

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Umlauf- und Dienstbildung als Aufgaben der ÖPNV-Planung</b>	<b>5</b>
2.1	Operativer Planungsprozess im ÖPNV . . . . .	6
2.2	Umlaufplanung . . . . .	10
2.3	Dienstplanung . . . . .	13
2.3.1	Traditionelle (umlaufbasierte) Dienstplanung . . . . .	13
2.3.2	Fahrplanbasierte Dienstplanung . . . . .	15
2.3.3	Dienstregeln . . . . .	16
2.4	Integrierte Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Mathematische Optimierung</b>	<b>23</b>
3.1	Ausgewählte Probleme der mathematischen Optimierung . . . . .	25
3.1.1	Netzwerkflussprobleme . . . . .	25
3.1.2	Set-Partitioning- and Covering-Probleme . . . . .	28
3.2	Lagrange-Relaxation . . . . .	29
3.2.1	Grundidee . . . . .	30
3.2.2	Subgradienten-Verfahren . . . . .	31
3.2.3	Volume-Algorithmus . . . . .	33
3.3	Column-Generation-Verfahren . . . . .	35
3.4	Simulated Annealing . . . . .	38
3.5	Branch-and-Bound . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Methoden der Umlauf- und Dienstplanung: Stand der Forschung</b>	<b>41</b>
4.1	Sequenzielle Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	41
4.1.1	Umlaufplanung . . . . .	41
4.1.2	Umlaufbasierte Dienstplanung . . . . .	48
4.2	Fahrplanbasierte Dienstplanung . . . . .	51
4.3	Integrierte Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	53
4.3.1	Teilintegration der Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	53
4.3.2	Vollständige Integration mit einem Depot . . . . .	56
4.3.3	Vollständige Integration mit mehreren Depots . . . . .	59
4.3.4	Behandlung großer Probleminstanzen . . . . .	64

4.3.5	Integration im Bereich der Flugplanung . . . . .	65
4.4	Handlungsbedarf . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Integrierte Umlauf- und Dienstplanung</b>	<b>69</b>
5.1	Problem-Formulierung . . . . .	69
5.1.1	Netzwerkmodell . . . . .	71
5.1.2	Mathematische Formulierung des MD-VCSP . . . . .	77
5.1.3	Column-Generation-Lösungsansatz . . . . .	79
5.2	Initialisierung durch sequenzielle Planung . . . . .	82
5.2.1	Umlaufplanungsproblem . . . . .	82
5.2.2	Dienstplanungsproblem . . . . .	82
5.3	Lösung des beschränkten Master-Problems . . . . .	87
5.3.1	Lagrange-Relaxationen . . . . .	88
5.3.2	Lagrange-Dual-Problem . . . . .	91
5.3.3	Subgradienten-Verfahren . . . . .	92
5.3.4	Volume-Algorithmus . . . . .	99
5.4	Lösung des Pricing-Problems . . . . .	102
5.4.1	Erzeugung von Dienststücken . . . . .	103
5.4.2	Erzeugung von Diensten durch Aufzählung . . . . .	104
5.4.3	Erzeugung von Diensten durch RCSP . . . . .	107
5.5	Spaltenmanagement . . . . .	109
5.5.1	Erweiterung des eingeschränkten Master-Problems . . . . .	110
5.5.2	Verkleinerung des eingeschränkten Master-Problems . . . . .	111
5.6	Ganzzahlige Lösung . . . . .	112
5.7	Allgemeiner Fall: beliebige Ablösemöglichkeit . . . . .	114
5.8	Numerische Ergebnisse . . . . .	116
5.8.1	Master Problem . . . . .	117
5.8.2	Ganzzahlige Lösung . . . . .	121
5.9	Zusammenfassung . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Adaptive Teilintegration von Umlauf- und Dienstplanung</b>	<b>129</b>
6.1	Interaktion zwischen Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	130
6.1.1	Mehrdeutigkeit von Umlaufplänen . . . . .	131
6.1.2	Flusslösung des TSN-basierten Umlaufplanungs- problems . . . . .	132
6.1.3	Adaptive Kopplung von Umlauf- und Dienstplanung . . . . .	134
6.2	Dienstplanungsproblem bei der adaptiven Teilintegration . . . . .	135
6.2.1	Netzwerkmodell . . . . .	135
6.2.2	Mathematische Formulierung . . . . .	136
6.2.3	Column-Generation-Lösungsansatz . . . . .	137
6.2.4	Ganzzahlige Lösung . . . . .	137
6.3	Nachträgliche Bildung der Umläufe . . . . .	138

6.4	Entkopplung von der Umlaufplanung . . . . .	138
6.5	Adaptive Teilintegration als Unterproblem im Lösungsprozess des MD-VCSP . . . . .	142
6.6	Numerische Ergebnisse . . . . .	142
6.6.1	Adaptive Teilintegration vs. sequenzielle Planung . . . . .	143
6.6.2	Adaptive Teilintegration als Unterproblem für MD-VCSP . . . . .	147
6.7	Zusammenfassung . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Fix-and-Optimize-Verfahren zur Lösung großer MD-VCSP</b>	<b>151</b>
7.1	Grundschemata des Verfahrens . . . . .	152
7.2	Das (unabhängige) fahrplanbasierte Dienstplanungsproblem . . . . .	155
7.3	Erweiterte Fahrtenfixierung . . . . .	157
7.4	Numerische Ergebnisse . . . . .	158
7.5	Zusammenfassung . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Numerische Ergebnisse und Vergleich der Lösungsansätze</b>	<b>163</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Testinstanzen</b>	<b>173</b>
A.1	Dienstinstanzen . . . . .	173
A.2	Künstlich erzeugte ECOPT-Instanzen . . . . .	174
A.3	Reale Instanzen aus der Praxis . . . . .	175
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>176</b>