

**Ein modulares Column Generation Framework  
zur effizienten Entwicklung von  
Crew Scheduling Software  
Konzeption – Design – Anwendungen**

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität zu Köln

2010



vorgelegt von  
Dipl.-Wirt.-Inf. Dominik Malcherek  
aus Mechernich

Referent: Prof. Dr. Dr. Ulrich Derigs  
Korreferent: Prof. Dr. Ulrich W. Thonemann  
Tag der Promotion: 23. Juli 2010

Wirtschaftsinformatik und Operations Research

Band 14

**Dominik Malcherek**

**Ein modulares Column Generation Framework  
zur effizienten Entwicklung von  
Crew Scheduling Software**

Konzeption - Design - Anwendungen

D 38 (Diss. Universität Köln)

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Köln, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9235-5

ISSN 1433-8521

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Seminar für Wirtschaftsinformatik und Operations Research an der Universität zu Köln unter der Leitung meines Doktorvaters Herrn Prof. Dr. Dr. Ulrich Derigs. Allen voran möchte ich mich bei ihm für die Möglichkeit bedanken, dieses sehr interessante Thema an seinem Seminar zu bearbeiten. Ebenso gilt ihm mein Dank für die gute Betreuung dieser Arbeit, die damit verbundenen Denkanstöße, fruchtbaren Diskussionen und das in mich gesetzte Vertrauen. Darüber hinaus bedanke ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr. Ulrich W. Thonemann für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Wesentliche Teile dieser Arbeit, insbesondere die Problemanalyse und die Praxisevaluation der entwickelten Verfahren, wurden erst durch die Unterstützung und Kooperationsbereitschaft von Praxispartnern ermöglicht. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei den beteiligten Unternehmen für die engagierte Zusammenarbeit und Unterstützung.

Ein besonderer Dank geht an alle Kollegen, ehemaligen Kollegen und Freunde an der Universität zu Köln, insbesondere Dr. Paul Bartodziej, Dr. Felix Bomsdorf, Dr. Sascha Dahl, Dr. Stefan Ems, Stefan Friederichs, Gisela Hafner, René Keller, Dr. Tobias Krautkremer, Dr. Shehab Marzban, Simon Schäfer, Ulrich Vogel und Daniel Weber für Ihre Unterstützung und die stets gute und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Auch möchte ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Großeltern und meiner Schwester Ramona herzlich für ihr Vertrauen und ihren Rückhalt danken. Besonders danke ich meinen Eltern, die mir in Sachen Zielstrebigkeit und Ausdauer, die mir beim Anfertigen dieser Arbeit zugutegekommen sind, stets ein großes Vorbild sind.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Freunden außerhalb der Universität bedanken, die mich nicht nur tatkräftig unterstützt haben, sondern mich stets aufbauten und für die erforderliche Abwechslung sorgten.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meiner Freundin Verena Braun, die mich während meines gesamten Studiums und meiner Promotion mit viel Verständnis und Entgegenkommen unterstützt hat.

Köln, im Juni 2010

Dominik Malcherek



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Verzeichnis der Algorithmen</b>	<b>xv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Das Crew Scheduling Problem (CSP)	1
1.1.1 Der Prozess der operativen Personaleinsatzplanung	3
1.1.2 Disziplinen der Personalplanung auf den höheren Managementebenen	4
1.2 Kommerzielle Systeme zur Personaleinsatzplanung	5
1.3 Ziel der Arbeit	7
1.4 Aufbau der Arbeit	8
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Begriffe	9
2.2 Literaturübersicht	10
2.3 Modelle zur Formulierung des CSP	11
2.3.1 Masterproblem	11
2.3.2 Subproblem	13
2.3.2.1 Netzwerkmodelle	13
2.3.2.2 Repräsentation des Lösungsraums	17
2.3.3 Restriktionsebenen in Crew Scheduling Problemen	20
2.4 Verfahren zur Lösung des CSP	21
2.4.1 Dantzig-Wolfe Dekomposition und Column Generation	21
2.4.2 Branch & Bound / Branch & Price	24
2.4.3 Verfahren zur Generierung von Pairings / Lösung des Subproblems	26
2.4.4 Meta-Heuristiken	29

<b>I</b>	<b>Konzeption des Frameworks</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>Konzeption der Optimierungsalgorithmik im Framework</b>	<b>33</b>
3.1	Typ-Kategorisierung der Nebenbedingungen beim CSP . . . . .	33
3.1.1	Statische Nebenbedingungen (Typ I) . . . . .	33
3.1.2	Dynamische Nebenbedingungen (Typ II) . . . . .	35
3.1.2.1	Unmittelbar-limitierende, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIa) . . . . .	36
3.1.2.2	Fristzeitpunkt-limitierende, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIb) . . . . .	37
3.1.3	Globale Nebenbedingungen (Typ III) . . . . .	39
3.1.4	Sollvorgaben (Typ IV) . . . . .	40
3.1.4.1	Sollvorgaben für Pairings (Typ IVa) . . . . .	40
3.1.4.2	Globale Sollvorgaben (Typ IVb) . . . . .	41
3.2	Modellierung des erweiterten, ressourcenbeschränkten Crew Scheduling Problems . . . . .	43
3.2.1	Analytisches Modell . . . . .	43
3.2.2	Rechenmodell . . . . .	45
3.3	Optimierungslogik im Framework . . . . .	47
3.3.1	Basisverfahren . . . . .	47
3.3.2	Erweiterungen des Basisverfahrens . . . . .	53
3.3.3	Heuristische Varianten des Optimierungsverfahrens . . . . .	55
3.3.3.1	Vorzeitige Terminierung . . . . .	57
3.3.3.2	Partielle Erschließung des Branch & Bound - Baums . . . . .	57
3.3.3.3	Verzicht auf Branches . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Design des Frameworks: Struktur – Funktionen – Implementierung</b>	<b>61</b>
4.1	Verfahrens-Steuerung . . . . .	63
4.2	Vorverarbeitung . . . . .	64
4.2.1	Verbindungsnetzwerk-Konstruktor . . . . .	65
4.2.2	Zulässigkeitsprüfung für Aktivitätsparsequenzen . . . . .	66
4.2.3	Konstrukturen optionaler Datenstrukturen . . . . .	67
4.3	Pairing-Selektor . . . . .	68
4.3.1	LP-Modell-Formulierung . . . . .	68
4.3.2	LP-Daten-Handler . . . . .	69
4.3.3	LP-Solver . . . . .	71
4.4	Pairing-Generator . . . . .	71
4.4.1	Algorithmen zur Pairing-Generierung . . . . .	72

4.4.2	Zulässigkeitsprüfung für Pairings . . . . .	76
4.4.3	Pairing-Evaluator . . . . .	78
4.5	Pairing-Pool . . . . .	79
4.6	MIP-Solver . . . . .	80
4.7	Brancher . . . . .	82
4.7.1	Branch-Identifizierer . . . . .	82
4.7.2	Branch-Implementierer . . . . .	85

## II Anwendungen des Frameworks89

<b>5</b>	<b>Anwendung des Frameworks bei der taktischen Crew-/Vehicle-Einsatzplanung im Luftfrachtersatzverkehr</b>	<b>91</b>
5.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	92
5.2	Problemspezifische Konzepte . . . . .	96
5.2.1	Zulässigkeit und Evaluation von Touren . . . . .	97
5.2.1.1	Zulässigkeit von Touren hinsichtlich Lenk- und Ruhezeiten . . . . .	99
5.2.1.2	Zulässigkeit von Touren bezüglich erforderlicher Fahrzeugeigenschaften . . . . .	104
5.2.1.3	Evaluation von Touren . . . . .	105
5.2.2	Zulässigkeit und Evaluation von Tourenplänen . . . . .	106
5.3	Typ-Kategorisierung der Nebenbedingungen . . . . .	106
5.3.1	Statische Nebenbedingungen (Typ I) . . . . .	106
5.3.2	Dynamische Nebenbedingungen (Typ II) . . . . .	108
5.3.2.1	Unmittelbar gültige, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIa) . . . . .	108
5.3.2.2	Fristzeitpunkt-limitierende, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIb) . . . . .	108
5.3.3	Globale Nebenbedingungen (Typ III) . . . . .	108
5.4	Zusammenfassung der Vorgaben zur Bewertung von Pairings und Dienstplänen . . . . .	109
5.5	Mathematisches Modell . . . . .	110
5.6	Framework-Konfiguration zur Lösung des <i>RCCSP-LFEV</i> . . . . .	112
5.6.1	Verfahrens-Steuerung . . . . .	113
5.6.1.1	Problem-Instanz-Daten: Verarbeitung der Eingabedaten . . . . .	113
5.6.1.2	Parameter-Verwaltung . . . . .	115

5.6.1.3	Logik des Steuerungs-Agenten . . . . .	115
5.6.2	Vorverarbeitung . . . . .	116
5.6.2.1	Verbindungsnetzwerk-Konstruktor . . . . .	116
5.6.2.2	Zulässigkeitsprüfung für Aktivitätsparsequenzen . . . . .	119
5.6.3	Pairing-Selektor . . . . .	120
5.6.4	Pairing-Generator . . . . .	124
5.6.4.1	Algorithmen zur Pairing-Generierung . . . . .	124
5.6.4.2	Zulässigkeitsprüfung für Pairings . . . . .	130
5.6.4.3	Pairing-Evaluator . . . . .	140
5.6.5	MIP-Solver . . . . .	141
5.7	<i>blockbuster</i> – Ein System zur Unterstützung der taktischen Tourenplanung . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Anwendung des Frameworks bei der strategischen Servicepersonalplanung im Schienenverkehr</b> . . . . .	<b>147</b>
6.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	147
6.2	Problemspezifische Konzepte . . . . .	150
6.2.1	Zulässigkeit und Evaluation von Schichten und Pairings . . . . .	153
6.2.2	Zulässigkeit und Evaluation von Dienstplänen . . . . .	157
6.3	Typ-Kategorisierung der Nebenbedingungen . . . . .	159
6.3.1	Statische Nebenbedingungen (Typ I) . . . . .	159
6.3.2	Dynamische Nebenbedingungen (Typ II) . . . . .	160
6.3.2.1	Unmittelbar gültige, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIa) . . . . .	160
6.3.2.2	Fristzeitpunkt-limitierende, dynamische Nebenbedingungen (Typ IIb) . . . . .	161
6.3.3	Globale Nebenbedingungen (Typ III) . . . . .	162
6.3.4	Sollvorgaben auf Pairingebene (Typ IVa) . . . . .	162
6.4	Zusammenfassung der Vorgaben zur Bewertung von Pairings und Dienstplänen . . . . .	163
6.5	Mathematisches Modell . . . . .	164
6.6	Framework-Konfiguration zur Lösung des <i>RCCSP-SCSP</i> . . . . .	167
6.6.1	Verfahrens-Steuerung . . . . .	170
6.6.1.1	Problem-Instanz-Daten: Verarbeitung der Eingabedaten . . . . .	170
6.6.1.2	Parameter-Verwaltung . . . . .	170
6.6.1.3	Logik des Steuerungs-Agenten . . . . .	172

6.6.2	Vorverarbeitung . . . . .	173
6.6.2.1	Verbindungsnetzwerk-Konstruktor . . . . .	173
6.6.2.2	Zulässigkeitsprüfung für Aktivitätspaarsequenzen . . .	179
6.6.2.3	Prüftabellen-Konstruktor . . . . .	181
6.6.3	Pairing-Selektor . . . . .	182
6.6.4	Pairing-Generator . . . . .	186
6.6.4.1	Algorithmen zur Pairing-Generierung . . . . .	186
6.6.4.2	Zulässigkeitsprüfung für Pairings . . . . .	198
6.6.4.3	Pairing-Evaluator . . . . .	203
6.6.5	MIP-Solver . . . . .	205
6.6.6	Pairing-Pool . . . . .	206
6.6.7	Brancher . . . . .	206
6.6.7.1	Branch-Identifizierer . . . . .	207
6.6.7.2	Branch-Implementierer . . . . .	208
6.7	<i>on.Track</i> – Ein Decision Support System zur Unterstützung der strategischen Personalplanung im Schienenverkehr . . . . .	210
6.7.1	Der Planungsprozess mit <i>on.Track</i> . . . . .	210
6.7.2	Evaluation des mit Hilfe des Frameworks entwickelten Optimierungsverfahrens . . . . .	213
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>219</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	219
7.2	Kritik am Ansatz . . . . .	220
7.3	Ausblick . . . . .	221
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>223</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über den allgemeinen Planungsprozess bei der operativen Personaleinsatzplanung . . . . .	3
2.1	Exemplarische Darstellung eines Time-Line-Netzwerks . . . . .	18
2.2	Exemplarische Darstellung eines Verbindungs-Netzwerks . . . . .	19
2.3	Schema des Column Generation Verfahrens . . . . .	23
3.1	Beispiel-Aktivitäten in Form von Dienstabschnitten . . . . .	34
3.2	Schema des Basis-Optimierungsverfahrens zur Lösung des <i>RCCSP</i> . . . . .	49
3.3	Schema des erweiterten Optimierungsverfahrens zur Lösung des <i>RCCSP</i> . . . . .	56
4.1	Schema des CSP-Solver-Frameworks . . . . .	62
4.2	Verfahrens-Steuerung: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	63
4.3	Vorverarbeitung: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	64
4.4	Pairing-Selektor: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	68
4.5	Pairing-Generator: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	72
4.6	Pairing-Pool: Schnittstellen . . . . .	79
4.7	MIP-Solver: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	81
4.8	Brancher: Modulkomponenten und Schnittstellen . . . . .	82
5.1	Beispiel eines Tourverlaufs . . . . .	103
5.2	Verfahrens-Ablauf-Diagramm des implementierten Ansatzes zur Lösung des <i>RCCSP-LFEV</i> . . . . .	113
5.3	Skizze eines Verbindungsnetzwerks im Luftfrachtersatzverkehr . . . . .	119
5.4	Entscheidungsbaum zur Zulässigkeitsprüfung für Aktivitätspaarsequenzen hinsichtlich statischer Restriktionen (Typ I) . . . . .	121
5.5	Szenario einer Pfaderweiterung des Start-Labels über eine Direkt-Leerfahrt-Kante mit Zusatzpause . . . . .	131
5.6	Pfaderweiterung des Start-Labels über eine Direkt-Leerfahrt-Kante ohne Zusatzpause . . . . .	132
5.7	Logik der Zulässigkeitsprüfung einer Pfaderweiterung vom Depot-Quellknoten $depot_q$ über eine Direkt-Leerfahrt-Kante $e = (depot_q, k')$ zu einem Aktivitätsknoten $k'$ . . . . .	133

5.8	Varianten der Pfaderweiterungen von Labels an Auftragsknoten über Direkt-Leerfahrt-Kanten zu Auftragsknoten . . . . .	134
5.9	Logik der Zulässigkeitsprüfung einer Pfaderweiterung von einem Aktivitätsknoten $k$ über eine Direkt-Leerfahrt-Kante $e = (k, k')$ zu einem Aktivitätsknoten $k'$ . . . . .	135
5.10	Szenario einer Pfaderweiterung von Labels an Aktivitätsknoten über indirekte Depot-Leerfahrt-Kanten ohne Zusatzpause zu Aktivitätsknoten . . . . .	136
5.11	Szenario einer Pfaderweiterung von Labels an Aktivitätsknoten über indirekte Depot-Leerfahrt-Kanten mit Zusatzpause zu Aktivitätsknoten	136
5.12	Logik der Zulässigkeitsprüfung für Pfaderweiterungen von einem Aktivitätsknoten $k$ über eine indirekte Depot-Leerfahrt-Kante $e = (k, k')$ zu einem Aktivitätsknoten $k'$ . . . . .	138
5.13	Pfaderweiterung von Labels an Aktivitätsknoten über Direkt-Leerfahrt-Kanten zum Depot-Senkeknoten . . . . .	139
5.14	Logik der Zulässigkeitsprüfung einer Pfaderweiterung von einem Aktivitätsknoten $k$ über eine Direkt-Leerfahrt-Kante $e = (k, depot_s)$ zum Depot-Senkeknoten $depot_s$ . . . . .	140
6.1	Beziehung zwischen Zugfahrten und Pairings . . . . .	151
6.2	Beispiel eines Pairings für ein Service-Team im Schienenpersonenverkehr	154
6.3	Verfahrens-Ablauf-Diagramm des implementierten Ansatzes zur Lösung des <i>RCCSP-SCSP</i> . . . . .	168
6.4	Exemplarische Darstellung eines Verbindungsnetzwerks zur strategischen Personaleinsatzplanung im Schienenverkehr . . . . .	178
6.5	Entscheidungsbaum zur statischen Zulässigkeitsprüfung für Paarsequenzen aus Fahrabschnitts-Aktivitäten . . . . .	180
6.6	Exemplarische Darstellung einer Prüftabelle, die Informationen über die Zulässigkeit von Durchfahrt-Verbindungen zwischen Fahrabschnitten hinsichtlich statischer Restriktionen enthält . . . . .	182
6.7	Rekombination durch den Join-Operator . . . . .	195
6.8	Rekombination durch den Swap-Operator . . . . .	196
6.9	Rekombination durch den Dissolve-Operator . . . . .	196
6.10	Logik der Zulässigkeitsprüfung einer Pfaderweiterung eines Labels $J$ am Knoten $v$ über eine Kante $e = (v, v')$ zu einem Knoten $v'$ bezüglich der dynamischen Restriktionen (1)-(4) aus der Typ-Kategorie IIa . . . . .	199

6.11	Logik der Zulässigkeitsprüfung einer Pfaderweiterung eines Labels $J$ am Knoten $v$ über eine Kante $e = (v, v')$ zu einem Knoten $v'$ bezüglich der dynamischen Restriktionen (5)-(6) vom Typ IIa sowie der dynamischen Restriktionen vom Typ IIb . . . . .	202
6.12	Teamkategorie-Zuweisung der Fahrabschnitte in <i>on.Track</i> . . . . .	211
6.13	Konfiguration der Einsatzstellen in <i>on.Track</i> . . . . .	212
6.14	Konfiguration der Optimierungsparameter in <i>on.Track</i> . . . . .	213
6.15	Oberfläche zur Analyse von Optimierungsszenarien in <i>on.Track</i> . . .	214



## Tabellenverzeichnis

3.1	Duale Variablen zu $RMP_{LP}$ . . . . .	51
5.3	Duale Variablen für $RMP_{LP}$ zur Lösung des $RCCSP-LFEV$ . . . . .	124
5.5	Charakteristika der evaluierten Probleminstanzen . . . . .	143
5.6	Leistungskennzahlen des CG-Optimierungsverfahrens bei den verschiedenen Probleminstanzen . . . . .	144
6.1	Zugehörigkeit der Aktivitäten und Verbindungen zu den für die Zulässigkeitsprüfung und Evaluation notwendigen Zeitkonten . . . . .	155
6.2	Duale Variablen für $RMP_{LP}$ zur Lösung des $RCCSP-SCSP$ . . . . .	185
6.4	Charakteristika der evaluierten Probleminstanzen . . . . .	215
6.5	Leistungskennzahlen des Optimierungsverfahrens bei den verschiedenen Szenarien . . . . .	216



## Verzeichnis der Algorithmen

4.4.1 Label-Setting-Prozedur zur Pfadgenerierung . . . . .	75
4.7.1 Funktion zur Identifikation von Aktivitätspaarkombinationen für zulässige Branchs gemäß der Branching-Regel nach Ryan und Foster . .	84
5.6.1 Label-Setting-Prozedur zur Enumeration zulässiger, effizienter Aktivitätssequenzen im Luftfrachtersatzverkehr . . . . .	129
6.6.1 Label-Setting-Prozedur zur Pfadgenerierung bei der strategischen Servicepersonalplanung im Schienenverkehr . . . . .	190



## Abkürzungsverzeichnis

B&B	Branch & Bound
B&P	Branch & Price
bzw.	beziehungsweise
CG	Column Generation
CSP	Crew Scheduling Problem
d.h.	das heißt
DDM	Dialog – Daten – Modell
DSS	Decision Support System
engl.	englisch
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
evtl.	eventuell
FIFO	First-In-First-Out(-Prinzip)
ggf.	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber
ID	Identifikationsnummer
IP	Integer Programmierung, Ganzzahliges Optimierungsproblem
$k$ -SPP	$k$ -Kürzeste-Wege Problem
KWP	Kürzeste-Wege Problem
LFEV	Luftfrachtersatzverkehr
LP	Lineare Programmierung, Lineares Optimierungsproblem
LS	Lokale Suche
MCFP	Min-Cost-Flow Problem
MIP	Gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem
MP	Masterproblem
n.def.	nicht definiert
o.a.	oben angeführte/r/s
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OR	Operations Research
RCCSP	Ressourcenbeschränktes Crew Scheduling Problem
RCSP	Ressource Constrained Shortest Path (-Problem)

S.	Seite
s.t.	subject to
SCP	Set Covering Problem
SCSP	Strategisches Crew Scheduling Problem
sog.	so genannte/r/s
SP	Subproblem
SPP	Set Partitioning Problem
SPPRC	Shortest Path Problem with Resource Constraints
u.a.	unter anderem/n, und andere
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel