

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der Planungsprozess im ÖPNV</b>	<b>7</b>
2.1	Strategische und operative Planung . . . . .	7
2.2	Planungsschritte der operativen Planung . . . . .	9
2.2.1	Linienplanung . . . . .	10
2.2.2	Fahrplanerstellung . . . . .	11
2.2.3	Fahrzucugumlaufplanung . . . . .	11
2.2.4	Dienstplanung . . . . .	12
2.2.5	Reihenfolge der Planungsschritte . . . . .	14
2.3	Umlaufbildung als Aufgabe der operativen Ressourceneinsatzplanung	14
2.3.1	Mehrdepot-Umlaufplanung . . . . .	17
2.3.2	Kennzahlen für die Bewertung der Umlaufpläne . . . . .	17
2.3.3	Praktische Anforderungen an die Umlaufplanung . . . . .	19
2.4	Umlaufplanungswerkzeuge mit Einsatz von Optimierungsmethoden	24
<b>3</b>	<b>Mehrdepot-Umlaufplanung - Stand der Forschung</b>	<b>27</b>
3.1	Mathematische Optimierung . . . . .	27
3.1.1	Branch-and-Bound Verfahren . . . . .	29
3.1.2	Heuristische Verfahren . . . . .	31
3.2	Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem . . . . .	31
3.3	Grundlegende Modellierungsansätze . . . . .	33
3.3.1	Mehrgüter-Fluss-Modelle . . . . .	34
3.3.2	Quasi-Assignment-Modelle . . . . .	40
3.3.3	Set-Partitioning-Modelle . . . . .	44
3.3.4	Spezielle Aspekte der Modellierung . . . . .	45
3.3.5	Zielfunktionen und Kostenbeachtung . . . . .	47
3.4	Lösungsansätze . . . . .	50
3.4.1	Exakte Ansätze . . . . .	51
3.4.2	Heuristische Ansätze . . . . .	56
3.5	Motivation für eine alternative Modellierung . . . . .	59

<b>4</b>	<b>TSN-basierte Modellierung und Lösung</b>	<b>61</b>
4.1	Modellierung	62
4.1.1	Das Netzwerk	63
4.1.2	Das Flussmodell	69
4.1.3	Das mathematische Modell	70
4.1.4	Einfaches Beispiel für den Netzwerkaufbau	74
4.2	Lösungsansatz	81
4.3	Numerische Ergebnisse	81
4.3.1	Probleminstanzen und Testergebnisse	82
4.3.2	Wahl des LP-Verfahrens: Laufzeitanalyse	85
4.3.3	Minimierung der Fahrzeuganzahl	86
<b>5</b>	<b>Flussdekomposition für TSN</b>	<b>87</b>
5.1	Dekomposition der Flüsse in Wege	87
5.2	Die Dekompositionsstrategien	88
5.2.1	<i>FIFO</i> : First In First Out	90
5.2.2	<i>LIFO</i> : Last In First Out	90
5.2.3	<i>MinAlternation</i> : Greedy-Verknüpfung	91
5.2.4	Zuordnungsproblem-Strategien	91
5.2.5	Vorsortierung der Haltestellen	95
5.2.6	Globale Dekompositionsstrategie: <i>SPP</i>	95
5.3	Numerische Ergebnisse	96
<b>6</b>	<b>Einbeziehung praktischer Randbedingungen und Zielsetzungen</b>	<b>99</b>
6.1	Multikriterielle Optimierung: Kosten und Linienreinheit	99
6.1.1	Linienkanten im Netzwerkmodell	100
6.1.2	Erweiterung des mathematischen Modells	101
6.1.3	Ergebnisse	102
6.2	Verschiebeintervalle für Fahrten	106
6.2.1	Erweiterung des Netzwerkmodells	107
6.2.2	Erweiterung des mathematischen Modells	113
6.2.3	Verschiebbare Fahrten	115
6.2.4	Testergebnisse	118
6.2.5	Überlegungen zu der Anschlussfahrten-Problematik	129
6.3	Das Depotgruppen-Konzept	129
6.3.1	Einsatzmöglichkeit	130
6.3.2	Modellierung	131
6.3.3	Ergebnisse	134
6.4	Weitere praktische Aspekte	138
6.4.1	Kapazitäten	138
6.4.2	Mindestaufenthaltszeit im Depot	139
6.4.3	Tageszeitabhängige Verbindungsdauer und -Entfernung	140
6.4.4	Vergabe von Fahrten	141

---

6.4.5	Vorbereitungs- und Wendezeiten . . . . .	141
<b>7</b>	<b>Maßnahmen zur Kostensenkung in der Umlaufplanung</b>	<b>143</b>
7.1	Untersuchte Instanzen . . . . .	143
7.2	Linienbündelung . . . . .	144
7.2.1	Tests an ausgewählten Instanzen . . . . .	146
7.3	Fahrzeugtypgruppen . . . . .	149
7.3.1	Testergebnisse . . . . .	151
7.3.2	Zusammenfassung . . . . .	154
7.4	Mehrdepotplanung . . . . .	154
7.4.1	Klassische Mehrdepotplanung . . . . .	155
7.4.2	Depotgruppen für gleitende Fahrzeug-Depot-Zuordnung . . .	159
7.5	Zusammenfassung . . . . .	163
<b>8</b>	<b>Lösungsansätze für sehr große Probleminstanzen</b>	<b>165</b>
8.1	Problemdekomposition im Preprocessing . . . . .	165
8.2	Lambda-gesteuerte Reduktion der Verbindungsanten . . . . .	167
8.3	Sequenzielles Scheduling und Clustering . . . . .	168
8.4	Fahrtenketten-Heuristik: Fix-and-Optimize Methode . . . . .	169
8.4.1	Phase 1 . . . . .	169
8.4.2	Phase 2 . . . . .	169
8.4.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	173
8.4.4	Automatische Erstellung vereinfachter Probleme . . . . .	185
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>187</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Planungsprozess im ÖPNV . . . . .	8
2.2	Ausschnitt aus einem Liniennetz von PaderSprinter, Paderborn . . .	10
2.3	Typische Fahrtenmengen eines Betriebstages . . . . .	12
3.1	Ein Netzwerk-Fluss-Modell für das MDVSP . . . . .	34
3.2	Transformation eines SDVSP zu einem minimalc-Kosten-Flussproblem in Anlehnung an [Löbel and Strubbe, 1996] . . . . .	35
3.3	Mehrgüter-Fluss-Modell nach [Löbel and Strubbe, 1996] . . . . .	36
3.4	Reduziertes Mehrgüter-Fluss-Modell nach [Grötschel et al., 1997] . .	37
3.5	Netzwerk nach [Banihashemi and Haghani, 2000] . . . . .	38
3.6	Graph nach dem Modellansatz von [Dell'Amico et al., 1993] . . . . .	41
3.7	Graph nach dem Modellansatz von [Fischetti et al., 1999] . . . . .	42
3.8	Graph nach der Modellierung von [Freling et al., 2001] . . . . .	44
3.9	Ablaufdiagramm für die Lösung des MDVSP nach [Löbel, 1997] . .	54
4.1	Timelines mit Kanten für potenzielle Service-, Depotausrück- und Depoteinrückfahrten . . . . .	65
4.2	Anschlussknoten als aggregierte Gruppen von Ankünften und un- mittelbar darauffolgenden Abfahrten . . . . .	66
4.3	Eliminierung redundanter Verbindungsfahrt-Kanten . . . . .	67
4.4	Netztopologie . . . . .	74
4.5	Erstellen der Timelines und Einfügen der Servicefahrt-Kanten . . .	76
4.6	Matches-Reduktion . . . . .	77
4.7	Einfügen der Depot-Kanten . . . . .	78
4.8	Knotenbildung, Einfügen der Warte- und Zirkulationsfluss-Kanten .	79
4.9	Ein optimaler Fluss von drei Flusseinheiten . . . . .	80
5.1	Dekomposition eines S-T-Flusses in Wege . . . . .	88
5.2	Dekomposition eines Flusses nach FIFO/LIFO . . . . .	90
5.3	Ergebnissvergleich der verschiedenen Dekompositionsstrategien . . .	97
6.1	Line Arcs in Time-Space Netzwerk . . . . .	100
6.2	Einfügen der Linienkanten . . . . .	100
6.3	Einfügen der Linienkanten . . . . .	101

6.4	Ergebnisse für drei Instanzen . . . . .	105
6.5	Potential von Zeitfenstern . . . . .	106
6.6	Verwendung von Zeitfenster-Kanten . . . . .	107
6.7	Netzwerkaufbau mit Zeitfenstern (Schritt 1) . . . . .	108
6.8	Netzwerk-Reduktion durch Löschen überflüssiger Zeitfenster-Kanten	110
6.9	Reduktion von Depot-Kanten für Zeitfenster . . . . .	111
6.10	Netzwerk nach Reduktion überflüssiger Zeitfenster-Kanten . . . . .	111
6.11	Optimaler Fluss im Netzwerk mit Zeitfenster-Kanten . . . . .	112
6.12	Linien-Kanten und Zeitfenster-Kanten: Normalfall . . . . .	113
6.13	Linien-Kanten und Zeitfenster-Kanten: Spezialfall . . . . .	113
6.14	Ablauf der Verkürzungsheuristik . . . . .	116
6.15	Fahrtenauslastung eines Fahrplans . . . . .	117
6.16	Ermittlung kritischer Fahrten in der Schnitt-Heuristik . . . . .	118
6.17	Glättung der Auslastungskurve durch die Schnitt-Heuristik . . . . .	119
6.18	Fahrtensmengen der Instanzen über die Dauer eines Betriebstages . .	120
6.19	Einsparung und Laufzeit für globale Zeitfenster bis zu fünf Minuten	125
6.20	Einsparung und Laufzeit für große Zeitfenster für Monheim . . . . .	125
6.21	Vergleich von Lösungsqualität zu Laufzeit für Halle . . . . .	127
6.22	Vergleich von Lösungsqualität zur Gesamtverschiebung für Halle . .	127
6.23	Nur-Eigen-Depot A und Nur-Eigen-Depot B . . . . .	131
6.24	Depot A mit Pausen in B und Rückkehr zu B . . . . .	131
7.1	Time-Space Netzwerk für das Beispiel . . . . .	145
7.2	Modellierung der Fahrzeugtypgruppen als Mengen . . . . .	151
7.3	Gruppenbildung für BVO . . . . .	153
7.4	BVO: Kostenentwicklung . . . . .	157
7.5	BVO: Verteilung Depots . . . . .	158
7.6	München: Variable Kosten bei unterschiedlicher Depotanzahl . . . . .	159
7.7	München: Anzahl Fahrzeuge bei unterschiedlicher Depotanzahl . . .	160
8.1	Arbeitsweise der „fix-and-optimize“ Zwei-Phasen Heuristik . . . . .	170
8.2	Basis-Algorithmus zur Fahrtenkettenerkennung . . . . .	172
8.3	Laufzeiten versus Anzahl der Depots: city 1 . . . . .	177
8.4	Laufzeiten versus Anzahl der Depots: city 2 . . . . .	178
8.5	Laufzeiten versus Anzahl der Depots: city 3 . . . . .	179
8.6	Ergebnisse der Fahrtenketten-Erkennung für Fahrpläne city 1 bis 3 und mun 1 . . . . .	184

# Tabellenverzeichnis

3.1	Aufgabe der Umlaufbildung . . . . .	33
4.1	Fahrplan mit Servicefahrten . . . . .	74
4.2	Eigenschaften der Probleminstanzen . . . . .	83
4.3	Eigenschaften der Netzwerkmodelle . . . . .	83
4.4	Exakte Optimierung: Ergebnisse . . . . .	83
4.5	Eigenschaften der optimalen Lösungen . . . . .	84
4.6	Laufzeiten-Vergleich: IPM (Barrier) versus dualer Simplex . . . . .	85
4.7	Laufzeiten für die Minimierung der Fahrzeuganzahl . . . . .	85
5.1	Laufzeitvergleich der verschiedenen Dekompositionsstrategien . . . . .	96
6.1	Modellgröße und Laufzeit mit Linienkanten . . . . .	103
6.2	Vergleich der Lösungen mit und ohne Linienkanten (LK) . . . . .	103
6.3	Servicefahrt mit Zeitfenstern . . . . .	107
6.4	Daten der verwendeten Instanzen . . . . .	119
6.5	Ergebnisse bei globalen Zeitfenstern . . . . .	122
6.6	Ergebnisse der Verkürzungs-Heuristik . . . . .	123
6.7	Ergebnisse der Schnitt-Heuristik mit $\alpha = 10$ und $\beta = 10$ . . . . .	124
6.8	Fahrplandaten . . . . .	135
6.9	2-Depots-Instanzen ohne und mit Depotgruppen . . . . .	135
6.10	Drei Depots ohne und mit Depotgruppen . . . . .	136
6.11	Verteilung der „depot-eigenen“ und „depot-gemischten“ Umläufe . . . . .	137
6.12	Hinzufügen von Pausendepots (Fahrplan 2) . . . . .	138
7.1	Eigenschaften untersuchter Testfälle . . . . .	144
7.2	Beispielfahrplan . . . . .	145
7.3	Beispiel - linienrein vs. liniengemischt . . . . .	146
7.4	Halle linienrein vs. liniengemischt . . . . .	146
7.5	Halle linienrein vs. liniengemischt, detailliert . . . . .	146
7.6	München linienrein vs. liniengemischt . . . . .	147
7.7	München linienrein vs. liniengemischt, detailliert . . . . .	147
7.8	München linienrein vs. liniengemischt, Ein-/Ausrückfahrten . . . . .	147
7.9	BVO linienrein vs. liniengemischt . . . . .	149

7.10	BVO linienrein vs. liniengemischt, detailliert . . . . .	149
7.11	BVO linienrein vs. liniengemischt, dicht . . . . .	150
7.12	Halle: feste Vorgabe . . . . .	152
7.13	Halle: alle Fahrzeugtypen in einer Gruppe . . . . .	152
7.14	Beispiel: zwei Depots . . . . .	155
7.15	Halle: Eindepot- versus Mehrdepot-Umlaufplanung . . . . .	156
7.16	Halle: Eindepot- versus Mehrdepot-Umlaufplanung detailliert . . . . .	156
7.17	BVO: Eindepot-Umlaufplanung . . . . .	157
7.18	Halle: gleitende Depotzuordnung . . . . .	161
7.19	Halle: gleitende Depotzuordnung, detailliert . . . . .	161
7.20	BVO: gleitende Depotzuordnung . . . . .	161
7.21	BVO: gleitende Depotzuordnung, detailliert . . . . .	162
7.22	München: gleitende Depotzuordnung . . . . .	162
7.23	München: gleitende Depotzuordnung, detailliert . . . . .	162
8.1	Änderung von $\lambda$ . . . . .	168
8.2	Zuordnungsfunktion für Nachfolger-Servicefahrten . . . . .	171
8.3	Eigenschaften untersuchter Testfälle . . . . .	174
8.4	Ergebnisse der exakten Optimierung . . . . .	175
8.5	Ergebnisse der Zwei-Phasen-Heuristik: city 1 . . . . .	178
8.6	Ergebnisse der Zwei-Phasen-Heuristik: city 2 . . . . .	179
8.7	Ergebnisse der Zwei-Phasen-Heuristik: city 3 . . . . .	180
8.8	Ergebnisse der Zwei-Phasen-Heuristik: mun 1 . . . . .	181
8.9	Anzahl der erkannten Fahrtenketten . . . . .	183