tag{10.5}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^d} c_{ijn}^d y_{ijn}^d + s - u = \epsilon \tag{10.6}$$

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^d(t)} y_{ijn}^d = b_t \quad \forall t \in \mathcal{T} \tag{10.7}$$

$$\sum_{\{j:(j,i,n) \in A_U^d\}} y_{jin}^d - \sum_{\{j:(i,j,n) \in A_U^d\}} y_{ijn}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N_U^d \tag{10.8}$$

$$0 \leq y_{ijn}^d \leq u_{ijn}^d, y_{ijn}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j,n) \in A_U^d \tag{10.9}$$

$$s, u \geq 0 \tag{10.10}$$

Die Zielfunktion (10.5) minimiert die Distanz zum gegebenen Referenzplan. Dabei beschränkt die elastische Kostenrestriktion (10.6) die Kosten der Lösung. Nebenbedingungen (10.7) und (10.8) entsprechen einer Mehrgüter-Flussformulierung: Fahrtenabdeckungsbedingungen (10.7) stellen sicher, dass über alle Netzwerkschichten jede Fahrt genau so oft von Fahrzeugen ausgeführt wird, wie benötigt. Nebenbedingungen (10.8) garantieren einen gültigen Netzwerkfluss, indem an jedem Knoten Flusserhaltung sichergestellt wird.

Abbildung 10.5 veranschaulicht die Formulierung für das einfache Beispiel aus Abbildung 10.4.

		Umlaufblöcke				Slack und Surplus		Depotkanten						
		u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	Surplus		w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	z ₁	
(10.5)	Distanz	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	0	p ^u	0	0	0	0	0	0	
(10.6)	Kosten	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	1	-1	0	0	0	0	0	c _z	= ε
(10.7)	Servicefahrten		1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
				0		0	0	0	0	0	0	0	0	= 1
					
(10.8)	N1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	+1	= 0
	N2	0	-1	-1	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	= 0
	N3	+1	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	= 0
	N4	0	+1	+1	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	= 0
	N5	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1	-1	0	= 0
	N6	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	+1	-1	= 0

Abbildung 10.5: Umlaufblöcke zu Abbildung 10.4 mit Distanz zu einem Referenzplan nach Modell (10.5)-(10.10)

Column Generation-Lösungsansatz

Gelöst werden kann das Modell dann mit einer zu Algorithmus 10.3.1 aus Abschnitt 10.3.1 analogen Vorgehensweise: Der Hauptunterschied besteht darin, dass nicht eine Flusslösung fest vorgegeben ist, deren Fluss in Umlaufblöcken enthalten sein soll, sondern dass Umlaufblöcke zu bilden sind, die alle Servicefahrten aus dem Fahrplan kosteneffizient und ähnlich zum Referenzplan abdecken. Im (beschränkten) Master-Problem wird die LP-Relaxation des Modells gelöst, während im Pricing-Problem ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme mit dem vorgestellten Algorithmus 9.2.1 gelöst werden.

Die ressourcenbeschränkten Kürzeste-Wege-Probleme sind auf den *Umlauf(block)-generierungsnetzwerken* $\tilde{G}^d = (N^d, \tilde{A}^d)$ formuliert. Diese enthalten nur Kanten und Knoten, die Fahrzeugaktivitäten außerhalb des Depots repräsentieren, Ankünfte im Depot bzw. Abfahrten vom Depot, sowie Quell- und Senkeknoten mit entsprechenden Verbindungskanten zu möglichen Starts von Umlaufblöcken und von möglichen Enden (siehe Abschnitt 10.3.1).

Zur Verbesserung der (LP-)Lösung des (beschränkten) Master-Problems werden im Pricing-Problem mit Hilfe der Dualwerte neue Spalten – also neue Umlaufblöcke – mit negativen reduzierten Kosten ermittelt. Dabei werden die Dualwerte λ , μ und π berücksichtigt, die mit den Restriktionen (10.6), (10.7) und (10.8) assoziiert sind. Sei λ die duale Variable, die der Kostenrestriktion (10.6) zugeordnet ist. Mit π_t sei die duale Variable für Fahrt $t \in \mathcal{T}$ aus den Abdeckungsbedingungen (10.7) bezeichnet. Außerdem sei mit μ_i die duale Variable definiert, die mit Flusserhaltungsbedingungen an Knoten $i \in N_U^d$ assoziiert ist. Die reduzierten Kosten \bar{a}_k eines Umlaufblocks $k \in K$ aus der Menge aller zulässigen Umlaufblöcke K , der zu dem Zeitpunkt startet, der im *Umlaufplanungsnetzwerk* G_U^d durch Knoten $i \in N_U^d$ repräsentiert ist und zu dem Zeitpunkt endet, der über Knoten $j \in N_U^d$ abgebildet ist², werden dann ermittelt als:

$$\bar{a}_k = a_k - f_k \lambda + \mu_{i:(i,j)} - \mu_{j:(i,j)} - \sum_{t \in \mathcal{T}(k)} \pi_t \quad (10.11)$$

wobei a_k die Distanz des Umlaufblocks zum Referenzplan ist, f_k die Kosten des Umlaufblocks und $\mathcal{T}(k)$ die Menge der Servicefahrten, die im Umlaufblock bedient werden.

Im Umlaufblockgenerierungsnetzwerk sind dabei die Kosten auf den Kanten abgebildet, ebenso die Dualwerte für die Abdeckung von Servicefahrten und die Dual-

² Im Umlaufblockgenerierungsnetzwerk $\tilde{G}^d = (N^d, \tilde{A}^d)$ existieren ebenfalls Knoten i' und j' mit $i', j' \in N^d$, die die gleichen Zeitpunkte repräsentieren wie Knoten $i, j \in N_U^d$ im Umlaufplanungsnetzwerk $G_U^d = (N_U^d, A_U^d)$. Es gilt $N^d \supseteq N_U^d$.

werte, die sich aus der Flusserhaltungsrestriktion ergeben. Diese können den Kanten in \tilde{A}^d zugeordnet werden, die Ausrückfahrten bzw. Einrückfahrten entsprechen. Die pfadabhängige Distanz wird wie in Algorithmus 9.2.1 beschrieben berücksichtigt.

10.4.2 Umlaufplanung auf Basis von S-RSP-IT-RP

Als zweiter genereller Ansatz für eine bi-kriterielle Ressourceneinsatzplanung mit den Zielen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit wurde in Abschnitt 9.3.2 das Basis-Modell S-RSP-IT-RP (siehe Formulierung (9.17)-(9.22)) vorgestellt. Mit diesem werden die Kosten für den Ressourceneinsatz mehrerer Tage minimiert, während die Belohnung für die regelmäßige Verwendung von Fahrtenmustern in den Plänen verschiedener Tage – also die Ähnlichkeit der Pläne – maximiert werden soll. Die Umsetzung dieses allgemeinen Modells für eine tagesübergreifende Umlaufplanung bedarf einiger Anpassungen. Wie bei Umsetzung des Basis-Referenzplanmodells für die Umlaufplanung im vorherigen Abschnitt 10.4.1, soll eine Netzwerkflussformulierung auf Basis von Umlaufblöcken vorgeschlagen werden, mit der die Lösbarkeit verglichen zum Basis-Modell verbessert werden kann. Modellierung und Lösungsansatz für eine Umlaufplanung mit planungsproblemübergreifender Ähnlichkeit durch regelmäßige Muster werden im Folgenden genauer dargestellt.

Modellierung

Die dem Modell zugrunde liegenden Netzwerke sind wie im vorherigen Abschnitt beschrieben aufgebaut. Sie bestehen aus Umlaufblockkanten, Wartekanten, Zirkulationsflusskanten und Knoten, die Anfänge und Enden von Umlaufblöcken repräsentieren. Zu dem Umlaufplanungsproblem jeden Tages wird ein Netzwerk aufgebaut.

In der mathematischen Formulierung gelten die bekannten Bezeichnungen aus den vorherigen Abschnitten: Mit \mathcal{L} sei die Menge der betrachteten Tage bezeichnet, \mathcal{D} beschreibt die Menge aller Depots und \mathcal{T} die Menge aller Servicefahrten, die in den Fahrplänen der betrachteten Tage bedient werden müssen. Des weiteren sei \mathcal{T}^l die Menge aller Fahrten, die an Tag l auszuführen sind. Alle einbezogenen Fahrtenmuster seien durch die Menge \mathcal{P} beschrieben und mit \mathcal{G} die Menge aller Fahrtenmustergruppen. Jede Gruppe $g \in \mathcal{G}$ steht für eine Menge von Mustern, die über die betrachteten Tage gleich häufig genutzt werden. Die Anzahl der Nutzung, die von Gruppe g repräsentiert ist, sei mit $C(g)$ definiert. Mit r^g sei der Belohnungswert für die Nutzung der Gruppe g bezeichnet. Zu jedem Tag $l \in \mathcal{L}$ und jedem Depot $d \in \mathcal{D}$ ist ein Umlaufplanungsnetzwerk $G_U^{l,d} = (N_U^{l,d}, A_U^{l,d})$ definiert. Knotenmenge $N_U^{l,d}$ repräsentiert mögliche Starts und Enden von Umlaufblöcken. Kantenmenge $A_U^{l,d}$ enthält Kanten,

die Umlaufblöcke repräsentieren, Wartezeiten im Depot und eine Zirkulationsflusskante. Jede Kante sei eindeutig beschrieben durch ihre Anfangs- und Endknoten $i, j \in N_U^{l,d}$ und eine eindeutige Nummer $n \in \mathbb{N}$ für unterschiedliche Kanten zwischen dem gleichen Knotenpaar. Des Weiteren sei $A_U^{l,d}(t) : \mathcal{T} \rightarrow A_U^{l,d}$ eine Funktion, die zu Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$, Tag $l \in \mathcal{L}$ und Depot $d \in \mathcal{D}$ die Menge aller Umlaufblockkanten $(i, j, n) \in A_U^{l,d}$ liefert, die Umlaufblöcke repräsentieren, in denen Servicefahrt t ausgeführt wird.

Jeder Kante $(i, j, n) \in A_U^{l,d}$ werden abhängig von ihrem Typ fixe und variable Kosten f_{ijn} zugeordnet wie in Abschnitt 10.4.1 beschrieben. Ebenso, wie beschrieben, werden die Flusskapazitäten u_{ijn} auf den Kanten gesetzt.

Zwei Arten Entscheidungsvariablen werden definiert: Flussvariablen y und Variablen z zur Fahrtenmustergruppenzuordnung. Die ganzzahligen Flussvariablen $y_{ijn}^{l,d}$ geben an, wie hoch der Fluss ist, der über die entsprechende Kante verläuft, also wie viele Fahrzeuge, die durch die Kante abgebildeten Aktivitäten ausführen. Dabei sei mit $A_U^{l,d}(p)$ die Menge aller Kanten bezeichnet, deren abgebildete Aktivitäten Fahrtenmuster $p \in \mathcal{P}$ beinhalten. Binäre Variablen z_p^g zeigen an, ob für Muster $p \in \mathcal{P}$ tagesübergreifend die Gruppe $g \in \mathcal{G}$ ausgewählt ist, oder nicht.

Das *tagesübergreifende Umlaufplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten und regelmäßigen Mustern als Mehrgüter-Flussmodell* (engl. *simultaneous multi commodity flow vehicle scheduling problem with irregular trips and regular patterns*, *S-VSP-IT-RP-MCFP*) kann dann wie in Formulierung (10.12)-(10.18) beschrieben werden.

Zielfunktion (10.12) minimiert die Kosten für die Umlaufpläne während die Belohnung für die Ähnlichkeit – die Nutzung von Fahrtenmustern an möglichst vielen Tagen – maximiert wird. Fahrtenabdeckungsbedingungen (10.13) garantieren, dass an jedem Tag über alle Netzwerkschichten jede Fahrt genau so oft von Fahrzeugen ausgeführt wird, wie benötigt. Flusserhaltungsbedingungen (10.14) stellen einen gültigen Netzwerkfluss an jedem Knoten sicher. Durch Verknüpfungsbedingungen (10.15) und Gruppenzuordnungsbedingungen (10.16) wird die Kopplung der Umlaufpläne der einzelnen Tage garantiert: Nebenbedingungen (10.15) sorgen dafür, dass ein Muster so oft in den Plänen vorkommt, wie es der ausgewählten Fahrtenmustergruppe entspricht, während Restriktionen (10.16) sicherstellen, dass jedes Muster maximal einmal einer Fahrtenmustergruppe zugeordnet wird.

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^{l,d}} y_{ijn}^{l,d} f_{ijn}^{l,d} - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r_p^g \rightarrow \min \quad (10.12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^{l,d}(t)} y_{ijn}^{l,d} = b_t^l \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l \quad (10.13)$$

$$\sum_{\{j:(j,i,n) \in A_U^{l,d}\}} y_{jin}^{l,d} - \sum_{\{j:(i,j,n) \in A_U^{l,d}\}} y_{ijn}^{l,d} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N_U^{l,d} \quad (10.14)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j,n) \in A_U^{l,d}(p)} y_{ijn}^{l,d} - \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (10.15)$$

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (10.16)$$

$$0 \leq y_{ijn}^{l,d} \leq u_{ijn}^{l,d}, \quad y_{ijn}^{l,d} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j,n) \in A_U^{l,d} \quad (10.17)$$

$$z_p^g \in \{0, 1\} \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (10.18)$$

Column Generation-Lösungsansatz

Modell (10.12)-(10.18) kann analog zur in Abschnitt 10.3.2 bzw. Algorithmus 10.3.2 beschriebenen Vorgehensweise bei der globalen Flussdekomposition mit regelmäßigen Mustern gelöst werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Flusslösungen beim Bilden der Umlaufblöcke nicht fest vorgegeben sind. Wie auch bei Nutzung eines Referenzplans, werden im (beschränkten) Master-Problem die LP-Relaxation des Modells gelöst und im Pricing-Problem ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme.

Für eine Beschreibung des Aufbaus der den Pricing-Problemen zugrunde liegenden Umlaufblockgenerierungsnetzwerke sei auf Abschnitt 10.4.1 verwiesen. Um mit Hilfe der Dualwerte der (LP-)Lösung des (beschränkten) Master-Problems im Pricing-Problem neue Spalten bzw. neue Umlaufblöcke zu finden, die die Lösung verbessern können, werden in den Umlaufblockgenerierungsnetzwerken Umlaufblöcke mit negativen reduzierten Kosten gesucht.

Dabei setzen sich die reduzierten Kosten wie folgt zusammen: Zusätzlich zu den in Abschnitt 10.4.1 beschriebenen Dualwerten π zu Fahrtenabdeckungsbedingungen (10.13) und μ zu den Flusserhaltungsbedingungen (10.14) werden die Dualwerte ν der Muster-Kopplungsbedingungen (10.15) berücksichtigt. Die reduzierten Kosten \bar{f}_k eines Umlaufblockes $k \in K^l$ aus der Menge K^l aller zulässigen Umlaufblöcke eines

Tages l werden dann ermittelt als:

$$\bar{f}_k = f_k + \mu_{i:(i,j)} - \mu_{j:(i,j)} - \sum_{t \in \mathcal{T}^l(k)} \pi_t - \sum_{p \in \mathcal{P}(k)} \nu_p \quad (10.19)$$

wobei f_k die Kosten des Umlaufblocks beschreibt, $\mathcal{T}^l(k)$ die Menge der Servicefahrten, die im Umlaufblock bedient werden und $\mathcal{P}(k)$ die Menge der bei Bedienung der Servicefahrten enthaltenen Fahrtenmuster.

Die (reduzierten) Kosten können dabei auf die entsprechenden Kanten im Umlaufblockgenerierungsnetzwerk abgebildet werden (vgl. Abschnitt 10.4.1). Die Dualwerte der pfadabhängigen Muster können wie in Algorithmus 9.3.2 beschrieben einbezogen werden.

10.5 Bilden von ähnlichen (Tages-)Umläufen auf Basis von Umlaufblöcken

Beim Bilden von (ähnlichen) (Tages-)Umläufen kann es rechentechnisch vorteilhafter sein, diese in zwei Schritten zu erstellen (siehe Abschnitte 10.3.1, 10.3.2 und 10.4.1): Im ersten Schritt werden zunächst Umlaufblöcke erstellt. Im zweiten Schritt werden die erstellten Umlaufblöcke dann zu Tagesumläufen zusammengefügt.

In den in dieser Arbeit in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Verfahren zur Umlaufbildung ist dabei garantiert, dass durch das Ergebnis des ersten Schrittes die (gesamt)kostenminimale Anzahl an Fahrzeugen nicht überschritten wird: Bei der globalen netzwerkübergreifenden Dekomposition des kostenoptimalen Lösungsflusses in den Umlaufplanungsnetzwerken ist die kostenminimale Anzahl an Fahrzeugen durch den Lösungsfluss vorgegeben. Dieser wird durch das Bilden von Umlaufblöcken nicht verändert (vgl. Abschnitt 10.3). Bei der (ähnlichen) Umlaufbildung mit erlaubten Mehrkosten wird durch die Formulierung als Netzwerkflussproblem über die Zirkulationsflusskante sichergestellt, dass Kosten für den anfallenden Fahrzeugeinsatz berücksichtigt sind. Die Umlaufblöcke werden so gebildet, dass der für die Blöcke notwendige Fahrzeugeinsatz minimiert ist (vgl. Abschnitt 10.4).

Wie im zweiten Schritt aus den Umlaufblöcken verschiedener Tagen zueinander ähnliche Umläufe gebildet werden können, soll in diesem Abschnitt kurz dargestellt werden. Abbildung 10.6 stellt die unterschiedlichen Möglichkeiten zusammenfassend dar.

Grundsätzlich können aus den gegebenen Umlaufblöcke mehrerer Tage ähnliche Umlaufpläne *tageweise* gebildet werden oder *gleichzeitig* für alle betrachteten Ta-

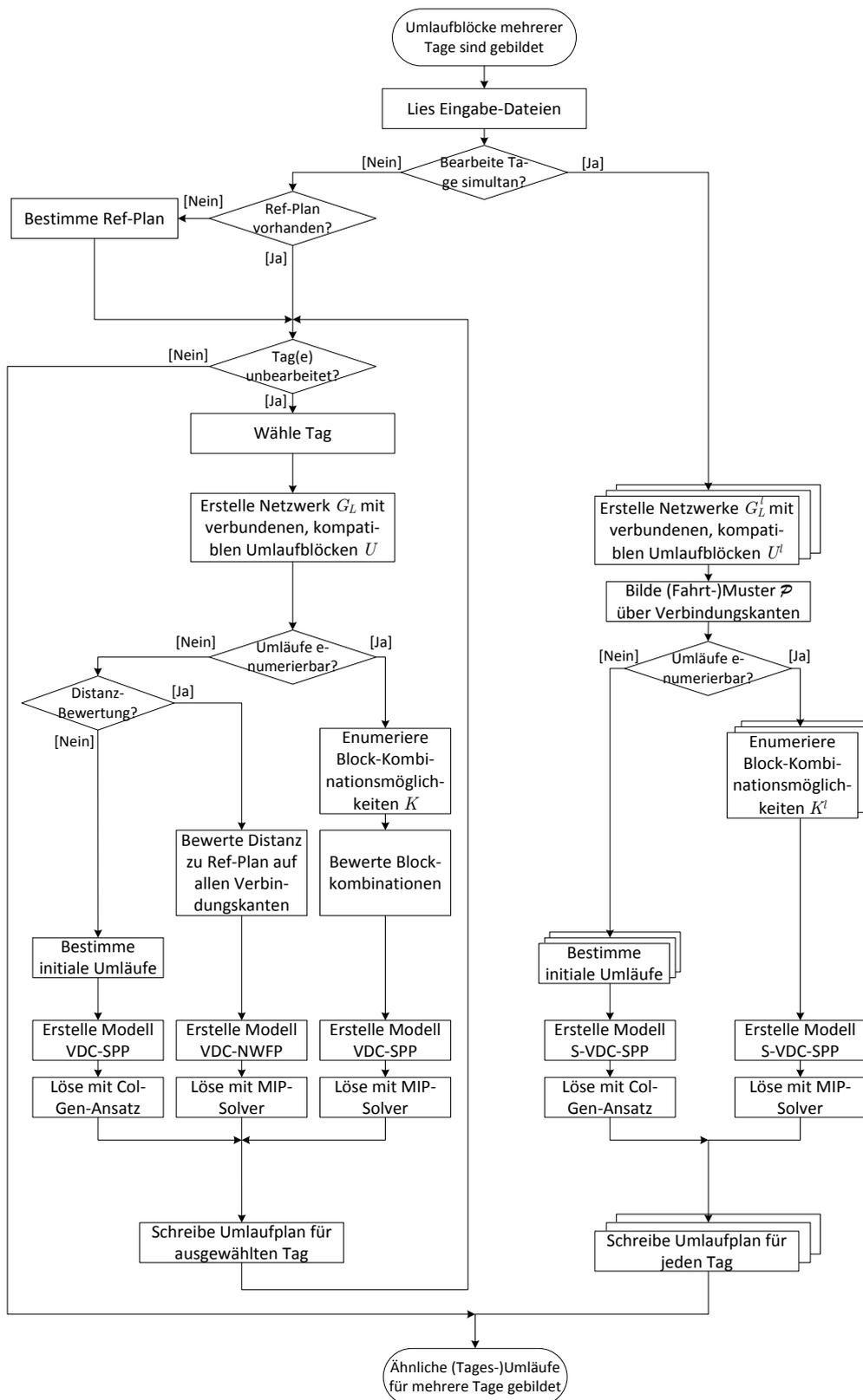


Abbildung 10.6: Grundsätzliche Vorgehensweisen beim Bilden von ähnlichen Tagesumläufen aus Umlaufblöcken für die Fahrpläne mehrerer Tage

ge. Werden die Umlaufpläne tageweise erstellt, muss noch – falls nicht gegeben – ein Referenzplan erstellt werden, an welchem die Umlaufpläne der einzelnen Tage ausgerichtet werden können (zur Bestimmung eines geeigneten Referenzplans siehe Abschnitt 9.2.1). Die tageweise Vorgehensweise sowie das tagesübergreifende Vorgehen werden nachfolgend mit ihren Variationsmöglichkeiten in den Abschnitten 10.5.1 und 10.5.2 näher erläutert.

10.5.1 Tageweises Vorgehen

Beim *tageweisen Vorgehen* werden dann je Tag *Tagesumlaufgenerierungsnetzwerke* $G_L = (N_L, A_L)$ erstellt, die als Knoten N_L die gegebenen Umlaufblöcke U enthalten, sowie Quell- und Senkeknoten und als Kanten A_L Verbindungskanten vom Quellknoten zu den Umlaufblockknoten bzw. von den Umlaufblockknoten zum Senkeknoten sowie Verbindungskanten zwischen *kompatiblen* Umlaufblöcken. Zwei Umlaufblöcke sind kompatibel, wenn der Endort des ersten dem Startort des zweiten entspricht und der erste beendet ist, bevor der zweite beginnt. Jeder Pfad von Quellknoten zu Senkeknoten entspricht dann einem gültigen Tagesumlauf.

Umläufe enumerierbar

Sind alle Tagesumläufe enumerierbar, d.h. können (in kurzer Zeit) alle Block-Kombinationsmöglichkeiten gebildet werden und reicht der Speicher des verwendeten Rechners dafür aus, können aus allen gebildeten Kombinationen diejenigen ausgewählt werden, die am ähnlichsten zum gegebenen Referenzplan sind. Dazu werden die Block-Kombinationen jeweils mit einem der vorgestellten Ähnlichkeitsmaße bewertet. In einem erweiterten Set-Partitioning-Modell sollen dann die Block-Kombinationen ausgewählt werden, die den besten Ähnlichkeitswert erreichen, wobei jeder gegebene Umlaufblock genau einmal in den ausgewählten Block-Kombinationen enthalten sein muss und die minimal benötigte Anzahl an Fahrzeugen (= die maximale Anzahl ausgewählter Block-Kombinationen) nicht überschritten werden darf.

Für jede Depot-Fahrzeugtyp-Kombination $d \in \mathcal{D}$ sei $U^d = \{1, \dots, n\}$ die Menge aller gegebenen Umlaufblöcke des entsprechenden Depots und L_{\max}^d die maximal im Umlaufplan erlaubte Fahrzeuganzahl bzw. Anzahl (Tages-)Umläufe des Depots d . Ferner seien x_k^d binäre Entscheidungsvariablen, die anzeigen, ob (Tages-)Umlauf k aus der Menge K^d aller zulässigen Tagesumläufe des Depots d ausgewählt ist oder nicht. Dabei ist jedem Tagesumlauf $k \in K^d$ ein Kostenwert bzw. eine Ähnlichkeitsbewertung c_k^d zugeordnet. Außerdem sei mit $K^d(u)$ die Menge aller Tagesumläufe bezeichnet, die Umlaufblock $u \in U^d$ enthalten.

Die mathematische Formulierung für das als *Set-Partitioning-Problem formulierte Tagesumlaufbildungsproblem* basierend auf Umlaufblöcken (engl. *vehicle duty construction set partitioning problem, VDC-SPP*) je Depot-Fahrzeugtyp-kombination $d \in \mathcal{D}$ ist dann wie folgt:

$$\sum_{k \in K^d} x_k^d c_k^d \rightarrow \max \quad (10.20)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K^d(u)} x_k^d = 1 \quad \forall u \in U^d \quad (10.21)$$

$$\sum_{k \in K^d} x_k^d \leq L_{\max}^d \quad (10.22)$$

$$x_k^d \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K^d \quad (10.23)$$

Zielfunktion (10.20) maximiert die Ähnlichkeitsbewertung der ausgewählten Tagesumläufe (oder minimiert eine genutzte Unähnlichkeitsbewertung). Dabei stellt Abdeckungsbedingung (10.21) sicher, dass jeder gegebenen Umlaufblock genau einmal in den ausgewählten Tagesumläufen enthalten ist, während Restriktion (10.22) dafür sorgt, dass die maximal erlaubte Anzahl an Tagesumläufen für das jeweilige Depot nicht überschritten wird.

Umläufe nicht enumerierbar

Sind alle Tagesumläufe nicht ohne Weiteres enumerierbar und soll die Ähnlichkeit als Distanz zum Referenzplan bewertet werden, können die Block-Kombinationen durch Lösen eines Netzwerkflussproblems auf Basis der Tagesumlaufgenerierungsnetzwerke bestimmt werden. Dazu werden die r -regelmäßigen Servicefahrten betrachtet, die von den als Knoten repräsentierten Umlaufblöcken bedient werden.

Auf jede Verbindungskante zwischen zwei Umlaufblöcken wird dann der Distanzwert gelegt, der sich aus einem Vergleich der letzten r -regelmäßigen Fahrt vor Einrücken des ersten Umlaufblockes und der ersten r -regelmäßigen Fahrt nach Ausrücken des nachfolgenden Umlaufblockes mit der entsprechenden Verbindung im Referenzplan ergibt. Der Distanzwert ist also 0 falls diese Verbindung zwischen r -regelmäßigen Fahrten auch im Referenzplan existiert und 1 falls nicht.³

Die maximal erlaubte Anzahl L_{\max} an (Tages-)Block-kombinationen / (Tages-)Umläufen wird über als maximale Flusskapazität auf einer Zirkulationsflusskante

³ Die Ähnlichkeit der r -regelmäßigen Fahrten der Umlaufblöcke zwischen Aus- und Einrücken wurde bereits beim Bilden der Blöcke berücksichtigt und wird durch die Zusammensetzung der Blöcke auch nicht wieder verändert.

zwischen Senk- und Quellknoten abgebildet. Aus der Flusslösung lassen sich dann die zum Referenzplan ähnlichen (Tages-)Umläufe identifizieren.

Mathematisch ist das entsprechende Modell dann wie folgt definiert. Zu jedem Depot $d \in \mathcal{D}$ sei $G_L^d = (N_L^d, A_L^d)$ das Tagesumlaufgenerierungsnetzwerk, das wie oben beschrieben aufgebaut ist. Mit jeder Kante $y_{ij}^d \in A_L^d$ sei ein Distanzwert a_{ij}^d assoziiert, der zwischen den Knoten i und j mit $i, j \in \check{N}_L^d$ wie oben beschrieben gesetzt ist und für alle anderen Kanten 0 beträgt. Dabei bezeichne $\check{N}_L^d \subset N_L^d$ die Menge aller Knoten, die Umlaufblöcke repräsentieren, \check{N}_L^d beschreibt also alle Knoten außer Quell- und Senkeknoten. Die maximale Flusskapazität u_{ij}^d auf den Kanten beträgt L_{\max}^d für die Zirkulationsflusskante zwischen Senke- und Quellknoten und 1 für alle anderen Kanten.

Das als *Netzwerkflussproblem formulierte Tagesumlaufbildungsproblem* basierend auf Umlaufblöcken (engl. *vehicle duty construction network flow problem, VDC-NWFP*) kann dann für Depot $d \in \mathcal{D}$ wie folgt zusammengefasst werden:

$$\sum_{(i,j) \in A_L^d} y_{ij}^d a_{ij}^d \rightarrow \min \quad (10.24)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\{j:(i,j) \in A_L^d\}} y_{ij}^d = 1 \quad \forall i \in \check{N}_L^d \quad (10.25)$$

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A_L^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A_L^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall i \in N_L^d \quad (10.26)$$

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall (i,j) \in A_L^d \quad (10.27)$$

Zielfunktion (10.24) minimiert die Kosten/Distanz auf den (Verbindungs-)Kanten der Flusslösung während durch Bedarfsbedingungen (10.25) garantiert ist, dass jeder Umlaufknoten genau einmal durch die Flusslösung besucht ist. Flusserhaltungsbedingungen (10.26) und Flusskapazitätsbedingungen (10.27) stellen einen gültigen Fluss sicher.

Soll eine andere Bewertung wie z.B. die Wiederholbarkeit von Tagesumläufen als Bewertungsmaßstab genutzt werden, können (ähnliche) Tagesumläufe statt über das Lösen eines Netzwerkflussproblems über einen Column Generation-Ansatz bestimmt werden: Im (beschränkten) Master-Problem zu Modell (10.20)-(10.23) sollen die Block-Kombinationen mit dem besten Ähnlichkeitswert ausgewählt werden, unter Beachtung, dass jeder Umlaufblock genau einmal enthalten ist und eine maximale Anzahl ausgewählter Block-Kombinationen eingehalten wird. Die Pricing-Probleme sind dann auf den Tagesumlaufgenerierungsnetzwerken formuliert und bestehen darin, die Pfade/Tagesumläufe zu finden, die den aktuellen Zielfunktionswert verbessern

können. Im Gegensatz zu (Tages-)Umlaufgenerierungsnetzwerken auf Basis von Fahrten sind die Pfade hier deutlich kürzer, sodass die Konvergenz des Verfahrens nicht durch überlange Pfade verschlechtert wird: In der Regel besteht ein Tagesumlauf aus ca. zwei bis fünf Umlaufböcken, während im gesamten Tagesumlauf ca. 15 bis 20 Servicefahrten bedient werden.

Für das Verfahren notwendige initiale Umläufe werden bestimmt, indem die zeitlich sortierten Umlaufblöcke nacheinander auf L_{\max}^d mögliche Tagesumläufe verteilt werden, beginnend mit dem frühest startenden Umlaufblock von kürzester Dauer. Dabei wird ein Umlaufblock dem Tagesumlauf hinzugefügt, dessen zuletzt hinzugefügter Umlaufblock kompatibel mit dem hinzuzufügenden ist und bei welchem die Zeit zwischen letzten Einrücken und neuem Ausrücken minimiert wird. Ganzzahlige Lösungen werden über ein Branch-and-Bound-Verfahren mit der Menge der im Master-Problem enthaltenen Tagesumläufe bestimmt.

10.5.2 Tagesübergreifendes Vorgehen

Beim *tagesübergreifenden Vorgehen* werden zunächst aus den Tagesumlaufgenerierungsnetzwerken aller betrachteten Tage r -regelmäßige (Fahrten-)Muster gebildet. Das weitere Vorgehen hängt davon ab, ob sich die Tagesumläufe enumerieren lassen oder nicht.

Umläufe enumerierbar

Sind die Tagesumläufe bzw. Block-Kombinationen aller Netzwerke (in kurzer Zeit und bei ausreichendem Speicher) enumerierbar (und ein damit entstehendes Modell in kurzer Zeit von einem MIP-Solver lösbar), wird zusammen mit den Mustern ein tagesübergreifendes Modell im Sinne von Modell S-RSP-IT-RP (siehe Formulierung (9.17)-(9.22)) aufgestellt und mit einem MIP-Solver gelöst: Ziel ist eine Maximierung der Belohnung für verwendete Fahrtenmuster in den Umlaufplänen unterschiedlicher Tage, wobei jeder gegebener Umlaufblock in genau einer ausgewählten Block-Kombination enthalten sein muss. Im Vergleich zur Grundversion formuliert in Modell (9.17)-(9.22) ändert sich für ein Depot $d \in \mathcal{D}$ lediglich die Abdeckungsbedingung (9.18). Für die Umlaufblöcke $U^{l,d}$ des Tages $l \in \mathcal{L}$ an Depot d und Tagesumläufe $K^{l,d}$ muss dann gelten:

$$\sum_{k \in K^{l,d}(u)} x_k^{l,d} = 1 \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall u \in U^{l,d} \quad (10.28)$$

Außerdem wird eine Restriktion ergänzt, die garantiert, dass die maximale Anzahl $L_{\max}^{l,d}$ möglicher Block-Kombinationen pro Tag l und Depot d nicht überschritten werden darf:

$$\sum_{k \in K^{l,d}} x_k^d \leq L_{\max}^{l,d} \quad (10.29)$$

Umläufe nicht enumerierbar

Sind die Tagesumläufe nicht enumerierbar, wird das Block-Kombinationsproblem mit einem Column Generation Ansatz gelöst. Das Master-Problem entspricht dann einer (LP oder Lagrange-)relaxierten Formulierung des oben aufgestellten Modells. Die Pricing-Probleme sind wie bei der tageweisen Vorgehensweise beschrieben auf Tagesumlaufgenerierungsnetzwerken formuliert mit dem Ziel, die Pfade/Tagesumläufe zu finden, die den aktuellen Zielfunktionswert verbessern können.

Numerische Ergebnisse zu den unterschiedlichen Vorgehensweisen und die dabei erreichte Ergebnisqualität bzw. die Ähnlichkeit der erstellten Umläufe und Dienste werden in Abschnitt 10.7 beschrieben.

Hinter dem Bilden ähnlicher Tagesumläufe steht allgemein die Idee, dass in einer sequenziellen Planung durch ähnlichere Umläufe auch ähnlichere Dienste erstellt werden können. Allerdings kann ein anderes Vorgehen ebenfalls sinnvoll sein. Statt Umlaufblöcke zu (ähnlichen) Tagesumläufen zusammenzufügen, können die Tagesumläufe abhängig von den gebildeten Diensten erstellt werden. So können z.B. weitere Qualitätsmerkmale beim Bilden von Ressourceneinsatzplänen berücksichtigt werden, wie z.B. störungstolerantere Pläne mit weniger Fahrzeug- oder Linienwechseln (vgl. [Amberg, 2014]). Für das Vorgehen beim Erstellen ähnlicher Umläufe basierend auf ähnlichen Diensten sei auf die kommenden Ausführungen in Abschnitt 11.5 verwiesen.

10.6 Bilden von ähnlichen Diensten basierend auf (ähnlichen) Umläufen

In den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurde erläutert, wie für eine sequenzielle Umlauf- und Dienstbildung mit Ähnlichkeitszielen bei mehreren Tagen möglichst ähnliche Umläufe erstellt werden können, um darauf aufbauend im nächsten Schritt möglichst ähnliche Dienste bilden zu können. Dabei können zum einen aus der Menge der kostenoptimalen Umlaufpläne diejenigen ausgewählt werden, die möglichst ähn-

lich zueinander sind. Zum anderen können durch Zulassen von Mehrkosten verglichen mit den kostenoptimalen Umlaufplänen ähnlichere Umlaufpläne generiert werden.

In diesem Abschnitt soll vorgestellt werden, wie basierend auf den (ähnlichen) Umläufen mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Ähnlichkeitskonzepte ähnliche Dienste erstellt werden – soweit es die vorgegebenen Umläufe zulassen (vgl. Vorgehen C im Lösungsschema zum VSP-CSP-IT in Abbildung 10.1). In Abschnitt 10.6.1 wird die Umsetzung einer Ähnlichkeitsberücksichtigung bei der Dienstbildung für mehrere Tage mit Hilfe eines Referenzplans beschrieben. Abschnitt 10.6.2 stellt die Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen bei der Dienstbildung mit regelmäßigen Mustern vor.

Auf Basis der gegebenen (ähnlichen) Umläufe können natürlich auch Dienste ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitskriterien gebildet werden. Da die Flexibilität bei der sequenziellen Dienstbildung eingeschränkt ist, stellt sich die Frage, in welchem Maße eine ähnliche Umlaufplanung ausreicht, um ähnliche Dienste bilden zu können. Es liegt die Vermutung nahe, dass ähnlichere Dienste erstellt werden können, wenn auch bei der Dienstbildung Ähnlichkeitskriterien berücksichtigt werden und nicht nur bei der Umlaufplanung. Ergebnisse zur Dienstplanung auf (ähnlichen) Umläufen mit und ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung bei der Dienstbildung werden daher in Abschnitt 10.7 miteinander bezüglich der erreichten Ähnlichkeit miteinander verglichen.

10.6.1 Sequenzielle Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS

Grundlegende Modellierung und Lösungsverfahren für eine Ressourceneinsatzplanung über mehrere Tage mit Ähnlichkeitsberücksichtigung durch einen Referenzplan wurden in Abschnitt 9.2 erläutert. Zur beschriebenen grundlegenden Vorgehensweise sind für eine Dienstbildung mit Ähnlichkeitszielen im Rahmen einer sequentiellen Umlauf- und Dienstplanung keine wesentlichen Ergänzungen notwendig.

Die Dienstplanungsprobleme können wie in Abschnitt 9.2.2 beschrieben als allgemeines Set-Partitioning-Problem mit elastischer Kostenrestriktion modelliert werden. Minimiert wird die Distanz zum gegebenen Referenzplan. Dabei enthält Modell (9.5)-(9.9) dann (Fahrer-)Dienste als mögliche Ressourceneinsätze K und wird daher abgekürzt als CSP-IT-RS. Gelöst wird das Modell mit dem in Abschnitt 9.2.3 vorgestellten Column Generation-Ansatz.

10.6.2 Sequenzielle Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP

Modellierung und Lösungsverfahren für eine Ressourceneinsatzplanung über mehrere Tage mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten durch regelmäßige Muster wur-

de in Abschnitt 9.3 ausführlich als ein Basis-Konzept zur Ähnlichkeitsberücksichtigung vorgestellt. Für eine Dienstbildung im Rahmen einer sequenziellen Umlauf- und Dienstplanung müssen dazu keine wesentlichen Änderungen in der beschriebenen Basis-Modellierung bzw. im beschriebenen Basis-Lösungsverfahren vorgenommen werden.

Die Dienstplanungsprobleme verschiedener Tage sind wie in Abschnitt 9.3.2 vorgestellt als allgemeine Set-Partitioning-Probleme formuliert, die über gemeinsam genutzte (Aufgaben-)Muster miteinander gekoppelt sind. Minimiert werden die notwendigen Kosten, wobei der Bonus für gemeinsam genutzte Muster in den Ressourceneinsätzen maximiert wird. (Fahrer-)Dienste bilden dabei mögliche Ressourceneinsätze K^l eines Tages $l \in \mathcal{L}$ in Modell (9.17)-(9.22), sodass es abgekürzt mit S-CSP-IT-RP beschrieben ist. Mögliche regelmäßige (Aufgaben-)Muster \mathcal{P} können aus den vorgegebenen Umlaufplänen enumeriert werden. Das Modell wird mit den in Abschnitt 9.3.3 vorgestellten Column Generation-Ansatz und Fixierungsstrategien gelöst.

10.7 Analyse numerischer Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Experimente diskutiert werden, die zu den in diesem Kapitel vorgeschlagenen Modellen und Lösungsverfahren für sequenzielle Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen durchgeführt wurden. Grundlage für die durchgeführten Tests sind folgende Fragestellungen:

1. Wie groß ist der Spielraum, den eine sequenzielle Planung für eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten bietet?
2. Wie entscheidend ist die Ähnlichkeit der Umlaufpläne für die Ähnlichkeit in der Dienstplanung?
3. Sind ähnliche Pläne sequenziell besser tageweise oder tagesübergreifend bestimmbar?

Zur Beantwortung der Fragen werden die Tests in zwei Experimentgruppen aufgeteilt: Zunächst wird die Erstellung ähnlicher Umlaufpläne untersucht, die sich aus einer Dekomposition eines kostenoptimalen Lösungsflusses ergeben, sowie die Erstellung ähnlicher Umlaufpläne bei erlaubten Mehrkosten (vgl. Vorgehen A und B in Abbildung 10.1). Im Anschluss daran wird die Bestimmung ähnlicher Dienstpläne (vgl. Vorgehen C) und der Einfluss unterschiedlich ähnlicher Umlaufpläne auf die Ähnlichkeit in der Dienstplanung untersucht. Testumgebung ist die in Abschnitt 9.2.4 beschriebene.

Experimente I: Effekte bei Variation in der Umlaufplanung

Tabelle 10.1 gibt eine Übersicht über die Experimente zur Erstellung ähnlicher Umlaufpläne. Verglichen werden unterschiedliche Ansätze (*approach*) und die benötigte Rechenzeit (*runtime*), die Kosten in Prozent bezogen auf die kostenoptimale Lösung (*costs*), sowie die entsprechenden Ähnlichkeitbewertungen der durchschnittlichen Wiederholrate (*rate*), des Anteils identisch bedienter Fahrten (*ratio*) und der Distanz zwischen den Plänen (*dist*). Bewertet wird die Ähnlichkeit anhand von Umlaufblöcken.

Dabei werden Umläufe untersucht, die ermittelt wurden mit einer kostenoptimalen Planung ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeit (*Kosten*), mit der Regular-First-Irregular-Second-Heuristik (*Reg-Irr*), der All-First-Irregular-Second-Heuristik (*All-Irr*), der All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik (*FOpt-Irr*), mit Nutzung eines Referenzplans (*Ref*) und bei Nutzung einer tagesübergreifenden Planung mit Boni für Aufgabenmuster (*Bonus*) berechnet wurden. Lösungen, die auf Basis kostenoptimaler Flusslösungen aus den Umlaufplanungsnetzwerken bestimmt wurden, sind mit „*opt*“ gekennzeichnet, Lösungen, bei welchen Mehrkosten erlaubt sind, mit „+“.

Für die Berechnungen mit Hilfe eines Referenzplans ist weiterhin angegeben, welche Art Referenzplan ausgewählt wurde (ein Referenzplan basierend auf einem Wochentag oder für eine *r*-regelmäßige Fahrtenmenge). Zur Veranschaulichung der Effekte sind die Referenzpläne ausgewählt, die zuvor als gut geeignet für eine ähnliche Planerstellung identifiziert wurden (vgl. Abschnitt 9.2.4). Werden bei der Berechnung mit einem Referenzplan Mehrkosten erlaubt, geschieht dies im Rahmen von bis zu 101% zur kostenoptimalen Lösung. Bei einer Berechnung mit Bonuswerten und erlaubten Mehrkosten sind die Boni von 100 bis 500 gewichtet. So können Lösungen ermittelt werden, die knapp über 100% der optimalen Kosten liegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgeschlagenen Lösungsansätze mit Ähnlichkeitsberücksichtigung geeignet sind, kosteneffiziente und ähnliche Pläne zu bestimmen. Gegenüber einer traditionellen kostenoptimalen Umlaufplanung ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen können Lösungen mit deutlich ähnlicheren Umlaufblöcken ermittelt werden – bei Beibehaltung der Kostenoptimalität. Beispielsweise kann die durchschnittliche Wiederholrate in Testset B um ca. 30% gesteigert werden, der Anteil identisch bedienter Fahrten um ca. 12% und die Distanz in den Fahrtensequenzen kann um ca. 70% verringert werden.

Werden Mehrkosten erlaubt, lässt sich die Ähnlichkeit noch ein wenig verbessern. So können z.B. für Testset D bei Erhöhung der Kosten um ca. 0,3% Umlaufblöcke bestimmt werden, deren Ähnlichkeitsbewertungen leicht erhöht werden.

Mit den heuristischen Ansätzen zur Bestimmung ähnlicher Pläne lassen sich ebenfalls ähnlichere Pläne bestimmen. Generell sind dafür mehr Kosten notwendig als bei

approach		runtime	costs	rate ($\Delta\%$)	ratio ($\Delta\%$)	dist ($\Delta\%$)
<i>Testset A</i>						
Kosten	(opt)	00:00:02	100,0	2,00 (+ 0,0)	64,3 (+ 0,0)	34,9 (- 0,0)
Reg-Irr	(+)	00:00:02	105,4	2,36 (+18,0)	68,8 (+ 7,0)	0,0 (-100,0)
All-Irr	(+)	00:00:08	100,7	2,70 (+35,0)	77,9 (+21,2)	11,4 (-67,3)
All-FOpt	(+)	00:00:05	100,4	2,43 (+21,5)	71,3 (+10,9)	10,2 (-70,8)
Ref Di	(opt)	00:00:03	100,0	2,42 (+21,0)	72,3 (+12,4)	9,7 (-72,2)
Ref 3	(opt)	00:00:03	100,0	2,39 (+19,5)	71,9 (+11,8)	9,9 (-71,6)
Bonus	(opt)	00:00:04	100,0	2,10 (+ 5,0)	64,8 (+ 0,8)	9,3 (-73,4)
Ref Di	(+)	00:00:23	100,4	2,42 (+21,0)	72,5 (+12,8)	9,6 (-72,5)
Ref 3	(+)	00:00:19	100,3	2,39 (+19,5)	72,1 (+12,1)	9,7 (-72,2)
Bonus	(+)	00:00:24	100,5	2,21 (+10,5)	69,4 (+ 7,9)	9,1 (-73,9)
<i>Testset B</i>						
Kosten	(opt)	00:00:02	100,0	2,30 (+ 0,0)	74,3 (+ 0,0)	80,0 (- 0,0)
Reg-Irr	(+)	00:00:03	106,0	2,95 (+28,3)	81,9 (+10,2)	0,0 (-100,0)
All-Irr	(+)	00:00:05	100,8	2,60 (+13,0)	74,9 (+ 0,8)	29,1 (-63,6)
All-FOpt	(+)	00:00:05	100,1	2,52 (+ 9,6)	66,1 (- 11,0)	27,3 (-65,9)
Ref Mo	(opt)	00:00:03	100,0	2,96 (+28,7)	83,3 (+12,1)	23,8 (-70,3)
Ref 3	(opt)	00:00:02	100,0	2,95 (+28,3)	83,0 (+11,7)	23,8 (-70,3)
Bonus	(opt)	00:00:12	100,0	2,98 (+29,6)	83,5 (+12,4)	23,7 (-70,4)
Ref Mo	(+)	00:00:08	100,7	2,96 (+28,7)	83,5 (+12,4)	23,8 (-70,3)
Ref 3	(+)	00:00:10	100,4	2,95 (+28,3)	83,2 (+12,0)	23,5 (-70,6)
Bonus	(+)	00:00:17	100,4	2,99 (+30,0)	84,0 (+13,1)	23,3 (-70,9)
<i>Testset C</i>						
Kosten	(opt)	00:00:04	100,0	1,58 (+ 0,0)	51,8 (+ 0,0)	95,6 (- 0,0)
Reg-Irr	(+)	00:00:03	104,6	3,03 (+108,9)	82,0 (+58,3)	0,0 (-100,0)
All-Irr	(+)	00:00:03	103,9	2,41 (+52,5)	79,3 (+53,1)	33,7 (-64,7)
All-FOpt	(+)	00:00:03	102,1	2,38 (+50,6)	78,0 (+50,6)	32,4 (-66,1)
Ref Mi	(opt)	00:00:04	100,0	2,26 (+43,0)	70,4 (+35,9)	31,1 (-67,5)
Ref 2	(opt)	00:00:03	100,0	2,29 (+44,9)	71,0 (+37,1)	28,1 (-70,6)
Bonus	(opt)	00:00:47	100,0	2,17 (+37,3)	68,6 (+32,4)	35,5 (-62,9)
Ref Mi	(+)	00:00:09	100,6	2,28 (+44,3)	73,4 (+41,7)	29,3 (-69,4)
Ref 2	(+)	00:00:11	100,5	2,29 (+44,9)	71,7 (+38,4)	28,1 (-70,6)
Bonus	(+)	00:00:28	100,5	2,17 (+37,3)	68,8 (+32,8)	35,3 (-63,1)
<i>Testset D</i>						
Kosten	(opt)	00:00:08	100,0	1,36 (+ 0,0)	40,5 (+ 0,0)	207,8 (- 0,0)
Reg-Irr	(+)	00:00:05	112,0	2,88 (+111,8)	79,8 (+97,0)	0,0 (-100,0)
All-Irr	(+)	00:00:08	108,3	2,31 (+69,9)	66,9 (+65,2)	26,1 (-87,4)
All-FOpt	(+)	00:00:08	103,6	2,20 (+61,8)	63,4 (+56,5)	24,8 (-88,1)
Ref Di	(opt)	00:00:23	100,0	2,34 (+72,1)	68,1 (+68,1)	15,2 (-92,7)
Ref 5	(opt)	00:00:28	100,0	2,40 (+76,5)	69,9 (+72,6)	8,4 (-96,0)
Bonus	(opt)	00:00:56	100,0	2,12 (+55,9)	61,2 (+51,1)	24,6 (-88,2)
Ref Di	(+)	00:00:12	100,4	2,34 (+72,1)	68,4 (+68,9)	15,3 (-92,6)
Ref 5	(+)	00:00:25	100,3	2,41 (+77,2)	70,1 (+73,1)	8,3 (-96,0)
Bonus	(+)	00:00:40	100,5	2,13 (+56,6)	61,6 (+52,1)	24,1 (-88,4)

Tabelle 10.1: Laufzeit, Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen zur Umlaufplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten

einer tageweisen Planung mit Referenzplan oder einer tagesübergreifenden Planung mit Mustern. In einigen Fällen verhindert die heuristische Vorgehensweise sogar ein besseres Ergebnis (Testset A und B): Die durchschnittliche Wiederholrate und der Anteil identisch bedienter Fahrten in den Umlaufblöcken ist dort etwas geringer als mit den Referenzplan- bzw. Muster-basierten Lösungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die bei der Heuristik verwendete Aufteilung der Fahrtenmenge Möglichkeiten für eine noch ähnlichere Planung einschränkt.

Die Zeiten zur Berechnung ähnlicher Lösungen sind insgesamt höher als ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitskriterien. Durch den höheren Aufwand lassen sich allerdings auch wesentlich ähnlichere Umlaufpläne realisieren.

Experimente II: Effekte bei Variation in der Dienstplanung

Abbildung 10.7 veranschaulicht die Effekte bei Nutzung unterschiedlicher Lösungsansätze zur sequenziellen Dienstplanung ohne bzw. mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten, sowie bei Verwendung unterschiedlich ähnlich ausgeprägter Umlaufpläne als Ausgangspunkt für die Dienstplanung. Da die Effekte auf allen betrachteten Instanzensets identisch sind, werden diese exemplarisch an einem Testset dargestellt (Testset B). Es gelten die gleichen Bezeichnungen wie in den vorherigen Experimenten zur Variation in der Umlaufplanung. Ausgangspunkt für die Dienstplanung bildet einmal ein kostenoptimaler Umlaufplan, der ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung erstellt wurde (*Kosten (opt)*), und ein kostenoptimaler Umlaufplan, der mit Hilfe eines Referenzplans erzeugt wurde (*Ref Mo (opt)*).

Bei Nutzung eines Referenzplans wird ein Kostenrahmen im Bereich von 100% bis 120% der Kosten einer kosteneffizienten Lösung vorgegeben. Werden Muster mit Bonuswerten genutzt, werden diese in sechs Stufen unterschiedlich gewichtet (von 1 bis 100.000).

Tabelle 10.2 fasst die benötigten Rechenzeiten vom Einlesen der Daten bis zur Ausgabe der Pläne zusammen. Für die kosteneffiziente Planung sowie die tageweise Berechnung ähnlicher Pläne mit Referenzplan und die tagesübergreifende Planung mit Mustern sind jeweils die durchschnittlichen Werte über alle Tests mit diesem Lösungsansatz angegeben. Da das Lösungsverfahren bei Nutzung eines Referenzplans jeweils mit den kosteneffizienten Lösungen initialisiert wird (vgl. Abschnitt 9.2.3), erhöht sich die Laufzeit dafür um die Zeit, die zur Bestimmung einer kosteneffizienten Lösung notwendig ist.

Aus den Ergebnissen werden zwei wesentliche Effekte deutlich: Zum einen, dass bei einer tageweisen Planung mit Referenzplan die Ähnlichkeit gegenüber einer kosteneffizienten Dienstplanung ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen kaum verbes-

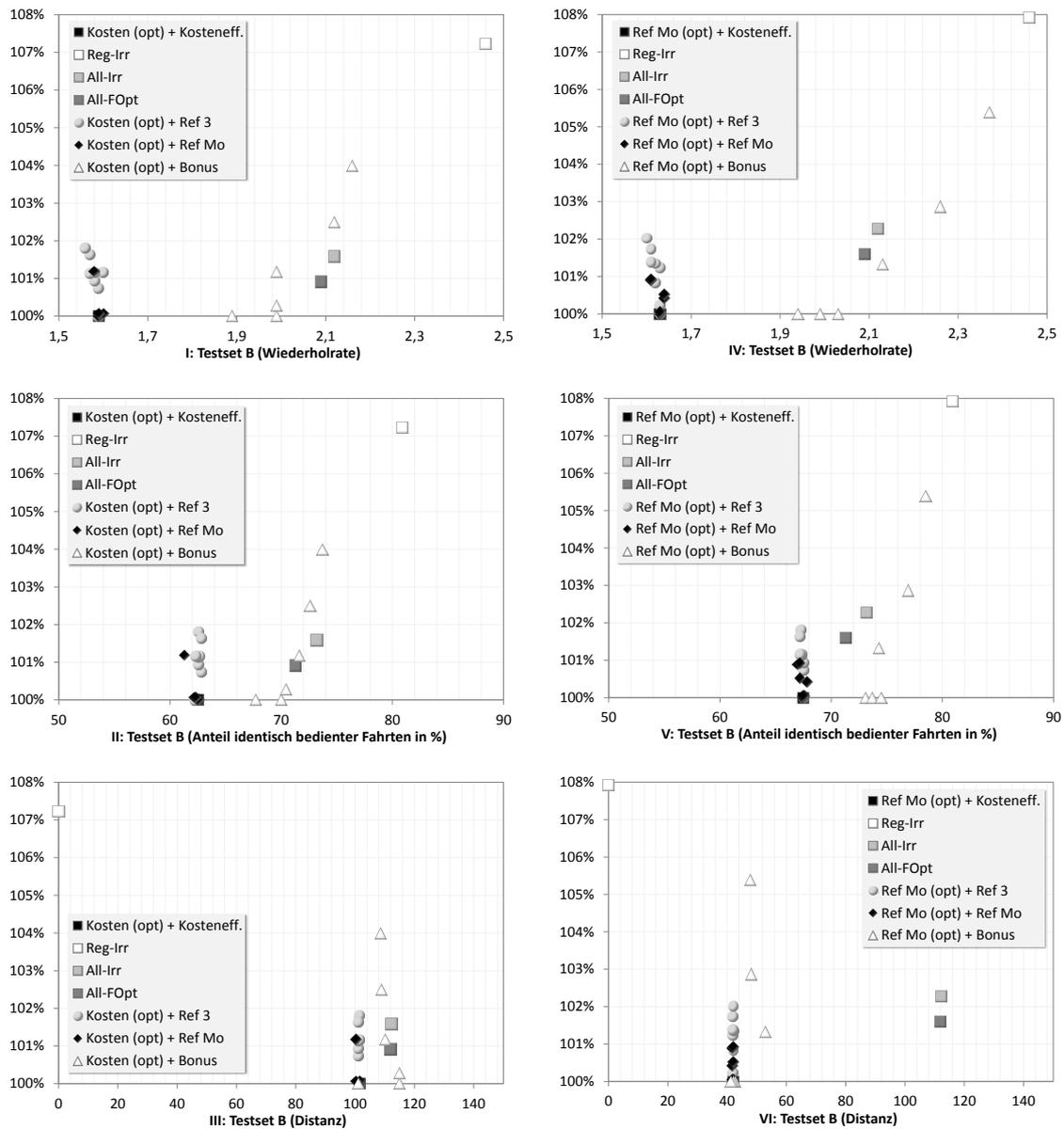


Abbildung 10.7: Gegenüberstellung von Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen bei rein kosteneffizienten Umlaufplänen als Ausgangspunkt für die Dienstplanung (Bilder I-III) sowie bei ähnlichen Umlaufplänen (Bilder IV-VI)

øKosteneff.	Reg-Irr	All-Irr	All-FOpt	øRef	øBonus
00:01:41	00:00:38	00:01:31	00:01:24	00:01:44	00:04:09

Tabelle 10.2: Laufzeiten in hh:mm:ss bei einer sequenziellen Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen

sert werden kann. Dies gilt sowohl für die Planung basierend auf rein kostenoptimal erstellten Umlaufplänen (siehe „Kosten (opt)“), als auch für eine Dienstplanung basierend auf kostenoptimal und ähnlich erstellten Umläufen (siehe „Ref Mo (opt)“). Zum anderen wird ersichtlich, dass sich basierend auf ähnlicheren (kostenoptimalen) Umlaufplänen auch deutlich ähnlichere Dienstpläne bestimmen lassen. Die Gegenüberstellung der Bilder I bis III und IV bis VI zeigt, dass die so ermittelten Dienstpläne unabhängig vom Lösungsansatz ähnlicher sind, als die zu rein kostenoptimal berechneten Umläufen bestimmten Pläne.

Dabei führt eine Änderung in den Strukturen der Umlaufpläne auch zu veränderten Kosten in der Dienstplanung – in diesem Fall zu einer Reduktion der Kosten. In Abbildung 10.7 ist dies daran zu erkennen, dass die Kosten der Heuristiken in den Bildern IV bis VI prozentual höher gegenüber den kosteneffizientesten Plänen bewertet sind als in den Bildern I bis III.

Zur Berechnung ähnlicher Lösungen wird insgesamt mehr Rechenzeit benötigt als ohne Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen. Insbesondere bei der tagesübergreifenden Planung mit Mustern lassen sich mit dem höheren Aufwand aber auch ähnlichere Dienstpläne bestimmen.

Zusammenfassung der Untersuchungen

Mit Hilfe der Ergebnisse lassen sich die zu Beginn dieses Abschnitts formulierten Fragestellungen zusammenfassend wie folgt beantworten:

Spielraum für eine sequenzielle Umlauf- und Dienstplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten bietet vor allem die Umlaufplanung. Mit den vorgeschlagenen Ansätzen für eine Dekomposition des Lösungsflusses in den Umlaufplanungsnetzwerken lassen sich ohne zusätzliche Kosten kostenoptimale und sehr ähnliche Umlaufpläne bestimmen. Mit Steigerung der Kosten lässt sich die Ähnlichkeit in den Umlaufplänen noch etwas verbessern.

Die ermittelten Umlaufpläne beeinflussen dabei stark die Ähnlichkeit der Dienstpläne. Unabhängig vom gewählten Lösungsansatz ermöglichen ähnlichere Umlaufpläne auch die Erstellung ähnlicherer Dienstpläne.

Dabei können die besseren ähnlichen Pläne mit einer tagesübergreifenden Planung durch ähnliche Muster erreicht werden. Im Gegensatz zur Planung mit Hilfe eines Referenzplans wird die Flexibilität bei der Suche nach ähnlichen Diensten nicht durch einen vorgegebenen Referenzplan eingeschränkt.

Kapitel 11

Teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Konzepte zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen aus Kapitel 9 für eine teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanung untersucht. Im Vergleich zur in Kapitel 10 diskutierten sequenziellen Planung bietet eine teilintegrierte Planung höhere Freiheitsgrade beim Erstellen der Dienste. Daher können auch mehr Freiheitsgrade genutzt werden, um ähnlichere Dienste zu bilden.

Eine Problemdefinition zur teilintegrierten Planung mit Ähnlichkeitszielen wird in Abschnitt 11.1 vorgestellt. Das zum Lösen des Problems genutzte Schema wird in Abschnitt 11.2 beschrieben und in den Abschnitten 11.3 bis 11.5 mit Fokus auf die unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten erläutert. Abschnitt 11.6 enthält numerische Ergebnisse zu den unterschiedlichen Arten der teilintegrierten Lösungsansätze und eine erste Bewertung dieser.

11.1 Problemdefinition – PVCSP-IT

Teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme sollen hier als Planungsprobleme im Sinne von [Gintner et al., 2006] aufgefasst werden: Dienstpläne werden zu Bündeln von Umlaufplänen mit dem gleichen Kostenwert ermittelt statt zu einem einzigen (optimalen) Umlaufplan wie in der sequenziellen Planung. Mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen kann das *teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten und Aufgaben von verschiedenen Fahrplänen* (engl. *partial integrated vehicle and crew scheduling problem with irregular trips and tasks from various timetables, PVCSP-IT*) dann wie folgt in drei Schritten definiert werden:

Im ersten Schritt ist für eine *Menge von Fahrplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge von Servicefahrten, Leerfahrtmöglichkeiten zwischen Haltestellen, und Depots mit zugeordneten Fahrzeugtypen, eine *Menge an Bündeln von Umlaufplänen* zu finden, die zulässig und kostenminimal sind, und *zueinander ähnliche Dienstpläne* ermöglichen.

Im zweiten Schritt ist für eine *Menge an Bündeln von Umlaufplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge zu leistender Aufgaben, Ablösepunkten und Transfermöglichkeiten zwischen Haltestellen, eine *Menge von Dienstplänen* zu finden, die zulässig, kostenminimal und möglichst ähnlich zueinander sind.

Im dritten Schritt sind für eine *Menge von ähnlichen Dienstplänen* die *Umlaufpläne* aus dem Bündel der Mengen von Umlaufplänen zu bestimmen, die zu diesen Dienstplänen kompatibel sind.

11.2 Lösungsschema für PVCSP-IT

Lösungsmöglichkeiten zu den oben definierten teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen fasst Abbildung 11.1 zusammen. Wie schon beim in Abbildung 10.1 veranschaulichtem Lösungsschema zu sequenziellen Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen (vgl. Abschnitt 10.2) können auch im teilintegrierten Fall Ähnlichkeitsziele sowohl beim Lösen von Umlaufplanungsproblemen, als auch beim Lösen der Dienstplanungsprobleme einbezogen werden. Dabei besteht der wesentliche Unterschied darin, dass nicht ein einzelner Umlaufplan den Input für das jeweilige Dienstplanungsproblem eines Tages bildet, sondern ein Bündel an Umlaufplänen (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Zu den Fahrplänen mehrerer Tage werden wie im sequenziellen Fall Umlaufplanungsprobleme (engl. *vehicle scheduling problems*, *VSPs*) als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Probleme basierend auf Time-Space-Netzwerkmodellen formuliert (vgl. Abschnitte 6.1.1 und 6.2.1). Die Flussprobleme können kostenoptimal mit einem LP/MIP-Solver gelöst werden. Dabei repräsentieren die Flusslösungen implizit ein Bündel unterschiedlicher Umlaufpläne mit gleichem Zielfunktionswert. Zu diesen Flusslösungen werden Dienstplanungsprobleme (engl. *crew scheduling problems*, *CSPs*) so als Set-Partitioning-Probleme formuliert, dass alle in den Flusslösungen der Umlaufplanungsprobleme beschriebenen Aufgaben durch die entsprechende Anzahl an Diensten abgedeckt sind.

Sowohl kostenoptimale Flusslösungen, als auch andere Flusslösungen können für eine ähnliche Planung genutzt werden (A). [Amberg, 2014] variiert in einem vergleichbaren teilintegrierten Verfahren die Flusslösung durch Nutzen von zusätzlich als SPP

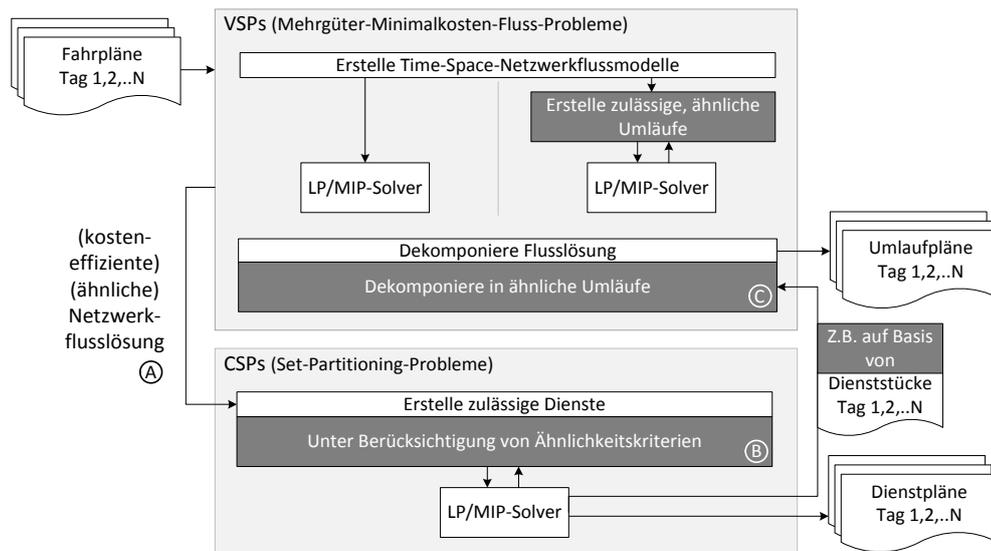


Abbildung 11.1: Teilintegrierte Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung

formulierten Umlaufplanungsproblemen so, dass die Güte der Flusslösung zwischen Kostenoptimalität und einem anderen Zielkriterium (dort: Robustheit im Sinne von möglichst geringer propagierter Verspätungen) gesteuert werden kann. Um durch eine erlaubte (leichte) Erhöhung der geplanten Kosten in der Umlaufplanung ähnlichere Flusslösungen für unterschiedliche Tage zu erhalten, besteht die Möglichkeit, die für eine sequenzielle Planung in Abschnitt 10.4 beschriebenen Methoden zu nutzen, mit denen ähnlichere Umlaufpläne mit erlaubten Mehrkosten generiert werden können. Von diesen können dann die entsprechenden Flusslösungen abgeleitet werden, um teilintegrierte Dienstplanungsprobleme zu formulieren.

Die Dienstplanungsprobleme werden mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen mit einem Column Generation-Ansatz gelöst (B). Auf Basis der ermittelten Dienstpläne können dann (ähnliche) Umläufe gebildet werden (C).

Dem Lösungsschema entsprechend sind die Inhalte der nächsten drei Abschnitte wie folgt: Abschnitt 11.3 beschreibt das Ermitteln von kosteneffizienten bzw. ähnlichen Bündeln an Umlaufplänen für die Planungsprobleme mehrerer Tage (siehe A). Abschnitt 11.4 umfasst das Erstellen von ähnlichen Diensten basierend auf den ermittelten Umlaufplanbündeln (siehe B). Abschnitt 11.5 verdeutlicht das Bilden (ähnlicher) Umlaufpläne basierend auf den erstellten (ähnlichen) Dienstplänen (siehe C).

11.3 Bilden von kosteneffizienten, ähnlichen Bündeln an Umlaufplänen

Ausgangspunkt für das teilintegrierte Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblemen eines Tages ist das Lösen von Umlaufplanungsproblemen derart, dass bei der Dienstbildung auf Bündel gleichwertiger Umlaufpläne zurückgegriffen werden kann, um so mehr Flexibilität beim Lösen des Dienstplanungsproblems zu besitzen. Bündel gleichwertiger Umlaufpläne ergeben sich direkt aus einer Modellierung der Umlaufplanungsprobleme als aggregierte Time-Space-Netzwerke nach [Kliwer et al., 2006b]. In dieser Modellierung repräsentiert eine Flusslösung des Problems ein solches Bündel an gleichwertigen (kostenoptimalen) Umlaufplänen (vgl. Abschnitt 10.3).

Um beim Lösen teilintegrierter Umlauf- und Dienstplanungsprobleme Ähnlichkeitsaspekte einzubeziehen, können die Flusslösungen zu den Planungsproblemen mehrerer Tage auf zwei Arten bestimmt werden (vgl. Vorgehen A in Abbildung 11.1): Erstens, indem die als Flussproblem modellierten Umlaufplanungsprobleme *kostenoptimal* gelöst werden. Zweitens, indem *Mehrkosten beim Lösen erlaubt* werden, wenn die Flusslösungen der unterschiedlichen Tage dadurch ähnlicher zueinander werden.

Bei der *ersten Vorgehensweise* ist zwar nicht explizit eine Ähnlichkeit der Flusslösungen unterschiedlicher Tage gefordert. Die per MIP-Solver (kostenoptimal) ermittelten Netzwerkflüsse erlauben aber generell mehr Flexibilität beim Erstellen ähnlicher Dienstpläne zu den durch die im Netzwerkfluss repräsentierten Aufgaben, als zu Aufgaben aus fest vorgegebene Umläufen wie in einer sequenziellen Planung. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 10.3 in Abschnitt 10.3 zur globalen, netzwerkübergreifenden Flussdekomposition. Die dort beschriebenen flexiblen Möglichkeiten beim Bestimmen von (ähnlichen) Umläufen aus der Flusslösung gelten ebenso beim Bilden von (ähnlichen) Diensten, Dienstteilen oder Dienststücken aus der Flusslösung.

Die *zweite Vorgehensweise* fordert explizit eine Ähnlichkeit bei der Bestimmung der Flusslösungen für die Umlaufplanungsprobleme unterschiedlicher Tage. Erreicht werden können ähnliche Flusslösungen durch eine Ergänzung der in Abschnitt 10.4 vorgestellten Methoden zur Ermittlung ähnlicher Umläufe bzw. Umlaufblöcke in einer sequenziellen Planung: Nachdem ähnliche Umlaufblöcke für unterschiedliche Tage berechnet wurden, durch Nutzen eines Referenzplans (siehe Abschnitt 10.4.1) oder mit Hilfe regelmäßiger Fahrtenmuster (siehe Abschnitt 10.4.2), können die zu den Umlaufblöcken passenden Flüsse in den Umlaufplanungsnetzwerken extrahiert werden. Die entsprechenden Flusslösungen bzw. die durch die Kanten in den Netzwerkrepräsentationen der Umlaufplanungsprobleme abgebildeten Aufgaben, die durch die Flusslösungen zur Bedienung ausgewählt sind, bilden dann den Ausgangspunkt für

eine teilintegrierte Dienstbildung mit Ähnlichkeitszielen, also den Ausgangspunkt für eine Dienstbildung zu „Bündeln an Umlaufplänen“.

11.4 Bilden von ähnlichen Diensten basierend auf (ähnlichen) Bündeln an Umlaufplänen

Zu gegebenen (ähnlichen) Bündeln an Umlaufplänen für die Planungsprobleme mehrerer Tage lassen sich mit Hilfe der in dieser Arbeit vorgestellten Ähnlichkeitskonzepte ähnliche Dienstpläne erstellen (vgl. Vorgehen B in Abbildung 11.1). Das Lösen von teilintegrierten Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitsberücksichtigung mit Hilfe eines Referenzplans wird in Abschnitt 11.4.1 vorgestellt. Eine Ähnlichkeitsberücksichtigung durch regelmäßige Aufgaben-Muster beim Lösen von teilintegrierten Dienstplanungsproblemen wird im darauf folgenden Abschnitt 11.4.2 beschrieben.

Natürlich ist es auch möglich, zu gegebenen (ähnlichen) Bündeln an Umlaufplänen, Dienstplanungsprobleme ohne Ähnlichkeitsberücksichtigung zu lösen. Mit Testen einer solchen Vorgehensweise kann die Frage beantwortet werden, ob es für das Erreichen ähnlicher Dienstpläne ausreichend ist, „traditionelle“ Dienstplanungsprobleme ohne Ähnlichkeitsaspekte zu ähnlichen Bündeln an Umlaufplänen zu lösen, oder ob bei Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen bessere Ergebnisse hinsichtlich Ähnlichkeit bei vergleichbarer Kosteneffizienz erreicht werden können. Eine Bewertung dazu findet sich analog zum entsprechenden Abschnitt in der sequenziellen Planung aus Kapitel 10 bei den numerischen Ergebnissen dieses Kapitels in Abschnitt 11.6.

11.4.1 Teilintegrierte Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS

Modellierung und Lösungsverfahren für eine ähnliche Ressourceneinsatzplanung mit Hilfe eines Referenzplans wurden in Abschnitt 9.2 vorgestellt. Für eine teilintegrierte Dienstbildung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung durch einen Referenzplan sind analog zur sequenziellen Dienstbildung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung keine Erweiterungen der Modellierung und des Lösungsverfahrens notwendig.

Als Dienstplanungsprobleme werden ebenso die in Abschnitt 9.2.2 beschriebenen allgemeinen Set-Partitioning-Probleme mit elastischer Kostenrestriktion formuliert, bei welchen die Distanz zum gegebenen Referenzplan minimiert werden soll. Gelöst werden können die Modelle mit dem in Abschnitt 9.2.3 erläuterten Column Generation-Ansatz. Im Vergleich zur sequenziellen Planung ändert sich dabei lediglich die Größe der Dienstgenerierungsnetzwerke. Die Menge an aus der Umlaufplanung vorgegebenen in der Dienstplanung zu leistenden Aufgaben ist zwar identisch. Aber im Gegen-

satz zur sequenziellen Planung stehen die Kombinationsmöglichkeiten der auf einem Fahrzeug zu leistenden Aufgaben noch nicht fest.

11.4.2 Teilintegrierte Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP

Auch bei Modellierung und Lösungsverfahren für eine teilintegrierte Dienstbildung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung durch regelmäßige Aufgaben-Muster sind keine wesentlichen Erweiterungen zur sequenziellen Dienstbildung bzw. zur entsprechenden vorgestellten Basis-Modellierung und zum Basis-Lösungsverfahren notwendig. Für Details sei auf die ausführlichen Darstellungen in Abschnitt 9.3 verwiesen.

Die Dienstplanungsprobleme können wie in Abschnitt 9.3.2 beschrieben als allgemeine Set-Partitioning-Probleme formuliert werden, deren Lösungen über gemeinsam genutzte (Aufgaben-)Muster miteinander verbunden sind. Dabei werden die zur Bedienung der Aufgaben notwendigen Kosten minimiert, während ein Bonus für in Diensten an unterschiedlichen Tagen genutzte gleiche Aufgaben-Muster maximiert wird. Mögliche r -regelmäßige Aufgaben-Muster können aus den Bündeln an Umlaufplänen, also den Flusslösungen zu den Umlaufplanungsproblemen der unterschiedlichen Tage berechnet werden. Gelöst wird das Modell mit dem in Abschnitt 9.3.3 beschriebenen Column Generation-Ansatz samt Fixierungsstrategien.

11.5 Bilden von (ähnlichen) Umläufen basierend auf ähnlichen Diensten

Im Zuge des Lösungsschemas für teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen erfolgt die Dienstbildung für eine Menge von Bündeln an Umlaufplänen bzw. einer Menge an Flusslösungen (vgl. Abschnitte 11.2 und 11.4). Nach erfolgreicher Bestimmung der (ähnlichen) Dienste müssen aus diesen Bündeln die Umlaufpläne ermittelt werden, die zu den gebildeten Diensten kompatibel sind. Ausgehend von den Diensten, sind also (ähnliche) Umläufe zu bestimmen (vgl. Vorgehen C in Abbildung 11.1).

[Amberg, 2014] nutzt ein vergleichbares Vorgehen, um für den Fahrplan eines Tages ein anderes Ziel bei einer Umlaufbildung auf Basis von Diensten zu realisieren. Basierend auf Diensten sollen dort Umläufe möglichst robust gegen Verspätungen gebildet werden. Das Ziel dort ist es dann, beim Zusammenstellen von (Tages-)Umläufen die Propagation von möglichen Verspätungen zu minimieren.

Hier sollen die für unterschiedliche Tage zu bestimmenden Umläufe möglichst ähnlich zueinander sein. Hintergrund für diese zusätzliche Forderung nach ähnlichen Um-

laufplänen (zusätzlich zu ähnlichen Dienstplänen) ist, dass so kurzfristig vom Verkehrsunternehmen durchzuführende Änderungen in einem Dienstplan nicht zu völlig unterschiedlichen Plänen führen. Die ähnlichen Umlaufpläne sollen für eine „stabile“ Dienstbildung im Falle von notwendigen Änderungen sorgen.

Das Bilden ähnlicher (Tages-)Umläufe basierend auf (ähnlichen) Diensten kann analog zum Bilden ähnlicher (Tages-)Umläufe aus (ähnlichen) Umlaufblöcken aus Abschnitt 10.5 durchgeführt werden. Wesentlicher Unterschied ist, dass die Knoten der Tagesumlaufgenerierungsnetzwerke statt Umlaufblöcke, Dienste oder Teile von Diensten repräsentieren. Abhängig von erlaubten Fahrzeugwechseln bei der Dienstbildung besteht die Knotenmenge aus Diensten (bei nicht erlaubten Fahrzeugwechseln), Dienstteilen (von geteilten Diensten) und/oder Dienststücken (bei erlaubten Fahrzeugwechseln). Diese sind entsprechend ihrer Kompatibilität über Verbindungskanten miteinander verknüpft. Mit den Tagesumlaufgenerierungsnetzwerken lassen sich *tageweise* (mit einem Referenzplan) oder *gleichzeitig* für alle Tage (über regelmäßige Muster) ähnliche (Tages-)Umläufe bestimmen. Für Details zu den beiden unterschiedlichen Vorgehensweisen sei auf die Ausführungen in Abschnitt 10.5 verwiesen.

11.6 Analyse numerischer Ergebnisse

Zu denen in diesem Kapitel vorgeschlagenen Ansätzen zur Lösung von teilentegrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen sollen in diesem Abschnitt die durchgeführten Tests diskutiert werden. Analog zu den Untersuchungen der sequenziellen Planung mit Ähnlichkeitszielen aus Abschnitt 10.7 bilden folgende Fragestellungen die Grundlage für die Experimente:

1. Wie groß ist der Spielraum, den eine teilentegrierte Planung für eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten bietet?
2. Sind ähnliche Pläne teilentegriert besser tageweise oder tagesübergreifend bestimmbar?

Um diese Fragen beantworten zu können, wird die Erstellung ähnlicher Dienstpläne für implizite Bündel kosteneffizienter Umlaufpläne untersucht (vgl. Vorgehen B in Abbildung 11.1). Testumgebung ist die in Abschnitt 9.2.4 beschriebene.

Effekte unterschiedlicher Lösungsansätze für PVCSP-IT

Abbildungen 11.2 und 11.3 stellen die Ergebnisse zusammenfassend dar. Gegenübergestellt werden die Kosten der ermittelten Pläne bezogen auf kosteneffizient bestimm-

te Lösungen ohne Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten (*Kosteneff.*) und die Ähnlichkeitsbewertungen der erstellten Pläne. Dabei werden wie in Abschnitt 10.7 Lösungen verglichen, die mit der Regular-First-Irregular-Second-Heuristik (*Reg-Irr*), welche den Referenzpunkt für die ähnlichste Lösung bildet, der All-First-Irregular-Second-Heuristik (*All-Irr*), der All-First-Fix-And-Optimize-Heuristik (*FOpt-Irr*), mit Nutzung eines Referenzplans (*Ref*) und bei Nutzung einer tagesübergreifenden Planung mit Boni für Aufgabenmuster (*Bonus*) berechnet wurden.

Für die Berechnungen mit Hilfe eines Referenzplans ist weiterhin angegeben, welcher Referenzplan ausgewählt wurde (ein Referenzplan basierend auf einem Wochentag oder für eine r -regelmäßige Fahrtenmenge). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind zur Veranschaulichung der Effekte die Referenzpläne ausgewählt, die zuvor als gut geeignet für eine ähnliche Planerstellung identifiziert wurden (vgl. Abschnitt 9.2.4). Bei der Berechnung mit einem Referenzplan werden außerdem (Mehr-)Kosten gegenüber den kosteneffizient erstellten Plänen von 100% bis 120% erlaubt. Bei einer Berechnung mit Bonuswerten werden diese in sechs Stufen unterschiedlich hoch gewichtet (von 1 bis 100.000).

Tabelle 11.1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Laufzeiten vom Einlesen der Daten bis zur Ausgabe der errechneten Pläne. Für die tageweise Berechnung ähnlicher Pläne mit Referenzplan und die tagesübergreifende Planung mit Mustern sind jeweils die durchschnittlichen Werte über alle Tests zu einem Testset aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass das Lösungsverfahren bei Nutzung eines Referenzplans jeweils mit den kosteneffizienten Lösungen initialisiert wird (vgl. Abschnitt 9.2.3). Die Laufzeit erhöht sich dann um die zur Zeit, die zur Bestimmung der kosteneffizienten Lösung notwendig ist.

Die Abbildungen zeigen, dass sich mit den vorgestellten Konzepten zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen deutlich bessere, d.h. ähnlichere Pläne als mit einer traditionellen kosteneffizienten Planung ermitteln lassen. Ohne Erhöhung der Kosten bietet sich genug Spielraum, um Pläne bestimmen zu können, die wesentlich bessere Werte bezüglich der Ähnlichkeitskennzahlen aufweisen als die traditionelle Planung.

Mit Erhöhung der Kosten können diese Ähnlichkeitswerte noch gesteigert werden. Da mit mehr Kosten auch die Anzahl der Dienste in den Plänen steigt, lässt sich dabei der Effekt beobachten, dass die auf die Anzahl von Ressourceneinsätzen bezogenen Maße wie die durchschnittliche Wiederholrate und der Anteil identische bedienter Fahrten wieder leicht zurück gehen können (siehe z.B. Bild I und Bild VIII in Abbildung 11.2).

Dabei lässt sich die maximal möglich erreichbare Ähnlichkeit in dem Rahmen steigern, den die Flusslösung aus der Umlaufplanung zulässt. Dies ist insbesondere gut

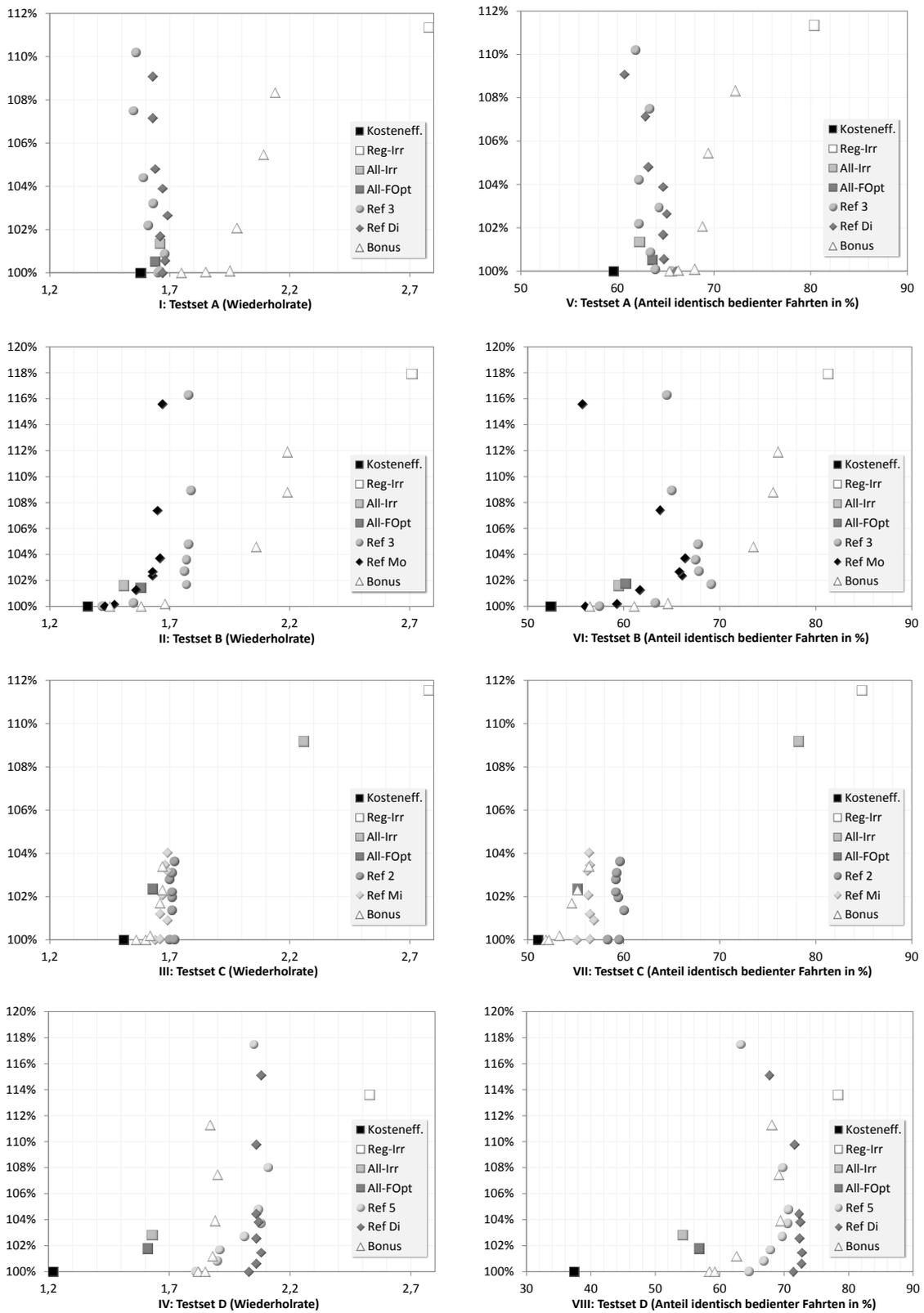


Abbildung 11.2: Gegenüberstellung von Kosten und Wiederholrate (Bilder I-IV) sowie von Kosten und dem Anteil identisch bedienter Fahrten (Bilder V-VIII)

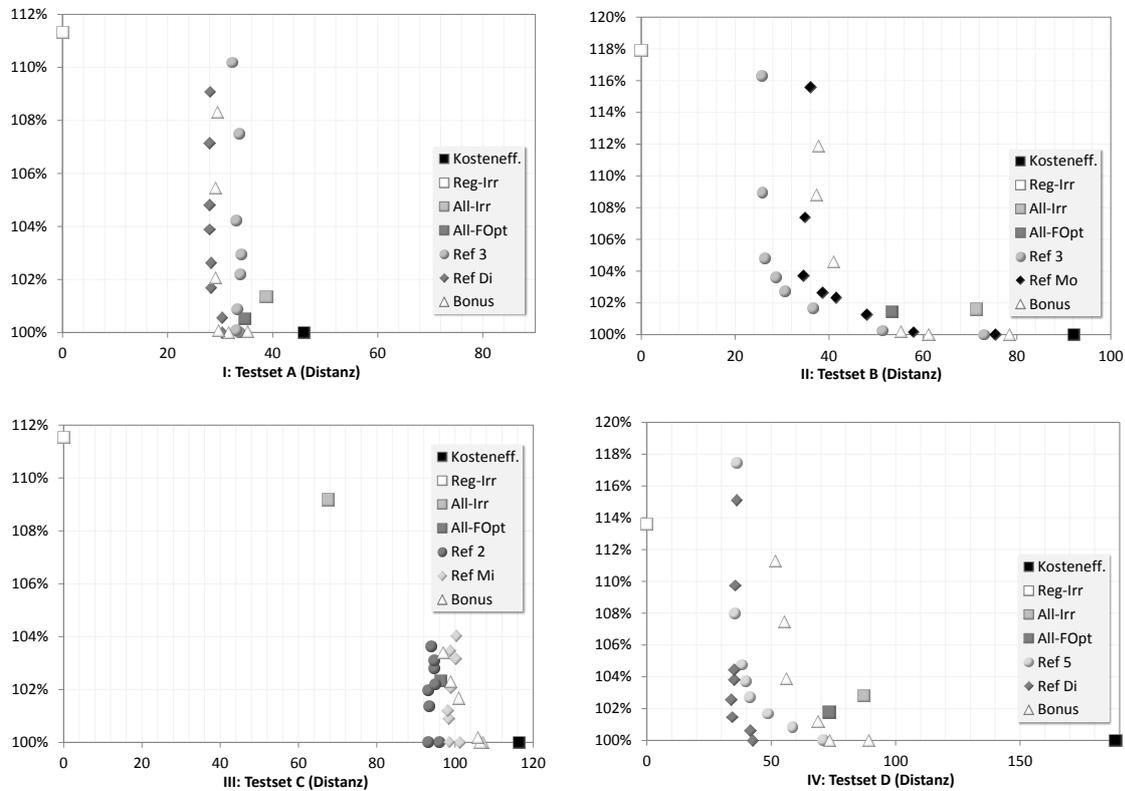


Abbildung 11.3: Gegenüberstellung von Kosten und Distanz in Sequenzen regelmäßiger Fahrten

set	Kosteneff.	Reg-Irr	All-Irr	All-FOpt	øRef	øBonus
A	00:01:54	00:00:17	00:03:24	00:02:54	00:00:31	00:05:58
B	00:22:35	00:04:27	00:59:18	01:00:34	00:41:19	01:15:03
C	00:00:43	00:00:08	00:00:36	00:00:33	00:00:23	00:01:21
D	00:36:10	00:12:31	01:08:14	00:56:47	00:51:25	00:46:30

Tabelle 11.1: Laufzeiten in hh:mm:ss bei einer teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen

an den Distanzbewertungen zu erkennen, bei denen die Bewertungen durch höhere Kosten gesteigert werden, der ähnlichste (und sehr teure) Punkt der Regular-First-Irregular-Second-Heuristik aber nicht erreicht wird, da diesem eine andere Umlaufplanungslösung zugrunde liegt (siehe Bilder I-IV in Abbildung 11.3).

Mit den Heuristiken können ebenfalls ähnlichere Pläne generiert werden. Allerdings zumeist nur, indem die Kosten so (stark) erhöht werden, dass sie an der Grenze des für einen praktischen Einsatz tolerierbaren Bereich von 1% Mehrkosten liegen.

Zur Bestimmung ähnlicher Pläne wird durchweg mehr Rechenzeit benötigt, als für eine Planung ohne Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten (siehe Tabelle 11.1). Dafür können allerdings auch deutlich bessere Ergebnisse bezüglich kosteneffizienter und ähnlicher Pläne erreicht werden.

Zusammenfassung der Untersuchungen

Die eingangs dieses Abschnittes formulierten Fragestellungen lassen sich anhand der Untersuchungen wie folgt zusammenfassend beantworten:

Die teilintegrierte Planung basierend auf (kostenoptimalen) Flusslösungen aus der Umlaufplanung bietet enormen Spielraum, ähnliche Pläne zu erstellen. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass bei einer teilintegrierte Umlauf- und Dienstplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten deutlich ähnlichere Pläne als bei einer rein kosteneffizienten Planung bestimmt werden können, ohne dabei die Kosten gegenüber einer traditionellen kosteneffizienten Planung zu erhöhen. Werden die Kosten erhöht, können im Rahmen der implizit durch die Flusslösung gegebenen Bündel an Umlaufplänen noch ähnlichere Pläne erstellt werden.

Dabei lässt sich im Gegensatz zur sequenziellen Planung nicht eindeutig festlegen, ob eine tageweise Planung mit Referenzplan einer tageweisen Planung durch regelmäßige Muster vorzuziehen ist, oder nicht. Abhängig von der Problemstellung bzw. Instanzenmenge können die besten Pläne bezüglich Kosteneffizienz und Ähnlichkeit sowohl tageweise als auch tagesübergreifend bestimmt werden. Mit der tagesübergreifenden Planung lassen sich durchgängig sehr gute Lösungen bezogen auf Kosteneffizienz und Ähnlichkeit ermitteln. In einigen Fällen können allerdings noch etwas bessere Pläne bei einer tageweisen Planung mit einem Referenzplan bestimmt werden.

Kapitel 12

Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Ansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen im Rahmen einer integrierten Umlauf- und Dienstplanung untersucht. Die vollständig integrierte Planung besitzt im Vergleich zu den in den beiden vorherigen Kapiteln 10 und 11 diskutierten Varianten höhere Freiheitsgrade beim Planen der Dienste (vgl. Abschnitt 2.2.4). So existieren auch höhere Freiheitsgrade, um ähnlichere Dienste erstellen zu können.

In Abschnitt 12.1 werden zunächst die integrierten Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen genauer definiert. Abschnitt 12.2 stellt ein dafür geeignetes Lösungsschema im allgemeinen vor, Abschnitte 12.3 und 12.4 im Detail. Eine Bewertung unterschiedlicher Arten der integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitszielen findet am Ende des Kapitels in Abschnitt 12.5 statt, in welchem numerische Ergebnisse aufgeführt sind.

12.1 Problemdefinition – IVCSP-IT

Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme mit Ähnlichkeitszielen verknüpfen klassische (integrierte) Umlaufplanungs- und Dienstplanungsprobleme mehrerer Tage miteinander, sodass das entsprechende Planungsproblem wie folgt als *integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Fahrten und Aufgaben von verschiedenen Fahrplänen* (engl. *integrated vehicle and crew scheduling problem with irregular trips and tasks from various timetables, IVCSP-IT*) definiert werden kann:

Für eine *Menge von Fahrplänen eines bestimmten Planungszeitraumes* mit einer Menge von Servicefahrten, Ablösepunkten, Leerfahrt- und Transfermöglichkeiten zwischen Haltestellen, sowie Depots mit zugeordneten Fahrzeugtypen, sind *Mengen von*

Umlauf- und Dienstplänen zu finden, die zulässig, wechselseitig kompatibel, d.h. zueinander passend, kostenminimal und *möglichst ähnlich zueinander* sind.

Umlauf- und Dienstpläne sind zueinander passend, wenn jede Fahrt aus dem Fahrplan von einem Fahrzeug und einem Dienst bedient wird, und jede in den Umlaufplänen auszuführende Leerfahrt genau einem Dienst zugeordnet ist (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Neben der aus klassischen integrierten Problemen bekannten gleichzeitigen Planung von Umläufen und Diensten sorgt die Planung über mehrere Tage für ein schwierig zu lösendes Optimierungsproblem.

12.2 Lösungsschema für IV CSP-IT

Abbildung 12.1 stellt das Vorgehen beim Lösen von integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit den in dieser Arbeit neu vorgestellten Möglichkeiten zur Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen schematisch dar. Wie beim Lösungsschema zu sequenziellen und zu teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen, können die Möglichkeiten zur Ähnlichkeitsberücksichtigung an mehreren Stellen realisiert werden (vgl. Abbildungen 10.1 und 11.1 in den Abschnitten 10.2 und 11.2).

Dabei besteht ein kleiner Unterschied: Wenn in der Praxis ähnliche Pläne verlangt sind, sind das vorrangige Ziel der Planung ähnliche Dienstpläne. Ähnliche Umläufe sind dabei weitestgehend als Hilfskonstrukt zu betrachten, um überhaupt ähnliche Dienste (im Rahmen z.B. einer sequenziellen Umlauf- und Dienstplanung) erhalten zu können. Daher reicht es bei der integrierten Umlauf- und Dienstplanung durch die gleichzeitige und gekoppelte Berücksichtigung von Umlaufplanung und Dienstplanung aus, die Ähnlichkeitsziele hauptsächlich durch Berücksichtigung von Ähnlichkeitskriterien bei der Dienstbildung abzubilden.

Auf Basis der Fahrpläne mehrerer Tage werden Umlaufplanungsprobleme (engl. *vehicle scheduling problems, VSPs*) als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Probleme in Time-Space-Netzwerkmodellen modelliert (vgl. Abschnitte 6.1.1 und 6.2.1). Diese werden mit den Dienstplanungsproblemen (engl. *crew scheduling problems, CSPs*) in Form von Set-Partitioning-Problemen so gekoppelt, dass alle in der Umlaufplanung anfallenden Aufgaben der unterschiedlichen Tage von der dafür notwendigen Anzahl Dienste erfüllt werden müssen. Für die so entstandenen integrierten Umlauf- und Dienstplanungsprobleme (engl. *integrated vehicle and crew scheduling problems, IV CSPs*) wird über eine Lagrange-relaxierte Formulierung in Kombination mit einem Column Generation Ansatz eine untere Schranke für die Lösung bestimmt (vgl. auch Abschnitt 6.1.2). Dabei werden zulässige und ähnliche Dienste im Rahmen des

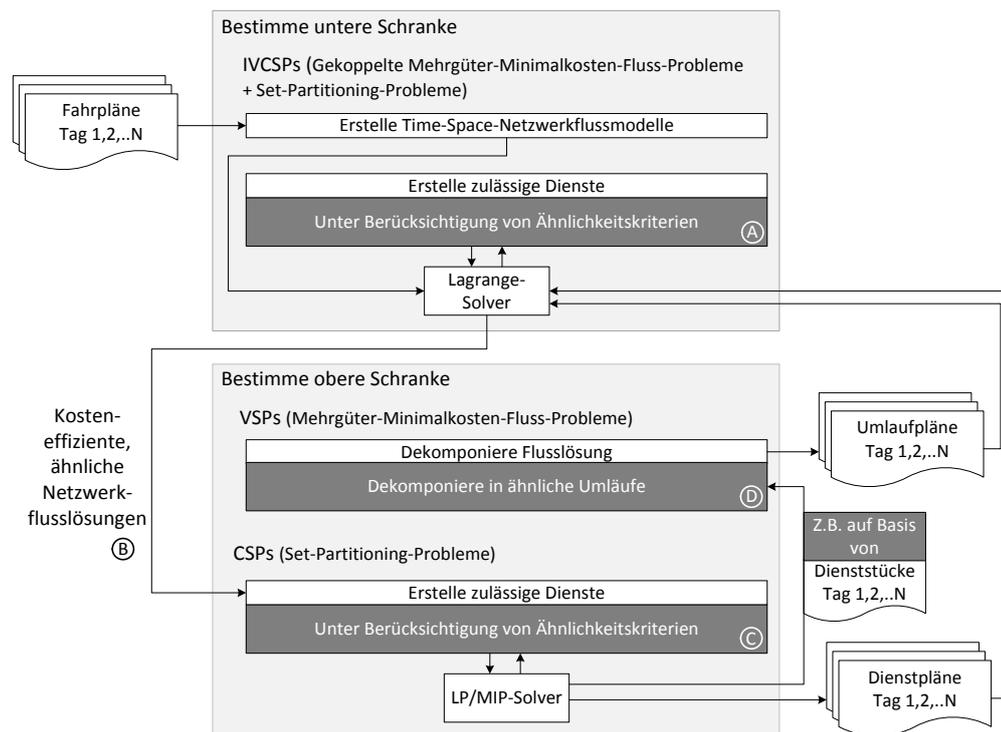


Abbildung 12.1: Integrierte Umlauf- und Dienstbildung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten während der Planung

Column Generation-Verfahrens erstellt (A). Beim Bestimmen der unteren Schranke werden kosteneffiziente und ähnliche Netzwerkflusslösungen für die Umlaufplanungsprobleme ermittelt, die implizit ein Bündel an unterschiedlichen Umlaufplänen mit gleichem Zielfunktionswert repräsentieren (B). Basierend auf diesen Lösungen werden Dienstplanungsprobleme als Set-Partitioning-Probleme formuliert zur Abdeckung aller durch die Netzwerkflüsse der Umlaufplanungsprobleme beschriebenen Aufgaben. Diese werden mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen mit einem Column Generation Ansatz gelöst, sodass (kosteneffiziente und) ähnliche Dienstpläne generiert werden (C). Auf Basis der Dienstpläne können die Netzwerkflusslösungen der Umlaufplanungsprobleme dann gegebenenfalls in ähnliche Umläufe für unterschiedliche Tage zerlegt werden (D). So wird mit diesem teilintegrierten Verfahren (vgl. Abschnitt 11.2) innerhalb der integrierten Umlauf- und Dienstplanung eine obere Schranke der Lösung bestimmt, d.h. zulässige und zueinander kompatible Umlauf- und Dienstpläne. Diese Lösungen können dann genutzt werden, um bessere untere Schranke zu bestimmen. So können dann Netzwerkflusslösungen in den Umlaufplanungsproblemen unterschiedlicher Tage ermittelt werden, zu denen bessere kosteneffiziente und ähnliche Dienstpläne generiert werden können, bis ein Abbruchkriterium, wie z.B.

eine marginale Verbesserung des Zielfunktionswertes in einer bestimmten Anzahl Iterationen oder ein Zeitlimit erreicht ist (zu Abbruchkriterien vgl. auch Abschnitt 6.1.2).

Die in der Abbildung aufgeführten Möglichkeiten B, C und D zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten entsprechen weitestgehend den im vorherigen Kapitel dargestellten Möglichkeiten beim Lösen von teilintegrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen. Für Details sei auf die entsprechenden Abschnitte 11.3, 11.4 und 11.5 verwiesen. Durch das gleichzeitige Lösen von Umlauf- und Dienstplanungsproblem ergeben sich im integrierten Fall einige Besonderheiten, sodass Möglichkeit A nachfolgend etwas genauer erläutert wird. Abschnitt 12.3 beschreibt das Bilden ähnlicher Umläufe und Dienste im Rahmen einer integrierten Planung bei Nutzen eines Referenzplanes. In Abschnitt 12.4 wird die integrierte Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung durch regelmäßige Muster vorgestellt.

12.3 Integrierte Umlauf- und Dienstbildung auf Basis von RSP-IT-RS

Für die grundsätzliche Modellierung und das generelle Lösungsverfahren zum Basis-Konzept der ähnlichen Planung mehrerer Tage mit Hilfe eines Referenzplans sei auf Abschnitt 9.2 verwiesen. Die für eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung mit Referenzplan notwendigen Ergänzungen der Modellierung werden im Folgenden in Abschnitt 12.3.1 vorgestellt sowie in Abschnitt 12.3.2 die Erweiterungen im Lösungsverfahren.

12.3.1 Modellierung

Das mathematische Modell zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Ähnlichkeitsberücksichtigung durch einen Referenzplan kombiniert die aus den Abschnitten 6.1.1 und 9.2.2 bekannten Formulierungen des integrierten Mehrdepot- Umlauf- und Dienstplanungsproblems (MD-IVCSP) und des Ressourceneinsatzplanungsproblems mit unregelmäßigen Aufgaben und Nutzen eines Referenzplans (RSP-IT-RS): Umlaufplanungsprobleme sind als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Probleme auf Basis eines Time-Space-Netzwerkmodells formuliert und mit der Dienstplanung darüber gekoppelt, dass jede in der Umlaufplanung genutzte Fahrzeugaktivität in entsprechend vielen Diensten enthalten ist. Dabei sind die Dienstplanungsprobleme als Set-Partitioning-Probleme formuliert, in welchen jede Fahrzeugaktivität von genau ei-

nem Dienst bedient werden muss. Ziel ist es, Dienstpläne mit minimaler Abweichung zum gegebenen Referenzdienstplan zu finden, wobei ein elastischer Kostenrahmen die dafür erlaubten Kosten vorgibt.

Mathematisch formuliert ist das Modell also wie folgt – es gelten die gleichen Bezeichnungen wie in den Abschnitten 6.1.1 und 9.2.2. Die Menge aller Depots sei also $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, m\}$ und sei $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge aller zu bedienenden Servicefahrten eines Tages. Mit \mathcal{T}^d sei die Menge aller Servicefahrten definiert, die von Fahrzeugen aus Depot $d \in \mathcal{D}$ durchgeführt werden können. Zu jedem Depot d ist ein Umlaufplanungsnetzwerk $G^d = (N^d, A^d)$ mit der Knotenmenge N^d und der Kantenmenge A^d definiert. Mit $\tilde{A}^d \subset A^d$ sei die Menge aller Kanten definiert, die Aktivitäten repräsentieren, die ein Fahrzeug und einen Fahrer erfordern. Des Weiteren sei mit $A^d(t) : \mathcal{T} \rightarrow A^d$ eine Funktion beschrieben, die für Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ und Depot $d \in \mathcal{D}$ die zugehörige Servicefahrtkante $(i, j) \in A^d$ liefert. Wenn Fahrt t nicht aus Depot d bedient werden, ist $A^d(t) = \emptyset$.

Jeder Kante $(i, j) \in A^d$ werden wie in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Fahrzeugkosten c_{ij}^d zugeordnet. Ebenso werden wie beschrieben die maximalen Flusskapazitäten u_{ij}^d einer Kante $(i, j) \in A^d$ gesetzt.

Als Entscheidungsvariablen werden Flussvariablen und Dienstvariablen definiert. Ganzzahlige Flussvariablen y_{ij}^d für jede Kante $(i, j) \in A^d$ geben an, wie hoch der Fluss über Kante (i, j) ist. Dabei repräsentiert jede Flusseinheit ein Fahrzeug, das die durch die Kante beschriebene Fahrzeugaktivität ausführt. Binäre Entscheidungsvariablen x_k^d geben an, ob Dienst $k \in K^d$ für Depot $d \in \mathcal{D}$ in der Lösung ausgewählt ist oder nicht. Dabei sei durch K^d die Menge aller gültigen Dienste definiert, die von Depot d aus durchgeführt werden können. Mit $K^d(i, j) \subset K^d$ sei die Menge aller Dienste beschrieben, die das Dienstelement enthalten, das durch die Fahrzeugaktivität auf Kante $(i, j) \in \tilde{A}^d$ modelliert ist. Jeder Dienstauswahlvariable x_k^d ist ein Distanzwert a_k^d zum Referenzdienstplan zugeordnet sowie ein Kostenwert f_k^d . Der Kostenrahmen sei durch ϵ vorgegeben. Damit der Kostenrahmen immer eingehalten werden kann, sind zusätzlich eine nicht negative Schlupfvariable s und eine Surplus-Variable u notwendig. Jegliches Überschreiten des Kostenrahmens wird über ein der Variable u zugeordneten Faktor p_u bestraft.

Dann kann das *integrierte Mehrdepot-Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und Benutzung eines Referenzplanes* (engl. *multiple depot integrated vehicle and crew scheduling problem with irregular tasks using a reference schedule, MD-IVCSP-IT-RS*) wie folgt formuliert werden:

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d a_k^d + up_u \rightarrow \min \quad (12.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + s - u = \epsilon \quad (12.2)$$

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (12.3)$$

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (12.4)$$

$$-y_{ij}^d + \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (12.5)$$

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (12.6)$$

$$x_k^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (12.7)$$

$$s, u \geq 0 \quad (12.8)$$

Die Zielfunktion (12.1) minimiert die Distanz zum gegebenen Referenzdienstplan, während die elastische Kostenrestriktion (12.2) den Kostenrahmen der Lösung vorgibt. Abdeckungsbedingungen (12.3) garantieren, dass jede Servicefahrt von genau einem Fahrzeug aus einem Depot bedient wird. Durch Nebenbedingungen (12.4) wird eine zulässige Flusslösung sichergestellt, indem an jedem Knoten im Umlaufplanungsnetzwerk Flusserhaltung gilt. Kopplungsbedingungen (12.5) garantieren die Kompatibilität zwischen Umlauf- und Dienstplan: Für jede durch eine Kante repräsentierte Fahrzeugaktivität, die von einem Fahrzeug(fluss) belegt ist, muss das der Aktivität entsprechende Dienstelement in ebenso vielen Diensten enthalten sein. Nebenbedingungen (12.6) sorgen dafür, dass das maximale Flussvolumen auf den Kanten eingehalten wird.

12.3.2 Lösungsansatz

Modell MD-IVCSP-IT-RS kombiniert die Modelle MD-IVCSP und RSP-IT-RS. Zum Lösen des Modells bietet sich also das in Abschnitt 6.1.2 und 9.2.3 beschriebene Vorgehen an. Gelöst wird das Modell mit einer Kombination aus Column Generation und Lagrange-Relaxation. Dabei ergeben sich einige Erweiterungen im Master-Problem und beim Pricing-Problem. Diese Erweiterungen sind nachfolgend aufgeführt.

Erweiterungen im Master-Problem: Lagrange-Relaxation zur Fahrtenabdeckung sowie zur Umlauf- und Dienstplanungskopplung

Durch die simultane Betrachtung von Umlaufplanung und Dienstplanung ist Modell (12.1)-(12.8) ein schwer zu lösendes Optimierungsproblem. Um die gleichzeitige Behandlung zu vereinfachen, werden beim MD-IVCSP-IT-RS analog zum MD-IVCSP in Abschnitt 6.1.2 die Kopplungsbedingungen (12.5) jeder Kante $(i, j) \in \tilde{A}^d$ der Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ aufgehoben und jeweils mit einem Lagrange-Multiplikator μ_{ij}^d gewichtet in die Zielfunktion aufgenommen. So zerfällt das Modell in ein zu lösendes Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem und ein Dienstplanungsproblem. Die Kopplung zwischen Mehrdepot-Umlaufplanungs- und Dienstplanungsproblem bleibt dadurch berücksichtigt, dass eine Verletzung der relaxierten Kopplungsbedingungen je nach Höhe der Verletzung und Gewichtung zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führt. Da das Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem ebenfalls ein schwer zu lösendes Optimierungsproblem darstellt, werden auch die Abdeckungsbedingungen (12.3) jeder Servicefahrt $t \in \mathcal{T}$ relaxiert und gehen somit jeweils gewichtet mit dem Lagrange-Multiplikator π_t in die Zielfunktion ein. Zielfunktion (12.1) wird wie folgt modifiziert:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d a_k^d \\
& + \lambda \left(\epsilon - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K} x_k^d f_k^d \right) \\
& + \sum_{t \in \mathcal{T}} \pi_t \left(1 - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d \right) \\
& + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^d} \mu_{ij}^d \left(y_{ij}^d - \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d \right)
\end{aligned} \tag{12.9}$$

Das zu lösende Lagrange-Unterproblem lautet dann:

$$\Phi(\lambda, \mu, \pi) = \Phi_y(\lambda, \mu, \pi) + \Phi_x(\lambda, \mu) + \sum_{t \in \mathcal{T}} \pi_t + \lambda \epsilon \tag{12.10}$$

Für das Umlaufplanungs-Unterproblem

$$\Phi_y(\lambda, \mu, \pi) = \left\{ \min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d \bar{c}_{ij}^d \mid \right. \quad (12.11)$$

$$\left. \sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d, \right. \quad (12.12)$$

$$\left. 0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \right\} \quad (12.13)$$

gilt für die reduzierten Kosten \bar{c}_{ij}^d jeder Kante $(i,j) \in A^d$ des Umlaufplanungsnetzwerkes von Depot $d \in \mathcal{D}$:

$$\bar{c}_{ij}^d = \begin{cases} c_{ij}^d - \lambda c_{ij}^d + \mu_{ij} - \pi_t & \text{für } : (i,j) \in \tilde{A} \text{ und } \exists t \in \mathcal{T} : (i,j) \in A^d(t) \\ c_{ij}^d - \lambda c_{ij}^d + \mu_{ij} & \text{für } : (i,j) \in \tilde{A} \text{ und } \neg \exists t \in \mathcal{T} : (i,j) \in A^d(t) \\ c_{ij}^d - \lambda c_{ij}^d & \text{für } : (i,j) \notin \tilde{A} \end{cases} \quad (12.14)$$

Das Dienstplanungs-Unterproblem kann formuliert werden als:

$$\Phi_x(\lambda, \mu) = \left\{ \min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d \bar{a}_k^d \mid \right. \quad (12.15)$$

$$\left. x_k^d \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \right\} \quad (12.16)$$

Für die reduzierten Kosten \bar{a}_k^d für jeden Dienst $k \in K^d$, der Depot $d \in \mathcal{D}$ zugeordnet ist, gilt dann mit a_k^d als Distanz eines Dienstes zum Referenzplan, f_k^d als Kosten des Dienstes, und $\tilde{A}^d(k) \subseteq \tilde{A}^d$ als Menge der Kanten, die von Dienst k abgedeckt werden:

$$\bar{a}_k^d = a_k^d - \lambda f_k^d - \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^d(k)} \mu_{ij}^d \quad (12.17)$$

Zu gegebenen Lagrange-Multiplikatoren λ , μ und π kann $\Phi_y(\lambda, \mu, \pi)$ als einfaches Flussproblem gelöst werden und $\Phi_x(\lambda, \mu)$ als einfaches Auswahlproblem, bei welchem für jedes Depot $d \in \mathcal{D}$ jeder Dienst bzw. jede Spalte $k \in K^d$ mit negativen reduzierten Kosten ausgewählt wird. Um für die Spaltenmenge eine gute untere Schranke zur nicht relaxierten Formulierung zu bekommen, werden die Lagrange-Multiplikatoren λ , μ und π so bestimmt, dass der Wert von $\Phi(\lambda, \mu, \pi)$ maximiert wird, indem das Lagrange-Duale-Problem mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst wird (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Erweiterungen im Column Generation Pricing-Problem

Nach Lösen des beschränkten Master-Problems können die ermittelten Lagrange-Multiplikatoren/Dualwerte λ und μ genutzt werden, um neue Spalten bzw. Dienste mit negativen reduzierten Kosten zu erzeugen. Dazu wird das in Abschnitt 9.2.3 vorgestellte Pricing-Verfahren auf wie in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Dienstgenerierungsnetzwerken verwendet. Verglichen mit dem Aufbau der Pricing-Probleme bei einer sequenziellen oder teilintegrierten Planung ändert sich bei der integrierten Planung lediglich die Netzwerkgröße der genutzten Dienstgenerierungsnetzwerke. Statt einer Auswahl an Aufgaben, müssen alle sich aus dem Fahrplan durch mögliche Fahrzeugaktivitäten ergebenden Aufgaben als Dienstelemente bzw. Dienstelement-Abschnitte im Dienstgenerierungsnetzwerk abgebildet sein. Um die Dienste/Pfade mit negativen reduzierten Kosten zu bestimmen, werden die durch die Dienstgenerierungsnetzwerke gebildeten ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme mit dem in Abschnitt 9.2.3 beschriebenen Algorithmus 9.2.1 gelöst. Die Ähnlichkeit von erstellten Diensten zum gegebenen Referenzplan wird also sichergestellt, durch die beschriebene (Un-)Ähnlichkeitsmessung von (Teil-)Pfaden zu den im Referenzplan vorgegebenen Diensten.

12.4 Integrierte Umlauf- und Dienstbildung auf Basis von S-RSP-IT-RP

Zur generellen Modellierungsidee sowie zum generellen Lösungsverfahren zum Basis-Konzept der ähnlichen Planung durch regelmäßige Muster sei an die Ausführungen in Abschnitt 9.3 erinnert. Die für eine integrierte Umlauf- und Dienstplanung mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen durch regelmäßige Muster notwendigen Erweiterungen in Modellierung und Lösungsansatz werden in den folgenden Abschnitten 12.4.1 und 12.4.2 erläutert.

12.4.1 Modellierung

Im Modell zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen durch regelmäßige Muster werden die in den Abschnitten 6.1.1 und 9.3.2 vorgestellten Modellierungen zum integrierten Mehrdepot-Umlauf- und Dienstplanungsproblem (MD-IVCSP) und zum tagesübergreifendem Ressourcenplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und regelmäßigen Mustern (S-RSP-IT-RP) kombiniert: Die als Mehrgüter-Minimalkosten-Fluss-Probleme formulierten Umlauf-

planungsprobleme werden mit der Dienstplanung gekoppelt, indem jede von Umläufen genutzte Fahrzeugaktivität in entsprechend vielen Diensten enthalten sein muss. Zur Abdeckung jeder Fahrzeugaktivität durch genau einen Dienst sind die Dienstplanungsprobleme als Set-Partitioning-Probleme formuliert. Für an unterschiedlichen Tagen regelmäßig genutzte Aktivitäten, d.h. Fahrtenmuster, wird eine Belohnung vergeben – je höher die Belohnung, desto ähnlicher sind die Pläne. Ziel ist eine Minimierung der Kosten bei gleichzeitiger Maximierung der Belohnung der genutzten Muster.

Für die mathematische Formulierung gelten die Bezeichnungen aus den Abschnitten 6.1.1 und 9.3.2. Mit $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, m\}$ sei also die Menge aller Depots definiert, mit $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge der betrachteten Tage und mit $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, q\}$ die Menge aller Fahrten der betrachteten Fahrpläne. Die Menge der Fahrten, die an Tag $l \in \mathcal{L}$ bedient werden müssen, sind mit $\mathcal{T}^{l,d}$ bezeichnet. Alle berücksichtigten Fahrtenmuster seien durch die Menge \mathcal{P} beschrieben, wobei jedes Muster $p \in \mathcal{P}$ aus einer Teilmenge $\mathcal{T}(p)$ der Fahrten \mathcal{T} besteht. Mit \mathcal{G} sei die Menge der Fahrtenmustergruppen bezeichnet, die die Regelmäßigkeit der genutzten Muster über die betrachteten Tage anzeigen. Jede Fahrtenmustergruppe $g \in \mathcal{G}$ repräsentiert eine Menge von Mustern, die über die betrachteten Tage gleich oft genutzt werden. Dabei sei die Anzahl der Nutzung, die von Gruppe g repräsentiert ist, mit $C(g)$ definiert und mit r^g sei der Belohnungswert für die Nutzung dieser Gruppe beschrieben. Für jeden Tag l und jedes Depot d sei das Umlaufplanungsnetzwerk $G^{l,d} = (N^{l,d}, A^{l,d})$ definiert, das die Knotenmenge $N^{l,d}$ und die Kantenmenge $A^{l,d}$ enthält. Mit $\tilde{A}^{l,d} \subset A^{l,d}$ sei die Kantenmenge bezeichnet, die Aktivitäten repräsentiert, die sowohl ein Fahrzeug als auch einen Fahrer benötigen. Außerdem sei $A^{l,d}(t) : \mathcal{T} \rightarrow A^{l,d}$ eine Funktion, die zu Fahrt $t \in \mathcal{T}$, Tag $l \in \mathcal{L}$ und Depot $d \in \mathcal{D}$ die entsprechende Kante $(i, j) \in A^{l,d}$ liefert. Falls t an Tag l nicht von Fahrzeugen aus Depot d bedient werden kann, gilt $A^{l,d}(t) = \emptyset$.

Jeder Kante $(i, j) \in A^{l,d}$ werden wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben Fahrzeugkosten $c_{ij}^{l,d}$ zugeordnet, die entweder fixe oder variable Kosten repräsentieren. Ebenso werden wie beschrieben die Flusskapazitäten der Kanten $(i, j) \in A^{l,d}$ gesetzt.

Drei Arten Entscheidungsvariablen werden definiert: Flussvariablen y , Dienstvariablen x und Mustergruppenvariablen z . Ganzzahlige Flussvariablen $y_{ij}^{l,d}$ repräsentieren den Fahrzeugfluss je Kante $(i, j) \in A^{l,d}$. Binäre Variablen $x_k^{l,d}$ mit zugeordneten Kosten $f_k^{l,d}$ geben an, ob Dienst $k \in K^{l,d}$ aus Depot d an Tag l in der Lösung ausgewählt ist oder nicht. Dabei bezeichnet $K^{l,d}$ die Menge aller zulässigen Dienste, die Depot d zuordbar sind an Tag l . Des Weiteren sei $K^{l,d}(i, j) \subset K^{l,d}$ die Menge aller Dienste, die das Dienstelement enthalten, das von Kante $(i, j) \in \tilde{A}^{l,d}$ repräsentiert ist. Außerdem sei $K^{l,d}(p) \subset K^{l,d}$ die Menge aller Dienste, die Dienstelemente enthalten, die Muster

$p \in \mathcal{P}$ bilden. Binärvariablen z_p^g zeigen an, ob Gruppe $g \in \mathcal{G}$ für Muster $p \in \mathcal{P}$ ausgewählt ist oder nicht.

Das *tagesübergreifende integrierte Mehrdepot-Umlauf- und Dienstplanungsproblem mit unregelmäßigen Aufgaben und regelmäßigen Mustern* (engl. *simultaneous multiple depot integrated vehicle and crew scheduling problem with irregular tasks and regular patterns*, *S-MD-IVCSP-IT-RP*) kann dann folgendermaßen formuliert werden:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^{l,d}} y_{ij}^{l,d} c_{ij}^{l,d} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^{l,d}} x_k^{l,d} f_k^{l,d} - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r^g \rightarrow \min \quad (12.18)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^{l,d}(t)} y_{ij}^{l,d} = 1 \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall t \in \mathcal{T}^l \quad (12.19)$$

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^{l,d}\}} y_{ji}^{l,d} - \sum_{\{j:(i,j) \in A^{l,d}\}} y_{ij}^{l,d} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^{l,d} \quad (12.20)$$

$$-y_{ij}^{l,d} + \sum_{k \in K^{l,d}(i,j)} x_k^{l,d} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^{l,d} \quad (12.21)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^{l,d}(p)} x_k^{l,d} - \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (12.22)$$

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (12.23)$$

$$0 \leq y_{ij}^{l,d} \leq u_{ij}^{l,d}, \quad y_{ij}^{l,d} \in \mathbb{N} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^{l,d} \quad (12.24)$$

$$x_k^{l,d} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^{l,d} \quad (12.25)$$

$$z_p^g \in \{0, 1\} \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (12.26)$$

Die Zielfunktion (12.18) minimiert die Kosten der Umläufe und Dienste während die Belohnung für regelmäßig genutzte Fahrtenmuster maximiert wird. Nebenbedingungen (12.19)-(12.20) repräsentieren die Mehrgüter-Fluss-Formulierungen für die Umlaufplanungsprobleme und garantieren zulässige Umlaufpläne: Durch die Fahrtenabdeckungsbedingungen (12.19) wird jede Servicefahrt genau einmal ausgeführt. Durch Nebenbedingungen (12.20) wird an jedem Knoten Flussserhaltung sichergestellt. Die Kompatibilität zwischen Umlaufplänen und Dienstplänen wird durch die Kopplungsbedingungen (12.21) garantiert: Das Dienstelement, das zu einer bestimmten Kante assoziiert ist, muss in gleicher Anzahl Diensten enthalten sein wie die Höhe des auf der Kante fließenden Flusses. Die Lösungen aller betrachteten Tage werden durch Restriktionen (12.22)-(12.23) miteinander verknüpft. Nebenbedingungen (12.22) garantieren, dass die Anzahl an Vorkommen eines Musters in den Plänen der ausgewählten Gruppe entspricht. Dabei stellen Bedingungen (12.23) sicher, dass

jedes Muster maximal einmal einer Gruppe zugeordnet wird. Außerdem garantieren Kapazitätsrestriktionen (12.24), dass der maximal erlaubte Fluss auf jeder Kante nicht überschritten wird.

12.4.2 Lösungsansatz

Da Modell S-MD-IVCSP-IT-RP eine kombinierte Variante der Modelle MD-IVCSP und S-RSP-IT-RP ist und sich die Modelle ähneln, werden zum Lösen des Modells die für das MD-IVCSP und S-RSP-IT-RP in den Abschnitten 6.1.2 und 9.3.3 beschriebenen Kombinationen von Column Generation und Lagrange-Relaxation verwendet. Die sich ergebenden Änderungen für das Master-Problem und das Pricing-Problem werden im Folgenden beschrieben.

Erweiterungen im Master-Problem: Lagrange-Relaxation zur Fahrtenabdeckung, zur Umlauf- und Dienstplanungskopplung, sowie zur Tageskopplung

Wie bereits bei den Modellen MD-IVCP-IT-RS und MD-IVCSP stellt auch Modell (12.18)-(12.26) (S-MD-IVCSP-IT-RP) durch die gleichzeitige Behandlung von Umlaufplanung und über Muster miteinander verbundene Dienstplanung für mehrere Tage ein schwer zu lösendes Optimierungsproblem dar. Zur Vereinfachung der gleichzeitigen Betrachtung von Umlauf- und Dienstplanung können analog zu den beiden anderen Modellen die Kopplungsbedingungen (12.21) jeder Kante $(i, j) \in \tilde{A}^{l,d}$ der Netzwerkschicht $d \in \mathcal{D}$ für das Planungsproblem eines Tages $l \in \mathcal{L}$ aufgehoben werden und jeweils mit einem Lagrange-Multiplikator $\mu_{ij}^{l,d}$ gewichtet in die Zielfunktion einbezogen werden. Somit wird das Modell in Mehrdepot-Umlaufplanungsprobleme und durch Muster-Nutzung gekoppelte Dienstplanungsprobleme für mehrere Tage zerlegt.

Sowohl die Mehrdepot-Umlaufplanungsprobleme als auch die über die Muster-Nutzung verbundenen Dienstplanungsprobleme für mehrere Tage stellen wiederum schwierig zu lösende Optimierungsprobleme dar. Die Mehrdepot-Umlaufplanungsprobleme können vereinfacht werden, indem auch die Abdeckungsbedingungen (12.19) relaxiert werden und je gewichtet mit dem Lagrange-Multiplikator π_t^l die Zielfunktion erweitern. Die gemeinsame Behandlung der über die Muster-Nutzung miteinander verbundenen Dienstplanungsprobleme für mehrere Tage lässt sich vereinfachen, indem die Kopplungsbedingungen (12.22) für jedes Muster $p \in \mathcal{P}$ aufgehoben werden und eine Verletzung der Kopplung über einen Lagrange-Multiplikator ν_p gewichtet in der Zielfunktion bestraft wird.

Zielfunktion (12.18) wird dann wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^{l,d}} y_{ij}^{l,d} c_{ij}^{l,d} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^{l,d}} x_k^{l,d} f_k^{l,d} - \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g r_p^g \\
& + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}^l} \pi_t^l \left(1 - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^{l,d}(t)} y_{ij}^{l,d} \right) \\
& + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^{l,d}} \mu_{ij}^{l,d} \left(y_{ij}^{l,d} - \sum_{k \in K^{l,d}(i,j)} x_k^{l,d} \right) \\
& + \sum_{p \in \mathcal{P}} \nu_p \left(- \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^{l,d}(p)} x_k^{l,d} + \sum_{g \in \mathcal{G}} C(g) z_p^g \right)
\end{aligned} \tag{12.27}$$

Das Lagrange-Unterproblem kann daher geschrieben werden als:

$$\Phi(\mu, \nu, \pi) = \Phi_y(\mu, \pi) + \Phi_x(\mu, \nu) + \Phi_z \nu + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}^l} \pi_t^l \tag{12.28}$$

mit den Umlaufplanungs-Unterproblemen

$$\Phi_y(\mu, \pi) = \left\{ \min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^{l,d}} y_{ij}^{l,d} c_{ij}^{l,d} \mid \right. \tag{12.29}$$

$$\left. \sum_{\{j:(j,i) \in A^{l,d}\}} y_{ji}^{l,d} - \sum_{\{j:(i,j) \in A^{l,d}\}} y_{ij}^{l,d} = 0, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^{l,d}, \right. \tag{12.30}$$

$$\left. 0 \leq y_{ij}^{l,d} \leq u_{ij}^{l,d}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^{l,d} \right\} \tag{12.31}$$

und den Dienstplanungs-Unterproblemen

$$\Phi_x(\mu, \nu) = \left\{ \min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K} x_k^l \bar{f}_k^{l,d} \mid \right. \tag{12.32}$$

$$\left. x_k^l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^{l,d} \right\} \tag{12.33}$$

sowie dem Muster-Auswahl-Unterproblem

$$\Phi_z(\nu) = \left\{ \min \sum_{g \in \mathcal{G}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_p^g \bar{r}_p^g \mid \right. \quad (12.34)$$

$$\left. \sum_{g \in \mathcal{G}} z_p^g \leq 1, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \right. \quad (12.35)$$

$$\left. z_p^g \in \{0, 1\}, \quad \forall g \in \mathcal{G}, \forall p \in \mathcal{P} \right\} \quad (12.36)$$

Dabei sind die reduzierten Kosten $\bar{c}_{ij}^{l,d}$ auf Kante $(i, j) \in A_{ij}^{l,d}$ definiert als

$$\bar{c}_{ij}^{l,d} = \begin{cases} c_{ij}^{l,d} + \mu_{ij}^{l,d} - \pi_t^l & \text{für } : (i, j) \in \tilde{A}^{l,d} \text{ und } \exists t \in \mathcal{T}^l : (i, j) \in A^{l,d}(t) \\ c_{ij}^{l,d} + \mu_{ij}^{l,d} & \text{für } : (i, j) \in \tilde{A}^{l,d} \text{ und } \neg \exists t \in \mathcal{T}^l : (i, j) \in A^{l,d}(t) \\ c_{ij}^{l,d} & \text{für } : (i, j) \notin \tilde{A}^{l,d} \end{cases} \quad (12.37)$$

Für die reduzierten Kosten $\bar{f}_k^{l,d}$ für Dienst $k \in K^{l,d}$ gilt:

$$\bar{f}_k^{l,d} = f_k^{l,d} - \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^{l,d}(k)} \mu_{ij}^{l,d} - \sum_{p \in \mathcal{P}(k)} \nu_p \quad (12.38)$$

Die reduzierten Kosten \bar{r}_p^g für Muster-Auswahl $p \in \mathcal{P}$ sind:

$$\bar{r}_p^g = r_p^g + C(g)\nu_p \quad (12.39)$$

Mit gegebenen Lagrange-Multiplikatoren μ , ν und π kann der Wert von $\Phi(\mu, \nu, \pi)$ durch Lösen einfacher Optimierungsprobleme bestimmt werden: Die Umlaufplanungs-Unterprobleme $\Phi_y(\mu, \pi)$ können für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$ als einfache Flussprobleme gelöst werden, die Dienstplanungs-Unterprobleme $\Phi_x(\mu, \nu)$ für jeden Tag $l \in \mathcal{L}$ und jedes Depot $d \in \mathcal{D}$ als einfache Auswahlprobleme, in denen jeder Dienst / jede Spalte $k \in K^{l,d}$ mit negativen reduzierten Kosten ausgewählt wird, und das Muster-Auswahl-Problem, indem zu jedem Muster $p \in \mathcal{P}$ die Gruppenzuordnung $g \in \mathcal{G}$ ausgewählt wird, die die besten negativen reduzierten Kosten besitzt. Um die Lagrange-Multiplikatoren μ , ν und π zu bestimmen, mit denen der Wert von $\Phi(\mu, \nu, \pi)$ maximiert wird, d.h. die Multiplikatoren, die zur nicht relaxierten Formulierung ein gute untere Schranke liefern, wird das Lagrange-Duale Problem mit einem Subgradienten-Verfahren gelöst (vgl. Abschnitt 6.2.2).

Erweiterungen im Column Generation Pricing-Problem

Mit den beim Lösen des beschränkten Master-Problems berechneten Lagrange-Multiplikatoren/Dualwerten μ und ν können neue Spalten bzw. Dienste mit negativen reduzierten Kosten bestimmt werden. Die Pricing-Probleme sind als ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme auf Dienstgenerierungsnetzwerken formuliert, die wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben aufgebaut sind. Dabei besteht das Dienstgenerierungsnetzwerk bei der integrierten Planung aus allen als Dienstelement bzw. Dienstelement-Abschnitten repräsentierten Aufgaben, die sich aus allen möglichen Fahrzeugaktivitäten ergeben, die durch Bedienen der vom Fahrplan vorgegebenen Servicefahrten anfallen können.

Zur Ermittlung der Dienste bzw. Pfade mit negativen reduzierten Kosten werden die Pricing-Probleme mit dem in Abschnitt 9.3.3 beschriebenen Algorithmus 9.3.2 gelöst. Dabei wird die Ähnlichkeit der Dienste durch die Berücksichtigung offener und abgeschlossener Muster-Sequenzen auf den (Teil-)Pfadern der Netzwerke sichergestellt.

Wesentlich für eine akzeptable Laufzeit ist dabei die Parallelisierbarkeit der Pricing-Probleme: In Abschnitt 6.2.5 wurde bereits darauf hingewiesen, dass als Pricing-Probleme in jedem Column Generation Pricing-Schritt pro Dienstyp-Depot-Kombination einzelne ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme aufgestellt werden. Da diese voneinander unabhängig sind, können sie auf mehrere Threads verteilt parallel gelöst werden. Dies ist umso wichtiger, wenn wie bei der tagesübergreifenden Planung mit regelmäßigen Mustern, die Planungsprobleme mehrerer Tage gleichzeitig gelöst werden und die Dienstgenerierungsnetzwerke wie bei der integrierten Planung aufgrund der Vielzahl abgebildeter Aufgaben vergleichsweise groß sind. Pricing-Probleme für komplizierte Dienstypen, die viel Rechenzeit benötigen können so für die unterschiedlichen Tage parallel bearbeitet werden.

12.5 Analyse numerischer Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die numerischen Ergebnisse zu den vorgeschlagenen Ansätzen zur Lösung von integrierten Umlauf- und Dienstplanungsproblemen mit Ähnlichkeitszielen diskutiert werden. Ähnlich zu den Untersuchungen der sequenziellen Planung mit Ähnlichkeitszielen aus Abschnitt 10.7 und der teilintegrierten Planung aus Abschnitt 11.6 bilden folgende Fragestellungen die Grundlage für die durchgeführten Tests:

1. Wie groß ist der Spielraum, den eine integrierte Planung für eine Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten bietet?

2. Sind ähnliche Pläne integriert besser tageweise oder tagesübergreifend bestimmbar?
3. Können aufgrund der größeren Flexibilität in der Dienstplanung bessere, d.h. kosteneffizientere und ähnlichere, Ressourceneinsatzpläne gebildet werden als bei der sequenziellen und der teilintegrierten Planung?

Zur Beantwortung der Fragen wird die Erstellung ähnlicher Dienste in Kopplung mit der Umlaufplanung untersucht (vgl. Vorgehen A, B und C in Abbildung 12.1).

Effekte unterschiedlicher Lösungsansätze für IV CSP-IT

Tabelle 12.1 gibt einen Überblick über durchgeführte Experimente zur Erstellung ähnlicher Ressourceneinsatzpläne im Rahmen einer integrierten Umlauf- und Dienstplanung. Es gelten die gleichen Bezeichnungen wie in den vorherigen Abschnitten 10.7 und 11.6. Zusätzlich wird die Veränderung der Kosten bezogen auf die rein kosteneffizient berechnete Lösung aufgeschlüsselt in den Umlaufplanungsteil (*vs*) und den Dienstplanungsteil (*cs*).

Testumgebung ist die in Abschnitt 9.2.4 beschriebene. Zur Bestimmung ganzzahliger bzw. zulässiger Lösungen werden die letzten zehn berechneten zulässigen Umlaufpläne bzw. Umlaufplanungsflusslösungen genutzt (vgl. Abschnitt 6.2.6). Die Effekte sind exemplarisch an den Testsets B und C dargestellt.

approach	runtime	costs		rate ($\Delta\%$)	ratio ($\Delta\%$)	dist ($\Delta\%$)
		vs	cs			
<i>Testset B</i>						
Kosten	03:02:48	100,0	100,0	1,00 (+ 0,0)	25,2 (+ 0,0)	309,1 (- 0,0)
Reg-Irr	00:31:47	110,1	106,4	2,08 (+108,0)	82,3 (+226,6)	0,0 (-100,0)
All-Irr	00:50:10	102,1	101,3	1,41 (+41,0)	58,0 (+130,2)	119,4 (-61,4)
All-FOpt	01:09:15	102,0	100,8	1,26 (+26,0)	46,3 (+83,7)	111,6 (-63,9)
Ref 2	03:32:55	100,0	100,1	1,22 (+22,0)	41,6 (+65,1)	100,3 (-67,6)
Bonus	08:43:09	100,2	100,0	1,36 (+36,0)	43,0 (+70,6)	96,8 (-68,7)
<i>Testset C</i>						
Kosten	00:40:10	100,0	100,0	1,13 (+ 0,0)	37,9 (+ 0,0)	118,3 (- 0,0)
Reg-Irr	00:12:51	108,2	103,1	1,90 (+68,1)	79,6 (+110,0)	0,0 (-100,0)
All-Irr	00:26:47	103,0	102,2	1,83 (+61,9)	72,3 (+90,8)	69,3 (-41,4)
All-FOpt	00:24:33	103,1	100,8	1,20 (+ 6,2)	51,8 (+36,7)	66,2 (-44,4)
Ref 2	01:48:07	100,0	100,0	1,27 (+12,4)	46,2 (+21,9)	92,1 (-22,1)
Bonus	03:06:14	100,1	100,0	1,18 (+ 4,4)	40,2 (+ 6,1)	106,0 (-10,4)

Tabelle 12.1: Laufzeit, Kosten und Ähnlichkeitsbewertungen zur integrierten Umlauf- und Dienstplanung mit Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit den vorgeschlagenen Ansätzen zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen deutlich ähnlichere Ressourceneinsatzpläne bestimmen lassen als bei einer rein kosteneffizienten Planung. So kann z.B. der Anteil identisch bedienter Fahrten in Testset B (fast) ohne Steigerung der Kosten um 70% erhöht werden.

Um bessere Pläne erstellen zu können ist dabei eine wesentlich höhere Rechenzeit notwendig als ohne Einbeziehung von Ähnlichkeitszielen. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass im Rahmen des integrierten Lösungsverfahrens mehrmals ganzzahlige bzw. zulässige Umlauf- und Dienstpläne erzeugt werden, deren Bestimmung unter Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten rechentechnisch aufwändiger wird.

Zusammenfassung der Untersuchungen

Die zu Beginn dieses Abschnitts aufgestellten Fragen können mit den durchgeführten Untersuchungen wie folgt zusammenfassend beantwortet werden:

Im Rahmen einer integrierten Planung wird genug Spielraum geboten, um deutlich ähnlichere Pläne erstellen zu können als bei einer traditionellen kosteneffizienten Planung. Zusätzliche Freiheitsgrade für die Bestimmung ähnlicherer Pläne können dadurch geschaffen werden, dass die Lösung der Umlaufplanungsprobleme in den eingesetzten Verfahren geeignet an die Dienstplanung angepasst wird.

Wie bereits bei der teilintegrierten Planung lässt sich dabei nicht eindeutig festlegen, ob ähnlichere Pläne besser tageweise mit einem Referenzplan oder tagesübergreifend durch ähnliche Muster bestimmt werden können. In beiden Fällen werden ähnlichere Ressourceneinsatzpläne generiert.

Die relativen Verbesserungen der Ähnlichkeitskennzahlen jeweils bezogen auf die kosteneffizienten Lösungen sind mit den relativen Verbesserungen der anderen Planungsvarianten vergleichbar. Dabei ist anzumerken, dass im integrierten Fall zusätzlich kosteneffizientere Pläne als in den anderen Planungsvarianten erstellt werden können. So werden mit einer integrierten Planung in den beschriebenen Testsets bis zu drei Dienste je Tag weniger benötigt als im teilintegrierten Fall.

Kapitel 13

Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend vom Anwendungsfall der Umlauf- und Dienstplanung im ÖPNV wurde im Rahmen dieser Arbeit als wesentliche Forschungsfrage untersucht, wie regelmäßig und unregelmäßig stattfindende Aufgaben bei der Ressourceneinsatzplanung so eingeplant werden können, dass sowohl kosteneffiziente als auch zueinander ähnliche Ressourceneinsatzpläne für mehrere Tage entstehen. Die dafür entwickelten Optimierungsmodelle und -methoden schließen durch eine tagesübergreifende Betrachtung der Ressourceneinsatzplanung eine Lücke zum aktuellen Stand der Forschung. Sie vermeiden die in der Praxis nachteiligen Effekte, die beim Einsatz traditioneller Optimierungskomponenten für eine Optimierung pro Betriebstag entstehen. Neben der Erforschung von Lösungsansätzen zur Planung mit Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten sollte außerdem eine effiziente Lösbarkeit bei vielfältig variierenden praxisnahen Problemstellungen untersucht werden. Im Folgenden werden die einzelnen Kapitel mit ihren Zielbeiträgen für diese Arbeit zusammengefasst.

Nach einer Einführung in die Problemstellung in Kapitel 1, wurden in Kapitel 2 die Rahmenbedingungen der Umlauf- und Dienstplanung insbesondere im Hinblick auf das Einbeziehen von Ähnlichkeitsaspekten in den Planungsprozess im ÖPNV herausgearbeitet. Dabei wurden die Vorteile regelmäßiger bzw. ähnlicher Ressourceneinsatzpläne verdeutlicht, sowie Grenzen bei der Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten aufgezeigt. Als Ausgangspunkt für die Betrachtung des Forschungsstands und der entwickelten Lösungsansätze wurden in Kapitel 3 relevante Optimierungstechniken für eine Umlauf- und Dienstplanoptimierung dargestellt. In Kapitel 4 wurden sowohl bestehende Ansätze zur rein kosteneffizienten Umlauf- und Dienstplanung als auch Ansätze zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten in der Ressourceneinsatzplanung unterschiedlicher Problemdomänen bezüglich Haupt- und Nebenziel der Arbeit analysiert und diskutiert. Darauf aufbauend wurde in Kapitel 5 Handlungsbedarf zur Schaffung und Untersuchung neuer Lösungsansätze abgeleitet. Dabei wurden neben zwei grundlegenden Planungskonzepten zu leistende Schritte zur Erfüllung des Handlungsbedarfs herausgearbeitet, die im weiteren Verlauf der Arbeit aufgegriffen wurden.

Grundlegende Planungskonzepte zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten: Als Grundlage zur Entwicklung neuer Lösungsansätze wurden in Kapitel 5 aus der Unternehmenspraxis und den bisher in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Ansätzen zwei elementare Vorgehensweisen zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten in der Ressourceneinsatzplanung erarbeitet. Zum einen das Konzept der *tageweise ähnlichen Planung mit Hilfe eines Referenzplans* und zum anderen das Konzept der *tagesübergreifenden Planung mit Hilfe ähnlicher Fahrten- und Aufgabenmuster*.

Effizientes Optimierungssystem als Basis zur Planung über mehrere Tage: Als Voraussetzung für eine effiziente Betrachtung des Ressourceneinsatzes über mehrere Tage wurden traditionelle Optimierungsansätze zur kosteneffizienten Planung aus dem Stand der Forschung in einem Optimierungssystem umgesetzt und erweitert. In Kapitel 6 wurde das entstandene Basisframework dargestellt. Insbesondere wurden zur Diensterstellung Dienstelement-Abschnitt basierte Time-Space Dienstgenerierungsnetzwerke mit virtuellen Ebenen vorgeschlagen, die neben ihrer Eignung für eine Einbeziehung von Ähnlichkeitsaspekten, eine Reduktion der Laufzeit für größere Problemstellungen ermöglichen. Darüber hinaus wurde zur drastischen Laufzeitreduktion eine Parallelisierung der Diensterstellung, sowie geeignete heuristische Abbruchkriterien beim Finden ganzzahliger Lösungen im Lösungsverfahren untersucht. Zusätzlich wurde gezeigt, dass der Einsatz eines Label Categorizing-Verfahrens beim Lösen der Pricing-Probleme im verwendeten Column Generation-Ansatz zur Diversifikation der erstellten Spaltenmenge führen kann, sodass trotz heuristischer Lösung der Pricing-Probleme eine nahezu identische Lösungsqualität wie bei einer exakten Betrachtung erreicht werden kann.

Einbeziehung vielfältig ausgeprägter unternehmensspezifischer Regelungen in Modellierung und Lösungsverfahren: In Kapitel 7 wurden die Umsetzung der in der Planungspraxis zu berücksichtigenden vielfältigen Interaktionsmöglichkeiten zwischen Umläufen und Diensten in geeignete Modelle und effiziente Lösungsverfahren diskutiert. Dazu wurde eine umfassende Katalogisierung der Kombinationen aus Pausen-, Fahrzeugwechsel- und Ablösemöglichkeiten erarbeitet. Zusätzlich wurde eine Unterteilung in ortsabhängige und zeitabhängige Restriktionen vorgeschlagen. Die Restriktionen wurden als Erweiterungen des entwickelten Optimierungssystems unter Berücksichtigung der genutzten Time-Space Netzwerkstrukturen abgebildet. Mit einer Fallstudie zur (integrierten) Umlauf- und Dienstplanoptimierung in einer europäischen Großstadt wurde die praktische Einsatzfähigkeit des entwickelten Optimierungssystems belegt.

Bewertung von Ähnlichkeit: In Kapitel 8 wurde als Fragestellung untersucht, wie Ähnlichkeit des Ressourceneinsatzes bewertet bzw. messbar gemacht werden kann. Dazu wurde als grundlegendes Merkmal die Menge *r-regelmäßiger Fahrten bzw. Aufgaben* definiert. Darauf basierend wurden zum einen qualitative und quantitative Hilfsmittel vorgeschlagen, die eine Einschätzung erlauben, ob und für welche Fahrpläne ein ähnlicher Ressourceneinsatz im Hinblick auf die einzuplanenden Aufgaben zweckmäßig ist. Zum anderen wurde ein Kennzahlensystem ausgearbeitet, das in drei Dimensionen unterschiedliche Sichten auf die Ähnlichkeit des Ressourceneinsatzes abbildet. Die vorgeschlagenen Maße finden bei der Beurteilung der erstellten Pläne sowie in den entwickelten Lösungsansätzen zur Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen Anwendung.

Basislösungsansätze für eine Ressourceneinsatzplanung mit Ähnlichkeitszielen: Aufbauend auf den beiden zuvor erarbeiteten Grundkonzepten wurden in Kapitel 9 zwei universelle, für verschiedene Anwendungsbereiche nutzbare Modelle zur Planung mit Ähnlichkeitszielen entwickelt, sowie passende Lösungsstrategien vorgeschlagen und getestet. Das entwickelte Modell zur tageweisen Planung mit Referenzplan minimiert die Distanz der Lösung zu einem gegebenen oder ermittelten Referenzplan während sich eine elastische Kostenrestriktion dazu eignet, einen möglichen Trade-Off zwischen Kosteneffizienz und Ähnlichkeit zu steuern. Das entwickelte Modell zur tagesübergreifenden Planung ermöglicht eine gleichzeitige Ähnlichkeitsbewertung der Ressourceneinsätze mehrerer Tage, indem in Ressourceneinsätzen bediente Fahrten- bzw. Aufgabensequenzen in Regelmäßigkeitsgruppen einsortiert und entsprechend der Häufigkeit ihres Vorkommens bewertet werden. Für eine deutliche Laufzeitreduzierung beim Lösen größerer Planungsprobleme wurde eine Einbeziehung von Techniken zur Fixierung von Variablen basierend auf Lagrange-Heuristiken ins Lösungsverfahren vorgeschlagen. Zusätzlich wurden Preprocessing-Techniken vorgeschlagen, die durch eine Fixierung von Fahrtenketten zu einer Reduktion der zu betrachtenden Problemgröße beitragen können. Es wurde gezeigt, dass mit den beiden entworfenen Ansätzen die Ähnlichkeit des Ressourceneinsatzes deutlich erhöht werden kann ohne die Kosten im Vergleich zu einer rein kosteneffizienten Lösung steigern zu müssen. Darüber hinaus wurden die Effekte der Auswahl unterschiedlicher Referenzpläne untersucht und festgehalten, wann der Einsatz künstlich generierter Referenzpläne vorteilhaft sein könnte. Ebenso wurden Effekte der Auswahl unterschiedlicher Fahrtenmuster untersucht und festgehalten, dass mit zunehmender Anzahl berücksichtigter Muster auch die Ähnlichkeit des Ressourceneinsatzes erhöht werden kann.

Überführung der Ähnlichkeitsansätze in Varianten der Umlauf- und Dienstplanung: Aufbauend auf den generellen Modellierungen und Lösungsstra-

tegien wurde die Umsetzbarkeit des Referenzplan-basierten Ansatzes und des tagesübergreifenden Ansatzes mit Musterberücksichtigung in Varianten der Umlauf- und Dienstplanung untersucht, die unterschiedliche Flexibilität zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen bei der Planung bieten. Dazu wurden die beiden Basislösungsansätze überführt in Modelle und Lösungsverfahren für eine sequenzielle Planung in Kapitel 10, für eine teilintegrierte Planung in Kapitel 11, sowie für eine integrierte Planung in Kapitel 12. Als geeignet zur Abbildung von Ähnlichkeitsaspekten in den Lösungsverfahren stellte sich dabei die Entwicklung folgender Kernelemente in unterschiedlicher Ausprägung heraus: eine globale netzwerkübergreifende Dekomposition von Lösungsflüssen in Time-Space-Umlaufplanungsnetzwerken verschiedener Tage, sowie die Distanzberechnung zu einem Referenzplan bzw. eine Mustererkennung von ähnlichen Fahrtensequenzen in Algorithmen beim Lösen ressourcenbeschränkter Kürzeste-Wege-Probleme zur Generierung von Umläufen oder Diensten. Die neuen Lösungsansätze der verschiedenen Planungsvarianten wurden anhand ausführlicher Tests evaluiert, sowohl kosteneffiziente als auch ähnliche Umlauf- und Dienstpläne erstellen zu können. Dabei wurde gezeigt, dass in allen Planungsvarianten die Ähnlichkeit des Ressourceneinsatzes im Rahmen der gebotenen Flexibilität gesteigert werden kann, ohne die Kosten jeweils im Vergleich zu einer rein kosteneffizienten Planung erhöhen zu müssen.

Die vorliegende Arbeit eröffnet in mehrerer Hinsicht weitere Forschungsmöglichkeiten. So ist insbesondere eine Überführung der Basislösungsansätze zur Berücksichtigung von Ähnlichkeitszielen auch auf andere Anwendungsfälle außerhalb der ÖPNV-Domäne denkbar. Exemplarisch sei hier eine Unterstützung der Tourenplanung über mehrere Perioden in (getakteten) Logistiknetzwerken genannt, in denen die Regelmäßigkeit bzw. Ähnlichkeit der Transporte wichtig für Transparenz und Stabilität des Logistikprozesses ist. In eine vergleichbare Richtung zielt eine Unterstützung der Einsatzplanung von ambulanten Pflegediensten. Ähnliche Aufgaben- bzw. Kundensequenzen für das gleiche Pflegepersonal an unterschiedlichen Einsatz-tagen können aus Kunden- sowie aus Pflegersicht zu einer Kontinuität in der Pflege und somit auch zu einer Qualitätsverbesserung der erbrachten Pflegeleistung führen.

Aus methodischer Sicht bieten sich weitere Untersuchungen zu einer Reduktion der entstehenden Problemgrößen bei der Berücksichtigung von Ähnlichkeitsaspekten an. So könnte beispielsweise untersucht werden, inwiefern eine Kombination aus Row Generation und Column Generation für eine tagesübergreifende Planung mit Musterberücksichtigung zur Erzeugung von geeigneten Fahrten- bzw. Aufgabenmustern während des Lösungsprozesses geeignet ist. Darüber hinaus könnte für das Lösen großer Problemstellungen die Effizienz von hybriden Lösungsverfahren untersucht

werden, die die entwickelten Lösungsansätze und den Einsatz von Metaheuristiken verknüpfen.

Literaturverzeichnis

- [Abbink et al., 2011] Abbink, E., Albino, L., Dollevoet, T., Huisman, D., Roussado, J., und Saldanha, R. (2011). Solving large scale crew scheduling problems in practice. *Public Transport*, 3(2):149–164.
- [Abbink et al., 2005] Abbink, E., Fischetti, M., Kroon, L., Timmer, G., und Vromans, M. (2005). Reinventing crew scheduling at netherlands railways. *Interfaces*, 35(5):393–401.
- [Abbink et al., 2007] Abbink, E., vantWout, J., und Huisman, D. (2007). Solving Large Scale Crew Scheduling Problems by using Iterative Partitioning. *ATMOS 2007 – 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems*, pages 96 – 106.
- [Ad Opt, 2014] Ad Opt (2014). GENCOL. Verfügbar unter <http://www.ad-opt.com/optimization/why-optimization/column-generation/> (letzter Abruf 1.8.2014).
- [Ahuja et al., 1993] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., und Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, New Jersey.
- [Amberg, 2014] Amberg, B. (2014). *Robuste Effizienz des Ressourceneinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr*. PhD thesis, Freie Universität Berlin. – im Erscheinen.
- [Amberg et al., 2011] Amberg, B., Amberg, B., und Kliewer, N. (2011). Approaches for Increasing the Similarity of Resource Schedules in Public Transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20:836–845.
- [Amberg et al., 2012] Amberg, B., Amberg, B., und Kliewer, N. (2012). Integrated vehicle and crew scheduling in public transport with simultaneous consideration of timetables of different days. *Proceedings of the International Conference on Applied Mathematical Optimization and Modelling APMOD 2012*, pages 297–302.
- [Andersson et al., 1998] Andersson, E., Housos, E., Kohl, N., und Wedelin, D. (1998). Crew pairing optimization. In Yu, G., editor, *Operations Research in the Airline*

- Industry*, volume 9 of *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 228–258. Springer US.
- [Árgilán et al., 2010] Árgilán, V., Balogh, J., Békési, J., Dávid, B., Krész, M., und Tóth, A. (2010). A flexible system for optimizing public transportation. In *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Informatics, Eger*, volume 2, pages 181–190.
- [Árgilán et al., 2012] Árgilán, V., Balogh, J., Békési, J., Dávid, B., Krész, M., und Tóth, A. (2012). Driver scheduling based on driver-friendly vehicle schedules. In Klatte, D., Lüthi, H.-J., und Schmedders, K., editors, *Operations Research Proceedings 2011*, Operations Research Proceedings, pages 323–328. Springer Berlin Heidelberg.
- [Balas und Padberg, 1976] Balas, E. und Padberg, M. W. (1976). Set partitioning: A survey. *SIAM Review*, 18(4):710–760.
- [Ball et al., 1983] Ball, M., Bodin, L., und Dial, R. (1983). A matching based heuristic for scheduling mass transit crews and vehicles. *Transportation Science*, 17(1):4–31.
- [Barnhart et al., 1998] Barnhart, C., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W. P., und Vance, P. H. (1998). Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, 46:316–329.
- [Beasley, 1993] Beasley, J. E. (1993). Lagrangian relaxation. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, pages 243–303.
- [Beck, 2008] Beck, M. (2008). Integrierter Optimierungsansatz in der Umlauf- und Dienstbildung ermöglicht Kostensenkung und bessere Sozialverträglichkeit. *Verkehr und Technik*, 8:294–295.
- [Benchimol et al., 2012] Benchimol, P., Desaulniers, G., und Desrosiers, J. (2012). Stabilized dynamic constraint aggregation for solving set partitioning problems. *European Journal of Operational Research*, 223:360–371.
- [Bertossi et al., 1987] Bertossi, A. A., Carraresi, P., und Gallo, G. (1987). On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17:271–281.
- [Bertram und Winckler, 1988] Bertram, H.-H. und Winckler, J. (1988). Scheduling on microcomputers using microbus. In Daduna, J. und Wren, A., editors,

- Computer-Aided Transit Scheduling*, volume 308 of *Lecture Note in Economics Mathematical Systems*, pages 188–199. Springer Berlin Heidelberg.
- [Blais und Rousseau, 1988] Blais, J.-Y. und Rousseau, J.-M. (1988). Overview of hastus current and future versions. In Daduna, J. und Wren, A., editors, *Computer-Aided Transit Scheduling*, volume 308 of *Lecture Note in Economics Mathematical Systems*, pages 175–187. Springer Berlin Heidelberg.
- [Bodin et al., 1983] Bodin, L., Golden, B., Assad, A., und Ball, M. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, 10(2):63–67.
- [Borndörfer et al., 2001] Borndörfer, R., Grötschel, M., und Löbel, A. (2001). Scheduling duties by adaptive column generation – duty scheduling in public transit. *Technischer Bericht ZIB Report 01-02*.
- [Borndörfer et al., 2012] Borndörfer, R., Langenhan, A., Löbel, A., Schulz, C., und Weider, S. (2012). Duty Scheduling Templates. *Technischer Bericht ZIB Report 12-09*.
- [Borndörfer et al., 2013] Borndörfer, R., Löbel, A., Reuther, M., Schlechte, T., und Weider, S. (2013). Rapid Branching. *Public Transport*, 5(1-2):3–23.
- [Borndörfer et al., 2002] Borndörfer, R., Löbel, A., und Weider, S. (2002). Integrierte Umlauf- und Dienstplanung im Nahverkehr. *Technischer Bericht ZIB Report 02-10*.
- [Borndörfer et al., 2004] Borndörfer, R., Löbel, A., und Weider, S. (2004). A bundle method for integrated multi-depot vehicle and duty scheduling in public transit. *Technischer Bericht ZIB Report 04-14*.
- [Borndörfer et al., 2008] Borndörfer, R., Löbel, A., und Weider, S. (2008). A bundle method for integrated multi-depot vehicle and duty scheduling in public transit. In Hickmann, M., Mirchandani, P., und Voß, S., editors, *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, volume 600, pages 3–24.
- [Borndörfer et al., 2011] Borndörfer, R., Reuther, M., Schlechte, T., und Weider, S. (2011). A Hypergraph Model for Railway Vehicle Rotation Planning. *ATMOS 2011 – 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems*, pages 146–155.

- [Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2005] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2005). Verordnung zur Durchführung des Fahrpersonalgesetzes (Fahrpersonalverordnung - FPersV). (40):1882–1933.
- [Bunte, 2009] Bunte, S. (2009). *Lösungen für Anwendungsfälle der Fahrzeugeinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr*. PhD thesis, Universität Paderborn.
- [Bunte und Kliwer, 2009] Bunte, S. und Kliwer, N. (2009). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, (1):299–317.
- [Cadarsó et al., 2013] Cadarsó, L., Marín, Á., und Maróti, G. (2013). Recovery of disruptions in rapid transit networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 53:15–33.
- [Clausen et al., 2010] Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J., und Rezanova, N. (2010). Disruption management in the airline industry - concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, pages 809–821.
- [Daduna und Paixão, 1995] Daduna, J. R. und Paixão, J. M. P. (1995). Vehicle scheduling for public mass transit - an overview. *Proceedings of the Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, 430:76–90.
- [Dallaire et al., 2004] Dallaire, A., Fleurent, C., und Rousseau, J.-M. (2004). Dynamic constraint generation in crewopt, a column generation approach for transit crew scheduling. *Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT)*, pages 73–90.
- [Dávid, 2010] Dávid, B. (2010). Heuristics for the multiple-depot vehicle scheduling problem. In *Proceedings of the MATCOS-10 Conference, accepted for publication*.
- [De Leone et al., 2011] De Leone, R., Festa, P., und Marchitto, E. (2011). A Bus Driver Scheduling Problem: a new mathematical model and a GRASP approximate solution. *Journal of Heuristics*, 17(4):441–466.
- [Dell’Amico et al., 1993] Dell’Amico, M., Fischetti, M., und Toth, P. (1993). Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Management Science*, 39(1):115–125.
- [Desaulniers und Hickman, 2007] Desaulniers, G. und Hickman, M. D. (2007). Public Transit. *Handbooks in Operations Research & Management Science: Transportation Science*, 14:69–127.

- [Desaulniers et al., 1998] Desaulniers, G., Lavigne, J., und Soumis, F. (1998). Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs. *European Journal of Operational Research*, 111(3):479–494.
- [Desrochers et al., 1992] Desrochers, M., Gilbert, J., Sauvé, M., und Soumis, F. (1992). Crew-opt: Subproblem modeling in a column generation approach to urban crew scheduling. volume 386 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 395–406. Springer.
- [Desrochers und Soumis, 1989] Desrochers, M. und Soumis, F. (1989). A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem. *Transportation Science*, 1(23):1–13.
- [Desrosiers et al., 1995] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., und Soumis, F. (1995). Time constrained routing and scheduling. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 8:35–139.
- [Desrosiers und Lübbecke, 2005] Desrosiers, J. und Lübbecke, M. E. (2005). A primer in column generation. In Desaulniers, G., Desrosiers, J., und Solomon, M. M., editors, *Column Generation*, pages 1–32. Springer, Berlin.
- [Double-Click s.a.s, 2014] Double-Click s.a.s (2014). TURNI. Verfügbar unter <http://www.turni.it> (letzter Abruf 1.8.2014).
- [Dück, 2010] Dück, V. (2010). *Increasing stability of aircraft and crew schedules*. PhD thesis, Universität Paderborn.
- [Ehrgott, 2005] Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization*. (2nd Edition), Springer.
- [Ehrgott, 2006] Ehrgott, M. (2006). A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. *Annals of Operations Research*, 147(1):343–360.
- [Ehrgott und Ryan, 2002] Ehrgott, M. und Ryan, D. M. (2002). Constructing Robust Crew Schedules with Bicriteria Optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 11(3):139–150.
- [Ernst et al., 2004] Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., und Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153(1):3–27.

- [Falkner und Ryan, 1992] Falkner, J. und Ryan, D. M. (1992). Express: Set partitioning for bus crew scheduling in christchurch. *Computer-Aided Scheduling*, 386:359–378.
- [Fischetti und Lodi, 2003] Fischetti, M. und Lodi, A. (2003). Local branching. *Mathematical Programming*, 84(1):23–47.
- [Fischetti et al., 1987] Fischetti, M., Lodi, A., Martello, S., und Toth, P. (1987). The fixed job schedule problem with spread-time constraints. *Operations Research*, 35(6):849–858.
- [Fischetti et al., 1989] Fischetti, M., Lodi, A., Martello, S., und Toth, P. (1989). The fixed job schedule problem with working-time constraints. *Operations Research*, 37(3):395–403.
- [Fischetti et al., 2001] Fischetti, M., Lodi, A., Martello, S., und Toth, P. (2001). A polyhedral approach to simplified crew scheduling and vehicle scheduling problems. *Management Science*, 47(6):833–850.
- [Fleurent und Rousseau, 2007] Fleurent, C. und Rousseau, J.-M. (2007). Integrated vehicle and crew scheduling in practice. *Technical Report*.
- [Fores et al., 2002] Fores, S., Proll, L., und Wren, A. (2002). Tracs ii: a hybrid ip/heuristic driver scheduling system for public transport. *Journal of the Operational Research Society*, pages 1093–1100.
- [Freling, 1997] Freling, R. (1997). *Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling*. PhD thesis, Erasmus University of Rotterdam.
- [Friberg und Haase, 1999] Friberg, C. und Haase, K. (1999). An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem. *Computer-Aided Transit Scheduling*, 471:63–80.
- [Gaffi und Nonato, 1999] Gaffi, A. und Nonato, M. (1999). An integrated approach to ex-urban crew and vehicle scheduling. *Computer-Aided Transit Scheduling*, 471:103–128.
- [Garey und Johnson, 1979] Garey, M. und Johnson, D. (1979). *Computer and Intractability: A Guide to NP-Completeness*. Freeman, San Francisco.
- [Geoffrion, 1974] Geoffrion, A. M. (1974). Lagrangian relaxation for integer programming. *Mathematical Programming Study*, 2:82–114.

- [Gintner, 2008] Gintner, V. (2008). *Modelle und Lösungsverfahren für die integrierte Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr*. PhD thesis, Universität Paderborn.
- [Gintner et al., 2006] Gintner, V., Kramkowski, S., Steinzen, I., und Suhl, L. (2006). Adaptive Dienst- und Umlaufplanung im ÖPNV. *Operations Research Proceedings 2005*, pages 55–60.
- [GIRO Inc., 2014] GIRO Inc. (2014). HASTUS - Transit scheduling and operations. Verfügbar unter <http://www.giro.ca/en/solutions/bus-metro-tram> (letzter Abruf 1.8.2014).
- [Guntsch und Middendorf, 2003] Guntsch, M. und Middendorf, M. (2003). Solving multi-criteria optimization problems with population-based ACO. In Fonseca, C. M., Fleming, P. J., Zitzler, E., Deb, K., und Thiele, L., editors, *Evolutionary Multi-Criterion Optimization – Second International Conference, EMO 2003, Proceedings*, volume 2632 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 464–478, Berlin. Springer.
- [Haase et al., 2001] Haase, K., Desaulniers, G., und Desrosiers, J. (2001). Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, 35(1):286–303.
- [Held und Karp, 1971] Held, M. und Karp, R. M. (1971). The travelling salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, 1(1):6–25.
- [Holmberg und Yuan, 2005] Holmberg, K. und Yuan, D. (2005). A lagrangian heuristic based branch-and-bound approach for the capacitated network design problem. *Operations Research*, 48(3):461–481.
- [Huisman, 2004] Huisman, D. (2004). *Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling*. PhD thesis, Erasmus University of Rotterdam.
- [Huisman, 2007] Huisman, D. (2007). A Column Generation Approach to solve the Crew Re-Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 180(1):163–173.
- [Huisman et al., 2005] Huisman, D., Freling, R., und Wagelmans, A. P. (2005). Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling. *Transportation Science*, 39(4):491–502.

- [Irnich und Desaulniers, 2004] Irnich, S. und Desaulniers, G. (2004). Shortest path problems with resource constraints. Technical report, Les Cahiers du GERAD, HEC Montréal.
- [IVU Traffic Technologies AG, 2014] IVU Traffic Technologies AG (2014). IVU.suite. Verfügbar unter <http://www.ivu.de/produkte-loesungen/busse-bahnen.html> (letzter Abruf 1.8.2014).
- [Kiwiel, 1995] Kiwiel, K. C. (1995). Approximations in proximal bundle methods and decomposition of convex programs. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 84(3):529–548.
- [Klabjan et al., 2001] Klabjan, D., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Gelman, E., und Ramaswamy, S. (2001). Airline crew scheduling with regularity. *Transportation Science*, 35(4):359–374.
- [Kliwer, 2005] Kliwer, N. (2005). *Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr - Modelle, Methoden und praktische Anwendungen*. PhD thesis, Universität Paderborn.
- [Kliwer et al., 2012] Kliwer, N., Amberg, B., und Amberg, B. (2012). Multiple depot vehicle and crew scheduling with time windows for scheduled trips. *Public Transport*, 3(3):213–244.
- [Kliwer et al., 2006a] Kliwer, N., Bunte, S., und Suhl, L. (2006a). Time windows for scheduled trips in multiple depot vehicle scheduling. In *Proceedings of the EURO working group on transportation (EWGT) joint conferences 2006*, pages 340–346.
- [Kliwer et al., 2002] Kliwer, N., Mellouli, T., und Suhl, L. (2002). A new solution model for multi-depot multi-vehicle type vehicle scheduling (sub)urban public transport. *Proceedings of the 13th Mini-EURO conference and the 9th meeting of the EURO working group on transportation (EWGT)*.
- [Kliwer et al., 2006b] Kliwer, N., Mellouli, T., und Suhl, L. (2006b). A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research*, 175(3):1616–1627.
- [Löbel, 1997] Löbel, A. (1997). *Optimal Vehicle Scheduling in Public Transit*. PhD thesis, Technische Universität Berlin.
- [Löbel, 1998] Löbel, A. (1998). Vehicle scheduling in public transit and lagrangean pricing. *Technischer Bericht ZIB Report SC96-26*.

- [Löbel, 1999] Löbel, A. (1999). Solving large-scale multiple-depot vehicle scheduling problems. In Wilson, N., editor, *Computer-Aided Transit Scheduling*, volume 471 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 193–220. Springer Berlin Heidelberg.
- [Leuthardt, 2005] Leuthardt, H. (2005). Betriebskosten von Linienbussen im systematischen Vergleich – Ein Beitrag zur Ermittlung der Kosten eines durchschnittlich gut geführten Unternehmens. *Der Nahverkehr*, 23(11):20–25.
- [Lourenço et al., 2001a] Lourenço, H. R., Paixão, J. P., und Portugal, R. (2001a). The crew-scheduling module in the gist system. *Technischer Bericht, Universität Pompeu Fabra*.
- [Lourenço et al., 2001b] Lourenço, H. R., Paixão, J. P., und Portugal, R. (2001b). Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem. *Transportation Science*, 35(3):331–343.
- [Mesquita et al., 2011] Mesquita, M., Moz, M., Paias, A., Paixão, J., Pato, M., und Respício, A. (2011). A new model for the integrated vehicle-crew-rostering problem and a computational study on rosters. *Journal of Scheduling*, 14(4):319–334.
- [Mesquita et al., 2013] Mesquita, M., Moz, M., Paias, A., und Pato, M. (2013). A decomposition approach for the integrated vehicle-crew-roster problem with days-off pattern. *European Journal of Operational Research*, 229(2):318 – 331.
- [Mesquita und Paias, 2008] Mesquita, M. und Paias, A. (2008). Set partitioning/covering-based approaches for the integrated vehicle and crew scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35(5):1562–1575.
- [Mesquita et al., 2009] Mesquita, M., Paias, A., und Respício, A. (2009). Branching approaches for integrated vehicle and crew scheduling. *Public Transport*, 1(1):21–37.
- [Mingozzi et al., 1995] Mingozzi, A., Bianco, L., und Ricciardelli, S. (1995). An exact algorithm for combining vehicle trips. In Daduna, J., Branco, I., und Paixão, J., editors, *Computer-Aided Transit Scheduling*, volume 430 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 145–172. Springer Berlin Heidelberg.
- [Patrikalakis und Xerocostas, 1992] Patrikalakis, I. und Xerocostas, D. (1992). A new decomposition scheme of the urban public transport scheduling problem. *Computer-Aided Transit Scheduling: Proceedings of the Fifth International Workshop*, pages 407–425.

- [Pepin et al., 2009] Pepin, A.-S., Desaulniers, G., Hertz, A., und Huisman, D. (2009). A comparison of five heuristics for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 1(12):17–30.
- [Portugal et al., 2009] Portugal, R., Lourenço, H. R., und Paixão, J. P. (2009). Driver scheduling problem modelling. *Public Transport*, 1(2):103–120.
- [Potthoff, 2010] Potthoff, D. (2010). *Railway crew rescheduling: Novel approaches and extensions*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, Niederlande.
- [Potthoff et al., 2010] Potthoff, D., Huisman, D., und Desaulniers, G. (2010). Column generation with dynamic duty selection for railway crew rescheduling. *Transportation Science*, 44(4):493–505.
- [Ribeiro und Soumis, 1994] Ribeiro, C. und Soumis, F. (1994). A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Operations Research*, 1(42):41–52.
- [Ryan und Foster, 1981] Ryan, D. M. und Foster, B. (1981). An integer programming approach to scheduling. *Computer Scheduling of Public Transport: Urban Passenger Vehicle and Crew Scheduling*, pages 269–280.
- [Saddoune et al., 2013] Saddoune, M., Desaulniers, G., und Soumis, F. (2013). Air-crew pairings with possible repetitions of the same flight number. *Computers & Operations Research*, 40:805–814.
- [Scholl, 2001] Scholl, A. (2001). *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen - Konzepte und Methoden - Experimentelle Untersuchungen*. Physica-Verlag Heidelberg.
- [Serafini, 1994] Serafini, P. (1994). Simulated annealing for multi objective optimization problems. In *Multiple criteria decision making*, pages 283–292. Springer.
- [Steinzen, 2007] Steinzen, I. (2007). *Topics in Integrated Vehicle and Crew Scheduling in Public Transport*. PhD thesis, Universität Paderborn.
- [Steinzen et al., 2010] Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., und Kliewer, N. (2010). A time-space network approach for the integrated vehicle- and crew-scheduling problem with multiple depots. *Transportation Science*, 44(3):367–382.
- [Steinzen et al., 2009] Steinzen, I., Suhl, L., und Kliewer, N. (2009). Branching strategies to improve regularity of crew schedules in ex-urban public transit. *OR Spectrum*, 31:727–743.

- [Tajima und Misono, 1997] Tajima, A. und Misono, S. (1997). Airline crew-scheduling problem with many irregular flights. In *ISAAC '97: Proceedings of the 8th International Symposium on Algorithms and Computation*, pages 2–11, London, UK. Springer-Verlag.
- [Tam, 2011] Tam, B. (2011). *Optimisation Approaches for Robust Airline Crew Scheduling*. PhD thesis, University of Auckland, New Zealand.
- [Vance et al., 1997] Vance, P. H., Atamtürk, A., Barnhart, C., Gelman, E., Johnson, E. L., Krishna, A., Mahidhara, D., und Rebello, R. (1997). A heuristic branch-and-price approach for the airline crew pairing problem. *Technical Report LEC-97-06, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA*.
- [Veelenturf et al., 2012] Veelenturf, L. P., Potthoff, D., Huisman, D., und Kroon, L. G. (2012). Railway crew rescheduling with retiming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1):95–110.
- [Weide, 2009] Weide, O. (2009). *Robust and Integrated Airline Scheduling*. PhD thesis, University of Auckland, New Zealand.
- [Weider, 2007] Weider, S. (2007). *Integration of Vehicle and Duty Scheduling in Public Transport*. PhD thesis, Technische Universität Berlin.
- [Wolsey, 1998] Wolsey, L. A. (1998). *Integer Programming*. John Wiley & Sons, New York.
- [Wren, 2004] Wren, A. (2004). Scheduling Vehicles and their Drivers – Forty Years’ Experience. *Technical Report 2004.03, University of Leeds - School of Computing, UK*.
- [Xie et al., 2012] Xie, L., Amberg, B., und Suhl, L. (2012). A vehicle-crew-scheduling-and-rostering approach for improving driver satisfaction in public bus transport. *Technischer Bericht 08/2012, Universität Paderborn, DS&OR Lab*.
- [Zitzler et al., 2002] Zitzler, E., Laumanns, M., und Thiele, L. (2002). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization. *Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control*, (4):19–26.

Anhang A

Anhang – Testinstanzen

A.1 Dienstarten

Zur Diensterstellung im Rahmen der durchgeführten Tests zur Planung mit Ähnlichkeitszielen werden fünf Diensttypen erlaubt, die die Zulässigkeit der zu erstellenden Dienste bestimmen: Kurzdienste, drei Arten zusammenhängender Dienste, die sich aus unterschiedlicher Anzahl Pausen ergeben, und geteilte Dienste (siehe Tabelle A.1). Kurzdienste bestehen aus einem Dienstteil mit bis zu 5:00h Schichtdauer. Geteilte Dienste müssen spätestens um 19:30 Uhr beendet sein.

	zusammenh. Dienst		geteilter Dienst	
	Min	Max	Min	Max
Dienstdauer	05:30	09:45	05:30	12:00
Arbeitszeit	05:30	09:45	05:30	09:00
Lenkzeit	04:30	08:45	00:10	08:45
Ununterbrochene Lenkzeit	00:10	04:30	00:10	04:30
Lenkzeitunterbrechung	00:15	00:45	00:15	00:45
Gesamtpausenzeit	00:45	01:30	00:00	–
Dienstunterbrechung	–	–	01:30	06:00
# Dienststücke/-teile	3	5	2	2

Tabelle A.1: Generelle Eigenschaften der Dienstarten (mit Zeiten in hh:mm)

A.2 Instanzen

Zu den verwendeten Testinstanzen zeigen Abbildungen A.1 bis A.4 die jeweilige Lage regelmäßiger und unregelmäßiger Fahrten im Tagesverlauf. Die Tabellen A.2 bis A.5 fassen Kenngrößen für die jeweiligen Instanzensets zusammen. Testset A stellt dabei eine Untermenge aus dem Testset B dar.

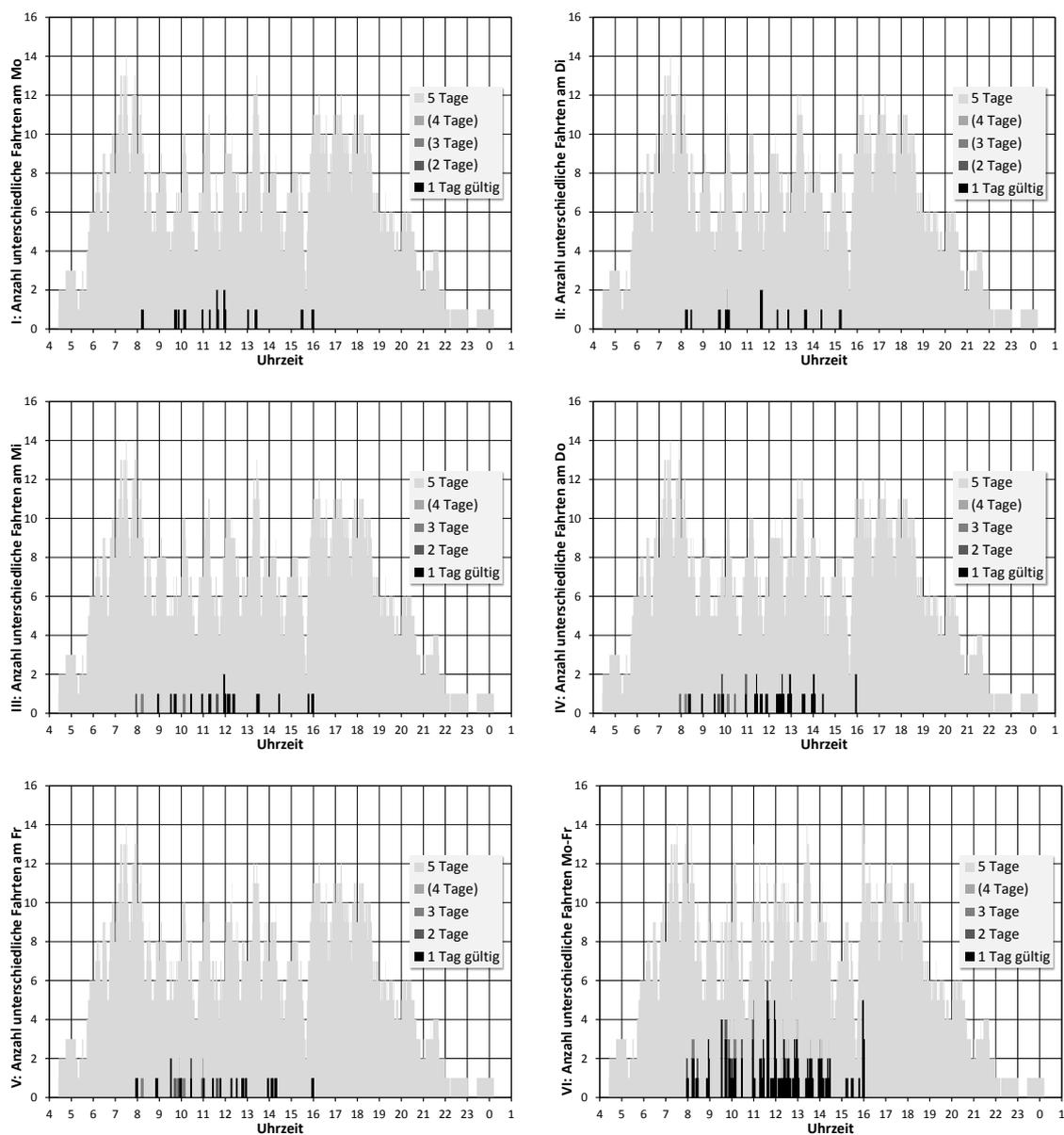


Abbildung A.1: Testinstanzenset A

Fahrten: Tag #	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	hh:mm	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	
	5	4	3	2	1			5	4	3	2	1		
	278	69,4	0	0,7	2,2	27,7	15,1	130:01	92,6	0	0,2	0,5	6,7	3,2
Mo	207	93,2	0	0	0	6,8		122:00	98,7	0	0	0	1,3	
Di	205	94,2	0	0	0	5,9		121:47	98,9	0	0	0	1,1	
Mi	211	91,5	0	1,0	1,0	6,6		122:30	98,3	0	0,2	0,2	1,3	
Do	220	87,7	0	0,9	2,3	9,1		123:37	97,4	0	0,2	0,4	2,0	
Fr	217	88,9	0	0,9	2,3	7,8		122:59	97,9	0	0,2	0,4	1,4	

Tabelle A.2: Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset A

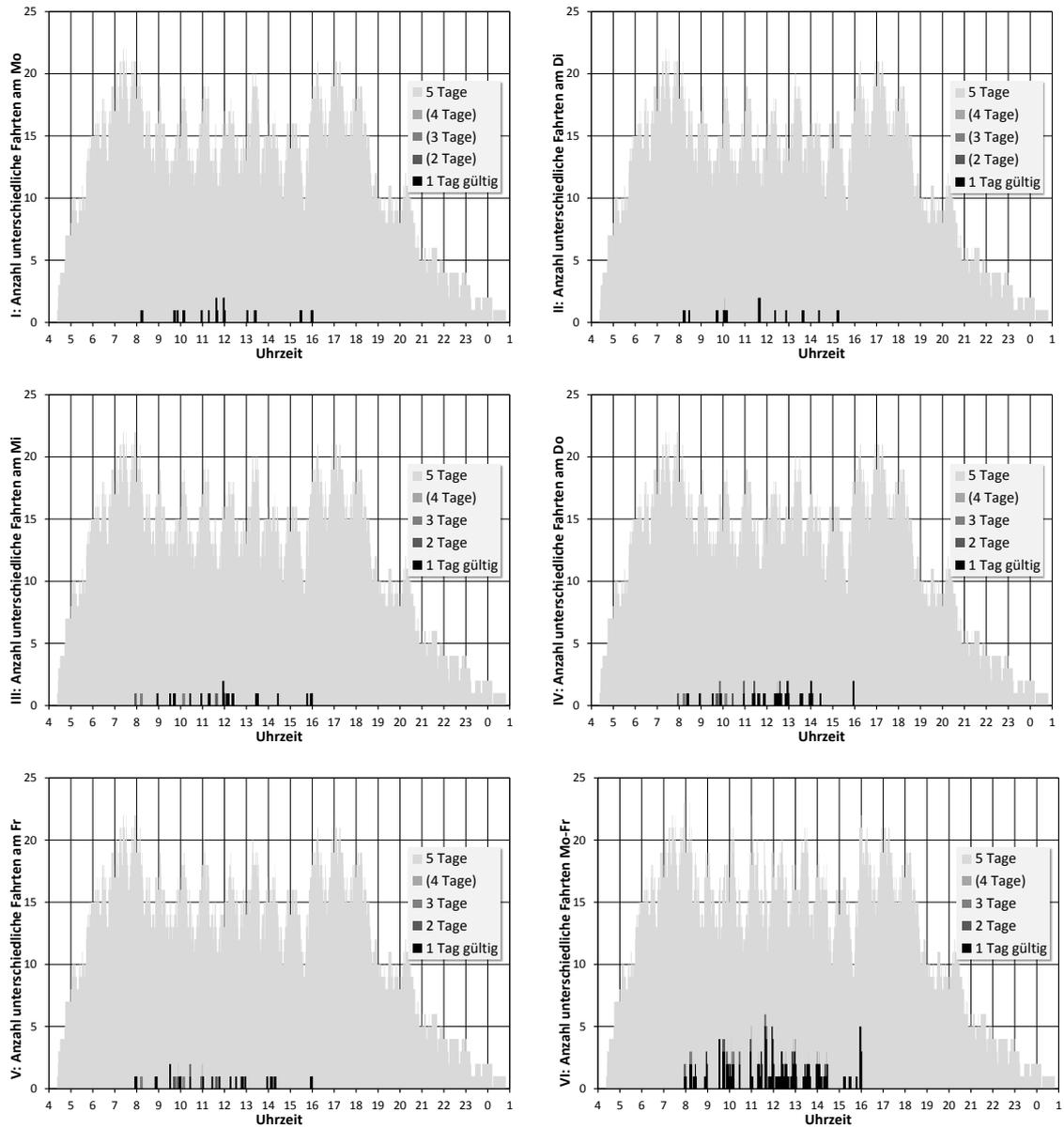


Abbildung A.2: Testinstanzenzenst B

Fahrten: Tag	#	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	hh:mm	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.
		5	4	3	2	1			5	4	3	2	1	
	494	82,8	0	0,4	1,2	15,6	7,8	250:58	96,2	0	0,1	0,2	3,5	1,6
Mo	423	96,7	0	0	0	3,3		242:57	99,4	0	0	0	0,6	
Di	421	97,1	0	0	0	2,9		242:44	99,4	0	0	0	0,6	
Mi	427	95,8	0	0,5	0,5	3,3		243:27	99,1	0	0,1	0,1	0,7	
Do	436	93,8	0	0,5	1,1	4,6		244:34	98,7	0	0,1	0,2	1,0	
Fr	433	94,5	0	0,5	1,1	3,9		243:56	99,0	0	0,1	0,2	0,7	

Tabelle A.3: Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset B

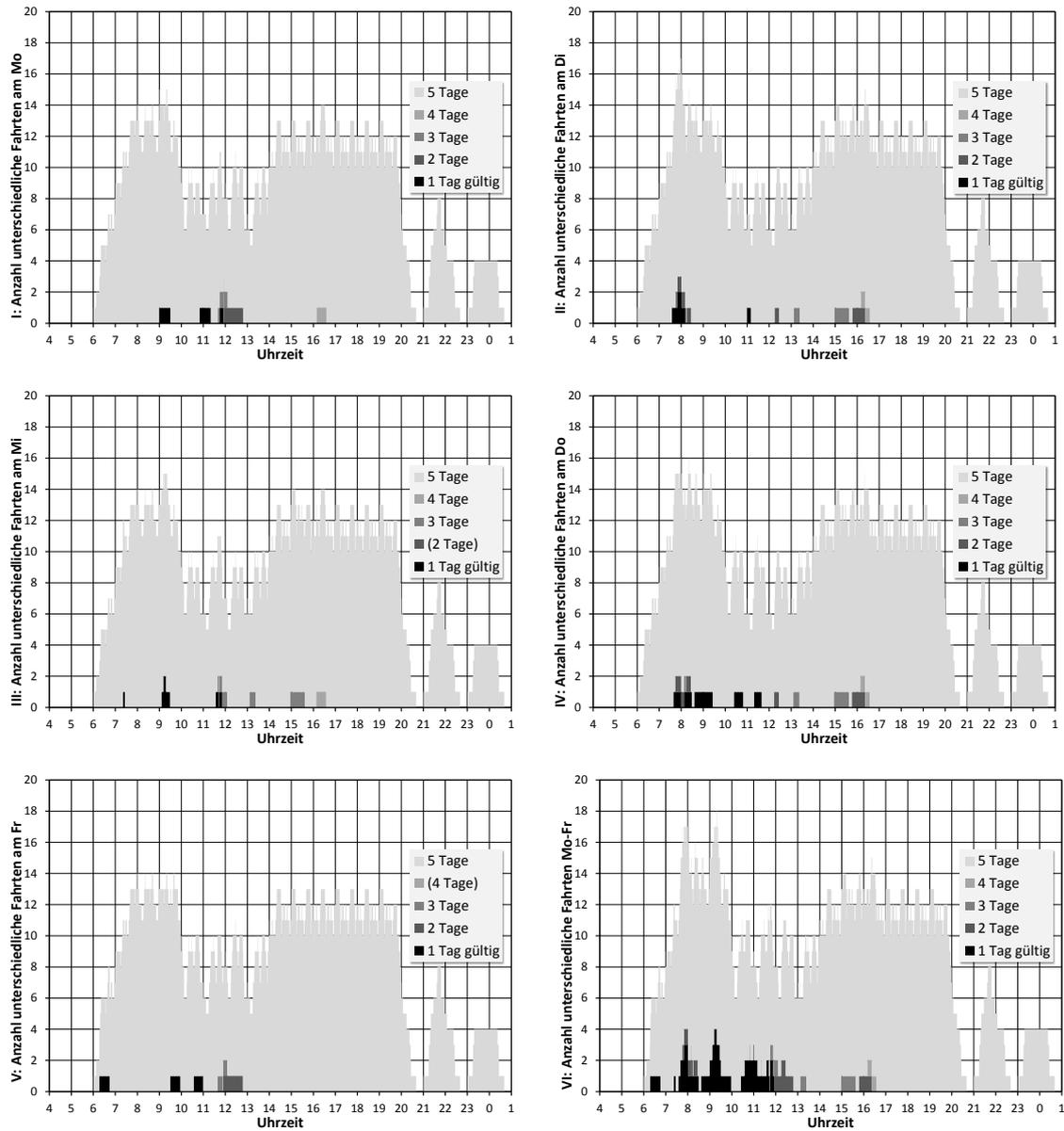


Abbildung A.3: Testinstanzen set C

Fahrten: Tag #	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	hh:mm	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	
	5	4	3	2	1			5	4	3	2	1		
	189	84,7	0,5	1,6	2,6	10,6	7,6	162:6	93,5	0,3	0,8	1,4	4,0	3,0
Mo	166	96,4	0,6	0,6	0,6	1,8		154:24	98,1	0,3	0,3	0,6	0,8	
Di	171	93,6	0,6	1,2	2,3	2,3		155:13	97,6	0,3	0,6	0,9	0,6	
Mi	169	94,6	0,6	1,8	0	3,0		154:07	98,3	0,3	0,9	0	0,5	
Do	172	93,0	0,6	1,2	2,3	2,9		156:33	96,8	0,3	0,6	0,9	1,4	
Fr	165	97,0	0	0,6	0,6	1,8		154:08	98,3	0	0,3	0,6	0,8	

Tabelle A.4: Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset C

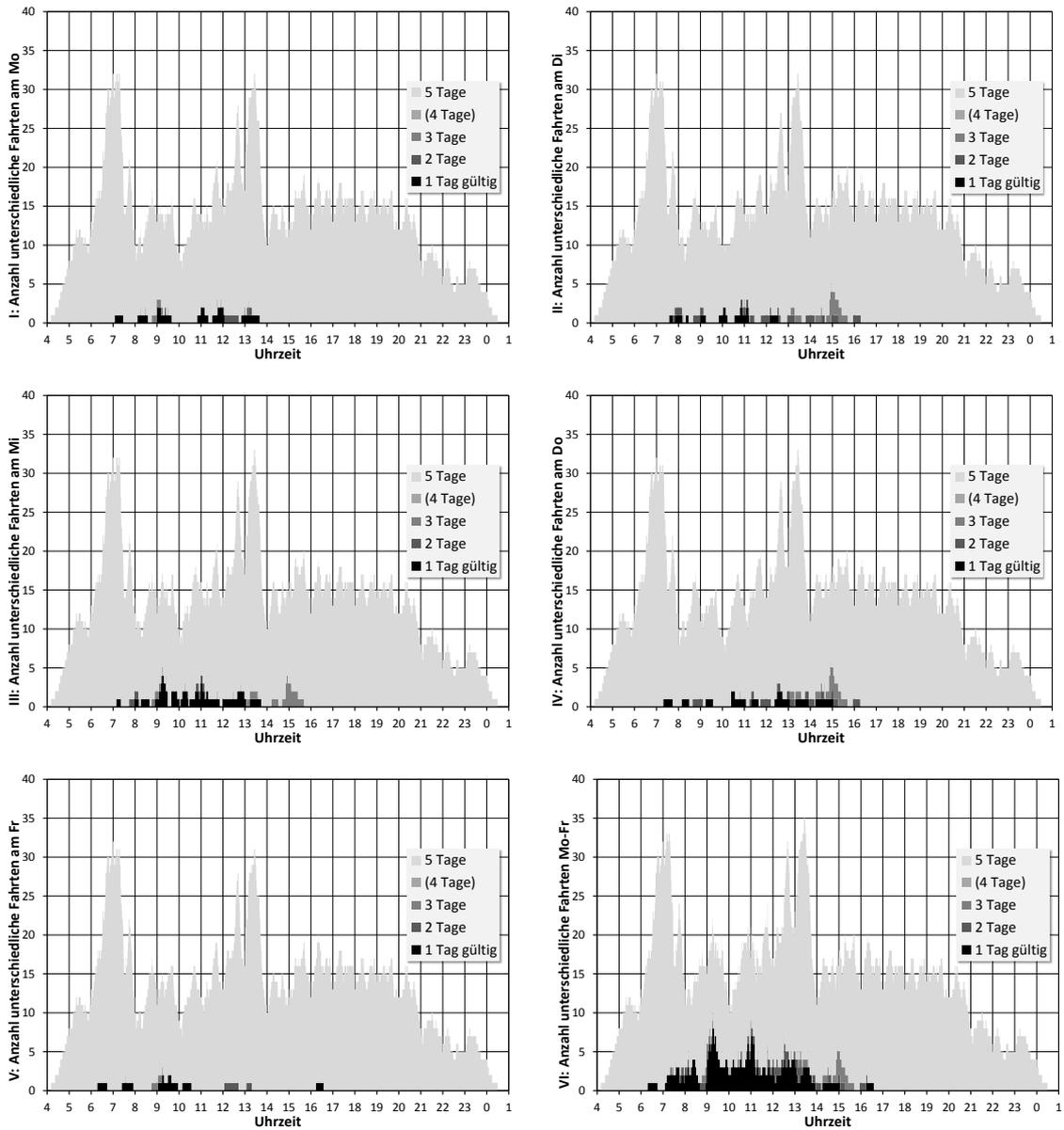


Abbildung A.4: Testinstanzen set D

Fahrten: Tag	Fahrten: #	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.	hh:mm	Gültigkeit an x Tagen (%)					P- Vgl.
		5	4	3	2	1			5	4	3	2	1	
	321	70,4	0	2,5	4,1	23,0	16,4	292:26	90,1	0	1,1	1,6	7,2	4,9
Mo	246	91,9	0	0,4	0,8	6,9		269:01	98,0	0	0,2	0,3	1,5	
Di	255	88,6	0	2,8	4,3	4,3		272:32	96,7	0	0,9	1,4	1,0	
Mi	262	86,3	0	3,0	0,8	9,9		274:36	96,0	0	1,1	0,3	2,6	
Do	254	89,0	0	2,8	3,5	4,7		273:38	96,3	0	0,9	1,0	1,7	
Fr	237	95,4	0	0,4	0,8	3,4		267:49	98,4	0	0,2	0,3	1,1	

Tabelle A.5: Gültigkeit der Anzahl und Dauer der Servicefahrten in Testset D

Anhang B

Anhang – Beispiele zur Reduktion von Fahrtenpaaren

Zu den Methoden in Abschnitt 9.3.4 zeigen die Tabellen B.1 und B.2 die mögliche Reduktion von Fahrtenpaaren am Beispiel eines realen Fahrplanes mit 129 Endhaltestellen und 1.356 Fahrten. Neben der maximalen Anzahl bei der Bildung der Fahrtenpaare berücksichtigter Nachfolgefahrten je Haltestelle (*Max Anzahl Nachfolger*) ist der berücksichtigte *Zeitraum (in Minuten)* angegeben in welchem die Nachfolgefahrten liegen müssen. Als Ergebnis sind aufgelistet die Gesamtanzahl erstellter Fahrtenpaare (*# Fahrtenpaare Gesamt*) und der Anteil bezogen auf die maximale Gesamtanzahl (*# Fahrtenpaare in %*), sowie die durchschnittlich pro Fahrt erstellten Fahrtenpaare (*Avg*), die Varianz dazu (*Var*) und die maximal mit einer Fahrt erstellten Fahrtenpaare (*Max*).

In Tabelle B.1 ist die mögliche Reduktion von Fahrtenpaaren aufgeführt, wenn für jede Fahrt des Fahrplans Fahrtenpaare gebildet werden mit den nächsten Nachfolgefahrten an allen Haltestellen (I). Dabei ist der Zeitraum in welchem die Nachfolgefahrten liegen dürfen nicht eingeschränkt.

Max Anzahl Nachfolger	Zeitraum (in Minuten)	# Fahrtenpaare Gesamt	in %	Avg	Var	Max
alle	–	836.870	100,00	617,16	332,00	1.326
50	–	823.374	98,39	607,21	321,77	1.234
10	–	478.027	57,23	352,52	132,60	562
5	–	318.987	38,12	235,24	77,96	369
4	–	277.769	33,19	204,84	66,02	322
3	–	230.205	27,51	169,77	53,60	268
2	–	174.234	20,82	128,49	40,87	205
1	–	98.367	11,75	72,54	22,63	119

Tabelle B.1: Beispiel (I) zur Reduktion von zu berücksichtigenden Fahrtenpaaren bei Nutzung der nächsten Nachfolgefahrten an 129 Haltestellen bei einem Fahrplan mit 1.356 Fahrten

Aus Tabelle B.1 ist zu erkennen, dass es für den Beispielfahrplan mit 129 Haltestellen und 1.356 Fahrten maximal 836.670 Möglichkeiten gibt, kompatible Fahrtenpaare

zu bilden. Falls je Fahrt an jeder Haltestelle nur die nächste erreichbare Fahrt zur Fahrtenpaarbildung genutzt wird, reduziert sich die Anzahl zu berücksichtigender Fahrtenpaare deutlich auf ca. 12% der Gesamtanzahl. Allerdings ist es nicht praktikabel nur jeweils den zeitlich nächste mögliche Nachfolgefahrt einzubeziehen, da dadurch die Freiheitsgrade beim Bilden ähnlicher Umlaufpläne zu stark eingeschränkt werden. Werden allerdings zwei oder mehr Nachfolgefahrten je Haltestelle zugelassen, erhöht sich die berücksichtigte Anzahl deutlich auf ca. 21% und mehr. Um die Anzahl der Fahrtenpaare nicht zu groß werden zu lassen, ist es also besser, statt eine festgelegte Anzahl zu berücksichtigen, zeitlich einzugrenzen, in welchem Zeitraum Nachfolgefahrten liegen dürfen.

Tabelle B.2 listet die mögliche Reduktion von Fahrtenpaaren auf anhand der Methoden (II), (III) und (IV), die Paare in unterschiedlich definierten Zeiträumen bilden. Die Anzahl der Nachfolgefahrten ist dabei nicht eingeschränkt. Es sind also Werte angegeben, wenn für jede Fahrt des Fahrplans Fahrtenpaare gebildet werden dürfen mit der nächsten Nachfolgefahrt an allen Haltestellen und allen in einem bestimmten Zeitraum ab Start der ersten Nachfolgefahrt liegenden Fahrten (II), mit den nächsten Fahrten, die in einem bestimmten Wartezeitraum liegen, d.h. nach Erreichen der Starthaltestelle der nächsten Fahrt (durch eine Leerfahrt) (III), sowie mit den nächsten Fahrten, die in einem bestimmten Zeitraum nach Ende der ersten Fahrt liegen (IV).

Tabelle B.2 zeigt, dass mit der Reduktionsmethodik (II) eine kleinschrittigere Reduktion der einbezogenen Fahrtenpaare möglich ist als mit Methode (I) in Tabelle B.1. Variiert der erlaubte Zeitraum z.B. zwischen 60 und 0 Minuten ab Beginn der nächsten erreichbaren Fahrt, verkleinert sich die Anzahl der betrachteten Fahrtenpaare gut steuerbar zwischen ca. 24% und ca. 12% der Gesamtanzahl möglicher Fahrtenpaare. Allerdings lässt sich die Fahrtenpaaranzahl nicht weiter reduzieren wenn Fahrten an allen Haltestellen betrachtet werden (Leerfahrtenvariante A), da die Vorgabe besteht, mindestens die nächste Fahrt an den Haltestellen zu berücksichtigen - also werden mindestens 98.367 Fahrtenpaare erzeugt. Eine Reduktion wäre möglich, wenn die betrachteten Haltestellen eingegrenzt werden (Leerfahrtenvariante B). Oder wenn lediglich die Fahrten zur Paarbildung berücksichtigt werden, die in einem bestimmten Zeitraum liegen - siehe Reduktionsmethoden (III) und (IV).

Für Methodik (III) zeigt Tabelle B.2, dass durch eine zeitliche Beschränkung der in eine Fahrtenpaarbildung einzubeziehenden Fahrten die Anzahl der gebildeten Fahrtenpaare drastisch reduziert werden kann - auf bis zu unter einem Prozent aller möglichen Fahrtenpaare. Allerdings schließt ein knapp gewählter Zeitraum von unter 10

Max Anzahl Nachfolger	Zeitraum (in Minuten)	Auswahl	# Fahrtenpaare Gesamt	in %	Avg	Var	Max
alle	1.380	(II)	836.870	100,00	617,16	332,00	1.326
alle	1.380	(III)	836.870	100,00	617,16	332,00	1.326
alle	1.380	(IV)	836.870	100,00	617,16	332,00	1.326
alle	1.200	(II)	836.870	100,00	617,16	332,00	1.326
alle	1.200	(III)	836.860	99,99	617,15	331,99	1.322
alle	1.200	(IV)	836.808	99,99	617,12	331,95	1.320
alle	600	(II)	749.913	89,61	553,03	270,04	937
alle	600	(III)	713.728	85,29	526,35	246,45	855
alle	600	(IV)	703.370	84,05	518,71	240,15	843
alle	300	(II)	516.035	61,66	380,56	142,01	551
alle	300	(III)	425.933	50,90	314,11	103,62	433
alle	300	(IV)	406.625	48,59	299,87	98,10	422
alle	120	(II)	295.091	35,26	217,62	62,71	325
alle	120	(III)	175.303	20,95	129,28	32,01	206
alle	120	(IV)	153.621	18,36	113,29	30,02	193
alle	60	(II)	199.050	23,79	146,79	40,02	229
alle	60	(III)	80.379	9,60	59,28	15,00	111
alle	60	(IV)	58.539	6,99	43,17	13,88	93
alle	30	(II)	140.887	16,83	103,90	29,18	169
alle	30	(III)	30.746	3,67	22,67	7,20	60
alle	30	(IV)	15.197	1,82	11,21	5,41	45
alle	20	(II)	116.582	13,93	85,97	27,55	144
alle	20	(III)	15.263	1,82	11,26	4,69	40
alle	20	(IV)	6.275	0,75	4,63	2,61	22
alle	10	(II)	102.523	12,25	75,61	25,02	128
alle	10	(III)	3.588	0,43	2,65	1,59	13
alle	10	(IV)	1.693	0,20	1,25	0,82	8
alle	5	(II)	100.577	12,02	74,17	23,77	123
alle	5	(III)	1.200	0,14	0,88	0,68	6
alle	5	(IV)	965	0,12	0,71	0,69	6
alle	4	(II)	99.659	11,91	73,49	23,33	122
alle	4	(III)	1.023	0,12	0,75	0,71	6
alle	4	(IV)	726	0,09	0,54	0,59	6
alle	3	(II)	99.534	11,89	73,40	23,23	122
alle	3	(III)	684	0,08	0,50	0,69	6
alle	3	(IV)	424	0,05	0,31	0,46	4
alle	2	(II)	98.872	11,81	72,91	22,69	120
alle	2	(III)	288	0,03	0,21	0,35	6
alle	2	(IV)	227	0,03	0,17	0,28	4
alle	1	(II)	98.781	11,80	72,85	22,64	120
alle	1	(III)	159	0,02	0,12	0,21	3
alle	1	(IV)	130	0,02	0,10	0,18	3
alle	0	(II)	98.367	11,75	72,54	22,63	119
alle	0	(III)	83	0,01	0,06	0,12	3
alle	0	(IV)	83	0,01	0,06	0,12	3

Tabelle B.2: Beispiele (II), (III) und (III) zur Reduktion von zu berücksichtigenden Fahrtenpaaren bei Nutzung der nächsten Nachfolgefahrten an 129 Haltestellen in nach (II), (III) und (IV) definierten Zeiträumen bei einem Fahrplan mit 1.356 Fahrten

Minuten viele mögliche Fahrtenpaare aus, sodass Freiheitsgrade bei der Bestimmung ähnlicher Ressourceneinsatzpläne eingeschränkt werden können.

Zu Methode (IV) ist Tabelle B.2 entnehmbar, dass ebenso die Anzahl berücksichtigter Fahrtenpaare stark reduziert werden kann. Sollen dabei die Freiheitsgrade nicht zu sehr beschränkt werden, darf der Zeitraum ebenfalls nicht zu kurz gewählt werden.