

**Ein personen- und aufgabengenaue Ansatz
zur robusten Einsatzplanung von Flugpersonal
mittels Optimierung und Simulation**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Patrick Kuckertz

aus Frechen

Köln, 2018

Berichtersteller:
(Gutachter)

Prof. Dr. Hubert Randerath
Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer

Tag der mündlichen Prüfung:

17. Januar 2018

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meiner Arbeit unterstützt, motiviert und inspiriert haben und ohne die mir diese Zeit nicht so viel Freude bereitet hätte.

Allen voran möchte ich meinem Betreuer und Doktorvater Prof. Dr. Hubert Randerath meinen herzlichen Dank aussprechen. Er hat mir nicht nur die Möglichkeit zur Promotion in einem spannenden und abwechslungsreichen Themenfeld ermöglicht und mich bei inhaltlichen Fragen und organisatorischen Herausforderungen unterstützt, sondern mir darüber hinaus in schwierigen Phasen Mut gemacht und mir zu jeder Zeit sein volles Vertrauen geschenkt.

Gleicher Dank gebührt meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer, ohne dessen wertvolle Anregungen und konstruktive Kritik diese Arbeit ebenfalls nicht gelungen wäre. Als Leiter des Instituts für Informatik der Universität zu Köln hat er mir über lange Jahre ein sicheres Arbeitsumfeld an seinem Lehrstuhl geschaffen, in dem neben der Forschung und der Lehre auch immer das Zwischenmenschliche im Vordergrund gestanden hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Kollegin Gabriele Eslamipour und meinen Kollegen Dr. Daniel Lückerath, Dr. Oliver Ullrich, Felix Werth, Manuel Molina Madrid, Alexander van der Grinten und Dr. Andreas Wotzlaw. Ihre Türen standen mir stets für knifflige Probleme offen und es hat mir immer Spaß bereitet, in angeregt geführten Diskussionen vor bunt bemalten Whiteboards im Büro oder auf vollgekritzelten Bierdeckeln im Brauhaus, gemeinsam nach kreativen Lösungen zu suchen.

Bei Dr. Daniel Lückerath möchte ich mich noch einmal besonders bedanken. Wir haben unser Promotionsstudium zur gleichen Zeit begonnen, haben gemeinsam Konferenzen und Workshops besucht, Kontakte geknüpft und Studenten betreut. Ich bin froh, dass ich diesen Weg mit ihm gehen und mich dabei jederzeit auf ihn verlassen konnte, auch wenn es mal nicht um die Arbeit ging.

Auch möchte ich den Kollegen des benachbarten Informatiklehrstuhls von Prof. Dr. Jünger und unserem Bibliothekar Michael Belling danken, die durch zahlreiche fachbezogene und persönliche Gespräche auf dem Flur oder in der Kaffeeküche sowie durch gemeinsame Weihnachtsfeiern für eine sehr angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre gesorgt haben.

Weiterhin möchte ich mich auch bei den von mir betreuten Studenten Ingo Proff, Helge Hillmann, Nadine Mühl, Alexander Needham, Maximilian Hirsch und Alexander Hecker bedanken, die diese Arbeit durch ihre Abschluss- und Seminararbeiten mit beeinflusst haben.

Zuletzt gilt mein tiefempfundener Dank meiner Frau und meiner Familie, die mich nicht nur durch das Korrekturlesen meiner Arbeit tatkräftig unterstützt haben. Vielmehr haben sie mich in all der Zeit stets aufgebaut, mir den Rücken frei gehalten und für die nötige Abwechslung gesorgt.

Abstract

In the present work, an employee- and task-specific approach to the robust deployment planning of airline crews is introduced. It is described how methods of mathematical optimization and discrete simulation are developed and combined to enable traffic- and personnel-schedulers to increase the quality of planning results and to examine their dynamic properties prior to their implementation.

At first, the task of the anonymous personnel planning is modeled in form of a classic crew pairing problem formulation, which contains all the contexts and constraints of planning anonymous personnel rotations. Based on this and under consideration of employee- and task-specific aspects such as qualifications and requirements, an approach for the planning of individual personnel rotations is developed: the Job Pairing Problem. To ensure that the optimization results are suitable for everyday use, well established robustness planning indicators as well as specially developed concepts for the more efficient use of human resources are taken into account. Using multi-criteria optimization methods and respecting planning preferences, these heterogeneous and partially contradictory objectives are considered within the problem formulation. Furthermore, with the ShiftJob-Neighborhood relation and the SingleBranch&Price heuristic, approaches are presented which, in combination with well-known exact and heuristic optimization methods, can be used to determine valid and high-quality solutions.

In order to ensure the suitability for daily use of the deployment plans drawn up by the optimization, this work also develops a simulation model that maps all relevant aircraft and personnel processes within operational air traffic and that also takes possible disruptions during the plan implementation into account. In order to integrate the operative management and its recovery strategies designed to handle disruption events, selected action alternatives are embedded, which cover in particular the field of crew recovery with its various deployment modes of personnel reserves. This is followed by a description of a program implementation of the model in form of a platform independent and easy to extend simulation application. Finally, within the validation and application of the program, its correct behavior and usefulness for both scientific and practical purposes is demonstrated.

This work is part of the project *Computer Aided Traffic Scheduling (CATS)*, which has been launched at the chair of Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer at the Institute of Computer Science of the University of Cologne, which has meanwhile been continued as cooperation with the Cologne University of Applied Sciences, the Kölner Verkehrs-Betriebe AG (KVB) and the Lufthansa CityLine. Within this project, planning problems of the traffic sector have been studied for years, always with the aim to solve them more efficiently and, in particular regard to their susceptibility to interferences, more robustly.

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein personen- und aufgabengenaue Ansatz zur robusten Einsatzplanung von Flugpersonal vorgestellt. Es wird beschrieben, wie Methoden der mathematischen Optimierung und der diskreten Simulation weiterentwickelt und kombiniert werden, um es Verkehrs- und Einsatzplanern zu ermöglichen, die Qualität ihrer Planungsergebnisse zu erhöhen und diese noch vor deren Umsetzung auf ihre dynamischen Eigenschaften hin untersuchen zu können.

So wird die anonyme Einsatzplanung zunächst in Form einer klassischen Crew Pairing Problemformulierung abgebildet, die sämtliche Zusammenhänge und Nebenbedingungen der Planung anonymer Personalumläufe beinhaltet. Hierauf aufbauend wird unter Hinzunahme personen- und aufgabenindividueller Aspekte wie Qualifikationen und Anforderungen ein Ansatz zur Planung individueller Personalumläufe entwickelt: das Job Pairing Problem. Um die Alltagstauglichkeit der Optimierungsergebnisse zu gewährleisten, werden in dessen Rahmen gleichzeitig sowohl bewährte, auf Robustheit abzielende Planungsindikatoren als auch eigens entwickelte Konzepte zur effizienteren Nutzung der Personalressource berücksichtigt. Unter Verwendung von Verfahren der multikriteriellen Optimierung und unter Einbeziehung von Planungspräferenzen werden diese heterogenen und teilw. gegenläufigen Zielsetzungen innerhalb der Problemformulierung berücksichtigt. Weiterhin werden in der Arbeit mit der ShiftJob-Nachbarschaftsrelation und der SingleBranch&Price-Heuristik Ansätze vorgestellt, die in Kombination mit etablierten exakten und heuristischen Optimierungsverfahren zur Bestimmung zulässiger und qualitativ hochwertiger Lösungen herangezogen werden können.

Um die Alltagstauglichkeit der durch die Optimierung erstellten Einsatzpläne sicherstellen zu können, wird in dieser Arbeit darüber hinaus ein Simulationsmodell entwickelt, das sämtliche relevanten Flugzeug- und Personalprozesse innerhalb des operativen Flugverkehrs abbildet und auch mögliche Störungen während der Planumsetzung berücksichtigt. Um auch das operative Management und deren auf Störereignisse ausgerichteten Recoverystrategien zu integrieren, werden ausgewählte Handlungsalternativen abgebildet, die insbesondere den Bereich des Crew-Recovery mit seinen verschiedenen Einsatzformen der Flugdienstreserve abdecken. Es wird die programmtechnische Umsetzung des Modells in Form einer plattformunabhängigen und leicht zu erweiternden Simulationsanwendung beschrieben. Abschließend werden durch Validierung und Anwendung dieses Programms dessen korrektes Verhalten und dessen Nützlichkeit sowohl für wissenschaftliche als auch praktische Fragestellungen nachgewiesen.

Entstanden ist diese Arbeit im Rahmen des Projekts *Computer Aided Traffic Scheduling (CATS)*, das am Lehrstuhl von Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer am Institut für Informatik der Universität zu Köln ins Leben gerufen und das zwischenzeitlich als Kooperation mit der Technischen Hochschule Köln, der Kölner Verkehrs-Betriebe AG (KVB) und der Lufthansa CityLine fortgeführt wurde. Innerhalb

dieses Projektes werden schon seit Jahren Planungsprobleme aus dem Verkehrsbereich untersucht, immer mit dem Ziel, diese effizienter und insbesondere im Hinblick auf deren Störungsanfälligkeit robuster lösen zu können.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis.....	17
Algorithmenverzeichnis	19
Abkürzungsverzeichnis	21
1 Einführung.....	25
1.1 Kontext und Motivation	25
1.2 Ziele der Arbeit	27
1.3 Vorgehen	28
2 Relevante Aspekte aus dem Luftverkehrsmanagement.....	31
2.1 Terminologie und grundlegende Zusammenhänge	31
2.2 Operative Abläufe im Flugverkehr.....	38
2.2.1 Flugzeugprozesse	38
2.2.2 Crewprozesse.....	40
2.2.3 Passagierprozesse	41
2.3 Planungsphasen einer Fluglinie.....	43
2.3.1 Produktplanung	44
2.3.1.1 Market Analysis	44
2.3.1.2 Fleet Planning.....	44
2.3.1.3 Flight Network Planning	45
2.3.1.4 Flight Schedule Design.....	48
2.3.1.5 Fleet Assignment.....	50
2.3.2 Produktionsplanung.....	51
2.3.2.1 Through Assignment	51
2.3.2.2 Tail Assignment	52
2.3.2.3 Crew Pairing.....	53
2.3.2.4 Crew Assignment	55
2.3.3 Absatzsteuerung	58
2.3.3.1 Pricing	58
2.3.3.2 Revenue Management	58
2.3.4 Operative Planung.....	58

3	Datengrundlage	61
3.1	Beschreibung öffentlicher Datenbestände	61
3.2	Generierung zusätzlicher Datensätze	63
3.2.1	Flightnetwork and Flightplan Generator	64
3.2.2	Job Generator	65
3.2.3	Through and Tail Assignment Generator	65
3.2.4	Jobpairing Generator	66
3.3	Bereitstellung der Daten für Optimierung und Simulation	66
4	Optimierung der Personaleinsatzplanung von Fluglinien	71
4.1	Das Airline Crew Pairing Problem	71
4.1.1	Problemformulierungen	72
4.1.2	Definitionen der Elemente und Eigenschaften	74
4.1.3	Bedingungen für Zulässigkeit	76
4.1.4	Kostenberechnung	78
4.1.5	Zielsetzungen	80
4.1.6	Integrierte Ansätze	82
4.2	Robustes Crew Pairing	84
4.2.1	Das Konzept der Robustheit	84
4.2.2	Robustheit im Umfeld von Fluglinien	85
4.2.3	Indikatoren des Robust Airline Scheduling	88
4.2.3.1	Stabilität	89
4.2.3.2	Flexibilität	90
4.2.4	Robustheitsmaße	92
4.3	Lösungsverfahren	94
4.3.1	Exakte Verfahren	94
4.3.1.1	Column Generation	94
4.3.1.2	Shortest Path Algorithms	95
4.3.1.3	Cutting Plane Methods	98
4.3.1.4	Branch-and-Bound	98
4.3.1.5	Branch-and-Price	99
4.3.1.6	Branch-and-Cut	100
4.3.1.7	Branch-and-Cut-and-Price	100
4.3.2	Heuristische Verfahren	100
4.3.2.1	Lokale Suche	100
4.3.2.2	Simulated Annealing	102
4.3.2.3	Konstruktionsheuristiken	104

4.4	Einsatzplanung in anderen Bereichen	105
5	Job Pairing – Ein aufgabengenaue Planungsansatz.....	109
5.1	Das Airline Job Pairing Problem.....	110
5.1.1	Definitionen der Elemente und Eigenschaften	112
5.1.2	Bedingungen für Zulässigkeit.....	116
5.1.3	Kostenberechnung	118
5.1.4	Zielfunktion	120
5.2	Robustes Job Pairing	120
5.2.1	Job Pairing Struktur als Robustheitsindikator	121
5.2.2	Das multikriterielle Optimierungsmodell.....	123
5.3	Lösungsverfahren	126
5.3.1	Simulated Annealing mit ShiftJob-Nachbarschaftsrelation.....	127
5.3.2	SingleBranch&Price mit MLSP-Algorithmus.....	131
5.3.3	Validierung und Vergleich	137
5.3.3.1	Optimierungsreihen anhand künstlicher Testinstanzen	137
5.3.3.2	Verhaltensweisen der Heuristiken.....	143
5.3.3.3	Optimierung unter wechselnden Gewichtungen der Zielparameter	149
6	Simulationsmodelle mit Bezug zur Einsatzplanung von Flugpersonal	153
6.1	Ausgewählte Grundlagen der Modellierung und Simulation	153
6.1.1	Statische vs. dynamische Modelle.....	154
6.1.2	Deterministische vs. stochastische Modelle	155
6.1.3	Diskrete vs. kontinuierliche Modelle.....	156
6.1.4	Einführung in die ereignisbasierte Simulation	156
6.2	Modelle zur Simulation von Flugverkehrssystemen	159
6.2.1	SimAir	160
6.2.2	MEANS	162
6.2.3	SimOps	165
6.3	Modelle zur Simulation von Personaleinsatzplänen.....	166
6.4	Diskussion und Modellvergleich.....	170
7	Modell zur Simulation individueller Flugpersonaleinsatzpläne	173
7.1	Modellbeschreibung	174
7.1.1	Flugnetz und Flugplan.....	174
7.1.2	Flugzeuge und Mitarbeiter	174
7.1.3	Ereignisse und Prozesse	176

7.1.4	Störungen des Flugplans.....	178
7.1.5	Airline Operations Control.....	180
7.1.6	Randomisierung.....	183
7.2	Implementierung	187
7.2.1	Simulationsaufbau	188
7.2.2	Simulationssteuerung	189
7.2.3	Simulationsauswertung.....	191
7.3	Modellprüfung.....	192
7.3.1	Verifizierung	194
7.3.2	Validierung.....	196
7.3.3	Leistungsanalyse.....	204
7.4	Anwendung	208
7.4.1	Wissenschaftlicher Anwendungsfall: Untersuchung von Robustheitsindikatoren.....	208
7.4.2	Praktischer Anwendungsfall: Steigerung der Robustheit eines Personaleinsatzplans.	216
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	221
8.1	Zusammenfassung	221
8.2	Ausblick.....	223
A	Glossar der verwendeten Zeitbegriffe	225
B	Übersicht über die typische Verteilung von Event-Typ-Häufigkeiten.....	229
C	Auflistung der in Kapitel 7.4.1 verwendeten Indikatorausprägungen.....	231
D	Literaturverzeichnis.....	233

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Flottenstruktur der Lufthansa Passage. Die Größe der Blasen zeigt den relativen Anteil des Flugzeugtyps an der Gesamtflotte	34
Abbildung 2.2: Personalstruktur von Air Berlin PLC	35
Abbildung 2.3: Der Turnaround-Prozess in seiner typischen zeitlichen Abfolge	39
Abbildung 2.4: Übersicht über die Planungsphasen einer Fluglinie	44
Abbildung 2.5: Gegenüberstellung verschiedener Flugnetzstrukturen	47
Abbildung 2.6: Schematische Teildarstellung des Lufthansa-Flugnetzes (geflogen von Mai bis Juli 2010).	47
Abbildung 2.7: Konnektivität innerhalb der Hubwave-Struktur	49
Abbildung 2.8: Abdeckung der Flight Legs eines Beispielflugplans durch drei anonyme Flugzeugrotationen.....	52
Abbildung 2.9: Beispielhafte Darstellung einer Pairing-Struktur	55
Abbildung 3.1: Auszug aus dem Lufthansa Flugplan für Mai bis Juli 2007	62
Abbildung 3.2: Querschnitt des Hauptdecks einer 388	63
Abbildung 3.3: Entity Relationship Diagramm.....	68
Abbildung 3.4: Datenbankschema.....	69
Abbildung 4.1: Set-Partitioning und Set-Covering	73
Abbildung 4.2: Robustheitsindikatoren im Zusammenhang	89
Abbildung 4.3: Crew Swapping	91
Abbildung 4.4: Pfadverlängerung bei Dijkstra von x nach z über ey, z	96
Abbildung 4.5: Pfadverlängerung bei einem Multilabel Shortest Path Problem.....	96
Abbildung 5.1: Die drei Teilmengen der Qualifikationsmenge Q.....	113
Abbildung 5.2: Konfigurationen von Primary Jobs	122
Abbildung 5.3: Die Nachbarschaftsfunktion ShiftJob.....	128
Abbildung 5.4: Ablauf der SingleBranch&Price-Heuristik	132
Abbildung 5.5: Darstellung des Flugplans als Graph zur Lösung des Pricing-Problems	134
Abbildung 5.6: Visualisierung des effizienten zeitlichen und räumlichen Planungsmusters für Testpläne	138
Abbildung 5.7: Übersicht über die erreichten OFVs der Optimierungsreihen	140
Abbildung 5.8: Übersicht der Optimierungszeiten.....	141
Abbildung 5.9: OFVs Stunde-Inst. (Trivial Solution).....	142
Abbildung 5.10: OFVs Stunde-Inst. (Linear Chainer)	142
Abbildung 5.11: OFVs Tag-Inst. (Trivial Solution).....	142
Abbildung 5.12: OFVs Tag-Inst. (Linear Chainer)	142
Abbildung 5.13: OFVs Woche-Inst. (Trivial Solution).....	142
Abbildung 5.14: OFVs Woche-Inst. (Linear Chainer)	142
Abbildung 5.15: Simulated Annealing Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Trivial Solution) .	143
Abbildung 5.16: Simulated Annealing Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Trivial Solution)	144
Abbildung 5.17: Simulated Annealing Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Linear Chainer)...	144

Abbildung 5.18: Simulated Annealing Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Linear Chainer).....	144
Abbildung 5.19: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Tag-Instanz mit Trivial Solution)	146
Abbildung 5.20: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Tag-Instanz mit Trivial Solution)	146
Abbildung 5.21: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Tag-Instanz mit Linear Chainer).....	146
Abbildung 5.22: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Tag-Instanz mit Linear Chainer)	147
Abbildung 5.23: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Linear Chainer)	147
Abbildung 5.24: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Linear Chainer)	147
Abbildung 5.25: Single Branch & Price CG Zyklus (Woche-Instanz mit Linear Chainer)	148
Abbildung 5.26: Excessive Cost Value	151
Abbildung 5.27: Buffer Violation Value.....	151
Abbildung 5.28: Rotation Change Value	151
Abbildung 5.29: Prim Config Value	151
Abbildung 5.30: Aux Config Value	151
Abbildung 5.31: Crew Base Violation Value.....	151
Abbildung 5.32: Beste und schlechteste gefundene Lösung vor den individuellen Wertebereichen der Zielfunktionsparameter	152
Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen	157
Abbildung 6.2: Flussdiagramm der Verarbeitungslogik im Event-Scheduling-Ansatz	158
Abbildung 6.3: Modulare Architektur des SimAir-Modells	161
Abbildung 6.4: EPK des SimAir Off-Blocks-Prozesses	162
Abbildung 6.5: Modulare Architektur des MEANS-Modells	163
Abbildung 7.1: EPK des Simulationsablaufs (AOC-Aufrufe implizit durch dick umrandete Prozesse dargestellt, Off-Blocks-Prozess grau hinterlegt).....	177
Abbildung 7.2: Modulare Trennung von Flugplan- und AOC-Simulation	180
Abbildung 7.3: Expliziter AOC-Aufruf	181
Abbildung 7.4: Dichtefunktion der Dreiecksverteilung	184
Abbildung 7.5: Histogramm der Häufigkeitsverteilung lognormalverteilter Zufallsvariablen mit den Parametern $\mu=4,7603$ und $\sigma=0,2331$	186
Abbildung 7.6: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Verspätungsweitergabe innerhalb des Flugplans LH_June07_Week_(Worst)	197
Abbildung 7.7: Personelle Auslastung eingeplanter Reserve- und Standby-Ressourcen unter Verwendung verschiedener AOC-Recoverystrategien (LH_June07_Week_(Worst))	198
Abbildung 7.8: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Häufigkeiten von Planungsregelverstößen innerhalb des Personaleinsatzplans LH_June07_Week_(Worst).....	199
Abbildung 7.9: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Verspätungsweitergabe innerhalb des Flugplans LH_June07_Week_(Best)	200
Abbildung 7.10: Personelle Auslastung eingeplanter Reserve- und Standby-Ressourcen unter Verwendung verschiedener AOC-Recoverystrategien (LH_June07_Week_(Best))	201
Abbildung 7.11: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Häufigkeiten von Planungsregelverstößen innerhalb des Personaleinsatzplans LH_June07_Week_(Best)	202
Abbildung 7.12: Abgleich der Simulationsergebnisse mit den On-Time-Performance-Daten europäischer Fluglinien aus den Jahren 2011, 2012 und Januar 2013	204

Abbildung 7.13: Durchschnittliche Programmlaufzeit in Abhängigkeit vom Planungshorizont des simulierten Personaleinsatzplans	205
Abbildung 7.14: Entwicklung der Laufzeit innerhalb von Simulationsreihen	206
Abbildung 7.15: Belegung der Event-Queue im Simulationsverlauf mit Fokus auf Briefing-Start-Events	206
Abbildung 7.16: Absoluter Anteil der Event-Typen in der Simulation	207
Abbildung 7.17: Entwicklung von Event-Häufigkeiten im Simulationsverlauf	208
Abbildung 7.18: Prozess zur Untersuchung von Robustheitsindikatoren	209
Abbildung 7.19: Aufschlüsselung des Aufgabenprofils des LH-Sommerflugplans 2007 anhand verschiedener Charakteristiken	209
Abbildung 7.20: Parameterausprägungen der fünf den <i>Buffer Violation</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	211
Abbildung 7.21: Parameterausprägungen der fünf den <i>Rotation Change</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	211
Abbildung 7.22: Parameterausprägungen der fünf den <i>Prim Config</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	212
Abbildung 7.23: Parameterausprägungen der fünf den <i>Aux Config</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	212
Abbildung 7.24: Simulationsergebnisse der fünf den <i>Buffer Violation</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	213
Abbildung 7.25: Simulationsergebnisse der fünf den <i>Rotation Change</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	213
Abbildung 7.26: Simulationsergebnisse der fünf den <i>Prim Config</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	213
Abbildung 7.27: Simulationsergebnisse der fünf den <i>Aux Config</i> -Indikator fokussierenden Einsatzpläne	214
Abbildung 7.28: Anforderungsprofile der fünf <i>Prim Config</i> - Einsatzpläne (Fokus: Primary Qualifications)	215
Abbildung 7.29: Anforderungsprofile der fünf <i>Aux Config</i> - Einsatzpläne (Fokus: Auxiliary Qualifications)	216
Abbildung 7.30: Prozess zur Verbesserung von Einsatzplaneigenschaften mittels Optimierung und Simulation	216
Abbildung 7.31: Zeitlich und räumlich aufgelöster Überblick über Ersatzpersonal-Anfragen des ursprünglichen Personaleinsatzplans (FRA in rot, MUC in beige)	217
Abbildung 7.32: Zeitlich aufgelöster Überblick über die Typen der Ersatzpersonal-Anfragen am Flughafen FRA (Viertagesausschnitt des ursprünglichen Personaleinsatzplans)	218
Abbildung 7.33: Zeitlich und räumlich aufgelöster Überblick über Ersatzpersonal-Anfragen des angepassten Personaleinsatzplans (FRA in rot, MUC in hellblau)	218
Abbildung 7.34: Zeitlich aufgelöster Überblick über die Typen der Ersatzpersonal-Anfragen am Flughafen FRA (Viertagesausschnitt des angepassten Personaleinsatzplans)	219
Abbildung 7.35: On-Time-Performance-Vergleich des ursprünglichen und des angepassten Personaleinsatzplans	219
Abbildung A.1: Verwendete Zeitbegriffe im Überblick	228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Liste der konvertierten Flugpläne.....	67
Tabelle 4.1: Kategorien der Standard IATA Delay Codes	88
Tabelle 5.1: Beispielhafte Zusammenstellung von Qualifikationen und ihrer Eigenschaften	111
Tabelle 5.2: Attribute eines Labels.....	135
Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Parameterausprägungen und Wertebereiche der Testinstanzen .	138
Tabelle 5.4: Parameterausprägungen der durchgeführten Testreihen	140
Tabelle 5.5: Indirekter Vergleich der Zielfunktionswerte beider Konstruktionsheuristiken	141
Tabelle 5.6: Quantifizierung der Graph-Repräsentationen der Testinstanzen.....	145
Tabelle 5.7: Parameterausprägungen und Wertebereiche der LH-S-06-Instanz am 07.08.2006	149
Tabelle 6.1: Überblick über die Modelle und ihre Eignung zur Einsatzplanungssimulation von Flugpersonal.....	172
Tabelle 7.1: Überblick über die verschiedenen Status von Flugzeugen und Mitarbeitern	175
Tabelle 7.2: Überblick über explizit berücksichtigte Flugplanstörungen.....	179
Tabelle 7.3: Minimale und daraus abgeleitete geplante Zeiten im Rahmen des Turnaround-Prozesses (Werte in Minuten).....	184
Tabelle 7.4: Eingabeparameter der entwickelten Anwendung und deren mögliche bzw. typische Ausprägungen	191
Tabelle 7.5: Anzahl und Dauer aufgetretener Störungsereignisse (Werte gemittelt über 100 Simulationsläufe)	196
Tabelle 7.6: Kennzahlen der verschiedenen Planungshorizonte (Personaleinsatzplan: LH_June07_Week(Best)).....	204
Tabelle 7.7: Auflistung von 20 Kombinationen der während der Optimierung berücksichtigten Indikatorgewichte.....	210
Tabelle B.1: Übersicht über die typische Verteilung von Event-Typ-Häufigkeiten innerhalb von Simulationsläufen (bei stündlicher Event-Queue-Betrachtung).....	229
Tabelle C.1: Auflistung der in Kapitel 7.4.1 durch Optimierung erzielten und im Rahmen der Simulation verwendeten Indikatorausprägungen	231

Algorithmenverzeichnis

Algorithmus 3.1: Linear Chainer.....	66
Algorithmus 4.1: SPA von Dijkstra.....	95
Algorithmus 4.2: SPA von Bellmann und Ford	97
Algorithmus 4.3: Simulated Annealing	103
Algorithmus 5.1: Ablauf der ShiftJob-Übergangsfunktion	130
Algorithmus 5.2: Multilabel SPA.....	136

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Kapitel
ACPP	Airline Crew Pairing Problem	4.1
AJPP	Airline Job Pairing Problem	5.1
AOC	Airline Operations Control	2.3.4
ATC	Air Traffic Control	2.2.2
Aufl.	Auflage	
B&B	Branch-and-Bound	4.3.1.4
B&C	Branch-and-Cut	4.3.1.6
B&P	Branch-and-Price	4.3.1.5
Bd.	Band	
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	6.3
bspw.	beispielsweise	
bzgl.	bezüglich	
bzw.	beziehungsweise	
CATS	Computer Aided Traffic Scheduling	1.1
CG	Column Generation	4.3.1.1
CPP	Crew Pairing Problem	4.1.6
CSP	Crew Scheduling Problem	4.1
d.h.	das heißt	
DB	Datenbank	3.3
DOO	Day of Operation	2.3
dt.	deutsch	
EASA	European Aviation Safety Agency	2.3.2.3
ECP	Excess Cost Percentage	5.1.3
engl.	englisch	
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette	6.2.1
et al.	et alii	
etc.	et cetera	
evtl.	eventuell	
EW	Erwartungswert	7.3.1
FAA	Federal Aviation Administration	2.1
FCL	Flight Crew Licensing	2.3.2.3

FDP	Flight Duty Period	4.1.2
FEL	Future Event List	6.1.4
FMS	Flight Management System	2.2.2
FTC	Flight Time Credit	4.1.4
ggf.	gegebenenfalls	
GTA	Ground Time After	5.1
GTB	Ground Time Before	5.1
H&S	Hub and Spoke	2.1
Hrsg.	Herausgeber	
i.Allg.	im Allgemeinen	
i.d.R.	in der Regel	
IATA	International Air Transportation Association	3.1
ICAO	International Civil Aviation Organisation	3.1
Intl.	International	
KVB	Kölner Verkehrs-Betriebe AG	1.1
LBA	Luftfahrt-Bundesamt	2.1
LH	Deutsche Lufthansa AG	2.1
Lit.	Literatur	
MCT	Minimum Connecting Time	2.3.1
MGP	Minimum Guaranteed Pay	2.3.2.3
MGPWT	Minimum Guaranteed Payed Work Time	5.1.3
MLSP	Multi Label Shortest Path	4.3.1.2
MP	Master Program	4.3.1.1
Nr.	Nummer	
o.g.	oben genannte/r/s	
OFV	Objective Function Value	5.3.3.1
OR	Operations Research	3
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr	4.4
PAX	Passagiere	2.2.1
RCSP	Railway Crew Scheduling Problem	4.4
RMP	Reduziertes Master Problem	4.3.1.1
S.	Seite/n	
s.t.	such that	
SA	Simulated Annealing	4.3.2.2
SB&P	SingleBranch-and-Price	5.3

SCP	Set Covering Problem	4.1.1
sog.	so genannte/r/s	
SPP	Set Partitioning Problem	4.1.1
TAFB	Time Away From Base	2.3.2.3
teilw.	teilweise	
u.a.	unter anderem/n	
u.U.	unter Umständen	
usw.	und so weiter	
vgl.	vergleiche	
z.B.	zum Beispiel	

Qualifikationstypen:

Abkürzung	Bedeutung	Kapitel
ARA	Arabic	3.2.2
ASI	Asian	3.2.2
CPT	Captain	2.1
FA	Flight Attendant	2.1
FC	First Class	2.1
FO	First Officer	2.1
M	Male	7.4.1
P1	Purser	2.1
P2	Chefpurser	2.1
SFO	Senior First Officer	2.1
SO	Second Officer	2.1
SOM	Sommelier	2.1

Flughäfen:

IATA-Code	Name
ATH	Eleftherios Venizelos Intl. (Athen, Griechenland)
BKK	Suvarnabhumi Intl. (Bangkok, Thailand)
CDG	Charles De Gaulle (Paris, Frankreich)
CTA	Catania Fontanarossa (Catania, Italien)
DUS	Düsseldorf
FRA	Frankfurt

HAJ	Hannover
KUL	Kuala Lumpur Intl. (Kuala Lumpur, Malaysia)
MAD	Barajas (Madrid, Spanien)
MUC	München
MPX	Malpensa (Mailand, Italien)
PHL	Philadelphia Intl. (Philadelphia, USA)
SGN	Tan-Son-Nhat Intl. (Ho-Chi-Minh-Stadt, Vietnam)
VIE	Schwechat (Wien, Österreich)

Flugzeugtypen:

IATA-Code	Name
318	Airbus A318-100
319	Airbus A319-100
320	Airbus A320-200
321	Airbus A321-200
333	Airbus A330-300
343	Airbus A340-300
346	Airbus A340-600
388	Airbus A380-800
738	Boeing 737-800
744	Boeing 747-400

1 Einführung

1.1 Kontext und Motivation

In der heutigen Gesellschaft stellt Mobilität einen wesentlichen Faktor dar. Im Zeitalter globaler Märkte und dem allgegenwärtigen Internet bieten Firmen ihre Produkte und Dienstleistungen weltweit an, wobei die geographische Nähe zum Kunden immer weiter aus dem Fokus gerät. Und auch im Privatleben ist es den Menschen ein Grundbedürfnis, sich zu jeder Zeit bequem und frei bewegen zu können. Die stetig steigende Nachfrage nach Mobilität zwingt die moderne Verkehrspolitik zur immer effizienteren Nutzung und zum kontinuierlichen Ausbau der bestehenden Infrastrukturen. Gleichzeitig muss sie vor dem Hintergrund technologischer und gesellschaftlicher Entwicklungen steigenden Anforderungen gerecht werden. Es stellt eine bedeutende gesellschaftliche Herausforderung dar, günstige und barrierefreie Mobilität in ausreichendem Maße zu gewährleisten, ohne dabei Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit zu vernachlässigen.

Dies gilt insbesondere auch für den Luftverkehr. Der langfristige Ausbau dieses Verkehrsträgers wird nicht selten von Bürgerprotesten begleitet, welche unzumutbare Lärm- und Schadstoffemissionen sowie zu hohe Baukosten bemängeln. Diese negativen Folgen der Mobilität auf Mensch und Umwelt führen zu lokalen Einschränkungen des Luftverkehrs und wirken so dem Ausbau von Kapazitäten entgegen. Für die im internationalen Wettbewerb stehenden Fluglinien und Flughafensbetreiber sind sowohl die hohen Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit als auch die ökonomische Prämisse der Minderung des Ressourcenverbrauchs weitere zentrale Aspekte. Um vor diesem Hintergrund im internationalen Vergleich zu bestehen und den Wirtschaftsstandort Deutschland stärken zu können, ist es für die am deutschen Luftverkehr beteiligten Unternehmen essentiell, in neue Technologien zu investieren und ihre Methoden und Prozesse stetig anzupassen.

In diesem Zusammenhang stellt der Planungsprozess von Fluglinien ein lohnendes Forschungsobjekt dar. Er beinhaltet nicht nur deren langfristige strategische Netzplanung, sondern auch das Festlegen, wie viele Flugzeuge zu den verschiedenen Tageszeiten welche Flughäfen frequentieren. Darüber hinaus hängen von der Güte des Planungsprozesses die Qualität und die Zuverlässigkeit des Flugangebots ab. Insgesamt wird innerhalb des Planungsprozesses ein einziges großes Optimierungsproblem behandelt. Aufgrund seiner enormen Komplexität muss es jedoch in handhabbare Teilprobleme zerlegt und in separaten Planungsphasen behandelt werden. Daraus folgt zwar, dass sich die Lösungen der Teilprobleme mit den zur Verfügung stehenden Optimierungsmethoden einem jeweiligen Optimum annähern können, sich die Wahrscheinlichkeit des Erreichens eines Gesamtoptimums jedoch stark verringert. Erschwerend hinzu kommt die gängige Praxis, für die jeweils nachfolgende Phase Planungspuffer einzubauen, die die vorhandenen Ressourcen teilweise unnötig belasten.

Das Flugpersonal einer Fluglinie stellt eine ihrer zentralen Ressourcen dar. In Zeiten, da sich viele der großen Fluglinien bzgl. ihrer Preise und Dienstleistungsangebote nicht mehr nennenswert unterscheiden, ist eine Individualisierung durch gut geschulte Flugdienstmitarbeiter und besondere Serviceleistungen im Rahmen der Kundenbetreuung und -bindung von strategischer Relevanz. Durch ihren persönlichen Kontakt zu den Fluggästen gilt dies insbesondere für die Kabinenbesatzungen. Deren Softskills werden vom Kunden direkt wahrgenommen und können daher zu langfristigen ökonomisch messbaren Wettbewerbsvorteilen ausgebaut werden.

Diese Form der Marketingstrategie stellt jedoch erhebliche Anforderungen an die Personaleinsatzplanung, die typischerweise ohnehin schon in einem komplexen Spannungsfeld agiert. Einerseits ist diese vor dem Hintergrund eines hohen Wettbewerbsdrucks und allgegenwärtiger Kosteneinsparungen davon geprägt, mit möglichst knappen Personalressourcen auskommen zu müssen. Andererseits gilt es, die operative Stabilität während des Flugbetriebs zu gewährleisten und ausreichende Personalreserven vorzuhalten, um flexibel auf Störungen im Flugablauf reagieren und deren Auswirkungen zeitlich und räumlich begrenzen zu können. Vor diesem Hintergrund ein Gleichgewicht zu finden, wird durch das zusätzliche Abgleichen von personellen Qualifikationen mit flugbetrieblichen Anforderungen erschwert.

Hinsichtlich dieser Zusammenhänge und aufgrund der teilw. gegensätzlichen Zielsetzungen bieten die Anwendung von multikriteriellen Optimierungsmethoden als auch von diskreten Simulationsmodellen eine erhebliche Verbesserung der Untersuchungsmöglichkeiten. Die Analyse heterogener Planungskonzepte kann mit hoher Zuverlässigkeit der Ergebnisse und ohne eine Gefährdung eines Realsystems erfolgen. Vor dem Hintergrund, dass im Bereich der robusten Einsatzplanung von Flugpersonal noch keine personen- und aufgabengenauen Konzepte zur anonymen Umlaufplanung bekannt sind, wird sich in dieser Arbeit der Entwicklung entsprechender Problemformulierungen und Lösungsansätze unter Verwendung und Anpassung von Methoden der Optimierung und Simulation gewidmet.

Damit ist diese Arbeit als weiterer Baustein im Projekt *Computer Aided Traffic Scheduling (CATS)* zu verstehen, das am Lehrstuhl von Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer am Institut für Informatik der Universität zu Köln ins Leben gerufen und das zwischenzeitlich als Kooperation mit der Technischen Hochschule Köln, der Kölner Verkehrs-Betriebe AG (KVB) und der Lufthansa CityLine fortgeführt wurde. Im CATS-Projekt werden Planungsprobleme aus dem Verkehrsbereich untersucht mit dem Ziel, diese effizienter und insbesondere im Hinblick auf deren Störungsanfälligkeit robuster lösen zu können. Dabei werden Methoden der diskreten Simulation und der mathematischen Optimierung angewandt, weiterentwickelt und programmtechnisch implementiert. So soll es Verkehrsplanern ermöglicht werden, die Qualität ihrer Planungsergebnisse zu erhöhen und diese noch vor ihrer Umsetzung auf ihre dynamischen Eigenschaften hin zu untersuchen. In diesem Zusammenhang sind bereits vier Dissertationen und 14 Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten entstanden. Gleichzeitig

wurden die wesentlichen Forschungsergebnisse in diversen Artikeln publiziert und auf Konferenzen und Vorträgen bekannt gemacht¹.

1.2 Ziele der Arbeit

Die Ziele, die in dieser Arbeit angestrebt werden, können in die beiden folgenden Themenbereiche eingeordnet werden:

1. Themenbereich Optimierung

Das im vorigen Abschnitt skizzierte komplexe Spannungsfeld, in dem Entscheidungen der Personaleinsatzplanung zu treffen sind, soll in Form eines mathematischen Optimierungsprogramms abgebildet werden. Dieses soll sämtliche Zusammenhänge und Nebenbedingungen der klassischen Planung anonymer Personalumläufe beinhalten und sie um personen- und aufgabenindividuelle Aspekte wie Qualifikationen und Anforderungen erweitern. Darüber hinaus soll auch insbesondere die Robustheit von Planungsergebnissen fokussiert werden, um deren Alltagstauglichkeit zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang sollen die Auswirkungen etablierter Planungsindikatoren auf die personelle Umlaufplanung untersucht und spezielle Konzepte zur effizienteren Nutzung der Personalressource entwickelt werden. Das Optimierungsprogramm soll die gleichzeitige Berücksichtigung dieser heterogenen und teilw. gegenläufigen Zielsetzungen unter Einbeziehung der Präferenzen eines Einsatzplaners ermöglichen. Weiterhin sollen Lösungsansätze entworfen werden, die in Kombination mit etablierten exakten und heuristischen Optimierungsverfahren zur Bestimmung zulässiger und qualitativ hochwertiger Lösungen herangezogen werden können.

2. Themenbereich Simulation

Um die Alltagstauglichkeit der durch die Optimierung erstellten Einsatzpläne sicherstellen und sie auf ihre dynamischen Eigenschaften hin überprüfen zu können, sollen Methoden der diskreten Simulation zum Einsatz kommen. Hierfür soll zunächst ein Simulationsmodell entworfen werden, das sämtliche relevanten Flugzeug- und Personalprozesse innerhalb des operativen Flugverkehrs abbildet und auch mögliche Störungen während der Planumsetzung berücksichtigt. Die Recoverystrategien, denen das operative Management einer Fluglinie im Störfall folgt, sollen ebenfalls Bestandteil des Modells sein. Dies soll ausgewählte Handlungsalternativen umfassen, die insbesondere den Bereich des Crew-Recovery abdecken, weshalb auch die Abläufe der verschiedenen Einsatzformen von Flugdienstreserven integriert werden sollen. Die Umsetzung des Modells in Form einer Simulationsanwendung gehört ebenfalls zu den Zielsetzungen dieser Arbeit. Diese soll in erster Linie flexibel in der Abbildung von Personaleinsatzplanszenarien, darüber hinaus aber auch plattformunabhängig und im Hinblick auf zukünftige Forschungsarbeiten leicht erweiterbar sein. Um eine flexible

¹ Eine entsprechende Auflistung ist in [Lüc1] S. 21 zu finden.

Anwendung zu ermöglichen, soll sie nur geringe Anforderungen an die zu verwendende Hardware stellen. Insgesamt soll die Simulationsanwendung die Bewertung von Flug- und Personaleinsatzplänen und das Aufzeigen von Verbesserungspotentialen ermöglichen und zusätzlich zur Entwicklung neuer Planerstellungsverfahren herangezogen werden können.

1.3 Vorgehen

Nach Abschluss dieses Kapitels wird in Kapitel 2 zunächst in die Terminologie und in die grundlegenden Zusammenhänge des Luftverkehrs eingeführt. Weiterhin erfolgt eine Beschreibung der Flugzeug-, Crew- und Passagierprozesse im operativen Flugverkehr, bevor die einzelnen Phasen im Gesamtplanungsprozess von Fluglinien erläutert werden.

In Kapitel 3 wird sich mit dem Aufbau eines konsistenten Datenbestandes befasst, der für die Untersuchung der Personaleinsatzplanung und deren Einfluss auf die Robustheit von Flugplänen benötigt wird. Reale Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen werden mit Hilfe von eigens entwickelten Generatoren um künstliche Datensätze ergänzt, um eine lückenlose Datengrundlage zu schaffen. Diese wird in einem Datenmodell abgebildet, in ein Datenbankschema überführt und in Form einer SQL-Datenbank nutzbar gemacht.

Mit dem Crew Pairing Problem wird in Kapitel 4 die Problemformulierung untersucht, die typischerweise für die anonyme Einsatzplanung von Flugzeugbesatzungen verwendet wird. Neben der Erarbeitung eines vollständigen mathematischen Programms wird hierbei sowohl auf verbreitete Modellierungsalternativen als auch auf die Berücksichtigung von Robustheitsaspekten eingegangen. Um darüber hinaus auch einen Überblick über häufig angewandte Lösungsmethoden zu gewinnen, werden die gängigen exakten und heuristischen Lösungsverfahren behandelt.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 5 mit der Formulierung des Job Pairing Problems ein aufgabengenaue Ansatz zur anonymen Einsatzplanung von individuellem Flugpersonal entwickelt. Unter Verwendung von Methoden der multikriteriellen Optimierung wird dieser um ausgewählte Ansätze zur Berücksichtigung von Planstabilitäten und -flexibilitäten erweitert. Weiterhin werden zwei speziell an die Problemstellung angepasste heuristische Lösungsverfahren konzipiert, validiert und beispielhaft angewendet.

Um die durch die Optimierung erzeugten individuellen Personaleinsatzpläne auch auf ihre dynamischen Eigenschaften hin untersuchen zu können, werden in Kapitel 6 Methoden und Modelle der Simulation behandelt. Es wird in ausgewählte Grundlagen der Modellierung und Simulation eingeführt, bevor mit SimAir, MEANS und SimOps bestehende Modelle untersucht werden, die zur Simulation im Umfeld von Flugverkehrssystemen konzipiert wurden. Auch werden personalorientierte Modellierungsansätze aus dem Umfeld von Einzelhandels- und Fertigungsbetrieben betrachtet, um

dem Fokus auf die Personaleinsatzplanung Rechnung zu tragen. Abschließend werden sämtliche Ansätze gegenübergestellt und ihre Eignung für die Ziele dieser Arbeit diskutiert.

In Kapitel 7 wird daraufhin ein Simulationsmodell vorgestellt, das sowohl für die Berücksichtigung der operativen Prozesse von Flugpersonal auf individueller Ebene als auch für die personengenaue Abbildung von Umläufen, Aufgaben, Qualifikationen und Recovery-Prozeduren geeignet ist und auf einer Kombination der zuvor als hilfreich identifizierten Ansätze basiert. Es wird weiterhin dessen programmtechnische Umsetzung beschrieben und dessen Validität und Leistungsfähigkeit eingeschätzt. Abschließend wird im Rahmen zweier Anwendungsfälle dessen Nützlichkeit demonstriert.

Kapitel 8 beschließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung des Erreichten und einem Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten.

2 Relevante Aspekte aus dem Luftverkehrsmanagement

Man kann das System des Luftverkehrs aus dem Blickwinkel verschiedener Akteure beschreiben, so z.B. aus der Sicht von Passagieren, Flughäfen, Fluglinien, Staaten etc. Die Beschreibung, die ein solcher Akteur anfertigen würde, würde im Detailgrad variieren, je nachdem ob ein bestimmter Sachverhalt für den Akteur von Bedeutung wäre oder nicht. In dieser Arbeit geht es um die Personaleinsatzplanung von Fluglinien, weshalb der Blickwinkel einer Fluglinie eingenommen wird. Je mehr ein spezifischer Aspekt aus dem Umfeld des Luftverkehrsmanagements mit der Einsatzplanung von Flugpersonal zusammenhängt, desto detaillierter wird die thematische Einführung in diesem Kapitel vorgenommen.

Es werden zunächst in die Terminologie und die grundlegenden Zusammenhänge des Luftverkehrs eingeführt (Kapitel 2.1). In dieser Arbeit kommt es insbesondere auch auf die Dynamiken des Luftverkehrssystems an, weshalb in Kapitel 2.2 die wichtigsten Prozessabläufe beschrieben werden. Zum besseren Problemverständnis der Einsatzplanung von Flugpersonal und um die Konsequenzen der hier getroffenen Entscheidungen auf andere Bereiche der Fluglinie einschätzen zu können, wird die Personalplanung in Kapitel 2.3 in den Gesamtplanungsprozess von Fluglinien eingebettet.

Die internationale Arbeitssprache im Bereich des Luftverkehrs ist Englisch, weshalb sowohl die gebräuchliche Terminologie als auch die Literatur, die sich mit diesem Themenbereich beschäftigt, oftmals ebenfalls englischsprachig ist. In dieser Arbeit werden sowohl englische Begriffe als auch deutsche Übersetzungen verwendet, immer mit dem Ziel, Sachverhalte präzise zu beschreiben und Missverständnisse zu vermeiden.

2.1 Terminologie und grundlegende Zusammenhänge

In dieser Arbeit wird die Sicht einer Fluglinie eingenommen, weshalb es zunächst zu klären gilt, was hier unter dem Begriff ‚Fluglinie‘ verstanden wird. Wenn in der heutigen Zeit von Fluglinien oder auch von Fluggesellschaften oder Airlines gesprochen wird, sind Unternehmen gemeint, deren Geschäftszweck es ist, durch den Transport von Personen oder Fracht auf dem Luftweg Gewinne zu erzielen. Dabei handelt es sich oftmals um international agierende Großkonzerne, bei denen nicht immer sofort klar wird, wer oder was dahinter steht. Ein Grund dafür ist, dass sie aus einer Vielzahl von Tochterunternehmen und Beteiligungsgesellschaften bestehen können, die in verschiedenen Geschäftsfeldern tätig sind und die ein ganzes Portfolio an Serviceleistungen anbieten.² Ein anderer Grund dafür ist, dass diese Konzerne zunehmend im Rahmen von strategischen Allianzen eng zusammenarbeiten, um langfristig Wettbewerbsvorteile ausbauen und zukünftige

² Im Geschäftsjahr 2014 bestand die Lufthansa Group (LH) aus rund 540 Tochterunternehmen bzw. Beteiligungsgesellschaften, die in den Sparten Personenverkehr, Logistik, Technik, Catering und IT-Services organisiert waren (vgl. [Luft]).

Wettbewerbspositionen sichern zu können (vgl. [Maur] S. 50, 52). Durch ein gemeinsames Marketing und einen gemeinsamen Verkauf können höhere Auslastungen erreicht und den Kunden gleichzeitig ein breiteres Flug- und Serviceangebot zugänglich gemacht werden. Die Zusammenlegung von Ticket- und Check-in-Schaltern, die Reduzierung von Connecting Times durch Nutzung gleicher Terminals und die Erhöhung der Ausfallsicherheit durch gemeinsame Ressourcen steigern die Attraktivität aus Kundensicht. Insgesamt führen diese Sachverhalte zu einer eher schwammigen Definition eines Flugunternehmens, weshalb sie für diese Arbeit wie folgt präzisiert wird: Eine Fluglinie ist ein Unternehmen oder der Teil eines Unternehmens, dessen Geschäftszweck einzig die Personenbeförderung ist und deren Aufgaben, Angebote und Ressourcen klar gegen die anderer Fluglinien abgegrenzt werden können.

Das Kernprodukt einer Fluglinie ist ihr Flugplan, welcher somit für ihren wirtschaftlichen Erfolg von herausragender Bedeutung ist (vgl. im Folgenden [Conr] S. 317 ff.). Er spiegelt ihr gesamtes Flugangebot wider und wird zumeist zweimal im Jahr, für eine Sommer- und eine Winterperiode, geplant und veröffentlicht. In ihm werden Abflugs- und Zielorte, Abflugs- und Ankunftszeiten³ sowie eingesetztes Fluggerät festgeschrieben. Zusätzlich gibt er Auskunft über die Frequenzen, also die Anzahl von Flügen innerhalb eines bestimmten Zeitraums (zumeist eine Woche), in denen die verschiedenen Verbindungen geflogen werden.

Fluglinien bieten ihren Kunden im Wesentlichen zwei Arten von Reiseverbindungen an: Direkt- und Umsteigeverbindungen. Eine Direktverbindung bzw. ein Direktflug ist eine Verbindung zwischen zwei Orten, bei dem eine planmäßige Zwischenlandung stattfinden kann. Ein Direktflug wird dadurch gekennzeichnet, dass die Passagiere nicht das Flugzeug zu wechseln brauchen und sich die Flugnummer nicht ändert. Findet auf der Reise vom Start- zum Zielort keine Zwischenlandung statt, wird der Flug auch als Non-Stop-Flug bezeichnet. Bei Umsteigeverbindungen gibt es mindestens einen Zwischenstopp, bei dem das Flugzeug gewechselt werden muss. Hierbei ändert sich auch die Flugnummer. Sämtliche Verbindungen werden innerhalb des Flugplans anhand ihrer Flugnummern identifiziert. Da Verbindungen innerhalb einer Flugplanperiode in wöchentlichen oder täglichen Frequenzen angeboten werden, ist zur Bestimmung eines speziellen Fluges auch noch das Abflugdatum heranzuziehen. Ein einzelner Non-Stop-Flug, der auf diese Art zeitlich und räumlich von allen anderen Flügen abgegrenzt werden kann, wird im Weiteren, abgeleitet vom englischen Begriff ‚Flight Leg‘, als Leg bezeichnet.

Die grundlegende Struktur eines Flugplans wird durch das Flugnetz einer Fluglinie bestimmt. Es setzt sich aus den von der Fluglinie bedienten Flughäfen, in diesem Fall ‚Stationen‘ genannt, und den angebotenen Verbindungen zwischen ihnen zusammen. In dieser Arbeit wird die direkte räumliche Verbindung zwischen zwei Flughäfen als ‚Route‘ definiert. Dabei soll gelten, dass eine Route gerichtet ist, damit sich die Route von Flughafen A zu Flughafen B von der Route von Flughafen B zu

³ Eine Übersicht der im Weiteren verwendeten Zeitbegriffe wird im Glossar in Anhang A dieser Arbeit gegeben.

Flughafen A unterscheiden lässt. Die Tatsache, dass Flugzeuge nicht immer exakt den gleichen Weg durch den Luftraum nehmen, da sie von Toren und anderen Luftraumkontrollpunkten individuell gelotst werden, ist für diese Definition unerheblich. Abhängig von ihren Distanzen können Routen in Kurz-, Mittel- und Langstrecke unterschieden werden, wobei hierfür keine allgemeingültige Einteilung existiert (vgl. [Conr] S. 4). Die Gestaltung eines Flugnetzes bleibt jeder Fluglinie selbst überlassen, wobei sich, zumindest für größere Unternehmen, eine sog. Hub-and-Spoke-Struktur (H&S) durchgesetzt hat. Das ‚Nabe-Speiche‘-System besteht aus einem zentralen Verteilerflughafen, dem Hub, der von im Netzwerk weiter außerhalb liegenden Flughäfen, den Spokes, angefliegen wird und so eine Vielzahl von Umsteigeverbindungen ermöglicht.

Um den Flugplan umzusetzen greift eine Fluglinie auf ihre Flugzeugflotte zurück. Diese beinhaltet alle Flugzeuge, die das Unternehmen zur Ausführung der Flüge nutzen kann. Dabei können die Flugzeuge verschiedenen Flugzeugtyps sein. Die Flugzeugtypen, auch Flugzeugmuster oder -modelle genannt, unterscheiden sich u.a. in Erwerbs- und Unterhaltskosten, Antriebsart, maximaler Reichweite und Geschwindigkeit, Gewicht, Wartungsaufwand und Passagierkapazität (vgl. im Folgenden [Conr] S. 139-141). Die Flotte einer Fluglinie wird i.d.R. anhand der Flugzeugtypen in Interkontinental-, Kontinental- und Regionalflotten unterteilt, auch wenn diese Einteilung, ähnlich wie bei den Routen, nicht trennscharf ist. In diesem Zusammenhang sind die maximale Reichweite und die Passagierkapazität von besonderer Bedeutung, da bei internationalen Flügen, im Vergleich zu regionalen Flügen, die Routen länger und die zu bewältigenden Passagierzahlen höher sind. Hierbei gilt es, die gegenseitige Abhängigkeit dieser beiden Faktoren zu beachten: Die Reichweite eines Flugzeugs lässt sich erhöhen, indem dessen Passagierkapazität nicht völlig ausgeschöpft wird. Neben diesem technischen Einfluss auf das zu nutzende Sitzplatzkontingent gibt es auch einen wirtschaftlichen Aspekt. Eine Fluglinie hat einen gewissen Spielraum bei der Einteilung der Sitzplätze in verschiedene Buchungsklassen. Je nach Konfiguration variieren die Sitzabstände und somit auch die Maximalzahl an Plätzen. So kann bspw. eine Boeing 737-800 (738) bei einem Zwei-Klassen-System mit 148, bei einem Ein-Klassen-System mit 186 Sitzplätzen ausgestattet werden. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft die Flottenstruktur der Lufthansa Passage im Jahr 2014 anhand verschiedener Flugzeugtypen und deren Reichweite, Sitzplatzanzahl und jeweiligem Anteil an der Gesamtflotte.

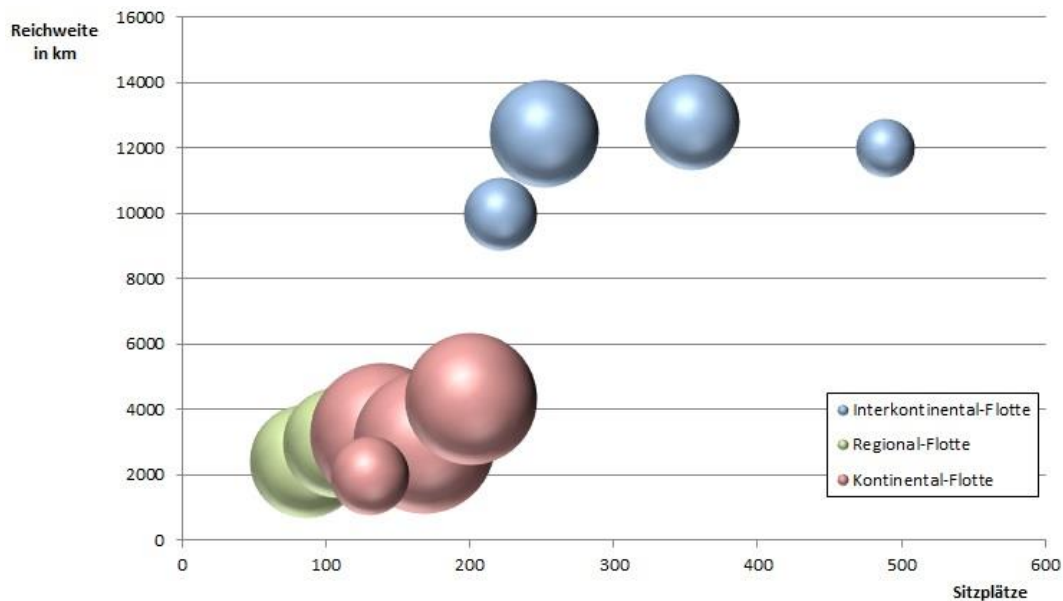


Abbildung 2.1: Flottenstruktur der Lufthansa Passage. Die Größe der Blasen zeigt den relativen Anteil des Flugzeugtyps an der Gesamtflotte⁴

Ebenso wichtig für die Implementierung eines Flugplans wie die Flugzeugflotte ist das Personal einer Fluglinie. Je nach Firmenstruktur kann es verschiedenen Bereichen zugeordnet werden, so z.B. der Verwaltung, dem Service, der Technik etc. In Abbildung 2.2 wird beispielhaft die Personalstruktur einer mittelgroßen Fluglinie dargestellt. Für die Betrachtung der Einsatzplanung in dieser Arbeit ist jedoch ausschließlich das fliegende Personal von Interesse. Das Flugpersonal lässt sich in zwei Gruppen aufteilen: Cockpit- und Kabinenpersonal. Auf jedem Flug setzt sich die Besatzung aus einer Cockpitcrew und einer Cabincrew zusammen, innerhalb derer die einzelnen Mitarbeiter verschiedene Positionen einnehmen.

Bei den möglichen Positionen innerhalb einer Cockpitcrew ist zunächst der Captain (CPT) zu nennen. Als kommandierender Pilot während eines Linienfluges trägt er die Verantwortung für die Sicherheit des Flugzeuges und der Passagiere und hat zu jeder Zeit die oberste Entscheidungs- und Weisungsbefugnis. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der CPT einen gesamten Flug über die Steuerung übernehmen muss. Diese Aufgabe teilt er sich mit seinem First Officer (FO), seinem Kopiloten, der ihn im Notfall auch ersetzen kann. Er steht in der Rangfolge direkt unter dem CPT. Je nach Fluglinie kann zwischen CPT und FO noch der Senior First Officer (SFO) eingeordnet werden, der sich durch einen größeren Erfahrungsschatz und durch absolvierte Zusatzausbildungen vom FO abgrenzt. Abschließend kann zur Ergänzung der Cockpitmannschaft noch die Position eines weiteren Officers, des Second Officers (SO), besetzt werden, welcher hierarchisch am weitesten unten steht. Während auf Kurzstreckenflügen die Cockpitcrew zumeist nur aus zwei Piloten besteht (CPT und FO), wird sie auf Langstreckenflügen durch einen SFO oder einen SO ergänzt, um die Einhaltung der Ruhezeiten zu

⁴ In Anlehnung an [Conr] S. 142. Die Daten mit dem Stand vom 31.12.2014 beziehen sich auf die Lufthansa Passage inkl. Germanwings und Regionalgesellschaften ohne SWISS, Austrian Airlines und Lufthansa Cargo (vgl. [Luf1]).

ermöglichen. Auch wenn der Karriereweg eines Piloten je nach Fluglinie variieren kann, wird er typischerweise zunächst als FO auf Kurzstrecken eingesetzt. Danach folgen FO Langstrecke, CPT Kurzstrecke und CPT Langstrecke.

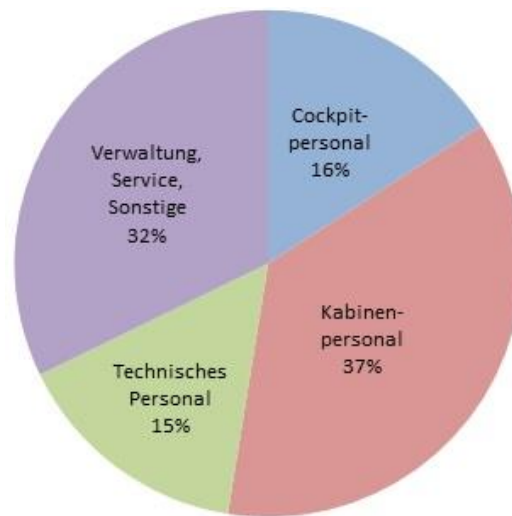


Abbildung 2.2: Personalstruktur von Air Berlin PLC⁵

Die Cabincrew setzt sich hauptsächlich aus Flugbegleitern (engl.: flight attendant, FA) zusammen, welche in erster Linie für die Sicherheit der Passagiere, daneben aber auch für deren Wohlbefinden zuständig sind (vgl. im Folgenden [Conr] S. 148 f. und [Euro] S. 186 f.). Die Größe der Kabinenbesatzung hängt von der Passagierkapazität des Flugzeugs ab und muss pro angefangene 50 Sitzplätze einen FA bereitstellen. Während eines Langstreckenfluges an Bord eines Großraumflugzeugs kann diese gesetzliche Bestimmung vor dem Hintergrund von Ruhezeitenregelungen und zusätzlichen Serviceanforderungen zu Besatzungsstärken des Cabincrew-Complements von über 15 FAs führen (vgl. [Eber] S. 66). Grundsätzlich gilt, dass die Personalkapazitäten, die für eine erfolgreiche Evakuierung des Flugzeugs im Notfall nötig sind, vorhanden sein müssen. Zusätzlich zu den Positionen der FAs wird ein sog. Purser⁶ (P1) als Leiter der Cabincrew eingesetzt. Der Purser ist der ranghöchste Flugbegleiter und verantwortlich für die Durchführung von gesetzlichen und betrieblichen Verfahren. Er koordiniert die Sicherheits- und Serviceabläufe in der Kabine und bildet die Kommunikationsschnittstelle zwischen Cockpit, Kabine und Boden (vgl. [Maur] S. 234-235). Je nach Fluglinie wird dem P1 auf Großraumflugzeugen mit separaten Gängen und abgetrennten Bereichen ein erfahrenerer Chefpurser (P2) hierarchisch übergeordnet.

Um die Servicequalität zu steigern und den Passagieren ihren Flug möglichst angenehm zu gestalten, können die Funktionsbereiche der Kabinenpositionen um spezielle Serviceaufgaben erweitert werden

⁵ Zum 31.12.2014 beschäftigte Air Berlin PLC insgesamt 8440 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (vgl. [Airb] S. 42).

⁶ Ursprünglich bezeichnet der Begriff, abgeleitet vom englischen Wort ‚purse‘ (dt.: Geldbeutel, Börse), den Zahlmeister an Bord eines Schiffes (siehe [Dude]).

(vgl. im Folgenden [Köni] S. 365-370). So können FAs mit entsprechender Zusatzqualifikation z.B. für die intensivere Betreuung der Ersten Klasse (engl.: first class, FC) eingesetzt werden oder die Passagiere als Sommelier (SOM) über die Qualitätsweine aufklären, die an Bord angeboten werden. Des Weiteren kann es als Qualitätsmerkmal gelten, wenn zumindest ein Mitglied der Kabinenbesatzung die Sprache des Ziellandes beherrscht. So kann Fluggästen, die sich ansonsten nur schwer verständigen könnten, eine gewisse Sicherheit vermittelt und ihnen ihre Reise komfortabler gestaltet werden. Darüber hinaus können die FAs geschult werden, um den verschiedenen kulturellen Hintergründen der Fluggäste Rechnung zu tragen. Was in der einen Kultur als höflich oder üblich gilt, kann in einer anderen Kultur als aufdringlich oder beleidigend empfunden werden oder auf andere Art zu Irritationen führen.⁷ In diesem Zusammenhang kann es ebenfalls sinnvoll sein, explizit darauf zu achten, dass eine Cabincrew sowohl aus Flugbegleiterinnen als auch aus Flugbegleitern besteht, da eine rein weibliche Kabinenbesatzung in arabisch geprägten Ländern⁸ als unakzeptabel gelten und das mögliche Missachten von Anweisungen zu Sicherheitsrisiken führen kann.

Neben den Fluglinien und ihrem Personal sind für die Planung und Durchführung des täglichen Flugverkehrs die Flughäfen von entscheidender Bedeutung. Die Kernfunktionen eines Flughafens bestehen in der Bereitstellung von Flächen und Anlagen, die den Flugzeugen das Starten und Landen ermöglichen, sowie die betriebliche Abfertigung des Fluggeräts und die verkehrliche Abfertigung von Passagieren, Fracht und Post (vgl. [Conr] S. 158 ff.). Dabei können die Anforderungen bei Hubs, im Gegensatz zu anderen Flughäfen, höher sein, da neben der normalen Passagierabfertigung ein erheblicher Anteil von Umsteigepassagieren hinzukommt. Es ist das Geschäftsmodell eines Flughafenbetreibers durch die zeitliche und räumliche Verknüpfung von inter- und intramodalen Verkehrsströmen Gewinne zu erzielen. Dabei können sie sich als Verkehrsknotenpunkt unterschiedlich am Markt positionieren, indem sie sich z.B. auf den Personen- oder Frachttransport spezialisieren, sich durch eine gezielte Preispolitik für Billigfluggesellschaften attraktiv machen oder sich durch eine entsprechend ausgebaute Infrastruktur als Umsteigehub qualifizieren. Flughäfen kooperieren mit Behörden, Dienstleistungsunternehmen und ihren Partnern innerhalb der Logistikkette, zu denen vornehmlich die Fluglinien zählen. Je nach der Position innerhalb eines Flugnetzes können sie für die jeweilige Fluglinie von unterschiedlicher Bedeutung sein und so z.B. die Rolle eines Hubs oder auch die einer Crewbase einnehmen. Ein Flughafen wird von einer Fluglinie als Crewbase bezeichnet, wenn sie dort Teile ihres Personals stationiert. Gilt die Crewbase für einen Mitarbeiter als Einsatzort, wird sie von ihm Homebase genannt, wobei Homebase und Wohnort des Mitarbeiters nicht übereinstimmen müssen.

⁷ Um diesen Tatsachen Rechnung zu tragen hat die Lufthansa Passage innerhalb des Kabinenpersonals verschiedene Kompetenzgruppen gebildet: „Global Competence Team“, „Local Competence Team China“, „Local Competence Team India“ und „Special Competence Team“ (vgl. [Weiß] S. 70-72).

⁸ König und Strauss nennen in diesem Zusammenhang die Länder: Saudi Arabia, Kuwait, Qatar, United Arab Emirates, Iran, Iraq, Pakistan, Algeria und Morocco.

Der komplizierte Aufbau eines Flughafens mit seinen Gebäuden, Anlagen und Einrichtungen lässt sich in eine Luft- und eine Landseite unterteilen. Auf der Luftseite ist neben dem eigentlichen Luftraum, dessen Kontrolle in die Zuständigkeit des Flughafens fällt, zunächst das Runway-System zu nennen (vgl. im Folgenden [Conr] S. 160 f.). Von der Länge und Breite seiner verschiedenen Start- und Landebahnen hängt es ab, wie hoch das Gesamtgewicht eines Flugzeugs sein darf und welche Flugzeugtypen den Flughafen benutzen können. Rollwege, auch Taxiways genannt, verbinden die Runways mit dem Vorfeld des Flughafens, auf dem sich die Parkpositionen für die Flugzeuge befinden. Diese können entweder direkt am Terminalgebäude oder auch in einiger Entfernung zu ihm gelegen sein, wobei im ersten Fall das Flugzeug über eine Fluggastbrücke direkt aus dem Gebäude heraus betreten werden kann und im zweiten Fall Shuttlebusse und Treppenwagen zum Personentransport eingesetzt werden müssen. Darüber hinaus gehören einschließlich Hangars und Hallen alle die Flächen zum Vorfeld, die ebenfalls zur Abfertigung von Flugzeugen benötigt werden, so z.B. Reparatur-, Wartungs- und Enteisungsstationen. Die Flugzeugbewegungen auf Run- und Taxiways und dem Vorfeld werden von den Verkehrslotsen im Tower des Flughafens koordiniert. Die Landseite eines Flughafens beinhaltet sämtliche bodengebundenen öffentlichen und individuellen Verkehrssysteme. Dazu gehören Bahnhöfe für den Zugverkehr, Haltestellen für Bus und Bahn und Parkplätze für Taxen und private Kraftfahrzeuge. Das Terminalgebäude verbindet die bodengebundenen mit den luftgebundenen Verkehrsströmen und bildet somit die Nahtstelle zwischen Luft- und Landseite. Hierfür beinhaltet es sämtliche Anlagen und Einrichtungen die zur Abfertigung von Fracht und von Passagieren und ihrem Gepäck nötig sind (vgl. [Maur] S. 225), wobei der Betrieb oftmals durch Dritte erfolgt und der Flughafenbetreiber lediglich die entsprechenden Flächen, zumeist gegen Entgelt, zur Verfügung stellt. Neben Informations-, Ticket- und Abfertigungsschaltern gehören die einzelnen Gates mit ihren Wartebereichen, Sicherheits- und Kontrollstationen, Sortieranlagen und Transportbänder dazu. Darüber hinaus bieten die Terminals Platz für die Fluglinien selbst, für weitere Transport- und Serviceunternehmen sowie für staatliche Behörden wie das Luftfahrtbundesamt (LBA), den deutschen Wetterdienst, den Zoll, die Polizei und Bundespolizei und das Gesundheitsamt. Handel und Gastronomie in Form von Restaurants, Bars, Cafés, Kiosks, Geschäften und Duty-free-Shops sorgen für den Komfort der Flughafenbesucher.

Die maximalen Kapazitäten eines Flughafens hängen von seiner technischen und räumlichen Ausstattung ab und werden vor dem Hintergrund von Sicherheitsfragen vom deutschen LBA (oder z.B. seinem amerikanischen Pendant, der Federal Aviation Administration, FAA) reglementiert (vgl. [Clar] S. 392). Die Flughafenkapazitäten können auf unterschiedliche Weise gemessen werden, z.B. in Flugbewegungen oder Passagieren pro Jahr, der Anzahl von Terminals und Gates oder in Start- und Landeraten. Die Start- und Landeraten treffen eine Aussage darüber, wie viel Flugzeugverkehr, gemessen in Anzahl Starts und Landungen, ein Flughafen in einer gewissen Zeit bewältigen kann. Anhand dieser technischen und administrativen Kriterien kann die sog. Slot-Kapazität eines Flughafens bestimmt werden (vgl. [Jägg] S. 197). Slots bezeichnen im Voraus geplante Zeiträume für

Luftfahrzeugbewegungen, z.B. Starts, Landungen oder Überflüge, und stellen somit das Kernprodukt von Flughäfen dar. Die Slot-Planung stellt sicher, dass keine Ressource innerhalb eines Zeitfensters doppelt belegt wird (vgl. [Maur] S. 249-256). Regelverstöße im täglichen Betrieb, z.B. Landungen ohne zugeteilte Zeitslots, werden von der Flughafenkoordination gemeldet und können vom LBA sanktioniert werden. Die Slot-Planung dient weiterhin dem optimalen Verkauf der Flughafenkapazitäten an die Fluglinien. Bei alledem ist zu beachten, dass es sich bei diesen Kapazitäten keineswegs um Konstanten handelt, da sie vielen Einflüssen unterliegen und im Zeitverlauf variieren können. Geplante Kapazitätsveränderungen können z.B. in gesetzlich vorgeschriebenen zeitlichen Einschränkungen von Flugzeugbewegungen bestimmter Bautypen oder in Nachtflugverboten begründet liegen. Ungeplante Verringerungen der Kapazitäten können zeitlich begrenzt durch dichten Verkehr und durch schlechte Wetter-, Sicht- und Windverhältnisse hervorgerufen werden. Insgesamt gilt, dass die Flughafenkapazität nur so groß ist, wie die schwächste Teilkapazität es zulässt. So wird es nicht möglich sein, die Kapazitäten des Flughafens vollständig auszuschöpfen, wenn eine Stelle nicht wie geplant arbeitet.

2.2 Operative Abläufe im Flugverkehr

Das Umsetzen eines Flugplans ist ein sehr komplexes Unterfangen. Damit jeder einzelne Linienflug wie geplant durchgeführt werden kann, müssen eine Reihe von Abläufen nahtlos ineinandergreifen und zahllose Aktivitäten aufeinander abgestimmt werden. Gleichzeitig gilt es äußerliche Einflüsse zu beachten, sämtliche gesetzliche wie auch vertraglich bedingte Vorschriften einzuhalten und den Zielsetzungen der Fluglinie bestmöglich nachzukommen. Das Flugnetz, welches der Flugplan durch Flughäfen und Flüge definiert, wird von Flugzeugen, Crews und Passagieren anhand von Prozessen durchlaufen, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.2.1 Flugzeugprozesse

Die Prozesse die ein Flugzeug im täglichen Betrieb zyklisch durchläuft, können in zwei komplementäre Prozesse zusammengefasst werden: in den Boden- oder auch Turnaround-Prozess einerseits und in den Off-Blocks-Prozess andererseits. Der Bodenprozess beginnt für ein Flugzeug mit dem Erreichen seiner Parkposition, welche sich entweder auf dem Flughafenvorfeld oder direkt am Gate eines Terminals befindet, und endet mit deren Verlassen. Er wird auch Turnaround-Prozess genannt, weil er alle Aufgaben zur Nachbereitung des letzten und zur Vorbereitung des nächsten Fluges beinhaltet und das Flugzeug somit ‚umdreht‘. Eine Übersicht über die Teilprozesse und deren typischen zeitlichen Ablauf ist in Abbildung 2.3 gegeben.

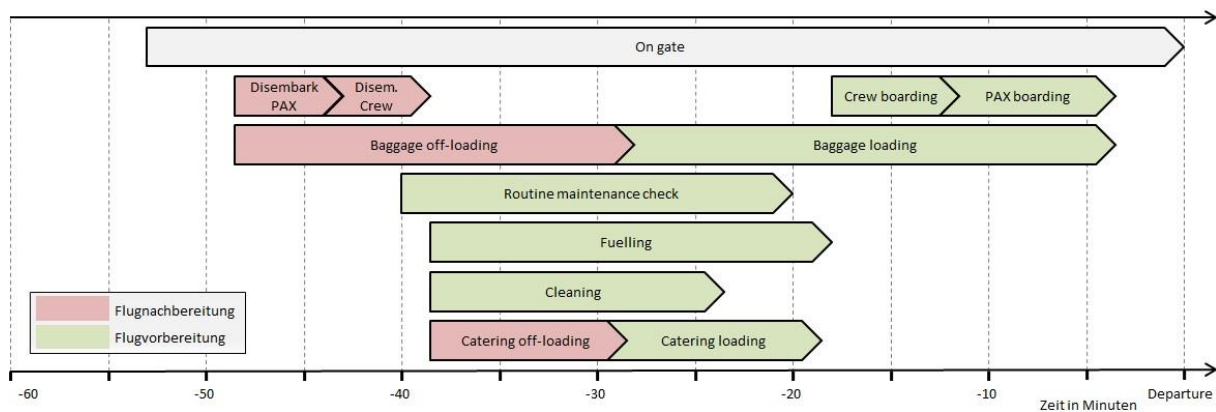


Abbildung 2.3: Der Turnaround-Prozess in seiner typischen zeitlichen Abfolge⁹

Sollte ein Flugzeug nicht gerade erst seinen Umlauf beginnen, sondern soeben einen Flug absolviert haben, beginnt der Bodenprozess mit dem Aussteigen der Passagiere (PAX) (vgl. [Maur] S. 233-234). Zeitgleich beginnt das Entladen des Gepäcks aus dem Frachtraum (Baggage off-loading). Sobald alle Passagiere von Bord sind, verlässt auch die Crew das Flugzeug. Muss das Flugzeug sofort für einen nächsten Flug vorbereitet werden, beginnt der technische Serviceablauf mit der routinemäßigen Inspektion des Flugzeugs. Parallel finden die Betankung (Fuelling) und die Reinigung (Cleaning) des Flugzeugs statt. Während die Dauer des Fuellings von der Treibstoffmenge abhängt, die für den nächsten Flug berechnet wurde, richtet sich die Dauer des Cleanings nach der Passagieranzahl des letzten Fluges. Zeitgleich zu diesen beiden Prozessen wird das Catering durchgeführt, die Entladung und Beladung des Flugzeugs mit Essen, Getränken und Komfortartikeln wie Zeitungen, Kissen, Decken etc., dessen Dauer hauptsächlich von der Passagieranzahl des nächsten Fluges abhängt. In der Regel fahren dabei die Hubwagen für das Catering von rechts, die Tankwagen von links an das Flugzeug heran. Ebenfalls zur gleichen Zeit, vorausgesetzt das Entladen des Gepäcks ist abgeschlossen, kann mit dem Einladen des neuen Gepäcks begonnen werden. Sind Cleaning, Catering und insbesondere das Betanken abgeschlossen, kann die Crew, gefolgt von den Passagieren, das Flugzeug betreten. Sollte es aus Zeitgründen nötig sein, den Boardingprozess vor Beendigung des Fuellings zu beginnen, muss aus Sicherheitsgründen die Flughafenfeuerwehr mit einem Einsatzwagen vor Ort sein. Ebenfalls aus Sicherheitsgründen muss darauf geachtet werden, dass das aufgegebene Gepäck synchron mit den Passagieren befördert wird, also kein Gepäckstück ohne seinen Besitzer transportiert wird. Gerade bei Umsteigeverbindungen erfordert diese Prämisse besondere Koordination. Sollte es dazu kommen, dass ein Koffer geladen wurde, die zugeordnete Person aber nicht in das Flugzeug eingestiegen ist, muss der Koffer ungeachtet der dafür benötigten Zeit oder etwaigen Termindrucks wieder ausgeladen werden. Aus diesem Grund kann der Beladevorgang frühestens mit dem Ende des Boardings beendet werden. Sind sowohl das Passengerboarding als auch das Beladen des Flugzeugs beendet, kann der Bodenprozess mit dem Schließen der Türen und Laderäume und dem Ablegen von Fluggastbrücken oder Treppen abgeschlossen werden. Die Zeit, die

⁹ In Anlehnung an [Conr] S. 338

ein Flugzeug insgesamt am Gate verbleibt, wird Turnaroundzeit genannt. Die technisch minimale Turnaroundzeit hängt neben den oben genannten Einflussfaktoren von der Fluglinie selbst und den Kapazitäten des Flughafens ab.

Der Off-Blocks-Prozess knüpft an den Bodenprozess an und beinhaltet alle Teilprozesse vom Verlassen eines Gates des Startflughafens bis zum Andocken an einem Gate des Zielflughafens. Der Begriff ‚Off-Blocks‘ leitet sich von gelben Blöcken ab, die während des Stillstehens eines Flugzeugs am Boden vor und hinter die Reifen gelegt werden, um versehentliches Wegrollen zu verhindern. Zunächst wird das Flugzeug während des Pushbacks aus der Parkposition geschoben, bevor es im Anschluss aus eigener Kraft über die Rollwege, die das Vorfeld mit den Runways verbinden, zur jeweiligen Startbahn rollt (Taxi-out-Prozess) (vgl. [Clar] S. 390-393). Die Dauer dieses Transfers hängt von der Distanz zwischen dem Gate und der Startbahn und der Dichte des Flugzeugverkehrs ab. Der Tower regelt den Verkehr und kann ein Flugzeug anweisen zu stoppen, um ein anderes Flugzeug vorbeizulassen. Im Anschluss an diesen Taxi-out-Prozess reiht sich das Flugzeug in die Runway-Queue ein, deren Länge ebenfalls von der Verkehrsdichte, aber auch von der Startrate des Flughafens abhängt. Ist das Flugzeug am Kopf der Warteschlange angelangt, kann es starten und den Reiseflug beginnen. Die Dauer des Fluges wird im Wesentlichen von der Distanz zwischen Start- und Zielflughafen sowie von Windrichtung und -geschwindigkeit bestimmt. Im Luftraum des Zielflughafens angekommen, wird in der Airspace-Queue auf die Landeerlaubnis gewartet. Nach erfolgreicher Landung geht es während des Taxi-in-Prozesses über die Rollwege zur jeweiligen Parkposition auf dem Flughafenvorfeld. Die Zeit, die für den gesamten Prozess vom Verlassen eines Gates bis zum Andocken am Zielgate benötigt wird, wird als Blockzeit bezeichnet.

2.2.2 Crewprozesse

Crews werden durch die Personaleinsatzpläne individueller Mitarbeiter für die jeweiligen Flüge zusammengestellt. In der folgenden Beschreibung geht es um die grundlegenden Aufgaben und Prozessabläufe von Cockpit- und Kabinenbesatzungen, die für die jeweiligen Mitglieder gleich sind.

Jeden Tag, etwa 90 Minuten vor der geplanten Abflugzeit des ersten Fluges, trifft sich die gesamte Besatzung zum Briefing (vgl. im Folgenden [Luf2] und [Maur] S. 234-235). Im sog. Dispatching-Raum erhält zunächst die Cockpitcrew alle relevanten Informationen und Unterlagen für den anstehenden Flug. Der Flugplan inkl. etwaiger Besonderheiten des Zielflughafens sowie möglicher Ausweichrouten und -flughäfen wird studiert und Wetterkarten und -berichte abgerufen. Daten über den technischen Zustand des Flugzeugs und dessen Beladung werden zusammengetragen und sowohl Flugzeit als auch benötigte Treibstoffmenge in Abhängigkeit von Wetter und Gesamtgewicht errechnet. Im Anschluss kommen alle Besatzungsmitglieder im Briefing-Raum zusammen, wo die Kabinencrew neben Informationen zur Flugroute, Flugzeit und Wetterlage über die zu erwartenden Fluggäste, z.B. unbegleitete Kinder oder spezielle Essenswünsche informiert wird. Für die Cabincrew ergänzt der Purser Details zu Service- und Sicherheitsabläufen und teilt die einzelnen

Arbeitspositionen an Bord ein. Ist das Briefing beendet, wird die Besatzung etwa 45 Minuten vor dem geplanten Abflug mit dem Crewbus zum Flugzeug gebracht. Während der anschließenden Flugvorbereitung führt die Kabinenbesatzung einen Kabinen-Check durch und übernimmt das Boarding der Passagiere. Die Piloten hingegen überprüfen während des Preflight-Checks das Flugzeug äußerlich auf sichtbare Beschädigungen z.B. an Reifen oder Bremsbelägen und prüfen im Winter, ob sich Eis auf den Tragflächen befindet. Danach werden von ihnen im Cockpit sämtliche Geräte und Instrumente überprüft (u.a. Ölstand, Hydraulik, Sauerstoff etc.) und sowohl das Flugmanagement- (FMS) als auch das Navigationssystem mit Flugroute, Flughöhe, Gesamtgewicht, Flugnummer und Windverhältnissen programmiert. Abschließend werden die Startgeschwindigkeit berechnet und die Funkfrequenzen angepasst. Einige Minuten vor der geplanten Abflugzeit bittet der Pilot die Flugsicherung (Air Traffic Control, ATC) um die Freigabe zum Pushback. Wenn sich das Flugzeug nach dem Start im Reiseflug befindet, ist die Cockpitcrew mit der Überwachung der Systeme und des Treibstoffverbrauchs und der Einhaltung des richtigen Flugweges und der richtigen Flughöhe beschäftigt. Obwohl Autopilot und FMS bei der Steuerung des Flugzeugs helfen, ändern Fluglotsen immer wieder Details der Route oder ordern Steig- und Sinkflüge wegen anderer Flugzeugbewegungen an. Passagieransagen fallen immer in den Aufgabenbereich des gerade fliegenden Piloten. Ein großer Teil des Produktes, das eine Fluglinie anbietet, ist der Service, der den Kunden während des Reiseflugs durch die Kabinenbesatzung angeboten wird. Unabhängig von der gebuchten Klasse kann in zwei Servicearten unterteilt werden: in Verpflegungs- und Unterhaltungsangebote. Art und Umfang dieser Angebote hängen von der Flugdauer und der Uhrzeit ab. Kosteneinsparungen bei Fluglinien führen dazu, dass Teile dieses Angebots kostenpflichtig werden und dass Kabinenpersonal zunehmend dazu eingesetzt wird, während des Flugs Gewinne zu erwirtschaften (vgl. [Wu] S. 22-23). Ist das Flugzeug am Zielort gelandet und sind die Fluggäste verabschiedet, findet mit der Archivierung von Flugunterlagen und -daten, wie den tatsächlichen Flugzeiten, dem Treibstoffverbrauch und den Anweisungen von Fluglotsen, die Nachbereitung des Flugprozesses statt. Sind alle Flüge des Tages absolviert, wird im Rahmen des Debriefings reflektiert, ob es im Arbeitsablauf zu Problemen gekommen ist und wie die Teamarbeit funktioniert hat.

2.2.3 Passagierprozesse

Der Beförderungsprozess beinhaltet alle Prozesse bei denen ein Passagier zwischen Antritt und Beendigung seiner Reise von einer Fluglinie begleitet wird (vgl. im Folgenden [Pomp] S. 85, [Maur] S. 231-232 und [Wu] S. 19-22). Der Prozess umfasst sämtliche Kundenkontakte und beinhaltet auch alle Serviceleistungen, die dem Kunden angeboten werden. Die Prozesse der Passagierabfertigung können auf drei unterschiedliche Arten konfiguriert werden, je nachdem ob Passagiere abfliegen, ankommen oder an einem Flughafen im Rahmen einer Umsteigeverbindung das Flugzeug wechseln. Des Weiteren gibt es Unterschiede zwischen den Abfertigungsprozeduren nationaler und internationaler Flüge.

Für abfliegende Passagiere beginnt der Prozess etwa 1 Stunde 15 Minuten vor der geplanten Abflugzeit mit dem Einchecken und dem Aufgeben des Gepäcks am Abflugschalter im Terminalgebäude. Alternativ ist das Online-Einchecken ab 48 Stunden vor geplantem Start möglich. Zumeist gibt es eine Deadline zum Einchecken von 15 bis 30 Minuten vor Abflug. Falls es sich um einen internationalen Flug handelt und es keine Sonderregelungen gibt, wie z.B. im Schengener Abkommen festgelegt, kann es vor einer Sicherheitsüberprüfung schon bei der Ausreise zu einer Passkontrolle kommen. Diese Prozeduren werden von Fremdpersonal durchgeführt, weshalb eine Fluglinie keinen Einfluss auf die Prozesszeiten hat. Nach den Kontrollen begeben sich die Passagiere zu ihrem Gate und warten dort auf den Aufruf zum Boarding. In Abhängigkeit vom Flugzeugtyp und der Passagierzahl beginnt das Boarding 40 bis 15 Minuten vor der geplanten Abflugzeit. Fluglinien können mittels verschiedener Boarding-Methoden versuchen, die Zeit, die zum Boarding benötigt wird, zu verkürzen. Eine Politik der freien Platzwahl kann Passagiere an dieser Stelle ermutigen, früh am Gate zu erscheinen und sich beim Einsteigen zu beeilen, um einen bevorzugten Sitzplatz zu bekommen. Eine andere Methode sieht vor, dass zunächst die Passagiere in den hinteren Reihen zum Einsteigen aufgerufen werden, um Kollisionen auf den Laufwegen innerhalb des Flugzeugs und damit einhergehende Verzögerungen des Boardingprozesses zu minimieren. Zumeist werden jedoch im Rahmen des sog. Priorityboardings Fluggäste, die zusätzliche Zeit zum Einsteigen benötigen, wie etwa Familien mit Kleinkindern, unbegleitete Kinder und Personen mit Behinderungen, bevorzugt behandelt. Sollte sich das Flugzeug auf einer Außenposition des Flugfeldes befinden und sich nicht direkt vom Terminal aus über eine Fluggastbrücke betreten lassen, werden Shuttlebusse bereitgestellt, die die Passagiere zum Flugzeug bringen.

Für Passagiere, die an ihrem Zielort angelangt sind, laufen diese Prozesse in Teilen in umgekehrter Reihenfolge ab. Nach dem Verlassen des Flugzeugs finden ggf. die Identitäts-Überprüfungen durch die Einwanderungsbehörden statt. Anschließend holen die Passagiere ihr Gepäck von den Laufbändern der Gepäckausgabe ab und werden, ebenfalls nur bei internationalen Flügen, stichprobenartig durch den Zoll überprüft, bevor sie das Terminal verlassen können.

Passagiere, die an einem Flughafen zwischenlanden und in ein anderes Flugzeug umsteigen müssen, um ihr Ziel zu erreichen, durchlaufen nach dem Aussteigen evtl. erneut eine Sicherheitsüberprüfung. Auch ist es möglich, dass ihr Gepäck nicht automatisch weitergeleitet wird, sondern abgeholt und erneut aufgegeben werden muss. Die Wege zwischen den jeweiligen Ankunfts- und Abfluggates können unterschiedlich lang sein und sind manchmal räumlich von sonstigem Fußgängerverkehr innerhalb des Flughafens getrennt. Die Entfernungen hängen zumeist davon ab, welche Fluglinien die beiden Flüge durchführen, ob sie miteinander kooperieren, um nötige Umsteigezeiten zu reduzieren, oder davon, welche Vorrechte die Fluglinien an dem jeweiligen Flughafen genießen.

2.3 Planungsphasen einer Fluglinie

Bevor eine Fluglinie einen Flugplan fertiggestellt hat und bereit ist, ihn umzusetzen, muss sie einen langwierigen und äußerst komplexen Planungsprozess durchlaufen (vgl. [Grot] S. 3-4). Innerhalb dieses Prozesses müssen eine Reihe von Problemstellungen mit teils konkurrierenden Zielvorgaben bewältigt werden. Insgesamt nimmt der Prozess einen langen Zeitraum in Anspruch, da einige Planungsphasen Jahre im Voraus und andere Phasen erst kurz vor dem Beginn der Planumsetzung durchgeführt werden. Während dieser Zeit können sich die jeweiligen Zielvorgaben und Rahmenbedingungen verändern. Auch die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Informationen verändert sich, da Schätzungen und Vorhersagen nach und nach durch Realdaten ersetzt werden. Gleichzeitig sind die Planungsphasen hochgradig voneinander abhängig, so dass es sich im Grunde genommen um ein einziges großes Planungsproblem handelt. Da somit ein rein sequentielles Vorgehen nicht geeignet ist, aber auch die gleichzeitige Behandlung aller Planungsaufgaben in der Praxis ein hoffnungsloses Unterfangen darstellt, hat sich bei den Fluglinien eine Herangehensweise durchgesetzt, bei der die einzelnen Planungsphasen zwar einer zeitlichen Hierarchie unterliegen, diese dennoch in weiten Teilen parallel betrachtet werden. Mit auf diese Weise abgestimmten Planungsaktivitäten soll ein möglichst effizientes Gesamtergebnis erzielt und nachträgliche kostspielige Anpassungen vermieden werden.

Die einzelnen Phasen des Planungsprozesses können der Produkt- oder auch Angebotsplanung, der Produktionsplanung, der Absatzsteuerung oder dem operativen Bereich zugeordnet werden (vgl. [Jägg] S. 136-142). Während der Produktplanung werden langfristige strategische Entscheidungen getroffen. Sie behandeln die Gestaltung und das Management des Flugnetzes sowie die Struktur und den Umfang der einzusetzenden Flottenkapazitäten. Die Produktionsplanung wird von taktischen Entscheidungen geprägt, die auf eine optimale Ressourcennutzung abzielen. Hierzu gehört sowohl die Rotationsplanung der Flugzeugflotte als auch die Einsatzplanung des Flugpersonals. Vor dem Hintergrund der Marktsituation und der Erlösmaximierung werden in der Absatzsteuerung Vermarktungs- und Verkaufsentscheidungen getroffen. Es wird festgelegt, wann und in welcher Form den Kunden die Transportkapazitäten und weitere Serviceleistungen angeboten werden sollen. Die operative Planung beschäftigt sich mit der Implementierung des Flugplans. Schon vor seinem eigentlichen Beginn wird hier auf Ausfälle und andere Störereignisse reagiert. Abbildung 2.4 zeigt einen Überblick der einzelnen Phasen des Planungsprozesses und gibt einen Hinweis auf den zeitlichen Bezugsrahmen ausgehend vom Tag der Umsetzung (Day of Operation, DOO).

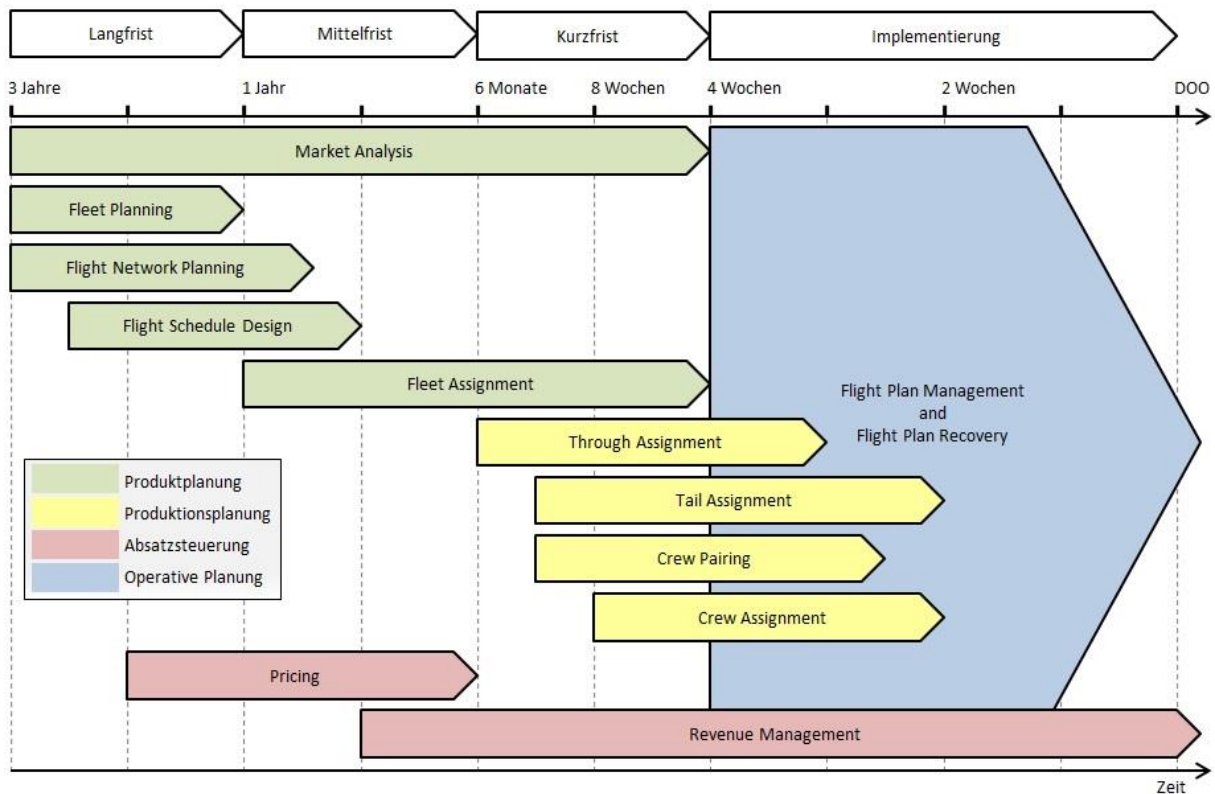


Abbildung 2.4: Übersicht über die Planungsphasen einer Fluglinie¹⁰

2.3.1 Produktplanung

2.3.1.1 Market Analysis

In dieser Analysephase werden die Struktur und das aktuelle Gesamtpotential des Marktes bewertet und Vorhersagen für dessen weitere Entwicklung getroffen (vgl. [Grot] S. 4-5 und [Jägg] S. 136). Auf Grundlage historischer Daten und unter Berücksichtigung der Konkurrenzsituation und der eigenen Position am Markt werden Szenarien entworfen und Passagierströme, deren Nachfrage an das eigene Unternehmen, die hierfür benötigte Transportleistung und mögliche Erlöse abgeschätzt. Um möglichst präzise Aussagen über zukünftige Kapazitätsanforderungen treffen zu können, werden vor dem Hintergrund wöchentlicher und saisonaler Schwankungen Bedarfe einzelner Regionen bis hin zu einzelnen Städteverbindungen prognostiziert. Die Modellierung der verkehrsflussorientierten Kapazitätsplanung wird in den frühen Phasen des Gesamtplanungsprozesses als Bewertungsgrundlage für die Güte anderer Planungsaktivitäten herangezogen.

2.3.1.2 Fleet Planning

Als ein zentraler Bestandteil der Kapazitätsplanung legt das Fleet Planning die weitere Entwicklung der konzerneigenen Flugzeugflotte fest. Auf diese Planungsphase haben sowohl Nachfrageprognosen als auch die langfristige Ausrichtung der Fluglinie großen Einfluss. Neben Wachstums- und Kooperationsstrategien finden die finanziellen und personellen Kapazitäten der Fluglinie

¹⁰ In Anlehnung an [Grot] S. 3

Berücksichtigung (vgl. [Conr] S. 314-317). Je nach Struktur und Zustand der aktuellen Flotte können Flugzeuge entweder neu geordert oder stillgelegt werden¹¹. Die Flottenstruktur wird durch die Anzahl an Flugzeugen der jeweiligen Flugzeugtypen definiert (vgl. [Jägg] S. 136-137). Besteht die Flotte hauptsächlich aus Flugzeugen eines Herstellers können Kosteneinsparungen bei Beschaffung und Unterhalt realisiert werden. In der Personaleinsatzplanung können Flugzeuge gleicher Baureihe flexibler eingesetzt werden, da Typ-Restriktionen, die ansonsten zu beachten wären, wegfallen. Aufgrund dieser Tatsachen ist in diesem Planungsbereich ein Trend zum Aufbau homogener Flottenfamilien zu beobachten. Es ist zu beachten, dass, nachdem die Planungsentscheidungen getroffen wurden, die Auslieferung neuer Flugzeuge Jahre in Anspruch nehmen kann, da Flugzeughersteller aus wirtschaftlichen Gründen oftmals nicht mit der Produktion eines Flugzeugtyps beginnen, bevor eine gewisse Mindestbestellmenge erreicht wurde (vgl. [Grot] S. 4). Insgesamt handelt es sich bei der Neubeschaffung von Flugzeugen um einen strategischen und langfristigen Prozess, weshalb er in der Planungshierarchie weit oben angesiedelt ist.

2.3.1.3 Flight Network Planning

In der Flugnetzplanung werden die strategischen Fragestellungen bezüglich des Umfangs und der Strukturierung des Netzwerks einer Fluglinie behandelt. Diese Planungsphase ist eng mit dem Flight Schedule Design verwoben, in dem innerhalb der Flugplanerstellung die operativen Aspekte der Netzwerkplanung ausgearbeitet werden (vgl. im Folgenden [Jägg] S. 106-113, 137, 197). Die wichtigste Grundlage für Entscheidungen in der Flugnetzgestaltung sind die von der Marktanalyse prognostizierten Verkehrsströme, gemessen als durchschnittlicher Personenverkehr zwischen zwei Flughäfen innerhalb einer bestimmten Zeitspanne. In Abhängigkeit der Flugnetze von Allianzpartnern und aufbauend auf den Kapazitätsvorgaben des Fleet Plannings wird festgelegt, welche Flughäfen mit welcher Anzahl an Flügen zu bedienen sind und wo geographische Schwerpunkte gesetzt werden sollen. Voraussetzung für die Umsetzung der hier aufgestellten Planungen ist die ausreichende Verfügbarkeit von Slot-Ressourcen an den jeweiligen Flughäfen. Um eine marktgerechte und wirtschaftlich optimale Netzwerkstruktur zu definieren, werden in dieser Phase verschiedene Szenarien ausgearbeitet und mit Hilfe von Marktmodellierungsverfahren bewertet.

Bei der Ausgestaltung von Flugnetzen kann man im Wesentlichen drei verschiedene Netzwerkstrukturen unterscheiden: Liniennetze, Direktverkehrsnetze und Hub and Spoke Netze (siehe Abbildung 2.5). In den Anfängen der kommerziellen Luftfahrt waren aufgrund limitierter Flugzeugreichweiten Liniennetze weit verbreitet. Liniennetze sind dadurch gekennzeichnet, dass Passagiere innerhalb ihrer Verbindungen zumeist mehrmals zwischenlanden müssen, um ihren Zielflughafen zu erreichen. Auch wenn ein solcher Netzaufbau einfach zu planen und zu steuern ist, führt die geringe Nachfrage einzelner Verbindungen zu geringen Frequenzen und die häufig

¹¹ Im Jahr 2015 war die 318 mit einem Listenpreis von 74,3 Mio. US \$ das günstigste Flugzeug von Airbus und die A380-800 (388) mit 428 Mio. US \$ das teuerste. Bei Boeing bewegten sich die Flugzeugpreise im selben Jahr in einem vergleichbaren Rahmen (vgl. [Air2] und [Boei]).

einzuplanenden Übernachtungen zu niedriger Flugzeug- und Personalproduktivität. Gleichzeitig ist zu beachten, dass eine Fluglinie für jeden bedienten Flughafen Fixkosten, sog. Stationskosten, aufzuwenden hat, die es auf so viele Flüge wie möglich zu verteilen gilt. Eine Verbesserung der Personalauslastung und eine deutliche Reduzierung der Umsteigevorgänge bringt ein Direktverkehrsnetz mit sich. In seiner Reinform verbindet es jeden Flughafen mit jedem anderen und bildet somit ein vollständiges Netz. Obwohl die deutliche Reduzierung der Umsteigevorgänge gerade für Businesspassagiere äußerst attraktiv ist, sind die Frequenzen der einzelnen Routen nach wie vor gering und die Stationskosten hoch. Den dritten Strukturtyp bilden die H&S-Netze, welche erst seit der Aufhebung staatlicher Regulierungen von Streckenführungen möglich sind. Sie erlauben die Gestaltung weit effizienterer und kostengünstigerer Flugnetze, mit denen eine bestmögliche Marktabdeckung erreicht werden kann. Im Gegensatz zum Direktverkehrsnetz wird hier eine indirekte Streckenführung über ein Hub als zentrale Drehscheibe angestrebt. Der Grundgedanke liegt dabei in der zeitlichen Zusammenführung einzelner Quelle-Ziel-Verbindungen und der damit einhergehenden Steigerung der Auslastung. Dieser Gedanke soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden (vgl. [Conr] S. 200-201):

Um fünf Flughäfen vollständig und bidirektional zu verbinden, werden bei einem Direktverkehrsnetz 20 Verbindungen und 20 Legs benötigt. Benennen V und L die Anzahl der nötigen Verbindungen bzw. Legs und n die Anzahl der Flughäfen gilt: $V = L = n \cdot (n-1)$. Im Gegensatz dazu werden unter Verwendung des H&S-Systems bei gleichbleibender Anzahl der Verbindungen lediglich 8 Legs gebraucht. Es gelten: $V = n \cdot (n-1)$ und $L = 2 \cdot (n-1)$.

Diese Bündelung von Verkehrsströmen erlaubt höhere Frequenzen auf den Routen und den Einsatz größerer Verkehrsflugzeuge. Durch Zubringerflüge von Regionalflughäfen zum Hub kann das Transfernetz in Regionen ausgedehnt werden, deren Verkehrsnachfragen ansonsten keine wirtschaftliche Anbindung zulassen würden. Aus Kundensicht bildet die Struktur eines H&S-Systems einen Kompromiss zwischen dem Wunsch nach zeitlich optimalen Direktverbindungen und dem Wunsch, viele Ziele mit möglichst wenigen Umsteigevorgängen erreichen zu können. Aus Sicht von Fluglinien stellen Hubs die Zentren ihrer Flugnetze dar, welche sie als Flotten- und Personalstandorte ausbauen, um effizientere und kostengünstigere Umläufe zu ermöglichen. An Hubs haben Fluglinien die Möglichkeit, eine ihren Konkurrenten gegenüber strategisch dominante Position einzunehmen und Wettbewerbsvorteile auszubauen.

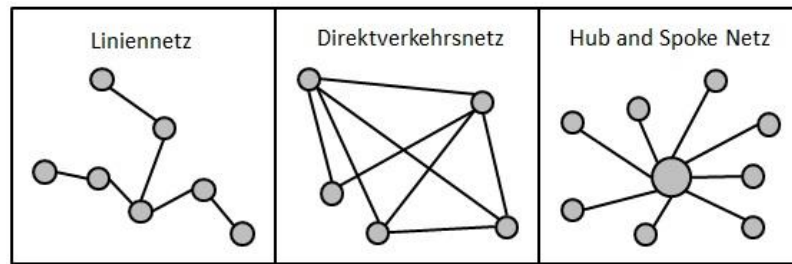


Abbildung 2.5: Gegenüberstellung verschiedener Flugnetzstrukturen¹²

Die Bündelung von Fluggastströmen und die Kombination von Flügen zu Umsteigeverbindungen haben jedoch nicht nur positive Effekte, sie bilden gleichzeitig auch die Schwachstelle einer H&S-Struktur. Die hohe Interdependenz der Flüge und die Erzeugung von Belastungsspitzen an Hubflughäfen führen zu einer erhöhten Verspätungsanfälligkeit des Systems. Das Anstreben möglichst kurzer und somit kundenfreundlicher Umsteigezeiten führt dazu, dass sich die Verspätungen einzelner Flüge zu einer nachhaltigen Störung des Flugplans entwickeln können.

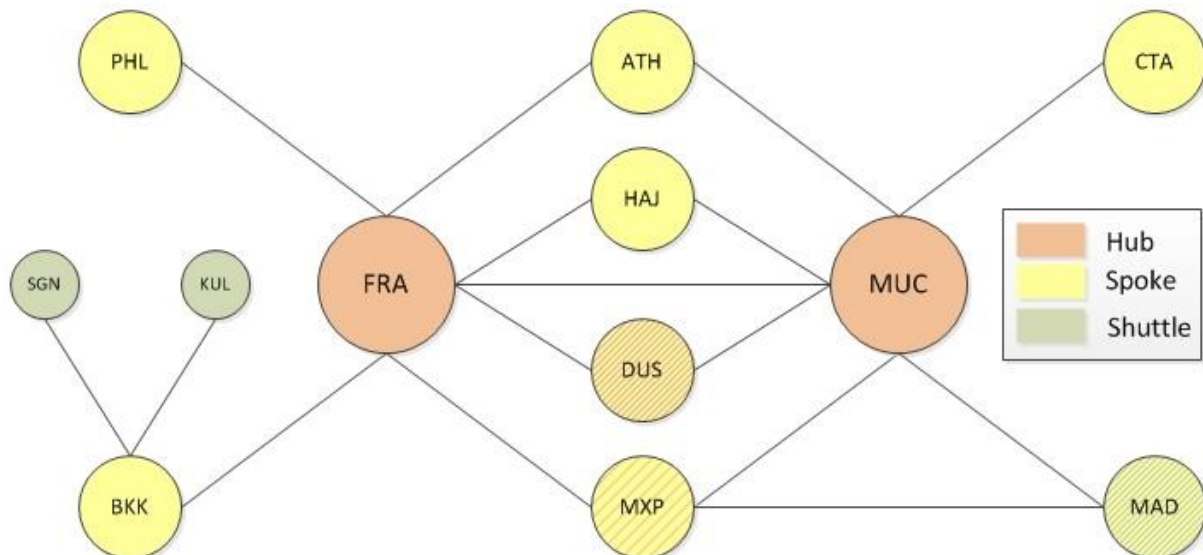


Abbildung 2.6: Schematische Teildarstellung des Lufthansa-Flugnetzes (geflogen von Mai bis Juli 2010).¹³

Um ein reales Beispiel eines H&S-Netzwerks vorzustellen, wird unter Verwendung von Abbildung 2.6 ein Teil des Lufthansa-Flugnetzes aus dem Jahr 2010 beschrieben und auf einige Besonderheiten eingegangen. Im Zentrum der schematischen Darstellung stehen die Flughäfen Frankfurt und München, welche der Fluglinie als Hubs dienen und von denen aus die umliegenden Spokes angefliegen werden. Abweichend von der in Abbildung 2.5 dargestellten Reinform einer H&S-Struktur, gibt es nicht nur Flughäfen, die von genau einem Hub bedient werden (BKK, CTA, MAD, PHL), sondern auch solche, die sowohl mit FRA als auch mit MUC verbunden sind (ATH, DUS, HAJ,

¹² In Anlehnung an [Jägg] S. 105-106

¹³ ATH: Eleftherios Venizelos Intl. (Athen, Griechenland); BKK: Suvarnabhumi Intl. (Bangkok, Thailand); CTA: Catania Fontanarossa (Catania, Italien); DUS: Düsseldorf; FRA: Frankfurt; HAJ: Hannover; KUL: Kuala Lumpur Intl. (Kuala Lumpur, Malaysia); MAD: Barajas (Madrid, Spanien); MUC: München; MXP: Malpensa (Mailand, Italien); PHL: Philadelphia Intl. (Philadelphia, USA); SGN: Tan-Son-Nhat Intl. (Ho-Chi-Minh-Stadt, Vietnam)

MXP). Um auf der Langstreckenverbindung FRA-BKK genügend Nachfrage zu erzeugen, wurden von LH mit der lokalen Anbindung von SGN und KUL weiterführende Shuttleverbindungen angeboten. Entsprechend werden auf diese Art an das Netz angeschlossene Flughäfen als Shuttles bezeichnet. Dass die Einteilung von Flughäfen in die Kategorien Hub, Spoke und Shuttle nicht immer trennscharf ist, wird an den Flughäfen DUS und MAD verdeutlicht. DUS ist für LH der drittgrößte Flughafen und bietet neben den hier dargestellten Verbindungen zahlreiche weitere innerhalb Deutschlands an und ist darüber hinaus Ausgangspunkt für einige internationale Langstreckenflüge. Obwohl er somit passende Charakteristika aufweist, wird er von LH nicht als Hub bezeichnet. MAD hingegen nimmt aufgrund seiner direkten Anbindung zu MUC und seiner indirekten über MXP führenden Anbindung zu FRA sowohl die Rolle eines Spoke- als auch die eines Shuttleflughafens ein. Auch wenn der Flughafen MXP nicht im direkten Sinne einen Hub für die LH darstellt, so dient er doch als Drehscheibe der StarAlliance, zu der auch die LH gehört.

2.3.1.4 Flight Schedule Design

Aufbauend auf das Flight Network Planning befasst sich die Flugplangestaltung mit der Optimierung des Netzbetriebes. Ziel ist das bestmögliche Verhältnis zwischen Betriebskosten und Ausschöpfung des Marktpotentials (vgl. im Folgenden [Conr] S. 317 ff.). Gleichzeitig soll sich die Struktur des Flugangebots nach den qualitativen Ansprüchen der Kunden richten. Die Anforderungen der Passagiere umfassen neben einem hohen Maß an Pünktlichkeit, Ausfallsicherheit und Flexibilität eine breite Auswahl an stark frequentierten Reiseverbindungen, die sich durch geringe Flug-, Warte- und Umsteigezeiten auszeichnen. Hoher Komfort soll zu niedrigen Preisen angeboten werden.

Um den operativen Ablauf des Flugplans im Detail festzulegen, werden auf Basis der Wochentage die Flugfrequenzen einzelner Routen bestimmt und die Abflug-, Block- und Ankunftszeiten der Flight Legs angepasst. Da es sich zumeist um paarige Verkehrsströme handelt, werden Flight Legs i.d.R. als Pärchen geplant. Die überwiegende Mehrheit der Passagiere, die einen Flug von A nach B antreten, reist innerhalb einiger Stunden, Tage oder Wochen von B zurück nach A. Damit grenzt sich der Reiseverkehr vom Fracht- und Postverkehr ab, bei denen Güter hauptsächlich in eine Richtung befördert werden. Die Anzahl an tatsächlichen One-Way-Flügen, z.B. im Falle von Auswanderungen oder der Nutzung eines andern Verkehrsmittels für die Rückreise, fällt hierbei nicht ins Gewicht. Die Planung der Verkehrsströme wird durch die verfügbaren Ressourcen der Fluglinie eingeschränkt, da die Flottengröße und die Personalkapazitäten der Cockpit- und Cabincrews potentielle Engpässe darstellen. Weitere Restriktionen ergeben sich durch gesetzliche Vorschriften bezüglich Fluggeräten und Flugpersonal (z.B. Wartungspläne, Arbeitszeitregelungen) sowie durch Tarifverträge und individuelle Betriebsvereinbarungen. Weiterhin muss auf die Verfügbarkeit von Slots an den jeweiligen Flughäfen geachtet und deren individuelle Zeiten berücksichtigt werden.

Im Flight Schedule Design werden Flüge mit möglichen Anschlussflügen im Rahmen von Umsteigeverbindungen in Zusammenhang gesetzt. Dabei kommt der Ausgestaltung des Hubverkehrs

besondere Bedeutung zu. Zusätzlich zu der Festlegung von Routen zwischen den Hubs und den Spokes bedarf es für die Erstellung von Umsteigeverbindungen der detaillierten zeitlichen Ablaufplanung der Flight Legs. Neben der maximal zulässigen Umsteigezeit für Passagiere ist hierfür die Minimum Connecting Time (MCT) von entscheidender Bedeutung (vgl. im Folgenden [Conr] S. 160 f.). Die MCT benennt die minimal notwendige Umsteigezeit zwischen zwei Flight Legs und bildet mit der maximalen Umsteigezeit ein Zeitfenster, in dem ein Anschlussflug abgehen muss, damit er mit einem Zubringerflug zu einer gültigen Umsteigeverbindung kombiniert werden kann. Um in diesen Verbindungsfenstern gleichzeitig eine möglichst hohe Konnektivität zu erreichen, werden an Hubs sog. Hubwaves geplant. Eine Wave (dt.: Welle) setzt sich dabei aus einem Inbound- und einem Outbound-Zeitfenster zusammen, in denen möglichst viele Flight Legs ankommen bzw. abgehen. Abbildung 2.7 zeigt die Struktur einer Hubwave am Beispiel von fünf eingehenden und fünf ausgehenden Flügen. Das ankommende Leg L1 kann mit den Legs L6 bis L9 kombiniert werden. L10 kommt hier nicht infrage, da es erst nach dem Verbindungsfenster von L1 startet. Abgesehen von der Umsteigeverbindung L5-L6, welche aufgrund der nicht eingehaltenen MCT ungültig ist, erfüllen alle anderen Kombinationen die zeitlichen Restriktionen, weshalb sich die Konnektivität dieser Hubwave auf insgesamt 23 Umsteigeverbindungen beläuft. Sollten einige dieser Verbindungen z.B. aufgrund von zu großen Umwegen oder der Rückführung zum Ausgangsflughafen nicht sinnvoll sein, würden diese entfallen und sich die Konnektivität der Hubwave entsprechend verringern.

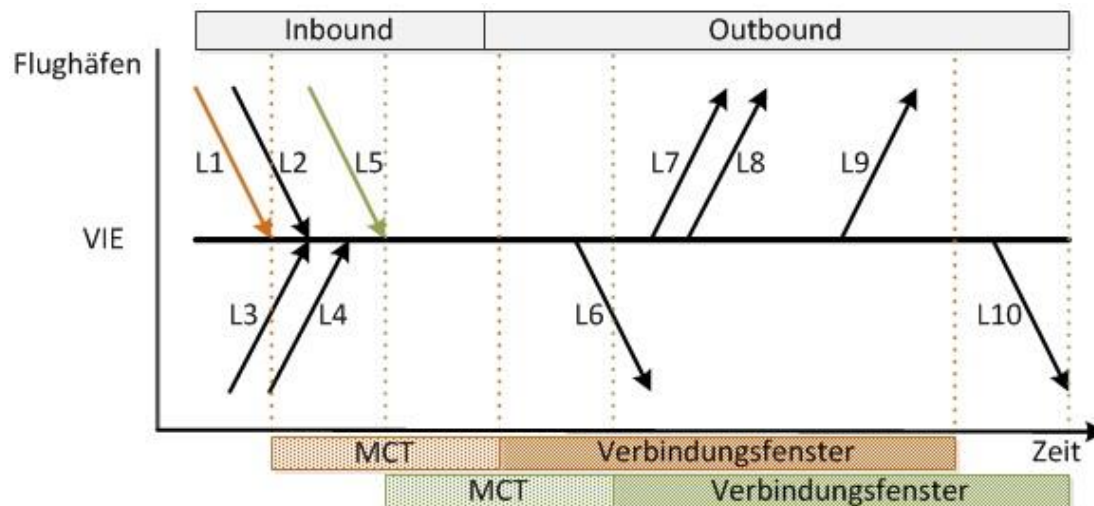


Abbildung 2.7: Konnektivität innerhalb der Hubwave-Struktur¹⁴

Die Dauer von MCTs hängt vor allem von den Prozessen der Fluglinien und den Infrastrukturkapazitäten der Flughäfen ab¹⁵. Zudem dauert ein Umstieg zwischen Interkontinentalflügen i.d.R. länger als der zwischen Regionalflügen. Normalerweise haben Fluglinien ein Interesse daran, die MCT nicht zu knapp zu berechnen, da sie auch als Zeitpuffer zwischen

¹⁴ In Anlehnung an [Jägg] S. 115

¹⁵ Am Flughafen VIE in Wien bewegt sich die MCT zwischen 25 und 30 Minuten. Mehr Zeit wird in Frankfurt eingeplant: 45 Minuten. In Paris werden am Flughafen CDG 60 bis 90 Minuten als MCT angesetzt (vgl. [Vien] S. 20).

Zubringer- und Anschlussflügen dient. Haben Passagiere eine Umsteigeverbindung gebucht, sind sie zu entschädigen, sollten sie ihre Anschlussflüge aufgrund von Verspätungen nicht erreichen.

Wie viele Umsteigewellen an einem Hub täglich eingeplant werden sollen, wird durch den sog. Hub-Repeat-Cycle festgelegt. Er benennt die Zeitdauer zwischen den gleichen Punkten zweier konsekutiver Wellen und wird in Abhängigkeit von der Nachfrage und der Ressourcenmenge, über die eine Fluglinie verfügt, gewählt. Ist es nicht möglich, eine dichte Wellenstruktur (Strong-Hubbing) aufrechtzuerhalten, kann ein Weak-Hubbing-Modell mit weniger Wellen und geringeren Frequenzen gewählt werden (vgl. [Wu] S. 14-17). Weak-Hubbing wird zumeist von mittelgroßen Fluglinien in Kombination mit Direktflugnetzen verwendet, um das Einzugsgebiet für Langstreckenflüge zu vergrößern.

2.3.1.5 Fleet Assignment

Im Fleet Assignment (dt.: Flottenzuweisung) werden den einzelnen Flight Legs des Flugplans Flugzeugtypen zugeordnet (vgl. im Folgenden [Grot] S. 5). Diese Zuordnung beschreibt die Transportkapazität der Fluglinie für die Dauer der Flugplanperiode. Es ist das Ziel, die prognostizierte Nachfrage abzudecken und hierfür die Flotte kostenoptimal einzuplanen. Werden nur wenige Kapazitäten bereitgestellt, werden auch nur geringe operative Kosten verursacht und die Chance steigt, hohe Auslastungen zu erzielen (vgl. [Jägg] S. 140-141). Gleichzeitig steigt die Wahrscheinlichkeit, Nachfrage und mit ihnen verbundene Erlöse abweisen zu müssen. Bei der Allokierung größerer Transportkapazitäten verhält es sich entgegengesetzt.

Bei der Angleichung von Sitzplatzangeboten zu erwartetem Passagieraufkommen müssen eine Reihe von operativen Restriktionen eingehalten werden. Die grundlegendste Einschränkung stellt die Flotte selbst dar, da nur so viele Flugzeuge eines Typs zur gleichen Zeit eingesetzt werden können, wie vorhanden sind. Darüber hinaus können nur solche Flugzeugtypen für eine Relation eingesetzt werden, deren Reichweite für die zu bewältigende Distanz ausreicht. Weiterhin haben die Start- und Zielflughäfen einer Verbindung erheblichen Einfluss auf die Typauswahl. So ist deren Infrastruktur mit Längen der Pisten und Architektur der Gates nicht für jeden Flugzeugtyp geeignet. Auch kann der Einsatz spezieller Baumuster, z.B. aus Lärmschutzgründen oder wegen lokal geltender Flugzeitbeschränkungen, temporär verboten werden. Darüber hinaus können aufgrund individueller Anforderungen nicht an jedem Flughafen alle Flugzeugtypen gewartet oder repariert werden. Insgesamt machen es die Restriktionen sehr schwer, eine zulässige Flottenzuweisung mit maximalem Gesamtgewinn zu identifizieren. Die Komplexität dieses kombinatorischen Optimierungsproblems steigt, wenn bereits hier Bedingungen des Through und Tail Assignments sowie der Personaleinsatzplanung berücksichtigt werden.

2.3.2 Produktionsplanung

2.3.2.1 Through Assignment

Die Einsatzplanung von Flugzeugen baut auf den Vorgaben des Fleet Assignments auf und kann in Through und Tail Assignment untergliedert werden. Das hier beschriebene Through Assignment bereitet die nachfolgende Planungsphase vor, indem Flugzeugumläufe, auch Flugzeugrotationen genannt, geplant werden, ohne sie jedoch mit konkreten Flugzeugen der Flotte zu verknüpfen. Solch ein generischer Umlauf besteht aus einer Sequenz von Flight Legs, die unter Einhaltung zeitlicher, räumlicher und typbedingter Restriktionen von einem Flugzeug ausgeführt werden können (vgl. [Ruth] S. 177 f.). Regelmäßige Wartungsereignisse werden in dieser Phase miteingeplant. Seltenerere Wartungsereignisse werden ignoriert, da sie zu flugzeugspezifisch sind und nicht auf dieser Abstraktionsebene betrachtet werden können.

Es ist der Fokus des Through Assignments, Flugverbindungen zu identifizieren, die sich zu sinnvollen Flugzeugrotationen verbinden lassen und die das gesamte Angebot eines Flugplans abdecken (vgl. [Jägg] S. 141). Sinnvoll bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich die jeweiligen Legs in Orientierung und Kapazitätsanforderung ähneln sollten, damit sie als Direktflug unter einer Flugnummer vermarktet werden können. Eine Verbindung, die bspw. zunächst nach Norden, dann aber wieder nach Süden führt, würde von Kunden aufgrund des damit verbundenen sog. Backtrackings nicht nachgefragt werden. Vor dem Hintergrund von H&S-Netzwerken, in denen einzelne Flughäfen als Drehscheibe und andere als Zubringer fungieren, kommt dieser Planungsphase und den in ihrem Rahmen gestalteten Passagiertransfers besondere Bedeutung zu.

Der Notation eines Time-Line-Networks folgend zeigt Abbildung 2.8 einen kleinen Beispielflugplan bestehend aus vier der in Abbildung 2.6 aufgeführten Flughäfen, 16 Mittelstrecken- und vier Langstreckenflügen. Die Planung des Through Assignments hat dazu geführt, dass die 20 Flight Legs, der farblichen Darstellung entsprechend, auf drei generische Flugzeugrotationen aufgeteilt wurden, die alle am Hub FRA beginnen und enden. Es ist zu erkennen, dass keine Vermischung von Mittel- und Langstreckenflügen innerhalb der Rotationen vorgenommen wurde, weshalb zur Umsetzung dieses Plans nur ein Langstreckenflugzeug benötigt wird. Angenommen die Zeitspanne zwischen L2 und L4 entspräche genau der minimal benötigten Turnaroundzeit am Flughafen MXP, so wären die Verbindungen von L2 zu L3 und von L10 nach L11 unzulässig. Unabhängig vom später zugeordneten Flugzeug, sieht die Rotation R3 neben den eigentlichen Flügen noch eine Zeitspanne für routinemäßige Wartungsarbeiten vor.

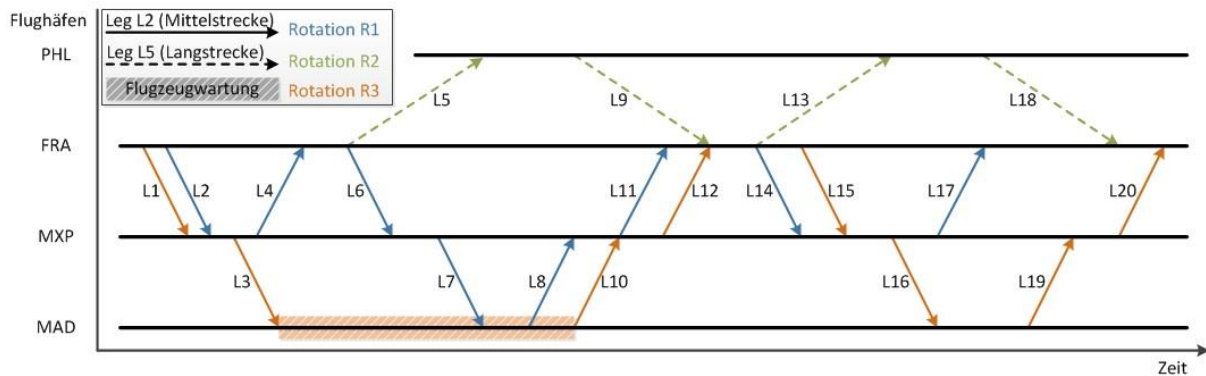


Abbildung 2.8: Abdeckung der Flight Legs eines Beispielflugplans durch drei anonyme Flugzeugrotationen

2.3.2.2 Tail Assignment

Kurz vor dem Beginn der Flugplanimplementierung werden in dieser zweiten Phase der Flugzeugeinsatzplanung die konkreten Flugzeugrotationen festgelegt (vgl. im Folgenden [Klab] S. 174). Aufbauend auf den Planungsergebnissen aus Fleet und Through Assignment, die hier als Restriktionen gelten, werden die generischen Umläufe individuellen Flugzeugen zugewiesen und mit deren Identifikationsnummer, der sog. Tail Number, versehen. Dieser Planungsschritt trägt entscheidend dazu bei, den im Marketing entwickelten Flugplan in einen real umsetzbaren und gleichzeitig kostenminimalen Flugplan zu überführen (vgl. [Conr] S. 336 f.). Das Flugzeug-Routing-Problem dieser Planungsphase lässt sich der besseren Handhabung wegen zerlegen, indem die verschiedenen Flugzeugtypen separat behandelt werden.

Auch in diesem Planungsschritt müssen verschiedene operative Anforderungen erfüllt werden. Zu ihnen zählen die zeitlich und räumlich zulässige Kombination der Rotationen und das Einhalten von Flottenkapazitäten. Auch müssen sämtliche Wartungsregeln Berücksichtigung finden. Jedes Flugzeug muss nach einem gesetzlich festgelegten Zeitplan kontrolliert, gewartet und überholt werden. In den USA gibt die FAA die Wartungsintervalle vor und unterscheidet dabei vier Check-Typen. Die sog. A-Checks sind routinemäßig durchgeführte visuelle Inspektionen, die nach einer gewissen Anzahl an Flugoperationen oder in etwa alle 65 Flugstunden fällig werden. Nach einigen Monaten müssen im Rahmen von B-Checks detailliertere visuelle Überprüfungen durchgeführt werden. Bei A- und B-Checks kann das Flugzeug in seinem Umlauf verbleiben, da sie zumeist nachts durchgeführt werden. C- und D-Checks erfordern umfangreichere technische Kontrollen und Instandhaltungsarbeiten und können mehrere Wochen in Anspruch nehmen, während derer das Flugzeug aus dem Umlauf genommen werden muss. Dadurch, dass C- und D-Checks nur alle ein bis vier Jahre vorgenommen werden müssen, stellen sie für diese Planungsphase keine Herausforderung dar, auch wenn sie je nach Typ des Flugzeugs nur an ausgewählten Flughäfen durchgeführt werden können. Um die gesetzlichen Vorgaben exakt einzuhalten, müssen die Planer die individuellen Flug- und Wartungshistorien der Flugzeuge betrachten (vgl. [Ruth] S. 177 f.). Da es sich hierbei um ein komplexes Unterfangen handelt, kann es nötig sein, die zuvor optimierten generischen Rotationen anzupassen.

Wie in der Produktionsplanung üblich, wird auch in dieser Planungsphase versucht, die Kosten, sprich die zur Flugplanimplementierung benötigte Flugzeuganzahl und die veranschlagten Turnaroundzeiten, zu reduzieren und die jeweiligen Auslastungen zu erhöhen. Dennoch ist den Planern bewusst, dass die Integrität des Flugplans dadurch nicht in Mitleidenschaft gezogen werden darf. Es wird darauf geachtet, dass die Flugzeuge möglichst gleichmäßig ausgelastet und genügend Räume für technische Arbeiten und Zeitpuffer zwischen den einzelnen Flügen eingeplant werden. Diese erlauben Passagieren angenehmere Umsteigeverbindungen und wirken sich sowohl auf die Pünktlichkeit als auch auf die Flexibilität des Flugplans positiv aus (vgl. [Conr] S. 336 f.). Letztere wird durch die Möglichkeit gekennzeichnet, kurzfristig Flight Legs innerhalb der Rotationsabläufe einschieben oder austauschen zu können, was die Umplanung als Reaktion auf Störfälle erleichtert. Eine hohe Flugplanflexibilität ermöglicht ebenfalls, dynamisch auf kurzfristige Nachfrageschwankungen durch Flugzeugtausche eingehen zu können.

2.3.2.3 Crew Pairing

Ähnlich wie die Flugzeugeinsatzplanung kann das Crew Schedule Planning (dt.: Personaleinsatzplanung) in zwei Planungsphasen aufgeteilt werden: in das Crew Pairing und in das Crew Assignment (vgl. im Folgenden [Grot] S. 5). Im Crew Pairing, welches oftmals bereits parallel zur Rotationsplanung der Flugzeuge begonnen wird, wird die Erstellung der Arbeitspläne sowohl für Cockpit- als auch für Cabincrews vorbereitet. Zu diesem Zweck werden für das Flugpersonal anonyme Crewumläufe, sog. Pairings, geplant. Ein Pairing besteht aus einer Kombination von Flight Legs, die von einer Crew innerhalb ihrer Flugtätigkeiten sequentiell ausgeführt werden können. Durch die Aufgaben und die Flugzeugtypen, die im Rahmen eines Pairings eingeplant werden, ergeben sich die Qualifikationsanforderungen dieses Pairings, welche im Crew Assignment vom jeweiligen Flugpersonal erfüllt werden müssen. Zusammengenommen müssen die erstellten Pairings den gesamten Personalbedarf des Flugplanangebots abdecken und die detaillierten Dienst- und Ruheregelungen der Personaleinsatzplanung einhalten. Diese äußerst komplexe Aufgabe wird zusätzlich erschwert, wenn neben dem Kurz- und Mittelstreckenverkehr auch noch Langstreckenverkehr in die Dienstplanung aufgenommen werden muss. Durch das Erstellen möglichst preisgünstiger Umläufe, z.B. durch Vermeidung von dienstlichen Übernachtungen in Hotels, soll auch diese Phase zur Minimierung der Gesamtproduktionskosten beitragen.

Der Crewumlauf, der durch ein Pairing beschrieben wird, kann sich über mehrere Tage erstrecken. Die Umlaufdauer beträgt zumeist ein bis fünf Tage, kann aber auch doppelt so lang sein, wenn Langstreckenflüge enthalten sind. Für eine einfachere Handhabung werden die Flight Legs eines Pairings zusätzlich, den einzelnen Tagen entsprechend, in sog. Duties unterteilt. Duties bilden die einzelnen Tagesaufgaben, die eine Crew im Rahmen des Pairings auszuführen hat. Somit setzt sich ein Pairing aus Duties und diese wiederum aus Flight Legs zusammen. Unabhängig von der Dauer eines Pairings beginnt dieses immer an einer Crewbase der Fluglinie und endet an derselben. Neben den

eigentlichen Flugtätigkeiten müssen noch Zeiten für weitere Tätigkeiten in die Umläufe eingeplant werden. Hierzu gehören Briefing und Debriefing Times vor bzw. nach den Duties sowie Vor- und Nachbereitungszeiten für die einzelnen Flüge. Die Zeit zwischen zwei Legs innerhalb einer Duty, die vom Personal nicht produktiv genutzt werden kann, wird Sit Time genannt. Zumeist ist sie vergleichsweise kurz und liegt zwischen 30 Minuten und ein paar Stunden. Die Zeiten zwischen den Duties innerhalb eines Pairings werden Layover oder auch Overnight Rests genannt. Ein Layover bezeichnet die ausgedehnte Ruhezeit zwischen zwei Arbeitstagen und ist für die Fluglinie mit Hotel- und Verpflegungskosten verbunden. Außer von solchen linearen Aufwendungen hängen die Kosten eines Pairings sowohl von dessen reiner Flugzeit als auch von seiner Gesamtdauer (engl.: time away from base, TAFB) ab, während der Personalressourcen eingesetzt wurden. Neben arbeitszeitabhängigen Löhnen garantieren Fluglinien oftmals Minimallohne (Minimum Guaranteed Pay, MGP) oder bezahlen arbeitszeitunabhängige Festgehälter. Bei solchen Varianten ist das Einsparen von Crewressourcen Teil des Optimierungsziels dieser Planungsphase (vgl. [Klab] S. 178 f.).

Die Optimierung der Crewumläufe wird von zahlreichen Reglementierungen eingeschränkt, welche sich primär aus Sicherheitserwägungen heraus ergeben und u.a. in der EASA-FCL-Bestimmung¹⁶, im Luftverkehrsgesetz, in der Luftverkehrszulassungsordnung und in der Verordnung über Luftfahrtpersonal festgelegt sind (vgl. im Folgenden [Conr] S. 148 f. und [Euro] S. 167 f.). So benötigen Piloten eine sog. Musterberechtigung (engl.: type rating), um einen Flugzeugtyp fliegen zu dürfen. Diese hat eine Gültigkeitsdauer von einem Jahr und wird nur dann verlängert, wenn der Pilot hinreichend viele Flüge mit diesem Typ absolviert hat. Zumeist verfügen Piloten zu einem Zeitpunkt nur über die Berechtigung für ein Flugzeugmuster. Flugbegleiter hingegen können i.d.R. auf bis zu drei Flugzeugtypen eingesetzt werden. Umschulungen von Piloten und Flugbegleitern können zu jeder Zeit erfolgen. Um die Einschränkungen, die sich durch die Flugzeugtyp-Restriktionen ergeben, abzumildern und sich somit für Fluglinien attraktiver zu machen, bieten Flugzeughersteller ihre Flugzeuge in sog. Flugzeugfamilien an. Die Flugzeugtypen einer Familie sind für Piloten hinsichtlich ihrer Bedienung so ähnlich, dass sie teilweise nur eines Type Ratings bedürfen. So beinhaltet die A320-Familie von Airbus z.B. die Typen A318-100 (318), A319-100 (319), A320-200 (320) und A321-200 (321) (vgl. [Air1]).

Neben den Lizenzbestimmungen müssen eine Reihe von zeitlichen Beschränkungen beachtet werden. Damit der Flugprozess regelkonform durchgeführt werden kann, muss bei der Hintereinanderschaltung zweier Legs innerhalb einer Duty darauf geachtet werden, dass die Dauer der MCT im Falle eines Flugzeugwechsels das Umsteigen einer Crew ermöglicht. Weitere Beschränkungen ergeben sich durch rechtliche Arbeits- und Ruhezeitenregelungen. Die gesetzlich

¹⁶ EASA: European Aviation Safety Agency, FCL: Flight Crew Licensing

festgelegten zeitlichen Mindestnormen können um tarifliche Bestimmungen ergänzt werden, wobei diese sich nur zu Gunsten der Beschäftigten auswirken dürfen.

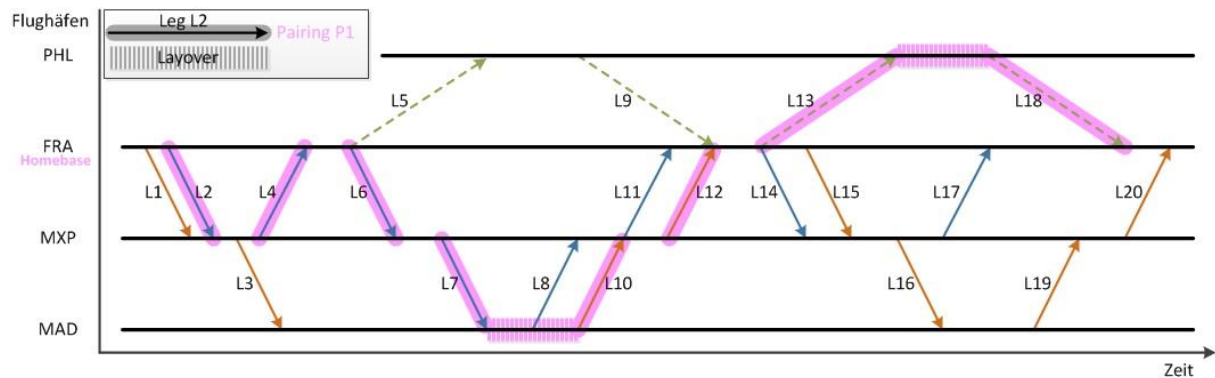


Abbildung 2.9: Beispielhafte Darstellung einer Pairing-Struktur

Aufbauend auf der Abbildung 2.8 zeigt Abbildung 2.9 das Beispiel eines dreitägigen Pairings P1, für das FRA als Homebase gilt. Der Umlauf beginnt mit dem Mittelstreckenflug L2 von FRA nach MXP. Angenommen die Zeit zwischen L2 und L4 entspräche genau der MCT, dann wäre eine Hintereinanderschaltung der Legs L2 und L3 aufgrund des zu geringen Zeitabstandes nicht möglich. Die Legs L6 und L7 setzen das Pairing über MXP nach MAD fort, wo die erste Duty von P1 endet und ein Layover eingeplant ist. Mit den Legs L10 und L12 geht es am nächsten Tag zurück über MXP nach FRA. Aufgrund der zwischenliegenden Übernachtung handelt es sich bei dem Wechsel von Rotation R1 nach R3 nicht um einen zeitkritischen Vorgang. Dies ist bei dem sich anschließenden Rotationswechsel von R3 auf R2 anders, da der Langstreckenflug L13 nach PHL und sein Vorgänger L12 Teil derselben Duty sind. Nach erneuter Übernachtung beinhaltet die dritte Duty des Pairings lediglich den Rückflug L18 zur Homebase.

2.3.2.4 Crew Assignment

Das Crew Assignment bildet den zweiten und abschließenden Teil des Crew Schedule Plannings, in dem die im Crew Pairing konstruierten Personalumläufe mit konkreten Crewmitgliedern verbunden werden (vgl. im Folgenden [Klab] S. 178 f.). Die Pairings, die einem Mitarbeiter zugewiesen und um zusätzliche Aufgaben, wie z.B. Flugtrainings, Fortbildungen oder Reserveeinsätze, ergänzt werden, bilden die typischerweise einen Monat umfassenden individuellen Einsatzpläne. Innerhalb dieses Zeitraums finden i.d.R. zwischen drei und sechs Umläufe statt. Dienstfreie Tage der Beschäftigten, die sich z.B. aus Urlaubsansprüchen oder gesetzlichen Ruhezeitenregelungen ergeben, werden ebenfalls explizit in die Dienstpläne aufgenommen.

Das Zurückgreifen auf Ersatzpersonal im Rahmen von Reserveeinsätzen kann je nach Fluglinie unterschiedlich gehandhabt werden. Die LH unterscheidet im Wesentlichen drei verschiedene Reserveformen: ‚Standby‘, ‚Standby-Airport‘ und ‚Reserve 12‘ (vgl. für diesen Absatz [Flug]). Wird ein Mitarbeiter zum Standby eingeteilt, muss er an diesem Tag zwischen 5 und 24 Uhr erreichbar und auf Abruf innerhalb einer Stunde am Einsatzort verfügbar sein. Da dies auch bei widrigen Wetter- und

Verkehrsbedingungen gewährleistet sein muss, werden Standby-Tage vom Personal oftmals direkt am Flughafen verbracht, wenn die Wohnung zu weit entfernt ist. Standby-Tage werden nicht einzeln sondern in sog. Standby-Linien mit einer Dauer von drei bis fünf Tagen zugewiesen. Standby-Airport-Einsätze schließen sich direkt an absolvierte Kurzstreckenumläufe an. Mitarbeiter verbleiben nach ihrem letzten Flug noch zwei Stunden am Flughafen, um im Falle eines Personalausfalls sofort einspringen zu können. Bei Standby-Airport werden üblicherweise ganze Crews eingesetzt, wobei gelegentlich auch nur Cockpit- oder Cabincrews abgerufen werden. Erhält ein Mitarbeiter eine Reserve 12-Linie, hat er zwischen 17 und 18 Uhr Rufbereitschaft. D.h. bis auf die eine Stunde in der er telefonisch erreichbar sein muss, handelt es sich um einen freien Tag. In dem Anruf bekommt der Mitarbeiter mitgeteilt, ob er am folgenden Tag zum Flugdienst eingeteilt wurde, der folgende Tag in einen Standby-Tag umgewandelt wurde oder ob die Reserve 12-Linie fortgesetzt wird. Reserve 12-Linien haben ihren Namen wegen dem in etwa 12-stündigen Vorlauf der Mitarbeiter und dauern zumeist vier bis fünf Tage an. Für eine ausführlichere Betrachtung des operativen Reserveeinsatzes von Fluglinien sei auf die Arbeiten von Sohoni et al. verwiesen (vgl. [Soho] und [Soh2]).

Bei der Abdeckung der Personalaufgaben durch Mitarbeiterressourcen sollen zum einen die Kosten, durch Vermeidung von Überstunden, minimiert und zum anderen die Arbeitsbelastung möglichst ausgewogen auf das Personal verteilt werden. D.h. die Anzahl an Arbeitsstunden, Lang- und Kurzstreckeneinsätzen und arbeitsfreier Tage soll unter den Mitarbeitern relativ ähnlich sein (vgl. [Weiß] S. 70). Damit ein Plan Gültigkeit besitzt, muss er sowohl gesetzlichen als auch tariflichen Arbeitszeitregelungen genügen, wobei einige Grenzwerte in gewissem Maße temporär überschritten werden dürfen. Die Summe der täglich, monatlich und jährlich einzuhaltenden Bestimmungen bildet ein äußerst umfangreiches Regelwerk, was die Optimierungsaufgabe dieser Planungsphase komplex gestaltet. Deshalb ist es durchaus üblich, das Planungsproblem nach Personalpositionen und gelegentlich auch nach Flugzeugtypen zu unterteilen und die sich so ergebenden Teilprobleme jeweils separat zu lösen. Einige dieser Regelungen wurden [Conr] (S. 149-150) und [Euro] (S. 225 f.) entnommen, um beispielhaft einen Eindruck zu vermitteln, wobei auf die Beschreibung der zahlreichen Sonderfälle verzichtet wurde:

- Die maximale jährliche Arbeitszeit (einschließlich Bereitschaftszeit und Neutralzeit) beträgt 2000 Stunden. Diese Arbeitszeit soll möglichst gleichmäßig über das Kalenderjahr verteilt werden.¹⁷
- Die maximale Flugdienstzeit beträgt 1.800 Stunden pro Kalenderjahr.
- Die maximale Blockzeit pro Jahr beträgt 900 Stunden.
- Die maximale Blockzeit in 28 aufeinanderfolgenden Tagen beträgt 100 Stunden.

¹⁷ Für eine nähere Beschreibung und Abgrenzung der hier benutzten Zeitbegriffe sei an dieser Stelle erneut auf das ‚Glossar der verwendeten Zeitbegriffe‘ in Anhang A verwiesen.

- Pro Kalendermonat sind mindestens sieben, pro Kalenderjahr mindestens 96 so genannte Ortstage am Wohnsitz des Beschäftigten zu gewähren. Der Ortstag, der von 0.00 bis 24.00 Uhr dauert, ist arbeits- und bereitschaftsfrei.
- Die maximale Flugdienstzeit in 30 aufeinanderfolgenden Tagen beträgt 210 Stunden.
- Die maximale Flugdienstzeit in sieben aufeinanderfolgenden Tagen beträgt 60 Stunden.
- Innerhalb einer Periode von sieben aufeinander folgenden Tagen muss mindestens eine Ruhezeit von 36 Stunden beginnen. Sonderregelungen bestehen, wenn eine bestimmte Zahl von Zeitzonen überschritten wurde.
- Innerhalb einer Periode von 24 Stunden ist mindestens eine Ruhezeit von zehn Stunden zu gewähren.
- Die Flugdienstzeit zwischen zwei Ruhezeiten darf grundsätzlich höchstens zehn Stunden betragen. Sie kann um bis zu vier Stunden verlängert werden, wobei bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Darüber hinaus reduziert sich die maximal zulässige Verlängerung, wenn es sich um Flugdienstzeiten während der Nacht handelt oder eine bestimmte Zahl von Starts und Landungen während der Flugdienstzeit überschritten wird.

Um die allgemeine Personalzufriedenheit zu erhöhen, wird in diesem Planungsschritt auch auf die persönlichen Ziele und Präferenzen der Angestellten eingegangen. Das kann z.B. der Wunsch nach einem frühen Arbeitsbeginn oder der nach einem bestimmten Flugziel mit dortigen Aufenthaltstagen sein. Verheiratete Paare oder befreundete Kollegen können den Wunsch äußern, zusammen Umläufe zu absolvieren. Um so viele Präferenzen wie möglich auf eine gerechte Art und Weise zu berücksichtigen, können verschiedene Methoden angewendet werden. Bei dem sog. Rostering, ein Verfahren, welches außer in Nordamerika weit verbreitet ist, äußert sich das Flugpersonal zunächst hinsichtlich seiner Präferenzen für einzelne Pairings in Form von sog. Requests, bevor diese dann, neben dem Aspekt der Kostenminimierung, in die Zielfunktion des Optimierungsvorgangs eines Rotation Distribution Systems einfließen (vgl. [Weiß] S. 70). Hier wird die Maximierung der aggregierten Gesamtzufriedenheit der Mitarbeiter angestrebt. Ein anderer Ansatz wird bei dem sog. Bidlining verfolgt (vgl. im Folgenden [Köni] S. 366 und [Doer] S. 72). Hier wählen die Mitarbeiter aus der Menge aller Pairings ihre Favoriten, welche sie gerne in ihren Dienstplänen hätten. Die Reihenfolge, in der die Mitarbeiter wählen dürfen, wird hierbei durch die Seniorität bestimmt. Die Senioritätsliste stellt eine Rangfolge innerhalb des Flugpersonals dar, welche sich typischerweise nach dem Dienstalder der jeweiligen Person im Unternehmen richtet. Evtl. werden darüber hinaus auch Dienstränge oder Lebensalter herangezogen. Eine Mischform beider Ansätze, das sog. Preferential Bidding, findet typischerweise bei nordamerikanischen Fluglinien Anwendung. Zusätzlich zu der Angabe der Präferenzen werden diese gewichtet, was es auch Mitarbeitern mit niedriger Seniorität gelegentlich erlaubt, die eigenen Wünsche gezielt umzusetzen. Bei dem Preferential Bidding handelt es sich um einen Kompromiss zwischen der allgemeinen Optimierung der Gesamtzufriedenheit und der Optimierung persönlicher Zufriedenheiten nach Seniorität.

2.3.3 Absatzsteuerung

2.3.3.1 Pricing

Während des Pricings wird die Preis- und Konditionspolitik für das Flugplanangebot festgelegt (vgl. im Folgenden [Grot] S. 5 und [Jägg] S. 142-147). Das Ziel ist die bestmögliche Vermarktung der einzelnen Verbindungen und somit die Erzielung höchstmöglicher Preise für die Flugtickets. Um die Zahlungsbereitschaft der Kunden optimal auszuschöpfen, können die Tickets, die im Wesentlichen ein einheitliches Gut darstellen, im Rahmen der Preisdifferenzierung in verschiedene Beförderungsklassen eingeteilt und den Kunden somit ein Flug zu unterschiedlichen Preisen angeboten werden. Neben der Differenzierung des Produktes kann auch die Einteilung der Kunden in verschiedene Gruppen, z.B. in Geschäfts- oder Freizeitreisende, erfolgen, denen ein Ticket für unterschiedliches Entgelt angeboten wird. Weiterhin können Zeitpunkt und Ort des Ticketerwerbs den Preis beeinflussen, z.B. durch Rabatte für frühes Buchen oder das Buchen im Internet. Zusätzliche Leistungen, wie z.B. erweiterte Stornierungsmöglichkeiten oder Zusatzversicherungen, können ebenfalls im Ticketpreis berechnet werden. Die auf diese Art bestimmten Preise müssen über den Zeitverlauf nicht konstant bleiben. Sollten sich während des Verkaufs Unterauslastungen herausstellen, können diese durch das Verändern der Preisstruktur abgemildert oder kompensiert werden.

2.3.3.2 Revenue Management

Das Revenue Management (dt.: Ertragsmanagement) steuert den Verkauf der Sitzplätze in den vom Pricing festgelegten Beförderungsklassen (vgl. [Grot] S. 5 und [Jägg] S. 147-148). Vor dem Hintergrund, dass dem feststehenden Angebot eine schwankende Nachfrage gegenübersteht, und der Tatsache, dass die Sitzplätze eines Fluges nicht gelagert werden können, gilt es, eine ertragsoptimale Sitzauslastung zu erreichen. Da das Kaufverhalten der Kunden insoweit bekannt ist, dass z.B. Touristen günstige Angebote gerne weit im Voraus buchen und Geschäftsleute kurzfristig auch höhere Preise bezahlen, muss jeweils konkret entschieden werden, wann ein Sitzplatz zu verkaufen ist: in einem frühen Buchungsstadium zu einem geringen Erlös oder bei unsicherer Nachfrage in einem späteren Stadium zu einem höheren Preis. Um sich dem Optimum zwischen zu günstig vergebenen und unbesetzten Plätzen anzunähern, wird auf Prognosedaten zurückgegriffen. Um trotz kurzfristiger Ausfälle durch Umbuchungen und Stornierungen hohe Auslastungen zu erzielen, können Flüge überbucht werden. D.h. es werden mehr Tickets verkauft als Sitzplätze physisch vorhanden sind. Weiterhin ist es durch sog. Upgrading möglich, das Kontingent einer Beförderungsklasse kurzfristig zu Lasten einer höheren Klasse zu vergrößern und somit Kunden, die andernfalls abgewiesen werden müssten, aufzunehmen.

2.3.4 Operative Planung

Die operative Planung beschäftigt sich mit dem Flight Plan Management und dem Flight Plan Recovery, also der Durchführung, der Kontrolle und nötigenfalls der Wiederherstellung des geregelten Flugbetriebs. Hierbei handelt es sich um einen alle vorherigen Planungsphasen betreffenden

Querschnittsprozess, welcher durch kurzfristige Handlungsentscheidungen geprägt wird (vgl. [Grot] S. 6). Bereits einige Wochen vor dem eigentlichen DOO beginnen die Mitarbeiter der Airline Operations Control (AOC) mit der Realisierung der zuvor festgelegten Abläufe, damit zu Planbeginn alle Ressourcen einsatzbereit am richtigen Ort verfügbar sind. Ab dem Tag der Implementierung nimmt die AOC Feinabstimmungen vor, um alle Entitäten, die sich durch das Flugnetz bewegen (Flugzeuge, Personal und Passagiere), zu synchronisieren und das reibungslose Ineinandergreifen der einzelnen Prozesse zu gewährleisten. So können z.B. basierend auf den täglichen Wind- und Wettervorhersagen die Abflug- und Ankunftszeiten angepasst oder aufgrund einer hohen Flughafenauslastung Passagierströmen neue Abfluggates zugewiesen werden. (vgl. [Klab] S. 169). Sobald sich die geschätzten Nachfragen einzelner Flüge realisieren, kann mit Hilfe von Umbuchungen etwaigen Über- und Unterauslastungen entgegengewirkt werden.

Neben der Umsetzung geplanter Abläufe ist es die Hauptaufgabe der AOC im Rahmen des Recovery Managements, auch Disruption Management genannt, auf die im täglichen Geschäft auftretenden Störungen zu reagieren und deren Auswirkungen auf die Passagiere und die Prozesse der Fluglinie zu minimieren. Dabei sind Betriebsstörungen (engl.: disruptions) Ereignisse, die eine Fluglinie ganz oder teilweise daran hindern, ihre Pläne umzusetzen. Sie können sich als Verspätungen oder Ausfälle manifestieren, deren häufigste Ursachen schlechte Wetterbedingungen mit einhergehender Reduzierung von Runway-Kapazitäten, technische Flugzeugmängel, zu hohes Verkehrsaufkommen, Krankheitsfälle und Sicherheitsprobleme sind (vgl. [Klab] S. 169). Tritt eine Verspätung an einem Punkt des Flugnetzes auf, wird deren Ausbreitung auf andere Netzbereiche sowohl durch stark verwobene Netzwerk- und Prozessstrukturen als auch durch aus Effizienzgründen gemeinsam genutzte und stark ausgelastete Ressourcen gefördert. Die Fortpflanzung von Störungen in Form von Folgeverspätungen wird als Delay-Propagation bezeichnet. Nach einer Störung ist es die Aufgabe der AOC, möglichst schnell mit möglichst geringem planerischen und finanziellen Aufwand und auf möglichst passagierfreundliche Art und Weise, wieder zum Normalbetrieb, d.h. zum Ursprungsplan, zurückzukehren (vgl. im Folgenden [Wu] S. 165-173). Diese oftmals gegenläufigen Zielsetzungen, die zuvor erwähnte Netzstruktur und -auslastung und der hohe Zeitdruck, der durch das ständige Weiterlaufen des Flugplans verursacht wird, machen aus dieser Aufgabe ein schwieriges und umfangreiches Unterfangen. Die Verfahren, welche taktischen Maßnahmen hierfür zu ergreifen und wie diese durch die zuständigen Stellen (z.B. Personalmanagement, Verkauf, Wartung) umzusetzen sind, werden durch die Recoverystrategie einer Fluglinie festgelegt. Dieser übergeordneten Strategie folgend, werden die Handlungsentscheidungen im Einzelnen von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. So spielen zunächst der Ort und die Tageszeit der Störung eine Rolle. Bei einem Hub zur Mittagszeit würde anders gehandelt werden als bei einem abgelegenen Flughafen in der Nacht. Die Art und der Umfang der Störung und die Anzahl betroffener Passagiere oder der Typ des betroffenen Flugzeugs sind neben dem Umfang der zur Verfügung stehenden Reservekapazitäten ebenfalls zu

berücksichtigen. Wie dabei die Größe von Störungen gemessen wird und in welche Kategorien sie daraufhin einzuteilen sind, bleibt jeder Fluglinie selbst überlassen.

Zur Umsetzung der Wiederherstellungs-Strategie steht der AOC eine Reihe von Recovery-Maßnahmen zur Verfügung, auf die je nach Störungskategorie zurückgegriffen werden kann. Entsprechend der verschiedenen Entitäten im Flugnetz können diese in die Bereiche Aircraft-Recovery, Crew-Recovery und Passenger Reacommodation unterteilt werden (vgl. für diesen Absatz [Klab] S. 169). Bis heute sind Planungswerkzeuge aufgrund der Komplexität nicht dazu in der Lage, alle drei Bereiche in einer Störungssituation gleichzeitig und integriert zu behandeln, weshalb die Planer oftmals damit zufrieden sind, einen einzigen zulässigen Recovery-Plan zu erstellen, ohne alle Alternativen zu berücksichtigen (vgl. [Clau] S. 809-810). Im Rahmen des Aircraft-Recovery können bei kleineren Verspätungen sowohl der Turnaround- als auch der Off-Blocks-Prozess unter Zuhilfenahme zusätzlicher Ressourcen, z.B. zusätzliches Bodenpersonal, Equipment oder Kerosin, beschleunigt werden. Bei größeren Verspätungen können Flugzeuge getauscht werden (engl.: aircraft swapping) oder Ersatzflugzeuge zum Einsatz kommen, was beides die Verspätungsweitergabe zwar sofort beendet, im weiteren Planverlauf aber auch zusätzliche Aktionen, wie z.B. ein Zurücktauschen, erfordert. Bei flughafen- oder routenbedingten Störungen kann das Umleiten oder Repositionieren (Aircraft Ferrying) von Flugzeugen sinnvoll sein. Das Streichen von Flügen bleibt die letzte Option, auf die typischerweise bei gravierenden länger anhaltenden Störungen, z.B. Streiks, Vulkanausbrüche etc., zurückgegriffen wird. Zumeist ermöglichen Streichungen die Aufrechterhaltung der wichtigsten Kernflüge einer Fluglinie. Aufgrund der starken Abhängigkeiten weist das Crew-Recovery viele Parallelen zum Aircraft-Recovery auf. So können Crews ihre Pairings tauschen oder neu geplante Umläufe zugewiesen bekommen. Entsprechend dem Aircraft Ferrying können Crews durch sog. Deadheads, das sind Flüge, auf denen Crews keine Aufgaben übernehmen, zu anderen Flughäfen repositioniert werden. Je nach Personalkapazität hat die AOC Zugriff auf Original-, Standby- und Reservecrews. Gerade bei Reservecrews muss darauf geachtet werden, den Einsatz frühzeitig zu kommunizieren, damit die Personalressourcen rechtzeitig am Einsatzort verfügbar sind. Bei der Passenger Reacommodation geht es darum, den Passagieren, die die Flugziele ihrer Verbindungen aufgrund von Verspätungen oder Streichungen nicht erreichen können, Alternativen anzubieten. Das kann die Umbuchung auf andere Flüge, evtl. mit anderen Routen oder Zielflughäfen beinhalten, wobei auch auf das Flugangebot anderer Fluglinien zurückgegriffen wird. Alternative Verkehrsmittel wie z.B. Bahn oder Taxen können ebenfalls zum Einsatz kommen. Je nach Dauer der Verspätung schreibt die europäische Rechtsprechung finanzielle Kompensationen und die Erstattung von Übernachtungen und Mahlzeiten vor. Bei all den genannten Recovery-Maßnahmen ist darauf zu achten, dass der Flugplan alle gesetzlichen, tariflichen und technischen Restriktionen einhält, damit er zu jeder Zeit umsetzbar und gültig bleibt.

3 Datengrundlage

Um die Personaleinsatzplanung von Fluglinien detailliert untersuchen und ihren Einfluss auf die Robustheit von Flugplänen feststellen und erklären zu können, bedarf es einer Reihe von Flugplandaten. Sie werden dazu benötigt, unterschiedliche Planungsstrategien zu entwickeln und zu testen. Diese Datengrundlage sollte möglichst viele reale Szenarien enthalten, um relevante strukturelle Merkmale erkennen und deren mögliche Wechselwirkungen mit Entscheidungsstrategien der Personaleinsatzplanung identifizieren zu können. Durch Hinzunahme künstlicher Szenarien, die sich z.B. durch extreme Parameterausprägungen kennzeichnen, können die Untersuchungsergebnisse abgesichert werden. Für sämtliche Flugpläne werden Ergebnisdaten aus den der Einsatzplanung vorgelagerten Planungsphasen benötigt. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Informationen über Flottengrößen und -konfigurationen, Flugnetz- und Flugplangestaltungen, Flottenzuweisungen und Umlauf- und Einsatzplanungen von Flugzeugen.

In diesem Kapitel werden zunächst die Datenbestände beschrieben, deren Quellen für die Öffentlichkeit zugänglich sind (Abschnitt 3.1). Im darauf folgenden Abschnitt 3.2 wird auf Planungsentscheidungen von Fluglinien eingegangen, die diese in der Regel nicht veröffentlichen. Es werden Generatoren beschrieben, mit denen sich diese Daten künstlich erzeugen lassen. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels (Abschnitt 3.3) wird erläutert, wie die Daten modelliert und für die Optimierung und die Simulation bereitgestellt werden.

3.1 Beschreibung öffentlicher Datenbestände

Als umfangreichste und somit wichtigste Datenquelle sind als erstes die von den Fluglinien auf ihren Internetseiten veröffentlichten Flugpläne zu nennen, da sie nicht nur Informationen zum Flugangebot und der in ihnen enthaltenen Flugnetzstrukturen enthalten, sondern auch zur jeweiligen Ausprägung des Fleet Assignments. Der typische Aufbau eines Flugplans wird im Folgenden anhand des in Abbildung 3.1 gezeigten Ausschnitts aus einem Lufthansa Flugplan aus dem Jahr 2007 erläutert. Die Informationen bezüglich der von der Fluglinie angebotenen Verbindungen sind innerhalb des Flugplans lexikographisch nach den Namen der Startflughäfen (gelb hinterlegt) und dann nach Zielflughäfen (fett gedruckt) sortiert. Die IATA-Codes¹⁸, die hinter den Namen in Klammern angegeben sind, spielen hierfür keine Rolle. Ebenfalls fett gedruckt ist die Distanz zwischen den Flughafenpaaren, so z.B. FRA-TXL mit 268 Meilen. Die dünngedruckten Zeilen enthalten Informationen über die Direktverbindungen, die anhand der blau hinterlegten Verbindung von Frankfurt nach Berlin Tegel erklärt werden. Die geplante Abflugzeit ist 6:55 Uhr, die geplante

¹⁸ Als Dachverband der Fluglinien arbeitet die International Air Transportation Association (IATA) u.a. an der Vereinfachung der länderübergreifenden Prozesse des Luftfahrtgeschäfts. Zu diesem Zweck vergibt sie Codes, mit denen sich Fluglinien, Flughäfen und Flugzeugtypen weltweit eindeutig identifizieren lassen.

Ankunftszeit 8:00 Uhr. Eine ‚-1‘ oder auch ‚+2‘ hinter der Ankunftszeit weist auf zu berücksichtigende Datumsunterschiede hin. Die Verbindung wird unter der Flugnummer LH170 angeboten. Ist die Flugnummer durch ein rautenförmiges Symbol gekennzeichnet, ist das der Hinweis darauf, dass diese Verbindung im Rahmen von Codeshare-Vereinbarungen von einer Partnerfluglinie der Lufthansa durchgeführt wird. Codesharing ermöglicht es verschiedenen Fluglinien, ein und denselben Flug unter ihren eigenen Flugnummern anzubieten (vgl. [Conr] S. 275). Die Fluglinie, die den Flug tatsächlich durchführt, der sog. Operating Carrier, gestattet der Partnerfluglinie die Vermarktung des Fluges unter ihrer eigenen ‚Marketing-Flugnummer‘¹⁹. Die nachstehende Spalte enthält den Eintrag ‚321‘, was bedeutet, dass die Verbindung mit einem Flugzeug des Typs A321-200 durchgeführt wird. Die nächste Zeichenkombination beschreibt die Frequenz, mit der die Verbindung innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Flugplans angeboten wird. Die Zahlen 1 bis 7 stehen hierbei für die Wochentage, an denen zu dieser Zeit von Frankfurt nach Berlin Tegel geflogen wird. Bei ‚7‘ wird die Verbindung nur sonntags geflogen, bei ‚24‘ dienstags und donnerstags. ‚X7‘ bedeutet, dass an allen Tagen außer an Sonntagen geflogen wird. Die folgende Zahl beziffert die Anzahl der Zwischenstopps dieser Direktverbindung. ‚0‘ deutet in diesem Fall auf einen Non-Stop-Flug hin. In der folgenden Spalte wird auf die Verpflegung an Bord hingewiesen. ‚R‘ steht bspw. für Refreshments, ‚MS‘ für Meal und Snack. Abschließend wird mit einer Stunde und fünf Minuten noch die geplante Flugdauer angegeben, welche aufgrund von möglicherweise unterschiedlichen Zeitzonen oder Daylight-Saving-Time-Regelungen der Start- und Zielregionen keine redundante Information darstellt. Eine möglicherweise folgende Zeile, die mit ‚Above‘ beginnt, enthält weitere Details zur Gültigkeitsdauer, innerhalb derer eine Verbindung angeboten wird. Im Beispiel wird die Verbindung in den Zeitspannen vom 17.05. bis zum 19.05. und vom 07.06. bis zum 09.06. sowie am 28.05. ausnahmsweise (engl.: exceptionally) nicht geflogen.

Fargo (FAR)	Frankfurt (FRA)	Beirut (BEY)
Chicago (ORD) 556mi	Abu Dhabi (AUH) 3,024mi	09.05 13.50 LH3516 320 5 0 O 3:45
13.10 14.58 LH5635+ CRJ 0 1:48	13.00 22.45 LH622 333 2467 1 MR 7:45	09.45 14.30 LH3516 320 2 0 O 3:45
	13.10 22.40 LH626 744 135 1 MR 7:30	21.10 01.55+1 LH3516 321 1357 0 O 3:45
Faro (FAO)	Abuja (ABV)	21.25 02.10+1 LH3516 321 6 0 O 3:45
Frankfurt (FRA) 1,218mi	10.45 15.40 LH562 333 247 0 MS 5:55	Belgrad/Belgrade (BEG) 655mi
16.50 20.50 LH4565 321 67 0 M 3:00	Addis Ababa (ADD) 3,327mi	14.50 16.40 LH5980+ 733 0 S 1:50
Lissabon/Lisbon (LIS) 137mi	10.55 20.45 LH590 333 1356 1 SS 8:50	21.55 23.45 LH3408 733 0 S 1:50
06.15 07.00 LH2193+ 319 0 R 0:45	23.15 07.25+1 ET707 763 135 0 7:10	Berlin Tegel (TXL) 268mi
12.00 12.45 LH2191+ 320 0 R 0:45	Akkra/Accra (ACC) 3,115mi	06.55 08.00 LH170 321 X7 0 R 1:05
16.45 17.30 LH2195+ 319 0 R 0:45	10.45 16.55 LH564 343 46 1 MSR 8:10	Above Exc. 5/17 - 5/19, 5/28, 6/7 - 6/9
	11.00 17.10 LH564 343 X46 1 MSR 8:10	07.40 08.45 LH172 321 0 R 1:05
		09.05 10.10 LH174 AB6 0 R 1:05

Abbildung 3.1: Auszug aus dem Lufthansa Flugplan für Mai bis Juli 2007

Um sich nicht auf die Flugnetzinformationen einzelner Flugpläne zu beschränken, kann auf der Webseite OpenFlights.org (vgl. [Open]) auf eine mit 6978 Einträgen sehr umfassende Liste von Flughäfen zugegriffen werden²⁰. Neben den Namen der Flughäfen werden deren internationale

¹⁹ Der Begriff ‚Codesharing‘ ist insofern irreführend, als dass sich nicht mehrere Flüge eine Flugnummer teilen, sondern ein Flug unter mehreren Flugnummern durchgeführt wird.

²⁰ Die Verwendung der Datei ‚airports.dat‘ unterliegt der Open Database License (siehe [Ope2]).

Erkennungszeichen (IATA und ICAO²¹ Codes) sowie deren Standort mit Städte- und Ländernamen angegeben. Diese werden durch Angaben der jeweiligen Längen- und Breitengrade und der Höhe über Normalnull ergänzt. Zusätzlich sind durch die Nennung von entsprechenden Zeitzonen und Daylight-Saving-Time-Regelungen noch zeitliche Informationen enthalten. Weitere umfangreiche Routeninformationen bzgl. einzelner Länder, Regionen, Fluglinien und Flughäfen können von den Webseiten ‚The Air DB‘ und ‚Airline Route Maps‘ bezogen werden (vgl. [TheA] und [Air]).

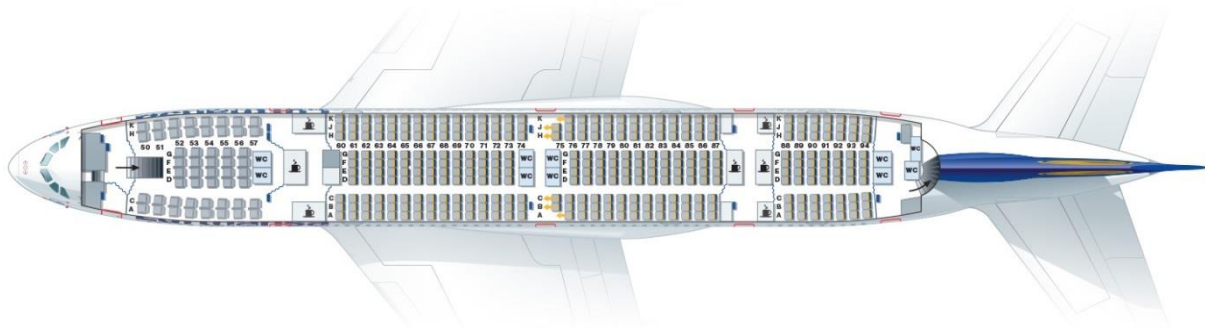


Abbildung 3.2: Querschnitt des Hauptdecks einer 388²²

Daten bzgl. des Umfangs und der Zusammensetzung der Flugzeugflotten der verschiedenen Fluglinien sind zumeist direkt von deren Internetauftritten abrufbar (siehe z.B. [Luf1] oder [Air3]). Hier ist auf die Unterscheidung zwischen Personentransport- und Cargoflotten zu achten. Genauere technische Spezifikationen sind ebenfalls auf den Webseiten oder auch in den Anhängen einiger Flugpläne zu finden. Diese geben u.a. Aufschluss über Bezeichnung, Länge, Höhe, Spannweite, Leergewicht, verbaute Triebwerke, Treibstoffverbrauch, maximale Reichweite und Start-, Lande- und Reisegeschwindigkeiten. Neben der maximalen Anzahl an Sitzplätzen wird zumeist noch die von der Fluglinie verwendete Sitzplatzkonfiguration angegeben. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft den Querschnitt des Hauptdecks einer 388. Die Lufthansa bestückte diesen Flugzeugtyp mit 8 Sitzen für die Erste Klasse, 78 für die Business Klasse, 52 für Premium Economy und 371 Sitzplätze für die Economy Klasse.

3.2 Generierung zusätzlicher Datensätze

Da die frei verfügbaren Datenbestände aus der Produktplanung keine Informationen hinsichtlich der auf den einzelnen Flight Legs anfallenden Aufgaben enthalten, diese jedoch für den in dieser Arbeit verfolgten Betrachtungsansatz unerlässlich sind, wurde ein Job Generator entwickelt, mit dem sich diese Daten künstlich erzeugen lassen. Darüber hinaus werden für die Untersuchung der Personaleinsatzplanung von Fluglinien aufgrund der in Abschnitt 2.3 erläuterten hierarchischen Struktur der Planungsphasen auch Daten aus der Produktionsplanung benötigt. Diese werden im Allgemeinen jedoch nicht veröffentlicht, weshalb im Rahmen dieser Arbeit Generatoren zur Erstellung

²¹ Zusätzlich zu den IATA Codes legt auch die International Civil Aviation Organisation (ICAO) Codes zur eindeutigen Identifizierung von Fluglinien, Flughäfen und Flugzeugtypen fest.

²² Die Abbildung wurde den Lufthansa-Webseiten ([Luf3]) entnommen.

von Through und Tail Assignments und Jobpairings entwickelt wurden, die diesen Umstand ausgleichen. Abschließend wurde in einer Abschlussarbeit, welche in diesem Forschungsbereich betreut wurde, ein Generator implementiert, mit dem sich künstliche Flugnetz- und Flugplandaten erzeugen lassen. Diese können den verfügbaren Realdaten zu Vergleichs- und Validierungszwecken gegenübergestellt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Generatoren, entsprechend ihres Bezuges zu den Planungsphasen, der Reihe nach vorgestellt.

3.2.1 Flightnetwork and Flightplan Generator

Mit dem Flightnetwork Generator lassen sich Flugnetzgraphen nach dem Zufallsprinzip erzeugen, wobei eine Reihe von zuvor festzulegender Rahmenparameter eingehalten wird. So ist zunächst auszuwählen, ob es sich um eine Hub&Spoke-, eine Hub-Spoke&Shuttle- oder eine Zufallsstruktur handeln soll. Letztere kann als Point-to-Point-Netzwerk interpretiert werden. Über die Knotenanzahl und die Kantendichte des Graphen kann der Umfang des Netzwerks bestimmt werden. Die Knoten repräsentieren einzelne Flughäfen, die zufällig aus der Menge real existierender Flughäfen gewählt werden. Einzig die Hubs können über ihre IATA-Codes explizit bestimmt werden, falls das zu generierende Flugnetz in einer bestimmten Erdregion platziert werden soll. Die Kanten des Graphen stellen gegenläufige Routenpaare dar, die zwei Flughäfen miteinander verbinden. Da ein Flugnetz zusammenhängend sein muss, wird die minimale Anzahl der Kanten durch einen zufällig erzeugten minimalen Spannbaum vorgegeben. Sollte das Netz mehrere Hubs beinhalten, werden diese untereinander vollständig verbunden. Darüber hinaus kann die Kantendichte bis hin zu einem vollständigen Graphen erhöht werden. Für die Erzeugung der Routen kann eine maximale Distanz angegeben werden. Weiterhin kann eine Gewichtung der Anteile von Lang-, Mittel- und Kurzstrecken relativ zu den Hubs erfolgen.

Die erstellten Flugnetze lassen sich mit dem Generator direkt um entsprechende Flugpläne erweitern. Diese können einen beliebigen Planungshorizont umfassen, wobei sich die erstellten Flüge entweder täglich oder wöchentlich wiederholen. Die Anzahl der zu generierenden Flight Legs ist nach unten hin dadurch begrenzt, dass auf jeder Route mindestens ein Flug angeboten werden muss. Da etwaige Flughafenkapazitäten außer Acht gelassen werden, ist der Umfang des Flugangebots nach oben hin nicht begrenzt. Um ein gewisses Gleichgewicht im Flugangebot zu wahren, wird für jeden Flug von A nach B ein Rückflug von B nach A eingeplant. Ähnlich der Distanzgewichtung der Routen können, neben einer gleichverteilten Belegung der Routen durch Legs, einige Kantentypen, wie z.B. Hub-Hub-Kanten, stärker frequentiert werden als andere. Durch einen Parameter, mit dem sich der Anteil an Nachtflügen (zwischen 23 und 5 Uhr) bestimmen lässt, kann zusätzlich Einfluss auf die zeitliche Verteilung der Legs genommen werden. Abschließend können durch die Angabe von Parametern bzgl. des Hub-Repeat-Cycles, der MCT und der Größe der Verbindungsfenster (vgl. Abbildung 2.7) auch Umsteigewellen an Hubs nachgebildet werden.

3.2.2 Job Generator

Die Aufgabe des Job Generators ist es, den Detailgrad von Flight Legs zu einzelnen Jobs zu erhöhen. In Abhängigkeit verschiedener Parameter, wie z.B. der Anzahl der Sitzplätze, der Flugdauer, der Standorte der Start- und Zielflughäfen oder des Flugzeugtyps, erstellt er für die einzelnen Flüge Aufgabenprofile. Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, wie ein Regelsatz zur Jobgenerierung aussehen könnte:

- Auf jedem Flug muss ein CPT und FO eingesetzt werden.
- Auf Long-Haul-Flügen²³ muss zusätzlich ein SFO eingeplant werden.
- Für jede angefangene Gruppe von 25 Sitzplätzen des verwendeten Flugzeugs muss ein Cabincrewmitglied bereitstehen.
- Auf jedem Flug muss ein P1 eingesetzt werden.²⁴
- Auf Long-Haul-Flügen muss zusätzlich ein P2 eingesetzt werden.
- Die restliche Kabinenbesatzung besteht aus FAs.
- Auf Medium-Haul-Flügen muss ein Mitglied der Cabincrew als FC ausgebildet sein.
- Auf Long-Haul-Flügen müssen zwei Cabincrewmitglieder als FC und eines als SOM ausgebildet sein.
- Auf Flügen, die in einem arabischen Land starten oder enden, muss ein Besatzungsmitglied in der arabischen Sprache und Kultur geschult sein (ARA) und mindestens eins männlich sein (M).
- Auf Flügen, die in einem asiatischen Land²⁵ starten oder enden, muss ein Crewmitglied in der asiatischen Sprache und Kultur geschult sein (ASI).

3.2.3 Through and Tail Assignment Generator

Der Through and Tail Assignment Generator erstellt für einen Flugplan zulässige Flugzeugumläufe. Die triviale Methode das Umlaufproblem zu lösen ist, jedem einzelnen Flug ein separates Flugzeug zuzuweisen.²⁶ Eine etwas weiterentwickelte Möglichkeit, Umläufe zu generieren, bietet der Linear Chainer, dessen Grundidee darin besteht, einen Umlauf durch den erstbesten Flug zu erweitern, der zeitlich, räumlich und hinsichtlich des Flugzeugtyps kompatibel ist. Während hierbei Wartungsintervalle berücksichtigt werden, werden maximale Rotationslängen vernachlässigt. Die in Algorithmus 3.1 dargestellte Prozedur wird durch das Anlegen einer zunächst leeren *Rotationsliste* sowie durch das Übertragen aller Legs L eines Flugplans in eine nach Startzeitpunkt sortierte Liste Q

²³ In dieser Arbeit werden Flüge mit Blockzeiten bis einschließlich 90 Minuten als Short-Haul- und solche bis zu vier Stunden als Medium-Haul-Flüge bezeichnet. Legs mit längeren Blockzeiten gelten als Long-Haul-Flüge.

²⁴ Hier ist zu beachten, dass sich die Aufgaben einiger Jobtypen parallel von einem Besatzungsmitglied durchführen lassen. Die genaue Festlegung der Kombinationsregeln sind in Abschnitt 5.1 nachzulesen.

²⁵ Cambodia, China, Hong Kong, Indonesia, Japan, Korea, Laos, Malaysia, Mongolia, Myanmar, North Korea, Philippines, Singapore, South Korea, Thailand und Vietnam.

²⁶ Da die Personal- und nicht die Flugzeugeinsatzplanung im Vordergrund steht, wurde an dieser Stelle die Berücksichtigung etwaiger konkreter Flugzeugressourcen nicht einbezogen.

initialisiert (Zeilen 1 und 2). Nun werden iterativ die Legs in Rotationen untergebracht, aus Q gelöscht und die neuen Rotationen in *Rotationsliste* gespeichert (Zeilen 3 bis 9). In jeder Iteration wird zunächst eine leere Rotation r_{new} angelegt, bevor Q durchlaufen wird, um sie um jedes Leg zu ergänzen, das den o.g. Nebenbedingungen entspricht (Zeilen 4 bis 7).

```

01:   Rotationsliste :=  $\emptyset$ 
02:    $Q := L$ 
03:   Wiederhole, solange  $Q$  nicht leer ist:
04:        $r_{new} := CreateEmptyRotation()$ 
05:       Für jedes Leg  $l \in Q$ :
06:           Falls  $l$  an  $r_{new}$  angehängt werden kann:
07:               Hänge  $l$  an  $r_{new}$  an
08:       Füge  $r_{new}$  zu Rotationsliste hinzu
09:       Entferne alle Legs  $l \in r_{new}$  aus  $Q$ 

```

Algorithmus 3.1: Linear Chainer

3.2.4 Jobpairing Generator

Aufbauend auf einem Flugplan, der bereits Jobinformationen und Flugzeugumläufe enthält, können mit dem Jobpairing Generator Personenumläufe generiert werden, welche u.a. als zulässige Initiallösungen im Rahmen der Optimierung Verwendung finden. Aufgebaut wie der Through and Tail Assignment Generator bietet er die Optionen triviale sowie linear verkettete Pairings zu erzeugen. Zu den einzuhaltenden Konstruktionsbedingungen zählen, neben der Gewährleistung der zeitlichen und räumlichen Umsetzbarkeit der Jobs, im Wesentlichen die Sicherstellung der Kompatibilität von Qualifikations- und Flugzeugtypanforderungen. Für eine formale Beschreibung sämtlicher Bedingungen sei an dieser Stelle auf Abschnitt 5.1.2 verwiesen.

3.3 Bereitstellung der Daten für Optimierung und Simulation

Bevor die gesammelten realen und die generierten künstlichen Daten den Optimierungs- und Simulationsprogrammen zugeführt werden können, müssen sie zunächst aufbereitet werden. Dies gilt insbesondere für die Flugpläne, deren Informationen, den Bedürfnissen der Fluggäste entsprechend, aggregiert präsentiert werden und somit keine explizite Auflistung der einzelnen Flight Legs beinhalten. Um zu beschreiben, wie sich aus der ‚Kundensicht‘ die Sicht der Planer einer Fluglinie ableiten lässt, wird im Folgenden auf die Kernaspekte der Konverter-Funktion eingegangen, die zum Zwecke der Interpretation und Erfassung der Flugplandaten implementiert wurde. Damit der Konverter die einzelnen Zeilen eines Plans verarbeiten und in Datenobjekte umwandeln kann, muss das PDF-Dokument zunächst per Copy&Paste in eine Excel-Datei überführt werden. Diese wird sequentiell eingelesen, wobei die einzelnen Informationen in Abhängigkeit eines festgestellten Zeilentyps erfasst werden. Vor dem Hintergrund des Codesharings und der Tatsache, dass ausschließlich die Aufgaben für das Personal des Operating Carriers betrachtet werden sollen, werden

dabei alle Verbindungen ignoriert, die von Partnerfluglinien durchgeführt werden. Um jedes Leg und sämtliche Starts und Landungen einzeln zu berücksichtigen, müssen weiterhin alle Verbindungen eines Flugplans auf Non-Stop-Flüge heruntergebrochen und gleichzeitig das doppelte Erfassen von Legs vermieden werden. Da eine Flugnummer im Rahmen eines Direktflugs jedoch auf mehrere Non-Stop-Flüge hinweisen kann, wird sie um einen Bindestrich und eine weitere Zahl erweitert, die die Reihenfolge der Non-Stop-Flüge innerhalb einer Direktverbindung angibt. Wenn z.B. die Flugnummer LH778 den Flug von Frankfurt (FRA) nach Jakarta (CGK) mit Zwischenlandung in Singapur (SIN) bezeichnet, wird der Flug FRA – SIN mit LH778-1 und der Flug SIN – CGK mit LH778-2 bezeichnet. Da ein Flug innerhalb der Flugplanperiode wöchentlich oder täglich geflogen werden kann, wird für die Identifikation eines bestimmten Non-Stop-Fluges zusätzlich zu der erweiterten Flugnummer auch noch das Datum des geplanten Abflugs herangezogen, z.B. also LH778-1 am 1. Juni 2010.

Mit Hilfe der Konverter-Funktion, welche zum jetzigen Stand die Flugplan-Formate von British Airways und Lufthansa interpretieren kann, wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Flugpläne aufbereitet. Mit entsprechenden Erweiterungen kann die Prozedur auf Flugplanformate weiterer Fluglinien²⁷ angepasst werden.

Bez.	Fluglinie	Startdatum	Enddatum	# Tage	# Flugh.	# Routen	# Legs
BA-W-07	British Airways	28.10.2007	29.03.2008	154	142	308	179.143
BA-S-08	British Airways	30.03.2008	25.10.2008	210	153	325	293.483
BA-W-08	British Airways	26.10.2008	28.03.2009	154	147	316	186.547
LH-S-06	Lufthansa	01.07.2006	30.09.2006	92	148	434	109.505
LH-S-07	Lufthansa	01.05.2007	31.07.2007	92	145	440	100.806
LH-S-10	Lufthansa	01.05.2010	31.07.2010	92	157	517	95.821

Tabelle 3.1: Liste der konvertierten Flugpläne

Um den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Optimierungs- und Simulationsprogrammen die aufbereiteten Datenbestände zugänglich zu machen, wurde eine zentrale Datenbank (DB) erstellt. Hierfür wurde auf die XAMPP-Entwicklungsumgebung²⁸ zurückgegriffen, welche das einfache Installieren und Konfigurieren eines lokalen Apache-Webervers ermöglicht und gleichzeitig eine MySQL-Datenbank enthält, zu deren Verwaltung die graphische Benutzeroberfläche der Webanwendung phpMyAdmin genutzt werden kann. Der DB-Entwurfsprozess wurde an der Drei-Schichten-Architektur ausgerichtet, um die strikte Trennung von Programmen und Daten zu gewährleisten und somit eine größere Überschaubarkeit, Flexibilität und Wartbarkeit des Systems zu erreichen (vgl. [Elma] S. 39 ff.).

Die oberste der drei Schichten beinhaltet die externen Schemata, welche die Blickwinkel (sog. Views) der Benutzer auf die in der DB enthaltenen Daten beschreiben. Jede View zeigt immer nur einen

²⁷ In Tabelle B.1 werden die Flugpläne verschiedener Fluglinien aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit gesammelt wurden.

²⁸ Das verwendete XAMPP-Softwarepaket wurde von der Webseite ‚Apache Friends‘ [Apac] bezogen und ist unter der Apache-Lizenz (Version 2.0) bzw. der GNU General Public License frei nutzbar.

bestimmten Ausschnitt der DB, während die Daten, die gerade nicht von Interesse sind, verborgen bleiben. In diesem Zusammenhang wurden, nach Fertigstellung des Gesamtentwurfs, alle benötigten Views mit Hilfe der Datenbanksprache SQL definiert und in einem Interface, welches als zentrale Schnittstelle zur DB dient, zusammengefasst. Zusätzlich enthält das Interface Schreib-, Lösch- und Änderungsfunktionen, wodurch sich die Datenbestände auch manipulieren lassen.

In der darunter liegenden konzeptuellen Ebene wird die logische Struktur der in der DB vorgehaltenen Daten definiert. Hierfür wird von den eigentlichen Daten abstrahiert und durch die Modellierung von Entitäten sowie ihrer Attribute und wechselseitigen Beziehungen die zugrunde liegende Sachlogik in einem logischen Datenmodell formal beschrieben. Das konzeptuelle Schema der in dieser Arbeit verwendeten DB ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Hervorzuheben ist hier die Entität des anonymen Personaleinsatzplans, welche sich aus n Pairing-Assignments zusammensetzt. Ein solches Assignment beschreibt durch sein Attribut ‚PairingNumber‘ dabei, welchem Pairing ein Job im Rahmen des Einsatzplans zugewiesen wird. Da es keine Attribute bzgl. des konkreten Flugpersonals in der DB zu hinterlegen gilt, wird dieses nur implizit durch die durch ‚PairingNumber‘ identifizierten Personalumläufe abgebildet.

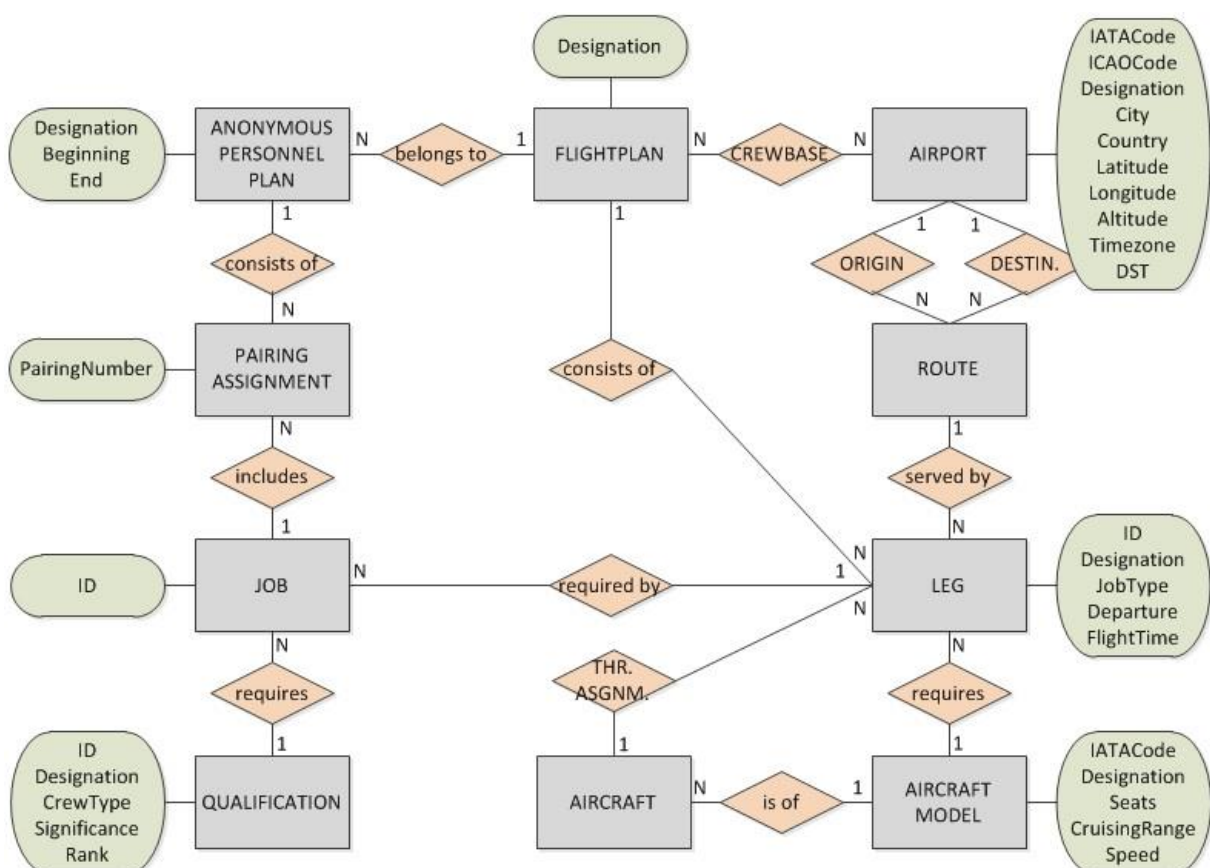


Abbildung 3.3: Entity Relationship Diagramm

In der untersten Schicht wird mit einem konkreten Datenbankentwurf, auch internes Schema genannt, das physische Datenmodell beschrieben (vgl. im Folgenden [Elma] S. 317 ff.). Für die zuvor definierten Attribute der Entitäten werden Tabellen erzeugt, Datentypen festgelegt und identifizierende

Merkmale als Primärschlüssel bestimmt. Weiterhin werden durch das Definieren von Fremdschlüsseln Beziehungen zwischen einzelnen Tabellen angelegt. Abschließend wird die physikalische Speicherstruktur um Indizes und Konsistenzbedingungen ergänzt. Bei dem für die Untersuchung der Personaleinsatzplanung verwendeten Schema (siehe Abbildung 3.4) handelt es sich um einen relationalen Datenbankentwurf. Um Anomalien bei der Verwendung von Update- und Join-Operationen zu vermeiden und eine einfache Attributssemantik und ein Minimum an Redundanzen und Nullwerten zu erreichen, wurde der Entwurf den Regeln der ersten, der zweiten und der dritten Normalform unterworfen (vgl. [Elma] S. 324-325):

1. „Die Relation sollte keine nicht atomaren Attribute oder verschachtelten Relationen enthalten.“
2. „In Relationen, deren Primärschlüssel mehrere Attribute enthalten, sollte kein Nichtschlüsselattribut funktional von einem Teil des Primärschlüssels abhängen.“
3. „Eine Relation sollte kein Nichtschlüsselattribut enthalten, das funktional von einem anderen Nichtschlüsselattribut (oder von einer Menge von Nichtschlüsselattributen) bestimmt wird. Das heißt, es sollte keine transitive Abhängigkeit eines Nichtschlüsselattributs vom Primärschlüssel bestehen.“

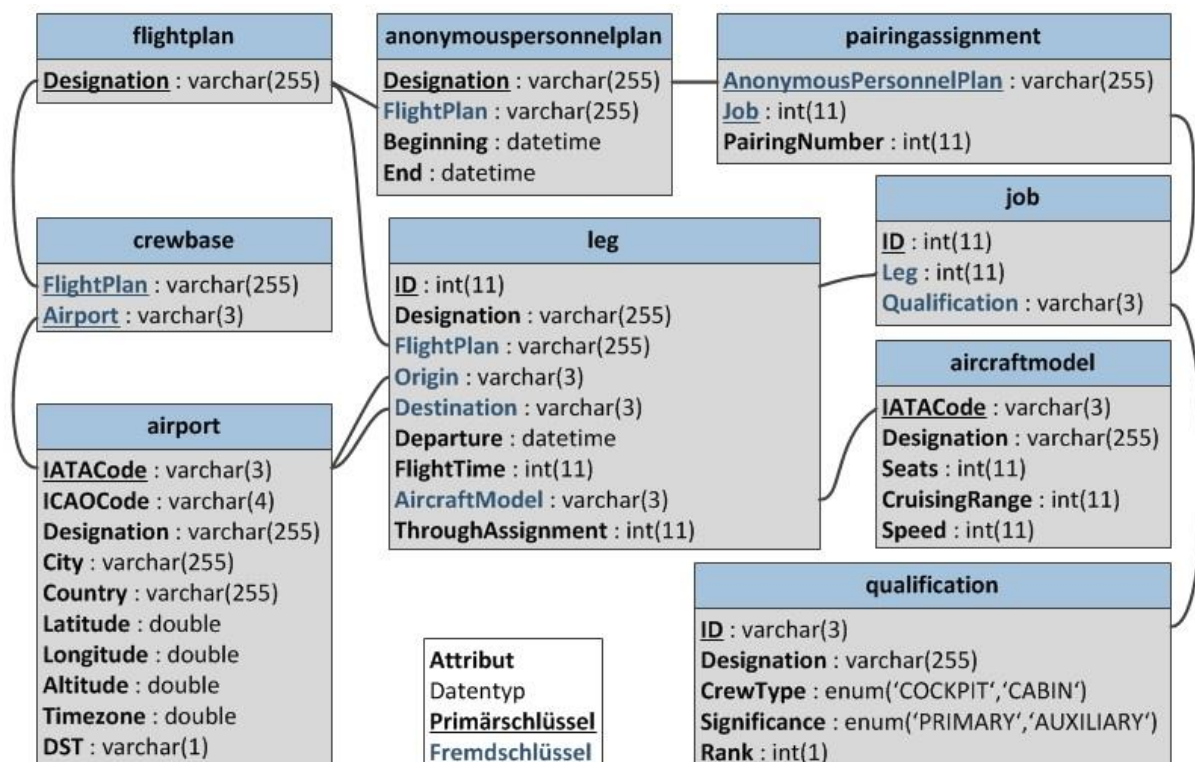


Abbildung 3.4: Datenbankschema

Das aus dem zuvor dargestellten ER-Diagramm abgeleitete Datenbankschema ermöglicht die Verwaltung von beliebig vielen anonymen Personaleinsatzplänen. Dabei können sich mehrere Einsatzpläne auf denselben Flugplan beziehen oder auch nur einen Teil eines Flugplans, definiert

durch die Attribute ‚Beginning‘ und ‚End‘, berücksichtigen. So wie die eigentlichen Mitglieder des Flugpersonals werden auch die zu verwendenden Flugzeuge nur implizit abgebildet. Durch das in der leg-Tabelle enthaltene ‚ThroughAssignment‘ können, in Kombination mit dem ‚AircraftModel‘, beim Lesen der Daten aus der DB Flugzeug-Objekte mit den entsprechenden Umläufen generiert werden.

4 Optimierung der Personaleinsatzplanung von Fluglinien

Seit den 1950er Jahren benutzen Fluglinien Modelle des Operations Research (OR), um ihre Planungsprobleme zu lösen (vgl. [Klab] S. 163). Durch die stetig steigende Nachfrage und Zusammenlegungen von Luftfahrtkonzernen wurden diese Modelle zunehmend komplexer. Gleichzeitig erfordert der hohe Druck, die Profitabilität zu steigern und wettbewerbsfähig zu bleiben, immer genauere Modelle und bessere Lösungsverfahren.

In diesem Kapitel wird zunächst detailliert die mathematische Formulierung des Crew Pairing Planungsproblems von Fluglinien dargestellt (Abschnitt 4.1). Hierbei wird auf verschiedene Modellierungsalternativen und anschließend auf unterschiedliche Zielsetzungen und deren gleichzeitige Betrachtung im Rahmen der multikriteriellen Optimierung eingegangen. In Abschnitt 4.2 wird die Problemstellung unter dem Aspekt der Robustheit betrachtet. Nach einer Diskussion des Robustheitsbegriffs, auch im Fluglinienumfeld, werden sowohl Planungs- als auch Messansätze für robuste Personaleinsatzplanung angeführt. Abschnitt 4.3 enthält eine Darstellung exakter und heuristischer Lösungsverfahren, die sich für die Behandlung der Problemstellung bewährt haben. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung, wie die Einsatzplanung von Personal in anderen Bereichen durchgeführt wird (Abschnitt 4.4).

4.1 Das Airline Crew Pairing Problem

Das Airline Crew Pairing Problem (ACPP), dessen Terminologie und Einbettung in den Planungsprozess von Fluglinien bereits in den Kapiteln 2.1 bzw. 2.3.2.3 beschrieben wurde, beschäftigt sich mit der anonymen Personaleinsatzplanung. Es dient dazu, allen Flügen eines Flugplans Personalressourcen zuzuweisen, weshalb eine Menge an generischen Crew-Pairings erstellt wird, die alle Flight Legs abdeckt. Das Problem wird von der OR-Gemeinde bereits seit über 45 Jahren diskutiert und ist in der Literatur auch als Crew Scheduling Problem (CSP) und unter Bezug auf Flugpersonal als Airline Crew Pairing Problem bekannt (vgl. [Arab]).

In Abhängigkeit der Struktur des zugrunde liegenden Flugplans kann das Crew Pairing in drei Problemkategorien behandelt werden: im daily, im weekly und im fully dated-Problem (vgl. im Folgenden [Gopa] S. 308-310 und [Emde] S. 421). Im daily-Problem wird angenommen, dass alle Flüge täglich durchgeführt werden. Hier reicht es für eine Lösung aus, Pairings für alle Flüge eines Tages zu finden. Diese können dann für einen beliebig langen Planungshorizont wiederholt werden. Innerhalb des weekly-Problems wird davon ausgegangen, dass sich Flüge in einem wöchentlichen Rhythmus wiederholen, was die Berücksichtigung von z.B. an Wochenenden abweichenden Flugfrequenzen ermöglicht. Diese Struktur spiegelt das typische Flugangebot von nordamerikanischen Fluglinien wider, in denen die Flüge außer an Wochenenden täglich angeboten werden. In diesem Fall

kann zuerst das daily-Problem gelöst werden, wenn es anschließend um entsprechende Ausnahmen ergänzt wird. Das fully dated-Problem tritt dann auf, wenn nur wenig bis gar keine Regularität vorhanden ist. So ist es z.B. bei europäischen Fluglinien der Fall, dass Verbindungen nur zwei bis drei Mal in der Woche angeboten werden. Diese Kategorie ermöglicht eine exakte Abbildung des Flugplans ohne jegliche Verallgemeinerungen, wobei die Problemkomplexität jedoch gleichzeitig enorm erhöht wird.

Um die Komplexität zu reduzieren, kann das ACPP in verschiedene Teilprobleme zerlegt und somit schrittweise gelöst werden. Hierbei ist es gängige Praxis, die Pairings für Cockpit- und Kabinencrews getrennt zu behandeln, da sich die Regelsätze für die Einplanung beider Crewtypen unterscheiden können. Da die Cockpit-Besetzung im Regelfall nur über eine Musterberechtigung verfügt, kann das Problem an dieser Stelle für jeden Flugzeugtyp getrennt betrachtet werden. Gleiches Vorgehen ist bei der Kabinenbesetzung, welche bis zu drei Musterberechtigungen parallel innehaben kann, nur sehr begrenzt möglich. Der Nachteil einer Problemzerlegung ist, dass bestehende Zusammenhänge zwischen den Pairings, wie etwa Deadhead-Möglichkeiten, und Informationen über die Nutzung gleicher Flugzeugressourcen verloren gehen.

4.1.1 Problemformulierungen

Bei der Formulierung von Optimierungsprogrammen gibt es einige Strukturen, die in ähnlicher Form immer wieder den Hauptbestandteil von Modellierungsansätzen bilden (vgl. im Folgenden [Grün] S. 58-60 und [Malc] S. 11 ff.). So findet die Formulierung des ACPP als Set Partitioning Problem (SPP) oder auch als Set Covering Problem (SCP) weite Verbreitung. Beide Ansätze bieten die Möglichkeit, das Problem in handhabbare Teilprobleme zu zerlegen und im Umkehrschluss eine Auswahl der errechneten Teillösungen zu einer Gesamtlösung zusammenzufügen. SPP und SCP haben gemeinsam, dass sie, in der allgemeinen Form, in der sie hier vorgestellt werden, im Sinne der Komplexitätstheorie zu den NP-schweren Problemen gehören und deshalb nicht effizient gelöst werden können. Ein Grund hierfür liegt in dem kombinatorischen Charakter der Problemformulierungen, der zu einer sehr großen Anzahl an Lösungsmöglichkeiten führt. Ein weiterer Grund liegt in den Ganzzahligkeitsanforderungen, die an einige Variablen des Programms gestellt werden. Für beide Ansätze wurden sowohl spezielle exakte als auch heuristische Verfahren entwickelt, von denen die gängigsten im Kapitel 4.3 vorgestellt werden.

Beide Problemstrukturen lassen sich anhand von Mengen (engl.: sets) beschreiben. Auf das ACPP angewendet wird hierfür zunächst eine Menge L definiert, die die n_L Flight Legs eines Flugplans beinhaltet. Unter Berücksichtigung einer Reihe von Kombinationsregeln stellt die zeitlich sortierte Teilmenge $P_i = \{l_{1,P_i}, \dots, l_{n_{P_i},P_i}\} \subseteq L$ ein mögliches Pairing dar, wobei n_{P_i} die Anzahl der in ihr enthaltenen Legs angibt. Die Menge P enthält sämtliche Pairings, wobei n_P deren Anzahl beziffert. Im

ACPP wird eine Auswahl von Pairings zu einer Lösung kombiniert, die als $\Omega_i \subseteq P$ gekennzeichnet wird, wobei n_{Ω_i} die Anzahl der in ihr enthaltenen Pairings angibt.

Für eine Lösung Ω_i des SCP muss jedes Leg des Flugplans in der Vereinigung aller Pairings enthalten sein:

$$\bigcup_{u=1}^{n_{\Omega_i}} P_u = L \quad (4.1)$$

Für eine Lösung Ω_i des SPP muss ebenfalls Bedingung (4.1) gelten, wobei die Pairings untereinander keine Schnittmengen aufweisen dürfen:

$$P_u \cap P_v = \emptyset \quad \forall P_u, P_v \in \Omega_i; P_u \neq P_v \quad (4.2)$$

Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft eine Probleminstanz, in der die Menge L aus $n_L = 7$ Flight Legs und die Menge P aus $n_P = 5$ Pairings besteht, wobei $P_1 = \{l_1, l_4, l_5\}$, $P_2 = \{l_2, l_3\}$ usw. Die Menge $\Omega_1 = \{P_1, P_3, P_4\}$ stellt hier für das SPP eine gültige Lösung dar. Die Menge $\Omega_2 = \{P_1, P_2, P_5\}$ ist eine zulässige Lösung des SCP. Es ist leicht ersichtlich, dass jede Lösung des SPP auch eine zulässige Lösung für das SCP darstellt. Jedoch ist zu beachten, dass eine optimale Lösung des SPP nicht auch für das SCP optimal sein muss.

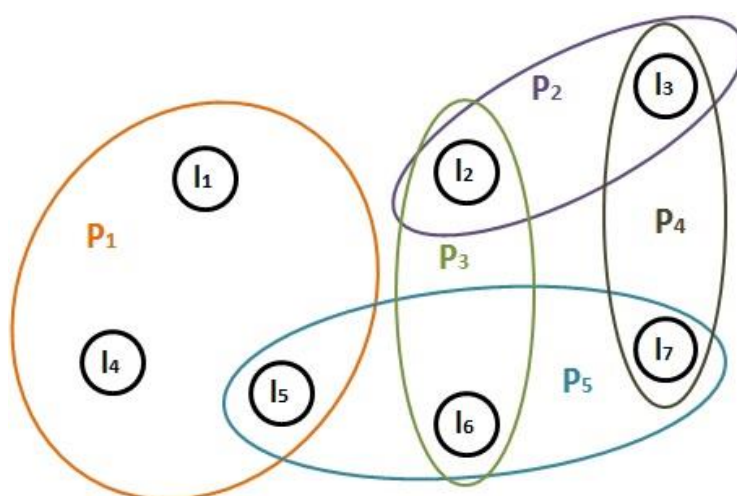


Abbildung 4.1: Set-Partitioning und Set-Covering²⁹

Um im Rahmen der Optimierung möglichst kostengünstige Lösungen identifizieren zu können, wird den Pairings ein Kostensatz c_{P_i} zugeordnet. Weiterhin wird das Programm für jedes Pairing P_i um eine binäre Entscheidungsvariable x_{P_i} ergänzt, die den Wert 1 annimmt, falls P_i Teil der Lösung ist, und 0 sonst. Der ebenfalls binäre Parameter $\gamma_{P_i}^l$ beschreibt die Teilmengen, indem er auf 1 gesetzt wird, wenn Leg l in Pairing P_i enthalten ist und 0 sonst.

²⁹ In Anlehnung an [Grün] S. 59

Die mathematische Formulierung des SCP-Modells lautet wie folgt:

$$\min \sum_{i=1}^{n_P} c_{P_i} x_{P_i} \quad (4.3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n_P} \gamma_{P_i}^l \geq 1 \quad \forall l \in L \quad (4.4)$$

$$x_{P_i} \in \{0,1\} \quad \forall P_i \in P \quad (4.5)$$

Die Zielfunktion (4.3) minimiert die Gesamtkosten, die sich aus den Kosten der in der Lösung enthaltenen Pairings zusammensetzen. Die Nebenbedingung (4.4) stellt analog zu der zuvor angeführten Bedingung (4.1) sicher, dass jedes Flight Leg mindestens einmal von einem Pairing abgedeckt wird. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das mehrfache Abdecken eines Flight Legs durch Flugpersonal der Durchführung eines Deadheads gleichkommt und somit i.d.R. in einem ACPP als zulässig gilt. Abschließend verleiht Bedingung (4.5) den Entscheidungsvariablen ihren binären Charakter.

Die Notation des SPP-Modells ist analog zu der des SCP mit dem Unterschied, dass anstelle der Bedingung (4.4) die folgende Bedingung (4.6) herangezogen wird, die sicherstellt, dass jedes Leg genau einmal abgedeckt wird:

$$\sum_{i=1}^{n_P} \gamma_{P_i}^l = 1 \quad \forall l \in L \quad (4.6)$$

Eine genauere Beschreibung des ACPP, welche über die hier angeführten Modellierungsansätze hinausgeht und komplexere Pairingstrukturen, hierarchische Regelsätze, Reihenfolgebedingungen und Begrenzungen von Ressourcenverbräuchen umfasst, wird im folgenden Abschnitt gegeben.

4.1.2 Definitionen der Elemente und Eigenschaften

Im Folgenden werden die für das ACPP benötigten Konstanten, Mengen sowie die Eigenschaften ihrer Elemente definiert. Dabei stellen die aufgeführten konstanten Planungsparameter, die Flugzeugflotte mit entsprechenden Type Ratings und die im Flugplan enthaltenen Flughäfen und Flight Legs die Inputdaten einer Problem Instanz dar. Die Kombinationen der Legs zu Duties, Pairings und ganzen Einsatzplänen bilden die Outputdaten.

Konstanten

briefingTime := Dauer des Briefings zu Beginn einer Duty

debriefingTime := Dauer des Debriefings zum Ende einer Duty

mct_{reg} := MCT zwischen zwei Legs ohne Umsteigevorgang innerhalb einer Duty

mct_{rot} := MCT zwischen zwei Legs mit Umsteigevorgang innerhalb einer Duty

sitTime_{min} := Minimal gewünschte Pufferzeit zwischen zwei Legs innerhalb einer Duty

$sitTime_{max}$:= Maximale Sit Time zwischen zwei Legs innerhalb einer Duty
 $restPeriod_{min}$:= Minimale Ruhezeit zwischen zwei Duties innerhalb eines Pairings³⁰
 $restPeriod_{max}$:= Maximale Ruhezeit zwischen zwei Duties innerhalb eines Pairings
 fdp_{max} := Maximale Flight Duty Period (FDP) einer Duty
 $tafb_{max}$:= Maximale Time Away From Base eines Pairings
 $dutyLegs_{max}$:= Maximale Anzahl an Legs in einer Duty³¹
 $pairingDuties_{max}$:= Maximale Anzahl an Duties in einem Pairing
 $typeRating_{max}$:= Maximale Anzahl an Type Ratings in einer Duty oder einem Pairing

Menge aller Type Ratings TR mit n_{TR} Elementen.

Menge aller Flugzeuge AC mit n_{AC} Elementen. Für alle $ac \in AC$ wird folgende Eigenschaft definiert:

$tr(ac)$:= Type Rating von Flugzeug ac , wobei gilt: $tr(ac) \in TR$

Menge aller Flughäfen AP mit n_{AP} Elementen. Es gilt $AP = AP_{CB} \cup AP_{Reg}$ und $AP_{CB} \cap AP_{Reg} = \emptyset$, wobei AP_{CB} die Menge der Crewbases mit $n_{AP_{CB}}$ Elementen und AP_{Reg} die Menge der regulären Flughäfen mit $n_{AP_{Reg}}$ Elementen ist.

Menge aller Legs L mit n_L Elementen. Für alle $l \in L$ werden folgende Eigenschaften definiert:

$orig(l)$:= Abflughafen von Leg l , wobei gilt: $orig(l) \in AP$

$dest(l)$:= Zielflughafen von Leg l , wobei gilt: $dest(l) \in AP$

$dep(l)$:= Abflugzeit von Leg l

$arr(l)$:= Ankunftszeit von Leg l

$block(l)$:= Block Time von Leg l , wobei gilt: $block(l) = arr(l) - dep(l)$

$ac(l)$:= Flugzeug von Leg l , wobei gilt: $ac(l) \in AC$

Menge aller Duties D mit n_D Elementen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen aus 4.1.3 stellen alle $D_i \in D$ zeitlich geordnete Tupel von Legs dar. Für alle $D_i = \{l_{1,D_i}, \dots, l_{n_{D_i},D_i}\}$ mit n_{D_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$orig(D_i)$:= Abflughafen von Duty D_i , wobei gilt: $orig(D_i) = orig(l_{1,D_i})$

$dest(D_i)$:= Zielflughafen von Duty D_i , wobei gilt: $dest(D_i) = dest(l_{n_{D_i},D_i})$

$beg(D_i)$:= Startzeit von Duty D_i , wobei gilt: $beg(D_i) = dep(l_{1,D_i}) - briefingTime$

³⁰ Emden-Weinert und Proksch berücksichtigen für diesen Parameter neben der hier angeführten Untergrenze die Länge der vorhergehenden Duty. Den jeweiligen Abstand zwischen zwei konsekutiven Duties legen sie auf das Maximum beider Werte fest (vgl. [Emde] S. 423).

³¹ Es kann sinnvoll sein, das Erzeugen von zu kurzen Arbeitstagen zu unterbinden. Hierfür können den Parametern $dutyLegs_{max}$ oder fdp_{max} entsprechende Untergrenzen gegenübergestellt werden.

$end(D_i) :=$ Endzeit von Duty D_i , wobei gilt: $end(D_i) = arr(l_{n_{D_i}, D_i}) + debriefingTime$

$fdp(D_i) :=$ FDP von Duty D_i , wobei gilt: $fdp(D_i) = end(D_i) - beg(D_i)$

$block(D_i) :=$ Total Block Time von Duty D_i , wobei gilt: $block(D_i) = \sum_{j=1}^{n_{D_i}} block(l_{j, D_i})$

$L(D_i) :=$ Menge der Legs in Duty D_i , wobei gilt: $L(D_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{D_i}} l_{u, D_i}$

$TR(D_i) :=$ Menge der Type Ratings in Duty D_i , wobei gilt: $TR(D_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{D_i}} tr(ac(l_{u, D_i}))$

Menge aller Pairings P mit n_P Elementen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen aus 4.1.3 stellen alle $P_i \in P$ zeitlich geordnete Tupel von Duties dar. Für alle $P_i = \{D_{1, P_i}, \dots, D_{n_{P_i}, P_i}\}$ mit n_{P_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$cb(P_i) :=$ Crewbase von Pairing P_i , wobei gilt: $cb(P_i) \in AP_{CB}$

$orig(P_i) :=$ Abflughafen von Pairing P_i , wobei gilt: $orig(P_i) = orig(D_{1, P_i})$

$dest(P_i) :=$ Zielflughafen von Pairing P_i , wobei gilt: $dest(P_i) = dest(D_{n_{P_i}, P_i})$

$beg(P_i) :=$ Startzeit von Pairing P_i , wobei gilt: $beg(P_i) = beg(D_{1, P_i})$

$end(P_i) :=$ Endzeit von Pairing P_i , wobei gilt: $end(P_i) = end(D_{n_{P_i}, P_i})$

$tafb(P_i) :=$ TAFB von Pairing P_i , wobei gilt: $tafb(P_i) = end(P_i) - beg(P_i)$

$block(P_i) :=$ Total Block Time von Pairing P_i , wobei gilt: $block(P_i) = \sum_{u=1}^{n_{P_i}} block(D_{u, P_i})$

$L(P_i) :=$ Menge der Legs in Pairing P_i , wobei gilt: $L(P_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{P_i}} L(D_{u, P_i})$

$TR(P_i) :=$ Menge der Type Ratings in Pairing P_i , wobei gilt: $TR(P_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{P_i}} TR(D_{u, P_i})$

Menge aller anonymen Personaleinsatzpläne Ω mit n_Ω Elementen. Alle $\Omega_i \in \Omega$ stellen Mengen von Pairings dar: $\Omega_i \subseteq P$. Für alle Ω_i mit n_{Ω_i} Elementen wird folgende Eigenschaft definiert:

$L(\Omega_i) :=$ Menge der Legs in Personaleinsatzplan Ω_i , wobei gilt: $L(\Omega_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{\Omega_i}} L(P_u)$

4.1.3 Bedingungen für Zulässigkeit

In diesem Abschnitt werden die Bedingungen aufgeführt, die sowohl für die Input- als auch für die Outputdaten eingehalten werden müssen, um Zulässigkeit zu gewährleisten. Bei ihnen handelt es sich um gesetzliche, tarifrechtliche, betriebliche sowie um formale Anforderungen für den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont von Crewumläufen.

Eine Belegung der Konstanten wird als zulässig bezeichnet, wenn alle Werte aus \mathbb{N}_0 gewählt und darüber hinaus folgende Bedingungen erfüllt werden:

$$0 \leq sitTime_{min} \leq sitTime_{max} \quad (4.7)$$

$$restPeriod_{min} \leq restPeriod_{max} \quad (4.8)$$

$$dutyLegs_{max} \geq 1 \quad (4.9)$$

$$pairingDuties_{max} \geq 1 \quad (4.10)$$

$$typeRating_{max} \geq 1 \quad (4.11)$$

Ein Satz an Eingabedaten wird als zulässig bezeichnet, wenn n_{TR} , n_{AC} , n_{AP} und $n_L \in \mathbb{N}$ sind und darüber hinaus alle Legs des Flugplans zulässig sind. Ein Leg $l_i \in L$ wird als zulässig bezeichnet, wenn es die Integritätsbedingungen (4.12) und (4.13) erfüllt. (4.12) besagt, dass ein geplantes Leg nicht an dem Flughafen ankommen darf, von dem aus es gestartet ist. Bedingung (4.13) sichert die zeitliche Umsetzbarkeit.

$$\forall l_i \in L: orig(l_i) \neq dest(l_i) \quad (4.12)$$

$$\forall l_i \in L: dep(l_i) < arr(l_i) \quad (4.13)$$

Eine Duty $D_i \in D$ wird als zulässig bezeichnet, wenn sie nur zulässige Legs beinhaltet und darüber hinaus die Bedingungen (4.14) bis (4.18) erfüllt. Die Bedingung (4.14) legt die maximale Anzahl Legs pro Duty fest. Die zeitliche Obergrenze für eine Duty darf laut (4.15) nicht überschritten werden. Die räumliche Realisierbarkeit der Duty wird durch die Bedingung (4.16) gewährleistet. Die Bedingungen (4.17) und (4.18) sichern die minimalen und maximalen zeitlichen Abstände zwischen regulären Verbindungen und Umsteigeverbindungen, die einen Rotation Change bedeuten.

$$1 \leq n_{D_i} \leq dutyLegs_{max} \quad (4.14)$$

$$fdp(D_i) \leq fdp_{max} \quad (4.15)$$

$$dest(l_{u,D_i}) = orig(l_{u+1,D_i}) \quad u = 1, \dots, n_{D_i} - 1 \quad (4.16)$$

$$ac(l_{u,D_i}) = ac(l_{u+1,D_i}) \rightarrow 0 \leq dep(l_{u+1,D_i}) - (arr(l_{u,D_i}) + mct_{reg}) \leq sitTime_{max} \quad u = 1, \dots, n_{D_i} - 1 \quad (4.17)$$

$$ac(l_{u,D_i}) = ac(l_{u+1,D_i}) \rightarrow 0 \leq dep(l_{u+1,D_i}) - (arr(l_{u,D_i}) + mct_{rot}) \leq sitTime_{max} \quad u = 1, \dots, n_{D_i} - 1 \quad (4.18)$$

Ein Pairing $P_i \in P$ wird als zulässig bezeichnet, wenn es nur zulässige Duties beinhaltet und darüber hinaus die Bedingungen (4.19) bis (4.23) erfüllt. Die Bedingung (4.19) legt die maximale Anzahl Duties pro Pairing fest. Für die Einhaltung der zeitlichen Obergrenze eines Pairings sorgt Bedingung (4.20). Die räumliche Realisierbarkeit des Pairings wird durch (4.21) gewährleistet. (4.22) zielt auf die Einhaltung der Unter- und Obergrenzen für die Ruheperioden ab. Die Bedingung (4.23) fordert, dass es sich bei einem Pairing um eine Rundtour handelt, die bei einer Crewbase beginnt und endet.

$$1 \leq n_{P_i} \leq pairingDuties_{max} \quad (4.19)$$

$$tafb(P_i) \leq tafb_{max} \quad (4.20)$$

$$dest(D_{u,P_i}) = orig(D_{u+1,P_i}) \quad u = 1, \dots, n_{P_i} - 1 \quad (4.21)$$

$$restPeriod_{min} \leq beg(D_{u+1,P_i}) - end(D_{u,P_i}) \leq restPeriod_{max} \quad u = 1, \dots, n_{P_i} - 1 \quad (4.22)$$

$$orig(P_i) = dest(P_i) = cb(P_i) \quad (4.23)$$

Ein anonymer Personaleinsatzplan $\Omega_i \in \Omega$ wird als zulässig bezeichnet, wenn er nur zulässige Pairings beinhaltet und darüber hinaus die Bedingung (4.24) im Sinne eines SPP erfüllt. Diese legt fest, dass jedes Leg genau einmal eingeplant werden muss und basiert dabei auf der binären Variable $\gamma_{P_i}^l$, deren Wertigkeit wie folgt definiert wird:

$$\gamma_{P_i}^l := \begin{cases} 1, & l \in L(P_i) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Dass ein Pairing P_i seinerseits das Leg l nur einmal abdeckt, ergibt sich implizit aus den Bedingungen (4.17), (4.18) und (4.21), die durch die Regelung der zeitlichen Abfolge von Legs und Duties innerhalb von Pairings das doppelte Einplanen eines Legs unmöglich machen.

$$\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} \gamma_{P_i}^l = 1 \quad \forall l \in L \quad (4.24)$$

4.1.4 Kostenberechnung

Die Kosten eines Personaleinsatzplans werden typischerweise nicht in Geldbeträgen sondern in Form von zeitlichem Personalaufwand ausgedrückt, der für dessen Durchführung benötigt wird. Diese sog. pay-and-credit costs, welche zumeist in Crewminuten angegeben werden, werden zunächst für die einzelnen Legs des Flugplans und darauf aufbauend für die geplanten Duties und Pairings berechnet, bis sich in der Summe die Gesamtkosten des Einsatzplans ergeben. Im Folgenden wird ein hochgradig nicht-lineares Kostenmodell angegeben, wie es u.a. von Schaefer et al. ([Scha] S. 342-343) und Gopalakrishnan und Johnson ([Gopa] S. 311-312) verwendet wird.

Konstanten

$fraction_{duty}$:= Anteil der bezahlungswirksamen pay-and-credit costs von der FDP

mgp_{duty} := Minimum Guaranteed Pay (MGP) für eine Duty

$fraction_{pairing}$:= Anteil der bezahlungswirksamen pay-and-credit costs von der TAFB

$mgp_{pairing}$:= MGP für eine Duty in einem Pairing

Die pay-and-credit costs eines Flight Legs bemessen sich nach seiner Blockzeit (4.25). Die Kosten einer Duty entsprechen dem Maximum aus drei Termen: den kumulierten Blockzeiten ihrer Legs, einem bezahlungswirksamen Anteil der FDP und der garantierten Minimalbezahlung für eine Duty, ebenfalls ausgedrückt in pay-and-credit costs (4.26). Für die Berechnung der Pairingkosten in (4.27) ist, analog zu (4.26), das Maximum aus den kumulierten Blockzeiten der enthaltenen Legs, einem Anteil der TAFB und die Minimalbezahlung für eine Duty mal der Dutyanzahl ausschlaggebend. Zur Bestimmung des Gesamtpersonalaufwands eines Personaleinsatzplans werden die Kosten aller enthaltenen Pairings aufsummiert (4.28).

$$cost(l_i) := block(l_i) \quad (4.25)$$

$$cost(D_i) := \max\{block(D_i), fraction_{duty} * fdp(D_i), mgp_{duty}\} \quad (4.26)$$

$$cost(P_i) := \max\{block(P_i), fraction_{pairing} * tafb(P_i), mgp_{duty} * n_{P_i}\} \quad (4.27)$$

$$cost(\Omega_i) := \sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} cost(P_{u,\Omega_i}) \quad (4.28)$$

Zusätzlich zu dem zeitlichen Personalaufwand $cost(\Omega_i)$ eines Einsatzplans Ω_i fallen i.d.R. weitere Kosten an, die umgerechnet in Personalminuten in die Kostenberechnung von (4.25) bis (4.28) einfließen können. So z.B. für Hotel- und Verpflegungskosten, die mit jedem Layover einhergehen, Zusatzkosten, die durch Deadheads verursacht werden, oder fixe Grundkosten für jeden Creweinsatz.

In diesem Zusammenhang ist es während des Crew Pairings üblich, sich auf diese Zusatzkosten sowie auf den Teil des Personalaufwands zu konzentrieren, der nicht durch Flugzeiten verursacht wird. So wird die Summe der eigentlichen Blockzeiten der Flight Legs ausgeblendet, da es sich bei ihr um eine Konstante des zugrunde liegenden Flugplans handelt, welche durch die Kombinationsmöglichkeiten dieser Optimierungsphase nicht verändert werden kann. Die Summe der Blockzeiten der in einem Flugplan enthaltenen Flight Legs stellt eine untere Schranke der Gesamtkosten eines Personaleinsatzplans dar. Um die Gesamtkosten eines Einsatzplans in Relation zu seiner unteren Schranke zu setzen, wird i.Allg. das Maß der Flight-Time-Credits (FTC) verwendet, welches u.a. von Vance et al. ([Vanc] S. 7-8) und Rosenberger et al. ([Rose] S. 370) folgendermaßen definiert wird:

$$ftc = \frac{pay-and-credit-minutes - flytime}{flytime} * 100\%$$

wobei *pay-and-credit-minutes* und *flytime* in dieser Arbeit als *cost* bzw. *block* bezeichnet werden. Da die bezahlte Flugzeit immer mindestens so groß ist wie die Blockzeit (vgl. (4.26) und (4.27)), kann die prozentuale Abweichung, ausgehend von der Blockzeit, immer nur nach oben erfolgen. (4.29) bis (4.31) geben die FTC-Berechnungen für Duties, Pairings und ganze Einsatzpläne an.

$$ftc(D_i) := \frac{cost(D_i) - block(D_i)}{block(D_i)} \quad (4.29)$$

$$ftc(P_i) := \frac{cost(P_i) - block(P_i)}{block(P_i)} \quad (4.30)$$

$$ftc(\Omega_i) := \frac{cost(\Omega_i) - \sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} block(P_{u,\Omega_i})}{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} block(P_{u,\Omega_i})} \quad (4.31)$$

4.1.5 Zielsetzungen

Neben der Erstellung eines zulässigen Einsatzplans, der alle Flight Legs des Flugplans mit Personalressourcen abdeckt, werden innerhalb des ACPP i.d.R. weitere Ziele verfolgt. Wie im Bereich der Produktionsplanung üblich, wird im Rahmen der Crew Pairing Optimierung zumeist das Ziel der Kostenminimierung verfolgt und deshalb unter allen zulässigen Einsatzplänen nach $\Omega_i \in \Omega$ gesucht, der für die Fluglinie am günstigsten ist. Unter Einhaltung der in Abschnitt 4.1.3 aufgeführten Nebenbedingungen gilt es, die Zielfunktion (4.3) zu minimieren. Eine weitere Zielsetzung, die oftmals mit dem Aspekt der Kostenreduzierung kombiniert wird, ist das Streben nach robusten Einsatzplänen, auf das in Kapitel 4.2 näher eingegangen wird. Darüber hinaus können im Rahmen der belastungsorientierten Dienstplanung die Personalumläufe zusätzlich zu ihrer Dauer nach ihrer Regularität oder ihren Strukturen bewertet werden, die für das frühzeitige Ermüden von Besatzungsmitgliedern (engl.: crew fatigue) verantwortlich gemacht werden.

Der Grad der Regularität eines Einsatzplans bemisst sich nach der Wiederholbarkeit seiner Pairings. Ein Plan mit hoher Regularität ist insofern wünschenswert, da er das Planen, das Implementieren und das Wiederherstellen von Crewumläufen erleichtert. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass das Flugpersonal sich wiederholende Umläufe präferiert. Um während der Optimierung einen hohen Grad an Regularität zu erreichen, müssen spezielle Nebenbedingungen berücksichtigt werden, da bei der reinen Kostenminimierung zumeist höchst irreguläre Pairingstrukturen entstehen.

Die beiden Hauptfaktoren für Crew Fatigue sind zu wenig Schlaf und unregelmäßige Ruhezeiten. Da Personalmüdigkeit im Bereich der Luftfahrt ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellt, achten staatliche Behörden streng auf die Einhaltung der gesetzlichen Ruhezeitenregelungen. Diese beziehen sich jedoch zumeist nur auf den Umfang der einzuhaltenden Ruhezeiten. Da neben der eigentlichen Schlafdauer jedoch auch der Schlafrhythmus erheblichen Einfluss auf die Qualität der Ruhepausen hat, kann es für einen Einsatzplan ebenfalls als Qualitätsmerkmal gelten, wenn dem Personal Erholungszyklen mit regelmäßigen Zeitabständen ermöglicht werden.

Wird in der Optimierung mehr als ein Ziel verfolgt, handelt es sich um multikriterielle Optimierung (vgl. im Folgenden [Pers] S. 1759-1760 und [Evan] S. 896-898). Im Regelfall gibt es bei dem Anstreben von mehreren Zielen nicht die eine beste Lösung, die im Hinblick auf alle Kriterien optimal ist. Dies liegt oftmals in der Gegenläufigkeit der Zielsetzungen begründet, die in der Verschlechterung eines Parameters resultiert, sobald ein anderer verbessert wird. So würden im Bereich des Crew Pairings mit steigender Regularität vermutlich auch die Kosten eines Einsatzplans anwachsen. Aus diesem Grund wird in der multikriteriellen Optimierung zumeist nach einem guten Kompromiss, einer sog. pareto-optimalen Lösung, gesucht. Eine Lösung wird als pareto-optimal bezeichnet, wenn sich keine andere Lösung findet, die bzgl. jedes Kriteriums besser ist, sie also von keiner anderen Lösung dominiert wird. Eine pareto-optimale Lösung ist somit selbst dominant und kann je nach Präferenz des Entscheiders als Lösung des Optimierungsproblems gewählt werden.

Je nach Zeitpunkt, zu dem ein Entscheider seine Präferenzen äußert, können Verfahren der multikriteriellen Optimierung in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Diese Äußerung kann vor, während oder nach der Optimierung erfolgen. Werden die Präferenzen vorher geäußert, werden die einzelnen Ziele ihrer Bedeutung entsprechend gewichtet. Ausgehend von einem zu verteilenden Gesamtgewicht von 100%, bedeutet ein höheres Gewicht, dass die entsprechende Zielsetzung im Optimierungsprozess stärker verfolgt wird. So werden die Informationen über die Präferenzen dazu genutzt, den Prozess zu steuern und ihn somit effizienter zu gestalten. Bezeichnet i ein Kriterium, u_i und w_i die Erreichung bzw. die Gewichtung dieses Kriteriums und n die Anzahl der Kriterien, so gibt v die Gesamtzielerreichung wie folgt an:

$$v = \sum_{i=1}^n u_i w_i, \text{ wobei gilt: } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \text{ und } w_i \geq 0$$

Da die verschiedenen Kriterien oftmals in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, müssen für einen fairen Vergleich der Funktionswerte alle Einheiten auf Werte zwischen 0 und 1 normalisiert werden. Bezeichnen o_i , $worst_i$ und $best_i$ den gemessenen, den schlechtestmöglichen und den bestmöglichen Funktionswert von Kriterium i , so wird die Zielerreichung u_i wie folgt bestimmt:

$$u_i = \frac{o_i - worst_i}{best_i - worst_i}$$

Ehrgott und Ryan benennen als Nachteile dieser Gewichtungsmethode zum einen, dass trotz der Parameter für die jeweilige Zielerreichung verschiedene Ziele, wie z.B. Kosten angegeben in Dollar und Robustheit angegeben in der erwarteten Verspätung, nur schwer zu vergleichen seien (vgl. im Folgenden [Ehrg] S. 142). Zum anderen führen sie an, dass das Festlegen der jeweiligen Gewichte nicht trivial, sondern mit hohem Aufwand verbunden sei.

Eine Alternative zur Gewichtungsmethode ist die ε -Constraint-Methode, bei der der Entscheider seine Präferenzen in Form von Satisfizierungs- und Extremierungszielen definiert. Dabei werden einige Optimierungsziele aus der Zielfunktion entfernt und als sog. Satisfizierungsziele in den Nebenbedingungen berücksichtigt. Die Zielfunktion wird anhand eines verbleibenden Optimierungsziels, dem sog. Extremierungsziel, beschrieben. Unter Gewährleistung der durch die Nebenbedingungen beschriebenen Minimal- bzw. Maximalwerte der anderen Ziele, wird dieses Ziel soweit maximiert bzw. minimiert, wie es möglich ist. Ein Beispiel ist das Maximieren der Robustheit eines Flugplans bei Nichtüberschreitung eines maximalen Kostenzuwachses.

Lässt der Entscheider die Informationen seiner Kompromissbereitschaft bezüglich der Erreichung einzelner Kriterien erst während der Durchführung der Optimierung einfließen, muss er den gesamten Prozess begleiten und in jeder Iteration Anpassungen vornehmen. Seine Präferenzen können in Form von Rangordnungen von Lösungen, neuen Gewichtungen oder durch Substitutionsraten zwischen den einzelnen Zielkriterien angegeben werden. Werden die Präferenzen erst im Nachhinein angegeben,

wird während der Optimierung versucht, möglichst viele pareto-optimale Lösungen zu identifizieren. Aus dieser Lösungsmenge kann der Entscheider dann seinen Favoriten wählen.

4.1.6 Integrierte Ansätze

Der Planungsprozess einer Fluglinie ist, wie zu Beginn des Kapitels 2.3 bereits angedeutet wurde, zu komplex, um ihn in einem einzigen Optimierungsproblem lösen zu können. Die Zerlegung in separate Problemstellungen hat entscheidende Auswirkungen auf die Güte der am Ende des Planungsprozesses erreichten Gesamtlösung, da die Optimierung eines Teilproblems für ein anderes von Nachteil sein kann. Auch das vorrausschauende Einplanen von Zeitpuffern und Zusatzressourcen, um in den sich anschließenden Planungsaufgaben mehr Spielraum zu erlangen, kann hier nur bedingt weiterhelfen. Zu großzügig dimensionierte oder in falschen Bereichen angelegte Puffer treiben die Gesamtkosten in die Höhe, wohingegen bei zu knapp kalkulierten Puffern keine Wirkung erzielt wird. Trotz des erheblichen Aufwands ist es in Teilen möglich und auch sinnvoll, verwandte Planungsphasen simultan zu betrachten. Es wird geschätzt, dass die Flugindustrie allein durch das gemeinsame Planen von Flugzeug- und Personalumläufen Beträge in der Größenordnung von einer halben Milliarde Dollar pro Jahr einsparen könnte (vgl. [Gopa] S. 332). Nicht zuletzt deshalb sind in der Literatur zahlreiche Ansätze zur integrierten Planung zu finden, von denen im Folgenden einige derer vorgestellt werden, die das Einplanen von Flugpersonal beinhalten.

Sandhu und Klabjan kombinieren in ihrer Arbeit das Crew Pairing mit dem Fleet Assignment (vgl. [Sand]). Vor dem Hintergrund, dass im Fleet Assignment festgelegt wird, welches Leg mit welchem Flugzeugtyp zu bedienen ist, weisen sie darauf hin, dass es unter Berücksichtigung einschränkender Parameter, wie den minimalen und maximalen Sit- und Connecting Times, dazu kommen kann, dass an einem Flughafen innerhalb eines bestimmten Zeitfensters nur eine zulässige Leg-Kombination existiert. Solche implizit vorgegebenen Kombinationen müssen während des Tail Assignments zwangsweise in die Flugzeugrotationen einfließen. Sollte es im anschließenden Crew Pairing jedoch nicht möglich sein, diese Leg-Kombinationen in die Pairings aufzunehmen, können erhebliche Mehrkosten durch den Einsatz zusätzlicher Crews oder Flugzeuge anfallen. Um diese zu vermeiden, schlagen Sandhu und Klabjan ein Verfahren vor, das diese Kombinationsvorgaben aufdeckt und sie bei der Berechnung von Crew Pairings und Fleet Assignments berücksichtigt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Gao et al. in ihrer Arbeit, jedoch mit dem Ziel, durch das gemeinsame Betrachten von Fleet Assignment und Crew Pairing die Robustheit eines Flugplans zu steigern (vgl. [Gao]). Um die Chance zu erhöhen, Crews im Störfall flexibel austauschen zu können, achten sie darauf, die Anzahl verschiedener Flugzeugtypen, die an einem Flughafen des Flugnetzes eingesetzt werden, gering zu halten. Das zugrunde liegende Konzept, die Anforderungen an das Personal lokal zu minimieren, wird ‚Station Purity‘³² genannt. Gao et al. übertragen diesen Gedanken

³² Der Begriff ‚Station Purity‘ (dt.: Flughafen-Reinheit) folgt dem sog. ‚Fleet Purity‘, bei dem es darum geht, innerhalb einer Flugzeugflotte keine unterschiedlichen Flugzeugtypen zu verwenden.

auf die Personalplanung und begrenzen in der sog. ‚Crew Base Purity‘ auch die Anzahl an Crew Bases, von denen aus ein Flughafen bedient wird. Hierdurch fliegen die Crews einer Basis weniger Flughäfen an, diese jedoch umso häufiger, was die Einsatzflexibilität weiter steigert und die Kosten der operationalen Planumsetzung minimiert.

Um die Weitergabe von Störungen in einem Flugplan zu minimieren, schlagen Cordeau et al. eine integrierte Erzeugung von Legfolgen für Flugzeuge und Crews vor, wobei immer nur ein Flugzeugtyp fokussiert wird (vgl. [Cord]). Sie verknüpfen Modelle des Crew Pairings und des Through Assignments mit dem Ziel der Kostenminimierung unter gleichzeitiger Einhaltung aller einschränkenden Nebenbedingungen, wie bspw. Wartungsintervallvorgaben oder Arbeits- oder Ruhezeitenregelungen. Zur Berechnung ihres Planungsmodells lösen Cordeau et al. das Through Assignment Problem und das Crew Pairing Problem (CPP) abwechselnd, wobei sie auf eine Angleichung der jeweiligen Legfolgen abzielen. Mercier et al. greifen in ihrer Arbeit ebenfalls das Planungsmodell auf und entwickeln, im Hinblick auf die Robustheit und die Leistungsfähigkeit, effektivere Varianten des Lösungsverfahrens (vgl. [Merc]). Ein vergleichbares Vorgehen wurde von Cohn und Barnhart vorgestellt (vgl. [Cohn]). Sie verknüpfen die Routenplanung von Flugzeugen und Crews, indem sie das CPP um die Wartungsanforderungen des Through Assignments erweitern. Auch Weide et al. beschäftigen sich mit der Kombination von Crew Pairing und Through Assignment (vgl. [Weid]). Sie verwenden ebenfalls eine iterative Heuristik, um für beide Problemstellungen kostengünstige und robuste Rotationen zu identifizieren. Ihre Lösungsprozedur beginnt mit der Suche nach dem kostengünstigsten Crew Pairing, ohne dabei Restriktionen des Through Assignments zu beachten. Für die Flugverbindungen, die die kürzesten Umsteigezeiten aufweisen, wird daraufhin festgelegt, dass die Flugzeuge den Crew Rotationen folgen, um Störungen durch zu knapp geplante Umsteigezeiten zu vermeiden. Dück et al. verfolgen ebenfalls das Ziel, die Stabilität von Flugzeug- und Crewumläufen zu erhöhen, und stellen ein integriertes stochastisches Modell zur kombinierten Planung von Crew Pairings und Tail Assignments vor (vgl. [Dück]). Kern des Modells sind die Abhängigkeiten zwischen den Umläufen des Personals und den Flugzeugen und ihre Auswirkungen auf die Fortpflanzung von Störungen innerhalb des Flugplans. Zur Lösung ihres Modells verwenden Dück et al. Methoden des Column Generation (siehe Abschnitt 4.3.1.1) auf Basis der iterativen Heuristik von Weide et al.

Im Gegensatz zum klassischen zweigeteilten Ansatz der Einsatzplanung von Flugpersonal, bei dem das Crew Pairing und das Crew Assignment sequentiell geplant werden, formulieren Saddoune et al. ein integriertes Crew Scheduling Problem zum Zwecke der Minimierung von Personalkosten (vgl. [Sadd]). Dabei konzentrieren sie sich auf die Einsatzplanung von Piloten eines Flugzeugtyps unter Verwendung des Bidlining-Verfahrens. Im Zuge der Umlaufplanung wird in dem Modell zwischen Crew Bases und Flughäfen ohne stationiertes Personal unterschieden. Die Crew Bases verfügen über Personalkapazitäten, deren Überschreitung im Zuge der Planung von Pairings dem Einsatz von

Reservepersonal gleich kommt und erhebliche Mehrkosten verursacht. Die Pairings und die Reserveeinsätze werden den Piloten zeitgleich zugewiesen. Zwar erfordert das vorgestellte Modell wesentlich längere Berechnungszeiten als der klassische Planungsansatz, doch konnten Saddoune et al. zeigen, dass sich mit seiner Hilfe Einsparungen bei den Personalkosten im Bereich von 3,5% erreichen lassen.

4.2 Robustes Crew Pairing

In diesem Teilkapitel wird robustes Crew Pairing behandelt. Dazu wird sich zunächst in Abschnitt 4.2.1 mit dem Begriff der Robustheit auseinandergesetzt. Es wird in das allgemeingültige Konzept eingeführt und anschließend auf die Bedeutung von Robustheit im Planungsumfeld von Fluglinien eingegangen (Abschnitt 4.2.2). In Abschnitt 4.2.3 werden gängige Indikatoren für Robustheit aufgeführt. Sie repräsentieren die Eigenschaften eines Einsatzplans, die oftmals während der Optimierung angestrebt werden, um die Robustheit des Planungsergebnisses zu steigern. Getrennt hiervon werden in Abschnitt 4.2.4 Maße angeführt, mit deren Hilfe die Robustheit der aufgestellten Planungen gemessen und bewertet werden können.

4.2.1 Das Konzept der Robustheit

Der Begriff der Robustheit findet in vielen Bereichen Anwendung. So spricht man z.B. von robust konstruierten Gebäuden, von robusten Kommunikationsarchitekturen oder von Menschen mit robuster Gesundheit. Je nach Zusammenhang wird dem Begriff eine andere Bedeutung zugeschrieben und kann bspw. als Synonym für Widerstandsfähigkeit, Zuverlässigkeit, Ausfallsicherheit, Beständigkeit, Zähigkeit etc. gebraucht werden (vgl. [Dud2]). Für eine allgemeingültige Definition von Robustheit muss von dem jeweiligen Kontext abstrahiert werden. So kann der Begriff als Konzept aufgefasst werden, das die Fähigkeit eines Systems beschreibt, zufälligen Umwelteinflüssen standhalten und weiterhin seine Funktionen erfüllen zu können. Dabei ist es wiederum kontextabhängig, welche Umwelteinflüsse relevant sind. Diese können sich auf alltägliche Problemsituationen aber auch auf extreme Ereignisse beziehen, die u.a. menschliche Irrtümer, technische Defekte, Unfälle sowie absichtliche Angriffe einschließen. Die o.g. Beispiele aufgreifend sollen Gebäude auch Erdbeben standhalten, Kommunikationssysteme trotz einzelner Hardwareausfälle funktionieren und Personen während Grippewellen gesund bleiben.

In der Informatik bezeichnet Robustheit die Eigenschaft eines Systems oder Verfahrens, auch unter ungünstigen Bedingungen weitestgehend zu funktionieren. Sie setzt sich aus den Fähigkeiten zusammen, Störungen tolerieren, lokal begrenzen oder ausgleichen zu können. So sollen sich z.B. einzelne Fehler während der Implementierung von Software nicht auf ein ganzes Programmsystem auswirken oder das Erreichen undefinierter Zustände durch Anwendungsfehler oder inkonsistente Datengrundlagen vermieden werden.

Im Bereich der Mathematik wird unter Robuster Optimierung (RO) bzw. robuster Planung die Optimierung unter Unsicherheit verstanden (vgl. im Folgenden [Gebh] S. 33 ff.). Da zum Planungszeitpunkt die weitere Entwicklung der Umweltsituation nicht komplett zu erfassen ist, was insbesondere für komplexe und dynamische Planungsbereiche gilt, ist es schwierig, einen für die tatsächlich eintretende Situation optimalen Handlungsplan zu berechnen. Da es gleichzeitig zumeist nicht möglich ist, Entscheidungen so lange hinauszuzögern, bis die Ausprägungen aller Parameter bekannt sind, wird in der RO zumindest die Unsicherheit relevanter Informationen berücksichtigt. Dies geschieht, indem alle möglichen Szenarien der Planimplementierung betrachtet werden und ein Plan gesucht wird, der nicht nur für eine spezielle Konstellation optimal ist, sondern in allen Szenarien gut abschneidet und somit die Planungsgüte maximiert und eventuelle nachteilige Auswirkungen minimiert. Durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Szenarien grenzt sich die RO von der Deterministischen Planung ab. Da sie darüber hinaus nicht nur die Erwartungswerte der Zielkriterien optimiert, sondern auch die Risikopräferenzen der Entscheider berücksichtigt, ist sie ebenfalls von der Stochastischen Optimierung zu unterscheiden.

Wie in allen Optimierungsansätzen strebt auch die RO Zulässigkeit und Optimalität an, wobei die beiden Eigenschaften einer Lösung wie folgt beschrieben werden: Eine Lösung gilt als zulässig, wenn sie für alle möglichen Szenarien zulässig ist. Da dies in der Praxis oftmals nicht zu garantieren ist, kann die Formulierung insoweit aufgeweicht werden, dass der Plan unter Zuhilfenahme kleinerer Anpassungen während der Umsetzung zulässig bleiben muss. Die Güte einer Lösung hängt davon ab, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie für jedes der möglichen Szenarien gute Werte erreicht. Darüber hinaus wird in der RO die Robustheit einer Lösung als Kombination zweier weiterer Eigenschaften beschrieben: Stabilität und Flexibilität. Ein Planungsergebnis wird als stabil angesehen, wenn es sich im Verlauf der Implementierung nur wenig verändert. D.h. trotz sich verändernder Umwelteinflüsse müssen nur wenige Anpassungen vorgenommen werden, um im zulässigen Bereich zu bleiben. Eine Planung wird flexibel genannt, wenn sie die Möglichkeit bietet, auf zufällige Umwelteinflüsse reagieren zu können. Der Grad der Flexibilität hängt dabei von der Anzahl der Reaktionsmöglichkeiten ab sowie von der Zeit, die vergeht, bis diese wirksam werden. Insgesamt hängt die Güte einer Lösung der RO davon ab, in welchem Maß alle vier Eigenschaften vorhanden sind.

4.2.2 Robustheit im Umfeld von Fluglinien

Der im Kapitel 2.3 beschriebene Planungsprozess ist traditionell auf Effizienzsteigerung und Kostensenkung ausgerichtet. Obwohl sich die hier erzeugte Gesamtplanung unter normalen Bedingungen einwandfrei umsetzen lässt, führen enge Zeitpläne, hohe Ressourcenauslastungen und stark synchronisierte Umläufe von Fluggerät und Flugpersonal sowohl zu einer hohen Störanfälligkeit als auch zu einem hohen Potential, einmal entstandene Verspätungen im Streckennetz weiterzugeben. Unter zufälligen Umwelteinflüssen wird ein solch kompakter Plan schnell unzulässig und muss durch

aufwendige und kostenintensive Recovery-Maßnahmen wiederhergestellt werden. Die Nichtdurchführung angekündigter Flüge resultiert darüber hinaus sowohl in finanziellen Strafen seitens der Genehmigungsbehörden, als auch in Kompensationsansprüchen und Vertrauensverlusten seitens der Kunden (vgl. [Pomp] S. 85). Aus diesen Gründen sind die operativen Kosten, die sich durch die tatsächliche Ausführung eines Flugplans ergeben, oftmals signifikant höher als die geplanten Kosten.

Erst als in den späten 1990er Jahren der stark anwachsende Flugverkehr zunehmend zu Verkehrsstaus im Luftraum und zu Kapazitätsengpässen in der bodengebundenen Infrastruktur führte, gewannen in Publikationen Überlegungen zur Robustheit in der Flugverkehrsplanung an Bedeutung (vgl. [Dück] S. 2). Die robuste Optimierung innerhalb der einzelnen Stufen des Planungsprozesses wird als ‚Robust Airline Scheduling‘ bezeichnet. Der Beschreibung der RO im vorigen Abschnitt folgend, werden auch im Robust Airline Scheduling schon während der Optimierungsphase explizit Planungsunsicherheiten bezüglich möglicher Ereignisse und deren Konsequenzen berücksichtigt, um insgesamt bessere Gestaltungsentscheidungen treffen zu können. Für Fluglinien bedeutet eine hohe Planrobustheit eine größtmögliche Kostenersparnis bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit, was zu einem guten Image, einer hohen Kundenzufriedenheit und insgesamt zu Wettbewerbsvorteilen führt.

Wu beschreibt die Planungsrobustheit im Kontext von Fluglinien als das Anstreben von Flexibilität und Zuverlässigkeit unter dem Einfluss von Störungen (vgl. [Wu] S. 206). Zuverlässigkeit selbst wird von Wu und von Pompl als die tatsächliche Einhaltung des Flugplans hinsichtlich seiner Regelmäßigkeit und seiner Pünktlichkeit definiert (vgl. [Wu] S. 187 f. und [Pomp] S. 85). Im Hinblick auf die Abweichung von geplanten und tatsächlichen Flugzeiten können die Konzepte Zuverlässigkeit und Stabilität gleichgesetzt werden.

Die Unsicherheiten, mit denen sich im Rahmen des Robust Airline Scheduling auseinandergesetzt wird, ergeben sich aus stochastischen Einflüssen während der Ausführung des Flugplans und haben erheblichen Einfluss auf dessen Performanz und Implementierungskosten (vgl. im Folgenden [Wu] S. 10-11). Einerseits umfassen diese Unsicherheiten sowohl die Abweichungen zwischen geplanten und tatsächlichen Prozesszeiten der operativen Aufgaben als auch die Abweichungen zwischen geplanten und tatsächlichen Passagierzahlen. So hängt z.B. die Beladungsdauer eines Flight Legs von der Passagieranzahl ab, welche jedoch bis zum Start des Flugzeugs unbekannt ist. Andererseits tragen nicht vorhersehbare Störereignisse im Umfeld der Flughäfen und des Luftraums zur Planungsunsicherheit bei. Dabei kann es sich um größere Ereignisse handeln, wie den Ausfall eines Flugzeugs aufgrund technischer Defekte oder um verringerte Flughafenkapazitäten aufgrund schlechter Wetterverhältnisse. Aber auch kleinere Störungsereignisse, wie verspätete Passagiere oder fehlendes Gepäck, können sich in der Summe negativ auf die Zeitpläne auswirken.

Bei einem Flugverkehrssystem handelt es sich mit all seinen Akteuren, Prozessen und Infrastrukturen um ein außerordentlich komplexes Gebilde, was eine unüberschaubar große Anzahl an möglichen Störungsquellen mitbringt. Eine Störung selbst wird von Clausen et al. als eine Situation während des operativen Flugverkehrs definiert, die eine hinreichend große Abweichung zu den aufgestellten Planungen aufweist (vgl. [Clau] S. 810). Diese etwas vage Ausdrucksweise ermöglicht es Clausen et al., zwischen den Begriffen ‚Störungsereignis‘ und ‚Flugplanstörung‘ zu unterscheiden und darauf hinzuweisen, dass nicht jedes Störungsereignis zu einem gestörten Flugplan führen muss, wenn z.B. eine Verspätung nicht groß genug ist, um Anschlussflüge zu beeinträchtigen. Gleichzeitig muss ein gestörter Flugplan nicht zwangsläufig auf ein einziges Störereignis zurückzuführen sein.

Da Störungen nicht immer die gleichen Eigenschaften aufweisen, ist es sinnvoll, sie verschiedenen Störungsklassen zuzuordnen. Diese Klassen können dann sowohl während des Robust Airline Scheduling als auch während des Flight Plan Recoverys differenziert behandelt werden. Grundsätzlich lassen sich Störungen anhand ihrer Dauer und ihres negativen Einflusses auf den Flugplan unterscheiden, auch wenn diese Form der Unterteilung nie gänzlich trennscharf vorgenommen werden kann. Schaefer et al. definieren zwei Klassen, anhand derer sie zwischen ‚reibungsbedingten‘ und ‚ernsthaften‘ Störungen unterscheiden (vgl. [Scha] S. 341). Ersterer rechnen sie Ereignisse wie Passagierverspätungen, Flughafenstaus, kleinere ungeplante Wartungsarbeiten und kurze Wetterbeeinflussungen zu. Letztere enthält größere technische Ausfälle sowie schwerwiegende und lang anhaltende schlechte Wetterverhältnisse. Eine weitere gängige Einteilung ist die Unterscheidung zwischen primären Verspätungen (engl.: primary delays oder auch root delays) und Folgeverspätungen (engl.: reactionary delays) (vgl. [Dück] S. 1 und [Wu] S. 144).³³ Bei primary delays handelt es sich um eigenständige bzw. unabhängige Verspätungen, die von der AOC nicht beeinflusst werden können. Reactionary delays sind Verspätungen, die ihren Ursprung in primary delays bzw. in den durch sie nötig gewordenen Recovery-Aktionen der AOC haben. Die Verspätungsweitergabe durch sog. Knock-On-Effekte, in denen aus primary delays reactionary delays resultieren, wird als Delay-Propagation bezeichnet und ist im Sinne einer robusten Flugplanung unbedingt zu vermeiden. Verspätungen können weiterhin in die Kategorien Inbound-Delays und Outbound-Delays unterteilt werden. Ein Flight Leg startet mit einem Outbound-Delay, wenn die geplante Abflugzeit nicht eingehalten werden kann. Demgegenüber erreicht ein Leg seinen Zielflughafen mit einem Inbound-Delay, wenn es nach der geplanten Ankunftszeit landet. Die Begriffe Inbound- und Outbound-Delay treffen noch keine Aussage darüber, wann Störungen aufgetreten sind, da diese sich bereits vor dem letzten Off-Blocks- bzw. Turnaround-Prozess ereignet haben können. Darüber hinaus weist Wu darauf hin, dass es neben Verspätungen auch ‚negative‘ Verspätungen, also

³³ Auch wenn eine Verspätung präzise formuliert selbst keine Störung, sondern vielmehr die Auswirkung einer Störung ist, ist dieser Unterschied in der Literatur oftmals nicht erkennbar. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass sich die Auswirkungen von Störungen zumeist in Verspätungsminuten ausdrücken lassen, und dass die eigentliche Ursache einer Verspätung, z.B. ein Stau oder Gegenwind, für Recovery-Manager i.d.R. von nachrangigem Interesse ist.

neben zeitlich positiven auch zeitlich negative Planabweichungen gibt (vgl. [Wu] S. 24). Auch wenn das zu frühe Abfliegen bzw. Ankommen eines Legs nicht die Integrität eines Flugplans gefährdet, kann es dennoch Startsequenzen und Slot- und Gate-Zuweisungen durcheinander bringen. Abschließend zeigt Tabelle 4.1 die Kategorien der zahlreichen Standard Delay Codes, wie sie von der IATA in den Airport Handling Manuals 730 und 731 veröffentlicht wurden (vgl. [Eur2] S. 21-22). Dabei stellt jeder einzelne Delay Code wiederum eine Kategorie dar, mit der verschiedene Störungsquellen bezeichnet werden können. Beispiele hierfür sind die Codes ‚35: Aircraft Cleaning‘, ‚41: Aircraft Defects‘ und ‚63: Late Crew Boarding or Departure Procedures‘. Die Kategorie ‚Reactionary‘ beinhaltet die Codes für Folgeverspätungen, so z.B. ‚91: Load Connection‘, ‚93: Aircraft Rotation‘ und ‚95: Crew Rotation‘.

Kategorie	Delay Code Bereich
Others	00-09
Passenger and Baggage	11-19
Cargo and Mail	21-29
Aircraft and Ramp Handling	31-39
Technical and Aircraft Equipment	41-48
Damage to Aircraft & EDP/Automated Equipment Failure	51-58
Flight Operations and Crewing	61-69
Weather	71-77
Air Traffic Flow Management Restrictions	81-84
Airport and Governmental Authorities	85-89
Reactionary	91-96
Miscellaneous	97-99

Tabelle 4.1: Kategorien der Standard IATA Delay Codes

4.2.3 Indikatoren des Robust Airline Scheduling

Die RO während der Plangestaltung kann als proaktiver Weg zur Behandlung von Störungen angesehen werden (vgl. [Wu] S. 205). Mit dem Ziel der Störungsvermeidung stellt sie das Gegenstück zum Recovery-Management dar, das sich mit der Störungsbehebung auseinandersetzt. Dabei ist die zentrale Idee des Robust Airline Scheduling, Flug- und Einsatzpläne derart zu gestalten, dass zum einen die Auswirkungen auftretender Störungen absorbiert werden und die Pläne weiterhin zulässig bleiben, und zum anderen, falls dies nicht gänzlich gelingt, den Einsatz von Recovery-Maßnahmen zu erleichtern (vgl. [Clau] S. 819-820). Um den Aspekt der Robustheit in der Optimierung anstreben zu können, müssen Planstrukturen definiert werden, die der Erreichung dieses Ziels förderlich sind. Je mehr solche Strukturen ein Plan aufweist, desto robuster soll er sich während seiner Umsetzung verhalten. In diesem Zusammenhang stellen die definierten Planstrukturen Indikatoren für Robustheit dar und müssen in die Zielfunktion des Optimierungsprogramms integriert werden.

Im Folgenden werden Indikatoren für Robustes Airline Scheduling dargestellt. Je nachdem ob sie die Eigenschaft eines Plans, Störungen zu absorbieren, unterstützen oder seine Eigenschaft verbessern,

Recoverystrategien leicht umsetzbar zu machen, werden die Indikatoren in den Abschnitten ‚Stabilität‘ und ‚Flexibilität‘ erläutert. Der Notation einer kognitiven Karte folgend, stellt Abbildung 4.2 eine Übersicht der Wirkungszusammenhänge dar. Auch wenn in dieser Arbeit die robuste Optimierung der Personaleinsatzplanung im Vordergrund steht, ist diese jedoch so eng mit anderen Planungsstufen verwoben, dass auch Planstrukturen aus deren Bereichen aufgeführt werden.

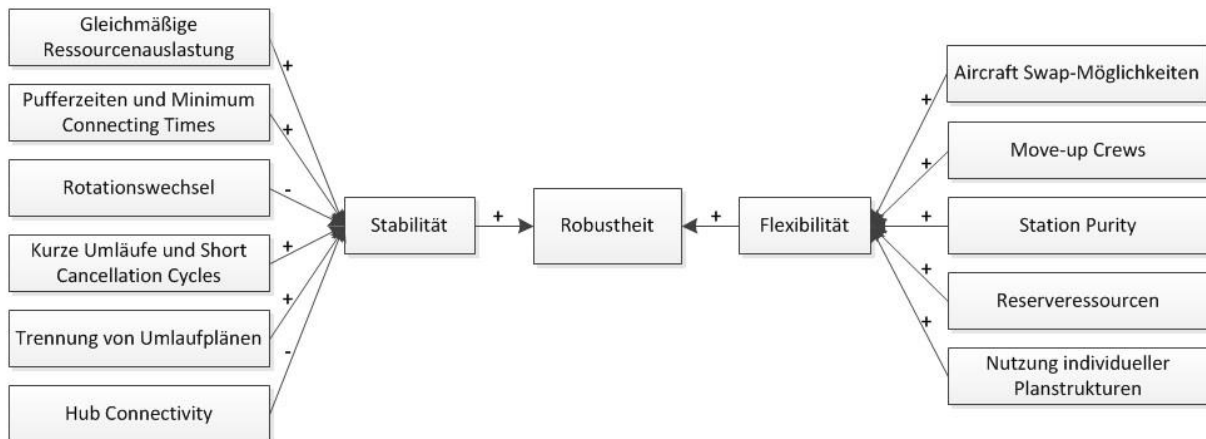


Abbildung 4.2: Robustheitsindikatoren im Zusammenhang

4.2.3.1 Stabilität

Gleichmäßige Ressourcenauslastung: Werden Flugzeuge oder Mitarbeiter im Rahmen eines Flugplans fast bis zu ihren operativen Limits eingeplant, können Störungen dazu führen, dass maximale Einsatz- bzw. Arbeitszeiten überschritten werden (vgl. [Scha] S. 344). In einem solchen Fall müssten betroffene Rotationen und Pairings unterbrochen und umgeplant werden. Um möglichst viel Spielraum zu operativen Grenzwerten zu erhalten, sollte die Gesamtauslastung gleichmäßig auf alle Ressourcen verteilt werden.

Pufferzeiten und MCTs: Je größer die zeitlichen Abstände zwischen den Legs der Flugzeug- und Personalumläufe sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die durch auftretende Störungen ergebenden Verspätungen nicht durch das Flugnetz fortpflanzen (vgl. z.B. [Wu] S. 204-205 oder [Clau] S. 819-820). Die Zeitabstände können in der Planung als separate Pufferzeiten oder als Minimum Connecting Times eingeplant werden. Letztere verhindern zu kurze Turnaround-Operationen und werden für Flugverbindungen, die in der Praxis als anfällig gelten, etwas ausgedehnter geplant. Separate MCTs können für Flugverbindungen gelten, bei denen die Crews die Flugzeuge wechseln.

Kurze Umläufe und Short Cancellation Cycles: Kommt es bei der Implementierung eines Flugplans zu Störungen, sind neben einzelnen Flight Legs auch die entsprechenden Flugzeugrotationen und Crew Pairings betroffen. Im Falle von größeren Verspätungen oder Flugstreichungen muss das Recovery die Durchführung der restlichen Legs in den Umläufen sicherstellen. Je kürzer die Umläufe im Allgemeinen sind, desto geringer wird dieser Aufwand ausfallen (vgl. [Rose] S. 365 f.). Darüber

hinaus können Flugzeugrotationen derart gestaltet werden, dass sie sich aus einer Reihe kurzer Flight Leg-Zyklen zusammensetzen, die jeweils an dem Flughafen enden, an dem sie begonnen haben (vgl. [Ros2] S. 358). Der Gedanke hierbei ist, dass, wenn ein Flug aufgrund einer Störung gestrichen wird, auch weitere Flüge der Rotation gestrichen werden müssen, um ohne Aircraft Ferrying den Rotationsfluss des Flugzeugs zu erhalten. Je kürzer solche Short Cycles ausfallen, desto geringer sind die Auswirkungen, wenn sie gestrichen werden müssen.

Rotationswechsel: Im Falle eines Rotationswechsels, auch Rotationsprung genannt, steigt eine Crew innerhalb einer Duty in ein anderes Flugzeug um. Durch den Flugzeugwechsel entstehen Verbindungen bzw. Abhängigkeiten zwischen Flugzeugrotationen und Crew Pairings (vgl. z.B. [Ruth] S. 178 oder [Ehrg] S. 141). Ohne Rotationswechsel ist durch eine Verspätung maximal ein Anschlussflug betroffen (wenn man die Flugverbindungen der Passagiere außer Acht lässt). Soll nach dem verspäteten Leg jedoch die Crew umsteigen, wartet ein Anschlussflug auf das Flugzeug und ein Weiterer auf die Crew. Der Grad, in dem Flugzeugrotationen und Crew Pairings übereinstimmen, wird durch den sog. Crewgleichlauf-Parameter ausgedrückt. Ein hoher Crewgleichlauf, wie auch die zuvor beschriebene Planung kurzer Umläufe, fördert die Isolation von Flight Legs und wirkt somit der Delay Propagation entgegen.

Trennung von Umlaufplänen: Unter dem Begriff ‚Degradable Airline Schedule‘ wird ein Flugplan verstanden, der in mehrere unabhängige Teilkomponenten zerlegt wird (vgl. [Kang] S. 17 f.). Die Idee dabei ist, sowohl Flugzeugrotations- als auch Personaleinsatzpläne so zu konzipieren, dass verschiedene Planbereiche entstehen, über deren Grenzen sich keine Störungen fortpflanzen können. Auch wenn die Planbereiche aufgrund der Flugverbindungen der Passagiere nicht völlig isoliert sind, ermöglichen sie es dennoch, bestimmte Schlüsselbereiche, denen eine hohe Priorität zugesprochen wird, besonders zu stabilisieren und Teilbereiche mit niedrigeren Prioritäten im Störfall vorübergehend zu vernachlässigen.

Hub Connectivity: Im Bereich der Hubs sind Flugnetze besonders anfällig für Delay Propagation, da hier der absolute Großteil der Flight Legs ein- und ausgeht und die Abhängigkeiten durch Umsteigevorgänge von Personal und Passagieren am größten sind. Um einen Störfall auf ein Hub zu begrenzen und zu verhindern, dass weitere Hubs betroffen werden, sollte die Anzahl der Rotationen, die die Hubs miteinander verbinden, die sog. Hub Connectivity, minimiert werden (vgl. [Ros2] S. 359).

4.2.3.2 Flexibilität

Aircraft Swap-Möglichkeiten: Wenn sich innerhalb eines gewissen Zeitfensters zwei Flugzeugrotationen an zwei Flughäfen begegnen, besteht im Störfall die Möglichkeit, die beiden Teilrotationen dem jeweils anderen Flugzeug zuzuweisen (vgl. [Agee] S. 43). Auf diese Weise kann ein Flug, der ansonsten stark verspätet starten oder vielleicht komplett gestrichen würde, zu Lasten

eines anderen Fluges plangemäß durchgeführt werden. Das würde insbesondere dann Sinn machen, wenn es sich um einen Flug handelt, der im Gegensatz zu seinem Pendant eine sehr hohe Passagierauslastung hat.

Move-up Crews: Ähnlich wie das Austauschen von Teilrotationen zwischen Flugzeugen ist auch das teilweise Austauschen von Pairings zwischen Crews möglich (vgl. [Sheb] S. 303). In dem Fall, dass eine Crew verspätet ist und ihren Anschlussflug nicht wahrnehmen kann, kann es andere Crews geben, die zum entsprechenden Zeitpunkt an dem Flughafen bereit sind, den Anschlussflug durchzuführen. Findet der eigentlich nächste Flug der Ersatzcrew später statt als der Anschlussflug der verspäteten Crew, kann er dieser im Austausch zugewiesen werden. Abbildung 4.3 zeigt hierzu ein Beispiel, in dem Leg L2 verspätet eintrifft und deshalb der weitere Verlauf der Pairings P1 und P2 getauscht wird. Weil die Ersatzcrew (im Beispiel blau eingezeichnet) einen früheren als den eigentlich geplanten Flug durchführt, also im Zeitplan ‚aufrückt‘, wird sie auch als ‚Move-up crew‘ bezeichnet. Damit solch ein Austausch von Aufgaben möglich wird und alle Regularien eingehalten werden, sollten u.a. die Crewbases und die Anzahl der restlichen Duties übereinstimmen.

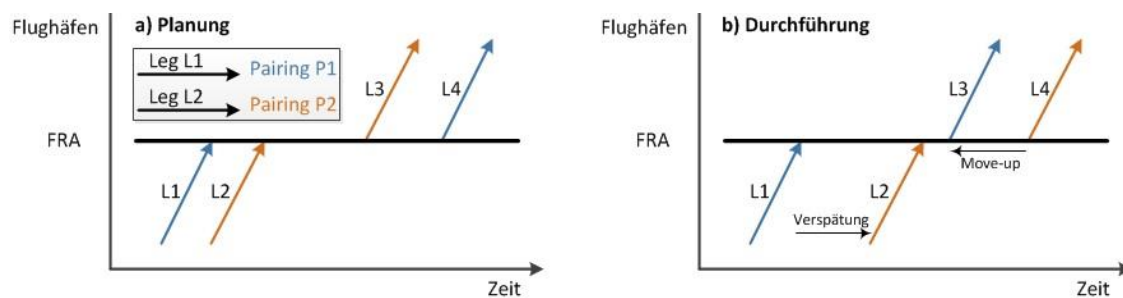


Abbildung 4.3: Crew Swapping³⁴

Station Purity: Der Grundgedanke des ‚Station Purity‘-Konzepts ist es, bei Flughäfen, vornehmlich bei den Spokes eines Flugnetzes, nur ein bis zwei Flottentypen einzusetzen (vgl. [Smit] S. 497 f.). Auf diese Weise sollen neben der Optimierung von Reparaturressourcen vor allem die Anzahl von Move-up Crews erhöht werden. Dies gilt insbesondere für den Austausch von Cockpitcrews, da diese jeweils nur über ein Type Rating verfügen.

Reserveressourcen: Sollten sich im Falle von verspäteten oder gestrichenen Flügen keine Aircraft Swap-Möglichkeiten oder Move-up Crews ergeben, kann auf Reserveressourcen zurückgegriffen werden, falls diese zuvor eingeplant wurden. Diese können sowohl Reserveflugzeuge als auch Standby- und Reservecrews beinhalten. Je mehr zusätzliche Ressourcen eingeplant wurden und je mehr Reaktionszeit bleibt, desto einfacher können restliche Rotationen und Pairings neu zugewiesen werden.

Nutzung individueller Planstrukturen: Die bisher vorgestellten Indikatoren stellen die am weitesten verbreiteten Zielsetzungen dar, die während der robusten Plangestaltung angestrebt werden. Darüber

³⁴ In Anlehnung an [Sheb] S. 301

hinaus ist es jedoch auch möglich, Planstrukturen auf individuelle Situationen von Fluglinien anzupassen und auf spezielle Störungsquellen einzugehen. So beschäftigen sich Muter et al. z.B. mit einer kleinen türkischen Fluglinie, die häufig dazu gezwungen ist, kurzfristig zusätzliche Legs in den Personaleinsatzplan aufzunehmen (vgl. im Folgenden [Mute]). Um eine hohe Robustheit gegen diese Form der Störung zu erreichen, haben sie das Framework RCPEF (Robust Crew Pairing for Manging Extra Flights) entwickelt. Mit diesem Werkzeug fördern sie während der Planung Pairingstrukturen, die mit einem Minimum an Crew Swaps und Deadheads die Extraflüge aufnehmen können.

4.2.4 Robustheitsmaße

In den vorigen Abschnitten wurde auf die RO im Allgemeinen sowie im Speziellen auf die typischen Störungen und Robustheitsindikatoren im Planungsumfeld von Fluglinien eingegangen. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie der Zielerreichungsgrad des Robust Airline Scheduling gemessen werden kann. Hierfür werden die Parameter aufgeführt, die zumeist während der Durchführung der in der Optimierung erzielten Planungsergebnisse für die Bemessung der Robustheit herangezogen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass sämtliche Messdaten als absolute und durchschnittliche Zahlen erhoben, anteilig auf unterschiedliche Zeiträume sowie Entitäten bezogen und in verschiedene Klassifizierungen eingeteilt werden können. Obwohl in der Literatur gelegentlich der Begriff ‚Nicht-Roubstheitsmaß‘ verwendet wird (vgl. z.B. [Ehrg] S. 141 oder [Weid] S. 837) um anzudeuten, dass einige Parameter im Sinne der Robustheit minimiert werden (in Abgrenzung zu Robustheitsmaßen, die maximiert werden), wird im Weiteren von dieser Unterscheidung abgesehen, da die angestrebte Zielrichtung bei jedem Parameter intuitiv zu erfassen ist.

On-Time Performance: Die On-Time Performace eines Flugplans drückt aus, wie viele der in ihm enthaltenen Flight Legs ihren jeweiligen Zielort pünktlich erreicht haben (vgl. im Folgenden [Lee] S. 1966). Sie trifft eine Aussage darüber, wie nahe Planung und Umsetzung beieinander liegen. Es ist zu beachten, dass es in der Flugbranche durchaus üblich ist, Verspätungen bis 15 Minuten nicht als solche zu bewerten (siehe auch [Pomp] S. 85). Auch ist es möglich, dass gestrichene Flüge ebenfalls als ‚nicht pünktlich‘ erfasst werden. Ist die On-Time Performance einer Fluglinie schlecht, kann sie Imageschäden und Vertrauensverluste seitens der Kunden davontragen.

Anzahl verspäteter Flüge: Dieses Maß entspricht im Wesentlichen der On-Time Performance. Es können jedoch Verspätungen bei den Starts und bei den Landungen separat erfasst werden.

Verspätung: Dieser Parameter gibt die Verspätungen der operativen Durchführung eines Flugplans z.B. in Form einer Gesamtverspätung oder einer durchschnittlichen Verspätung pro Flight Leg an. Wie die Anzahl verspäteter Flüge wird sie dazu genutzt, die Abweichung zwischen Planung und Durchführung zu beschreiben.

Anzahl Flugstreichungen: Flugstreichungen werden vom Recovery-Management als Reaktion auf Störungen angeordnet. Flugstreichungen können in die On-Time Performance einfließen. Passagiere, die auf solchen Flügen gebucht waren, müssen anderweitig transportiert oder kompensiert werden.

Anzahl Störungen, die Eingreifen erfordern: Je nach Recoverystrategie können unterschiedliche Störungen unterschiedliche Maßnahmen aus den Bereichen Flugzeug-, Personal- und Passagierrecovery auslösen. Anzahl und Art der erforderlichen Maßnahmen hängen von Störungsart und -dauer ab.

Operative Kosten: Die operativen Kosten eines Flugplans setzen sich aus einer ganzen Reihe von Kostenfaktoren zusammen, u.a. aus Betriebs-, Wartungs- und Personalkosten. Weiterhin hängen die Personaleinsatzkosten neben der Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter, ihrer Qualifikationen sowie ihrer jeweiligen Einsatzdauer von der vereinbarten Bezahlstruktur ab. Diese kann z.B. durch Minimal- oder Pauschalentlohnungen oder durch separate Kostensätze für Überstunden, Nacht-, Wochenend- und Feiertagsarbeit etc. beliebig komplex ausgestaltet werden. Einerseits kann das Kostenmaß nur indirekt dazu genutzt werden, Aussagen über die Planrobustheit zu treffen, da das Ausführen von Recovery-Maßnahmen und längere Einsatzdauern aufgrund von Verspätungen sich zwar in höheren Kosten widerspiegeln, diese aber keine genaueren Rückschlüsse zulassen. Andererseits sind die operativen Kosten unverzichtbar, um ein Kosten-Nutzen-Verhältnis der erreichten Robustheit anzugeben.

Anzahl Regelverstöße: Bei der Durchführung des täglichen Flugverkehrs kann es zu Verletzungen von gesetzlichen, tarifrechtlichen und betrieblichen Regelungen kommen. Wenn die Planung selbst keinerlei Regelverstöße aufweist, sind sämtliche auftretende Verstöße auf Störungen zurückzuführen. Dieser Parameter kann für jede Regel separat erhoben werden.

Benötigtes Reservepersonal: Die Anzahl der Standby- und Reservecrews, die zur Planerfüllung benötigt werden, lässt einen Rückschluss auf die Planrobustheit, genauer die Planstabilität, zu. Bei diesem Parameter kann zwischen Cockpit- und Kabinenpersonal unterschieden werden.

Anzahl von Störungen betroffener Passagiere: Dieser Parameter lässt eine personengenaue Betrachtungsweise der Störungen zu. Er kann dazu genutzt werden, die Störung eines vollbesetzten Langstreckenflugs und der Störung eines kleinen Kurzstreckenflugzeugs unterschiedlich zu gewichten. Je nach Definition kann ein Passagier als von einer Störung betroffen angesehen werden, wenn er aufgrund von Umleitungen oder Streichungen nicht auf der ursprünglichen Verbindung befördert wird. Einer anderen Definition folgend ist ein Passagier betroffen, wenn sein gebuchter Flug über einen gewissen Grenzwert hinaus verspätet ist.

4.3 Lösungsverfahren

In diesem Abschnitt werden einige der Lösungsmethoden für das ACPP vorgestellt, die sowohl in der Literatur als auch in der Praxis am weitesten verbreitet sind. Neben einigen exakten Verfahren, die darauf abzielen, in endlich vielen Schritten eine optimale Lösung des Problems zu finden, werden auch einige heuristische Vorgehensweisen erläutert, die sich für das Auffinden oder Verbessern eines Personaleinsatzplans bewährt haben. Obwohl letztere gegenüber ersteren zwar keine optimalen Lösungen garantieren können, benötigen sie jedoch für Probleminstanzen von praxisrelevanten Größenordnungen zumeist nur polynomiellen Rechenaufwand.

4.3.1 Exakte Verfahren

4.3.1.1 Column Generation

Viele kombinatorische Optimierungsprobleme haben eine sehr große Anzahl an Variablen bzw. Spalten, von denen jedoch nur die wenigsten Teil der jeweiligen optimalen Lösung sind (vgl. im Folgenden [Schä] S. 66-68 und [Grün] S. 149 f.). Die Variablenmenge ist oftmals so groß, dass es unmöglich oder zumindest nicht praktikabel ist, sämtliche Spalten zu erzeugen, zu speichern und für die Lösung des Master-Problems (engl.: master program, MP) gleichzeitig heranzuziehen. Deshalb kann es sinnvoll sein, zunächst nur eine handhabbare Teilmenge der Spalten in einem reduzierten MP (RMP) in einer relaxierten Problemformulierung zu berücksichtigen. Mit Hilfe des Simplex-Algorithmus kann das RMP gelöst und die dualen Preise berechnet werden. Die optimale Lösung des RMPs stellt eine zulässige Lösung für das MP dar. Um festzustellen, ob es sich auch um die optimale Lösung des MP handelt, werden die dualen Preise an ein Subproblem, das sog. Pricing-Problem, übergeben, das mit deren Hilfe die Reduzierten-Kosten-Koeffizienten aller Variablen berechnet. Sofern möglich, wird eine Spalte mit negativen reduzierten Kosten generiert und in die Basis des RMPs eingefügt. Obwohl die Spaltengenerierung (engl.: column generation, CG) selbst für jedes Optimierungsproblem unterschiedlich erfolgen kann, ist es immer das Ziel, nur eine möglichst geringe Anzahl an Variablen zu generieren und diese erst an das RMP zu übergeben, wenn sie benötigt werden. Durch die Minimierung der Spaltenanzahl im Linearen Programm wird die Chance erhöht, es noch mittels gängiger Standardsolver, wie z.B. dem ILOG CPLEX Optimization Studio oder dem GurobiOptimizer, lösen zu können (vgl. [IBM] und [Guro]). Es kommt häufig vor, dass die Spalten und das zugrunde liegende Problem spezielle Strukturen aufweisen, deren Eigenschaften für die Suche neuer Spalten ausgenutzt werden können. RMP und Pricing-Problem werden solange abwechselnd gelöst, bis keine negativen reduzierten Kosten mehr gefunden werden und somit das Gesamtergebnis nicht weiter verbessert werden kann. An dieser Stelle wurden implizit alle Spalten berücksichtigt und die optimale Lösung des MP gefunden. Diese Prozedur terminiert nach endlich vielen Schritten. Für eine Anwendung des CG auf das CPP in Form eines SPP bzw. eines SCP sei auf Lavoie et al. ([Lavo]) oder Borndörfer et al. ([Born]) bzw. auf Muter et al. ([Mute]) verwiesen.

4.3.1.2 Shortest Path Algorithms

Eine weit verbreitete Methode, um in dem im letzten Abschnitt angeführten Pricing-Problem neue Pairings zu generieren, benutzt aus der Graphentheorie stammende, seit langem bekannte und gut untersuchte Kürzeste-Wege-Algorithmen (engl.: shortest path algorithms, SPA). Dabei wird sich zunutze gemacht, dass die Pairings eines Personaleinsatzplans als Pfade in einem Graphen repräsentiert werden können und der kürzeste Weg dem Pairing mit minimalen reduzierten Kosten entspricht. Ausführliche Anwendungsbeschreibungen wurden wiederum von Lavoie et al. ([Lavo]) und von Vance et al. ([Vanc]) verfasst.

Um einen Flugplan auf einen Graphen $G(V, E)$ zu übertragen, werden zunächst sämtliche in ihm enthaltene Abflüge und Ankünfte als Knoten der Menge V abgebildet. Auf diese Weise wird jedem Knoten $v \in V$ sowohl ein Flughafen als auch ein Zeitpunkt zugeordnet. Die Legs selbst werden als gerichtete Kanten $e \in E$ in den Graphen aufgenommen. Darüber hinaus wird die Kantenmenge E um alle Verbindungen zwischen Ankunfts- und Abflugsknoten erweitert, die unter Beachtung räumlicher und zeitlicher Bedingungen möglich sind. Kosten, Zeitdauern und andere Ressourcen können in Form von Kantengewichten abgebildet werden.

```

01:   Für jeden Knoten  $v \in V$ :
02:        $distanz(v) := \infty$ 
03:        $vorgänger(v) := v$ 
04:    $distanz(\text{Startknoten}) := 0$ 
05:    $Q := V$ 
06:   Wiederhole, solange  $Q$  nicht leer ist:
07:        $v :=$  Knoten in  $Q$  mit kleinster Distanz
08:       Entferne  $v$  aus  $Q$ 
09:       Für jede Kante  $e = (v, w) \in E$ :
10:           Falls  $w$  in  $Q$ :
11:               Falls  $distanz(v) + länge(e) < distanz(w)$ :
12:                    $distanz(w) := distanz(v) + länge(e)$ 
13:                    $vorgänger(w) := v$ 

```

Algorithmus 4.1: SPA von Dijkstra

Ausgehend von einem Startknoten bestimmt der SPA von Dijkstra, welcher in Algorithmus 4.1 dargestellt ist, die kürzesten Pfade zu einem (oder allen) anderen Knoten in einem kantengewichteten Graphen $G(V, E)$ mit n Knoten und m Kanten, sofern keines der Kantengewichte negativ ist. Zu Beginn des Algorithmus werden zunächst für jeden Knoten des Graphen Variablen als Teil von sog. Labels initialisiert (Zeilen 1 bis 4). Das Label eines Knotens enthält Informationen über die Distanz des aktuell kürzesten Weges, über den der Knoten vom Startknoten aus erreicht werden kann und enthält zudem einen Verweis auf den unmittelbaren Vorgängerknoten auf diesem Weg. Die Labels können im Verlauf der Suche ersetzt werden, wenn sich ein kürzerer als der bisher bekannte Weg zu einem Knoten findet (Zeilen 11 bis 13). Die Suche wird anhand einer äußeren und einer inneren

Schleife implementiert (Zeilen 6 bzw. 9), wobei in der ersten, dem Greedy-Prinzip folgend, immer der Knoten mit der geringsten Distanz ausgewählt wird und in der Zweiten geprüft wird, ob über seine Kanten Distanzverbesserungen zu seinen adjazenten Knoten erreicht werden können. Dieses Vorgehen führt zu einer Laufzeit von $O(n * \log n + m)$, falls für die Verwaltung der Knotenmenge ein Fibonacci-Heap gewählt wird. Das Ersetzen eines Labels durch ein anderes wird als Pfadverlängerung bezeichnet und in Abbildung 4.4 anhand eines Beispiels verdeutlicht.

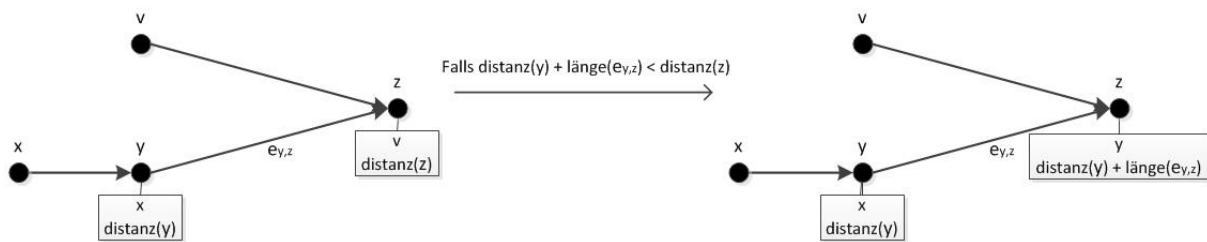


Abbildung 4.4: Pfadverlängerung bei Dijkstra von x nach z über $e_{(y,z)}$ ³⁵

Im Rahmen der Spaltengenerierung des Pricing-Problems müssen neben den Kosten der Pairings noch weitere ihrer Eigenschaften auf dem Graphen abgebildet werden, um bei der Erzeugung alle Restriktionen, wie z.B. maximale Arbeits- oder Flugzeiten, berücksichtigen zu können. Diese Informationen müssen, genau wie die Kosten, bei der Konstruktion und der Verlängerung der Pfade mitgeschrieben und aktualisiert werden. Aufgrund der verschiedenen zu beachtenden Kriterien muss es nicht mehr genau einen kürzesten Pfad geben, der alle anderen Pfade bezüglich aller Kriterien dominiert. Ein Beispiel hierfür wäre, wenn der Pfad von v nach z in Abbildung 4.5 zwar eine geringere Distanz, dafür aber höhere Kosten als der Pfad von w nach z aufweisen würde. So kann es mehrere nicht dominierte Pfade geben, weshalb die Obergrenze von einem Label pro Knoten aufgehoben werden muss. Es handelt sich nun um ein ressourcenbeschränktes Multilabel Shortest Path (MLSP) Problem (vgl. [Barn] S. 258-260).

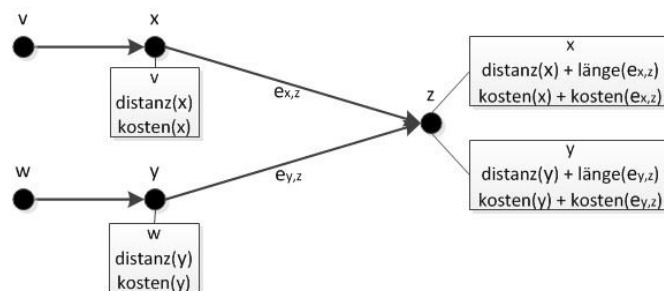


Abbildung 4.5: Pfadverlängerung bei einem Multilabel Shortest Path Problem³⁶

Da anhand der Labels, wie bei der vollständigen Enumeration, zunächst alle möglichen Pfade überprüft werden und ein Pfad nur dann verworfen wird, wenn er sich nicht mehr verlängern lässt oder er von einem anderen Pfad vollständig dominiert wird, wächst die Zahl der Labels sehr stark an. Die

³⁵ In Anlehnung an [Rath] S. 42

³⁶ In Anlehnung an [Rath] S. 44

Anzahl der Labels steigt mit jedem zu berücksichtigenden Kriterium, genau wie der Aufwand, diese zu überprüfen. Um die Effizienz des Verfahrens zu gewährleisten, muss es über eine geeignete Methode für die sog. Labeleliminierung verfügen. Unter Labeleliminierung wird verstanden, dass aufgrund von Vergleichen einige Label als dominiert identifiziert und gelöscht werden, noch ehe der jeweilige Pfad verlängert wurde. Dies ist dann der Fall, wenn ein anderer Pfad mit all seinen möglichen Fortsetzungen in jedem Fall besser sein muss, als der betrachtete Pfad mit dessen Fortsetzungen. Das frühzeitige Erkennen überflüssiger Labels trägt erheblich zur Beschleunigung des Verfahrens bei.

```

01:   Für jeden Knoten  $v \in V$  in Graph  $G(V, E)$ :
02:        $distanz(v) := \infty$ 
03:        $vorgänger(v) := v$ 
04:    $distanz(Startknoten) := 0$ 
05:   Wiederhole  $n-1$  mal:
06:       Für jede Kante  $e = (v, w) \in E$ :
07:           Falls  $distanz(v) + länge(e) < distanz(w)$ :
08:                $distanz(w) := distanz(v) + länge(e)$ 
09:                $vorgänger(w) := v$ 
10:   Für jede Kante  $e = (v, w) \in E$ :
11:       Falls  $distanz(v) + länge(e) < distanz(w)$ 
12:           STOPP mit Ausgabe „Kreis mit negativer Länge vorhanden.“

```

Algorithmus 4.2: SPA von Bellmann und Ford

Da es bei der Verrechnung von Kantengewichten und der im RMP ermittelten dualen Preise zu negativen reduzierten Kosten und somit zu negativen Kantengewichten im Pricing-Problem kommen kann, kann alternativ zum Dijkstra-Algorithmus der SPA von Bellmann und Ford eingesetzt werden. Solange vom Startknoten aus kein negativer Kreis erreichbar ist, kann der Bellmann-Ford-Algorithmus, im Gegensatz zu Dijkstras Vorgehensweise, auch bei negativen Kantengewichten die kürzesten Wege ermitteln. Das in Algorithmus 4.2 angegebene Verfahren behandelt einen Graphen $G(V, E)$, wobei die Knotenmenge V aus n und die Kantenmenge E aus m Elementen besteht. Nach einer Initialisierung, wie sie schon bei Algorithmus 4.1 erläutert wurde, wird die Hauptschleife (beginnend bei Zeile 5) $n - 1$ mal durchlaufen. In jeder Iteration werden sämtliche Kanten daraufhin geprüft, ob sich durch sie die Entfernungen zu ihren Zielknoten reduzieren lassen, weshalb der Algorithmus eine Laufzeit von $O(n * m)$ aufweist. Das ist dann der Fall, wenn in der vorhergehenden Iteration der jeweilige Startknoten ein niedrigeres Gewicht erhalten hat. Auf diese Weise werden in der n -ten Iteration alle kürzesten Wege der Länge n bestimmt, bis hin zur maximalen Länge $n - 1$ eines (kreisfreien) kürzesten Weges. Ob vom gewählten Startknoten aus ein negativer Kreis erreichbar war, wird durch eine zusätzliche Iteration (beginnend bei Zeile 10) festgestellt. Findet hier noch eine Reduzierung statt, hat der Algorithmus die Existenz eines negativen Kreises bewiesen.

4.3.1.3 Cutting Plane Methods

Schnittebenenverfahren (engl.: cutting plane methods) können zur Lösung von gemischt-ganzzahligen oder ganzzahligen Optimierungsproblemen herangezogen werden (vgl. im Folgenden [Grün] S. 123 f. und [Schä] S. 74-75). Dabei wird zunächst mit Hilfe der linearen Programmierung die optimale Lösung einer LP-Relaxation bestimmt. Sind darin Variablen mit fraktionalen Werten enthalten, für die Ganzzahligkeit gefordert wird, werden durch die Lösung eines Separationsproblems eine oder mehrere zusätzliche Nebenbedingungen generiert und dem Optimierungsprogramm hinzugefügt. Eine solche Ungleichung wird als zulässig bezeichnet, wenn sie den Lösungsraum derart einschränkt, dass die gefundene Optimallösung der Relaxierung unzulässig wird, gleichzeitig aber sämtliche Lösungen des (gemischt) ganzzahligen Problems zulässig bleiben. Die hinzugefügten Ungleichungen ‚beschneiden‘ den Lösungsraum, weshalb sie als Cutting Planes (dt.: Schnittebenen) oder einfach als Cuts (dt.: Schnitte) bezeichnet werden. I.d.R. können nicht alle gültigen Schnittebenen generiert werden, weshalb im Separationsproblem oftmals von den bekannten Ungleichungen die am meisten verletzte ausgewählt wird. Innerhalb einer Cutting Plane Methode wird das Problem solange im Wechsel separiert und reoptimiert, bis die gefundene Lösung auch für das (Mixed) Integer Programm gültig ist.

Die Geschwindigkeit des Verfahrens hängt davon ab, wie viele Iterationen bis zur Bestimmung des Optimums durchlaufen werden müssen, und davon, wie groß die Bereiche sind, die vom Lösungsraum abgeschnitten werden. Obwohl für viele Standardprobleme Klassen von zulässigen Ungleichungen bekannt sind, ist es oftmals besser, die speziellen Besonderheiten einer Problemstruktur auszunutzen und somit die Effektivität der Schnitte zu steigern. Für eine weiterführende Beschreibung, wie möglichst gute Schnittebenen hergeleitet werden können, sei an dieser Stelle auf Grünert und Irnich ([Grün] S. 125 ff.) verwiesen.

4.3.1.4 Branch-and-Bound

Die Grundidee des Branch-and-Bound (B&B) besteht zur einen Hälfte, dem ‚Teile und Herrsche‘-Prinzip folgend, in der hierarchisch strukturierten Zerlegung eines übergeordneten Hauptproblems in leichter zu lösende untergeordnete Teilprobleme (vgl. im Folgenden [Grün] S. 110 f.). Hierbei wird der Zulässigkeitsraum des Problems rekursiv durch zusätzliche Restriktionen in zwei oder mehr Bereiche aufgeteilt, so dass eine Baumstruktur entsteht. Beginnend mit dem Hauptproblem als Wurzel werden die Teilprobleme als Knoten dargestellt, die mittels Kanten verbunden werden, wenn ein Problem durch die Zerlegung eines übergeordneten Problems entstanden ist. Diese Form der Zerlegung wird in der Graphentheorie als Verzweigung (engl.: branching) bezeichnet. Wurden alle möglichen Verzweigungen in den Baum aufgenommen, stellen die Blätter des Baums, bzw. die Pfade bis dorthin, alle möglichen Lösungen des Hauptproblems dar, inklusive der optimalen Lösung. Da der Baum bei komplexen Problemen sehr groß werden kann, ist das Durchlaufen sämtlicher Pfade, was einer vollen Enumeration gleichkommt, in der Praxis oft nicht möglich. Deshalb besteht die andere Hälfte der B&B-Grundidee darin, den Baum erst gar nicht so groß werden zu lassen und ihn möglichst

frühzeitig in seinen Verzweigungen zu beschränken. Kann an einem Knoten anhand von Schrankenvergleichen gezeigt werden, dass sich die optimale Lösung nicht auf einem untergeordneten Pfad befinden kann, kann dieser Ast dort abgeschnitten (engl.: bounding) und somit sämtliche zugehörigen Teilprobleme ignoriert werden.

Die grundsätzlichen Bestandteile des B&B, die rekursiv aufgerufen werden, sind das Auswählen, das Abarbeiten und das Erzeugen von Teilproblemen. Mit welchem der zum jeweiligen Zeitpunkt bestehenden Teilprobleme im Baum fortgefahren werden soll, hängt von der angewandten Suchstrategie ab. Neben der Tiefensuche, welche dem LIFO-Prinzip (Last In First Out) folgt und immer den offenen Knoten auswählt, der im Baum am tiefsten liegt, gibt es die Breitensuche nach dem FIFO-Prinzip (First In First Out), bei der erst alle Teilprobleme einer Ebene nacheinander ausgewählt werden, bevor zur nächst tieferen Ebene übergegangen wird. Alternativ kann als eine dritte Strategie die Bestensuche gewählt werden. Hierbei werden die offenen Teilprobleme nach einem festzulegenden Kriterium bewertet und das mit der höchsten Wertung für den nächsten Schritt gewählt. Die Abarbeitung eines Teilproblems beinhaltet das Errechnen der optimalen Lösung einer Relaxation in diesem Knoten. Im Falle eines Minimierungsproblems kann die hierdurch bestimmte untere Schranke mit der besten bisher gefundenen zulässigen Lösung, der oberen Schranke, verglichen werden. Liegt erstere nicht unterhalb der letzteren, kann die Suche in diesem Zweig beendet werden. Dies gilt auch für den Fall, dass in dem betrachteten Knoten keine zulässige Lösung gefunden werden kann. Wird kein Bounding durchgeführt, können evtl. bereits einige Variablen fixiert und die obere Schranke aktualisiert werden. Das Erzeugen untergeordneter Teilprobleme hängt zum einen davon ab, welche Branchingregeln zur Aufteilung des Lösungsraums angewendet werden. Zum anderen ist die Auswahl der Variable entscheidend, auf die diese angewendet werden. So kann z.B. die fraktionale Entscheidungsvariable mit den höchsten reduzierten Kosten herangezogen werden und für ein Teilproblem auf die nächsthöhere und für ein weiteres Teilproblem auf die nächstniedrigere ganze Zahl gesetzt werden. In diesem Zusammenhang schlagen Ryan und Foster mit dem sog. Constraint-Branching einen speziell auf das ACPP zugeschnittenen Ansatz vor, der anstelle fraktionaler Variablen Gruppen von Flight Legs identifiziert, deren konsekutive Ausführung vorteilhaft erscheint (vgl. [Ryan]).

4.3.1.5 Branch-and-Price

Viele kombinatorische Optimierungsprobleme gestalten sich aufgrund von großen Variablenmengen schwierig (vgl. [Grün] S. 149 ff.). Der Schwierigkeitsgrad steigt zusätzlich, wenn Ganzzahligkeitsbedingungen für einige oder alle Entscheidungsvariablen aufgestellt werden. In den vorigen Abschnitten wurden mit CG und B&B zwei Verfahren vorgestellt, deren Kombination zu einem sog. Branch-and-Price-Verfahren (B&P) gleichzeitig sowohl mit vielen Variablen als auch mit Mixed Integer Programmformulierungen umgehen kann. Für die Zusammenführung beider Verfahren reicht es dabei nicht aus, das RMP einmalig mittels CG zu lösen und das Ergebnis mit Hilfe des B&B

auf ganze Zahlen zu runden, da sich die dualen Preise mit jeder zusätzlichen Restriktion verändern können. So können Spalten, die bislang unvorteilhaft erschienen, neue negative reduzierte Kosten aufweisen und im Pricing-Subproblem als Lösung gewählt werden. Wie schon beim B&B muss der gesamte Suchbaum durchlaufen werden, weshalb es nach wie vor wichtig ist, möglichst schnell gute Schranken zu erzeugen. Das B&P-Verfahren wurde von der Fluglinie Air France mindestens noch bis zum Jahr 1993 für die Personaleinsatzplanung verwendet (vgl. [Grav] S. 738).

4.3.1.6 Branch-and-Cut

Bei Branch-and-Cut (B&C) handelt es sich um spezielle B&B-Algorithmen, bei denen in jedem Knoten des Entscheidungsbaums Schnittebenenverfahren angewandt werden (vgl. [Grün] S. 139 f. und [Schä] S. 75). Jedes Mal wenn die Optimallösung einer LP-Relaxierung in einem Knoten errechnet wurde, diese jedoch unzulässig für das Originalproblem ist, wird sie mit der besten bisher gefundenen Schranke verglichen, ersetzt diese u.U. und eine weitere Verzweigung im Suchbaum wird vorgenommen. Die Suche unterhalb eines Knotens wird eingestellt, wenn in dem Knoten eine zulässige Lösung gefunden wurde, gezeigt wurde, dass das Problem unzulässig ist, oder eine bekannte obere Schranke überschritten wurde.

Damit ist die Idee des B&C genau dual zu der Idee des Column Generation bzw. des B&P. Ein großer Vorteil von B&C ist, dass mittels der Schnittebenenverfahren im B&B-Entscheidungsbaum schnell gute Schranken gefunden und somit große Bereiche nicht durchsucht werden müssen. Für eine detaillierte Beschreibung dieses Lösungsalgorithmus sei auf die Dissertation von Frau Noltemeier verwiesen, die ihn im Rahmen der Generierung von Charterflugplänen verwendet (vgl. [Nolt]).

4.3.1.7 Branch-and-Cut-and-Price

Für sehr große Probleminstanzen kann es sinnvoll sein, auf Elemente des B&P und des B&C zurückzugreifen. Werden dem Problem dynamisch sowohl Spalten als auch Ungleichungen hinzugefügt, handelt es sich um einen Branch-and-Cut-and-Price-Algorithmus (B&C&P) (vgl. [Schä] S. 75). Dabei stellen das Generieren neuer Spalten und das Hinzufügen neuer Ungleichungen komplementäre Prozeduren dar, wobei zusätzliche Spalten den Lösungsraum erweitern und zusätzliche Cuts diesen begrenzen.

4.3.2 Heuristische Verfahren

4.3.2.1 Lokale Suche

Im Rahmen der Optimierung wird bei der lokalen Suche eine zulässige Lösung durch zu definierende Überföhrungsfunktionen in eine andere Lösung mit besserem Zielfunktionswert transformiert (vgl. im Folgenden [Grün] S. 195 f.). Wird eine gewinnbringende Transformation gefunden, gilt die neue Lösung als die neue beste Lösung. Der Prozess wird iterativ solange wiederholt, bis entweder keine weitere bessere Lösung mehr gefunden wird und somit ein (lokales) Optimum erreicht ist oder ein

festgelegtes Abbruchkriterium erfüllt wurde. Bei Überföhrungsfunktionen handelt es sich um elementare Operationen, die den Nachbarschaftsraum einer L6sung definieren. Bezeichnet Ω die Menge aller L6sungen, enth6lt die Nachbarschaft $N(\omega) \subseteq \Omega$ einer L6sung $\omega \in \Omega$ alle L6sungen, in die ω mit Hilfe der 6bergangsfunktionen transformiert werden kann. Typische elementare Operationen sind das Hinzufügen, das L6schen sowie das Vertauschen von Elementen. Neben der Definition der gew6hlten Nachbarschaft h6ngt die G6te eines lokalen Suchverfahrens von dem Problem selbst sowie von der gew6hlten Initiall6sung ab.

Ein einfaches Verfahren, das die lokale Suche anwendet, ist der Hill-Climbing-Algorithmus (vgl. im Folgenden [Grot] S. 67-68). Ausgehend von einer initialen L6sung wird iterativ der Nachbarschaftsraum der aktuellen L6sung in zuf6lliger Reihenfolge nach besseren L6sungen im Sinne der Zielfunktion gesucht. Wird eine L6sung mit besserem Zielfunktionswert gefunden, wird sie als aktuell beste L6sung angenommen und der Prozess wiederholt sich. Auf diese Weise wird der L6sungsraum solange durchsucht, bis keine bessere L6sung mehr gefunden werden kann und ein (lokales) Optimum gefunden wurde. Die Tatsache, dass die Trajektorie der gefundenen L6sungen (im Falle eines Maximierungsproblems) einen monoton steigenden Zielfunktionswert aufweist, verleiht dem Verfahren seinen Namen. Abh6ngig davon, wie der Nachbarschaftsraum durchsucht wird, k6nnen zwei verschiedene Varianten des Verfahrens angewendet werden: Greedy und Steepest Descent. Bei der Greedy-Variante wird die erste L6sung mit besserem Funktionswert als aktuell beste L6sung angenommen. Beim Steepest Descent werden sich alle Nachbarn bewertet und der beste von ihnen gew6hlt. Im Vergleich zum Steepest Descent bewegt sich der Greedy-Algorithmus schneller durch den L6sungsraum, da der Nachbarschaftsraum je nach Definition sehr gro6 sein kann (vgl. [Kuc2]). Obwohl mit dem Steepest Descent gegen6ber der Greedy-Variante u.U. bessere Ergebnisse erzielt werden k6nnen, kann die L6sungsqualit6t des Hill-Climbing-Verfahrens unabh6ngig von der gew6hlten Variante beliebig schlecht sein.

Eine M6glichkeit, die lokale Suche auf das ACPP anzuwenden, wird von Emden-Weinert und Proksch beschrieben (vgl. [Emde] S. 425). Ausgehend von der Tatsache, dass Crew Pairings aus einzelnen Legs bestehen, definieren sie die Operationen Join und Split, welche die Legs zweier Pairings zu einem einzelnen Pairing hintereinanderschalten bzw. ein Pairing zwischen zwei Legs auftrennt, woraus sich zwei separate Pairings ergeben. Vorausgesetzt, dass mit diesen Funktionen nur zul6ssige Pairings erzeugt werden d6rfen (vgl. Kapitel 4.1.3), kann ausgehend von einem g6ltigen Personaleinsatzplan der L6sungsraum schrittweise nach besseren Konfigurationen durchsucht werden.

Graves et al. beschreiben eine weitere lokale Suchtechnik, die in den Programmen TPACS, TRIP und ALPPS implementiert und zumindest noch im Jahr 1993 von einer Reihe gro6er Fluggesellschaften³⁷ zur Personaleinsatzplanung verwendet wurde (vgl. [Grav] S. 736-738). Ausgehend von einem initialen

³⁷ Continental Airlines, US Airways, United Airlines (heute zugeh6rig zu Continental Airlines), American Airlines (heute zugeh6rig zu US Airways), Northwest Airlines

zulässigen Crew Pairing werden im Rahmen der 2-OPT-Optimierungsstrategie alle bis auf zwei zufällig ausgewählte disjunkte Pairings temporär fixiert, wobei disjunkt bedeutet, dass ein Pairing kein Leg des anderen enthält. Aus den Legs beider Pairings werden nun alle möglichen zulässigen Pairingkonfigurationen erzeugt. Analog zum Steepest Descent wird nun nach der Konfiguration mit den geringsten Kosten gesucht. Ist diese günstiger als die ursprünglichen beiden Pairings, wird sie in die aktuelle Lösung eingebaut und zwei neue Pairings können gewählt werden. Der von der 2-OPT-Strategie betrachtete Nachbarschaftsraum kann im Rahmen der 3-OPT-Strategie durch das Hinzunehmen eines dritten disjunkten Pairings vergrößert werden. Die zusätzlichen Kombinationsmöglichkeiten ermöglichen größere Verbesserungen im Sinne der Zielfunktion, führen jedoch auch zu wesentlich höheren Laufzeiten.

4.3.2.2 Simulated Annealing

Seit den 1980er Jahren wird das Simulated Annealing Verfahren (SA), welches auf Metropolis et al. zurückgeht (vgl. [Metr]), mit Erfolg auf komplexe kombinatorische Optimierungsprobleme angewendet, insbesondere dann, wenn keine problemspezifischen Lösungsalgorithmen bekannt sind (vgl. im Folgenden [Dreo] S. 23 ff. und [Grün] S. 211 ff.). Beim Simulated Annealing (dt.: Simuliertes Ausglühen) handelt es sich um eine Meta-Heuristik, die eine untergeordnete lokale Suchheuristik bei ihrer Erkundung des Lösungsraums beeinflusst, um effizient qualitativ hochwertige Lösungen zu erzeugen. Dabei können lokale Optima überwunden werden, indem auf kontrollierte Art und Weise auch Verschlechterungen des Zielfunktionswertes zugelassen werden.

Das Verfahren orientiert sich an dem physikalischen Prozess des Ausglühens von Metallen, die dabei von einer geschmolzenen in eine feste kristalline Form übergehen. Hierbei ist es das Ziel, möglichst gleichmäßige Strukturen zu erzeugen, welches nur bei langsamem Abkühlen erreicht wird, wenn die Atome ausreichend Zeit haben, sich zu ordnen, und stabile Kristalle zu bilden. Im Gegensatz zum schnellen Abkühlen, bei dem sich strukturelle Unregelmäßigkeiten ergeben, kann so auf jedem der sinkenden Temperaturniveaus ein thermodynamisches Gleichgewicht erzielt und bei der Erhaltung eine Kristallstruktur mit nahezu minimaler Energie erreicht werden. Im Verfahren des Simulated Annealings werden analog hierzu die Zustände des abkühlenden Systems mit den zulässigen Lösungen eines Optimierungsproblems und das absinkende Energieniveau mit einem sich verringernden Zielfunktionswert (im Minimierungsfall) gleichgesetzt. Die fallende Temperatur des Metalls entspricht im Optimierungsverfahren der abnehmenden Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zwischenlösung mit schlechterem Zielfunktionswert angenommen wird. Je geringer die Temperatur und je größer die Verschlechterung ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass die Nachbarlösung als nächste Lösung in der Trajektorie akzeptiert wird. Wird die folgende Formel eines Minimierungsproblems erfüllt, wird die Nachbarlösung akzeptiert:

$$\text{Kosten}(\text{aktuelle Lösung}) > \text{Kosten}(\text{Nachbarlösung}) \vee$$

$$e^{\frac{\text{Kosten(aktuelle Lösung)} - \text{Kosten(Nachbarlösung)}}{\text{aktuelle Temperatur}}} > \text{Zufallszahl} \in [0,1]$$

Für das Verfahren, welches in Algorithmus 4.3 in Pseudocode angegeben ist, wird zunächst im Rahmen der Initialisierung die Starttemperatur T_0 , die Anzahl n_0 an Übergängen auf diesem Temperaturniveau sowie die Ausgangslösung Ω_{akt} gewählt (Zeile 1). In der Abkühlungsschleife (beginnend bei Zeile 3) wird die Temperatur sowie die Verweildauer für die nächste Temperaturebene festgelegt (Zeilen 9 und 10). Sie wird solange durchlaufen, bis das definierte Abbruchkriterium erfüllt ist. In der inneren Schleife (beginnend bei Zeile 4) findet bei konstanter Temperatur die lokale Suche mit modifiziertem Akzeptanzkriterium statt (Zeile 7). Da das Verfahren nach dem Auffinden der besten Lösung mit der Durchsuchung des Lösungsraums fortfährt und zum Programmende hin ansonsten nur die letzte Lösung zur Verfügung steht, kann es durch einen Speicher für die beste gefundene Lösung ergänzt werden. Algorithmus 4.3 beschreibt die homogene Variante des Verfahrens, welches durch die äußere Abkühlungsschleife und die innere Suchschleife gekennzeichnet wird. Die inhomogene Variante enthält nur eine Schleife, in der sowohl die (in diesem Fall sehr geringe) Temperaturabsenkung als auch der Nachbarschaftsübergang vorgenommen wird.

```

01:   Initialisiere  $T_0$ ,  $n_0$  und  $\Omega_{akt}$ 
02:    $t := 0$ 
03:   Wiederhole, solange Abbruchkriterium nicht erfüllt ist:
04:       Wiederhole  $n_t$  mal:
05:           Bestimme zufällig eine Nachbarlösung  $\Omega_{nb} \in N(\Omega_{akt})$ 
06:           Berechne die Zielfunktionsdifferenz  $\Delta_{cost} = cost(\Omega_{nb}) - cost(\Omega_{akt})$ 
07:           Falls  $\Delta_{cost} < 0$  oder Zufallszahl  $z \in [0,1] < e^{-\Delta_{cost}/T_t}$ :
08:                $\Omega_{akt} := \Omega_{nb}$ 
09:            $T_{t+1} = f(t, T_t)$ 
10:            $n_{t+1} = f(t, n_t)$ 
11:        $t := t + 1$ 

```

Algorithmus 4.3: Simulated Annealing³⁸

Die größten Vorteile des SA sind, dass es sich um eine allgemein anwendbare Methodik handelt, die leicht zu implementieren ist und die i.d.R. gute Ergebnisse liefert. Ein Nachteil liegt darin, dass für einen effektiven Optimierungsverlauf eine sehr aufwendige Kalibrierung der Steuerungsparameter vorgenommen werden muss. Die Parametrisierung umfasst das Festlegen einer Starttemperatur T_0 , einer Abkühlungsfunktion $f(t, T_t)$, einer Funktion $f(t, n_t)$ zur Bestimmung der Verweildauer auf den Temperaturebenen und eines Abbruchkriteriums. Die drei erstgenannten Parameter definieren die Abkühlstrategie (engl.: cooling schedule). Bei der Wahl der Starttemperatur muss ein adäquates Mittel zwischen schlechten Lösungsqualitäten bei geringen und langen Laufzeiten bei hohen Starttemperaturen gefunden werden. Um jedoch eine gewisse Unabhängigkeit von der Startlösung zu erlangen, sollte die Starttemperatur so hoch gewählt werden, dass zunächst noch nahezu alle

³⁸ In Anlehnung an [Grün] S. 214

Änderungen akzeptiert werden. Für die Reduzierung der Temperatur kann z.B. eine geometrische Abkühlung der Form $T_{t+1} = \alpha * T_t$ gewählt werden, wobei α als Konstante gewählt werden kann. Als Abbruchkriterium kann das Erreichen einer minimalen Temperatur oder einer maximalen Laufzeit gelten oder wenn innerhalb einer gewissen Zeit keine Verbesserung mehr erzielt wurde. Für eine umfassendere Betrachtung möglicher Parametrisierungen sei an dieser Stelle auf Dréo et al. ([Dreo]) verwiesen. Eine konkrete Anwendung des Verfahrens auf das ACPP wird von Emde et al. ([Emde]) vorgenommen.

4.3.2.3 Konstruktionsheuristiken

Die meisten lokalen Suchalgorithmen benötigen eine Initiallösung, von der aus sie die Durchsuchung des Lösungsraums beginnen können. Von dieser hängen oftmals sowohl die Qualität des Optimierungsergebnisses als auch die Laufzeit der Prozedur ab. So kann bspw. nach der Erzeugung einer gut strukturierten Startlösung eine anschließend durchgeführte SA-Prozedur sofort mit einer niedrigeren Anfangstemperatur begonnen und somit deren Gesamtlaufzeit reduziert werden. Um eine initial zulässige Startlösung zu ermitteln, können heuristische Konstruktionsverfahren, auch Eröffnungsverfahren genannt, verwendet werden. Diese beginnen zumeist mit einer Teillösung des Problems und erweitern diese sukzessive, z.B. anhand von Prioritätswerten, um einzelne Elemente, bis sich eine Gesamtlösung ergibt (vgl. [Scho] S. 68). Im Folgenden werden einige Konstruktionsverfahren vorgestellt, mit denen sich Startlösungen spezifisch für das ACPP erzeugen lassen (vgl. im Folgenden [Emde] S. 420 f.).

Die einfachste Möglichkeit, eine zulässige Lösung zu erzeugen, ist es, jedem einzelnen Flight Leg eines Flugplans sein eigenes Pairing zuzuweisen. Auch wenn es sich um die teuerste und ineffizienteste mögliche Lösung handelt, da zumeist Strafkosten dafür erhoben werden, dass es sich bei den Pairings nicht um Rundtouren handelt und diese auch nicht an Crewbases beginnen und/oder enden, ist sie im Prinzip schon bei der Initialisierung des Flugplans vorhanden. Diese Form der Lösung wird als ‚Trivial Solution‘ und von Emden-Weinert und Proksch auch als ‚Singleton‘ bezeichnet.

Ein anderes Konstruktionsverfahren, der sog. Linear Chainer, basiert auf einer Run-Cutting-Formulierung des ACPP, bei der nach und nach Flight Legs, welche noch nicht Teil der Lösung sind, anhand eines Prioritätskriteriums ausgewählt und der Lösung hinzugefügt werden. Der Linear Chainer erzeugt Pairings maximaler Länge, indem er ausgehend von einem Leg solange iterativ z.B. das jeweils frühestmögliche nachfolgende Leg anhängt, bis sich keine mögliche Verlängerung mehr finden lässt. Die auf diese Weise zeitlich und räumlich verketteten Legs werden aus der Gesamtmenge der abzudeckenden Pairings entfernt, woraufhin das nächste Pairing zusammengestellt wird. Das Verfahren endet, wenn alle Legs zu Pairings kombiniert wurden. Zumeist ähneln die so erstellten Pairings den geplanten Flugzeugrotationen. Eine andere Variante des Linear Chainers, welche nicht die Pairings, sondern die Legs nacheinander abarbeitet, konstruiert Pairings simultan, indem einzelne

Legs iterativ dem Pairing hinzugefügt werden, bei dem die geringsten Sit Times anfallen würden. Kann ein Leg keinem Pairing hinzugefügt werden, wird es zur Eröffnung eines neuen Pairings genutzt.

Der Linear Chainer kann neben der Erzeugung ganzer Personaleinsatzpläne auch für das Generieren einzelner Pairings herangezogen werden, was ihn für die lokale Suche zu einem nützlichen Werkzeug macht (vgl. im Folgenden [Grav] S. 738-739). So können Pairings, welche z.B. innerhalb eines gewissen Zeitraums von einer speziellen Crewbase ausgehen, erzeugt werden. Das Anhängen zeitlich nachgelagerter Flight Legs an ein bestehendes Pairing wird Forward Enumeration genannt. Mit der Festlegung eines Zielflughafens und dem sukzessiven Vorschalten von Legs, lässt sich das Prinzip im Rahmen der Backward Enumeration auch umkehren. Bei der Interior Enumeration wird ein Leg als Startpunkt gegeben, welches weder bei einer Crewbase startet noch endet. Mittels der beiden zuvor genannten Enumerationsmethoden kann es in eine Reihe möglicher Rundtouren eingebettet werden.

4.4 Einsatzplanung in anderen Bereichen

Das CSP findet nicht nur bei der Personaleinsatzplanung im Bereich von Fluglinien, sondern noch in einer Reihe weiterer Branchen Verwendung. Um einen Eindruck zu vermitteln, inwiefern sich die branchenspezifischen Regularien, Rahmenbedingungen und Vorgehensweisen innerhalb der Modellformulierung ähneln oder unterscheiden und wo die jeweiligen Schwerpunkte liegen können, wird in diesem Abschnitt grob in die Personalplanung von Bahnunternehmen und in die des ÖPNVs eingeführt.

Der allgemeine Prozess der Produktionsplanung, den Bahnunternehmen in regelmäßigen Abständen durchlaufen, ist dem von Fluglinien, auf den in Abschnitt 2.3.2 näher eingegangen wurde, formal sehr ähnlich. Nachdem die einzelnen Zugrouten eines Fahrplans festgelegt und diesen konkrete Züge zugewiesen wurden, wird das Railway Crew Scheduling Problem (RCSP) mit dem Crew Pairing und dem Crew Assignment ebenfalls in zwei aufeinander folgenden Planungsschritten durchgeführt (vgl. im Folgenden [Capr] und [Schä] S. 15 f.). Unter Berücksichtigung technischer und personeller Kapazitäten und der gesetzlich und tariflich festgelegten Arbeitszeit- und Pausenregelungen werden im RCSP zulässige Einsatzpläne berechnet, die alle Fahrten eines Fahrplans abdecken. Neben dem klassischen Ziel der Kostenminimierung können während des Optimierungsprozesses weitere Zielsetzungen, wie z.B. die Kundenzufriedenheit, angestrebt werden. Jütte et al. betrachten aus der Sicht des Personals die Popularität und die Fairness von Einsatzplänen (vgl. [Jüt2]). Dabei ist die Popularität eines Plans gering, wenn er viele Duties enthält, die sehr lang oder gestückelt sind oder die zu ungünstigen Tageszeiten durchzuführen sind. Gleichzeitig wird ein Plan jedoch als fair empfunden, wenn die unpopulären Duties gleichmäßig auf die verschiedenen Personalstandorte verteilt werden.

Obwohl das RCSP im Wesentlichen die gleichen Elemente beinhaltet wie das Einsatzplanungsproblem von Fluglinien, werden diese in der Literatur zumeist anders benannt (vgl. [Gaff]). Die Bahnhöfe eines Bahnnetzes sind durch Gleisabschnitte miteinander verbunden. Eine

Zugfahrt auf einem solchen Abschnitt wird als ‚Trip‘ bezeichnet. Die Hintereinanderschaltung von Trips, die den Umlauf eines Zuges ausmachen, wird ‚Block‘ genannt. Die Bahnhöfe, an denen das Personal eines Zuges während eines Blocks ausgetauscht werden kann, werden als ‚Relief Points‘ bezeichnet. Ein sog. ‚Piece of Work‘ ist die Kombination von Trips zwischen zwei Relief Points, die einem Mitarbeiter zugewiesen wird. Der einen Tag umfassende Umlauf eines Mitarbeiters, der mehrere Pieces of Work beinhalten kann, wird ‚Run‘ genannt. Ein Bahnhof, der als Heimatort von Zügen und Personal fungiert, gilt als ‚Depot‘. In Bezug auf das Personal wird hier nicht immer der eindeutigere Begriff ‚Crew Base‘ verwendet. Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, wie ein Regelsatz des RCSP aussehen könnte (vgl. [Jütt] S. 113 und [Schä]):

- Arbeitszeiten
 - Die maximale Arbeitszeit beträgt 10 Stunden.
 - Die minimale bezahlte Arbeitszeit liegt bei fünf Stunden, auch wenn die tatsächliche Arbeitszeit kürzer ist.
 - Die maximale Länge einer Duty, incl. Pausen- und Transferzeiten, beträgt 14 Stunden.
- Pausenzeiten
 - Arbeitszeiten von bis zu sechs Stunden setzen keine Pausen voraus.
 - Arbeitszeiten zwischen sechs und neun Stunden müssen eine Pause von 30 Minuten enthalten.
 - Arbeitszeiten von mehr als neun Stunden müssen eine Pause von 45 Minuten enthalten.
 - Duties mit einer Länge von mehr als 12 Stunden müssen eine zusammenhängende Pause von zwei Stunden enthalten.
 - Die minimale Pausenzeit beträgt 15 Minuten.
 - Die erste Pause muss innerhalb von sechs Stunden nach Start der Duty beginnen.
 - Pausen dürfen nicht zu Beginn oder zum Ende einer Duty erfolgen.
 - Pausen sind nur an Bahnhöfen mit geeigneten Einrichtungen erlaubt.
- Fahrtzeiten
 - Die maximale Fahrtzeit während des Tages beträgt neun Stunden.
 - Die maximale Fahrtzeit während der Nacht beträgt acht Stunden; dabei müssen drei Arbeitsstunden der Duty zwischen 23 Uhr und 6 Uhr liegen.
 - Die maximale ununterbrochene Fahrtzeit beträgt fünf Stunden und 30 Minuten; dabei gilt eine Fahrtzeit als ununterbrochen, wenn innerhalb dieser Zeit insgesamt nicht mehr als 10 Minuten mit anderweitigen Tätigkeiten verbracht werden.
- Verbindungszeiten
 - Die Verbindungszeit zweier Trips, die mit demselben Zug durchgeführt werden, darf nicht länger als 15 Minuten sein.

- Die Verbindungszeit zweier Trips, die nicht mit demselben Zug durchgeführt werden, muss zwischen 15 Minuten und vier Stunden betragen.
- Die Verbindungszeit zweier Trips, zwischen denen ein Layover eingeplant ist, muss mindestens sechs und darf höchstens 12 Stunden betragen.

Das im RCSP einzuplanende Bahnpersonal setzt sich aus Lokführern, Zugbegleitern und Stewards zusammen (vgl. im Folgenden [Malc] S. 148 f. und [Kwan]). Die Hauptaufgabe der Lokführer ist das Fahren der Züge. Daneben sind sie vor und nach den Fahrten mit technischen Aufgaben betraut, wie z.B. das Verkuppeln oder das Rangieren von Loks und Waggons oder das Durchführen von Bremstests (vgl. [Jütt] S. 111). Dabei kann ein Lokführer nicht für alle Züge und alle Strecken eingeplant werden. Um einen gewissen Typ von Triebfahrzeug bedienen zu dürfen, muss er in dessen Handhabung geschult sein. Auch muss er für eine bestimmte Strecke über Routenwissen verfügen und geübt sein, um diese bedienen zu dürfen. Die Konsequenzen aus diesen Vorgaben sind regelmäßige Trainings zum Erhalt des Wissens und die Begrenzung der potentiellen Einsatzgebiete in Abhängigkeit vom jeweiligen ‚Home Depot‘. Die Aufgabe der Zugbegleiter liegt in der Kontrolle und dem Verkauf von Fahrscheinen sowie dem Erteilen von Auskünften. Stewards sind in Bistro- oder Restaurantabteilen für den Verkauf von Erfrischungen und Snacks und für das Zubereiten und Servieren von Gerichten zuständig. Zugbegleiter und Stewards werden in Form von kleinen Serviceteams, die genaue Teamstärke richtet sich nach den Passagierzahlen und den anzubietenden Services, gemeinsam eingeplant und einem Home Depot zugeordnet. Die Einplanung der Lokführer wird üblicherweise separat vorgenommen.

Die Personaleinsatzplanung im Bereich des ÖPNVs, welche i.d.R. unter der Kontrolle städtischer Behörden durchgeführt wird, ist formal identisch zu den bisher beschriebenen Planungsprogrammen, weist jedoch inhaltliche Unterschiede bei den Rahmenbedingungen und der allgemeinen Vorgehensweise auf (vgl. im Folgenden [Wren]). So sind zum einen nur die Fahrer von Bussen und Bahnen einzuplanen, da kein weiteres Servicepersonal berücksichtigt werden muss. Zum anderen ist es in dieser Branche üblich, dass die Fahrer während der Pausen in ihren Fahrzeugen bleiben. Letzteres hat zur Folge, dass Personal- und Fahrzeugumlaufpläne zumeist integriert berechnet werden. Bei der Erreichung des Ziels, allen Trips Fahrer zuzuweisen, müssen die üblichen gesetzlichen, tariflichen und ablaufbedingten Nebenbedingungen eingehalten werden. Die Planstrukturen richten sich dabei nach der Art des betrachteten Verkehrssystems. Grundsätzlich lassen sich drei nicht klar voneinander abzugrenzende Arten öffentlicher Nahverkehrssysteme unterscheiden: urbaner, sub-urbaner und extra-urbaner ÖPNV. Diese Klassifizierung richtet sich nach der Größe und dem Einsatzgebiet des Transportangebots. Während ein urbanes System nur den Verkehr innerhalb einer Stadtgrenze abbildet, werden im sub-urbanen Fall auch Verbindungen zu Vororten berücksichtigt. Erst die Verbindung zu weiter außerhalb liegenden Ballungsräumen werden als extra-urbaner Verkehr angesehen. Diese Klassifizierung ist insofern von Bedeutung, als dass sich wesentliche

Rahmenbedingungen der Einsatzplanung von ihr ableiten lassen. So kann z.B. ein Fahrer in einem urbanen System aufgrund der Vielzahl an Transportmöglichkeiten und der geringen Distanzen seinen Umlauf praktisch überall starten und beenden. In einem extra-urbanen System ist ein Fahrer an sein Fahrzeug gebunden, um einen Relief Point zu erreichen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die Einsatzplanungsprobleme der Luft- und der Bahnverkehrsbranche sowie des ÖPNVs aus konzeptioneller Sicht sehr ähneln. Sie alle werden oftmals als SPP oder als SCP modelliert und mit Hilfe der gleichen Berechnungsmethoden gelöst (vgl. im Folgenden [Schä] S. 26 f.). Auch die aus der Größe des betrachteten Verkehrssystems resultierende Komplexität des Planungsproblems und die Anzahl der einzuhaltenden Regularien lassen sich durchaus vergleichen. In diesem Zusammenhang kann den in Tabelle 3.1 aufgelisteten Flugplänen z.B. das von der italienischen Bahngesellschaft FS (Ferrovie dello Stato Italiane) betreute Bahnnetz gegenübergestellt werden. Dieses Netzwerk umfasst 16.000 Schienenkilometer, auf denen täglich ca. 8.000 Zugfahrten angeboten werden, von denen 800 Fahrten dem Mittel- bis Langstreckenverkehr und 1.500 Fahrten dem Frachtverkehr zugeordnet werden können (vgl. [Capr]). Die restlichen Fahrten entfallen auf verschiedene lokale und regionale Stadtverbindungen. Zur Umsetzung ihrer Fahrpläne kann die FS auf 40.000 Mitarbeiter zurückgreifen, von denen 25.000 als Lokführer und 15.000 als Zugbegleiter arbeiten und die in über 50 Home Depots stationiert sind. Im Vergleich dazu fallen Busnetze kleiner aus. Dass die Erstellung von Personalplänen dennoch auch hier ein kompliziertes Unterfangen darstellt, soll am Beispiel der Stadt Sao Paulo verdeutlicht werden, wo bis zu 12.000 Busse zum Einsatz kommen (vgl. [Wren]). Da das kombinatorische Potential des CSP stark von der Anzahl der einzuplanenden Legs und der Anzahl der möglichen Verknüpfungspunkte abhängt, scheint das RCSP am schwierigsten zu lösen. Die durchschnittliche Länge eines Bahn-Legs im Verkehrsnetz der Deutschen Bahn beträgt ca. 30 Minuten, wohingegen die Flüge in einem Short-Haul-Flugnetz zumeist über eine Stunde dauern. Zu der Tatsache, dass Flugnetze zumeist eine oder zwei Crew Bases, Bahnnetze jedoch mehrere Dutzend Crew Bases beinhalten, kommt hinzu, dass Pairings von Bahnpersonal normalerweise nicht länger dauern als ein bis zwei Tage. Pairings von bis zu fünf Tagen sind bei Langstrecken-Flugnetzen hingegen keine Seltenheit. Ein weiterer Unterschied der Planungsprobleme liegt in der Diversität einzuhaltender Regelungen und vorhandener Infrastrukturen. Während der Zugverkehr zum Großteil nationaler Gesetzgebung und eher lokalen Einflüssen unterliegt, ist der Flugverkehr auf internationaler Ebene standardisiert.

5 Job Pairing – Ein aufgabengenaue(r) Planungsansatz

Das Personal einer Fluglinie stellt eine ihrer wichtigsten Ressourcen dar. Über dessen Bedeutung für das operative Tagesgeschäft hinaus ist es für die mittel- und langfristige strategische Planung von hoher Relevanz (vgl. [Köni] S. 368). In Zeiten, da sich die Angebote der Fluglinien aus Kundensicht kaum noch unterscheiden, stellen eine hohe Servicequalität und zusätzliche Leistungsangebote eine Möglichkeit zur Differenzierung dar. Ein verstärkt wahrgenommener Nutzen kann zu einer erhöhten Kundenbindung und somit zu nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen führen. Um vor diesem Hintergrund das Potential des Flugpersonals bestmöglich nutzbar zu machen, müssen dessen Fähigkeiten und Qualifikationen in der Personaleinsatzplanung besondere Berücksichtigung finden.

Allerdings ist es in den gängigen Planungsmodellen üblich, während der anonymen Personaleinsatzplanung nicht einzelne Mitarbeiter sondern ganze Crewkomplemente zu betrachten, wobei von den individuellen Fähigkeiten einzelner Mitarbeiter sowie von unterschiedlichen gesetzlichen und tariflichen Regelungen abstrahiert wird. Weiterhin wird in der Modellierung angenommen, dass alle Legs eines Flugplans hinsichtlich ihrer Personal- und Qualifikationsanforderungen gleich sind. Durch diese Verallgemeinerungen verringert sich die Anzahl der im Crew Pairing zu berücksichtigenden Elemente erheblich, was die Berechnung des kombinatorischen Optimierungsproblems erleichtert. Gleichzeitig werden so jedoch Aufgaben zu Einsatzplänen kombiniert, ohne darauf zu achten, ob sich deren Qualifikationsanforderungen in der anschließenden Rosteringphase erfüllen lassen.

Um diesem Sachverhalt zumindest teilweise entgegenzuwirken, wird das Planungsproblem zumeist in Teilprobleme zerlegt und getrennt voneinander gelöst. Durch die separate Behandlung von Cockpit- und Kabinencrews lassen sich die unterschiedlichen Arbeitszeitregelungen im ACPP abbilden. Um zu vermeiden, dass die Type Rating-Restriktion, denen die Piloten unterliegen, verletzt wird, wird das ACPP für diese nochmals unterteilt und für jeden Flugzeugtyp gesondert berechnet. Abgesehen davon, dass sich die Aufteilung nach Flugzeugtypen nicht auf Kabinencrews anwenden lässt, führt die Zerlegung dazu, dass immer nur eine Teilmenge der Legs berücksichtigt wird, was zum einen die Deadhead-Möglichkeiten reduziert und zum anderen die Berücksichtigung übergreifender Aspekte wie z.B. Robustheit oder Regelmäßigkeit erschwert.

In diesem Kapitel wird mit dem sog. ‚Job Pairing‘ ein neuer Planungsansatz zur anonymen Aufgabenplanung vorgestellt, der die individuellen Fähigkeiten und Qualifikationen des Flugpersonals explizit berücksichtigt und sie unterschiedlichen Anforderungsprofilen der Flight Legs gegenüberstellt.

In den beiden Abschnitten 5.1 und 5.2 wird, in Analogie zu den ersten beiden Abschnitten des vorigen Kapitels, in die mathematische Formulierung des JPP sowie in das robuste Job Pairing eingeführt. Daraufhin werden in Abschnitt 5.3 zwei Heuristiken vorgestellt, die speziell für die Optimierung des JPP entwickelt wurden. Beide Verfahren werden validiert und miteinander verglichen.

5.1 Das Airline Job Pairing Problem

Das Airline Job Pairing Problem (AJPP) baut auf dem ACPP auf, grenzt sich jedoch dadurch von ihm ab, dass einerseits nicht ganze Crews sondern einzelne Mitglieder des Flugpersonals und andererseits nicht ganze Flight Legs sondern einzelne Aufgaben (engl.: jobs) behandelt werden (vgl. im Folgenden [Kuck]). Dabei wird zwischen essentiellen und unterstützenden Aufgaben unterschieden, die als ‚Primary Jobs‘ bzw. als ‚Auxiliary Jobs‘ bezeichnet werden. Zu ersterer Gruppe gehören die funktionalen Positionen, die an Bord eines Flugzeugs besetzt werden müssen, damit ein Flug sicher und fachgerecht durchgeführt werden kann, z.B. CPT, FO, P1, FA usw. Die genaue Anzahl an primären Jobs, die für die Durchführung eines Fluges erforderlich ist, hängt u.a. vom Flugzeugtyp, der Flugstrecke und von gesetzlichen Bestimmungen ab. Zu letzterer Gruppe gehören Aufgaben, die weniger auf die eigentliche Flugdurchführung als vielmehr auf das Serviceangebot an Bord abzielen. Zu ihnen gehören spezielle Leistungen wie die intensive Betreuung von Fluggästen erster Klasse oder die Beratung durch Sommeliers, darüber hinaus aber auch, dass Teile des Flugpersonals mit der Sprache oder den kulturellen Gepflogenheiten ihrer Passagiere vertraut sind. Das AJPP bildet die Jobs als elementare Aufgaben ab, die nicht weiter zu unterteilen sind. Das bedeutet, dass ein Job genau von einer Person auf genau einem Leg durchgeführt wird. Die Tatsache, dass ein Leg mehrere Jobs eines Typs benötigen und dass ein Mitarbeiter auf einem Leg mehrere Jobs parallel ausführen kann, bleiben davon unberührt. Dabei wird für die Jobs selbst i.d.R. mehr Arbeitszeit angesetzt, als die Legs selbst verursachen. Es sind mit der ‚Ground Time Before‘ (GTB) und der ‚Ground Time After‘ (GTA) Vor- und Nachbearbeitungszeiten zu berücksichtigen, in denen das Flugpersonal Aufgaben ausführen kann, die im Rahmen der in Absatz 2.2 beschriebenen Bodenprozesse anfallen.

Im AJPP werden die Jobs, die ein Mitarbeiter auf einem Flug auszuführen hat, in einem sog. Jobpaket zusammengefasst. Dabei gilt es zu beachten, dass in jedes Jobpaket nur ein Primary Job aufgenommen werden darf. Es ist z.B. einem Mitarbeiter nicht erlaubt, die Positionen zweier Flugbegleiter zu besetzen. Ein Jobpaket darf jedoch eine beliebige Anzahl an Auxiliary Jobs beinhalten, solange sich diese unterscheiden. Demnach ist z.B. das Zusammenfassen zweier FC Positionen nicht gestattet, die Kombination von FA und FC hingegen möglich. So wie im ACPP Flight Legs zu Duties und Pairings zusammengestellt werden, geschieht es im AJPP mit Jobpaketen. Jobpakete, Duties und Pairings dürfen jedoch jeweils nur Jobs eines Crewtyps enthalten. Das Kombinieren von Cockpit- und Kabinenpositionen ist nicht erlaubt. Da es sich bei sämtlichen zusätzlichen Serviceaufgaben um Kabinenjobs handelt, können sie nie mit Cockpitjobs kombiniert werden, so dass alle Jobpakete des Cockpitpersonals aus nur einem einzigen primären Cockpitjob bestehen.

Qualifikation (Abkürzung)	Crewtyp	Qualifikationstyp	Rang
Captain (CPT)	Cockpit	Primary	4
Senior First Officer (SFO)	Cockpit	Primary	3
First Officer (FO)	Cockpit	Primary	2
Second Officer (SO)	Cockpit	Primary	1
Purser 2 (P2)	Cabin	Primary	3
Purser 1 (P1)	Cabin	Primary	2
Flight Attendant (FA)	Cabin	Primary	1
Arabic (ARA)	Cabin	Auxiliary	0
Sommelier (SOM)	Cabin	Auxiliary	0
First Class (FC)	Cabin	Auxiliary	0

Tabelle 5.1: Beispielhafte Zusammenstellung von Qualifikationen und ihrer Eigenschaften

Da es sich bei den Aufgaben um elementare Aufgaben handelt, erfordert jeder Job genau eine Qualifikation. Ein P1-Job kann also nur von einem Mitarbeiter einer Kabinencrew ausgeführt werden, der zum Purser der Stufe 1 ausgebildet wurde und somit über die P1-Qualifikation verfügt. Insgesamt wird, diesem Beispiel folgend, jedem Jobtyp eine Qualifikation gegenübergestellt. Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft die Qualifikationen bzw. Jobtypen, wie sie von einer Fluglinie verwendet werden könnten. Es fällt auf, dass Type Ratings nicht Teil der Qualifikationsmenge sind. Sie werden im AJPP gesondert behandelt und stellen eigene Anforderungen an die Personalzuweisung. In diesem Zusammenhang wird lediglich angenommen, dass z.B. ein Mitarbeiter, der zum P1 ausgebildet wurde, auf allen Flugzeugen, für die er ein Type Rating hat, als P1 eingesetzt werden kann.

Üblicherweise werden die Aufgaben an Bord von Flugzeugen entsprechend ihres Rangs innerhalb der hierarchischen Ordnung ausgeführt, welche in Abschnitt 2.1 genauer beschrieben wurde (vgl. im Folgenden [Köni] S. 366 f.).³⁹ Für das Erstellen von Einsatzplänen, die jeweils nur Aufgaben eines bestimmten Rangs beinhalten, beschreibt Ryan die Möglichkeit, das Planungsproblem für alle Gruppen von Mitarbeitern desselben Rangs separat zu lösen (vgl. [Rya2] S. 460). Das unabhängige Lösen von Teilproblemen führt wiederum dazu, wie schon zuvor beschrieben, dass nicht immer Lösungen für reale Probleminstanzen gefunden werden können. Neben der strikten Trennung der Ränge gibt es jedoch auch die Möglichkeit, Mitarbeitern vorübergehend Tätigkeiten zuzuweisen, deren Rang unterhalb ihres eigenen liegt. Diese Maßnahme, das sog. Downgrading, führt verglichen mit einer konventionellen Crewzuweisung i.d.R. zu einer höheren Servicequalität innerhalb der Kabine. Darüber hinaus erhöht die Möglichkeit des Downgradings die Wahrscheinlichkeit, während der Personaleinsatzplanung eine zulässige Lösung zu finden.

Dadurch, dass das AJPP die Aufgaben des Flugpersonals als elementare Jobs beschreibt, mit denen sich u.a. auch individuelle Deadheads problemlos abbilden lassen, kann in der anonymen Personaleinsatzplanung eine sehr hohe Flexibilität erreicht werden. Gleichzeitig wird sofort

³⁹ Auxiliary Jobs haben einen ergänzenden Charakter und sind nicht Teil dieser Hierarchie, weshalb ihnen der Rang 0 zugeordnet wird.

ersichtlich, welche Qualifikationsanforderungen die erzeugten Jobpairings an die Ressource ‚Flugpersonal‘ stellen. Ein weiterer Vorteil ist, dass Airport-Standby-Aufgaben bereits während der Optimierung in die Pairings mit aufgenommen werden können, so dass dieser Planungsschritt nicht mehr separat durchgeführt werden muss.

5.1.1 Definitionen der Elemente und Eigenschaften

In Anlehnung an Abschnitt 4.1.3 werden im Folgenden die für das AJPP benötigten Konstanten, Mengen sowie die Eigenschaften ihrer Elemente definiert. Dabei stellen die aufgeführten konstanten Planungsparameter, die Flugzeugflotte mit entsprechenden Type Ratings und die im Flugplan enthaltenen Flughäfen und Flight Legs und insbesondere die Job- und die Qualifikationsmengen die Inputdaten einer Problem Instanz dar. Die Kombinationen der Jobs zu Jobpaketen und weiterhin zu Duties, Pairings und ganzen Einsatzplänen bilden die Outputdaten.

Konstanten

$briefingTime$:= Dauer des Briefings zu Beginn einer Duty

$debriefingTime$:= Dauer des Debriefings zum Ende einer Duty

mct_{reg} := MCT zwischen zwei Jobpaketen ohne Umsteigevorgang innerhalb einer Duty

mct_{rot} := MCT zwischen zwei Jobpaketen mit Umsteigevorgang innerhalb einer Duty

$sitTime_{min}$:= Minimal gewünschte Pufferzeit zwischen zwei Jobpaketen innerhalb einer Duty

$sitTime_{max}$:= Maximale Sit Time zwischen zwei Jobpaketen innerhalb einer Duty

$restPeriod_{min}$:= Minimale Ruhezeit zwischen zwei Duties innerhalb eines Pairings

$restPeriod_{max}$:= Maximale Ruhezeit zwischen zwei Duties innerhalb eines Pairings

fdp_{max} := Maximale FDP einer Duty

$tafb_{max}$:= Maximale TAFB eines Pairings

$dutyJobpackages_{max}$:= Maximale Anzahl an Jobpaketen innerhalb einer Duty

$pairingDuties_{max}$:= Maximale Anzahl an Duties innerhalb eines Pairings

$typeRating_{max}$:= Maximale Anzahl an Type Ratings innerhalb einer Duty oder eines Pairings

Menge aller Type Ratings TR mit n_{TR} Elementen.

Menge aller Flugzeuge AC mit n_{AC} Elementen. Für alle $ac \in AC$ wird folgende Eigenschaft definiert:

$tr(ac)$:= Type Rating von Flugzeug ac , wobei gilt: $tr(ac) \in TR$

Menge aller Flughäfen AP mit n_{AP} Elementen. Es gilt $AP = AP_{CB} \cup AP_{Reg}$ und $AP_{CB} \cap AP_{Reg} = \emptyset$, wobei AP_{CB} die Menge der Crewbases mit $n_{AP_{CB}}$ Elementen und AP_{Reg} die Menge der regulären Flughäfen mit $n_{AP_{Reg}}$ Elementen ist.

Menge aller Legs L mit n_L Elementen. Für alle $l \in L$ werden folgende Eigenschaften definiert:

$orig(l) :=$ Abflughafen von Leg l , wobei gilt: $orig(l) \in AP$

$dest(l) :=$ Zielflughafen von Leg l , wobei gilt: $dest(l) \in AP$

$dep(l) :=$ Abflugzeit von Leg l

$arr(l) :=$ Ankunftszeit von Leg l

$block(l) :=$ Block Time von Leg l , wobei gilt: $block(l) = arr(l) - dep(l)$

$ac(l) :=$ Flugzeug von Leg l , wobei gilt: $ac(l) \in AC$

Menge aller Qualifikationen Q mit n_Q Elementen. Es gilt $Q = Q_{CpPrim} \cup Q_{CbPrim} \cup Q_{CbAux}$ und $Q_{CpPrim} \cap Q_{CbPrim} = Q_{CpPrim} \cap Q_{CbAux} = Q_{CbPrim} \cap Q_{CbAux} = \emptyset$, wobei Q_{CpPrim} , Q_{CbPrim} und Q_{CbAux} die Mengen der Cockpit-Qualifikationen und der primären und unterstützenden Cabin-Qualifikationen mit $n_{Q_{CpPrim}}$, $n_{Q_{CbPrim}}$ bzw. $n_{Q_{CbAux}}$ Elementen sind (vgl. Abbildung 5.1). Für Q wird folgende Eigenschaft definiert:

$rank_{max}(Q) :=$ Maximaler Rang in Q , wobei gilt: $rank_{max}(Q) = \max\{rank(Q)\}$

Für alle $q \in Q$ werden folgende Eigenschaften definiert:

$ct(q) :=$ Crewtyp von Qualifikation q , wobei gilt: $ct(x) = \begin{cases} 1, & q \in Q_{CpPrim} \\ 0, & q \in Q_{CbPrim} \cup Q_{CbAux} \end{cases}$

$qt(q) :=$ Qualifikationstyp von Qualifikation q , wobei gilt: $qt(q) = \begin{cases} 1, & q \in Q_{CpPrim} \cup Q_{CbPrim} \\ 0, & q \in Q_{CbAux} \end{cases}$

$rank(q) :=$ Rang von Qualifikation q , wobei gilt: $rank(q) \in \mathbb{N}_0$

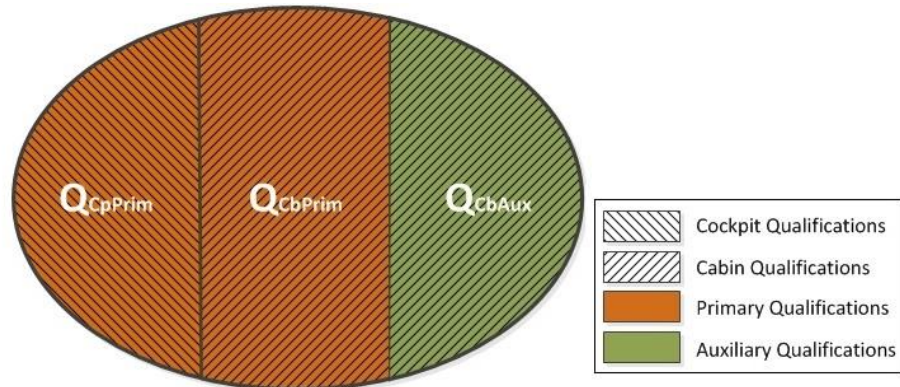


Abbildung 5.1: Die drei Teilmengen der Qualifikationsmenge Q

Menge aller Jobs J mit n_J Elementen. Für alle $j \in J$ werden folgende Eigenschaften definiert:

$l(j) :=$ Leg von Job j , wobei gilt: $l(j) \in L$

$beg(j) :=$ Startzeit von Job j , wobei gilt: $beg(j) = dep(l(j)) - GTB$

$end(j) :=$ Endzeit von Job j , wobei gilt: $end(j) = arr(l(j)) + GTA$

$q(j) :=$ Qualifikation von Job j , wobei gilt: $q(j) \in Q$

Menge aller Jobpakete JP mit n_{JP} Elementen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen aus 0 stellen alle $JP_i \in JP$ Mengen von Jobs dar: $JP_i \subseteq J$. Für alle JP_i mit n_{JP_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$l(JP_i) :=$ Leg von Jobpaket JP_i , wobei gilt: $l(JP_i) = l(j_{1,JP_i})$

$beg(JP_i) :=$ Startzeit von Jobpaket JP_i , wobei gilt: $beg(JP_i) = beg(j_{1,JP_i})$

$end(JP_i) :=$ Endzeit von Jobpaket JP_i , wobei gilt: $end(JP_i) = end(j_{1,JP_i})$

$block_{prim}(JP_i) :=$ Primary Block Time von Jobpaket JP_i , wobei gilt:

$$block_{prim}(JP_i) = \begin{cases} block(l(JP_i)), \exists j \in JP_i: qt(q(j)) = 1 \\ 0, \text{sonst} \end{cases}$$

$Q(JP_i) :=$ Menge der Qualifikationen in Jobpaket JP_i , wobei gilt: $Q(JP_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{JP_i}} q(j_{u,JP_i})$

$Q_{aux}(JP_i) :=$ Menge der unterstützenden Qualifikationen in Jobpaket JP_i , wobei gilt:

$$Q_{aux}(JP_i) = \{q \in Q(JP_i) | qt(q) = 0\}$$

$rank_{max}(JP_i) :=$ Höchster eingeplanter Rang in Jobpaket JP_i , wobei gilt:

$$rank_{max}(JP_i) = \max \left\{ rank \left(q(j_{1,JP_i}) \right), \dots, rank \left(q(j_{n_{JP_i},JP_i}) \right) \right\}$$

Menge aller Duties D mit n_D Elementen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen aus 0 stellen alle $D_i \in D$ zeitlich geordnete Tupel von Jobpaketen dar. Für alle $D_i = \{JP_{1,D_i}, \dots, JP_{n_{D_i},D_i}\}$ mit n_{D_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$orig(D_i) :=$ Abflughafen von Duty D_i , wobei gilt: $orig(D_i) = orig(l(JP_{1,D_i}))$

$dest(D_i) :=$ Zielflughafen von Duty D_i , wobei gilt: $dest(D_i) = dest(l(JP_{n_{D_i},D_i}))$

$beg(D_i) :=$ Startzeit von Duty D_i , wobei gilt: $beg(D_i) = beg(JP_{1,D_i}) - briefingTime$

$end(D_i) :=$ Endzeit von Duty D_i , wobei gilt: $end(D_i) = end(JP_{n_{D_i},D_i}) + debriefingTime$

$fdp(D_i) :=$ FDP von Duty D_i , wobei gilt: $fdp(D_i) = end(D_i) - beg(D_i)$

$block_{prim}(D_i) :=$ Total Primary Block Time von Duty D_i , wobei gilt:

$$block_{prim}(D_i) = \sum_{u=1}^{n_{D_i}} block_{prim}(JP_{u,D_i})$$

$TR(D_i) :=$ Menge der Type Ratings in Duty D_i , wobei gilt: $TR(D_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{D_i}} tr(ac(l(JP_{u,D_i})))$

$Q(D_i) :=$ Menge der Qualifikationen in Duty D_i , wobei gilt: $Q(D_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{D_i}} Q(JP_{u,D_i})$

$Q_{aux}(D_i) :=$ Menge der unterstützenden Qualifikationen in Duty D_i , wobei gilt:

$$Q_{aux}(D_i) = \{q \in Q(D_i) | qt(q) = 0\}$$

$rank_{max}(D_i) :=$ Höchster eingeplanter Rang in Duty D_i , wobei gilt:

$$rank_{max}(D_i) = \max \left\{ rank_{max}(JP_{1,D_i}), \dots, rank_{max}(JP_{n_{D_i},D_i}) \right\}$$

Menge aller Pairings P mit n_P Elementen. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen aus 0 stellen alle $P_i \in P$ zeitlich geordnete Tupel von Duties dar. Für alle $P_i = \{D_{1,P_i}, \dots, D_{n_{P_i},P_i}\}$ mit n_{P_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$cb(P_i) :=$ Crewbase von Pairing P_i , wobei gilt: $cb(P_i) \in AP_{CB}$

$orig(P_i) :=$ Abflughafen von Pairing P_i , wobei gilt: $orig(P_i) = orig(D_{1,P_i})$

$dest(P_i) :=$ Zielflughafen von Pairing P_i , wobei gilt: $dest(P_i) = dest(D_{n_{P_i},P_i})$

$beg(P_i) :=$ Startzeit von Pairing P_i , wobei gilt: $beg(P_i) = beg(D_{1,P_i})$

$end(P_i) :=$ Endzeit von Pairing P_i , wobei gilt: $end(P_i) = end(D_{n_{P_i},P_i})$

$tafb(P_i) :=$ TAFB von Pairing P_i , wobei gilt: $tafb(P_i) = end(P_i) - beg(P_i)$

$block_{prim}(P_i) :=$ Total Primary Block Time von Pairing P_i , wobei gilt:

$$block_{prim}(P_i) = \sum_{u=1}^{n_{P_i}} block_{prim}(D_{u,P_i})$$

$JP(P_i) :=$ Menge der Jobpakete in Pairing P_i , wobei gilt: $JP(P_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{P_i}} D_{u,P_i}$

$TR(P_i) :=$ Menge der Type Ratings in Pairing P_i , wobei gilt: $TR(P_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{P_i}} TR(D_{u,P_i})$

$Q(P_i) :=$ Menge der Qualifikationen in Pairing P_i , wobei gilt: $Q(P_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{P_i}} Q(D_{u,P_i})$

$Q_{aux}(P_i) :=$ Menge der unterstützenden Qualifikationen in Pairing P_i , wobei gilt:

$$Q_{aux}(P_i) = \{q \in Q(P_i) | qt(q) = 0\}$$

$lo(D_{u,P_i}, P_i) :=$ Anzahl Layover von Duty D_{u,P_i} in Pairing P_i , wobei gilt:

$$lo(D_{u,P_i}, P_i) = \begin{cases} 1, & D_{u,P_i} \neq D_{n_{P_i},P_i} \wedge dest(D_{u,P_i}) \neq cb(P_i) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$lo(P_i) :=$ Anzahl Layover von Pairing P_i , wobei gilt: $lo(P_i) = \sum_{u=1}^{n_{P_i}} lo(D_{u,P_i}, P_i)$

$rank_{max}(P_i) :=$ Höchster eingeplanter Rang in Pairing P_i , wobei gilt:

$$rank_{max}(P_i) = \max\{rank_{max}(D_{1,P_i}), \dots, rank_{max}(D_{n_{P_i},P_i})\}$$

Menge aller anonymen Personaleinsatzpläne Ω mit n_Ω Elementen. Alle $\Omega_i \in \Omega$ stellen Mengen von Pairings dar: $\Omega_i \subseteq P$. Für alle Ω_i mit n_{Ω_i} Elementen werden folgende Eigenschaften definiert:

$block_{prim}(\Omega_i) :=$ Total Primary Block Time von Personaleinsatzplan Ω_i , wobei gilt:

$$block_{prim}(\Omega_i) = \sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} block_{prim}(P_u)$$

$JP(\Omega_i) :=$ Menge der Jobpakete in Personaleinsatzplan Ω_i , wobei gilt: $JP(\Omega_i) = \bigcup_{u=1}^{n_{\Omega_i}} P_{u,\Omega_i}$

5.1.2 Bedingungen für Zulässigkeit

In diesem Abschnitt werden die Bedingungen aufgeführt, die sowohl für die Input- als auch für die Outputdaten eingehalten werden müssen, um Zulässigkeit zu gewährleisten. Bei ihnen handelt es sich um gesetzliche, tarifrechtliche, betriebliche sowie um formale Anforderungen für den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont von individuellen Personalumläufen.

Eine Belegung der Konstanten wird als zulässig bezeichnet, wenn alle Werte aus \mathbb{N}_0 gewählt und darüber hinaus folgende Bedingungen erfüllt werden:

$$0 \leq sitTime_{min} \leq sitTime_{max} \quad (5.1)$$

$$restPeriod_{min} \leq restPeriod_{max} \quad (5.2)$$

$$sitTime_{max} < restPeriod_{min} \quad (5.3)$$

$$dutyJobpackages_{max} \geq 1 \quad (5.4)$$

$$pairingDuties_{max} \geq 1 \quad (5.5)$$

$$cockpitTypeRating_{max} \geq 1 \quad (5.6)$$

$$cabinTypeRating_{max} \geq 1 \quad (5.7)$$

Ein Satz an Eingabedaten wird als zulässig bezeichnet, wenn n_{TR} , n_{AC} , n_{AP} , n_L , n_Q und $n_L \in \mathbb{N}$ sind und darüber hinaus die Integritätsbedingungen (5.8) bis (5.12) erfüllt werden. (5.8) besagt, dass ein geplantes Leg nicht an dem Flughafen ankommen darf, von dem aus es gestartet ist. Bedingung (5.9) sichert die zeitliche Umsetzbarkeit. Die Bedingungen (5.10), (5.11) und (5.12) beziehen sich auf die Qualifikationen und legen fest, dass Cockpit- und Auxiliary-Attribute nicht miteinander kombiniert werden dürfen bzw. dass Primär-Qualifikationen ein Rang größer 0 und Auxiliary-Qualifikationen der Rang 0 zugewiesen werden muss.

$$\forall l_i \in L: orig(l_i) \neq dest(l_i) \quad (5.8)$$

$$\forall l_i \in L: dep(l_i) < arr(l_i) \quad (5.9)$$

$$\nexists q: ct(q) = 1 \wedge qt(q) = 0 \quad (5.10)$$

$$\nexists q: qt(q) = 1 \wedge rank(q) \leq 0 \quad (5.11)$$

$$\nexists q: qt(q) = 0 \wedge rank(q) \neq 0 \quad (5.12)$$

Ein Jobpaket $JP_i \in JP$ wird als zulässig bezeichnet, wenn es nur zulässige Legs und Jobs beinhaltet und die Bedingungen (5.13) bis (5.16) erfüllt. Die Bedingungen (5.13) und (5.14) legen fest, dass alle Jobs in einem Paket auf demselben Leg stattfinden und vom selben Crewtyp sein müssen. Dabei muss jedes Paket genau einen Primary Job enthalten (5.15). Sekundärjobs können beliebig viele enthalten sein, solange sie alle unterschiedlicher Qualifikationen bedürfen (5.16). Eine Kombination von Cockpit und Auxiliary Jobs wird durch die gemeinsame Wirkungsweise der Bedingungen (5.10), (5.14), (5.15) und (5.16) unterbunden.

$$l(j_{u,JP_i}) = l(j_{v,JP_i}) \quad \forall (u, v) \in \{1, \dots, n_{JP_i}\} \quad (5.13)$$

$$ct(q(j_{u,JP_i})) = ct(q(j_{v,JP_i})) \quad \forall (u, v) \in \{1, \dots, n_{JP_i}\} \quad (5.14)$$

$$\sum_{u=1}^{n_{JP_i}} qt(q(j_{u,JP_i})) = 1 \quad (5.15)$$

$$q(j_{u,JP_i}) \neq q(j_{v,JP_i}) \quad \forall (u, v) \in \{1, \dots, n_{JP_i}\} \quad (5.16)$$

Eine Duty $D_i \in D$ wird als zulässig bezeichnet, wenn sie nur zulässige Jobpakete beinhaltet und die Bedingungen (5.17) bis (5.23) erfüllt. Die Bedingung (5.17) legt die maximale Anzahl Jobpackages und somit die maximale Anzahl Legs pro Duty fest. Die Bedingungen (5.18) und (5.19) erzwingen die Beachtung der Type Rating-Begrenzungen für Cockpit- bzw. Cabinenduties. Die zeitliche Obergrenze für eine Duty darf laut (5.20) nicht überschritten werden. Die räumliche Realisierbarkeit der Duty wird durch die Bedingung (5.21) gewährleistet. Die Bedingungen (5.22) und (5.23) sichern die Einhaltung der MCTs und der minimalen und maximalen zeitlichen Abstände zwischen Verbindungen mit und ohne Flugzeugwechsel.

$$1 \leq n_{D_i} \leq \text{dutyJobpackages}_{max} \quad (5.17)$$

$$ct(q(j_{1,JP_{1,D_i}})) = 1 \rightarrow TR(D_i) \leq \text{cockpitTypeRating}_{max} \quad (5.18)$$

$$ct(q(j_{1,JP_{1,D_i}})) = 0 \rightarrow TR(D_i) \leq \text{cabinTypeRating}_{max} \quad (5.19)$$

$$fdp(D_i) \leq fdp_{max} \quad (5.20)$$

$$\text{dest}(l(JP_{u,D_i})) = \text{orig}(l(JP_{u+1,D_i})) \quad \forall u \in \{1, \dots, n_{D_i} - 1\} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} ac(l(JP_{u,D_i})) = ac(l(JP_{u+1,D_i})) &\rightarrow 0 \\ &\leq \text{beg}(JP_{u+1,D_i}) - (\text{end}(JP_{u,D_i}) + \text{mct}_{reg}) \quad \forall u \in \{1, \dots, n_{D_i} - 1\} \\ &\leq \text{sitTime}_{max} \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} ac(l(JP_{u,D_i})) \neq ac(l(JP_{u+1,D_i})) &\rightarrow 0 \\ &\leq \text{beg}(JP_{u+1,D_i}) - (\text{end}(JP_{u,D_i}) + \text{mct}_{rot}) \quad \forall u \in \{1, \dots, n_{D_i} - 1\} \\ &\leq \text{sitTime}_{max} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Ein Pairing $P_i \in P$ wird als zulässig bezeichnet, wenn es nur zulässige Duties beinhaltet und die Bedingungen (5.24) bis (5.30) erfüllt. Die Bedingung (5.24) legt die maximale Anzahl Duties pro Pairing fest. Die Bedingungen (5.25) und (5.26) erzwingen die Beachtung der Type Rating-Begrenzungen für Cockpit- bzw. Cabinenpairings. Für die Einhaltung der zeitlichen Obergrenze eines Pairings sorgt Bedingung (5.27). Die räumliche Realisierbarkeit des Pairings wird durch (5.28) gewährleistet. (5.29) zielt auf die Einhaltung der Unter- und Obergrenzen für die Ruheperioden ab. Die Bedingung (5.30) fordert, dass es sich bei einem Pairing um eine Rundtour handelt, die bei einer Crewbase beginnt und endet.

$$1 \leq n_{P_i} \leq \text{pairingDuties}_{max} \quad (5.24)$$

$$ct\left(q\left(j_{1,JP_1,D_1,P_i}\right)\right) = 1 \rightarrow TR(P_i) \leq \text{cockpitTypeRating}_{max} \quad (5.25)$$

$$ct\left(q\left(j_{1,JP_1,D_1,P_i}\right)\right) = 0 \rightarrow TR(P_i) \leq \text{cabinTypeRating}_{max} \quad (5.26)$$

$$\text{tafb}(P_i) \leq \text{tafb}_{max} \quad (5.27)$$

$$\text{dest}(D_{u,P_i}) = \text{orig}(D_{u+1,P_i}) \quad \forall u \in \{1, \dots, n_{P_i} - 1\} \quad (5.28)$$

$$\text{restPeriod}_{min} \leq \text{beg}(D_{u+1,P_i}) - \text{end}(D_{u,P_i}) \leq \text{restPeriod}_{max} \quad \forall u \in \{1, \dots, n_{P_i} - 1\} \quad (5.29)$$

$$\text{orig}(P_i) = \text{dest}(P_i) = \text{cb}(P_i) \quad (5.30)$$

Ein anonymer Personaleinsatzplan $\Omega_i \in \Omega$ wird als zulässig bezeichnet, wenn er nur zulässige Pairings beinhaltet und darüber hinaus die Bedingung (5.31) im Sinne eines SPP erfüllt. Diese legt fest, dass jeder Job genau einmal eingeplant werden muss und basiert dabei auf der binären Variable $\gamma_{P_i}^j$, deren Wertigkeit wie folgt definiert wird:

$$\gamma_{P_i}^j := \begin{cases} 1, & j \in J(P_i) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Dass ein Pairing P_i seinerseits den Job j nur einmal abdeckt, ergibt sich implizit aus den Bedingungen (5.15) und (5.16), die festlegen, dass ein Job nur einmal in einem Jobpaket enthalten sein kann, und darüber hinaus aus den Bedingungen (5.22), (5.23) und (5.29), die durch die Regelung der zeitlichen Abfolge von Jobpaketen und Duties innerhalb von Pairings das doppelte Einplanen eines Jobs unmöglich machen.

$$\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} \gamma_{P_i}^j = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.31)$$

5.1.3 Kostenberechnung

Die Berechnung der Kosten von Komponenten des JPP orientiert sich an der in Kapitel 4.1.4 vorgestellten hierarchischen Kostenstruktur des CPP. Dabei stellen nun, anstelle von Legs, einzelne Jobs die unterste Ebene dar. Die Kosten eines Jobs j werden, wie in (5.32) aufgeführt, durch die Multiplikation seiner Blockzeit, bzw. die seines Legs, mit einem Personalkostensatz $c_{personnel}$ berechnet. Passend zu dem in diesem Modell abgebildeten Detailgrad drückt $c_{personnel}$ die Kosten aus, die der Einsatz eines einzelnen Mitarbeiters pro Zeiteinheit verursacht. Auf die gleiche Weise werden in (5.33) die Kosten eines Jobpakets JP_i bestimmt. Es wird sofort klar, dass es sich vorteilhaft auf die Gesamtkosten auswirkt, wenn möglichst viele Jobs innerhalb eines Jobpakets parallel durchgeführt werden. Für die Kosten einer Duty D_i spielen nicht nur die Blockzeiten der enthaltenen Jobpakete eine Rolle, sondern auch zwischenliegende Zeiten, welche gemeinsam die FDP ausmachen. Um das Erstellen zu kurzer und somit ineffizienter Tagestouren zu vermeiden, wird die Konstante

$mgpwt_{duty}$ herangezogen und das Maximum aus ihr und der FDP mit dem Personalkostensatz verrechnet (5.34). Angelehnt an den MGP-Kostensatz benennt die Minimum Guaranteed Payed Work Time (MGPWT) die minimal zu bezahlenden Zeiteinheiten pro Duty. Für die Erhebung der Pairingkosten in (5.35) werden die Kosten der im Pairing P_i enthaltenen Duties aufsummiert und diesen dann anfallende Übernachtungskosten hinzugefügt. Für die Berechnung der Übernachtungskosten wird der konstante Kostensatz $c_{layover}$ verwendet, der Hotelkosten und weitere Spesen abbildet. Die Gesamtkosten eines anonymen Personaleinsatzplans Ω_i ergeben sich aus den Kosten der in ihm enthaltenen Pairings (5.36).

$$cost(j) := block(l(j)) * c_{personnel} \quad (5.32)$$

$$cost(JP_i) := block(l(JP_i)) * c_{personnel} \quad (5.33)$$

$$cost(D_i) := \max\{fdp(D_i), mgpwt_{duty}\} * c_{personnel} \quad (5.34)$$

$$cost(P_i) := \sum_{u=1}^{n_{P_i}} cost(D_u) + lo(P_i) * c_{layover} \quad (5.35)$$

$$cost(\Omega_i) := \sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} cost(P_u) \quad (5.36)$$

Angelehnt an den relativen Bewertungsmaßstab der FTCs, wird im Folgenden mit der Excess Cost Percentage (ECP) eine Möglichkeit vorgestellt, die Planungsgüte von JPP-Komponenten zu beziffern. Im Gegensatz zu der FTC-Berechnung, bei der die Gesamtkosten einer Komponente ins Verhältnis zu ihren minimalen Kosten gesetzt wird, gibt die ECP den Anteil der Gesamtkosten an, der unter idealen Voraussetzungen hätte vermieden werden können. Die ECP-Werte können sich zwischen 0% und 100% bewegen, wobei diese Extremwerte bedeuten, dass ein bestmögliches bzw. ungünstigstes Planungsergebnis erzielt wurde.

Da es für die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Lösungsverfahren notwendig ist, die Bedingung (5.15) zu lockern und auch Jobpakete ohne Primary Job zuzulassen, wird im Weiteren zwischen der Block Time $block$ einer Komponente und ihrer sog. Primary Block Time $block_{prim}$ unterschieden. Abweichend von der Block Time, welche die Summe der Flugzeiten einer Komponente angibt, enthält die Primary Block Time nur die Flugzeiten, während derer ein Primary Job durchgeführt wird. Für ein Jobpaket, dessen Kosten sich laut (5.33) aus der Multiplikation aus Block Time und Personalkostensatz ergeben, gibt es der Formel (5.37) folgend für die ECP nur zwei mögliche Ausprägungen: 0% und 100%. Enthält das Jobpaket einen Primary Job, entspricht die Block Time der Primary Block Time und es fallen keine vermeidbaren Kosten an. Ist dies nicht der Fall, muss für das Leg des Jobpakets, welches nur unterstützende Aufgaben beinhaltet, ein zusätzliches Crewmitglied eingeplant werden, was Kosten verursacht, die bei alternativer Jobkombination vermeidbar wären.⁴⁰ Die ECP von Duties kann einen beliebigen Wert innerhalb der Extremwerte annehmen. Von sämtlichen anfallenden Kosten, incl.

⁴⁰ Dies beinhaltet implizit die Voraussetzung, dass es die gegebenen Flugplandaten nicht generell unmöglich machen, alle Auxiliary Jobs mit Primary Jobs zu kombinieren.

MGPWTs, Sit- und Umsteigezeiten, werden wiederum nur Flugzeiten von Primary Jobs abgezogen und ins Verhältnis gesetzt, da nur sie als unvermeidbare Kosten gelten (5.38). Auf gleiche Art und Weise werden für Pairings und ganze Einsatzpläne in (5.39) und (5.40) nur die jeweiligen kumulierten Primary Block Times von den Gesamtkosten zur Bestimmung der ECP abgezogen. Die Zähler der Formeln (5.37) bis (5.40) drücken die absoluten vermeidbaren Kosten aus, weshalb sie als Kostenmaße, den sog. Excessive Cost Values, als Alternative zu den in (5.32) bis (5.36) beschriebenen Gesamtkostenmaßen genutzt werden können.

$$ecp(JP_i) := \frac{cost(JP_i) - block_{prim}(JP_i) * c_{personnel}}{cost(JP_i)} \quad (5.37)$$

$$ecp(D_i) := \frac{cost(D_i) - block_{prim}(D_i) * c_{personnel}}{cost(D_i)} \quad (5.38)$$

$$ecp(P_i) := \frac{cost(P_i) - block_{prim}(P_i) * c_{personnel}}{cost(P_i)} \quad (5.39)$$

$$ecp(\Omega_i) := \frac{cost(\Omega_i) - block_{prim}(\Omega_i) * c_{personnel}}{cost(\Omega_i)} \quad (5.40)$$

5.1.4 Zielfunktion

Die Zielfunktion (5.41) sucht unter allen zulässigen anonymen Personaleinsatzplänen der Menge Ω den Plan Ω_i , dessen Kosten am geringsten sind. Hierbei handelt es sich implizit um eine SPP-Formulierung, wie sie in Abschnitt 4.1.1 erläutert wurde. Analog zu der Berechnung und Minimierung der Kosten, wie sie in (4.3) vorgenommen wird, stehen hier die Formeln (5.36) und (5.41). Die Forderung aus (4.6), dabei alle Elemente genau einmal abzudecken, findet sich in der Zulässigkeitsbedingung (5.31). Die binäre Entscheidungsvariable aus (4.5), die besagt, ob ein Pairing Teil der aktuellen Lösung ist und mit deren Hilfe im Rahmen des Optimierungsprozesses Übergänge von einer Lösung zu einer anderen vorgenommen werden können, entspricht in diesem Programm der Wahl einer anderen Lösung aus Ω .

$$\min\{cost(\Omega_i) | \Omega_i \in \Omega\} \quad (5.41)$$

5.2 Robustes Job Pairing

In diesem Abschnitt wird die robuste Variante des JPP beschrieben. Zu den Robustheitsindikatoren, die in diesem Ansatz berücksichtigt werden, gehört zunächst das Einplanen von MCTs und Pufferzeiten. Die Einhaltung der minimalen Verbindungszeiten wird durch die beiden konstanten Parameter mct_{reg} und mct_{rot} in den Nebenbedingungen (5.22) und (5.23) gewährleistet, die eine differenzierte Behandlung von Flugverbindungen mit und ohne Umsteigevorgänge ermöglichen. Hierbei handelt es sich um harte Bedingungen, da es zu unzulässigen Planungsergebnissen führt, sollten sie nicht eingehalten werden. Über die MCTs hinaus können Pufferzeiten verwendet werden.

Der Parameter $sitTime_{min}$ legt fest, wie viele Zeiteinheiten zwischen zwei Jobpaketen innerhalb einer Duty D_i zusätzlich eingeplant werden sollen. Die Nichteinhaltung dieser Pufferzeiten wird durch einen erhöhten Buffer-Violation-Value bestraft, der wie folgt die jeweiligen Zeiteinheiten, um die die minimale Pufferzeit unterschritten wurde, aufsummiert:

$$bufferViolation(D_i) = \sum_{u=1}^{n_{D_i}-1} \max \left\{ 0, sitTime_{min} - \left(dep(l(JP_{u+1,D_i})) - (arr(l(JP_{u,D_i})) + mct) \right) \right\}, \text{ wobei gilt: } mct = \begin{cases} mct_{reg}, ac(l(JP_{u,D_i})) = ac(l(JP_{u+1,D_i})) \\ mct_{rot}, ac(l(JP_{u,D_i})) \neq ac(l(JP_{u+1,D_i})) \end{cases}$$

Da es im Laufe der Optimierung jedoch möglich bleibt, die geforderten Pufferzeiten zu unterschreiten, handelt es sich hierbei um eine weiche Bedingung. Als weiterer Indikator für Robustheit wird durch die Vermeidung von Rotationswechseln innerhalb von Duties ein hoher Crewgleichlauf angestrebt. Die Anzahl der Rotationswechsel innerhalb einer Duty D_i , die während der Optimierung möglichst klein gehalten werden soll, wird wie folgt festgestellt:

$$rotationChanges(D_i) = \sum_{u=1}^{n_{D_i}-1} rc, \text{ wobei gilt: } rc = \begin{cases} 1, ac(l(JP_{u,D_i})) \neq ac(l(JP_{u+1,D_i})) \\ 0, sonst \end{cases}$$

Alle bisher genannten Indikatoren stellen, gerade in Kombination, einen zentralen Stabilitätsaspekt der anonymen Personaleinsatzplanung dar. Um auch den Flexibilitätsaspekt während der Optimierung nicht unberücksichtigt zu lassen, werden in Abschnitt 5.2.1 zwei Ansätze vorgestellt, wie sich die Ressource des Flugpersonals durch gezielte Jobpairing-Strukturen schonen lässt. In Abschnitt 5.2.2 wird der multikriterielle Ansatz vorgestellt, der dazu genutzt wird, neben den Kosten auch die verschiedenen Robustheitsaspekte zu optimieren.

5.2.1 Job Pairing Struktur als Robustheitsindikator

Im Rahmen der anonymen Personaleinsatzplanung werden Jobs zu Jobpaketen und darüber hinaus zu Duties und Pairings kombiniert. Dabei hängt es von der Anzahl und der Struktur der Pairings ab, wie viel Personal von den Planern zur Bewältigung der sich aus dem Flugplan ergebenden Aufgaben eingeplant werden muss. Die Pairingstruktur wird in diesem Zusammenhang durch die Qualifikationsanforderungen der enthaltenen Jobs bestimmt. Bei ungünstigen Pairingstrukturen sind die Anforderungen an das Personal so hoch, dass im Rahmen des Rosterings keine ausreichend qualifizierten Mitarbeiter gefunden werden können. Die beiden im Folgenden vorgestellten Ansätze zielen darauf ab, solche Situationen zu vermeiden und eine möglichst einfache Besetzung der anonymen Umläufe zu gewährleisten, um bei Störungen leicht Ersatzpersonal einplanen zu können.

Der erste Ansatz, bei dem ausschließlich die primären Aufgaben eines Flugplans betrachtet werden, fördert eine homogene Jobstruktur innerhalb der Pairings. Dabei sollen nach Möglichkeit nur Jobs gleichen Ranges miteinander kombiniert werden. Vor dem Hintergrund, dass ein Flugplan z.B.

wesentlich mehr Flugbegleiter-Jobs als P1-Jobs enthält und unter der Annahme, dass die Qualifikationsverteilung des Flugpersonals diesen Umstand abbildet, wäre es höchst ineffektiv, in jedem Kabinen-Pairing genau einen P1-Job einzuplanen. Dadurch, dass auf diese Weise jedes Pairing mindestens die P1-Qualifikation voraussetzen würde, würde während des Rosterings eine sehr große Anzahl von Mitarbeitern mit dieser Qualifikation benötigt. Würden jedoch Pairings gebildet, die ausschließlich aus P1-Jobs bestünden, würde sich die Anzahl der Pairings, die diese Qualifikation benötigen, deutlich reduzieren und die Gesamtanforderung an das Rostering sinken. Die Zielsetzung, das Flugpersonal seinen Qualifikationen entsprechend passgenau einzusetzen, kann in der Optimierung durch die Reduzierung des Prim-Config-Values umgesetzt werden. Der Prim-Config-Value stellt eine Möglichkeit zur Quantifizierung des verschenkten Potentials dar und wird für ein Pairing P_i wie folgt berechnet:

$$\text{primConfig}(P_i) = \sum_{u=1}^{|JP(P_i)|} (\text{rank}_{\max}(P_i) - \text{rank}_{\max}(JP_u))$$

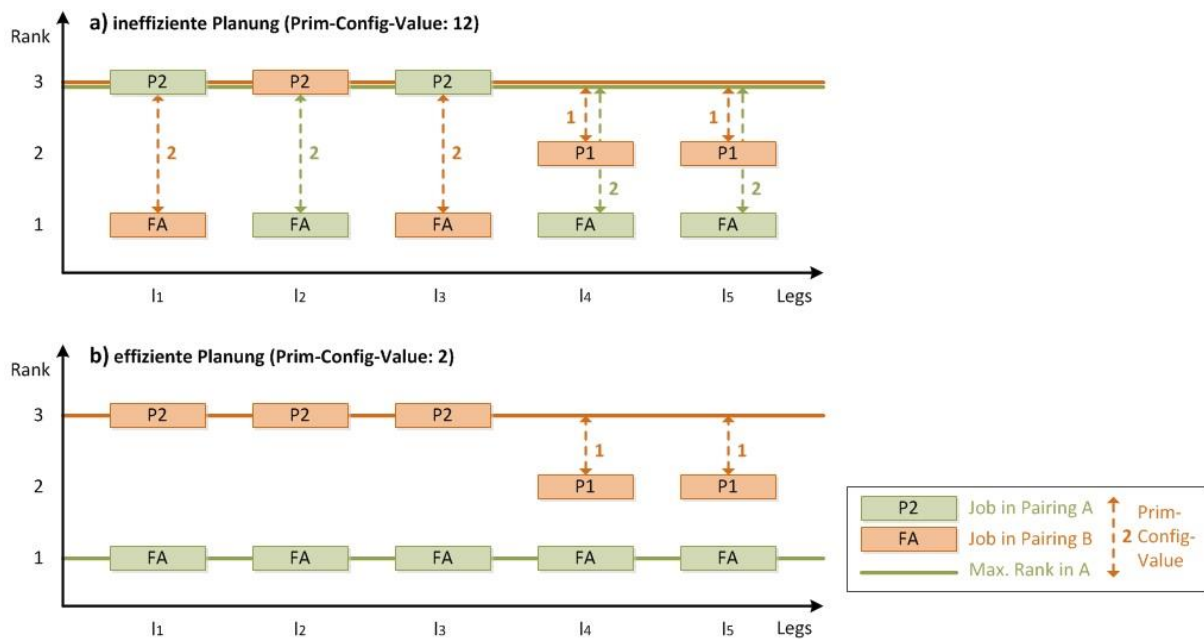


Abbildung 5.2: Konfigurationen von Primary Jobs

Abbildung 5.2 zeigt hierzu beispielhaft zwei Möglichkeiten unterschiedlicher Planungsgüte, zehn Primary Jobs auf zwei Pairings aufzuteilen. In Diagramm a) enthält das Pairing A zwei P2- und drei FA-Jobs. Das ist insofern ineffizient, da es theoretisch möglich wäre, dem Pairing fünf P2-Jobs zuzuweisen, ohne dass sich der maximale Rang des Pairings ändern würde. Entsprechend der Ranghierarchie der Qualifikationen ergibt sich ein kumulierter Prim-Config-Value von 6 für dieses Pairing. In Diagramm b) wurde eine homogenere Einsatzplanung vorgenommen. Pairing A enthält nur Jobs seines maximalen Ranges, weshalb an dieser Stelle kein Potential verschenkt wurde. Pairing B enthält mit den beiden P1-Jobs zwei Jobs, die eine Stufe unterhalb seines maximalen Ranges liegen. Dies führt zu einem Prim-Config-Value von 2, der sich in diesem Beispiel jedoch nicht vermeiden

lässt. Die Reduzierung des Prim-Config-Values hat hier dazu geführt, dass zur Bewältigung der zehn Aufgaben nicht mehr zwei Mitarbeiter mit P2-Qualifikation, sondern nur noch ein P2- und ein FA-Mitarbeiter benötigt werden.

Der zweite Ansatz beschäftigt sich mit der möglichst homogenen Konfiguration der Auxiliary Jobs in Kabinen-Pairings. Da die Hilfsaufgaben nicht Teil der Qualifikationshierarchie sind, ist einzig die Anzahl der für ein Pairing erforderlichen Zusatzqualifikationen entscheidend. Je mehr verschiedenartige Auxiliary Jobs ein Pairing umfasst, desto schwieriger wird es, im Rostering einen Mitarbeiter zu finden, der über die entsprechenden Qualifikationen verfügt. Ist hingegen bereits ein Aufgabentyp wie z.B. SOM oder FC eingeplant, sollten weitere Aufgaben dieses Typs in dem Pairing untergebracht werden, da die Anforderungen des Pairings nicht weiter steigen würden. Um diesen Sachverhalt während der Optimierung berücksichtigen zu können, wird jedem Pairing P_i ein Aux-Config-Value zugeordnet, der die jeweilige Anforderungshöhe quantifiziert. Um die zunehmende Schwierigkeit, über eine weitere Zusatzqualifikation zu verfügen, abzubilden, wurde eine quadratische Funktion gewählt:

$$auxConfig(P_i) = \max\{0, |Q_{aux}(P_i)| - 1\}^2$$

5.2.2 Das multikriterielle Optimierungsmodell

Da das in dieser Arbeit entwickelte Optimierungsmodell im Rahmen der Validierung und der Untersuchungen häufig angewendet wird, soll es weitest möglich automatisch berechnet werden können. Aus diesem Grund wird es als Gewichtungungsverfahren modelliert, welches nach Eingabe der Inputdaten und der Präferenzen kein weiteres Eingreifen von außen erfordert. Hierbei wird, wie in Abschnitt 4.1.5 beschrieben, sowohl den Kosten als auch den verschiedenen Robustheitsindikatoren ein Gewicht in der Zielfunktion zugeordnet, über die die Suche innerhalb des Optimierungsprozesses gesteuert wird. Einzig die Einhaltung der MCTs wird, der ε -Constraint-Optimierungsmethode folgend, in Form der harten Nebenbedingungen (5.22) und (5.23) vorausgesetzt, was den Lösungsraum von vorne herein beschränkt. Neben der bereits erwähnten Lockerung der Bedingung (5.15) muss für die Lösungsverfahren in Abschnitt 5.3 auch die Bedingung (5.30), die fordert, dass jedes Pairing bei einer Crewbase starten und auch dort wieder enden muss, aufgeweicht werden. Hierfür wird, neben den Kosten und den Robustheitsindikatoren, der zu minimierende Crewbase-Violation-Value mit separatem Gewicht in die Zielfunktion aufgenommen. Dieser beziffert die Anzahl der Verstöße, die sich durch ungünstige Planungen der Start- und/oder Zielflughäfen ergeben. Für ein Pairing P_i berechnet sich die Crewbase-Violation wie folgt:

$$crewBaseViolation(P_i) = \begin{cases} 2, & orig(P_i) \neq cb(P_i) \wedge dest(P_i) \neq cb(P_i) \\ 1, & orig(P_i) \neq cb(P_i) \oplus dest(P_i) \neq cb(P_i) \\ 0, & sonst \end{cases}$$

Um die sechs Optimierungskriterien, welche in Geld- und Zeiteinheiten sowie in absoluten Häufigkeiten und Straferten gemessen werden, im Gewichtungsverfahren miteinander vergleichen zu können, müssen die verschiedenen Meßskalen normalisiert werden. Hierfür werden die gemessenen Werte in Bezug zu den jeweiligen best- und schlechtestmöglichen Werten, den unteren und oberen Schranken, gesetzt und so für jedes Kriterium ein individueller Zielerreichungsgrad festgestellt. Die auf diese Weise erhaltenen sechs Prozentwerte können Ausprägungen im Bereich zwischen 0% und 100% annehmen und ermöglichen so eine bessere Vergleichbarkeit. Einzig der Umstand, dass es sich bei den im Folgenden vorgestellten Schranken teilw. um theoretische Werte handelt und die exakten Werte nicht bekannt sind, kann zu Verzerrungen bei der Gegenüberstellung zweier Zielerreichungsgrade führen. So wäre eine Zielerreichung von 70% bei einem Kriterium mit exakten Schranken de facto schlechter als 70% bei einem anderen Kriterium, bei dem die obere Schranke abweicht und eigentlich nur Werte bis zu 75% erreicht werden können. Vergleiche zweier Werte aus verschiedenen Optimierungsläufen bezgl. desselben Kriteriums bleiben von dieser möglichen Verzerrung unbeeinflusst.

$$best_{excessiveCost}(\Omega_i) := 0 \quad (5.42)$$

$$worst_{excessiveCost}(\Omega_i) := \sum_{u=1}^{n_J} \max\{block(l(j_u)), mgpwt_{duty}\} * c_{personnel} \\ + (n_J - \lfloor n_J / pairingDuties_{max} \rfloor) * c_{layover} \quad (5.43)$$

$$best_{bufferViolation}(\Omega_i) := 0 \quad (5.44)$$

$$worst_{bufferViolation}(\Omega_i) := n_J - \lfloor n_J / dutyJobpackages_{max} \rfloor * sitTime_{min} \quad (5.45)$$

$$best_{rotationChanges}(\Omega_i) := 0 \quad (5.46)$$

$$worst_{rotationChanges}(\Omega_i) := n_J - \lfloor n_J / dutyJobpackages_{max} \rfloor \quad (5.47)$$

$$best_{primConfig}(\Omega_i) := 0 \quad (5.48)$$

$$worst_{primConfig}(\Omega_i) := n_J - \lfloor n_J / (dutyJobpackages_{max} * pairingDuties_{max}) \rfloor \\ * rank_{max}(Q) \quad (5.49)$$

$$best_{auxConfig}(\Omega_i) := 0 \quad (5.50)$$

$$worst_{auxConfig}(\Omega_i) := \lfloor n_J / n_{Q_{CbAux}} \rfloor * (\max\{0, n_{Q_{CbAux}} - 1\})^2 \\ + (\max\{0, (n_J \bmod n_{Q_{CbAux}}) - 1\})^2 \quad (5.51)$$

$$best_{crewBaseViolation}(\Omega_i) := 0 \quad (5.52)$$

$$worst_{crewBaseViolation}(\Omega_i) := n_J * 2 \quad (5.53)$$

Die untere Schranke für die vermeidbaren Kosten eines Einsatzplans liegt bei null (5.42). Dieser Wert setzt voraus, dass alle Auxiliary-Jobs in Jobpakete mit Primary-Jobs eingeplant werden, und dass dabei keine zusätzlichen Kosten durch Layover oder unterschrittene MGPWT entstehen. Im Gegensatz dazu werden für die obere Schranke in (5.43) alle Jobs einzeln in Jobpakete und Duties eingeplant, weshalb sich keine Synergien ergeben und zusätzlich die MGPWT maximal unterschritten werden.

Hinzu kommen die Kosten für die maximal mögliche Anzahl von Layovern, die erreicht wird, indem Pairings maximaler Länge geplant werden. Die maximale Anzahl dieser ‚Nahtstellen‘ ergibt sich dann aus der Differenz der Jobanzahl und der Pairinganzahl. Die unteren Schranken aller anderen fünf Kriterien liegen ebenfalls bei null, da im besten Fall weder Strafen für nicht eingehaltene Pufferzeiten, ungünstige Pairingstrukturen oder Crewbase-Violations anfallen noch Rotationswechsel geplant wurden (siehe (5.44), (5.46), (5.48), (5.50) und (5.52)). Die obere Schranke für Pufferzeitverletzungen wird durch die Multiplikation der maximalen Anzahl der Nahtstellen innerhalb der Duties mit der geforderten Pufferzeit ermittelt (5.45). Da Rotationswechsel, genau wie die gerade behandelten Pufferzeiten, nur zwischen Jobpaketen innerhalb von Duties eingeplant werden können, gilt auch in (5.47) die maximale Anzahl dieser Nahtstellen als Obergrenze. Die schlechteste Kombination der Primary-Jobs wird dadurch erreicht, dass jedem Pairing genau ein Job maximalen Rangs und darüber hinaus so viele Jobs minimalen Rangs wie möglich zugewiesen werden (5.49). Um die schlechteste Konfiguration von Auxiliary-Jobs zu erstellen, werden Pairings gebildet, die genau einen Job von jedem Auxiliary-Jobtyp enthalten, sodass für jedes Pairing die maximale Anzahl von Qualifikationen benötigt und der maximale Strafwert erreicht wird (5.51). Um die höchste Anzahl an Crewbase-Violations zu erreichen, wird in (5.53) jedem Job ein eigenes Pairing zugewiesen und mit dem maximalen Violation-Wert multipliziert. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den Worst Cases um allgemeingültige obere Schranken handelt, die für die einzelnen Zielfunktionsparameter nur individuell zu erreichen sind und unter Einbeziehung detaillierterer Informationen bzgl. einer zugrunde liegenden Flugplanstruktur noch verbessert werden können.

Aus den erreichten Optimierungsergebnissen bzgl. der einzelnen Kriterien und der jeweiligen unteren und oberen Schranken ergeben sich die normalisierten Zielerreichungsgrade u_i wie folgt:

$$u_{excessiveCost}(\Omega_i) = \frac{excessiveCost(\Omega_i) - worst_{excessiveCost}(\Omega_i)}{best_{excessiveCost}(\Omega_i) - worst_{excessiveCost}(\Omega_i)} \quad (5.54)$$

$$u_{bufferViolation}(\Omega_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} \sum_{v=1}^{n_{P_u}} bufferViolation(D_v) - worst_{bufferViolation}(\Omega_i)}{best_{bufferViolation}(\Omega_i) - worst_{bufferViolation}(\Omega_i)} \quad (5.55)$$

$$u_{rotationChanges}(\Omega_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} \sum_{v=1}^{n_{P_u}} rotationChanges(D_v) - worst_{rotationChanges}(\Omega_i)}{best_{rotationChanges}(\Omega_i) - worst_{rotationChanges}(\Omega_i)} \quad (5.56)$$

$$u_{primConfig}(\Omega_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} primConfig(P_u) - worst_{primConfig}(\Omega_i)}{best_{primConfig}(\Omega_i) - worst_{primConfig}(\Omega_i)} \quad (5.57)$$

$$u_{auxConfig}(\Omega_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} auxConfig(P_u) - worst_{auxConfig}(\Omega_i)}{best_{auxConfig}(\Omega_i) - worst_{auxConfig}(\Omega_i)} \quad (5.58)$$

$$u_{crewBaseViolation}(\Omega_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n_{\Omega_i}} crewBaseViolation(P_u) - worst_{crewBaseViolation}(\Omega_i)}{best_{crewBaseViolation}(\Omega_i) - worst_{crewBaseViolation}(\Omega_i)} \quad (5.59)$$

Mit den entsprechenden Gewichten w_i für die einzelnen Optimierungskriterien wird für einen anonymen Personaleinsatzplan Ω_i die Gesamtzielerreichung v wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} v(\Omega_i) = & u_{excessiveCost} * W_{excessiveCost} + u_{bufferViolation} * W_{bufferViolation} \\ & + u_{rotationChanges} * W_{rotationChanges} + u_{primConfig} * W_{primConfig} \\ & + u_{auxConfig} * W_{auxConfig} + u_{crewBaseViolation} * W_{crewBaseViolation} \end{aligned} \quad (5.60)$$

Dabei müssen bei der Artikulation der Präferenzen für die Wahl der Gewichte die beiden Bedingungen (5.61) und (5.62) eingehalten werden:

$$\begin{aligned} W_{excessiveCost} + W_{bufferViolation} + W_{rotationChange} + W_{primConfig} \\ + W_{auxConfig} + W_{crewBaseViolation} = 1 \end{aligned} \quad (5.61)$$

$$\begin{aligned} W_{excessiveCost}, W_{bufferViolation}, W_{rotationChange}, \\ W_{primConfig}, W_{auxConfig}, W_{crewBaseViolation} \geq 0 \end{aligned} \quad (5.62)$$

Abschließend stellt (5.63) die übergreifende Zielfunktion der robusten Variante der anonymen Personaleinsatzplanung dar:

$$\min\{v(\Omega_i) | \Omega_i \in \Omega\} \quad (5.63)$$

5.3 Lösungsverfahren

Durch die Größe und Komplexität des anonymen Einsatzplanungsproblems ist das Auffinden der optimalen Lösung auch unter Verwendung ausgefeilter Lösungsverfahren nicht mehr effizient möglich. Dies gilt insbesondere dann, wenn anstelle von ganzen Crews und Flügen einzelne Jobs, Qualifikationen und Mitarbeiter berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zwei Lösungsheuristiken vorgestellt, die speziell auf das JPP angepasst wurden. Bei der ersten handelt es sich um ein lokales Suchverfahren, welches einen Simulated Annealing-Algorithmus verwendet. Für die Nachbarschaftsübergänge wurde die sog. ‚ShiftJob‘-Relation entwickelt, welche in Abschnitt 5.3.1 vorgestellt wird. Die zweite Heuristik, das sog. SingleBranch&Price (SB&P), wurde in Anlehnung an das exakte B&P-Verfahren entworfen und wird in Abschnitt 5.3.2 erläutert. Abschließend werden in Abschnitt 5.3.3 beide Verfahren validiert und miteinander verglichen.

Wie zuvor bereits angedeutet, werden für beide Verfahren die Bedingungen (5.15) und (5.30) aus Abschnitt 5.1.2 aufgeweicht. Dass nicht mehr jedes Jobpaket genau einen Primary Job enthalten muss, sondern durch (5.64) auch Jobpakete ohne Primay Job zulässig sind, erlaubt einen höheren Grad an Flexibilität bei der Suche nach guten Lösungen. Darüber hinaus wird dadurch auch bei ungünstigen Eingabedaten das Auffinden einer zulässigen Lösung stark vereinfacht. Gleiches gilt für die Aufhebung der Rundtour-Bedingung. Wird im Suchprozess nicht von jeder Zwischenlösung gefordert, dass ein Pairing an ein und derselben Crewbase starten und enden muss, ergeben sich mehr

Möglichkeiten, die einzelnen Jobs zu vorteilhaften Sequenzen zu kombinieren. Der Optimierer erhält somit zusätzliche Freiheiten, die er gegen potentiell schlechtere Zielfunktionswerte, die sich aus höheren Personalkosten und Crewbase-Violation-Values ergeben können, abwägen muss.

$$\sum_{u=1}^{n_{JP_i}} qt(q(j_{u,JP_i})) \leq 1 \quad (5.64)$$

5.3.1 Simulated Annealing mit ShiftJob-Nachbarschaftsrelation

Im Rahmen des Simulated Annealings wird, wie in Abschnitt 4.3.2.2 näher erläutert, ausgehend von einer zulässigen Startlösung, der Lösungsraum durchsucht. In jeder Iteration des Suchprozesses wird zufällig eine Nachbarlösung Ω_{nb} aus der Nachbarschaftsmenge $N(\Omega_{akt})$ der aktuellen Lösung gewählt und u.U. als neue aktuelle Lösung herangezogen. Dies geschieht solange, bis das gewählte Abbruchkriterium erreicht wurde. Neben der verwendeten Abkühlstrategie hängen Laufzeit und Verlauf der Suche von der gewählten Nachbarschaftsfunktion $N(\Omega_i)$ ab. Die in dieser Arbeit verwendete Funktion sollte im Wesentlichen die drei folgenden Anforderungen erfüllen:

1. Der Lösungsraum Ω soll stark zusammenhängend sein.
2. Die Anzahl der Nachbarn einer Lösung soll in der Anzahl der Jobs beschränkt sein.
3. Die Elemente der Trajektorie sollen zulässig sein.

Die Erfüllung der ersten Forderung stellt sicher, dass jede Lösung von jeder anderen Lösung aus erreichbar ist. Auf diese Weise besteht unabhängig von der gewählten Startlösung immer die Chance, das globale Optimum zu finden. Die zweite Forderung zielt darauf ab, dass die Anzahl der jeweiligen benachbarten Lösungen durch die Größe des betrachteten Flugplans beschränkt wird und nicht etwa durch die Anzahl möglicher Lösungen. In diesem Zusammenhang würde eine vollständige Relation bedeuten, dass alle Elemente des Lösungsraums in einer nachbarschaftlichen Beziehung zueinander stünden, was zur Berücksichtigung aller Elemente führen kann und dem Konzept der lokalen Suche zuwider läuft. Im Gegensatz dazu würden zu kleine Nachbarschaften die Zahl der lokalen Optima erhöhen und die Wahrscheinlichkeit, gute Lösungen zu finden, verringern. In diesem Zusammenhang gilt typischerweise, dass mit steigender Nachbarschaftsgröße weniger Rechenschritte durchgeführt werden, diese jedoch mehr Rechenzeit erfordern. Die dritte Anforderung bezieht sich auf den Weg, der bei der Durchsuchung des Lösungsraums gegangen wird, und besagt, dass bei jeder Zwischenlösung dieses Weges die Zulässigkeit gewährleistet sein soll. So können aufwendige Korrekturschritte vermieden und der Suchraum erheblich eingeschränkt werden.

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wurde in dieser Arbeit die sog. ShiftJob-Relation konzipiert, welche speziell für die Optimierung des JPP ausgelegt ist. Inspiriert wurde sie durch die von Emden-Weinert und Proksch verwendeten Join und Split Operationen zur Manipulation bestehender Pairings, auf die in Abschnitt 4.3.2.1 verwiesen wurde. Die Idee der ShiftJob-Relation ist

es, durch das Verschieben eines einzelnen zufällig ausgewählten Jobs in ein anderes Pairing eine neue Nachbarylösung zu erzeugen. Ausgehend von einer zulässigen Startlösung sind dabei nur Übergänge erlaubt, bei denen alle Nebenbedingungen erfüllt bleiben und somit in einer zulässigen Lösung münden. Die verschiedenen Situationen, die sich durch das Verschieben ergeben können, sollen anhand von Abbildung 5.3 verdeutlicht werden.

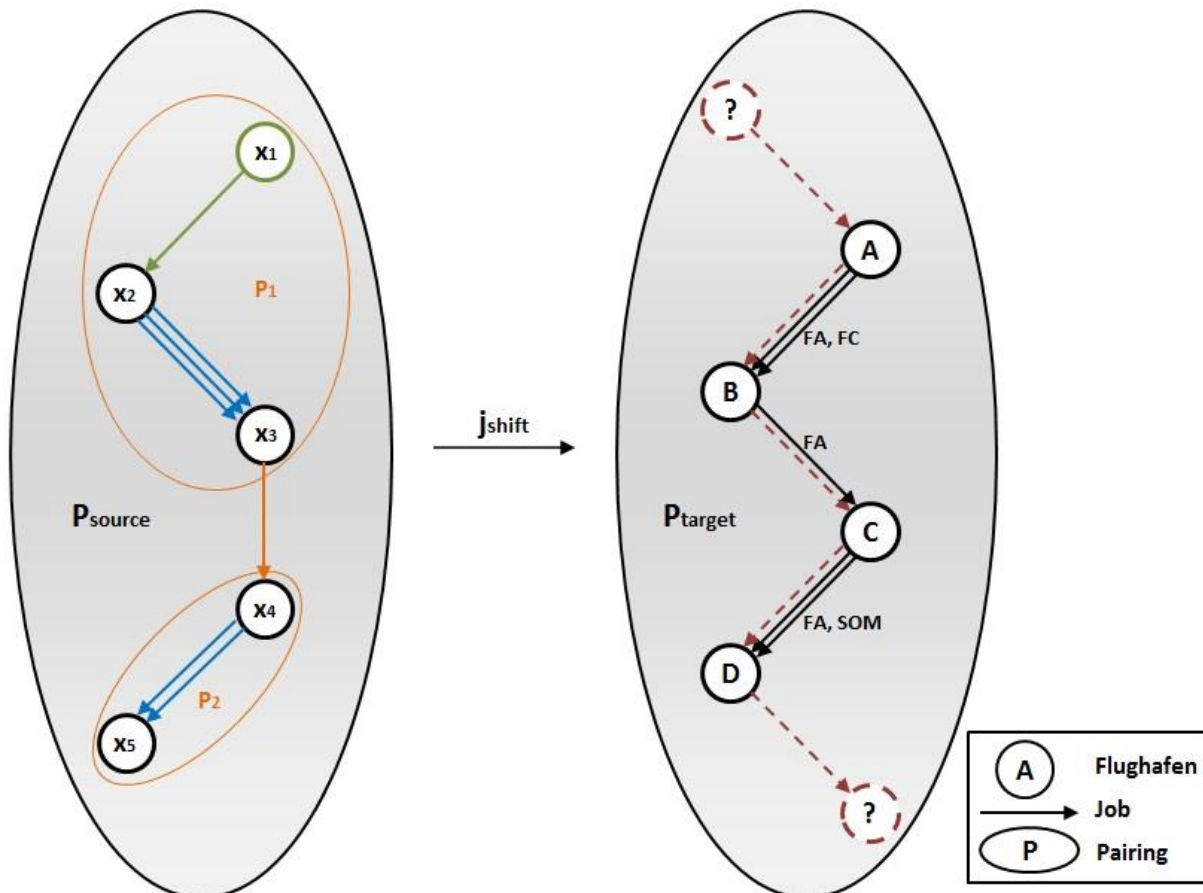


Abbildung 5.3: Die Nachbarschaftsfunktion ShiftJob

Das Pairing P_{source} ist das Pairing, in dem sich der ausgewählte Job befindet und aus dem er entnommen wird. P_{target} ist das das Zielpairing, in das der Job eingefügt wird. Bei der Entfernung des Jobs aus P_{source} bleibt die Pairingstruktur unverändert, wenn das Pairing weitere Jobs des betreffenden Flight Legs beinhaltet. In der Abbildung würde dieser Fall für einen in blau eingezeichneten Job zutreffen. Sollte es sich bei dem Job um den einzigen Job auf einem Leg handeln, wird die Struktur des Pairings verändert, da mit dem Job dann das ganze Leg entfernt wird. Befindet sich das betreffende Leg am Anfang oder am Ende des Pairings, wird dieses bei der Entnahme entsprechend verkürzt (grün eingezeichneter Fall). Liegt es in der Mitte, zerfällt P_{source} in die beiden Teilpairings P_1 und P_2 (orange eingezeichnet). Bei dem Einfügen des Jobs in das Zielpairing kann es aufgrund der zeitlichen und räumlichen Nebenbedingungen maximal eine Stelle geben, an die der Job passt. Ist das Leg des Jobs bereits in P_{target} vorhanden, wird er dem entsprechenden Jobpaket

hinzugefügt.⁴¹ In der Abbildung könnte dem Leg von C nach D z.B. ein P1-Job hinzugefügt werden. Ist das Leg des Jobs noch nicht enthalten, wird das Pairing vorne bzw. hinten um ein Leg verlängert, wodurch sich sein Start- bzw. der Zielflughafen verändert. In der Abbildung nicht dargestellt sind die folgenden beiden Sonderfälle. Ist der ausgewählte Job der einzige in seinem Pairing, wird das gesamte Pairing aus der Lösung entfernt. Im Gegensatz dazu kann ein neues Pairing in die Lösung aufgenommen werden, wenn als P_{target} ein ‚leeres‘ Pairing angelegt wird, das zuvor noch nicht Teil der Lösung war.

Da sie im Verlauf der lokalen Suche sehr häufig ausgeführt wird, gilt es bei der Umsetzung der ShiftJob-Funktion, deren Ablauf in Algorithmus 5.1 skizziert wird, sowohl den zu verschiebenden Job j_{shift} als auch das Zielpairing P_{target} auf möglichst effiziente Art und Weise zu bestimmen.⁴² Entgegen der Intuition wird hierfür zunächst das Zielpairing und erst im Anschluss j_{shift} gewählt, da es sich bei der Jobmenge J um eine statische Menge handelt, deren Elemente sich zu Beginn der Suche einmalig anhand verschiedener Eigenschaften, wie z.B. Start- und Zielflughäfen und Start- und Landezeiten, in vorteilhafte Datenstrukturen einsortieren lassen. Wurde das Zielpairing nach dem Zufallsprinzip ausgewählt (Zeilen 1 bis 6), kann so sehr schnell die Menge Q der Jobs identifiziert werden, deren Einbettung in P_{target} zulässig wäre (Zeile 7). Ist Q nicht leer, wird aus ihr ebenfalls zufällig j_{shift} gewählt und der Transfer wie zuvor beschrieben durchgeführt (Zeilen 8 bis 11). Würde andersherum vorgegangen und erst aus der Menge aller Jobs j_{shift} bestimmt, würden alle Pairings außer P_{source} als potentielle Zielpairings infrage kommen und müssten auf Zulässigkeit überprüft werden, bevor eines von ihnen zufällig ausgewählt werden könnte. Das würde enormen Rechenaufwand bedeuten, der zudem bei jedem Nachbarschaftsübergang erneut bewältigt werden müsste. Um auch den Vergleich der Zielfunktionswerte der aktuellen und der Nachbarlösung während des SA effizient zu gestalten, werden nicht alle Pairings für die Berechnungen herangezogen, sondern nur die, die durch die lokalen Änderungen der ShiftJob-Funktion betroffen sind.

Die ShiftJob-Nachbarschaftsrelation N legt für dem Lösungsraum Ω fest, welche Veränderungen an einer Lösung Ω_{akt} vorgenommen werden dürfen, um eine Nachbarlösung Ω_{nb} zu erhalten. Für $\Omega_{akt} \in \Omega$ bezeichnet $N(\Omega_{akt})$ die Menge aller Lösungen, die mit Ω_{akt} benachbart sind bzw. in Relation zu Ω_{akt} stehen. Dabei ist die ShiftJob-Relation weder als reflexiv noch als irreflexiv zu bezeichnen, da eine Lösung Ω_{akt} mit sich selbst in der Form $\Omega_{akt} \in N(\Omega_{akt})$ in Beziehung stehen kann, dies aber nicht immer der Fall ist. So erhält man bspw. die Ausgangslösung, wenn ein Job, welcher der einzige in seinem Pairing ist, in ein neues leeres Pairing P_{target} verschoben und das nun leere Ausgangspairing P_{source} entfernt wird. Darüber hinaus ist die Relation weder symmetrisch noch asymmetrisch, da für

⁴¹ Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass das Job Pairing Modell keine Reihenfolge für Jobs innerhalb eines Jobpaketes vorsieht.

⁴² Durch eine Zeigervariable eines Jobs auf das Pairing, in dem er aktuell enthalten ist, wird das Identifizieren des Ausgangspairings P_{source} , in dem sich j_{shift} befindet, trivial.

zwei Lösungen die Aussagen $\Omega_{nb} \in N(\Omega_{akt})$ und $\Omega_{akt} \in N(\Omega_{nb})$ gelten können, aber nicht müssen. So kann nach einer ShiftJob-Operation sofort wieder zur Ausgangslösung zurückgekehrt werden, indem der verschobene Job anschließend wieder an seine vorige Stelle transferiert wird. Dies ist jedoch nur möglich, wenn bei der ersten Operation P_{source} nicht in zwei Teilpairings zerfällt. Bei alledem ist die Eindeutigkeit der ShiftJob-Nachbarschaftsrelation von entscheidender Bedeutung. Diese ist gegeben, wenn durch das Verschieben eines Jobs j_{shift} in ein Zielpairing P_{target} nur genau eine Nachbarlösung erreicht werden kann. Hierfür ist es wichtig, dass die maximale Sit Time echt kleiner als die minimale Ruhezeit ist, wie in es in Bedingung (5.3) gefordert wird. Falls für j_{shift} ein neues Leg in P_{target} hinzugefügt werden muss, ist dann eindeutig geklärt, ob j_{shift} in eine bestehende Duty mit aufgenommen werden kann oder ob für ihn eine neue Duty zu Beginn bzw. zum Ende des Pairings anzulegen ist.

01:	Lege einen Index i über alle $P \in \Omega_{akt}$, sodass $i \in [0, n_{\Omega_{akt}} - 1]$
02:	Bestimme Zufallszahl $z \in [0, n_{\Omega_{akt}}]$
03:	Falls $0 \leq z < n_{\Omega_{akt}}$:
04:	Wähle das Pairing P_i , für das $i = z$ gilt, als P_{target}
05:	Sonst:
06:	Erstelle ein neues Pairing als P_{target}
07:	Bilde die Menge $Q \subseteq J$ der Jobs, die P_{target} hinzugefügt werden können
08:	Falls Q nicht leer:
09:	Wähle zufällig einen Job $j \in Q$ als j_{shift}
10:	Entferne j_{shift} aus seinem bisherigen Pairing P_{source}
11:	Füge j_{shift} in P_{target} ein

Algorithmus 5.1: Ablauf der ShiftJob-Übergangsfunktion

Dass die hier vorgestellte ShiftJob-Relation der oben angeführten Anforderung des starken Zusammenhangs des Lösungsraums gerecht wird, ist über den Umweg der Trivial Solution leicht nachzuvollziehen. Um von jeder zulässigen Lösung Ω_i aus die Trivial Solution Ω_{triv} zu erreichen, reicht es aus, alle Jobs der Reihe nach als j_{shift} auszuwählen und in ein neues Pairing einzufügen. Von Ω_{triv} ausgehend können weiterhin alle zulässigen Ω_i konstruiert werden, indem ein Pairing nach dem anderen solange um entsprechende Jobs erweitert wird, bis die gewünschte Lösung erreicht wurde. Hierbei ist ggf. auf die Reihenfolge zu achten, in der die Jobs einem Pairing hinzugefügt werden. Sowohl für das Zerlegen als auch das Zusammensetzen werden jeweils maximal n_j viele ShiftJob-Operationen benötigt, was bedeutet, dass eine zulässige Lösung in höchstens $2 * n_j$ vielen Schritten in jede andere zulässige Lösung überführt werden kann. Die zweite Anforderung, dass die Anzahl der Nachbarn einer Lösung in der Anzahl der Jobs beschränkt sein soll, wird ebenfalls erfüllt, da sich die theoretisch größtmögliche Anzahl an Nachbarlösungen aus der Multiplikation der Anzahl möglicher ShiftJobs n_j mit der Anzahl der potentiellen Zielpairings n_{Ω_i} ergibt. Der Umstand, dass ein Job nicht in sein eigenes Pairing P_{source} transferiert werden kann, wird dadurch ausgeglichen, dass immer die

Möglichkeit besteht, ein neues Pairing anzulegen. Dabei kann n_{Ω_i} höchstens n_j groß werden, wenn innerhalb der Trivial Solution jeder Job in einem eigenen Pairing untergebracht wird. Hieraus folgt, dass eine Lösung maximal n_j^2 viele Nachbarn haben kann. Entsprechend der Definition der Nachbarschaftsübergänge sind alle Elemente der Trajektorie, ausgehend von einer zulässigen Startlösung, ebenfalls zulässig, da in der ShiftJob-Operation nur solche Pairings und Lösungen betrachtet werden, die sämtliche Nebenbedingungen aus Abschnitt 5.1.2 gerecht werden. Somit werden von der Relation sämtliche zuvor spezifizierten Anforderungen erfüllt.

5.3.2 SingleBranch&Price mit MLSP-Algorithmus

Die SB&P-Heuristik orientiert sich am exakten B&P-Verfahren und unterscheidet sich im Wesentlichen nur dadurch von ihm, dass nicht ein ganzer B&B-Suchbaum aufgebaut und verwaltet, sondern lediglich ein Ast durchlaufen wird. Im Zentrum steht hierbei ein als SPP formuliertes RMP, welches aufgrund seiner relaxierten Entscheidungsvariablen die Form eines Mixed Integer Problems annimmt. Wie schon beim B&P wird das RMP ausgehend von einer zulässigen Startlösung sukzessive durch CG um weitere vielversprechende Pairings ergänzt und erneut gelöst, bis die Lösung nicht weiter durch Pairings mit negativen reduzierten Kosten verbessert werden kann. Dieser zyklische Vorgang ist in Abbildung 5.4 in blau dargestellt. Stagniert der CG-Zyklus, gilt es, die zumeist nicht ganzzahlige Entscheidungsvariable x_{P_i} eines vielversprechenden Pairings P_i zu runden. Im B&P-Verfahren würde der Suchbaum an dieser Stelle um zwei Äste bzw. Teilprobleme erweitert, indem die Variable einmal auf 0 und einmal auf 1 gesetzt würde. In der SB&P-Heuristik wird die ausgewählte Variable auf 1 fixiert und dem RMP als zusätzliche Nebenbedingung der Form $x_{P_i} = 1$ übergeben, wodurch das entsprechende Pairing fortan Teil der Lösung ist. Innerhalb des in Abbildung 5.4 in grün dargestellten Fixierungszyklus können auch mehrere Pairings in die Lösung aufgenommen werden, wobei dazwischen immer wieder das RMP gelöst werden muss, um die Zulässigkeit zu prüfen. Gleichzeitig ist zu beachten, dass eine Fixierung Auswirkungen auf die Entscheidungsvariablen anderer Pairings haben kann. Im weiteren Verlauf der Heuristik werden nun abwechselnd beide Zyklen durchlaufen, da sich durch die Aufnahme weiterer Nebenbedingungen und Pairings die dualen Preise der Jobs verändern und sich somit potentiell neue Pairings aus der Lösung des Subproblems ergeben können. Dabei wird das Pricing-Subproblem stetig verkleinert, da die Jobs, die durch das Fixieren von Pairings bereits in die Lösung mit aufgenommen wurden, nicht weiter für die Konstruktion neuer Pairings herangezogen werden sollen. Der wechselseitige Prozess wird solange fortgesetzt, bis alle Jobs durch fixierte Pairings abgedeckt wurden. Dadurch, dass SB&P systematisch Variablen auf ganzzahlige Werte fixiert und so nach und nach versucht, eine geeignete Lösung zu bestimmen, kann das Verfahren auch als Diving-Heuristik charakterisiert werden.



Abbildung 5.4: Ablauf der SingleBranch&Price-Heuristik

Für das Lösen des relaxierten RMPs bietet sich die Nutzung einer hoch performanten Solverbibliothek an, weshalb die Java-Klassenbibliothek des IBM ILOG CPLEX Optimization Studios der Version 12.6.1.0 verwendet und mit deren Hilfe das zentrale SPP abgebildet wurde. Der Beschreibung in Kapitel 4.1.1 folgend, enthält die zugrunde liegende Matrix für jeden Job der Problem Instanz eine Zeile und für jedes Pairing, das aktuell Teil des RMPs ist, eine Spalte. Die Elemente der Matrix sind entweder 1 oder 0, abhängig davon, ob ein Job in einem Pairing enthalten ist oder nicht. Um zu gewährleisten, dass jeder Job genau einmal abgedeckt wird, enthält das RMP für jede Zeile eine Nebenbedingung, die der Form von (4.6) entspricht. Für jede Spalte existiert eine Entscheidungsvariable x_{P_i} , die ausdrückt, inwiefern das Pairing P_i als Teil der Lösung gewählt wurde. Im relaxierten Fall kann x_{P_i} nicht nur die Werte 0 und 1, sondern auch alle Werte dazwischen annehmen, ein Pairing also z.B. zu Dreivierteln in die Lösung mit aufgenommen werden. Weitere Bestandteile des RMPs sind ein Vektor, der die Zielfunktionswerte der einzelnen Pairings enthält, sowie eine Zielfunktion, welche sich aus der Multiplikation der Entscheidungsvariablen mit den entsprechenden Zielfunktionswerten ergibt und die eigentliche Optimierungsrichtung festlegt. Da es sich bei dem weitaus größten Teil der Elemente innerhalb der Matrix um 0-Einträge handelt und die Matrix deshalb nur sehr dünn besetzt ist, wurde bei der Implementierung auf ein Ressourcen sparendes sog. Sparse-Matrix-Format zurückgegriffen.

Im Fixierungszyklus wird, ausgehend von einer aktuellen relaxierten Lösung, iterativ eine zuvor festgelegte Anzahl an Pairings fixiert. Für die Identifizierung der zu fixierenden Pairings sind verschiedene Auswahlheuristiken denkbar. So könnte z.B. immer das Pairing gewählt werden, dessen Entscheidungsvariable den größten Wert aufweist. Da sich dieses Verfahren somit jedoch nur auf die aktuell im RMP enthaltenen Pairings konzentriert und alle weiteren möglichen Jobkombinationen außer Acht lässt, wird stattdessen immer das Pairing mit dem geringsten Zielfunktionswert gewählt und somit implizit jedes Pairing berücksichtigt. Gleichzeitig darf zu keinem Zeitpunkt ein Pairing gewählt werden, dessen Entscheidungsvariable den Wert 0 hat, um die Konsistenz der Lösung zu gewährleisten. Ist ein Pairing P_i identifiziert, wird die Untergrenze der entsprechenden Entscheidungsvariable x_{P_i} auf 1 angehoben, wodurch P_i fortan Teil der Lösung ist. Sollte das Programm mit der Anpassung nicht mehr gelöst werden können, wird diese zurückgenommen und das Pairing mit dem nächsthöheren Zielfunktionswert gewählt. Der Zyklus wird solange fortgesetzt, bis

entweder die gewünschte Anzahl an Pairings fixiert wurde, keine weiteren Pairings mehr zur Verfügung stehen oder alle Jobs durch die bisher fixierten Pairings abgedeckt wurden.

Um im Rahmen des Pricing-Problems Pairings mit negativen reduzierten Kosten zu generieren, wird, wie in Abschnitt 4.3.1.2 eingeführt, der betrachtete Flugplan als Graph $G(V, E)$ repräsentiert und auf ihn ein MLSP-Algorithmus angewendet (vgl. im Folgenden Abbildung 5.5). Die Knoten V des Graphen repräsentieren die Abflüge und Ankünfte der Flight Legs des betrachteten Flugplans und verweisen somit sowohl auf einen Flughafen als auch auf einen Zeitpunkt. Zusätzlich werden zu diesen sog. Departure- und Arrival-Knoten ein Source- und ein Sink-Knoten hinzugefügt. Diese beiden künstlichen Knoten, welche für den SPA benötigt werden, markieren den Beginn und das Ende eines jeden Pairings. Die Kanten E sind gerichtet und verbinden die Knoten des Graphen derart miteinander, dass die zeitliche Kontinuität gewahrt bleibt. Die sog. Job-Kanten repräsentieren die Jobs des Graphen und verbinden immer einen Departure- mit einem Arrival-Knoten. Da die Knoten Abflüge und Ankünfte von Legs darstellen und die Kanten Jobs abbilden, ist es möglich, dass ein Knotenpaar durch mehrere Job-Kanten verbunden wird. Sit- und Layover-Kanten verbinden Arrival- und Departure-Knoten und ermöglichen die Hintereinanderschaltung von Jobs verschiedener Flüge. Die Kanten dieser beiden Typen werden bei der Erzeugung des Graphen generiert und bilden alle möglichen Verknüpfungen ab, die sowohl zeitlich als auch räumlich zulässig sind. Um nicht nur das sukzessive, sondern auch das parallele Durchführen von Jobs zu ermöglichen, wird für jedes Leg eine sog. Back-Kante erzeugt, die einen Arrival-Knoten mit einem entsprechenden Departure-Knoten verbindet. Dieser Kantentyp verhält sich im Vergleich zu allen anderen Typen zeitlich entgegengesetzt. Abschließend werden noch künstliche Source- und Sink-Kanten generiert, die den Source-Knoten mit allen Departure-Knoten und alle Arrival-Knoten mit dem Sink-Knoten verbinden.

Anhand der hier vorgestellten Graphstruktur können alle zulässigen Pairings erzeugt werden. Damit darüber hinaus nicht auch unzulässige Pairings konstruiert werden können, gilt es, eine ganze Reihe von Bedingungen einzuhalten. Einige davon können in einem korrekt erzeugten Graph bereits nicht mehr verletzt werden, da dieser nur Kanten enthält, die die räumliche und zeitliche Kontinuität gewährleisten, was auch die Berücksichtigung von minimalen und maximalen Sit- und Layoverzeiten mit und ohne Flugzeugwechsel einschließt. In dem Beispiel in Abbildung 5.5 ist zu erkennen, dass keine Job-Kante an dem Flughafen ankommt, von dem sie ausgeht. Sit- und Layover-Kanten beginnen und enden immer am selben Flughafen. Bis auf die Back-Kanten, die die parallele Ausführung von Jobs ermöglichen, weisen alle Kanten, dem Zeitverlauf folgend, nach unten. Da jedes zulässige Pairing am Source-Knoten beginnen und am Sink-Knoten enden muss, weisen alle möglichen Pfade nur zulässige Knoten- und Kantenkombinationen auf.

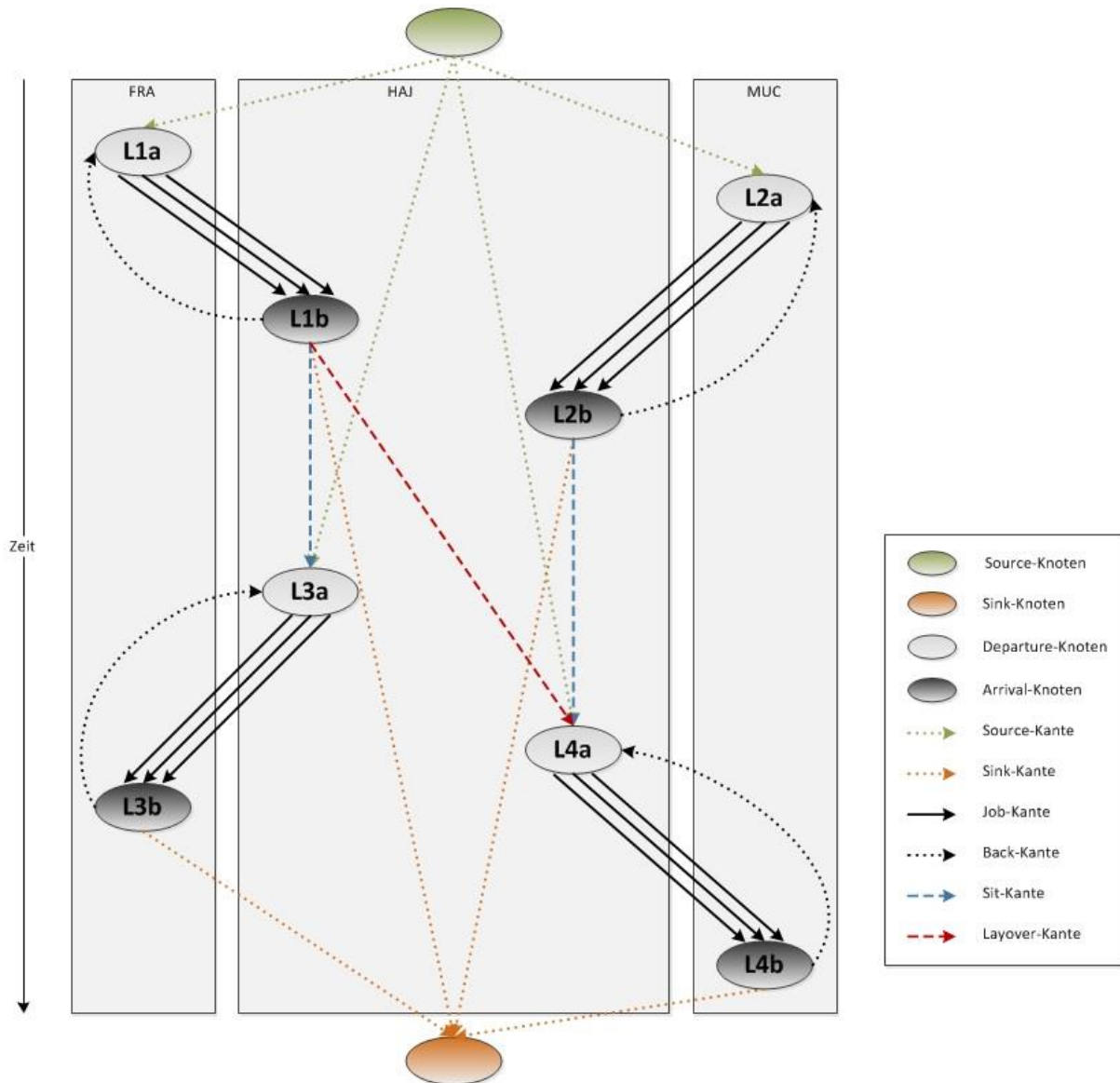


Abbildung 5.5: Darstellung des Flugplans als Graph zur Lösung des Pricing-Problems

Pairingspezifische Restriktionen bzgl. der Arbeitszeit und der Arbeitsbelastung können nicht anhand der allgemeinen Graphstruktur abgebildet werden. Um sie bei der Pfadkonstruktion dennoch berücksichtigen zu können, werden die hierfür benötigten Parameter innerhalb von Labels⁴³ mitgeschrieben, auf die bereits in Abschnitt 4.3.1.2 eingegangen wurde. So werden bei der Verlängerung eines Pfades um eine Kante Pairing-Werte, wie z.B. die Anzahl der im Pairing enthaltenen Jobs oder Duties oder die Gesamtarbeitszeit, um die entsprechenden Werte der Kante erhöht. Würde die Pfadverlängerung einen gesetzten Grenzwert verletzen, wäre die betroffene Kante kein Kandidat mehr, das Pairing fortzusetzen. Neben den Parametern, die für die Erzeugung von (Teil-) Pfaden benötigt werden, enthält ein Label Attribute, die für die Durchführung des im Folgenden beschriebenen Algorithmus gebraucht werden. Weiterhin enthält ein Label sämtliche Attribute, die für

⁴³ Labels entsprechen unvollständigen oder auch vollständigen Pfaden durch den Graphen, wobei ‚unvollständig‘ bedeutet, dass der Sink-Knoten noch nicht erreicht wurde. Labels bzw. Pfade entsprechen darüber hinaus Pairings, wobei ein unvollständiges Pairing als unzulässig verworfen wird, wenn sich keine Fortsetzungsmöglichkeit mehr bietet.

die Berechnung aller sechs Zielparameter und des gesamten Zielfunktionswertes, wie in (5.60) dargestellt, benötigt werden. Eine vollständige Übersicht über die Attribute eines Labels wird in Tabelle 5.2 gegeben.

Attribut	Beschreibung	Benötigt für...
Knoten	Der Knoten auf dem das Label gespeichert ist.	...die Durchführung des Algorithmus.
Vorgängerlabel	Das Label, das auf dem Pfad genau vor diesem Label liegt.	...die Durchführung des Algorithmus.
Vorgängerkante	Die Kante, die zum Knoten dieses Labels führt.	...die Rekonstruktion des Pfades.
Startflughafen	Flughafen, an dem der Pfad begonnen wurde.	...die Berechnung des CrewBase-Violation-Values.
# Jobpakete in Duty	Anzahl an Jobpaketen bzw. Flight Legs auf aktuellem Duty-Teilpfad.	...die Einhaltung der Leg-Obergrenze eines Pairings.
# Duties in Pairing	Anzahl an Duties auf dem Pfad.	...die Einhaltung der Duty-Obergrenze eines Pairings.
Duty Time	Zeitdauer des aktuellen Duty-Teilpfades.	...die Einhaltung der Arbeitszeitrestriktion.
Total Duty Time	Kumulierte Zeitdauer aller Duties auf dem Pfad.	...die Berechnung des Excessive-Cost-Values.
Pairing Time	Gesamtdauer des Pfades.	...die Einhaltung der Arbeitszeitrestriktion.
Crew Type	Crewtyp der Jobs auf dem Pfad.	...die Einhaltung der Crewtyp-Begrenzung.
Pairing Max Rank	Der höchste Rang, der für die Jobs auf dem Pfad benötigt wird.	...die Berechnung des Prim-Config-Values.
Rank Sum	Summe der Differenzen aus Max Rank und den Rängen der Jobs auf dem Pfad.	...die Berechnung des Prim-Config-Values.
Auxiliary Qualifications	Menge der Qualifikationen, die für die Jobs auf dem Pfad benötigt werden.	...die Berechnung des Aux-Config-Values.
Aircraft Models	Menge der Flugzeugtypen, die für die Jobs auf dem Pfad benötigt werden.	...die Einhaltung der Flugzeugtyp-Begrenzung.
Job Package	Menge der Jobs, die auf dem aktuellen Jobpaket-Teilpfad liegen.	...die Einhaltung von Konstruktionsregeln.
Kumulierter dualer Wert	Summe der dualen Werte der Jobs auf dem Pfad.	...die Berechnung des reduzierten Zielfunktionswertes.

Tabelle 5.2: Attribute eines Labels

Im Rahmen der SB&P-Heuristik wird bei der Lösung des Pricing-Problems innerhalb des CG die Erzeugung möglichst vieler potentiell vorteilhafter Pairings angestrebt, um schnell eine gute Lösung des SPP zu erreichen. Um dem linearen Solver in jeder Iteration eine breite Auswahl an Pairings bieten zu können, wird nicht nur nach Jobkombinationen gesucht, deren gesamter Zielfunktionswert niedrig ist, sondern auch nach solchen, die in einzelnen der sechs Zieldimensionen gut abschneiden. Das hierfür verwendete MLSP-Verfahren, welches in Algorithmus 4.1 skizziert und im Folgenden beschrieben wird, entspricht im Kern dem SPA von Dijkstra, kann aufgrund der verwendeten Labels jedoch mehr als einen Zielparameter gleichzeitig betrachten.

```

01:   Für jeden Knoten  $v \in V$ :
02:        $LabelListe(v) := \emptyset$ 
03:    $Q := \emptyset$ 
04:   Füge  $StartLabel$  zu  $Q$  hinzu
05:   Wiederhole, solange  $Q$  nicht leer ist:
06:        $l :=$  Label in  $Q$  mit kleinstem Ordnungswert
07:       Entferne  $l$  aus  $Q$ 
08:        $v := Knoten(l)$ 
09:       Für jede Kante  $e = (v, w) \in E$ :
10:            $l_{new} := CreateLabel(l, e)$ 
11:           Falls  $l_{new}$  zulässig ist und von keinem Label aus  $LabelListe(w)$  dominiert wird:
12:               Füge  $l_{new}$  zu  $LabelListe(w)$  hinzu
13:               Füge  $l_{new}$  zu  $Q$  hinzu
14:           Entferne alle Label aus  $LabelListe(w)$ , die  $l_{new}$  dominiert

```

Algorithmus 5.2: Multilabel SPA

Ausgehend von einem Source-Knoten werden im Verlauf des Algorithmus dynamisch (Teil-)Pfade erzeugt, deren Parameter in Labels erfasst und diese sowohl in den hierfür vorgesehenen *LabelListe* der jeweiligen Knoten v , als auch in einer Gesamtliste Q gespeichert werden. Während der Initialisierungsphase (Zeilen 1 bis 4) werden die Listen aller Knoten und die Gesamtliste geleert und auf dem Startknoten ein *StartLabel* erzeugt, dessen Werte alle 0 bzw. \emptyset sind. Im Hauptteil des Algorithmus (Zeilen 5 bis 14), der solange iteriert wird, bis Q leer ist, werden zunächst das kleinste Element aus Q als l und dessen Knoten wiederum als v identifiziert und l aus Q entfernt (Zeilen 6 bis 8). Hierbei ist Q als Priority Queue implementiert, die ihre Labels sortiert vorhält. Die Sortierung erfolgt anhand der einzelnen Zielparameter in folgender Reihenfolge: Zielfunktionswert v , $u_{excessiveCost}$, $u_{bufferViolation}$, $u_{rotationChanges}$, $u_{primConfig}$, $u_{auxConfig}$ und $u_{crewBaseViolation}$. Dann wird versucht, den bisherigen Pfad über jede den Knoten v verlassende Kante e zu verlängern (Zeile 9). In der Funktion *CreateLabel*(l, e) wird ein neues Label l_{new} erzeugt, für das die Werte des Vorgängerlabels l übernommen und mit den Ressourcenverbräuchen der Kante e verrechnet werden. An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass es vom jeweiligen Kantentyp abhängt, welche Attributsausprägungen sich von l_{new} im Gegensatz zu l verändern. Sollten die Parameter von l_{new} innerhalb der geforderten Grenzwerte liegen, wird es als zulässig bezeichnet. In diesem Fall wird weiterhin geprüft, ob es von einem bereits bestehenden Label des Zielknotens w der Kante e dominiert wird (Zeile 11). Ein Label wird genau dann von einem anderen dominiert, wenn mindestens einer seiner sieben Zielparameter⁴⁴ schlechter und zugleich keiner besser als die des zum Vergleich herangezogenen Labels ist. Wird ein Label dominiert, wird dessen Teilpfad im Rahmen des sog. Prunings verworfen und nicht weiter verfolgt. Wird l_{new} nicht dominiert, wird es zur *LabelListe*(w) und zur Gesamtliste Q hinzugefügt (Zeilen 12 und 13). Abschließend werden noch die Labels von w

⁴⁴ Der Zielfunktionswert, welcher sich aus der Zielerreichung der sechs betrachteten Dimensionen ergibt, wird hier zusätzlich noch einmal separat herangezogen.

entfernt, die ihrerseits von l_{new} dominiert werden (Zeile 14). Ist Q abgearbeitet, endet der Algorithmus und die dominierenden Pfade bzw. Pairings können, ausgehend von den Labels des Sink-Knotens, über die Vorgängerbeziehungen rekonstruiert werden.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass sich durch die Berücksichtigung dualer Job-Werte aus dem RMP innerhalb des MLSP-Algorithmus negative Gewichte auf den Job-Kanten ergeben können. Da ein bereits abgearbeiteter Knoten (ein Knoten, zu dem vermeintlich bereits ein kürzester Weg gefunden wurde) keine Neuberechnung anstößt, wenn sich durch negative Gewichte ein kürzerer Weg zu ihm finden lässt, kann das auf Dijkstras SPA basierende Verfahren das Auffinden der kürzesten Wege nicht garantieren. Auch wenn dieser Umstand den im Pricing-Problem angestrebten Zielen nicht im Wege steht, sei der Vollständigkeit halber angemerkt, dass auch alternative Vorgehensweisen, wie der SPA von Bellmann und Ford oder das Verfahren von Johnson (vgl. [John]), die mit negativen Kantengewichten umgehen können, an dieser Stelle keine Abhilfe bieten würden, da die komplexe Berechnung der Zielfunktionswerte dazu führt, dass einige der Kantengewichte, wie etwa der Primary- oder auch der Auxiliary-Config-Value, davon abhängen, in welchen Teilpfad sie aufgenommen werden, und somit im Vorfeld noch nicht bekannt sind.

5.3.3 Validierung und Vergleich

5.3.3.1 Optimierungsreihen anhand künstlicher Testinstanzen

Um die Funktionsfähigkeit der beiden hier vorgestellten Heuristiken zu zeigen und ihre Leistungspotentiale abzuschätzen und gegenüberzustellen, wurden mit der ‚Stunde-Instanz‘, der ‚Tag-Instanz‘ und der ‚Woche-Instanz‘ künstliche Vergleichsgrundlagen geschaffen. Die drei Flugpläne bilden dabei in etwa den Aufgabenumfang ab, den ein realer Flugplan innerhalb einer Stunde, eines Tages bzw. einer Woche beinhaltet. Der zentrale Aspekt der Testinstanzen ist der, dass mit deren Generierung die Konstruktion der optimalen Lösungen der Personaleinsatzplanungsprobleme einhergeht und somit der genaue Abstand von Optimierungsergebnissen zu den Optima ermittelt werden kann. Im Erzeugungsprozess werden einer Instanz solange Pairings mit minimalen Zielfunktionswerten hinzugefügt, bis eine zuvor festgelegte Mindestanzahl an Jobs erreicht wurde. Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, können die Pairings dabei entweder zwei oder vier Legs enthalten, was den Hub-Spoke- und den Hub-Spoke-Shuttle-Umläufen in einem H&S-Flugnetz entspricht. Obwohl die Start- und Zielflughäfen, die Flugdauer der einzelnen Legs sowie die Art und Anzahl der auf ihnen durzuführenden Jobs zufällig ausgewählt werden, werden entsprechende Planungsbedingungen derart berücksichtigt, dass eine günstigste Planung garantiert werden kann. Im Detail bedeutet das das Vermeiden von Übernachtungen, unnötigen Wartezeiten, Rotationswechseln und Crew Base Verstößen, das Einhalten von minimalen Pufferzeiten und minimalen garantierten Arbeitszeiten pro Duty und das homogene Zusammenstellen von Primary-Jobs, denen in der Kabine nicht mehr als ein Auxiliary-Jobtyp pro Umlauf hinzugefügt wird. Abbildung 5.6 visualisiert das effiziente zeitliche und räumliche Planungsmuster der Pairings. Auf diese Weise lassen sich die Werte

der Zielfunktionsparameter auf 0% reduzieren. Einzig bei dem Excessive-Cost-Value gelingt dies nicht, da die Personenarbeitszeiten, die für die Einhaltung der Pufferzeiten zwischen den Jobs einer Duty eingeplant werden müssen, als vermeidbare Kosten gewertet werden. Da eine Minute vermeidbare Arbeitszeit jedoch nicht so hoch bestraft wird wie eine Minute unterschrittener Pufferzeit, handelt es sich dennoch um das optimale Planungsergebnis.

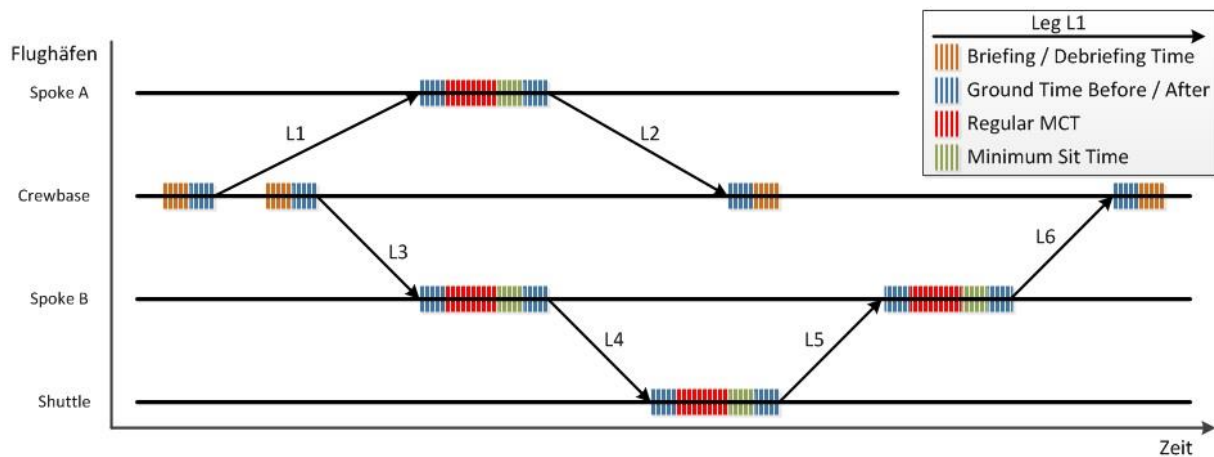


Abbildung 5.6: Visualisierung des effizienten zeitlichen und räumlichen Planungsmusters für Testpläne

In Tabelle 5.3 werden die einzelnen Ausprägungen der Flug- und Personaleinsatzplan-Parameter der Testinstanzen gegenübergestellt. Im Fokus steht hier die jeweilige Anzahl der Jobs, da sie für den Komplexitätsgrad während der Optimierung maßgebend ist. Zusätzlich gilt jedoch zu beachten, dass alle drei Pläne nur jeweils einen Flugzeugtyp beinhalten. Dies wurde so beabsichtigt, um viele Möglichkeiten für Jobkombinationen zu schaffen und die Testfälle somit herausfordernder zu gestalten. Im unteren Teil der Tabelle sind die Bereiche aufgeführt, in denen sich die Werte der einzelnen Zielfunktionsparameter bewegen können. Die theoretischen unteren und oberen Schranken wurden entsprechend der Formeln (5.42) bis (5.53) aus dem Abschnitt 5.2.2 berechnet.

	Parameter	Stunde-Instanz	Tag-Instanz	Woche-Instanz
Parameter der Flug- und Personaleinsatzpläne	# Flughäfen	5	50	100
	# Routen	18	306	1.570
	# Flight Legs	30	510	3.644
	# Flugzeugtypen	1	1	1
	# Flugzeuge	9	174	1.198
	# Qualifikationen	11	11	11
	# Jobs	530	10.048	70.014
Absolute Wertebereiche der Zielfunktionsparameter	Excessive Cost Value	0 – 176.988	0 – 3.343.814	0 – 23.082.874
	Buffer Violation Value	0 – 6.615	0 – 125.595	0 – 875.175
	Rotation Change Value	0 – 441	0 – 8.373	0 – 58.345
	Prim Config Value	0 – 461	0 – 8.791	0 – 61.260
	Aux Config Value	0 – 1.696	0 – 32.148	0 – 224.041
	CB Violation Value	0 – 1.060	0 – 20.096	0 – 140.028

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Parameterausprägungen und Wertebereiche der Testinstanzen

Im Rahmen der Testreihen wurden sowohl die SA- als auch die SB&P-Heuristik auf alle drei Instanzen angewendet. Für eine wirksame Verwendung von SA wurde für jede Problemgröße eine individuelle Abkühlstrategie gewählt, wobei sich deren Kalibrierungen vielmehr auf Beobachtungen und Erfahrungswerte stützten, als auf detaillierte Sensitivitätsanalysen, deren Aufwand zur Durchführung nicht genügend Nutzen für diese Arbeit bedeutet hätte. Die Auswahl der Starttemperatur T_0 orientiert sich an der potentiellen Zielfunktionsänderung, die ein Übergang zu einer Nachbarlösung bedeuten kann, damit diese eine angemessene Chance hat, angenommen oder abgelehnt zu werden. Da diese Änderungen in den durchgeführten Testreihen im Vergleich zu den festgelegten oberen Schranken nur sehr gering sind, wurden die Starttemperaturen sehr niedrig gewählt. Die Bestimmung des Temperaturniveaus T_t und der Anzahl der Übergänge n_t jeder Iteration t wurde anhand der Formeln (5.65) und (5.66) vorgenommen:

$$T_t = T_0 * \alpha^t \quad (5.65)$$

$$n_t = t * n_{Basis} \quad (5.66)$$

Aus Zeitgründen wurde der Parameter t_{max} verwendet, der die Anzahl möglicher Temperaturniveaus begrenzt, auch wenn zuvor noch Verbesserungen des Zielfunktionswertes erreicht wurden. Innerhalb der SB&P-Prozedur gilt gleiches für den Parameter n_{max}^{CG} , der eine Obergrenze an Iterationen in den CG-Zyklen vorgibt. Die Anzahl an Jobs, die in jedem Fixierungszyklus fest in die Lösung mit aufgenommen werden soll, wird durch den Parameter n^{Fix} bestimmt. Die Kombination der beiden SB&P-Parameter legt fest, wie oft der MLSP-Algorithmus und der CPLEX-Solver iterationsübergreifend aufgerufen werden, und hat damit großen Einfluss auf die Laufzeit der Heuristik. Im Sinne guter Lösungen darf n_{max}^{CG} im Verhältnis zu n^{Fix} nicht zu gering gewählt werden, da ansonsten, aufgrund zu wenig auswählbarer Spalten, unvorteilhafte Pairings fixiert werden müssen. Ein Überblick über sämtliche verwendete Parameterausprägungen beider Heuristiken ist in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Gewichtung der Zielfunktionsparameter wurde unter Berücksichtigung der Formeln (5.61) und (5.62) für alle Tests wie folgt festgelegt:

$$w_{excessiveCost} = 0,1; w_{bufferViolation} = 0,1; w_{rotationChange} = 0,1;$$

$$w_{primConfig} = 0,1; w_{auxConfig} = 0,1; w_{crewBaseViolation} = 0,5$$

Die erreichten Zielfunktionswerte (engl.: objective function value, OFV) der Testreihen werden in Abbildung 5.7 den jeweiligen Optima gegenübergestellt, wobei beide Verfahren mit den beiden Konstruktionsheuristiken ‚Trivial Solution‘ und ‚Linear Chainer‘, welche in Abschnitt 4.3.2.3 beschrieben sind, kombiniert wurden. Die Zielfunktionswerte der durch sie erstellten initialen Lösungen werden ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Da es sich bei SA im Gegensatz zu SB&P um einen stochastischen Algorithmus handelt, wurde hier in jeder Testreihe der Durchschnitt aus zehn Läufen gebildet. Einen differenzierteren Blick erlauben die Abbildungen 5.9 bis 5.14, in denen die

Verteilungen aller Ergebnisse für jeden Zielfunktionsparameter individuell in Form eines Boxplots aufgeführt werden. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der SB&P-Heuristik ebenfalls eingezeichnet.

	Parameter	Stunde-Instanz	Tag-Instanz	Woche-Instanz
SA	Starttemperatur T_0	0,02	0,0003	0,00002
	Abkühlfaktor α	0,98	0,95	0,95
	Basis-Anzahl Übergänge n_{Basis}	300	100	100
	Max. Anzahl Temperaturniveaus t_{max}	100	100	100
SB&P	Max. Anzahl CG-Iterationen n_{max}^{CG}	500	50	50
	Anzahl zu fixierender Jobs n^{Fix}	1	50	200

Tabelle 5.4: Parameterausprägungen der durchgeführten Testreihen

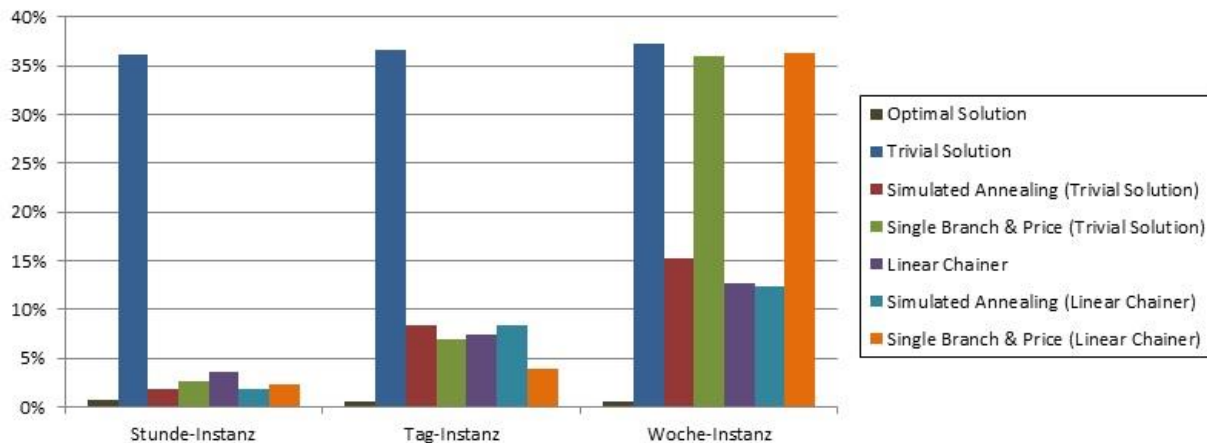


Abbildung 5.7: Übersicht über die erreichten OFVs der Optimierungsreihen

Zunächst fällt auf, dass die Optima aller drei Instanzen im Bereich von 0,637% bis 0,671% dicht beieinander liegen. Gleiches gilt für die Trivial Solution, welche zwischen 36,152% und 37,193% die Extremwerte auf der anderen Seite der Skala darstellen. Die Ergebnisse des Linear Chainers liegen in den Wertebereichen, in denen sich auch die befinden, die durch SA und SB&P erreicht wurden. Mit zunehmender Komplexität der Testinstanzen entfernen sich diese Bereiche vom jeweiligen Optimum. Während bei der Stunde-Instanz SA auf Basis beider Konstruktionsheuristiken noch leicht bessere Ergebnisse liefert als SB&P, verhält es sich bei der Tag-Instanz umgekehrt. Unter Verwendung des Linear Chainers konnte SB&P hier den Zielfunktionswert von SA sogar halbieren. SA beginnt die Suche an dieser Stelle bei 7,5%, verschlechtert sich aufgrund der noch hohen Temperatur nach einem Viertel der Laufzeit auf 24% und schafft es dann innerhalb der vorgegebenen 100 Temperaturniveaus nicht mehr, den Ausgangswert zu unterbieten. Bei den Werten der Woche-Instanz fallen die beiden Ausreißer der SB&P-Heuristik auf. Die beiden Optimierungsläufe wurden wegen Zeitüberschreitung abgebrochen, da sie nach über 12 Stunden Laufzeit erst sieben CG- und Fixierungszyklen durchlaufen hatten. Wie an den erreichten Ergebnissen abzulesen ist, ließ das frühzeitige Fixieren aller Pairings

zum Erstellen einer zulässigen Lösung die Suche praktisch auf die Trivial Solution zurückfallen. Das hier aufgetretene Phänomen wird weiter unten in diesem Abschnitt ausführlicher betrachtet.

	Konstruktionsheuristik	Stunde-Instanz	Tag-Instanz	Woche-Instanz
SA	Trivial Solution	1,792%	8,426%	15,246%
	Linear Chainer	1,856%	8,345%	12,359%
SB&P	Trivial Solution	2,659%	6,947%	35,928%
	Linear Chainer	2,391%	3,985%	36,313%

Tabelle 5.5: Indirekter Vergleich der Zielfunktionswerte beider Konstruktionsheuristiken

Der direkte Vergleich beider Konstruktionsheuristiken fällt deutlich zu Gunsten des Linear Chainers aus, der in den drei Testreihen einen 10 mal, 5 mal bzw. 3 mal besseren Wert erzielte als die Trivial Solution. Der indirekte Vergleich, bei dem es darum geht, welche Startheuristik sich als geeigneter für SA und SB&P erweist, lässt keinen klaren Favoriten erkennen, da die in Tabelle 5.5 gegenübergestellten Werte nicht signifikant voneinander abweichen. Auch wenn man die Zielfunktionsparameter in den Abbildungen 5.9 bis 5.14 einzeln betrachtet, können keine signifikanten Abweichungen der Lösungsmuster unter Verwendung der Trivial Solution (links) und des Linear Chainers (rechts) festgestellt werden. Es wird vielmehr ein Unterschied zwischen den Lösungsmustern der beiden Optimierungsheuristiken selbst deutlich. Obwohl sich mit SA und SB&P, abgesehen von den Ausreißern der Woche-Instanz, ähnliche Ergebnisse erzielen lassen, erreicht SA deutlich bessere Rotation Change und Prim Config Values, wohingegen SB&P zumeist bei den Crew Base Violation Values besser abschneidet. Diese Unterschiede sind instanzübergreifend gut zu erkennen.

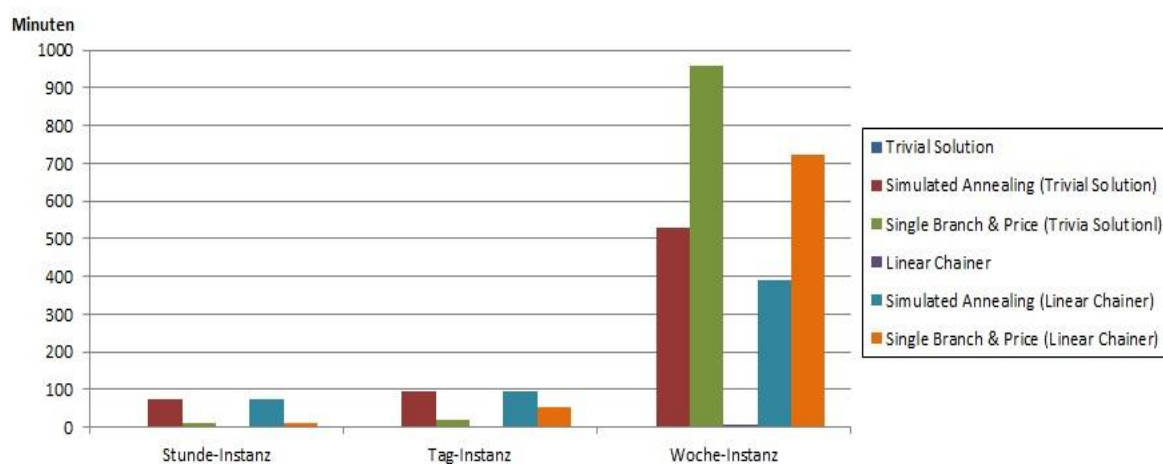


Abbildung 5.8: Übersicht der Optimierungszeiten

Um neben den Ergebnissen auch die Laufzeiten der verschiedenen Verfahren in den Vergleich einzubeziehen, werden in Abbildung 5.8 die während der Testreihen benötigten Optimierungszeiten

gegenübergestellt.⁴⁵ Die Konstruktionsheuristiken kommen zumeist mit Laufzeiten von unter einer Minute aus, einzig der Linear Chainer benötigt bei der Woche-Instanz acht Minuten. Bei Stunde- und Tag-Instanz liegt der durchschnittliche Zeitverbrauch von SA in etwa bei 75 und 95 Minuten, der von SB&P mit etwa 12 und 35 Minuten deutlich darunter. Hierbei spielt die Wahl der Startheuristik keine maßgebende Rolle. Wenn man die Zeiten, zu denen SB&P bei der Woche-Instanz abgebrochen wurde ignoriert, bleibt hier nur festzuhalten, dass ausgehend von der Trivial Solution im Durchschnitt zwei Stunden und 20 Minuten länger gerechnet wurde als unter Verwendung des Linear Chainers.

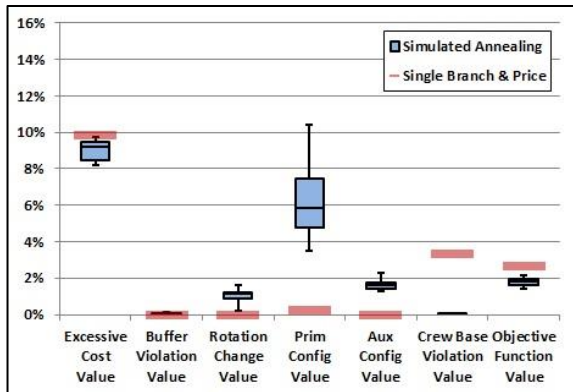


Abbildung 5.9: OFVs Stunde-Inst. (Trivial Solution)

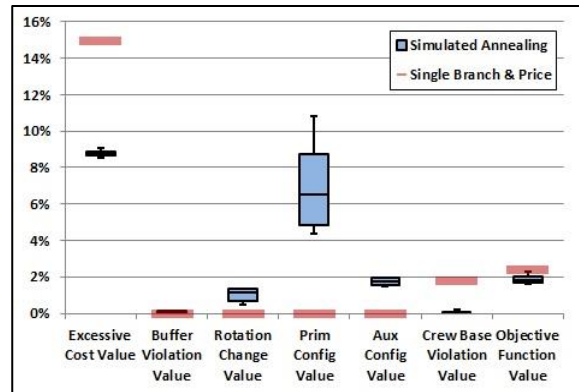


Abbildung 5.10: OFVs Stunde-Inst. (Linear Chainer)

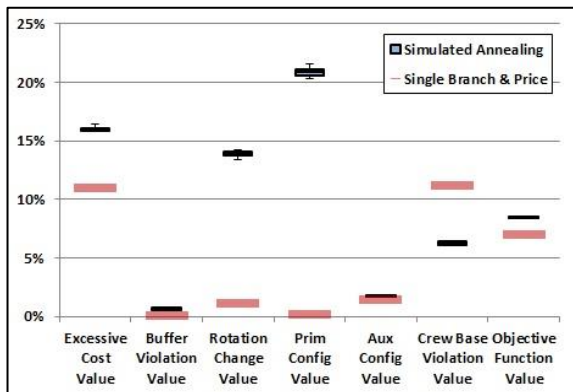


Abbildung 5.11: OFVs Tag-Inst. (Trivial Solution)

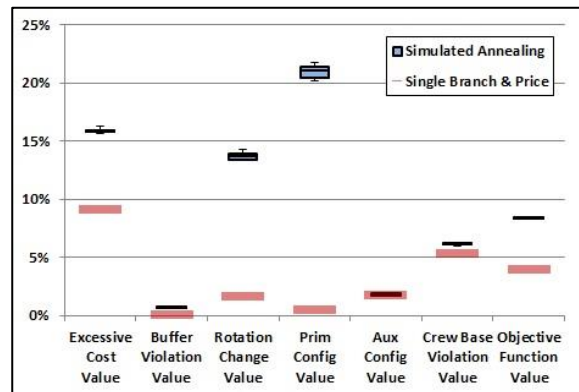


Abbildung 5.12: OFVs Tag-Inst. (Linear Chainer)

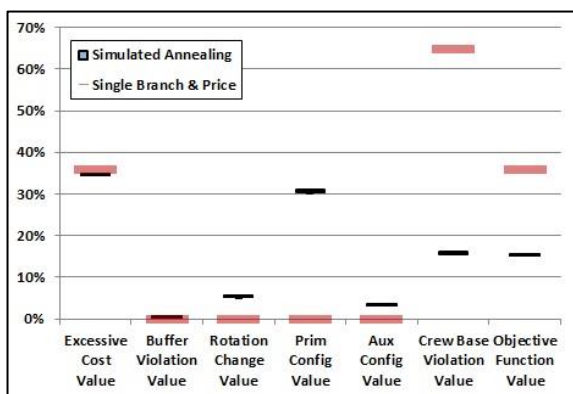


Abbildung 5.13: OFVs Woche-Inst. (Trivial Solution)

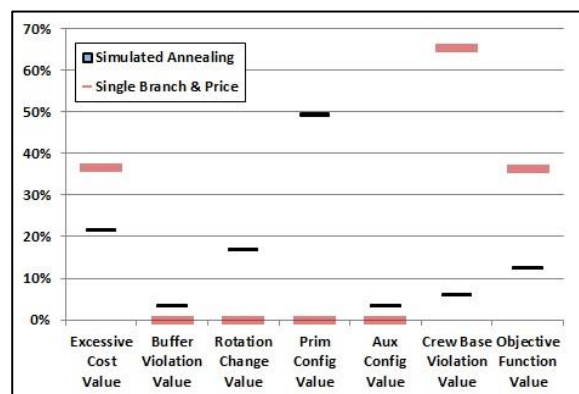


Abbildung 5.14: OFVs Woche-Inst. (Linear Chainer)

⁴⁵ Für die Durchführung der Testreihen wurde ein Sony Vaio Laptop der Serie VPCF13 verwendet. Als CPU waren ein Intel Core i7-740QM mit 4 x 1,73 GHz und 6 GB RAM verbaut.

5.3.3.2 Verhaltensweisen der Heuristiken

Im Folgenden werden die allgemeinen Verhaltensweisen beider Lösungsmethoden anhand einiger ausgewählter Läufe der zuvor beschriebenen Testreihen genauer betrachtet und deren Auswirkungen auf Ergebnisgüte und Laufzeit erläutert.

Die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen die Anwendung der SA-Heuristik auf die Woche-Instanz ausgehend von der Trivial Solution. Über den Verlauf der 100 Iterationen mit sinkenden Temperaturniveaus kann der Zielfunktionswert von 37,193% auf 15,221% reduziert werden. Während Abbildung 5.16 die linear ansteigende Anzahl an Nachbarschaftsdurchsuchungen der Iterationen zeigt, wird in Abbildung 5.15 die prozentuale Aufteilung auf die möglichen Reaktionen auf die Suchergebnisse dargestellt. Entsprechend dem in Algorithmus 4.3 vorgestellten Prozedere werden sämtliche Nachbarn, die eine Verbesserung darstellen, angenommen („Better Taken“). Mit sinkendem Temperaturniveau wird deren Anzahl weniger und mehr schlechtere Lösungen werden gefunden. Werden von ihnen zunächst noch viele angenommen („Worse Taken“), werden zunehmend mehr und mehr von ihnen abgelehnt („Worse Denied“). Dass Übergänge durchgeführt werden, die keine Veränderung des Zielfunktionswertes bedeuten („Equal Taken“) oder, der Arbeitsweise des implementierten Algorithmus folgend, erst gar kein Nachbar gefunden wird („No Neighbor“), sind in diesem Fall Randerscheinungen. Die Tatsache, dass der Rechenaufwand mit jeder Iteration linear ansteigt, der Zeitbedarf pro Iteration jedoch nicht, deutet darauf hin, dass die Art der als Reaktion auf das Suchergebnis durchgeführten Operationen die Laufzeit beeinflusst. Dies scheint insofern plausibel, als dass das Überführen einer Lösung zu einer benachbarten Lösung in den Fällen Better, Worse und Equal Taken mehr Rechenaufwand bedeutet als das Ablehnen oder Nicht-Finden von Nachbarn. Zum Vergleich werden die Abbildungen 5.17 und 5.18 herangezogen, die einen entsprechenden Lauf auf Basis des Linear Chainer zeigen. Hier fällt der Anteil von Nachbarschaftsübergängen von vorne herein niedriger aus, was in einer gleichmäßiger ansteigenden Zeitbedarfskurve resultiert.

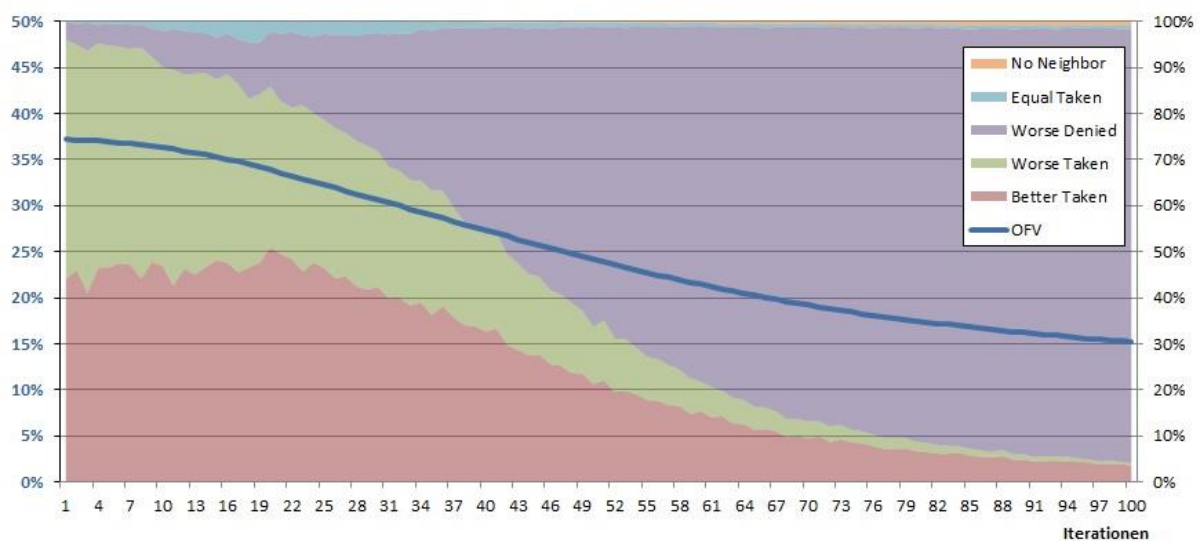


Abbildung 5.15: Simulated Annealing Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Trivial Solution)

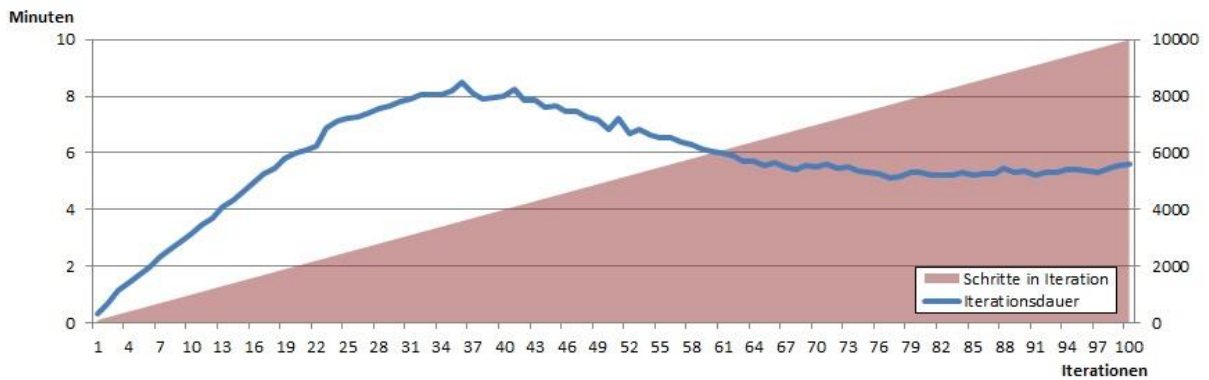


Abbildung 5.16: Simulated Annealing Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Trivial Solution)

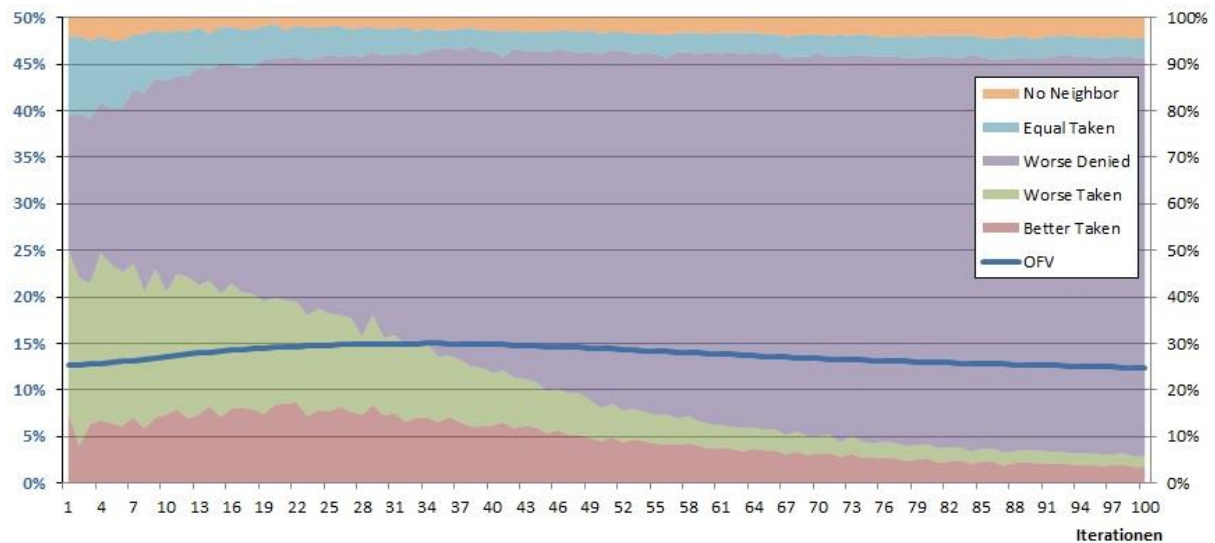


Abbildung 5.17: Simulated Annealing Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Linear Chainer)



Abbildung 5.18: Simulated Annealing Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Linear Chainer)

Die Abbildungen 5.19 und 5.20 beschreiben die Anwendung der SB&P-Heuristik auf die Tag-Instanz ausgehend von der Trivial Solution. Es ist zu sehen, dass 67 Wechsel zwischen CG- und Fixierungszyklus benötigt wurden, um alle 10.048 Jobs der Instanz fest in die Lösung aufzunehmen. Pro Iteration sind zwei Zielfunktionswerte eingetragen: in blau der Wert nach dem CG-Zyklus und in rot der Wert, nachdem die Entscheidungsvariablen der Jobs der 50 bestbewerteten Pairings fest auf eins gesetzt wurden. Im Verlauf der Optimierung konnte der Zielwert von 36,550% auf 6,947% abgesenkt werden, wobei die Werte nach den CG-Zyklen sehr dicht bei denen nach den

Fixierungszyklen lagen. Die Laufzeit der Prozedur ergab sich fast ausschließlich aus dem Zeitverbrauch innerhalb der CG-Zyklen, innerhalb derer der MLSP-Algorithmus auf einen Graphen mit 1.022 Knoten und 14.540 Kanten angewendet wurde (siehe Tabelle 5.6).

	Parameter	Stunde-Instanz	Tag-Instanz	Woche-Instanz
Nodes	# Source	1	1	1
	# Sink	1	1	1
	# Departure	30	510	3.644
	# Arrival	30	510	3.644
	# Nodes	62	1.022	7.290
Edges	# Source	30	510	3.644
	# Sink	30	510	3.644
	# Job	530	10.048	70.014
	# Sit	52	1.788	16.395
	# Layover	0	1.174	141.001
	# Back	30	510	3.644
	# Edges	672	14.540	238.342

Tabelle 5.6: Quantifizierung der Graph-Repräsentationen der Testinstanzen

Bei der Optimierung derselben Instanz auf Basis der Initiallösung des Linear Chainers konnte innerhalb der ersten elf Iterationen keine Verbesserung erzielt werden (vgl. Abbildung 5.21). Innerhalb der nächsten zehn Iterationen werden Jobs fixiert, die zunächst zu einem Anstieg des Zielfunktionswertes führen. Hier liegen die Werte nach den CG-Zyklen deutlich unterhalb derer, die nach den Fixierungszyklen gemessen wurden. Erst danach nähern sich die Ergebnisse beider Zyklen wieder an und sinken abschließend auf einen Wert von 3,985%. Die Zeitbedarfskurve in Abbildung 5.22 zeigt, dass die Rechenzeiten pro Iteration bis zur elften Iteration exponentiell ansteigen. Erst danach fallen die Werte ab und gleichen sich ihren Gegenstücken aus dem zuvor beschriebenen Optimierungslauf an. Aus der Abbildung geht hervor, dass der temporäre Anstieg des Zeitbedarfs nicht im Verhältnis zur anwachsenden Größe der RMPs (in der Abbildung hellgrün als ‚# Pairings‘ gekennzeichnet) steht. Dies deutet darauf hin, dass vielmehr die Strukturen der im RMP enthaltenen Spalten, evtl. deren Ähnlichkeit zueinander, negativen Einfluss auf die Laufzeit der Berechnungen des Linearen Solvers der CPLEX-Bibliothek hatten.

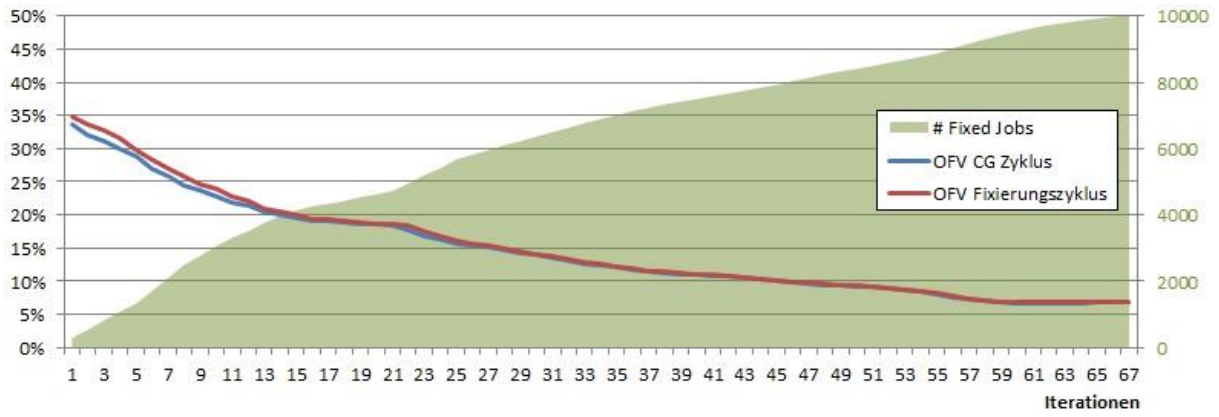


Abbildung 5.19: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Tag-Instanz mit Trivial Solution)

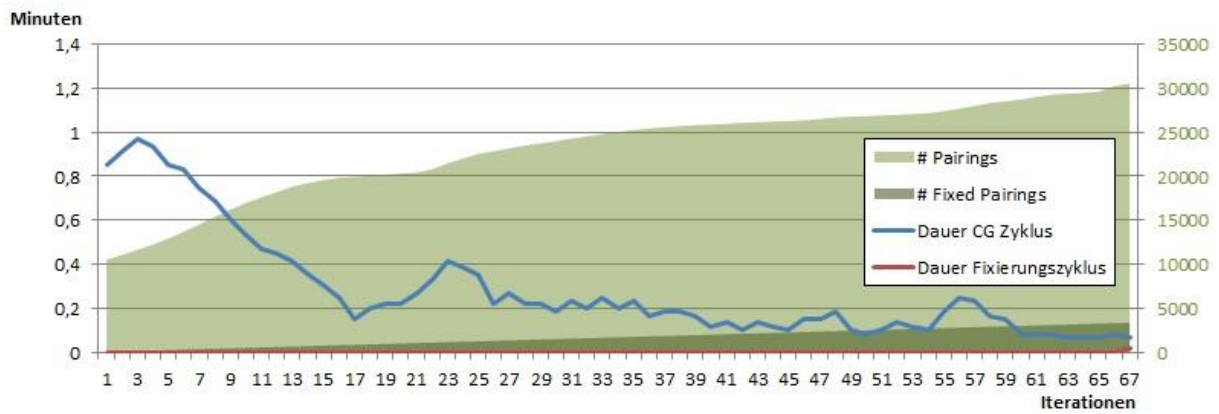


Abbildung 5.20: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Tag-Instanz mit Trivial Solution)

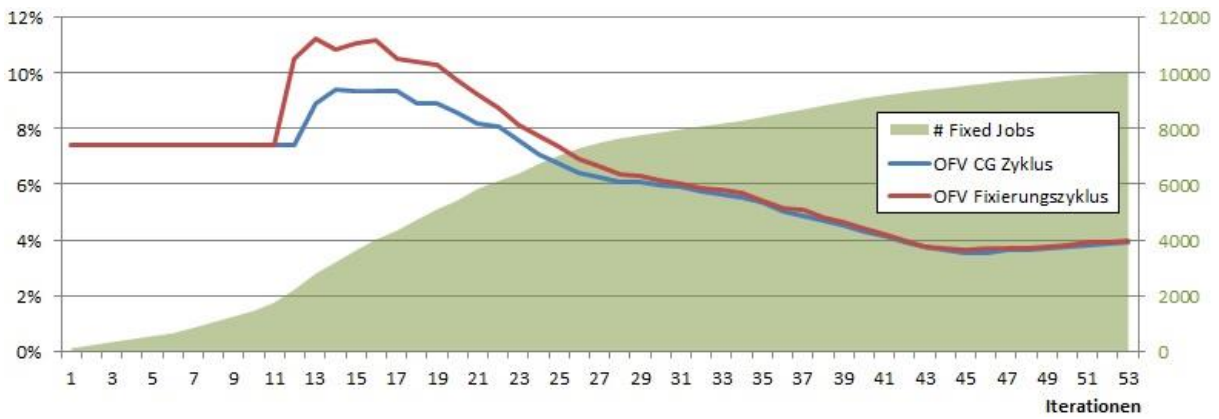


Abbildung 5.21: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Tag-Instanz mit Linear Chainer)

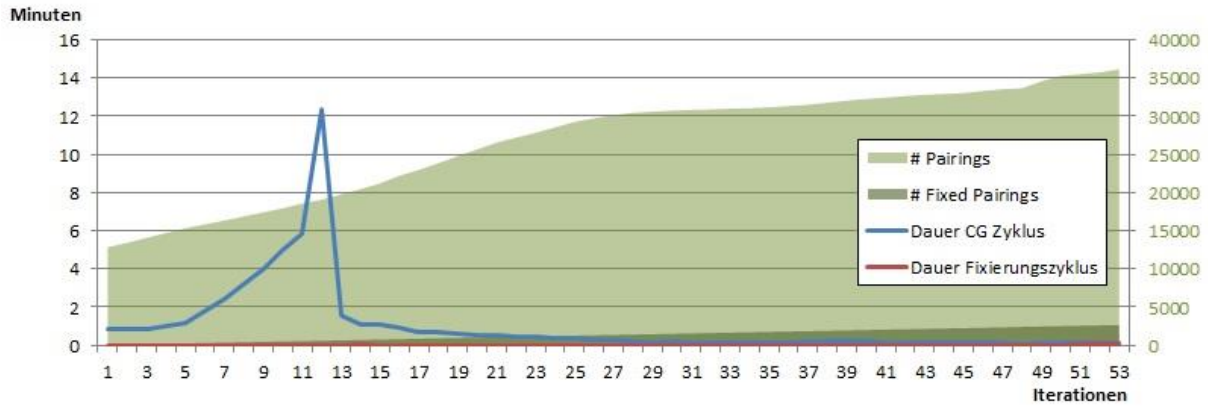


Abbildung 5.22: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Tag-Instanz mit Linear Chainer)

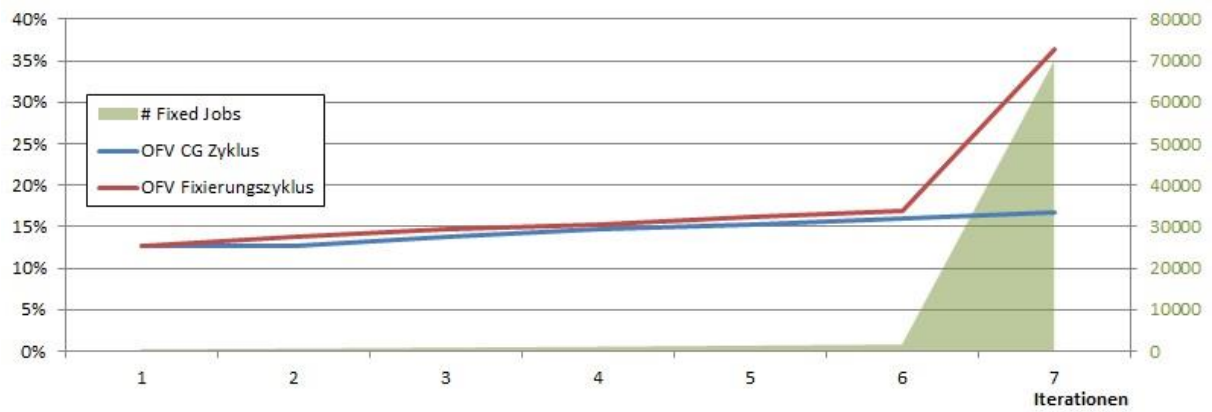


Abbildung 5.23: Single Branch & Price Optimierungsverlauf (Woche-Instanz mit Linear Chainer)

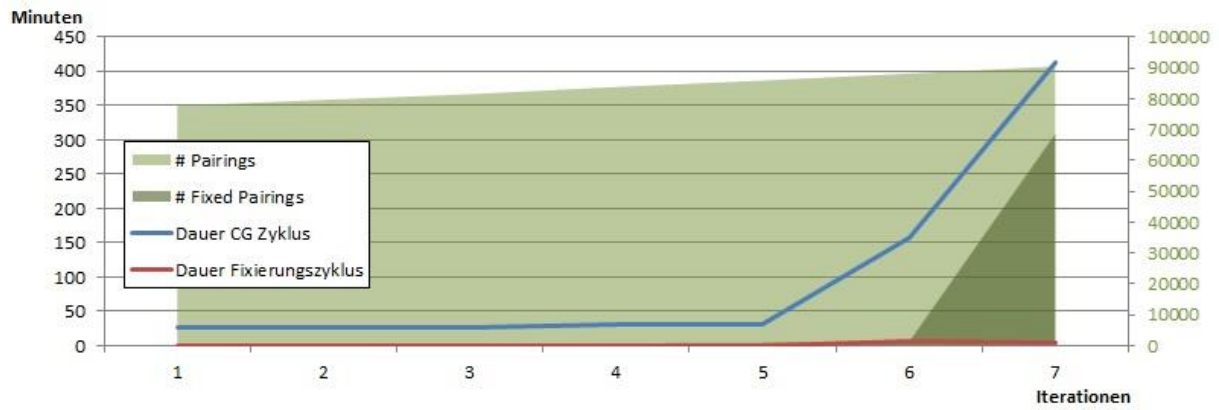


Abbildung 5.24: Single Branch & Price Zeitverbrauch (Woche-Instanz mit Linear Chainer)

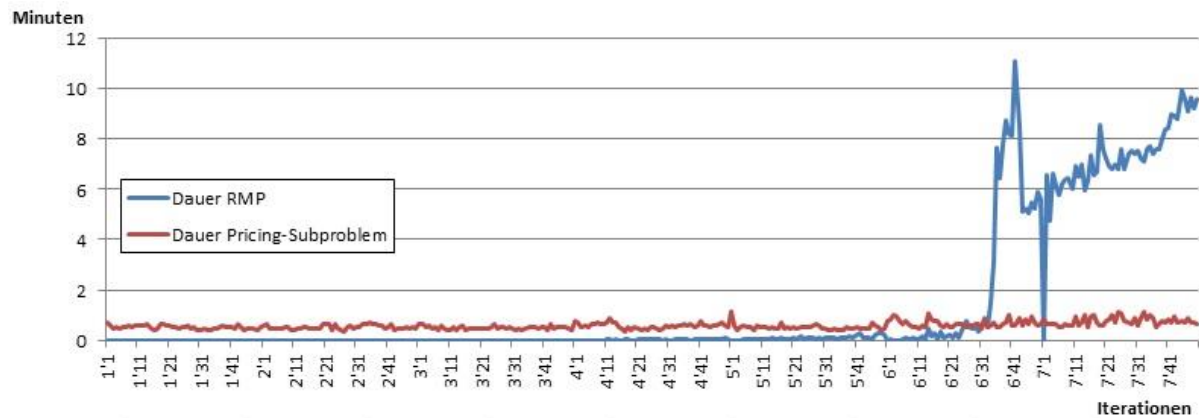


Abbildung 5.25: Single Branch & Price CG Zyklus (Woche-Instanz mit Linear Chainer)

Der gleiche Effekt ist vermutlich dafür verantwortlich, dass die Anwendung des SB&P auf die Woche-Instanz, ausgehend von der Startlösung des Linear Chainers, nach über zwölf Stunden erst sieben Iterationen durchlaufen hat. Die Abbildungen 5.23 und 5.24 lassen einige Parallelen zum zuvor beschriebenen SB&P-Lauf erkennen. Auch hier findet in den ersten Iterationen, bis zum Erstellen der Abschlusslösung beim Abbruch des Verfahrens, keine wesentliche Veränderung der Zielfunktionswerte statt. Die Zeitbedarfskurve zeigt in den Iterationen sechs und sieben einen Anstieg, der von der Form her durchaus mit der aus Abbildung 5.22 vergleichbar ist. Einzig die Dimension ist eine andere, da es sich hier um Iterationsdauern von ca. 150 und 400 Minuten handelt, was durch die fast sechsfache Menge an (evtl. wiederum sich ähnelnden) Spalten im RMP erklärt werden könnte. Abbildung 5.25 erlaubt einen differenzierteren Blick auf die CG-Zyklen dieses Laufs, indem sie die jeweils 50 Wechsel zwischen dem RMP und dem Pricing-Subproblem aller sieben Iterationen explizit aufführt. Es ist zu erkennen, dass die Berechnungszeiten des Subproblems über den gesamten Verlauf eng um eine Durchschnittszeit von knapp 35 Sekunden schwanken. Dieser eher homogene Zeitbedarf erklärt sich dadurch, dass es sich bei der Größe des dem MLSP zugrunde liegenden Graphen, mit seinen 7.290 Knoten und 238.342 Kanten, um eine Konstante handelt. Der enorme Anstieg des Rechenzeitbedarfs ist allein auf den CPLEX-Solver zurückzuführen, welcher für diese Arbeit eine Black-Box darstellt und somit keine tiefergehenden Laufzeitanalysen zulässt.

Die Ergebnisse der Testreihen zeigen, dass sich sowohl das implementierte Simulated Annealing-Verfahren auf Basis der ShiftJob-Nachbarschaftsrelation als auch die SingleBranch&Price-Heuristik mit untergeordnetem Multi Label Shortest Path-Problem zur Lösung des anonymen Einsatzplanungsproblems für Flugpersonal eignen. Obwohl sich die erzielten Ergebnisse durch spezifischer angepasste Parametereinstellungen und vor allem durch längere Laufzeiten verbessern ließen, konnte hier gezeigt werden, dass sich beide Optimierungsheuristiken plausibel verhalten. Anhand der Ergebnisse selbst lässt sich die Frage, welche der beiden Prozeduren zu favorisieren ist, nicht beantworten. Diesbezüglich hat sich gezeigt, dass die Wahl der Konstruktionsheuristik keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisqualität hat. Dabei ist zu bemerken, dass sich für die drei Testinstanzen mit dem Linear Solver, im Gegensatz zur Trivial Solution, Ergebnisse erzeugen ließen,

die im Bereich der Optimierungsergebnisse von SA und SB&P lagen. Erst wenn die innerhalb der Testreihen benötigten Laufzeiten berücksichtigt werden, lässt sich die Frage nach einem Favoriten leichter beantworten. Da der Umstand, dass der SB&P-Algorithmus sowohl bei der Stunde- als auch der Tag-Instanz weniger Zeit benötigte als SA, nicht die Tatsache aufwiegt, dass er bei der Woche-Instanz abgebrochen werden musste, ist das SA-Verfahren als zuverlässiger und zeitlich praktikabler anzusehen. Dennoch kann, abhängig von den in der Zielfunktion spezifizierten Präferenzen und vor dem Hintergrund, dass sich die Lösungsmuster beider Verfahren in den individuellen Parameterausprägungen unterscheiden, auch die Verwendung von SB&P von Vorteil sein.

5.3.3.3 Optimierung unter wechselnden Gewichtungen der Zielparameter

Zum Abschluss der Validierung werden in diesem Abschnitt die Auswirkungen unterschiedlich gewichteter Zielfunktionen auf die Optimierungsergebnisse betrachtet. Hierfür wird die SA-Heuristik auf einen Tagesausschnitt des in Tabelle 3.1 beschriebenen, von der Lufthansa im Sommer 2006 verwendeten Flugplans ‚LH-S-06‘ angewendet (vgl. Tabelle 5.7), wobei von einer zufällig ausgewählten zulässigen Lösung des anonymen Personaleinsatzproblems ausgegangen wird.

	Parameter	LH-S-06 (07.08.)
Parameter der Flug- und Personaleinsatzpläne	# Flughäfen	133
	# Routen	392
	# Flight Legs	1.215
	# Flugzeugtypen	11
	# Flugzeuge	550
	# Qualifikationen	11
	# Jobs	10.924
Absolute Wertebereiche der Zielparameter	Excessive Cost Value	0 – 4.214.554
	Buffer Violation Value	0 – 136.545
	Rotation Change Value	0 – 9.103
	Prim Config Value	0 – 9.556
	Aux Config Value	0 – 34.953
	CB Violation Value	0 – 21.848

Tabelle 5.7: Parameterausprägungen und Wertebereiche der LH-S-06-Instanz am 07.08.2006

Um zum einen weitere Plausibilitätstests bzgl. des Optimierungsverhaltens durchzuführen und zum anderen die realistisch erreichbaren Wertebereiche der einzelnen Zielparameter in Bezug zu den theoretischen unteren und oberen Schranken zu setzen, werden im Folgenden die sechs Zielfunktionsparameter der Reihe nach in den Fokus gerückt und mit 100% gewichtet, woraufhin nach den jeweiligen Minimal- und Maximalwerten gesucht wird. Da sich in den zuvor durchgeführten

Testreihen gezeigt hat, dass SA zumeist nur geringe Streuungen bei den einzelnen Zielfunktionsparametern aufweist und hier vielmehr die allgemeine Funktionsweise im Vordergrund steht, wurde jeweils nur ein Optimierungslauf pro Parameter und Zielrichtung durchgeführt.

Die Abbildungen 5.26 bis 5.31 zeigen für jeden der sechs Zielfunktionsparameter die Strukturen der gefundenen minimalen und maximalen Lösung vor dem Hintergrund der verwendeten Startlösung. Gemäß den Erwartungen, wurden die Extremwerte eines Parameters immer während der entsprechenden Optimierungsläufe gefunden und nicht etwa während ein anderer Parameter im Fokus stand. Weiterhin kann, auch wenn die dünne Datengrundlage keine belastbaren Schlüsse erlaubt, ein Zusammenhang zwischen dem Excessive Cost- und dem Buffer Violation-Parameter ausgemacht werden. Während des Optimierungslaufs, der die Minimierung des Excessive Cost Values zum Ziel hatte, erreichte der Buffer Violation Value mit 15,958% seinen höchsten Wert außerhalb seines eigenen Maximierungslaufs (vgl. Abbildung 5.26). Bei der Maximierung der vermeidbaren Kosten wurde mit 0,648% der entsprechende kleinste Wert gemessen. Umgekehrt wurde bei der Maximierung des Buffer Violation-Parameters mit 15,873% der niedrigste Kostenwert außerhalb seines eigenen Minimierungslaufs festgestellt. Diese Zahlen spiegeln die gegenläufigen Zielsetzungen wider, Personalminuten zwischen zwei Legs aufgrund der anfallenden Kosten einzusparen und durch das Einplanen von Pufferzeiten die Robustheit zu erhöhen. Ein zweiter etwas schwächer ausgeprägter Zusammenhang besteht zwischen dem Rotation Change- und dem Prim Config-Parameter. Werden Rotationswechsel minimiert, fällt der Violation Value der Planung von Primärjobs ebenfalls geringer aus (15,310%). Im umgekehrten Fall erhöht sich der Wert auf 43,156%. Auf der Gegenseite erhöht sich die Anzahl der Rotationswechsel auf dem Maximum nahe kommende 54,169%, wenn der Prim Config Value maximiert wird. Diese Zahlen lassen sich dadurch erklären, dass auf den Legs, die von einem Flugzeug durchgeführt werden, zumeist Jobs des gleichen Typs und der gleichen Anzahl ausgeführt werden.

Abbildung 5.32 stellt die erreichten Minima und Maxima in Form von parameter-individuellen Wertebereichen dar. Die Abstände zwischen den Grenzen der Wertebereiche und der theoretischen Schranken sind hier gut zu erkennen und fallen insbesondere zur oberen Schranke hin groß aus. Als Extrem ist hier der Aux Config Value hervorzuheben, dessen gefundenes Maximum mit gerade einmal 1,657% weit vom Worst-Case entfernt liegt. Zusätzlich sind in der Abbildung die Minimierungs- und Maximierungsergebnisse eingezeichnet, die mit den schon in Abschnitt 5.3.3.1 verwendeten Zielgewichten errechnet wurden. Es ist zu erkennen, dass sämtliche Werte innerhalb der gefundenen Grenzen liegen, wobei die Crew Base Violation Values, welche mit 50% genauso stark gewichtet wurden wie die restlichen Zielparameter zusammen, besonders nahe an diese heranreichen.

Insgesamt zeigt sich auch hier, dass sich die multikriterielle Optimierungsmethodik den Erwartungen entsprechend verhält und sich sehr gut dazu eignet, anonyme Personaleinsatzpläne gemäß den zuvor festgelegten Präferenzen zu erstellen.

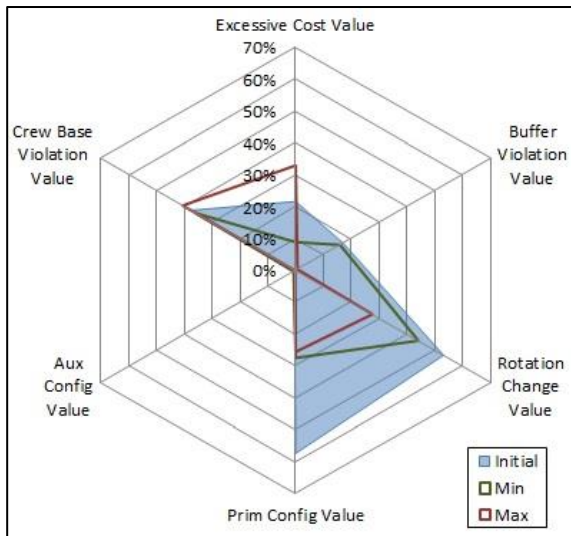


Abbildung 5.26: Excessive Cost Value

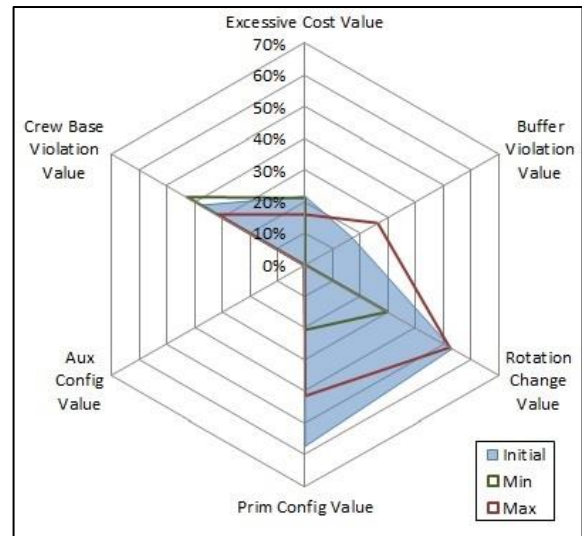


Abbildung 5.27: Buffer Violation Value

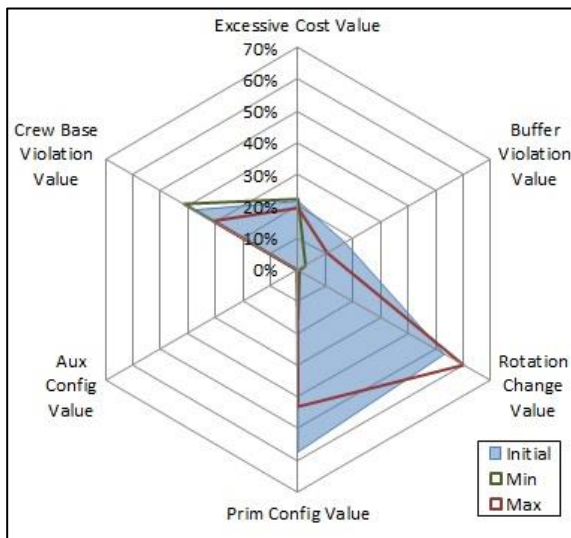


Abbildung 5.28: Rotation Change Value

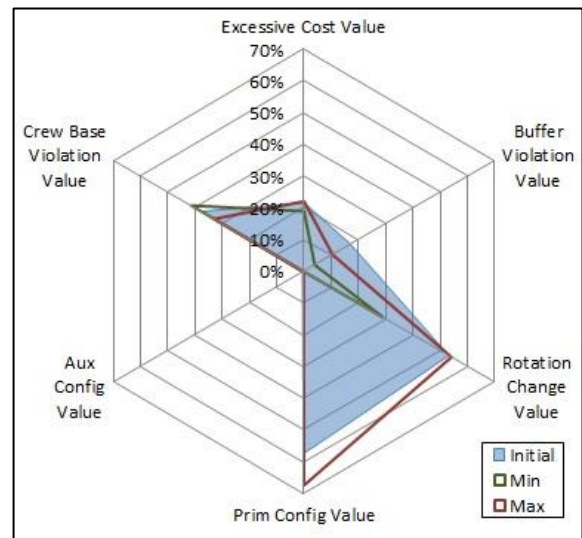


Abbildung 5.29: Prim Config Value

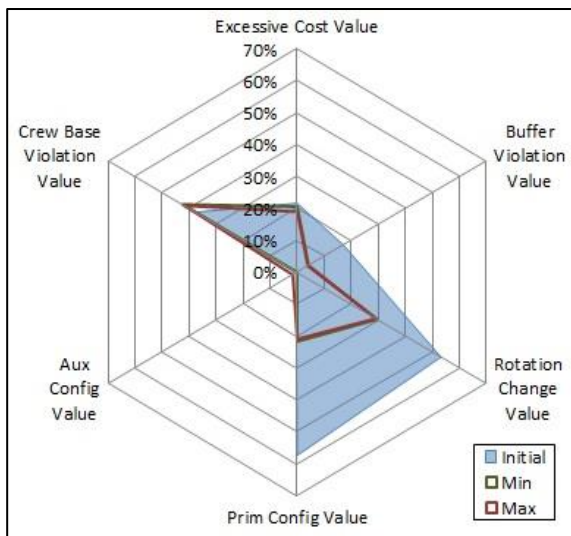


Abbildung 5.30: Aux Config Value

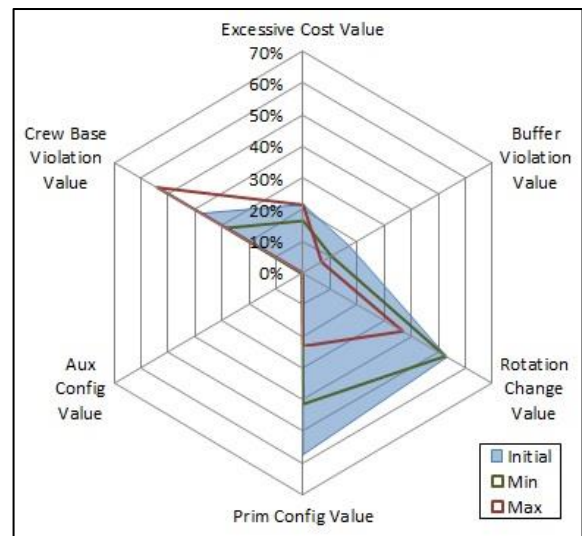


Abbildung 5.31: Crew Base Violation Value

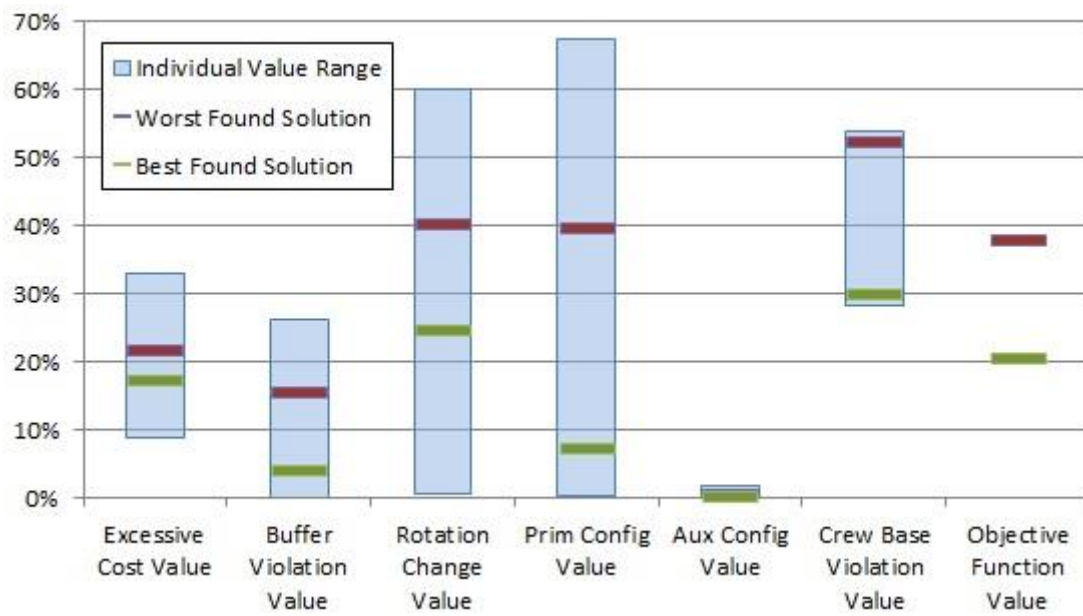


Abbildung 5.32: Beste und schlechteste gefundene Lösung vor den individuellen Wertebereichen der Zielfunktionsparameter

6 Simulationsmodelle mit Bezug zur Einsatzplanung von Flugpersonal

Es ist schwierig, allein auf Grundlage von Optimierungsergebnissen das Maß an Robustheit zu quantifizieren und zu bewerten, das bei der Durchführung eines anonymen Personaleinsatzplans im realen Betrieb erreicht würde. Um schon vor der Planimplementierung eine Vorstellung von seiner Stabilität und Flexibilität zu bekommen und Fragen bzgl. der Personalstärke und dessen Stationierung zu beantworten, wird ein Simulationsmodell entworfen, das die Abläufe des operativen Betriebs möglichst realitätsnah nachbildet (vgl. im Folgenden [Lieb] S. 3-4 und [Lüc2] S. 95 f.). An diesem abstrakten Modell, das einen Ausschnitt des Realsystems darstellt, werden unterschiedliche Szenarien unter stochastischen Einflüssen im Zeitraffer durchlaufen und zielgerichtete Experimente durchgeführt. Aus den daraus resultierenden Ergebnissen werden erfolgversprechende Handlungsoptionen abgeleitet, die, übertragen auf die reale Problemstellung, eine hohe Toleranz gegenüber eintretenden Störungen und vielfältige Möglichkeiten zur Umsetzung von Recovery-Maßnahmen versprechen. Mittels dieser Vorgehensweise sind Fluglinien nicht länger allein auf den Erfahrungsschatz ihrer Mitarbeiter angewiesen, um gute Einsatzpläne zu erzeugen. Und obwohl sie ihre mehrere Monate umfassenden Planungen im Vorfeld veröffentlichen müssen, bietet sich ihnen so die Möglichkeit, die Auswirkungen auch größerer Planveränderungen, z.B. im Bereich der Infrastrukturplanung oder der Flottenentwicklung, beobachten zu können, ohne sich dem Risiko von Fehlinvestitionen oder Imageschäden aussetzen zu müssen. Weiterhin kann ein Simulationsmodell dazu genutzt werden, die Ausprägungen der in der Optimierung angestrebten Zielfunktionsparameter den in den Simulationsergebnissen enthaltenen Strukturmerkmalen der Einsatzpläne gegenüberzustellen und etwaige Korrelationen nachzuweisen.

In diesem Kapitel wird zunächst auf ausgewählte Grundlagen aus dem Bereich Modellierung und Simulation eingegangen (Abschnitt 6.1). In den Abschnitten 6.2 und 6.3 werden Modelle vorgestellt, die zur Simulation von Flugverkehrssystemen und von Personaleinsatzplänen entwickelt wurden und die einige Parallelen zu den Zielsetzungen dieser Arbeit aufweisen. Abschließend werden die relevanten Kernaspekte der einzelnen Modelle diskutiert und verglichen (Abschnitt 6.4).

6.1 Ausgewählte Grundlagen der Modellierung und Simulation

Ein Modell stellt die Repräsentation eines Systems zum Zwecke seiner Betrachtung dar (vgl. [Lieb] S. 87 und [Bank] S. 9). Es ist das Ergebnis eines Abstraktionsprozesses, in dessen Rahmen das Realsystem auf seine für die zu untersuchenden Fragestellungen relevanten Aspekte reduziert wird. Einher geht zumeist die Identifizierung und Klassifizierung von handhabbaren Teilkomponenten, in die sich das System zerlegen lässt. Diese Komponenten werden individuell beschrieben, indem deren

Eigenschaften und Wirkungsweisen mit Einfluss auf das Untersuchungsziel spezifiziert werden. Um auch das Innenleben des Modells, seine zeitliche Abfolgelogik von Zustandsänderungen, abzubilden, müssen auch die Beziehungen, die die Komponenten wechselseitig eingehen, erfasst werden. Insgesamt ist ein Modell eine Vereinfachung eines Realsystems, dessen Detaillevel jedoch noch alle Charakteristika umfasst, die für das Treffen von validen und aussagekräftigen Schlussfolgerungen benötigt werden.

6.1.1 Statische vs. dynamische Modelle

Für Untersuchungen von Problemstellungen aus dem Umfeld der Flugverkehrsplanung existiert eine Vielzahl von Modellierungsansätzen (vgl. im Folgenden [Fuji] S. 6-8, [Lieb] S. 5 f. und [Evan] S. 894). Einige davon gehören zur Gruppe der statischen Modelle und basieren z.B. auf den Analyseverfahren der Warteschlangentheorie, der mathematischen Programmierung oder der Optimierungsrechnung. Ein Realsystem wird aus einer statischen Perspektive heraus betrachtet und dessen relevante Eigenschaften als mathematisches Programm formuliert. Unter Berücksichtigung von Parametern innerhalb und außerhalb des eigenen Einflussbereichs werden Gleichungen aufgestellt, die es im Sinne eines Optimierungsziels zu lösen gilt. So verwendeten z.B. Bian et al. in einer Kooperation mit KLM ein statistisches Regressionsmodell, um die Auswirkungen von Robustheitsindikatoren auf das Verhalten von Flugplänen zu messen (vgl. [Bian]). Ein Überblick über Ansätze zur statischen Analyse des operativen Verhaltens von Flugplänen wird in [Fuhr] S. 63 ff. gegeben.

In einem dynamischen Modell hingegen kommt eine zeitliche Ordnung hinzu, wodurch das betrachtete System als Folge einzelner Verarbeitungsschritte aufgefasst wird. Um die Abläufe der Realität und die Verhaltensweisen des Systems möglichst genau wiederzugeben, werden die Ausprägungen sämtlicher Entscheidungen und Umwelteinflüsse separat betrachtet und in einen zeitlichen Kontext zueinander gesetzt. Im Vergleich zur statischen Vorgehensweise wird ein dynamisches Simulationsmodell daher eher ‚ausgeführt‘ als ‚gelöst‘, was zur Folge hat, dass sich keine optimalen Lösungen aus mathematischen Beweisen ableiten lassen und es allein für gute Lösungen oftmals einiges Expertenwissens bedarf. Demgegenüber steht, dass sich mit dynamischem Simulationsverhalten auch unvorhersehbare Entwicklungen abbilden lassen. Anstelle von festen Werten lassen sich hier durch die Generierung von Zufallszahlen auf Basis parametrisierter Verteilungstypen zufällige Schwankungen in Parameterausprägungen erzeugen.

Im Bereich der dynamischen Anwendungen kann zwischen Modellen zum Zweck der Systemanalyse und sog. virtuellen Umgebungen unterschieden werden. Während bei den analytischen Simulationsmodellen die Generierung quantitativer Daten zur Gewinnung von Informationen bzgl. eines beobachteten Realsystems im Vordergrund steht, werden virtuelle Umgebungen dazu verwendet, Nutzern den Eindruck zu vermitteln, Teil des Systems zu sein. Die simulierten Abläufe finden hier in Realzeit statt, so dass diese aktiv vom Nutzer beeinflusst werden können. Analytische Simulationen

sind i.Allg. nicht auf das Eingreifen eines Nutzers angewiesen und werden typischerweise schnellstmöglich berechnet. Ein Beispiel für den Einsatz virtueller Umgebungen im Flugverkehrsbereich sind die sehr fortschrittlichen Flugsimulatoren, die u.a. von der Lufthansa für Pilotentrainings verwendet werden (vgl. [ProF]).

Wu und auch Lee et al. konstatieren, dass für die Bewertung der Performanz operativer Flugpläne dynamische Simulationsansätze statischen Analysemethoden vorzuziehen seien. Die Fähigkeit, Veränderungen über die Zeit abzubilden, sei hierfür essentiell, da sich ohne sie z.B. die Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Bestimmung von Flugverspätungen in analytischen Modellen nur unzureichend miteinander verknüpfen lassen (vgl. [Lee] S. 1950 und [Wu] S. 211-212). Für das in dieser Arbeit verfolgte Ziel, die Eigenschaften und Verhaltensweisen von anonymen Personaleinsatzplänen unter Einfluss von Störungen zu studieren, bieten dynamische Simulationsmodelle insgesamt die besseren Möglichkeiten.

6.1.2 Deterministische vs. stochastische Modelle

Simulationsmodelle, die keine Zufallsvariable beinhalten, gehören zur Klasse der deterministischen Modelle (vgl. [Bank] S. 11, [Lieb] S. 23 ff. und [Birt] S. 11-12). Die Zustandsvariablen des Systems werden, den in der Modellierung festgelegten Regeln folgend, iterativ fortgeschrieben, wodurch das Systemverhalten beobachtet werden kann. So führt ein Satz von Inputgrößen, welche alle im Vorfeld zu spezifizieren sind, bei deterministischen Modellen immer zu denselben Outputgrößen. Im Gegensatz dazu verfügt ein stochastisches Simulationsmodell über mindestens eine Zufallsvariable, die auf einer Wahrscheinlichkeitsverteilung basiert, und kann daher bei gleichem Input zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Da diese somit ebenfalls als zufällig angesehen werden können, müssen sie bei der Auswertung als statistische Schätzungen behandelt werden.

In der Literatur wird im Bereich der Simulation von Flugverkehrssystemen häufig von Monte-Carlo-Verfahren gesprochen, wenn stochastische Modelle beschrieben werden (vgl. z.B. [Dück] S. 9 oder [Jägg] S. 141). Wu beschreibt ausführlich (vgl. [Wu] S. 98):

„The Monte Carlo simulation is a technique widely used in modelling complex systems, especially those systems that are composed of stochastic sub-systems or stochastic components. A major advantage of using Monte Carlo simulation techniques is that modellers are able to change model parameters and the stochastic behaviour of system components in order to test "What-if" scenario study questions. This feature is essential when we study a complex system, as we are often interested in understanding how the system may behave under different system control strategies.“

Liebl zufolge handelt es sich dabei um eine ‚Begriffsverwirrung‘ (vgl. [Lieb] S. 63). So charakterisiert er Monte-Carlo-Verfahren als Unterkategorie der stochastischen Simulation, bei der das wiederholte Erheben von zumeist unabhängigen Stichproben zur Betrachtung mathematisch-statischer

Problemstellungen im Vordergrund steht. Im Gegensatz dazu beschreibt er Simulationsverfahren als eine dynamische Sichtweise auf stochastische Systeme, bei der die Ausprägungen von voneinander abhängenden Variablen einer zeitlichen Ordnung unterliegen. Um die Bedeutung dieser zeitlichen Abhängigkeiten für die Untersuchung der Robustheit von Personaleinsatzplänen zu betonen, wird in dieser Arbeit der von Liebl vorgeschlagenen differenzierten Verwendung der Terminologie gefolgt, wenn von ‚stochastischer Simulation‘ gesprochen wird.

6.1.3 Diskrete vs. kontinuierliche Modelle

Obwohl es sich bei der Zeit T an sich um eine kontinuierliche Variable handelt, kann sie auf unterschiedliche Art und Weise in einem Simulationsmodell abgebildet werden (vgl. im Folgenden [Lüc2] S. 30-31). In einem diskreten Modell kann sich der Zustand eines Systems nur zu diskreten Zeitpunkten t_i verändern, wobei gilt: $T = \{t_i | i = 1, \dots, n\}$. Werden hierfür sog. fixe Zeitinkremente verwendet, wird die Zeit in konstante Zeitintervalle Δt eingeteilt, so dass $\forall_{t_i \in T, 1 < i < n} | \Delta t := t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1}$. Hier dient Δt somit als Basis einer gleichförmigen Zeitfortschreibung, deren Genauigkeit auf ein Vielfaches der Intervalllänge begrenzt ist. Da jedoch nicht zu jedem Zeitpunkt eine Zustandsveränderung eintreten muss, kann es zu unnötig durchgeführten Überprüfungen kommen. Sollten sich diese häufen, kann es effizienter sein, den Zeitverlauf mittels variabler Zeitinkremente zu modellieren und so die Zeitpunkte zu überspringen, zu denen das System keine Möglichkeit hat sich zu verändern. Auf diese Weise verkürzt sich die Dauer von Δt in Situationen, in denen viele Veränderungen stattfinden, wohingegen sie sich in Situationen mit wenigen Zustandsübergängen verlängert. In einem kontinuierlichen Modell wird angenommen, dass sich die Zustände eines Systems graduell über die Zeit verändern. Auf digitalen Computern können diese Modelle nur mittels so klein wie möglich gewählter Δt approximiert werden.

6.1.4 Einführung in die ereignisbasierte Simulation

Ein komplexes dynamisches System lässt sich auf unterschiedliche Arten darstellen. In Abhängigkeit von seinen Eigenheiten, seiner Beschaffenheit und den zu untersuchenden Fragestellungen kann für die Systemabbildung ein geeignetes Modellierungsparadigma gewählt werden. Sollte z.B. eine Menge von heterogenen autonomen Individuen betrachtet werden, die sich durch unterschiedliche Verhaltensmuster auszeichnen und untereinander sowie mit ihrer Umwelt interagieren, würde sich die Formulierung eines agentenbasierten Modells anbieten. Stünde hingegen die zeitliche Entwicklung räumlicher Einheiten im Vordergrund, die sich in fest definierten Nachbarschaftsbeziehungen befinden, wäre ein auf einem zellulären Automaten basierendes Simulationsmodell sinnvoll. Für Simulationen im Bereich von Flugverkehrssystemen finden jedoch ereignisdiskrete Modellierungsmethoden die häufigste Verwendung, da hier zumeist das stochastische Zusammenspiel operativer Prozesse fokussiert wird.

Im Rahmen der Erstellung eines ereignisbasierten Modells müssen die relevanten Systemkomponenten, die sog. Entitäten, identifiziert werden (vgl. im Folgenden [Lieb] S. 87-90, [Lüc2] S. 32 f. und [Bank] S. 60 ff.). Den Entitäten werden Attribute zugeordnet, wodurch ihre jeweiligen Eigenschaften in das Modell aufgenommen werden. Anhand unterschiedlicher Ausprägungen dieser Attributvariablen, denen die unterschiedlichsten Skalen zugrunde liegen können, lassen sich so die Entitäten und die Zustände, in denen sie sich befinden, individuell beschreiben. Der Zustand eines Systems wird zumeist durch die Aggregation der einzelnen Entitätszustände definiert. Kern des ereignisdiskreten Paradigmas ist es dabei, dass sich der Systemzustand nur bei Eintritt eines Ereignisses verändern kann, was impliziert, dass dieser zwischen zwei Ereignissen konstant ist. Innerhalb dieses Modellierungsansatzes wird ein Ereignis als Zeitpunkt definiert und ist damit von der umgangssprachlichen Verwendung abzugrenzen, bei der ein Ereignis auch eine Zeitspanne beschreiben kann. Relevant ist in diesem Zusammenhang einzig die Simulationszeit, die als Variable den Zeitfortschritt innerhalb des Modells darstellt, und nicht etwa die sog. wallclock time (dt.: Wanduhrzeit), die die reale Uhrzeit angibt. Die Zeitperiode, die zwischen zwei Ereignissen liegt, wird als ‚Aktivität‘ bezeichnet. Zusammengefasst werden alle Aktivitäten einer Entität, die sie während einer Simulation sequentiell ausführt, als ‚Prozess‘ bezeichnet. In Abbildung 6.1 sind zwei Prozesse abgebildet, die jeweils aus zwei Aktivitäten bestehen, die von Ereignissen eingerahmt werden.

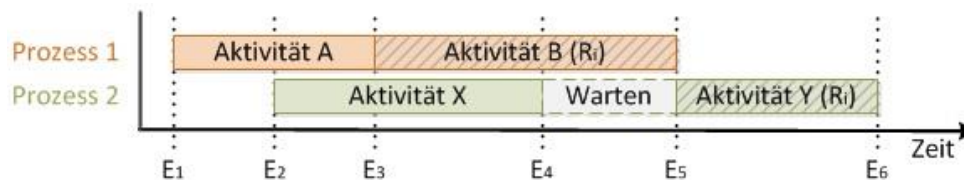


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen

Getrennt vom Simulationsmodell ist die Simulationslogik zu betrachten, deren Implementierung auf verschiedenen Konzepten beruhen kann. Im Activity-Scanning-Ansatz stehen zum einen die Aktivitäten eines Modells im Vordergrund und zum anderen die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit deren Ausführung beginnen kann. Bei jedem Voranschreiten der Simulationsuhr werden sämtliche Bedingungen auf Erfüllung hin überprüft und entsprechende Aktivitäten gestartet. Der Zeitfortschreibung liegen hierbei fixe Zeitinkremente zugrunde.

Die Ablauflogik des Process-Interaction-Ansatzes orientiert sich an den Prozessen der Entitäten. Durch die sequentiellen Aneinanderreihungen von Ereignissen und Aktivitäten, anhand derer sich die Entitäten durch das System bewegen, bilden die Prozesse deren Lebenszyklus innerhalb der Simulation ab. Einige Aktivitäten können des Einsatzes einer oder mehrerer Ressourcen bedürfen. Da die Kapazitäten der Ressourcen i.Allg. begrenzt sind, kann es zu Konkurrenzsituationen zwischen den Entitäten kommen, was wiederum dazu führt, dass die Prozesse miteinander interagieren. In dem in Abbildung 6.1 gezeigten Beispiel benötigen sowohl Aktivität B als auch Aktivität Y die Ressource R_i .

Obwohl geplant ist, dass der Start von Aktivität Y durch das Ereignis E_4 ausgelöst wird, muss auf die Beendigung von Aktivität B durch das Eintreten des Ereignisses E_5 gewartet werden. Wann immer eine Entität auf das Freiwerden einer Ressource warten muss, wird sie als ‚inaktiv‘ gekennzeichnet und in einer Warteliste abgelegt. Die dynamisch in ihrem Prozess voranschreitenden und somit ‚aktiven‘ Entitäten werden in einer separaten Liste vorgehalten, wobei immer die Entität an der Spitze steht, deren nächstes Ereignis die früheste Eintrittszeit aufweist. Aufgrund der iterativen Verarbeitung eines jeweils frühesten Ereignisses basiert der Zeitverlauf auf variablen Zeitinkrementen.

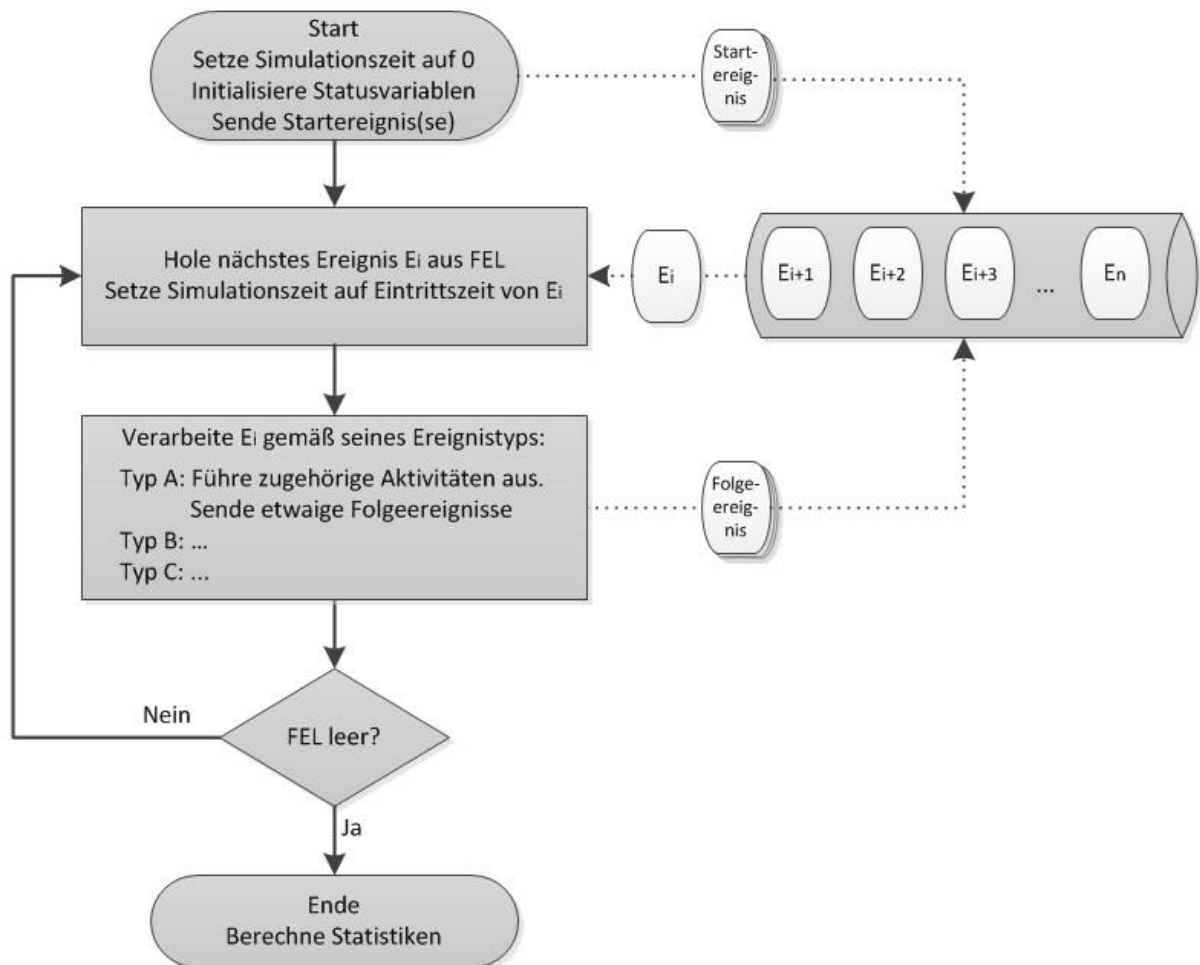


Abbildung 6.2: Flussdiagramm der Verarbeitungslogik im Event-Scheduling-Ansatz

Das gilt ebenfalls für den Event-Scheduling-Ansatz, dessen Mittelpunkt die in den Prozessen der Entitäten enthaltenen Ereignisse und deren Einfluss auf die Zustandsvariablen der Entitäten sind. Bei diesem Ansatz beginnt die Simulation mit dem Initialisieren der Simulationszeit und dem Anlegen mindestens eines Startereignisses (siehe Abbildung 6.2). Dieses wird, wie auch alle künftigen Ereignisse, in einer zentralen Future Event List (FEL) abgelegt. Bei der FEL handelt es sich um eine Prioritätswarteschlange, die aufsteigend nach den jeweiligen Eintrittszeitpunkten sortiert ist. An dieser Stelle beginnt die Hauptschleife der implementierten Ablauflogik mit der Verarbeitung der in der Simulation auftretenden Ereignisse. In jeder Iteration wird zunächst das als nächstes eintretende Ereignis aus der FEL entfernt und die Simulationszeit auf dessen Eintrittszeitpunkt fortgeschrieben.

Als nächstes wird das Ereignis verarbeitet. In Abhängigkeit des Ereignistyps werden verschiedene Methoden aufgerufen, die die Attributsausprägungen von Entitäten, und somit den Zustand des Systems, verändern können. Weiterhin können Folgeereignisse generiert werden, die wiederum in die FEL einsortiert werden. Im Anschluss wird geprüft, ob in der FEL noch Ereignisse vorhanden sind. Ist dies der Fall, wird die Simulation mit der nächsten Iteration der Hauptschleife fortgesetzt. Sind keine Ereignisse mehr übrig, wird der Simulationslauf beendet und dessen Ergebnisstatistiken können berechnet werden.

6.2 Modelle zur Simulation von Flugverkehrssystemen

Im Bereich der Simulation von Flugverkehrssystemen existieren vielfältige Anwendungen, deren zugrunde liegende Modelle sich je nach Verwendungszweck im abgebildeten Detailgrad stark unterscheiden. Für die Konzipierung dieser Modelle gilt grundsätzlich, dass mit steigendem Detaillevel auch sowohl der qualitative und quantitative Datenbedarf des Modells als auch der Zeitaufwand für dessen Konfiguration, Validierung und Implementierung anwächst. In Abhängigkeit von dem Detailgrad des zugrunde gelegten Modells können die Anwendungen in drei nicht scharf voneinander abzugrenzende Klassen eingeteilt werden: makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Simulationsanwendungen (vgl. im Folgenden [Fuhr] S. 35 f.).

Aufgrund ihrer stark abstrahierten Sichtweise verfügen makroskopische Modelle über eine niedrige Detailstufe und werden zumeist für die grobe Abbildung der Flughafen- und Luftraumkapazitäten eines Luftverkehrssystems und dessen Auslastung unter Verwendung verschiedener Strategien des Flugverkehrsmanagements herangezogen. Durch ihre einfache Struktur ermöglichen sie schnelle Berechnungen von Leistungsparametern, für die i.d.R. bereits begrenzte Rechenkapazitäten ausreichen. Da sie auf die Darstellung individueller Flight Legs verzichten und somit von einer grundlegenden Flugzeugdynamik abstrahieren, sind sie für die robuste Flug- und Personaleinsatzplanung jedoch nicht geeignet.

Mikroskopische Modelle zeichnen sich durch eine hohe Detailfülle aus und erlauben die genaue Betrachtung eines Flugverkehrssystems in seinem kompletten operationalen Zusammenhang unter Einbeziehung sämtlicher Systemkomponenten und ihrer interaktiven Dynamiken. Durch ihre Fähigkeit, einzelne Bewegungsabläufe von Flugzeugen am Boden und in der Luft wiederzugeben, eignen sie sich z.B. dazu, den Rollverkehr an Flughafeninfrastrukturen oder die Verkehrsprozesse in regionalen Lufträumen nachzuzeichnen. Auf diesem Detaillevel können individuelle Daten bzgl. Reisezeiten, Kapazitätsauslastung, Kerosinverbrauch, Fluglärmbelastung etc. erhoben werden. Nachteilig ist, dass mikroskopische Modelle zumeist nicht ohne eine sehr umfangreiche qualitative und quantitative Datengrundlage auskommen. Um die Menge an benötigten Daten zu reduzieren, werden oftmals nur kleinere Ausschnitte eines realen Systems modelliert. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Simulation eines Modells mit hohem Detaillevel einen erheblichen Rechenbedarf erfordert.

Insgesamt erscheinen mikroskopische Modelle für die robuste Personaleinsatzplanung nur bedingt geeignet.

Mesoskopische Modelle sind zwischen mikro- und makroskopischen Ansätzen einzuordnen und bilden das betrachtete System in einem Detailgrad ab, der für das jeweilig angestrebte Untersuchungsziel angemessen erscheint. Während einige zentrale Modellkomponenten sehr ausführlich beschrieben werden, werden andere nur stark verallgemeinert dargestellt. So kann z.B. das gesamte Flugnetz einer Fluglinie dargestellt und die Auswirkungen von Recovery-Entscheidungen einer AOC auf die Pünktlichkeit bewertet werden, ohne die genauen Strukturen einzelner Flughäfen oder der Luftrauminfrastruktur zu berücksichtigen.

In den folgenden Teilabschnitten werden drei mesoskopische Modelle vorgestellt, die im Forschungsbereich der Flugverkehrssimulation weit verbreitet sind und auch für die Untersuchung der Robustheit individueller Personaleinsatzpläne einiges Potential bieten. Für die Beschreibungen wurden Teile einer bereits veröffentlichten Publikation übersetzt und überarbeitet (vgl. im Folgenden [Kuc3]). Für einen weiter gefassten Überblick über Luftraum- und Flughafenmodelle verschiedener Detaillevel sei auf Barnhart und Smith verwiesen (vgl. [Barn] S. 435 f.).

6.2.1 SimAir

SimAir (Simulation von Airline Operations) ist der Name eines Simulationswerkzeugs, welches innerhalb einer Forschungsk Kooperation zwischen dem Georgia Institute of Technology und der National University of Singapore entwickelt wurde (vgl. im Folgenden [Lee2] und [Rose] S. 371-372). Das in der Programmiersprache C++ geschriebene Tool ermöglicht die Simulation von Flugverkehrssystemen auf Basis eines ereignisdiskreten Ansatzes. Es wird zur Erforschung von Airline-Recoverystrategien eingesetzt und zur Quantifizierung der Wirksamkeit verschiedener Wiederherstellungsmechanismen herangezogen. Hierfür werden sowohl zufällig auftretende Störungen des täglichen Betriebs als auch detaillierte Handlungsstrategien der AOC explizit in das zugrunde liegende Flugverkehrsmodell aufgenommen. Mit Hilfe des SimAir-Modells lässt sich neben der Performanz neuer Strategien auch die Robustheit von Flug- und Personaleinsatzplänen analysieren. Schaefer et al. ([Scha]) verwenden SimAir um ihre Crewplanung unter dem Einfluss von Störungen und Recovery-Mechanismen zu testen. Dück et al. ([Dück]) untersuchen die Ausbreitung von durch Rotationswechsel verursachten Störungen innerhalb von Flug- und Einsatzplänen. Um die Ergebnisse ihrer Planungsmethode mit anderen Ansätzen zu vergleichen, greifen sie ebenfalls auf SimAir zurück. Zurzeit wird das Modell innerhalb der Forschungsk Kooperation erweitert, um auch die Prozesse des Luftfrachtverkehrs untersuchen zu können (vgl. [SimA]).

Hervorzuheben ist die klar strukturierte modulare Architektur der Simulationssoftware (vgl. Abbildung 6.3). Das Simulationsmodul, welches das Herzstück der Anwendung darstellt, enthält ein stochastisches Modell, welches die Operationen einer Fluglinie anhand von Zuständen und

Zustandsübergängen beschreibt. Es definiert Entitäten samt ihrer Eigenschaften, Ereignisse und deren Auftrittswahrscheinlichkeiten und sämtliche Prozesse, die zur Simulation der operativen Flug- und Einsatzpläne benötigt werden. Bei jedem auftretenden Ereignis wird das Controller-Modul aufgerufen, um nach aktuell oder zukünftig auftretenden Störungen zu suchen, wie sie z.B. durch schlechtes Wetter, technisches Versagen oder Personalausfälle verursacht werden. Wurde eine Störung festgestellt, wird sie dem Recovery-Modul gemeldet, welches durch die Implementierung von Recovery-Maßnahmen, wie z.B. das Umleiten von Passagieren oder das Einsetzen von Reservepersonal, versucht, die Störung zu kompensieren und negative Konsequenzen zu begrenzen. Nachdem die Validität der Planänderungen durch Überprüfung der Einhaltung sämtlicher räumlicher und zeitlicher Restriktionen gewährleistet wurde, werden die aktualisierten Pläne an das Simulationsmodul weitergereicht.

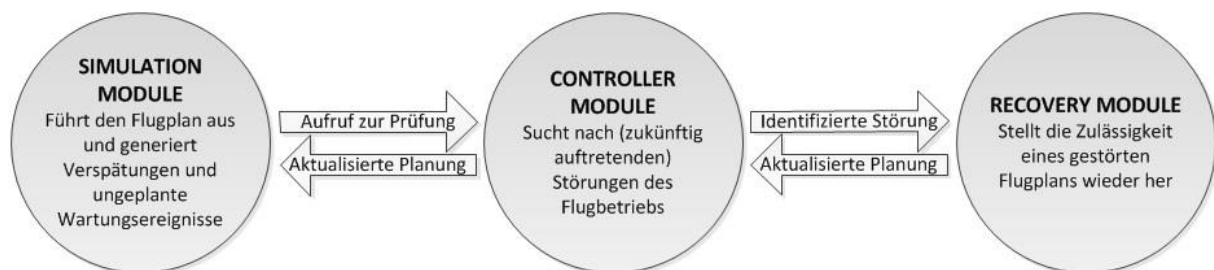


Abbildung 6.3: Modulare Architektur des SimAir-Modells

Im Modell werden alle Objekte beschrieben, die für die Simulation der Operationen einer bestimmten Fluglinie benötigt werden. Es enthält alle Legs des Flugplans mit deren geplanten Abflugs- und Ankunftszeiten und sämtliche Start- und Zielflughäfen. Ein Flughafen wird unter Einbeziehung seiner Start- und Landebahnen, Taxiways und Gates abgebildet, wobei die Start- und Landebahnen als Warteschlangen mit unendlicher Kapazität modelliert werden. Da Flughäfen Ressourcen darstellen, die die betrachtete Fluglinie mit anderen teilt, wird deren Einfluss auf die Verkehrsbelastung indirekt durch reduzierte Service-Raten der Start- und Landebahnen berücksichtigt. Flugzeuge werden anhand ihrer Umläufe abgebildet, innerhalb derer sich sowohl Flugbesatzungen als auch Passagiere zwischen den Flughäfen bewegen können. Obwohl keine weiteren Details über die Einbeziehung von Flugzeugeigenschaften in das Simulationsmodell veröffentlicht wurden, wurde doch besonderer Wert auf die Einhaltung von Wartungsintervallen gelegt. Während einige Crews ihren Dienst unter Einhaltung von Pausen- und Ruhezeiten an Bord von Flugzeugen verrichten, werden andere als Reservepersonal an den Flughäfen eingesetzt. Passagiere werden in Form von Gruppen modelliert, die den gleichen Routen durch das Flugnetz folgen. Wettereinflüsse werden, wie schon zuvor die durch andere Fluglinien bedingte Verkehrsbelastung, durch verringerte Service-Raten an Flughäfen in das Modell integriert.

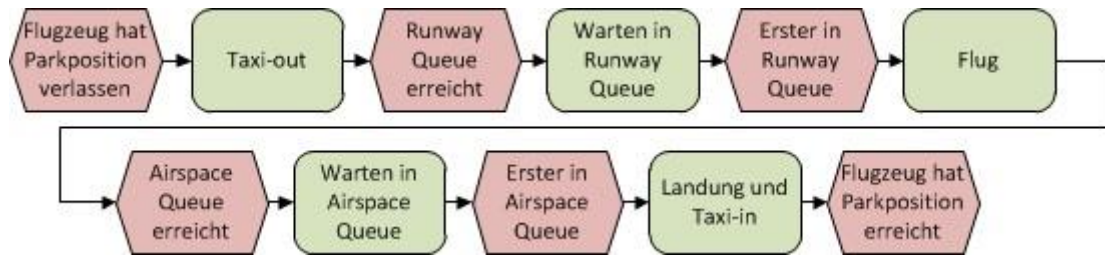


Abbildung 6.4: EPK des SimAir Off-Blocks-Prozesses

Vor dem Hintergrund der beiden in Abschnitt 2.2.1 erläuterten komplementären, zyklisch zu durchlaufenden Flugzeugprozesse wird deutlich, dass bei der Erstellung des SimAir-Modells das Augenmerk auf dem Off-Blocks-Prozess gelegen hat. Das Modell beinhaltet alle sechs Ereignisse und die zwischenliegenden Prozesse, wie sie in der Ereignisgesteuerten Prozesskette (EPK) in Abbildung 6.4 dargestellt werden. Im Gegensatz dazu wurde der Turnaround-Prozess nur stark vereinfacht abgebildet. Im Modell werden die einzelnen Teilprozesse und ihre Potentiale als Ursachen von Störungen nicht explizit abgebildet, sondern in Form einer einzigen Verteilungsfunktion aggregiert dargestellt, mittels derer die Dauer des gesamten Turnaround-Prozesses bestimmt wird. Zusätzlich wird nach der Landung eines Flugzeugs durch Flugzeugtyp-abhängige Wahrscheinlichkeitsfunktionen ermittelt, ob ungeplante größere oder kleinere technische Wartungsereignisse eintreten.

Um die Performanz operativer Pläne unter Anwendung verschiedener Recoverystrategien bewerten zu können, wird mit SimAir eine Vielzahl an heterogenen Daten erhoben. Für die Untersuchung von Flugplänen werden Informationen bzgl. der Pünktlichkeit der Flight Legs gesammelt und in verschiedene Verspätungsklassen eingeteilt. Die Anzahl der gestrichenen Flüge und der Anteil der gestörten bzw. unterbrochenen Passagierumläufe werden ebenfalls festgestellt. Die Bewertung des Personaleinsatzplans findet auf Grundlage der operativen Personalkosten, der Blockzeiten, der Anzahl aktivierter Reservecrews, durchgeführter Deadheads und der Menge an Verstößen gegen die Planungsregeln statt. Abschließend ermöglichen die Zahl der Abflüge und Ankünfte sowie die Wartezeiten in Warteschlangen die Leistungsanalyse einzelner Flughäfen.

6.2.2 MEANS

In einem Projekt aus dem Jahr 2001 untersuchte das Massachusetts Institute of Technology die Auswirkungen von Verkehrsüberlastungen an den zentralen Hubs von Flugverkehrssystemen (vgl. im Folgenden [Clar]). Im Verlauf des Projekts hat sich das Forschungsvorhaben dahingehend ausgedehnt, auch die wechselseitigen Auswirkungen von Strategien der Luftverkehrskontrolle, des Verkehrsfluss-Managements und der Flugbetriebskontrollen einzelner Fluglinien auf den gesamten US-amerikanischen Luftraum zu untersuchen. Der Fokus lag auf der Entwicklung und Bewertung von Strategien des Flugverkehrsmanagements unter Berücksichtigung der Planungs- und Recovery-Entscheidungen der Fluglinien. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes eine in C++ geschriebene Software-Anwendung mit dem Namen MIT Extensible Air Network Simulation (MEANS) entwickelt. Sie bietet ein Framework zur diskreten ereignisbasierten Simulation des US-Flugverkehrssystems mit

der Möglichkeit, es flexibel zu erweitern und an den gewünschten Detailgrad anzupassen. Auf Basis der Flughäfen und Routen bildet es die Bewegungen von Flugzeugen, Besatzungen und Passagieren in der Luft und am Boden ab.

Das MEANS-Modell basiert auf einer modularen Architektur bestehend aus Informations-, Entscheidungsfindungs- und Status-Modulen (vgl. Abbildung 6.5). Der gegenseitige Informationsaustausch wird durch Aktualisierungen der Ereigniswarteschlangen durchgeführt, die in jedem Modul vorhanden sind. Der modulare Aufbau der MEANS-Software unterstützt eine verteilte Implementierung des Programms auf verschiedene Hardware- und Software-Plattformen, in der die einzelnen Module über TCP/IP kommunizieren. Weiterhin wurden pro Modul bis zu vier Implementierungen realisiert, die sich im Detailgrad ihrer zugrunde liegenden Simulationsmodelle unterscheiden, um einem Anwender die Möglichkeit zu geben, das Framework auf seine individuellen Bedürfnisse und an den verfügbaren Datenbestand anzupassen.

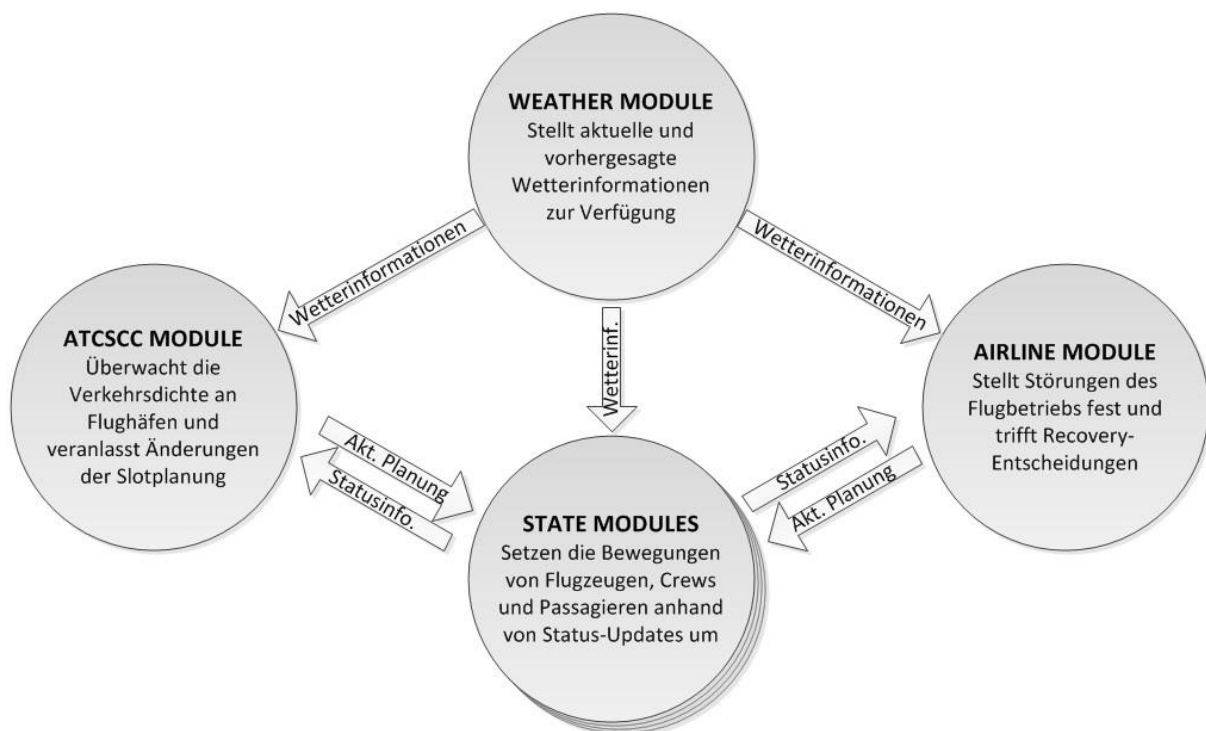


Abbildung 6.5: Modulare Architektur des MEANS-Modells

Das Wettermodul ist ein reines Informationsmodul, das anderen Modulen aktuelle und vorhergesagte Wetterinformationen übermittelt, ohne dabei selbst welche zu empfangen. Die Informationen beziehen sich dabei nur auf die Wetterverhältnisse an Flughäfen und betreffen somit nicht die Flugrouten. Je nach Implementierung verwendet es Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Erstellung von Wetterprognosen oder es greift auf archivierte Datensätze, wie z.B. Höhen von Wolkendecken, Sichtverhältnisse und Windgeschwindigkeiten und -richtungen, zurück.

Das Modul der Flugverkehrsüberwachung (Air Traffic Control System Command Center, ATCSCC) ist eines von zwei Entscheidungsmodulen. Es überwacht den Verkehrsfluss und das Verkehrsvolumen

innerhalb des betrachteten Luftraums. Basierend auf den Ankunftsdaten bestimmt es für jeden Flughafen das Verhältnis zwischen Kapazität und Bedarf. Bei dem Auftreten oder der Vorhersage von Staus in der Luft veranlasst es Änderungen in der bestehenden Slot-Planung, um diesen entgegenzuwirken. So werden z.B. verspäteten Flügen spätere Zeitfenster zur Landung eingeräumt oder der Start von Flügen verzögert. Im Wesentlichen hat die Neuzuweisung von Flughafen-Slots zum Ziel, Staus von vorne herein zu vermeiden und, wenn dies nicht möglich ist, sie aus der Luft auf den Boden zu verlagern.

Das andere Entscheidungsmodul ist das Airline-Modul, welches das Flugmanagement einer Fluglinie abbildet und nach aufgetretenen Störungen Recovery-Maßnahmen einleitet. In Abhängigkeit der Auswirkungen einer Störung auf die Reisewege der Passagiere kann es entscheiden, Flüge zu tauschen, zu verzögern oder zu streichen. Neben dem Ziel, die Auswirkungen von Störungen für die Passagiere zu minimieren, gilt es gleichzeitig, die ökonomischen Interessen der Fluglinie zu berücksichtigen. In der komplexesten Version des Moduls werden darüber hinaus noch Crew- und Wartungsbeschränkungen in den Entscheidungsprozess mit einbezogen.

Im Simulationsmodell werden die Flughäfen des betrachteten Flugnetzes als die Quellen und Senken des Flugverkehrs angesehen. Die Zu- und Abflüsse der außerhalb des Systems liegenden Flughäfen werden aggregiert und in Form eines weiteren Flughafens abgebildet. Innerhalb des Modells sind vier Module dafür vorgesehen, die Bewegungsabläufe von Flugzeugen und damit implizit die der Besatzungen und Passagiere durch Status-Aktualisierungen umzusetzen: Während das En-Route-Modul für Bewegungen in der Luft zuständig ist, sind das Tower-, das Taxi- und das Gate-Modul für die Bodenprozesse an Flughäfen verantwortlich, die im Wesentlichen dem in Abbildung 6.4 gezeigten Ablauf folgen. Das Gate-Modul behandelt den Turnaround-Prozess eines Flugzeugs, wenn es seine Parkposition an einem Flughafen erreicht. Das Ein- und Aussteigen von Passagieren, das Be- und Entladen des Gepäcks und das Reinigen, Betanken und Catern eines Flugzeugs werden zu einem Prozess aggregiert, dessen Dauer von der Gewichtsklasse des Flugzeugs, des Flugbetreibers und dem entsprechenden Flughafen abhängt. Die Dauer verlängert sich im Falle eines ungeplanten Wartungsereignisses, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit vom Flugzeugtyp und der letzten durchgeführten Wartung abhängig ist. Während der Taxi-in- und Taxi-out-Prozesse unterliegt ein Flugzeug der Kontrolle des Taxi-Moduls, in dem mehrere sich schneidende Rollwege zwischen den Gates und den Start- und Landebahnen abgebildet werden können. Hier kann die Notwendigkeit bestehen, dass sich Flugzeuge gegenseitig passieren lassen oder an Kreuzungen aufeinander warten müssen, was zu sehr unterschiedlichen Transferzeiten führen kann. Die MEANS-Software bietet für dieses Modul verschiedene Implementierungen, die auf fixen Taxizeiten oder auf historischen oder geschätzten Daten basieren. Für jeden Flughafen des Systems sieht das Simulationsmodell eine Instanz des Tower-Moduls vor. Diese Tower-Module sind vor allem dafür verantwortlich, die Start- und Landekapazitäten der jeweiligen Flughäfen zu bestimmen und von ihnen die Wartezeiten der

Flugzeuge in den Runway- und Airspace-Queues abzuleiten, um die Sicherheitsabstände zwischen ankommenden und abfliegenden Flugzeugen zu gewährleisten. Das En-Route-Modul ist für den eigentlichen Flugprozess verantwortlich. Es nutzt eine von den Start- und Zielflughäfen abhängende Wahrscheinlichkeitsverteilung, um die Flugzeiten der Legs zu bestimmen.

Je nach Konfiguration des Simulations-Frameworks kann durch die MEANS-Software eine Vielzahl von Daten erhoben werden. Die innerhalb von Simulationen beobachteten Konsequenzen getroffener Entscheidungen können dazu genutzt werden, Strategien des Flugverkehrsmanagements zu entwickeln und ihre Qualität zu bewerten. So wurde MEANS bspw. von Kang in ihrer Dissertation dazu verwendet, den von ihr entwickelten ‚Degradable Airline Schedule‘-Ansatz, welcher schon in Abschnitt 4.2.3.1 Erwähnung fand, zu verifizieren (vgl. [Kang]). Sie simulierte Flugpläne unter variierenden Wetterbedingungen und beobachtete die Auswirkungen auf Flug- und Passagierspätungen sowie auf die Kosten.

6.2.3 SimOps

Im Rahmen einer im Jahr 2007 an der Technischen Universität Clausthal veröffentlichten Dissertation über robuste Flugplanung mittels stochastischer Modelle wurde das ereignisbasierte Simulationstool SimOps entwickelt (vgl. im Folgenden [Fuhr]). Es implementiert ein stochastisches ereignisgesteuertes Flugverkehrsmodell, das auf detaillierten Informationen basiert, die von der Deutschen Lufthansa AG bereitgestellt wurden. Das Tool unterstützt die Erstellung von Flugplänen und die Positionierung und Dimensionierung von Zeitpuffern, um einen angestrebten Grad an Pünktlichkeit durch ein Minimum an Ressourcen zu erreichen. SimOps wurde von den Planern der Lufthansa dazu verwendet, die Auswirkungen verschiedener MCTs zu untersuchen, die Größe ihrer Reserveflotten zu dimensionieren und verschiedene Szenarien der Personaleinsatzplanung zu bewerten und miteinander zu vergleichen.

Im Gegensatz zu den beiden vorigen Modellen liegt der Schwerpunkt des SimOps-Modells nicht auf dem Off-Blocks-Prozess. Dieser ist nur von untergeordnetem Interesse und wird daher stark vereinfacht als ein einziger Prozess behandelt. Für Taxi-, Warte- und Flugzeiten wird eine aggregierte Verteilung verwendet, mit der sich tageszeitabhängige Verkehrsstörungen an Flughäfen abbilden lassen. SimOps fokussiert den Turnaround-Prozess, den es in verschiedenen Detailstufen modelliert, indem es Optionen zur Berücksichtigung von Crewumläufen und Passagierbewegungen bietet. Um die Aktivitäten der Turnaround-Prozesse in Bezug zu einzelnen Flügen zu stellen, werden sie in die Subprozesse ‚Flugvorbereitung‘ und ‚Flugnachbereitung‘ eingeteilt, wie sie schon in Abbildung 2.3 dargestellt wurden. Einzig die Be- und Entladevorgänge sind im Modell nicht berücksichtigt worden, da sie laut Fuhr nicht Teil des kritischen Pfades und für sie somit nicht weiter von Interesse waren. Wird der Off-Blocks-Prozess dieser Art zerteilt und einzelnen Flügen zugeordnet, kann es zu Zeitspannen zwischen Nach- und Vorbereitung kommen. Diese unproduktive Wartezeit wird von Fuhr als ‚operationelle Lücke‘ bezeichnet.

Werden die Umläufe von Crews im Modell berücksichtigt, ergeben sich durch Rotationswechsel Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Flügen, die zu einer verstärkten Verbreitung von Störungen im Flugnetz führen können. Bei der Simulation von Umläufen berücksichtigt SimOps daher minimale und maximale Sit- und Connecting Times. Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Passagierbewegungen mit dem Unterschied, dass ein Flug in jedem Fall auf eine verspätete Crew warten muss, während auf verspätete Passagiere nur eine begrenzte Zeit gewartet wird. Zur Abbildung der Umsteigeprozesse von Crews verwendet SimOps detaillierte Flughafenspläne, die die individuellen Distanzen zwischen Parkpositionen an Gates und auf dem Vorfeld beinhalten. Für die Bestimmung von Passagier-Umsteigezeiten werden durchschnittliche Laufgeschwindigkeiten herangezogen.

Der primäre Zweck der SimOps-Anwendung ist die Untersuchung der Robustheit von Flugplänen. Im Verlauf einer Simulation werden Störungsdaten erfasst und entsprechend der Größe ihrer Verspätungen in Kategorien eingeteilt. Der Einsatz sowohl von Personal- als auch von Flugzeug-Ressourcen wird minutengenau aufgezeichnet. Um einen Flugplan darüber hinaus zu beschreiben, werden auch der Grad seines Crewgleichlaufs und seine Dichte bestimmt. Im SimOps-Modell beschreibt die Dichte eines Flugplans das Maß an Pufferzeiten, die zwischen aufeinanderfolgenden Flügen eingeplant wurden. Um die Einflüsse von Crew- und Passagierumläufen auf die Robustheit abzuschätzen, führt Fuhr Simulationen mit und ohne die entsprechenden Modellprozesse durch.

6.3 Modelle zur Simulation von Personaleinsatzplänen

Im Rahmen der verschiedenen Ebenen der Personalplanung können personalbezogene Simulationsverfahren auf vielfältige Weise eingesetzt werden. Wird neben den technischen Aspekten eines Arbeitssystems das Personal als eigenständiges Element abgebildet, spricht man allgemein von personalintegrierter Modellierung. Sie erlaubt die separate Betrachtung und Auswertung aller verschiedenen maschinellen und personellen Ressourcen. Liegt der Fokus eines Simulationsmodells darüber hinaus explizit auf den Eigenschaften individueller Mitarbeiter, handelt es sich um personalorientierte Modellierung. Wie anhand der im Folgenden beschriebenen Studien, die im Umfeld von Einzelhandels- und Fertigungsbetrieben durchgeführt wurden, beispielhaft gezeigt wird, können durch personalorientierte Simulationsmodelle Ermüdungs- und Aufmerksamkeitsverläufe, physische Belastungs- und Gefährdungssituationen sowie dynamische Qualifikationsprofile differenziert für alle Mitarbeiter eines Arbeitssystems abgebildet werden. Weitere Anwendungsbeispiele personalbezogener Einsatzsimulation, u.a. von Mitarbeitern eines Krankenhauses, eines Distributionszentrums und aus dem Bereich der Kundenbetreuung, werden in [Eva2], [Liu], [März], [Müll] und [Ros3] beschrieben.

An der Universität Karlsruhe wurde am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation das personalorientierte Simulationsverfahren ESPE-QS (Engpassorientierte Simulation von Personalstrukturen für qualitätsförderliche Arbeitssysteme) entwickelt, welches die Untersuchung

neuer Formen der Arbeitsorganisation und des Personaleinsatzes in komplexen Arbeitssystemen ermöglicht (vgl. im Folgenden [Zülc] und [Faze]). Mit ihm lassen sich Aussagen über die Effektivität unterschiedlicher Arbeitszeitmodelle treffen und Personalstrukturen ggf. umgestalten oder neu planen. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes FAZEM⁴⁶ wurde das Planungswerkzeug zur Analyse der Arbeitszeitstrukturen von Einzelhandelsbetrieben eingesetzt. Vor dem Hintergrund sich ausdehnender Öffnungszeiten und täglich und saisonal schwankender Kundenaufkommen wurden insbesondere die Anpassungsfähigkeit und das Flexibilisierungspotential der angewandten Personaleinsatzpläne bewertet. Es wurden die Auswirkungen von Schicht-, Block- und Teilzeitarbeitsmodellen auf betriebliche Zielkriterien, wie bspw. Betriebskosten oder Personalauslastung, sowie auf die Präferenzen des Personals, wie z.B. der Wunsch nach En-Bloc-Freizeiten oder Gleitzeiten, ausgewertet. Hierfür wurden neben den Kunden, der Belegschaft und den Arbeitsplätzen, bei denen es sich im Einzelhandel typischerweise um Kassen in Verkaufsabteilungen, Informationsstände, Warenregale, Lager etc. handelt, insbesondere die Einflussfaktoren modelliert, die sich auf die Belastungssituation des Personals und somit auch indirekt auf die Dienstleistungsqualität auswirken. Abhängig von dem betrachteten Arbeitssystem können Arbeitsplätze bspw. durch ihre Klima-, Lärm- oder Lichtverhältnisse charakterisiert werden. Der Grad der Belastung individueller Mitarbeiter hingegen kann durch zusätzliche dynamische Attribute, wie z.B. Ermüdung, Übung, Zeitstress oder Aufmerksamkeit, im Modell erfasst werden. Neben der Produktivität des Arbeitssystems lassen sich hieraus menschliche Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten ableiten, die es durch effektive und möglicherweise auch individuelle Arbeitszeit- und Pausenregelungen zu minimieren gilt.

Dass sich mit dem in ESPE-QS implementierten Simulationsmodell nicht nur Einzelhandelsbetriebe abbilden lassen, wird in einer Arbeit von Thomas Bogus gezeigt (vgl. im Folgenden [Bogu]). Hier werden mit Hilfe der Software unterschiedliche Arbeitszeit- und Pausenregelungen in komplexen Fertigungssystemen analysiert, wobei wiederum die physischen und psychischen Arbeitsbelastungen des Personals und deren Auswirkungen auf die Arbeitsabläufe expliziter Bestandteil der Untersuchung sind. Obwohl Studien bzgl. der psychischen Ermüdung bisher hauptsächlich aus Bereichen wie der Radar- oder der Leitstandsüberwachung bekannt sind, werden sie auch zunehmend für die industrielle Fertigung relevant, da sich durch die fortschreitende Mechanisierung und Automatisierung die personellen Tätigkeiten weg von Verrichtungs- hin zu Überwachungsaufgaben wandeln. Das für die Simulation von Fertigungssystemen verwendete Modell lässt sich in die drei folgenden Hauptkomponenten unterteilen.

Das erste Teilmodell stellt die Arbeitszeit- und Pausenregelungen dar. Seine Basis bildet das Fertigungsprogramm, welches die Stückzahlen und Losgrößen der zu produzierenden Erzeugnisse definiert. Die Reihenfolge und die geplante Dauer der einzelnen Arbeitsvorgänge sind in einem

⁴⁶ FAZEM steht als Akronym für den Projekttitle ‚Auswirkungen flexibler Arbeitszeitmodelle auf den Personaleinsatz und die Belastung des Personals‘.

Durchlaufplan festgeschrieben. Da hier neben maschinellen auch personelle Funktionen berücksichtigt werden, werden den Arbeitsplätzen Anforderungen und den Mitarbeitern Qualifikationen zugeordnet, die in der Durchlaufplanung aufeinander abgestimmt wurden. In den geplanten Auftragsdurchläufen sind auch die Pausen enthalten, welche durch Beginn, Dauer und Häufigkeit beschrieben werden.

In der zweiten Komponente wird die menschliche Zuverlässigkeit modelliert, von der sich die Wahrscheinlichkeiten für Fehlhandlungen vor dem Hintergrund der eingesetzten Arbeitszeit- und Pausenregelungen ableiten lassen. Die Zuverlässigkeit, die als Attribut individueller Mitarbeiter modelliert wird, ist im Simulationsverlauf den folgenden vier dynamischen Einflussfaktoren unterworfen: Ermüdung, Zeitstress, Übung und Aufmerksamkeit. Der Ermüdungsverlauf eines Mitarbeiters wird im Wesentlichen als eine Funktion der Zeit abgebildet. In abwechslungsarmen Situationen tritt ein Zustand der Monotonie ein, der in Abhängigkeit von Art, Dauer und physischer und psychischer Belastung der auszuführenden Tätigkeit einen exponentiellen Anstieg der Ermüdung zur Folge hat. Durch einen Wechsel oder ein Pausieren der Tätigkeit kann sich der Grad der Ermüdung auch wieder reduzieren. Der zeitliche Verlauf dieser Reduzierung ist von dem Arbeitsplatz, der Person sowie von der Art und der Dauer der Pause abhängig. In diesem Zusammenhang wird in dem Modell zwischen geplanten Pausen und ablaufbedingten Wartezeiten unterschieden. Erstere haben eine exponentielle Abnahme der Ermüdung zur Folge, letztere eine lineare. In dem Modell wird die Aufmerksamkeit eines Mitarbeiters, welche bei andauernden Aufmerksamkeitsleistungen, wie sie z.B. im Rahmen von Überwachungsaufgaben erbracht werden müssen, abnimmt, mit Hilfe einer Sigmoidfunktion abgebildet. Der Abklingverlauf während einer ungeplanten Pause oder einer Wartezeit wird hingegen als linear angenommen. Wird der Arbeitsplatz oder die Tätigkeit gewechselt, wird dem Mitarbeiter sofort wieder volle Aufmerksamkeit unterstellt.

In dem dritten Teilmodell werden die Folgen von Fehlhandlungen behandelt, die eine Verringerung der Leistungsfähigkeit des betrachteten Arbeitssystems zur Folge haben. So können Fehler zu einer Verlängerung der ursprünglich geplanten Tätigkeitszeit führen. Auch können sie zu einer Verringerung der Qualität des Erzeugnisses führen. Je nach Ausmaß der Qualitätsminderung kann der Fehler entweder durch einen zusätzlichen Nacharbeitsprozess korrigiert werden oder er führt zum Ausschuss des Erzeugnisses. Welche der drei genannten Konsequenzen im Falle einer Fehlhandlung eintritt, hängt vom jeweiligen Arbeitsgang und dem Ausmaß des Fehlers ab.

Durch das individuelle Abbilden von Mitarbeitern und das Einbeziehen von Ermüdung und ermüdungsähnlicher Zustände, ermöglicht das ESPE-QS-Simulationsmodell die Überprüfung der Eignung verschiedener Arbeitszeit- und Pausenregelungen sowohl für Einzelhandelsbetriebe als auch für komplexe Fertigungssysteme. Neben der Möglichkeit, auch individuelle Pausenzeitenregelungen zu beurteilen, können ‚sich lohnende‘ Pausen identifiziert werden, die zu einer höheren Effektivität eines Arbeitssystems und zu einer höheren Qualität der Erzeugnisse führen.

In einem anderen vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben wurde das Potential untersucht, das Simulationsmodelle, die personalbezogene Informationen berücksichtigen, innerhalb der verschiedenen Ebenen der Arbeitsplanung und -steuerung für das Konzipieren von Maßnahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes darstellen (vgl. im Folgenden [Ehrh]). An dem Projekt ‚Gefährdungsinformationen in Planungssysteme integrieren‘ (GiPs) waren die Universitäten Magdeburg und Wuppertal, die TU Dresden, Systemkonzept Köln und das Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie in Wuppertal beteiligt. Um neben Aussagen zur technischen und zeitlichen Umsetzbarkeit von geplanten Arbeitsabläufen auch Prognosen zu Gefährdungs- und Belastungssituationen des Personals ableiten zu können, wurden neben den betrieblichen Arbeitssystem- und Ressourcenkennzahlen auch personalbezogene und insbesondere gefährdungsrelevante Faktoren in das entwickelte Simulationsmodell mit einbezogen. So wurden für die einzelnen Arbeitsplätze des betrachteten Systems Informationen bzgl. heißer Oberflächen, Lärmentwicklung, Erschütterungen, Körperbewegungen und statischer und dynamischer Muskelarbeit in die zugrunde liegende Datenbasis mit aufgenommen. Gleichzeitig wurde das Regelwerk des Modells für die verschiedenen Umgebungseinflüsse um entsprechende Grenz- und Richtwerte ergänzt. Mit einem derart erweiterten Modell lassen sich neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, bei denen der Fokus auf Termin- und Kostenprognosen liegt, auch Gefährdungs-, Belastungs- und Anforderungsanalysen durchführen, die als Entscheidungskriterien in verschiedene Planungsphasen einfließen können. Im Rahmen der Personaleinsatzplanung z.B. können Gefährdungs- und Belastungsprofile für die Gestaltung sicherer Tätigkeitsfolgen herangezogen werden. Des Weiteren können hier Belastungsschwerpunkte bereits im Vorfeld erkannt und gezielt entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen implementiert werden.

Neben der Personaleinsatzplanung kann auch die vorgelagerte Personalbedarfsplanung von personalorientierten Simulationsmodellen profitieren (vgl. im Folgenden [Lunz]). Lunze strebt in seiner Arbeit den betriebswirtschaftlich optimalen Einsatz von Bedienern in einem mittelständischen Fertigungsbetrieb an. Vor diesem Hintergrund verwendet er OptiFert, ein Programm, das zur Simulation von Werkstatt- und Kleinserienfertigungen entwickelt wurde, um die Güte verschiedener Einsatzplanszenarien zu bewerten, wobei er sich u.a. auf die erforderliche Anzahl an Bedienern und deren Qualifikationen fokussiert. Die Datengrundlage des modellierten Systems wird durch die Arbeitsprozesse, die Losgrößen der Aufträge und durch die Arbeitspläne, die die Zuordnung von Aufträgen, Bedienern und Stationen spezifizieren, gebildet. Das Modell enthält Arbeitsstationen zur Fertigung und zur Montage von Werkstücken, die je nach Qualifikationsanforderung in die Stationsklassen 1, 2 und 3 eingeteilt sind. Zusätzlich werden die Stationen durch ihre Bedienraten und dadurch spezifiziert, ob sie permanent, temporär oder gar nicht auf Bediener angewiesen sind. Die Bediener werden hauptsächlich durch ihre Namen, ihre Lohngruppen und die Qualifikationen, über die sie verfügen, beschrieben. Die Qualifikationen werden den Stationsklassen entsprechend angegeben, wobei hier eine hierarchische Struktur abgebildet wurde. Ein Bediener, der über die Qualifikation

verfügt, eine Station der Klasse 3 zu bedienen, kann demnach auch an Stationen der Klassen 2 und 1 arbeiten. Weiterhin darf ein Bediener der ‚Klasse 2‘ auch ‚Klasse 1‘-Stationen besetzen. Gleichzeitig steht die Bezahlung eines Mitarbeiters insofern in direktem Zusammenhang zu seiner Qualifikation, als dass ihm mit steigender Qualifikationsklasse eine höhere Lohngruppe zugeordnet wird. Nach erfolgter Simulation lassen sich geplante und tatsächliche Durchlaufzeiten und Herstellkosten gegenüberstellen. Letztere setzen sich aus den für ein Szenario fixen Materialkosten und den variablen Fertigungskosten zusammen, wobei in den Fertigungskosten die Kosten für nicht eingesetzte bzw. nicht ausgelastete Bediener und Maschinen enthalten sind. Anhand der Ergebnisse lassen sich ebenfalls die qualifikatorischen Anforderungen an das Personal ablesen und ob dieses optimal eingesetzt wurde. Weiterhin lassen sich Vorschläge für die weitere Qualifizierung im Sinne zukünftiger Personaleinsatzplanungen ableiten.

6.4 Diskussion und Modellvergleich

Die Auswahl der Elemente, die in ein Modell aufgenommen werden, und der jeweilige Detailgrad, in dem diese dargestellt werden, orientiert sich an den Zielsetzungen, die es mit Hilfe einer Simulationsstudie zu erreichen gilt. In diesem Abschnitt, welcher in Teilen auf einer bereits veröffentlichten Publikation basiert (vgl. [Kuc3] S. 177-178), werden zunächst die zuvor beschriebenen Simulationsmodelle von Flugverkehrssystemen und Personaleinsatzplänen gegenübergestellt und ihre individuellen Betrachtungsschwerpunkte anhand von sechs ausgewählten Kriterien hervorgehoben. Gleichzeitig werden die Bedeutungen dieser Kriterien für die Personaleinsatzplanung diskutiert. Die Eignung eines Modells zur Simulation des Einsatzes von Flugpersonal wird daraufhin von der Kombination der Kriterien, auf die die Schwerpunkte gelegt wurden, abgeleitet. Ein Überblick über die Modelle und ihre Eignung zur Einsatzplanungssimulation von Flugpersonal wird in Tabelle 6.1 gegeben.

Obwohl alle drei Modelle, die in Abschnitt 6.2 vorgestellt wurden, zur Luftverkehrssimulation eingesetzt werden und alle einem dynamischen, stochastischen, ereignisdiskreten Ansatz folgen, unterscheiden sie sich doch in der Modellierung der einzelnen operativen Prozesse. Während SimAir und MEANS den Schwerpunkt ihrer Betrachtung auf den Off-Blocks-Prozess legen (vgl. Abbildung 6.4), aggregieren sie sämtliche Tätigkeiten am Boden zu einem einzigen Turnaround-Prozess. Obwohl die Hauptaufgaben des Kabinen- und Cockpitpersonals während des Fluges an Bord eines Flugzeugs durchzuführen sind, ist es für ein Simulationsmodell, welches den Personaleinsatz fokussiert, nicht notwendig, die einzelnen Ereignisse und Prozesse, wie sie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt sind, zu berücksichtigen. Hier ist es ausreichend, die kumulierte Flugzeit eines Legs, vom Abflug bis zur Ankunft, abzubilden. Für die Personaleinsatzsimulation sind die Bodenprozesse an Flughäfen von größerer Relevanz, da ihr Einfluss auf die einzelnen Tätigkeiten der Besatzung deutlich komplexer ausfällt. An dieser Stelle kann die separate Erfassung von Arbeits-, Ruhe- und Pausenzeiten nur erfolgen, wenn die Prozesse an Flughäfen differenziert betrachtet werden. Im Gegensatz zu SimAir

und MEANS setzt SimOps deshalb seinen Schwerpunkt auf die Bodenprozesse und verallgemeinert gleichzeitig den Off-Blocks-Prozess.

Die Umsetzung eines Personaleinsatzplans ist ein hochgradig stochastischer Prozess, dessen Ablauf durch vielfältige Ereignisse, wie z.B. schlechtes Wetter oder technische oder personelle Ausfälle, gestört werden kann. Die AOC einer Fluglinie reagiert auf diese Störungen und versucht, durch geeignete Recovery-Maßnahmen die Auswirkungen der Störungen zu minimieren und lokal zu begrenzen, um schnellstmöglich zum Ursprungsplan zurückzukehren. Die dem Crew-Recovery zuzuordnenden Maßnahmen, wie bspw. das Austauschen oder Repositionieren von Crews oder das Einsetzen von Standby- oder Reservepersonal, haben direkten und erheblichen Einfluss auf den Simulationsverlauf, weshalb das Recovery-Management für den Blickwinkel dieser Arbeit eine unverzichtbare Modellkomponente darstellt. Im MEANS-Modell werden Recovery-Prozeduren bis zu einem gewissen Grad berücksichtigt, wobei es sich hier nicht um explizites Crew-Recovery handelt. Während SimAir eine breite Palette von Recovery-Maßnahmen abbildet, verzichtet SimOps auf entsprechende Implementierungen.

Um zu bestimmen, inwiefern während der Modellierung der Fokus auf der Abbildung des Flugpersonals gelegen hat, werden die verschiedenen Projektziele herangezogen. Es ist das Ziel des SimAir-Projekts, verschiedene Recoverystrategien miteinander zu vergleichen und ihren Einfluss auf die Robustheit von Flug- und Personaleinsatzplänen abzuschätzen. Und obwohl die Flugpläne im Vordergrund zu stehen scheinen, wird das Personal, welches in Form von Crews abgebildet wird, als separater Faktor aufgefasst, der die operative Umsetzung des Flugverkehrs beeinflusst. Gleiches gilt für das SimOps-Modell, welches ebenfalls für die Robustheitsanalyse von Flug- und Personaleinsatzplänen entworfen wurde und sich hierfür auf die wechselseitigen Einflüsse sich überschneidender Pairings konzentriert. Einzig im MEANS-Modell werden Crews als impliziter Bestandteil von Flight Legs aufgefasst. Da hier das Forschungsinteresse in der Analyse und Steuerung des Flugverkehrs nationaler Lufträume begründet liegt, wird das Flugpersonal einer Fluglinie als interne Ressource abgebildet, deren Einfluss auf den allgemeinen Verkehrsfluss oder die Belastung von Flughafenkapazitäten als minimal angesehen wird.

Keines der drei Flugverkehrsmodelle geht über die Berücksichtigung von Crews hinaus und bildet individuelle Mitarbeiter des Flugpersonals ab. Folglich können sie auch keine personenspezifischen Flug-, Arbeits-, Ruhe- und Pausenzeiten erheben, was zu Abweichungen in der Personalkostenberechnung sowie zu Ungenauigkeiten in der Erfassung von Ruhezeitverstößen führt. Des Weiteren können mit ihnen keine dynamischen Crewzusammensetzungen abgebildet werden, die sich z.B. durch Verspätungen oder krankheitsbedingten Ausfällen einzelner Crewmitglieder ergeben. Ein für die Simulation von Personaleinsatzplänen angemessener Detailgrad wird erst durch die Einbeziehung individueller personeller Eigenschaften erreicht. Obwohl sich die inhaltlichen Zielsetzungen aller in Abschnitt 6.3 vorgestellten Simulationsprojekte unterscheiden, ist ihnen

gemeinsam, dass sie zwischen einzelnen Mitarbeitern unterscheiden und sie mittels Attributen beschreiben, deren Ausprägungen sich über einen Simulationsverlauf individuell verändern können. Ein weiterer für die Personaleinsatzplansimulation wichtiger Punkt ist, dass neben dem Personal auch die von ihm durchzuführenden Aufgaben individuell und detailliert beschrieben werden. Die drei personalorientierten Modelle stellen hierfür dem Ermüdungs- oder Belastungsgrad oder dem Qualifikationsprofil eines Mitarbeiters entsprechende Charakteristika einzelner Tätigkeiten oder Arbeitsplätze gegenüber. So kann eine Überwachungsaufgabe z.B. zu schnellerer Ermüdung führen und andere Qualifikationen erfordern als eine Tätigkeit in einer Montagelinie.

		Kriterien					
		Boden- prozesse	Off-Blocks- Prozesse	Recovery- Maßnahmen	Flugpersonal (Crews)	Individuelle Mitarbeiter	Individuelle Aufgaben
Modelle	SimAir	×	✓	✓	✓	-	-
	MEANS	×	✓	✓	×	-	-
	SimOps	✓	×	×	✓	-	-
	ESPE-QS	-	-	-	-	✓	✓
	GiPs	-	-	-	-	✓	✓
	OptiFert	-	-	-	-	✓	✓

Tabelle 6.1: Überblick über die Modelle und ihre Eignung zur Einsatzplanungssimulation von Flugpersonal

7 Modell zur Simulation individueller Flugpersonaleinsatzpläne

Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 6.4 definierten Bewertungskriterien ist festzustellen, dass die SimAir-, MEANS- und SimOps-Simulationsmodelle nur bedingt für die Untersuchung und Bewertung der Robustheit personengenaue Flugpersonaleinsatzpläne geeignet sind. Um die personellen Abläufe und deren Stabilität und Flexibilität im operativen Betrieb hinreichend realitätsnah untersuchen zu können, ist es notwendig, anstelle ganzer Crews einzelne Mitarbeiter abzubilden. Nur so ist es möglich, individuelle Pairings innerhalb des Flugnetzes einer Fluglinie nachzuzeichnen und den einzuhaltenden gesetzlichen und tariflichen Restriktionen individuelle Arbeits- und Ruhezeiten gegenüberzustellen. Auch können die Tatsachen, dass sich die Legs innerhalb eines Pairings sowohl in der Anzahl der anfallenden Aufgaben als auch in deren Qualifikationsanforderungen unterscheiden können und sich auch nicht alle Mitarbeiter aufgrund unterschiedlicher Qualifikationsprofile wechselseitig austauschen lassen, erst auf diesem Detaillevel berücksichtigt werden. Das Ausführen von Springerdiensten, das Verspäten bzw. krankheitsbedingte Ausfallen von Personalressourcen zu Beginn eines Umlaufs und das Einbeziehen differenzierter Maßnahmen des Crew-Recovery sind weitere Punkte, die i.d.R. einzelne Personen betreffen und sich auf der Crew-Ebene nicht ohne Weiteres integrieren lassen.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und in diesem Kapitel vorgestellte Simulationsansatz fokussiert die operativen Prozesse von Flugpersonal auf individueller Ebene und bildet deren Umläufe, Aufgaben, Qualifikationen und Recovery-Prozeduren personengenau ab. Der Ansatz basiert auf einer Kombination geeigneter Komponenten der in Kapitel 6 vorgestellten Flugverkehrs- und Personaleinsatzplanmodelle, die um für die Untersuchungsziele dieser Arbeit notwendigen Zusammenhänge ergänzt wurde. Im Einklang mit den zuvor beschriebenen Modellen handelt es sich dabei um einen mesoskopischen, dynamisch-stochastischen Simulationsansatz, dessen Ablauflogik auf der Verarbeitung diskreter Ereignisse basiert. Da während des Simulationsprozesses, wie bei dem in Kapitel 5 vorgestellten Planungsansatz, die Sicht einer Fluglinie eingenommen wird, lassen sich die Modelle aus den beiden Bereichen Optimierung und Simulation leicht miteinander kombinieren.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird das Simulationsmodell beschrieben, wobei sowohl auf die enthaltenen Entitäten mit ihren Attributen und Beziehungen als auch auf die Ereignisse und Prozesse, die diese durchlaufen, eingegangen wird. In Abschnitt 7.2 wird der grundlegende Aufbau der entwickelten Simulationsanwendung erläutert und auf dessen Ein- und Ausgabedaten eingegangen. Die Validierung des Simulationsprogramms wird in Abschnitt 7.3 behandelt, woraufhin in Abschnitt 7.4 die Anwendbarkeit des entwickelten Programms demonstriert wird.

7.1 Modellbeschreibung

7.1.1 Flugnetz und Flugplan

Ein Flugplan und das ihm zugrunde liegende Flugnetz bilden die Kerndienstleistung ab, die eine Fluglinie ihren Kunden anbietet, und zugleich auch den geographischen Bezugsrahmen dieses Modells (vgl. für diesen und den folgenden Abschnitt nochmals das Entity Relationship Diagramm und das Datenbankschema aus Kapitel 3.3, denen die in diesem Modell berücksichtigten Attribute und Beziehungen entnommen werden können). Dabei wird das Flugnetz einzig anhand der im Rahmen des betrachteten Flugplans bedienten Flughäfen sowie durch die Routen der angebotenen Flüge, die diese miteinander verbinden, definiert. Da für die Betrachtung der personellen Abläufe der Bodenprozess fokussiert wird, gleichzeitig aber eine stark abstrahierte Abbildung des Off-Blocks-Prozesses ausreicht, werden für Flughäfen keine Start- und Landebahnen, Taxiwege oder Tower modelliert, wie es bspw. im MEANS-Projekt getan wurde (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die Flughäfen werden vielmehr als die Orte abgebildet, an denen Flugverbindungen starten, sich überschneiden oder enden und an denen im Simulationsverlauf dynamisch anwachsende oder abnehmende Flugzeug- und Personalressourcen stationiert und abgerufen werden können. Das Flugnetz selbst wird als vollkommen symmetrisch angenommen, weshalb immer zwei gegenläufig gerichtete Routen ein bidirektionales Pärchen bilden, auch für den Fall, dass in einem betrachteten Flugplan(-ausschnitt) eine entsprechende Flugverbindung fehlen sollte.

Dem in Kapitel 5 vorgestellten Optimierungsmodell folgend, werden auch in diesem Simulationsmodell sämtliche Flight Legs und die auf ihnen durchzuführenden Jobs separat erfasst. Zusätzlich werden auch die vom Flugpersonal auszuführenden Standby- und Reservedienste berücksichtigt, indem sie dem jeweiligen Flughafen entsprechend ihrer Zeitdauer vorübergehend als Ersatzpersonal zugerechnet werden. Die Tatsache, dass Reservedienste i.d.R. nicht direkt am Flughafen versehen werden, wie es bei Standby-Diensten der Fall ist, wird durch Vorlaufzeiten abgebildet, die es abzuwarten gilt, bevor das Reservepersonal tatsächlich einen Umlauf beginnen kann.

7.1.2 Flugzeuge und Mitarbeiter

Die Flugzeugflotte und die Flugdienstmitarbeiter stellen die Kernressourcen einer Fluglinie dar, mit denen sie ihr Flugangebot umsetzt. So wie nur die Flüge der betrachteten Fluglinie berücksichtigt werden, werden auch nur ihre Flugzeuge und Mitarbeiter in das Modell mit aufgenommen und die anderer Fluglinien außen vor gelassen.

Die Flugzeuge einer Fluglinie, welche sich auch innerhalb des Modells alle anhand einer Kennung eindeutig identifizieren lassen, werden genau einem Flugzeugtyp zugeordnet, über den sich technische Merkmale wie die Anzahl der Sitzplätze, die maximale Reisegeschwindigkeit etc. ableiten lassen. Die Flight Legs, die im Through Assignment zu Umläufen zusammengefasst und im Tail Assignment einzelnen Flugzeugen zugewiesen wurden, werden direkt bei diesen als Rotationen hinterlegt. Um die

simulierte Abarbeitung der Rotationen verwalten und deren Validität sicherstellen zu können, werden Variablen bzgl. der aktuellen Positionen der Flugzeuge, deren aktuell auszuführenden Legs sowie der aktuellen Status (siehe Tabelle 7.1) permanent fortgeschrieben. Um auch die Wartungsrestriktionen im Modell abbilden zu können, wird darüber hinaus pro Flugzeug festgehalten, wie viele Flugstunden seit den letzten Wartungsarbeiten vergangen sind.

Aircraft statuses	Employee statuses
• Idling	• Idling
• Preparing	• Briefing
• Crew Boarding	• Boarding
• Pax Boarding	• Flying
• Flying	• Deboarding
• Pax Deboarding	• Sitting
• Crew Deboarding	• Resting
• Postprocessing	• Transferring
• Maintaining	• Standing by
	• Reserve
	• Debriefing

Tabelle 7.1: Überblick über die verschiedenen Status von Flugzeugen und Mitarbeitern

Die Mitarbeiter des Flugpersonals lassen sich ebenfalls eindeutig identifizieren und entsprechen jeweils einem bestimmten Crewtyp, entweder ‚Cockpit‘ oder ‚Cabin‘. Darüber hinaus lassen sie sich individuell anhand ihrer Homebases und ihrer erworbenen Qualifikationen und Musterberechtigungen charakterisieren. Analog zu den Rotationen der Flugzeuge werden die Pairings und die in ihnen enthaltenen Jobs direkt den Mitarbeitern zugeschrieben. Dies umfasst die herkömmlichen primären und unterstützenden Aufgaben an Bord von Flugzeugen, aber auch die Standby- und Reserveaufgaben an den Flughäfen. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass im Simulationsmodell jeder Mitarbeiter nur genau eines der zuvor geplanten Pairings erhält und ihm nicht, wie in der realen Personaleinsatzplanung üblich, durch den Rosteringprozess innerhalb einer Zeitspanne von üblicherweise einem Monat mehrere Pairings zugeordnet werden. Durch das Ausklammern der Rostering-Planungsphase wird dem Untersuchungsziel dieser Arbeit, die Auswirkungen der ihr vorgelagerten Crew Pairing- bzw. Job Pairing-Planungsphase auf die Robustheit zu untersuchen, Rechnung getragen. Durch diese Modellierungsentscheidung wird sichergestellt, dass langfristige Personalausfälle aufgrund von länger andauernden Krankheiten nicht die Simulationsergebnisse bzgl. der eher kurz- bis mittelfristigen Störungfortpflanzungen im operativen Betrieb verfälschen. Die simulierte Abarbeitung der Pairings wird, wie es auch schon für die Rotationen der Flugzeuge erläutert wurde, anhand von Attributen durchgeführt und überprüft, die den aktuellen Standort, den aktuellen Status (siehe erneut Tabelle 7.1) und die aktuellen Aufgaben eines jeden Flugdienstmitarbeiters betreffen. Zur Einhaltung der Arbeits- und Ruhezeitenregelungen werden für jeden Mitarbeiter die täglichen Arbeitszeiten sowie die Anzahl der durchgeführten Flüge vermerkt.

7.1.3 Ereignisse und Prozesse

Aus einer formalen Sichtweise heraus sind die Mitarbeiter Objekte, die sich durch ein Flugnetz bewegen, wobei sie zu Paketen zusammengefasst werden, die wiederum die Flugzeuge repräsentieren. Auf welche Art Flugzeuge und Mitarbeiter diese Bewegungen im Rahmen der simulierten Durchführung des Flugplans umsetzen, wird in der EPK in Abbildung 7.1 dargestellt und im Folgenden erläutert.

Nach Beginn der Simulation wartet ein Flugzeug zunächst auf das *Preparation Start*-Ereignis des ersten Legs seiner Rotation (vgl. im Folgenden die Prozessbeschreibungen in Kapitel 2.2). Der sich anschließende *Prepairing*-Prozess aggregiert die in Abbildung 2.3 dargestellten Prozesse der Flugzeug-Vorbereitung, da eine separate Behandlung von ‚Baggage loading‘, ‚Routine maintenance check‘, ‚Fuelling‘, ‚Cleaning‘ und ‚Catering loading‘ keinen Mehrwert für die Zielsetzungen dieser Arbeit bietet. Der Abschluss dieses Prozesses bedeutet nicht zwingend den sofortigen Beginn des *Crew Boardings*, da evtl. noch auf Teile der Flugbesatzung gewartet werden muss. Die unproduktiven Flugzeug-Wartezeiten an dieser Stelle sind den ‚operationellen Lücken‘ aus dem Modell von Fuhr gleichzusetzen (vgl. [Fuhr] S. 16-17). Ist die Crew vollzählig, geht sie an Bord des Flugzeugs und führt u.a. Kabinen- und Preflight-Checks durch. Im Anschluss führen sie das *PAX Boarding* durch, mit dessen Beendigung auch die Flugvorbereitung abgeschlossen ist. Der nun folgende Off-Blocks-Prozess (in Abbildung 7.1 grau hinterlegt) aggregiert die in Abbildung 6.4 gezeigte Prozesskette, da eine Differenzierung in Taxi-, Warte- und Flugzeiten überflüssig ist, da sie alle auf die Flugzeit des Personals angerechnet werden. Weiterhin müssten für eine realistische Abbildung des Flugverkehrs im Umfeld von Flughäfen neben den Flugzeugen der betrachteten Fluglinie auch die sämtlicher anderer Fluglinien betrachtet werden, wie es bspw. im MEANS-Projekt gemacht wurde. Mit Eintritt des Arrival-Ereignisses wird das Flugzeug zunächst von den Passagieren, dann von der Besatzung verlassen. Aus der Sicht eines Flugzeugs schließt sich der Postprocessing-Prozess an, der im Wesentlichen das ‚Catering und Baggage off-loading‘ beinhaltet. Beinhaltet die Rotation eines Flugzeugs weitere Legs, beginnt der Prozess von neuem, indem auf das nächste *Preparation Start*-Ereignis gewartet wird. In Abhängigkeit der angesammelten Flugstunden seit der letzten Wartung muss das Flugzeug zunächst einen *Maintaining*-Prozess durchlaufen. Sind keine weiteren Flüge durchzuführen, verfällt das Flugzeug bis zum Simulationsende in einen *Idling*-Prozess.

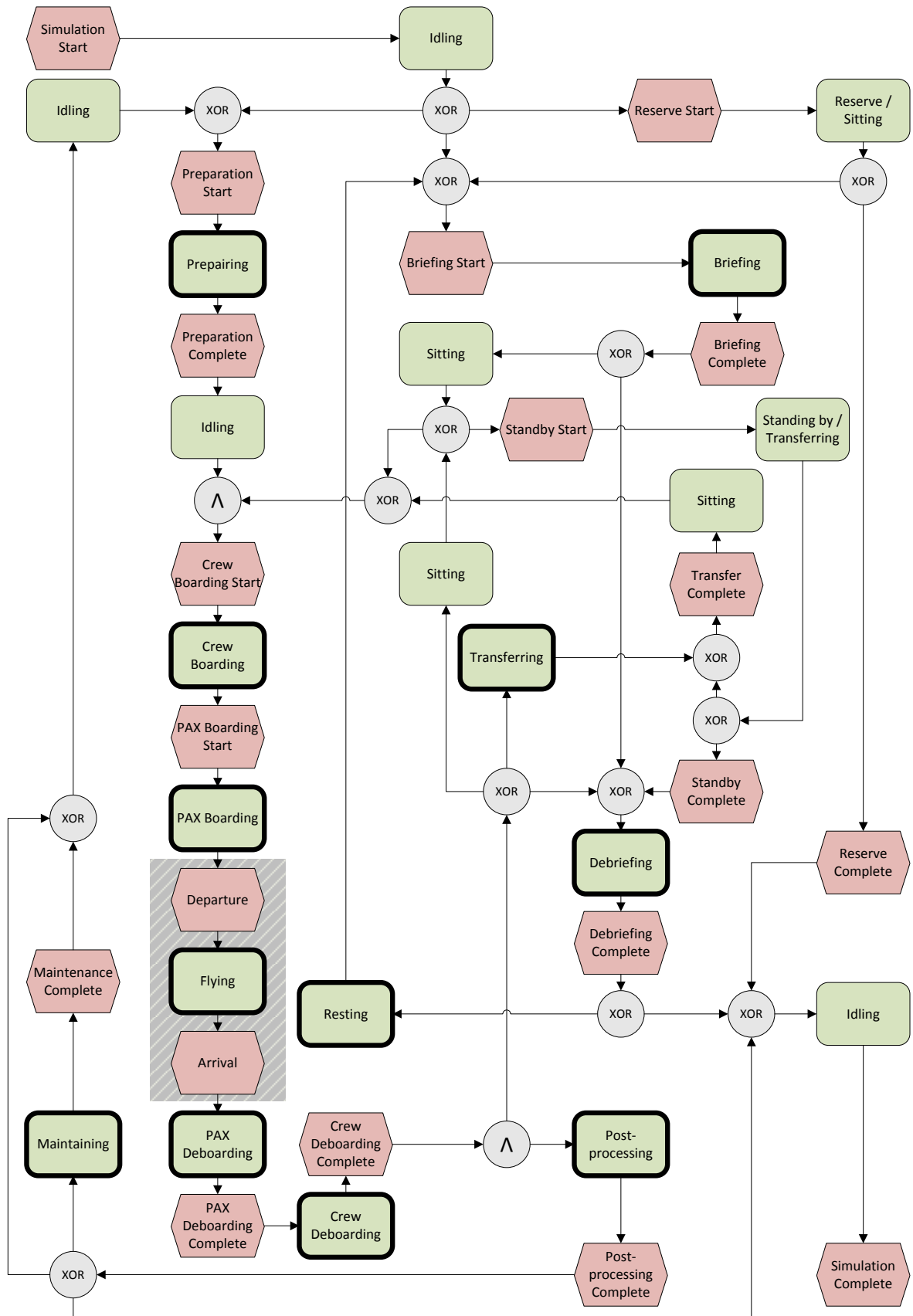


Abbildung 7.1: EPK des Simulationsablaufs (AOC-Aufrufe implizit durch dick umrandete Prozesse dargestellt, Off-Blocks-Prozess grau hinterlegt)

Mitarbeiter des Flugpersonals warten nach dem *Simulation Start* auf den Beginn ihres ersten Einsatzes. Findet dieser im Rahmen eines regulären Pairings statt, wird der Tag mit dem *Briefing* begonnen. Ist ein Mitarbeiter für einen Flug eingeplant, wird er, ggf. nach einer Wartezeit, als Teil einer Flugzeugbesatzung mit dem *Crew Boarding* beginnen. Bis zum *Crew Deboarding Complete*-Ereignis ist die Prozesskette für Flugzeug und Besatzung identisch, weshalb an dieser Stelle nicht erneut auf sie eingegangen wird. Allein den Umstand, dass dieser gesamte Prozess zwar als Arbeitszeit, jedoch nur der Off-Blocks-Prozess darüber hinaus auch als Flugzeit zu werten ist, gilt es zu erwähnen. Sollte sich nach dem Flug ein weiterer anschließen, wartet ein Mitarbeiter auf das nächste *Crew Boarding Start*-Ereignis bzw. durchläuft im Falle eines Flugzeugwechsels zunächst einen *Transferring*-Prozess, mit dem die benötigte Zeit zum Erreichen des anderen Flugzeugs im Modell berücksichtigt wird. Sollte sich jedoch kein weiterer Flug, sondern ein Standby-Dienst anschließen, wird ein Mitarbeiter entweder solange am Flughafen verbleiben, bis mit dem *Standby Complete*-Ereignis das zuvor geplante Dienstende eintritt, oder er als Ersatz für einen anderen Mitarbeiter nach einem *Transferring*-Prozess auf ein neues *Crew Boarding Start*-Ereignis wartet. Wurde die letzte Aufgabe des Tages mit dem *Crew Deboarding Complete*- oder dem *Standby Complete*-Ereignis beendet, ist nach dem *Debriefing* auch das Ende dieser Duty erreicht. Enthält das Pairing eine weitere Duty, beginnt der neue Tag nach einer *Resting*-Phase wieder mit dem *Briefing Start*-Ereignis. Ist dies nicht der Fall, hat ein Mitarbeiter alle Aufgaben seines Pairings erfüllt und verbleibt bis zum Ende der Simulation in einem *Idling*-Prozess. Mitarbeiter, denen kein reguläres Pairing, sondern Reservedienst zugeteilt wurde, werden diesen nach Simulationsstart mit dem *Reserve Start*-Ereignis beginnen. Analog zum Standby-Dienst tritt für den Fall, dass nicht auf den Reserve-Mitarbeiter zurückgegriffen wird, nach Ablauf der Tätigkeit ein *Reserve Complete*-Ereignis ein. Wird der Mitarbeiter jedoch im Rahmen des Crew-Recovery zu einem Einsatz herangezogen, erhält er ein reguläres Pairing, dessen Abarbeitung mit einem *Briefing Start*-Ereignis beginnt.

7.1.4 Störungen des Flugplans

Die in diesem Simulationsmodell explizit berücksichtigten Störereignisse innerhalb des Flugbetriebes, welche in Tabelle 7.2⁴⁷ aufgeführt sind, können in die Gruppen der Primärstörungen (en.: primary disruptions) und der Folgestörungen (en.: reactionary disruptions) unterteilt werden⁴⁸. Bei Primärstörungen handelt es sich um die Art von Störereignissen, die sich weder verhindern noch, bspw. durch eine AOC, beeinflussen lassen. Folgestörungen hingegen hängen im Rahmen der Delay Propagation direkt oder indirekt von den Primärstörungen sowie von den (ausbleibenden) Recovery-Handlungen der AOC ab. Sowohl die Primär- als auch die Folgestörungen können von Flugzeugen

⁴⁷ Die Informationen dieser Tabelle sind Ergänzungen zu den Kategorien der Standard IATA Delay Codes, welche in Tabelle 4.1 aufgeführt wurden (vgl. [Eur2] S. 21-22).

⁴⁸ In die Thematik der primary und reactionary delays wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 eingeführt. An dieser Stelle wird jedoch von dem Begriff ‚Delay‘ dahingehend abstrahiert, als dass sich mit dem Begriff ‚Disruption‘ neben Verspätungen auch andere Störungen fassen lassen.

und Flugdienstmitarbeitern ausgelöst werden bzw. diese betreffen, weshalb sich beide Störungsgruppen dahingehend weiter untergliedern lassen.

	Delay Code	Beschreibung
Primary Disruptions	42	SCHEDULED MAINTENANCE, late release.
	43	NON-SCHEDULED MAINTENANCE, special checks and/or additional works beyond normal maintenance schedule.
	63	LATE CREW BOARDING OR DEPARTURE PROCEDURES, [...] (flight deck [...] crew)
	64	FLIGHT DECK CREW SHORTAGE, sickness, [...]
	66	LATE CABIN CREW BOARDING OR DEPARTURE PROCEDURES, [...]
	67	CABIN CREW SHORTAGE, sickness, [...]
React. D.	93	AIRCRAFT ROTATION, late arrival of aircraft from another flight [...]
	94	CABIN CREW ROTATION, awaiting cabin crew from another flight
	95	CREW ROTATION, awaiting crew from another flight (flight deck [...] crew)

Tabelle 7.2: Überblick über explizit berücksichtigte Flugplanstörungen

Ungeplante Flugzeug-Wartungsereignisse (Delay Code 43) gehören zu den Primärstörungen, die im operativen Betrieb durch defekte oder wartungsbedürftige Flugzeuge verursacht werden. Im simulierten Flugbetrieb beginnt ein ungeplanter Wartungsprozess mit einem *Postprocessing Complete*-Ereignis (vgl. Abbildung 7.1), wenn nicht bereits eine reguläre Wartung eingeplant wurde. Ob solch ein zusätzliches Ereignis eintritt und wieviel Zeit der zugehörige Prozess ggf. beansprucht, wird durch Zufallskomponenten bestimmt, auf die in Abschnitt 7.1.6 näher eingegangen wird.

Bei krankheitsbedingten Personalausfällen (Delay Codes 64 und 67) handelt es sich um durch Flugdienstmitarbeiter verursachte Primärstörungen. Krankheitsereignisse können in der Simulation zwischen zwei Flügen einer Duty oder bereits vor Beginn einer Duty auftreten. Dabei wird die Dauer der Erkrankung außer Acht gelassen, da die Pairings, wie zuvor beschrieben, separat betrachtet werden. Meldet sich ein Mitarbeiter krank, muss für das restliche Pairing ein Standby- oder Reservemitarbeiter herangezogen werden. Extremfälle, wie das krankheitsbedingte Ausfallen mehrerer Mitglieder einer Flugbesatzung, werden im Modell gemäß ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt.

Es fällt ebenfalls in die Gruppe der primären Störungen, wenn sich Mitarbeiter verspäten oder geplante Prozesse mehr Zeit in Anspruch nehmen als ursprünglich geplant. Neben der Verzögerung eines geplanten Maintaining Complete-Ereignisses (Delay Code 42) oder eines PAX Boarding Start-Ereignisses (Delay Codes 63 und 66) können auch die anderen in Abbildung 7.1 dick umrandeten Prozesse Verspätungen aufweisen. Die jeweiligen Ursachen, welche bspw. im Passenger-, Baggage-, Aircraft- oder Ramp-Handling begründet liegen, werden im Modell jedoch nicht explizit abgebildet.

Je enger ein Flugplan getaktet ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich Primärstörungen fortpflanzen und Folgestörungen verursachen. Verspätet sich ein Flug, kann es Anschlussflüge geben,

die auf das verspätete Flugzeug (Delay Code 93) und/oder auf verspätetes Personal (Delay Codes 94 und 95) warten. Insbesondere die Folgestörungen, die das Personal betreffen, sind als problematisch anzusehen, da Verzögerungen innerhalb eines Pairings schnell zu Verstößen gegen geltende Arbeits- und Ruhezeitregelungen und somit zu weiteren Verspätungen führen können. Im Gegensatz zu den Primärstörungen verzögert sich bei Folgestörungen also nicht nur das Ende, sondern auch der Beginn eines Prozesses.

7.1.5 Airline Operations Control

Es ist die Aufgabe einer AOC, auf Störungen innerhalb der Planumsetzung zu reagieren und die Zulässigkeit eines gestörten Flugplans schnellstmöglich wieder herzustellen. Weiterhin ist sie dafür verantwortlich, sämtliche operativen Prozesse kontinuierlich zu überwachen, um zukünftigen Konflikten im Flugbetrieb vorzubeugen. Um auch in der simulierten Abarbeitung eines Flugplans die zu erwartenden Reaktionen der betrachteten Fluglinie auf entstandene Störungen abbilden zu können, werden die Methoden und Strategien einer AOC in das Modell mit aufgenommen. Die AOC wurde dabei als separates Modul eingebunden, das dem sog. Simulationsmodul gegenübersteht, das die in Abschnitt 7.1.3 beschriebenen Ereignisse und Prozesse koordiniert (siehe Abbildung 7.2). Dabei gestaltet sich die Kommunikation zwischen beiden Modulen derart, dass bei allen Prozessen, innerhalb derer es im Ablauf zu Störungen kommen kann, dem AOC-Modul aktuelle Statusinformationen zur Überprüfung übermittelt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese AOC-Aufrufe in Abbildung 7.1 nur anhand der dick umrandeten Prozesse implizit dargestellt. Abbildung 7.3 zeigt am Beispiel des Flying-Prozesses einen expliziten AOC-Aufruf. Stellt die Operations Control eine (zukünftige) Störung fest, trifft sie eine Recovery-Entscheidung und sendet die aktualisierte Planung zurück an das Simulationsmodul. In der hier gewählten Architektur entspricht das Simulationsmodul mit seinen Aufgaben dem SimAir-Simulation-Module. Das im Weiteren beschriebene AOC-Modul ist mit dem Controller- und dem Recovery-Module des SimAir-Modells bzw. mit dem Airline-Module des MEANS-Modells gleichzusetzen (vgl. Abbildung 6.3 und Abbildung 6.5).

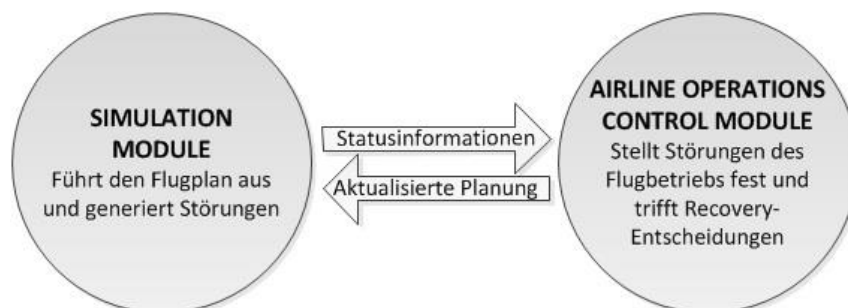


Abbildung 7.2: Modulare Trennung von Flugplan- und AOC-Simulation

Die Maßnahmen, die in diesem Simulationsmodell Berücksichtigung finden und die von der AOC angewendet werden können, gehören sowohl zum Aircraft- als auch zum Crew-Recovery. Auch wenn

innerhalb dieser Arbeit personalbezogene Entscheidungen im Fokus stehen, kann das Aircraft-Recovery aufgrund der starken Verknüpfung nicht gänzlich vernachlässigt werden.

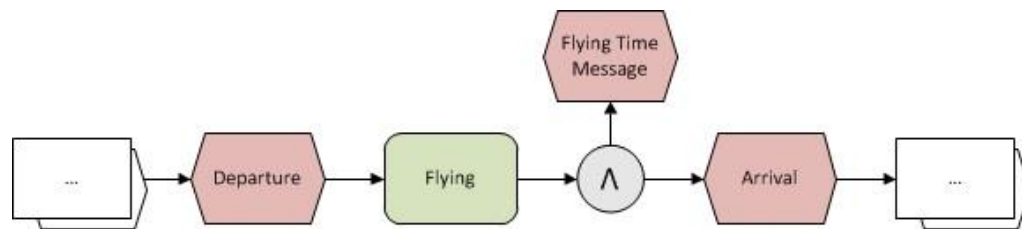


Abbildung 7.3: Expliziter AOC-Aufruf

Treten Störungen auf, durch die sich die Ankunft eines Fluges verzögert, ist die einfachste Reaktionsmöglichkeit die, die Flugzeiten der Anschlussflüge entsprechend zu verschieben. Als Anschlussflüge sind in diesem Zusammenhang alle die Legs anzusehen, die sich Flugzeug- und/oder Personalressourcen mit dem verspäteten Leg teilen und die diesem in Rotationen und/oder Pairings in direkter Folge nachgelagert sind. Bei dieser Methode werden Verspätungen im Flugplan an alle Leg-Nachfolger weitergegeben und bestenfalls nur durch zwischenliegende Pufferzeiten oder durch das Fehlen von Anschlussflügen gemindert. Eine Alternative zum Verschieben betroffener Anschlussflüge ist die, diese aus dem Flugangebot zu streichen. Auch wenn auf diese Weise keine Verspätungen weitergegeben werden, ist in der Folge zumeist eine Vielzahl weiterer Eingriffe in den Flugplan notwendig, um die Lücken in Flugzeug- und Personalumläufen zu schließen.

Um die Störungswartung an Flight Legs zu verhindern, deren Flugzeuge nicht zum geplanten Starttermin eintreffen werden, kann die AOC alternative Flugzeugreserven an den jeweiligen Flughäfen aktivieren, die die restliche Rotation der verspäteten Flugzeuge übernehmen. Hierbei müssen die Typen der verspäteten Flugzeuge mit denen der Ersatzflugzeuge übereinstimmen. Die auf diese Art ersetzten Flugzeuge haben somit nach ihrer Ankunft ihre Rotationen beendet und können den Flugzeugreserven der jeweiligen Flughäfen zugeführt werden. Um trotz fehlender Zahlen bzgl. der Größe und Stationierung von Reserveflotten aber auch Flugzeuge berücksichtigen zu können, die nicht zu der ursprünglich eingeplanten Flotte gehören, hat die AOC im Rahmen dieses Modells die Möglichkeit, Flugzeuge an Flughäfen neu zu generieren.

Analog hierzu kann die AOC an den Flughäfen auch auf Ersatzpersonal zurückgreifen, um die Störung von Legs zu vermeiden, die personelle Verbindungen zu verspäteten Flügen aufweisen. Im Vergleich zur Abbildung der Flugzeugreserven wird der Einsatz von Ersatzpersonal im Simulationsmodell jedoch wesentlich differenzierter dargestellt. So ist zunächst zwischen der Gruppe des Standby- und der des Reservepersonals zu unterscheiden. Je nach zeitlicher Dringlichkeit im Falle einer Störung können Mitarbeiter beider Gruppen aktiviert werden. Bei akutem Personalmangel wird auf die Mitarbeiter zurückgegriffen, die im Rahmen ihres Standby-Dienstes sofort zur Verfügung stehen. Ist die Störung hingegen ausreichend lange im Vorfeld bekannt, wird die Standby-Ressource geschont und auf die Mitarbeiter im Reservedienst zurückgegriffen. In Ergänzung zu den in Abschnitt 2.3.2.4

eingeführten Reservemustern können im Modell bspw. auch ‚Reserve 3‘- oder ‚Reserve 13‘-Muster abgebildet werden, die sich durch drei- bzw. dreizehnstündige Vorlaufzeiten auszeichnen und die in der Arbeit von Kaupp et al. Verwendung fanden (vgl. [Kaup] S. 128). Unabhängig davon, aus welcher der beiden Dienstarten Ersatzpersonal bezogen wird, werden diesem die Jobs, die es im Rahmen der verbleibenden Pairings der verspäteten Mitarbeiter noch auszuführen gilt, übertragen. Die Übertragung von Standby-Diensten ist in diesem Zusammenhang ausgeschlossen, so dass jeder Mitarbeiter höchstens einmal pro Pairing Reservedienst leistet. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass einspringende Crewmitglieder sowohl über die nötigen Qualifikationen als auch über entsprechende Type Ratings verfügen. Da sich durch das Eintreten von Störereignissen auch die geplanten Abläufe der Mitarbeiter verändern, muss der Einhaltung von tariflichen und gesetzlichen Arbeits- und Ruhezeitenregelungen besondere Beachtung geschenkt werden. Zu diesem Zweck werden die Arbeitszeiten und die Anzahl absolvierter Flüge im Simulationsverlauf für jede Person kontinuierlich mitgeschrieben. Werden verspäteten und infolge dessen ersetzten Crewmitgliedern nach ihrer Ankunft Standby-Aufgaben zugewiesen, werden diese als ‚verdeckte Reserve‘ bezeichnet. Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Personalressourcen und Reservediensten wurde der AOC im Simulationsmodell die Möglichkeit eingeräumt, Mitarbeiter mit verschiedenen Qualifikationen zu generieren. Hierdurch kann ein größeres Spektrum von Szenarien abgebildet und zusätzliche Fragestellungen bzgl. des optimalen Personaleinsatzes untersucht werden.

Die einzelnen Recovery-Methoden werden von der AOC im Rahmen ganzheitlicher Recoverystrategien kombiniert und angewendet, so dass entstehende Störungen und Konflikte im operativen Ablauf durch zuvor festgelegte Regelwerke gelöst werden können. Eine einfache, wenn auch extrem einseitige Handlungsweise, die im Modell konstruiert werden kann, stellt die sog. ‚Push-Back‘-Strategie dar, die Rosenberger et al. innerhalb ihres SimAir-Modells anwenden (vgl. [Rose] S. 365). Der Grundgedanke dabei ist der, dass im Falle von verspäteten Flight Legs alle Anschlussflüge auf die benötigten Flugzeug- und/oder Personalressourcen warten, unabhängig davon, wie lange das dauert. Wie zuvor bereits erwähnt, liegt der erhebliche Nachteil dieser Strategie darin, dass sich Störungen entlang der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Legs multiplizieren und ungehindert im Flugplan verbreiten können.

Eine weitere extreme Strategie, die gleichzeitig das andere Ende des möglichen Spektrums abbildet, ist die, dass niemals auf verspätete Ressourcen gewartet wird. Fehlende Flugzeuge und Mitarbeiter sind hier umgehend zu ersetzen, auch wenn es sich um Verspätungen von nur wenigen Minuten handelt. Die Anwendung dieser Strategie führt i.d.R. dazu, dass die Kosten durch die massive Einplanung von Ersatzressourcen erheblich ansteigen und in keinem Verhältnis mehr zum Nutzen stehen. Dennoch findet diese Handlungsweise in der Arbeit von Dück et al. Anwendung, da sich die Verspätungsweitergabe zwischen den Flight Legs durch den Verzicht auf Rescheduling-Maßnahmen

gänzlich vermeiden lässt und die Stabilität jedes Pairings separat und ohne Verfälschungen bestimmt werden kann (vgl. [Dück] S. 8).

Im Allgemeinen werden von den Fluglinien im realen Betrieb komplexere Recoverystrategien angewendet, die im Raum zwischen diesen beiden theoretischen Extremen anzusiedeln sind und die sich ebenfalls mit dem hier vorgestellten Simulationsmodell abbilden lassen. So scheint es plausibel, erst für Verspätungen, die einen gewissen Schwellwert überschreiten, auf Ersatzressourcen zurückzugreifen, da kleinere Verzögerungen durch eingeplante Zeitpuffer aufgefangen werden können. Weiterhin scheint es sinnvoll, verdeckte Reserven zu verwenden, und die Entscheidung, ob Standby- oder Reservepersonal aktiviert werden soll, davon abhängig zu machen, wie viel Vorlaufzeit zur Verfügung steht. Auf diese Weise können die Belastungen beider Ressourcen angeglichen werden.

7.1.6 Randomisierung

Für eine möglichst realitätsgetreue Simulation der operativen Prozesse einer Fluglinie ist es unumgänglich, das dynamische Wechselspiel zwischen auftretenden Störungen und eingeleiteten Recovery-Maßnahmen abzubilden. Hierfür werden Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen benötigt, deren Verwendung im Folgenden erläutert wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser Arbeit keine umfassenden Datenreihen zur Verfügung gestanden haben, weshalb zumeist einfachere Verteilungen modelliert wurden (vgl. [Birt] S. 83-84). Dennoch wurde darauf geachtet, die Abweichungen zu realen Kennzahlen und vergleichbaren Simulationsmodellen gering zu halten.

Zunächst wird auf die Randomisierung der Prozesse eingegangen, die im Rahmen eines Flugzeug-Turnarounds stattfinden. Die geplanten Prozesszeiten, von denen in dieser Arbeit ausgegangen wird, werden in Tabelle 7.3 aufgeführt. Dabei werden jeweils zwei Zeitwerte angegeben, je nachdem, ob sich ein Prozess auf ein Flugzeug einer Regional- bzw. Kontinentalflotte oder auf ein Flugzeug einer Interkontinentalflotte bezieht. Diese Unterscheidung soll den Tatsachen Rechnung tragen, dass auf Interkontinentalflügen im Vergleich zu Kurz- und Mittelstreckenflügen mehr Fluggäste durch größere Crews umfangreicher betreut werden. Dass die größeren Flugzeuge, z.B. für Tank- oder Beladevorgänge, mehr Zeit benötigen, wird so ebenfalls berücksichtigt. Die Einteilung der Flugzeugtypen in Regional- / Kontinental- bzw. Interkontinentalflotten ist dabei nicht von vorne herein trennscharf, da sie je nach Fluglinie unterschiedlich konfiguriert und eingesetzt werden können. In dieser Arbeit wird die Unterteilung anhand des Reichweite-Parameters der Flugzeugtypen vorgenommen, da die diesbezügliche Lücke⁴⁹, die die in Abbildung 2.1 dargestellte Lufthansa-Flottenstruktur aufweist, groß genug ist, um auch für andere Fluglinien plausibel zu sein. Die geplanten Prozesszeiten für regionale / kontinentale Flugzeugtypen wurden Abbildungen aus den Arbeiten von Conrady et al. und Schlegel entnommen, die inhaltlich nahe beieinander liegen (vgl. hier

⁴⁹ Die größte maximale Reichweite eines Flugzeugtyps der Regional- bzw. Kontinentalflotte beträgt 4350 km, wohingegen die kleinste maximale Reichweite eines interkontinental genutzten Flugzeugtyps bei 9140 km liegt.

und im Folgenden [Conr] S. 338 und [Schl] S. 81 f.). Weiterhin entsprechen sie in der Summe der MCT, die am Flughafen Frankfurt für Flugzeuge dieser Klasse gilt. Da in diesen Abbildungen für interkontinentale Flugzeugtypen mit 150 Minuten eine etwa dreimal längere MCT angegeben wird, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass jeder auf interkontinentale Flugzeugtypen bezogene Prozess das Dreifache der für Regional- / Kontinentalflüge angegebenen Prozesszeiten benötigt. Aufgrund fehlender weiterer Daten werden diese Prozesszeiten für alle Flughäfen und alle Tageszeiten verwendet.

	PAX Deboarding	Crew Deboarding	Postpro- cessing	Prepairing	Crew Boarding	PAX Boarding
Regional- / Kont.flotte	5 (6)	5 (6)	5 (6)	15 (18)	5 (6)	10 (12)
Interkonti- nentalflotte	15 (18)	15 (18)	15 (18)	45 (54)	15 (18)	30 (36)

Tabelle 7.3: Minimale und daraus abgeleitete geplante Zeiten im Rahmen des Turnaround-Prozesses (Werte in Minuten)

Da die tatsächlich eintretenden Prozesszeiten Schwankungen unterliegen und durch Störungen beeinflusst werden, werden sie als Zufallsvariablen modelliert, deren Ausprägungen innerhalb gewisser Intervalle liegen. In diesem Zusammenhang wird angenommen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von Ausprägungen abnimmt, je näher sich diese an den Intervallgrenzen befinden. Infolgedessen werden die tatsächlichen Prozesszeiten mit Hilfe dreiecksverteilter Zufallsvariablen ermittelt, deren Dichtefunktion in Abbildung 7.4 dargestellt ist. Da die in Tabelle 7.3 aufgeführten Zeiten den MCTs des Frankfurter Flughafens entsprechen, bietet es sich hierbei an, diese als minimal mögliche Werte a zu verwenden. Es wird angenommen, dass die maximalen Prozesszeiten c dem Anderthalbfachen von a entsprechen und die am häufigsten vorkommenden Werte b 10% über dem Minimum liegen. Die sich aus diesen Parametern ergebenden Erwartungswert werden im Weiteren zur Planung der Bodenprozesse herangezogen.

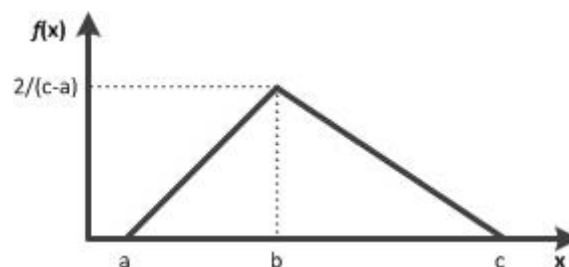


Abbildung 7.4: Dichtefunktion der Dreiecksverteilung⁵⁰

Beispiel: Im Falle des *Prepairing*-Prozesses für Flugzeugtypen einer Interkontinentalflotte ist $a = 45$, $b = 49,5$ und $c = 67,5$, weshalb der Erwartungswert $E(X)$, der Formel (7.1) entsprechend, bei 54 Minuten liegt.

⁵⁰ In Anlehnung an [Bank] S. 161.

$$E(X) = \frac{a + b + c}{3} \quad (7.1)$$

Die Abbildung der im simulierten Ablauf tatsächlich auftretenden Zeiten der *Flying*-Prozesse basieren auf den im Flugplan detailliert angegebenen geplanten Flugzeiten, welche in dieser Arbeit als beobachtete Durchschnittswerte aufgefasst werden. D.h. es wird hier davon ausgegangen, dass Einflussfaktoren, die für die Dauer eines Legs eine Rolle spielen, bereits bei der Erstellung des Flugplans berücksichtigt wurden. Zu diesen zählen einerseits z.B. eingesetzte Flugzeugtypen und jahreszeitabhängige Sicht- und Wetterverhältnisse, andererseits aber auch die jeweiligen Flughafeninfrastrukturen in Kombination mit den tageszeitabhängigen Verkehrsaufkommen. Für die Verteilung der Flugzeitausprägungen wird eine Lognormalverteilung verwendet, da die Flugdauer auf einer Route nach unten durch technische Möglichkeiten begrenzt wird, nach oben hingegen viel Zeit durch Störungen verloren gehen kann. Auf diese Weise lassen sich im Modell sowohl positive als auch negative Planabweichungen berücksichtigen. Die Parametrisierung der Verteilung wird anhand der erwarteten Flugdauer und anhand eines angenommenen Vielfachen derselben, das nur in 0,1% aller Fälle überschritten werden soll, vorgenommen, wodurch der Umfang einer Abweichung ins Verhältnis zur geplanten Flugdauer gesetzt wird. In diesem Zusammenhang werden der Erwartungswert $E(X)$ und das p -Quantil der Lognormalverteilung wie folgt bestimmt (vgl. [Bank] S. 163-164):

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (7.2)$$

$$x_{(p)} = e^{\mu + u_{(p)}\sigma} \quad (7.3)$$

Beispiel: Bei einem Leg, für das im Flugplan 120 Minuten eingeplant wurden, soll gelten:

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \stackrel{!}{=} 120 \quad (7.4)$$

Wird davon ausgegangen, dass das Doppelte der geplanten Flugzeit nur in 0,1% aller Fälle überschritten wird, soll unter Hinzunahme des 0,999-Quantils der Standardnormalverteilung mit $u_{(0,999)} = 3,0902$ gelten:

$$x_{(0,999)} = e^{\mu + 3,0902 \cdot \sigma} \stackrel{!}{=} 240 \quad (7.5)$$

Das Auflösen von (7.4) und (7.5) ergibt: $\mu = 4,7603$ und $\sigma = 0,2331$. Mittels μ und σ wird eine normalverteilte Zufallsvariable z bestimmt, die im Weiteren durch e^z zu einer lognormalverteilten Zufallsvariable umgewandelt wird. Abbildung 7.5 zeigt in einem Histogramm die Häufigkeitsverteilung der Ausprägungen von 1000 Zufallsvariablen, die mittels der hier errechneten Parametrisierung erzeugt wurden. In rot hervorgehoben sind zwei Werte, die im Bereich von 55-60 Minuten liegen, 75 im Bereich von 115-120 Minuten und einer, der im Bereich von 265-270 Minuten liegt.

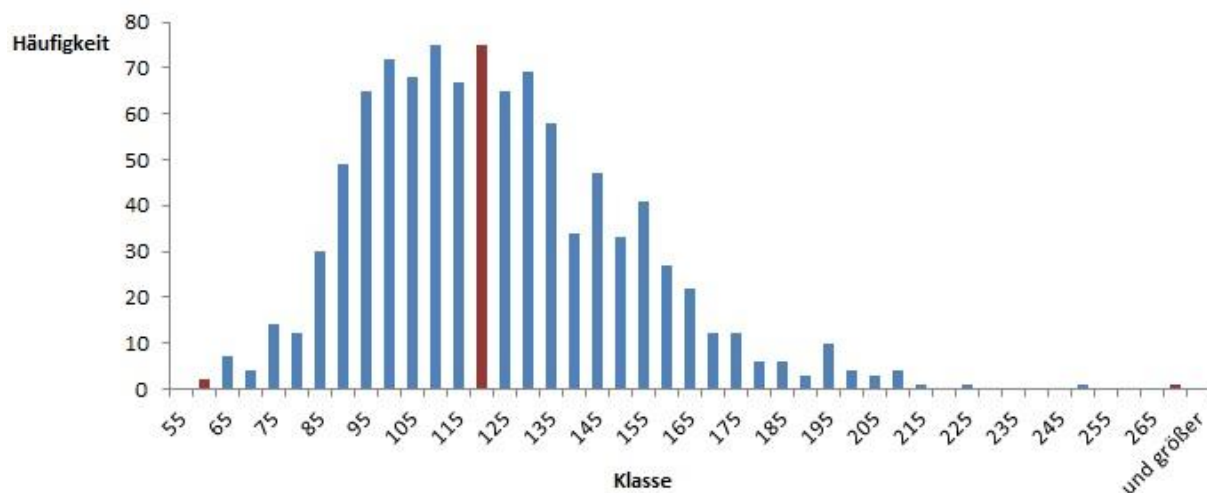


Abbildung 7.5: Histogramm der Häufigkeitsverteilung lognormalverteilter Zufallsvariablen mit den Parametern $\mu=4,7603$ und $\sigma=0,2331$

Bei der Randomisierung der Wartungsprozesse wird im Simulationsmodell zwischen geplanten und ungeplanten Wartungsereignissen unterschieden. Ausgehend von Klabjans Einschätzung, dass geplante Wartungsarbeiten je nach Flugzeugtyp i.d.R. drei bis zehn Stunden in Anspruch nehmen (vgl. [Klab] S. 174), wird für alle Flugzeugtypen im Mittel eine Wartungsdauer von sechs Stunden angenommen. Wie schon zuvor wird weiterhin angenommen, dass geplante Prozesszeiten am häufigsten vorkommen, weshalb erneut auf eine Dreiecksverteilung zurückgegriffen wird. Für minimal und maximal mögliche Ausprägungen der Zufallsvariable werden Werte von vier bzw. acht Stunden angenommen. Rosenberger et al. geben für die Dauer von ungeplanten Wartungsereignissen eine Zeitspanne von einer Minute bis zu zehn Tagen an (vgl. [Rose] S. 373). Da diese Arbeit jedoch nicht von der Berücksichtigung extremer Wartungsereignisse profitiert, wird die maximale Wartungsdauer auf zehn Stunden begrenzt. Im Gegensatz zu einer normalen Wartung liegt hier kein geplanter Prozess, sondern ein technischer Defekt zugrunde, weshalb die tatsächlichen Zeitbedarfe mittels einer Gleichverteilung ermittelt werden, in der alle Ausprägungen von einer Minute bis zu zehn Stunden als gleich wahrscheinlich angenommen werden. Ob ein ungeplantes Wartungsereignis überhaupt eintritt, wird ebenfalls durch eine innerhalb der Intervallgrenzen null und eins gleichverteilte Zufallsvariable ermittelt. Liegt die Variable unterhalb eines prozentualen Schwellwertes von bspw. 5%, wird in der Simulation ein ungeplantes Wartungsereignis erzeugt.

Mit dem Briefing, Debriefing und Transferring werden auch die Wahrscheinlichkeitsdichten der personalbezogenen Prozesszeiten dreiecksverteilt modelliert. Den Angaben der Lufthansa und des Wiener Flughafens entsprechend, werden dabei für den *Briefing*-Prozess 35 Minuten, für den *Debriefing*-Prozess 20 Minuten und für das *Transferring* 45 Minuten als häufigste vorkommende Ausprägungen verwendet (vgl. [Luf4] und [Vien] S. 20). Während sowohl beim Briefing als auch beim Debriefing positive und negative Abweichungen von fünf Minuten zugelassen werden, betragen diese beim Transferring jeweils eine Viertelstunde. Für alle drei Prozesse wird auf die differenzierte

Berücksichtigung etwaiger Abhängigkeiten von individuellen Flughafeninfrastrukturen oder Tageszeiten aufgrund des Mangels an diesbezüglichen Daten verzichtet.

Obwohl auch die Zeiten der *Idling*- und *Resting*-Prozesse und auch die der *Standing by*- und *Reserve*-Prozesse als randomisiert anzusehen sind, werden sie, im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Prozessen, nicht mit Hilfe eigener Zufallsvariablen abgebildet. Vielmehr werden die Zeiten dieser vier Prozesse indirekt durch den allgemeinen Simulationsverlauf bestimmt. So endet ein Reserve-Prozess z.B. genau dann, wenn das AOC den entsprechenden Mitarbeiter im Rahmen des Crew-Recovery anfordert. Genauso hängt auch die Dauer eines *Resting*-Prozesses von der Zeitspanne zwischen dem Ende einer Duty und dem Beginn der nächsten Duty und von der minimal einzuhaltenden Ruhezeit ab.

Ob sich ein Mitarbeiter zum Dienst verspätet oder ob er krankheitsbedingt ausfällt, wird analog zu den ungeplanten Wartungsereignissen anhand von Zufallsvariablen ermittelt, die innerhalb der Intervallgrenzen null und eins gleichverteilt sind. In Bezug auf krankheitsbedingte Ausfälle, welche im Modell vor jedem einzelnen Flug auftreten können, erwähnen Kaupp et al. in ihrer Arbeit, dass bei der Lufthansa im Jahr 1991 etwa 15,5% der Flugbegleiter einer beobachteten Planungsgruppe durch Krankheiten ausgefallen sind (vgl. [Kaup] S. 161). Von diesem Jahreswert ausgehend, wird in dieser Arbeit für Flugdienstmitarbeiter eine krankheitsbedingte Ausfallrate von 0,04% pro Tag angenommen. Die Feststellung einer Krankheitsdauer wird aus den in Abschnitt 7.1.4 erläuterten Gründen nicht vorgenommen. Um die Dauer einer Verspätung festzustellen, wird eine Dreiecksverteilung zugrunde gelegt, bei der die Parameter a und b aus Abbildung 7.4 übereinstimmen, wodurch längere Verspätungen zunehmend unwahrscheinlich werden. In diesem Zusammenhang werden Verspätungen von einer Minute bis zu einer Stunde mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1% berücksichtigt.

7.2 Implementierung

Nachdem im vorigen Abschnitt das Modell zur personengenauen Simulation des Einsatzes von Flugpersonal beschrieben wurde, wird im Folgenden auf dessen Implementierung eingegangen. Die erstellte Anwendung wurde dem objektorientierten Paradigma folgend in Java 8 programmiert. Incl. der Simulations-, Optimierungs- und Generator-Module und unter Einbeziehung von Kommentaren umfasst das Programm ca. 14.500 Zeilen Quellcode, aufgeteilt auf 53 Klassen. Wie bei den Optimierungsmodulen auch, wurde als integrierte Entwicklungsumgebung *Eclipse Luna* in der Version 4.4.2 verwendet. Die dem Programm zugrunde liegende *MySQL*-Datenbank wurde auf einem lokalen *Apache*-Webserver installiert und über das *phpMyAdmin*-Interface verwaltet⁵¹. Zum Exportieren und Visualisieren der Simulationsdaten wurde *Microsoft Excel* verwendet, das über die

⁵¹ Das verwendete XAMPP-Softwarepaket wurde von der Webseite ‚Apache Friends‘ [Apac] bezogen und ist unter der Apache-Lizenz (Version 2.0) bzw. der GNU General Public License frei nutzbar.

*JExcel-API*⁵²- und *POI*⁵³-Klassenbibliotheken angebunden wurde. Als Betriebssystem wurde *Microsoft Windows 7* in der 64 Bit-Version genutzt. Als Hardware wurde weiterhin ein *Sony Vaio* Laptop der Serie VPCF13 verwendet, auf dem als CPU ein Intel Core i7-740QM mit 4 x 1,73 GHz und 6 GB RAM verbaut wurde.

7.2.1 Simulationsaufbau

Das in dieser Arbeit entwickelte ereignisorientierte Simulationsprogramm basiert auf einem generischen Framework, dessen interne Abläufe der in Abbildung 6.2 dargestellten Verarbeitungslogik folgen. Im Kern besteht es aus den vier Klassen *SimEvent*, *EventStorage*, *SimEntity* und *SimCore*, welche speziell an die Abläufe des Flugpersonaleinsatzes angepasst wurden.

Die Klasse *SimEvent* bildet im Wesentlichen alle Attribute in Form von Datenfeldern ab, die für die Verarbeitung der einzelnen Ereignisse notwendig sind. Das Attribut des Ereignistyps, für das Ausprägungen wie bspw. *Crew-* oder *PAX-Boarding* zulässig sind, zeigt an, an welcher Stelle sich der Simulationsverlauf inhaltlich befindet. Weiterhin ist ein Verweis auf die Quelle des Ereignisses sowie ein Vektor mit Verweisen auf alle die Entitäten enthalten, die durch das Ereignis betroffen sind. Abschließend wird für jedes Ereignis dessen Eintrittszeit festgehalten.

Die zentrale FEL des Programms wird anhand der Klasse *EventStorage* abgebildet. Diese stellt einen Container dar, in dem sich die Ereignisse anhand ihrer Eintrittszeiten sortiert vorhalten und verwalten lassen. Zu den wichtigsten hier definierten Funktionen gehört das Ausgeben des als nächstes eintretenden Ereignisses sowie das Hinzufügen und Einsortieren eines neu erstellten Ereignisses. Im Rahmen dieses Programms wird *EventStorage* durch eine Java-PriorityQueue implementiert. In diesem Zusammenhang werden Ereignisse, die die gleiche Eintrittszeit aufweisen, als simultane Ereignisse bezeichnet. Tritt eine solche Situation ein und sind diese Ereignisse voneinander abhängig, kann es aufgrund der nicht spezifizierten Reihenfolge zu Fehlern in der Ablauflogik oder zu Abweichungen bei den Simulationsergebnissen kommen. Um dem vorzubeugen, wird in dieser Arbeit neben der Zeit auch der Ereignistyp als Reihenfolgekriterium herangezogen, sodass bspw. *Briefing Complete-* und *Transferring Complete-*Ereignisse immer vor *Crew Boarding Start-*Ereignissen verarbeitet werden. Für eine ausführlichere Untersuchung der Vor- und Nachteile verschiedener Implementierungsmöglichkeiten von Prioritätsschlangen oder für eine genauere Betrachtung von Strategien zur Behandlung simultaner Ereignisse sei auf die Arbeit von Lückemeyer verwiesen (vgl. [Lüc2] S. 40 ff. bzw. S. 31-32).

Die Klasse *SimEntity* repräsentiert die in der Simulation aktiven Entitäten und umfasst damit u.a. Flugzeuge, Flugdienstmitarbeiter und die AOC. Als abstrakte Basisklasse schreibt sie den einzelnen

⁵² Die *JExcel-API*-Klassenbibliothek, welche die Webseite ‚sourceforge.net‘ [Sour] zum Download anbietet, unterliegt ebenfalls der GNU General Public License der Version 2.0 (GPLv2) und kann in deren Rahmen ebenfalls frei genutzt werden.

⁵³ Die Apache *POI*-Klassenbibliothek wurde von der Webseite ‚Apache.org‘ [Apa2] bezogen und kann im Rahmen der Apache-Lizenz der Version 2.0 verwendet werden.

Entitätsklassen die Implementierung der Funktion *handleEvent(SimEvent)* vor, welche für die Verarbeitung der Ereignisse durch die Entitäten von zentraler Bedeutung ist. Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, enthält sie Anweisungen, die je nach Ereignistyp auszuführen sind. Im Falle eines Mitarbeiters, der ein *Crew Deboarding Complete*-Ereignis erhält, bedeutet dies z.B. das Aktualisieren seines Status und seines Aufenthaltsortes, das Erhöhen seiner geleisteten Flug- und Arbeitszeit und das Erzeugen eines seinem Pairing entsprechenden Folgeereignisses.

Die Informationen und Methoden zur Verwaltung der Simulationsanwendung werden in der Klasse *SimCore* zusammengefasst. Neben dem Datenfeld für die Simulationszeit, einem Generator für Zufallszahlen und der FEL werden hier sämtliche Entitäten gespeichert. Die Klasse ermöglicht mit der *fireEvent(SimEvent)*-Funktion jeder Entität während der Ereignisverarbeitung Folgeereignisse zu generieren. Weiterhin bildet ihre *run()*-Funktion die Hauptschleife der Simulation ab, wie sie in Abbildung 6.2 gezeigt wurde. Nachdem zunächst die Daten aus der DB geladen und in neu angelegte Entitäten überführt wurden, erzeugt sie das *Simulation Start*-Ereignis und legt es in der FEL ab. Bis die Simulation mit dem *Simulation End*-Ereignis endet, sammelt sie darüber hinaus statistische Daten, die sie im Anschluss in der DB ablegt und/oder exportiert.

7.2.2 Simulationssteuerung

Die Steuerung der Simulationsanwendung und die Definition von Simulationsexperimenten wird anhand der in Tabelle 7.4 aufgeführten Parameter vorgenommen, wobei sich nicht alle der 66 Einstellmöglichkeiten direkt auf die Simulation beziehen. Auch wenn sich die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Softwarekomponenten in die Bereiche Generierung, Optimierung und Simulation unterteilen lassen, verwenden diese jedoch oftmals dieselben Parameter und Strukturen. Die Tabelle gibt somit einen Überblick über sämtliche in den vorigen Kapiteln beschriebenen Parameter und deren mögliche bzw. typische Ausprägungen. Die Komplexität der implementierten Generatoren und Optimierungs- und Simulationsmodelle wird jedoch nicht nur durch die Anzahl der Parameter bemessen, sondern vielmehr auch durch deren Wirkungsbeziehungen untereinander.

In der Simulationssteuerung wird festgelegt, welcher Flugplan aus der DB einzulesen ist (A.1, A.3, A.4) und auf welche Art die Ergebnisdaten ausgegeben werden sollen (B). Darüber hinaus bietet sie zu Vergleichs- und Analysezwecken die Möglichkeit, einen Flugplan deterministisch ohne Störungseinflüsse oder mit stochastisch auftretenden Störungen auszuführen (A.2) und Simulationsläufe trotz Verwendung von Zufallszahlen exakt zu wiederholen (A.5 bis A.7). Das Regelwerk, das die AOC im Falle von Störungen anzuwenden hat, wird mit Hilfe der C-Parameter definiert. Diese legen im Wesentlichen fest, welche Flugzeug- und Mitarbeiterreserven eingeplant und genutzt werden können (vgl. Abschnitt 7.1.5). Die D- und E-Parameter bilden die geplanten Prozesszeiten ab, wie sie in Abschnitt 7.1.6 zusammengetragen wurden. Obwohl die Parameter der anonymen Personaleinsatzplanung dem in Kapitel 5 vorgestellten Job Pairing-Ansatz entstammen, müssen die durch sie festgelegten Arbeits- und Ruhezeitenregelungen jedoch auch im

Simulationsverlauf berücksichtigt werden (Parametergruppen F, G, H und I). Die Einstellungen des Jobgenerators (J) betreffen eher die Erstellung eines Flugplans und weniger dessen Ausführung. Die Parameter des Through- und Tailassignment-Generators (K) werden wiederum auch vom Simulationsprogramm verwendet. Die L-Parameter steuern die Generierung und Ausprägung von Störereignissen (vgl. erneut Abschnitt 7.1.6). Anhand der M-Parameter werden die durch die Optimierung erzeugten anonymen Personaleinsatzpläne bewertet. Gleichzeitig werden sie jedoch auch für die Bewertung der Pairings herangezogen, die sich im dynamischen Simulationsverlauf verändert haben.

	Nr.	Parameter	Mögliche bzw. typische Ausprägung
Simulationssteuerung	A.1	flightPlan	„LH_June10“ [String]
	A.2	simulationMode	{deterministic, stochastic} [Auswahl]
	A.3	alternativeBeginning	"2007-06-04 00:00:00" [String]
	A.4	alternativeEnd	"2007-06-04 23:59:59" [String]
	A.5	Seed	4711 [long]
	A.6	fixSeed	False [Boolean]
	A.7	nrRuns	100 [#]
	B.1	consoleLevel	{red, yellow, green} [Auswahl]
	B.2	writeDataToExcel	True [Boolean]
	B.3	writeDataToConsole	True [Boolean]
	B.4	pathToDataAnalysisTemplate	„C:/“ [String]
	B.5	nameOfDataAnalysisTemplate	„DataAnalysisTemplate.xlsx“ [String]
	B.6	pathToDataAnalysisFile	„C:/“ [String]
	B.7	nameOfDataAnalysisFile	„DataAnalyis.xlsx“ [String]
AOC Strategie	C.1	reservePersonnelStrategy	{no, limited, unlimited reserves} [Auswahl]
	C.2	reserveFleetStrategy	{no, limited, unlimited reserves} [Auswahl]
	C.3	allowedDelay	15 [Minuten]
	C.4	reserveReadyTime	3 [Stunden]
	C.5	useHiddenStandbys	True [Boolean]
	C.6	minRemainingDutyTime	6 [Stunden]
	C.7	hiddenStandbyDuration	2 [Stunden]
	C.8	reserveShiftDuration	8 [Stunden]
Geplante Prozesszeiten	D.1	plannedPreparationDurationReg	18 [Minuten]
	D.2	plannedPreparationDurationInt	54 [Minuten]
	D.3	plannedCrewBoardingDurationReg	6 [Minuten]
	D.4	plannedCrewBoardingDurationInt	18 [Minuten]
	D.5	plannedPAXBoardingDurationReg	12 [Minuten]
	D.6	plannedPAXBoardingDurationInt	36 [Minuten]
	D.7	plannedPAXDeboardingDurationReg	6 [Minuten]
	D.8	plannedPAXDeboardingDurationInt	18 [Minuten]
	D.9	plannedCrewDeboardingDurationReg	6 [Minuten]
	D.10	plannedCrewDeboardingDurationInt	18 [Minuten]
	D.11	plannedPostprocessingDurationReg	6 [Minuten]
	D.12	plannedPostprocessingDurationInt	18 [Minuten]
	D.13	maxRangeRegional	6745 [km]
E.1	plannedBriefingTime	35 [Minuten]	
E.2	plannedDebriefingTime	20 [Minuten]	
E.3	plannedTransferTime	45 [Minuten]	

Anonyme Personaleinsatzplanung	F.1	sitTimeMin	15	[Minuten]	
	F.2	dutyMaxFlightLegs	6	[#]	
	F.3	dutyMaxTime	16	[Stunden]	
	F.4	mctReg	15	[Minuten]	
	F.5	dutyMaxPause	4	[Stunden]	
	F.6	mctRot	60	[Minuten]	
	F.7	dutyMaxRotPause	4	[Stunden]	
	G.1	pairingMaxDuties	4	[#]	
	G.2	pairingMaxTime	96	[Stunden]	
	G.3	pairingMinRest	8	[Stunden]	
	G.4	pairingMaxRest	48	[Stunden]	
	H.1	cockpitMaxAircraftModels	1	[#]	
	H.2	cabinMaxAircraftModels	3	[#]	
	I.1	minimumGuaranteedWorkTimePerDuty	4	[Stunden]	
	I.2	personnelCosts	1	[€]	
	I.3	overnightRestCosts	100	[€]	
Generierung von Daten und Ereignissen	J.1	arabicCountries	Algeria, Iran, Iraq, ...	[Liste]	
	J.2	asianCountries	Cambodia, China, ...	[Liste]	
	J.3	maxNrPassengersPerFA	25	[#]	
	J.4	shortHaulMaxTime	90	[Minuten]	
	J.5	mediumHaulMaxTime	240	[Minuten]	
	K.1	totalFlightTimeUntilMaintenance	65	[Stunden]	
	K.2	plannedMaintenanceTime	6	[Stunden]	
	K.3	minimumRotationBufferTime	15	[Minuten]	
	L.1	maxUnplannedMaintenanceTime	10	[Stunden]	
	L.2	unplannedMaintenanceProbability	5	[%]	
	L.3	maxLateAppearanceDuration	1	[Stunden]	
	L.4	lateAppearanceProbability	1	[%]	
	L.5	sickReportProbability	0,04	[%]	
	Optimierung	M.1	excessiveCostWeight	10	[%]
		M.2	bufferViolationWeight	10	[%]
M.3		rotationChangeWeight	10	[%]	
M.4		primConfigWeight	10	[%]	
M.5		auxConfigWeight	10	[%]	
M.6		crewBaseViolationWeight	50	[%]	

Tabelle 7.4: Eingabeparameter der entwickelten Anwendung und deren mögliche bzw. typische Ausprägungen

7.2.3 Simulationsauswertung

Den Eingabedaten, die der Steuerung der Simulationsanwendung dienen, stehen die Ausgabedaten gegenüber, die im Rahmen von Untersuchungen und Experimenten erzeugt werden. Um die in dieser Arbeit behandelten Fragestellungen hinsichtlich der Robustheit von Flugplänen und der Güte von Personaleinsatzplanungsstrategien untersuchen zu können, wird während der Simulationen verschiedener Szenarien eine Reihe statistischer Daten erfasst und zu Kennzahlen aggregiert, die primär auf die Stabilität und die Flexibilität von Flugplänen sowie auf deren Verhalten unter wechselnden Stimuli abzielen. Die Daten und Kennzahlen, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird, können von der Anwendung nach Microsoft Excel exportiert und dort weiterverarbeitet und auch visuell ausgewertet werden.

Um die Stabilität eines Flugplans beurteilen zu können, wird dessen On-Time Performance erhoben, wie es in Abschnitt 4.2.4 beschrieben wurde. Obwohl in den von Fluglinien veröffentlichten Statistiken zumeist nur die Flüge als verspätet gelten, die mehr als 15 Minuten nach ihrer geplanten Ankunftszeit eintreffen, werden hier nur solche als pünktlich angesehen, die keinerlei Verspätung aufweisen. Weiterhin bilden hier gestrichene Flüge eine eigene Kategorie und werden nicht mit den verspäteten Legs verrechnet. Als weitere Kennzahl dafür, zu welchem Grad die Durchführung der Planung entspricht, wird die durchschnittliche Verspätung pro Flight Leg errechnet.

Im Rahmen der Untersuchung der Delay Propagation wird zwischen verspäteten Abflügen und verspäteten Ankünften, somit also zwischen primären Verspätungen und Folgeverspätungen unterschieden und die diesbezüglichen Kennzahlen separat erfasst. Um auch eine Aussage darüber treffen zu können, wo und in welchem Umfang sich Verspätungen durch das Flugnetz fortpflanzen, werden auch Informationen zur Tiefe der Weitergabebäume und zur Wirkung von Zeitpuffern gespeichert.

Weiterhin werden der Anzahl und den Arten der entstandenen Störungen die Anzahl und die Arten der veranlassten Recovery-Maßnahmen gegenübergestellt. Hierbei stehen die Stötereignisse im Vordergrund, auf die im Rahmen der Recoverystrategie aktiv reagiert werden musste. Eng hiermit verbunden sind die Auslastungszahlen der verschiedenen Gruppen des Reservepersonals. Überdimensionierungen dieser Ressourcen werden genauso mitgeschrieben wie die hier auftretenden Defizite. Die Aufschlüsselung dieser Daten nach einzelnen Qualifikationsmerkmalen ist möglich.

Abschließend werden noch die operativen Kosten des Personaleinsatzes sowie die Häufigkeit erfasst, wie oft gegen Regeln der Personaleinsatzplanung verstoßen wurde. Hierfür werden Arbeits-, Flug-, Sit- und Ruhezeiten sowie Standby- und Reservezeiten aller Mitarbeiter des Flugpersonals minutengenau aufgezeichnet.

7.3 Modellprüfung

Nachdem in den vorigen beiden Abschnitten das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell vorgestellt und auf dessen Implementierung eingegangen wurde, widmet sich dieser Abschnitt der Validierung des Modells (vgl. im Folgenden [Bank] S. 310 ff. und [Birt] S. 46-51). Im Kontext der Validierung geht es dabei nicht so sehr darum, absolute Aussagen zu treffen, sondern vielmehr darum, den Grad an Validität einzuschätzen, der dem konzipierten Modell zu eigen ist. Die Bestimmung des Grades der erreichten Validität ist von großer Bedeutung, da von ihm abgeleitet werden kann, inwiefern das Modell zur Untersuchung von Fragestellungen und zum Testen von Hypothesen aus dem Bereich der Flugpersonaleinsatzplanung geeignet ist (vgl. [Lieb] S. 203 f.). Um das Modell anstelle des Realsystems als Grundlage für Experimente, zur Vorhersage von Systemperformanzen sowie zur Ableitung verlässlicher Planungsentscheidungen nutzen zu können, muss es das reale Systemverhalten mit seinen zugrunde liegenden Prozessen und Ereignissen in sinnvoller Genauigkeit

abbilden. Da viele Modelle Abstraktionen der Wirklichkeit beinhalten, ist es zumeist möglich, die Genauigkeit eines Modells durch Hinzunahme weiterer Systemdetails zu erhöhen. Ob der hinzugewonnene Informationswert den hierfür zu erbringenden Aufwand in Bezug auf die zu beantwortenden Forschungsfragen lohnt, muss in jedem Einzelfall sorgfältig abgewogen werden. Der sich aus den Untersuchungszielen ergebende Anspruch an das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell beinhaltet, dass sich aus ihm sowohl präskriptive als auch deskriptive Aussagen ableiten lassen. Neben qualitativen Vergleichsaussagen sollen demnach auch Aussagen getroffen werden können, die auf quantitative Genauigkeit und absolute Größenordnungen abzielen. Insgesamt soll es ermöglicht werden, wiederkehrende typische Strukturmerkmale zu identifizieren und von diesen auf die grundlegenden Zusammenhänge und Funktionsweisen des betrachteten Systems zu schließen.

Die Validierung eines Simulationsmodells stellt einen individuellen Vorgang dar, weshalb es für deren Durchführung keine festgelegten strikt zu befolgenden Standards gibt. In Abhängigkeit des abgebildeten Realsystems, der Modellstruktur und der zu untersuchenden Forschungsfragen können für die Validierung verschiedene Vorgehensweisen gewählt und unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden. Im Rahmen einer theoriebezogenen Validierung z.B. werden die Ergebnisdaten des zu überprüfenden Modells denen von inhaltlich verwandten analytischen Modellen gegenübergestellt und festgestellt, in welchem Maß bei gleichen Eingabeparametern gleiche Ergebnisse produziert werden konnten. Auch wenn eine hohe Übereinstimmung erreicht wurde, besteht die Möglichkeit, dass sämtliche Modelle fehlerhaft spezifiziert wurden und deshalb trotz Ähnlichkeit keine Validität gegeben ist. In Kapitel 6 wurden eine Reihe von potentiell geeigneten Vergleichskandidaten vorgestellt. Da diese im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht in der Form vorliegen, dass sie für Ergebnisvergleiche ausgeführt werden können, finden an dieser Stelle keine theoriebezogenen Validierungsmethoden Anwendung. Vielmehr wird zunächst der Fokus auf die sog. funktionsbezogene Validierung gelegt. Ähnlich wie bei der theoriebezogenen Validierung werden die Ergebnisse eines Simulationslaufs mit Zielwerten verglichen, die in diesem Fall jedoch nicht aus anderen Modellen stammen, sondern auf allgemeiner Plausibilität beruhen. Die Aussagekraft dieser subjektiven Form der Beurteilung steigt, je mehr Informationen über die Strukturen und Verhaltensweisen des Realsystems vorliegen. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Umweltbedingungen wird das Modellverhalten betrachtet. Die Reaktionsweisen des Modells auf unterschiedliche im Vorfeld spezifizierte Umweltszenarien wird detailliert beobachtet und deren Plausibilität bewertet. Anhand der Simulationsergebnisse wird deutlich, ob sich das Modell vor dem Hintergrund dieser Stimuli wie erwartet und in sich konsistent verhält. Darauf aufbauend wird im Rahmen einer ergebnisbezogenen Validierung der quantitative Modelloutput den Kenndaten des Realsystems, soweit vorhanden, gegenübergestellt und die im Vergleich sichtbar gewordenen Abweichungen beschrieben. Doch noch bevor mit der Untersuchung des Validitätsgrades begonnen wird, wird die Implementierung der Simulationsanwendung verifiziert. Im Gegensatz zur Validierung,

welche sich mit der Frage auseinandersetzt, ob ein Modell hinreichend genau entworfen und kalibriert wurde, wird bei einer Verifizierung zunächst festgestellt, ob das Modell überhaupt seinen Spezifikationen entsprechend umgesetzt wurde. Neben der Verarbeitung von Input- und Output-Parametern werden hier die Abläufe innerhalb der logischen Modellstrukturen überprüft.

7.3.1 Verifizierung

Im ersten Schritt der technischen Überprüfung wurden der Parameter *A.2 simulationMode* (vgl. auch für im Folgenden verwendete Parameter Tabelle 7.4) auf „deterministic“ gestellt und Simulationsläufe wiederholt für verschieden lange Planungshorizonte durchgeführt. Als Testflugplan wurde hierfür der Sommerflugplan der Lufthansa aus dem Jahr 2007⁵⁴ herangezogen. Die Simulationsergebnisse konnten dabei, unabhängig vom Umfang der Flugpläne, beliebig oft exakt reproduziert werden. Unter Ausschaltung sämtlicher Zufallselemente innerhalb der Simulationen hätten unterschiedliche Resultate auf eine fehlerhafte Modellimplementierung hingewiesen, die kein verlässliches Nachvollziehen von Ergebnissen hätte gewährleisten können. Des Weiteren stimmen die erzielten Output-Parameter deterministischer Simulationsläufe immer in vollem Umfang mit den Planungsdaten überein, die mit Hilfe des Job Pairing-Optimierungsansatzes errechnet und den Simulationen als Input-Parameter übergeben wurden. Im Falle der einwöchigen Testinstanz bedeutet das bspw., dass

- alle 88.954 Regular-, Standby- und Reserve-Jobs, die vom Optimierer zu Pairings zusammengestellt wurden, genau so durchgeführt wurden,
- alle 7.385 Flight Legs sowohl on-time gestartet als auch on-time gelandet sind,
- keinerlei Verspätungen oder sonstige Störereignisse aufgetreten sind,
- keine Recovery-Maßnahmen von seiten der AOC durchgeführt wurden,
- die Auslastung der personellen Reservekapazitäten bei 0% lag,
- es nicht zu Verstößen gegen Planungsregeln des Personaleinsatzes gekommen ist.

In einem zweiten Schritt wurde der *simulationMode* auf „stochastic“ gestellt, wodurch das Zufallselement bei der Generierung von Prozesszeiten und Störungen Berücksichtigung findet. Um die Korrektheit der Implementierung auch in Bezug auf stochastische Prozesse nachzuweisen, wurden für diesen Fall die zuvor beschriebenen Testreihen für die einstündigen, eintägigen und einwöchigen Zeiträume wiederholt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Umstand, dass für den Parameter *A.6 fixedSeed* „true“ gewählt wurde. Auf diese Weise erzeugen die Zufallsgeneratoren der jeweiligen Simulationsläufe exakt die gleichen Zufallszahlen, was die Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen und somit die Überprüfung der internen Simulationsabläufe ermöglicht. Auch hier haben die Output-Daten der verschiedenen Testreihen einander entsprochen, was für die korrekte Implementierung der Abläufe spricht.

⁵⁴ Interne Bezeichnung: *LH_June07_Week(Best)*; Zeitraum: 04.06.2007 00:00:00 - 11.06.2007 00:00:00; Anzahl Jobs: 88.954; Anzahl Flight Legs: 7.385; Anzahl Flughäfen: 144.

Um neben den Modellabläufen auch die Umsetzung des Zufallszahlengenerators und die ihm zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsfunktionen zu untersuchen, werden im Folgenden die gemessenen den zu erwartenden Häufigkeitsverteilungen gegenübergestellt. Zur Überprüfung der Log-Normalverteilung werden nochmals die Daten herangezogen, die in Abbildung 7.5 abgetragen wurden. Die Erzeugung von 1.000 Zufallszahlen mit der durch $\mu = 4,7603$ und $\sigma = 0,2331$ parametrisierten Funktion ergaben im Mittel einen Wert von 120,625 Minuten, was den in Formel (7.4) angestrebten 120 Minuten sehr nahe kommt. Darüber hinaus wurde der Formel (7.5), die fordert, dass nur in 0,1% der Fälle Werte größer als 240 Minuten angenommen werden, weitestgehend entsprochen, da von 1.000 Zufallszahlen nur zwei in diese Kategorie fallen.

Die Normal- und die Dreiecksverteilungen werden anhand der Störungsereignisse überprüft, die im Rahmen von 100 Simulationen des einwöchigen Ausschnitts des Lufthansa-Sommerflugplans aufgetreten sind. Während dieser Testreihe kam es im Durchschnitt zu 370,36 ungeplanten Wartungsereignissen. In Kombination mit der durchschnittlichen Anzahl der gemessenen Gelegenheiten (7358,58), zu denen es in der Simulation zu ungeplanten Wartungen hätte kommen können, bedeutet das einen Anteil von 5,033%. Dies entspricht bis auf 0,033% dem auf 5% eingestellten Parameter L.2 *unplannedMaintenanceProbability*. Die durchschnittliche Gesamtdauer ungeplanter Wartungsereignisse betrug 111.546 Minuten pro Simulationslauf. Im Mittel dauerte ein ungeplantes Wartungsereignis demnach 301,47 Minuten, was im Wesentlichen dem Erwartungswert (EW) der Gleichverteilung entspricht, die Werte zwischen einer Minute und zehn Stunden (L.1 *maxUnplannedMaintenanceTime*) zulässt.

Im Durchschnitt traten in jedem der Simulationsläufe 267,94 Flugdienstmitarbeiter ihre Umläufe mit Verspätung an. Im Verhältnis zu den 36.733 Pairings dieses Einsatzplans, zu denen es in jedem Einzelfall zu einer Verspätung hätte kommen können, beträgt die gemessene Eintrittswahrscheinlichkeit 0,729%. Verglichen mit dem Parameter L.4 *lateAppearanceProbability*, welcher mit 1% eingestellt wurde, liegt die Abweichung bei 0,271%. Bei einer durchschnittlichen Gesamtverspätung von 5401,14 Minuten pro Simulationslauf beträgt die Verspätung pro Ereignis im Durchschnitt 20,158 Minuten. Da zur Bestimmung der Dauer eine Dreiecksverteilung gewählt und diese Abbildung 7.4 folgend anhand der Parameter $a = b = 1$ Minute und $c = 60$ Minuten (vgl. Parameter L.3 *maxLateAppearanceDuration*) spezifiziert wurde, entspricht der zu erwartende Wert $20,6$ Minuten (vgl. Formel 7.1). Dieser Wert wird von den gemessenen 20,158 Minuten gut angenähert.

Da Krankheitsereignisse vor Pairings, zwischen Flight Legs und während Übernachtungen, also an vielen Stellen innerhalb der simulierten Prozessabläufe, eintreten können, wurde der Parameter L.5 *sickReportProbability* mit 0,04% sehr gering gewählt. Die durchschnittlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten betragen für die drei Fälle 0,04% (16,16 von 39.673), 0,039% (14,07

von 35.706,64) und 0,04% (12,99 von 32,280,71). Alle in diesem Abschnitt genannten Wahrscheinlichkeiten finden sich zur Übersicht in Tabelle 7.5 gegenübergestellt.

Parameter	Verteilungstyp	EW	Messwert	Absolute Abweichung	Relative Abweichung
gepl. Flugdauer	log-normalverteilt	120 Min.	120,625	0,625 Min.	0,52%
L.1	gleichverteilt	300,5 Min.	301,47 Min.	0,97 Min.	0,32%
L.2	gleichverteilt	5%	5,03%	0,03%	0,66%
L.3	dreiecksverteilt	20,667 Min.	20,158 Min.	0,509 Min.	2,46%
L.4	gleichverteilt	1%	0,07%	0,03%	2,70%
L.5	gleichverteilt	0,04%	0,04%	0%	0%
		0,04%	0,04%	0,00%	2,50%
		0,04%	0,04%	0%	0%

Tabelle 7.5: Anzahl und Dauer aufgetretener Störungsereignisse (Werte gemittelt über 100 Simulationsläufe)

Die hier aufgeführten geringen relativen Abweichungen lassen auf eine korrekte Implementierung des Zufallszahlengenerators und der hinterlegten Wahrscheinlichkeitsfunktionen schließen. Darüber hinaus lassen die Simulationsergebnisse der durchgeführten Testreihe jedoch noch weitere Rückschlüsse zu. So fällt bspw. auf, dass es in keinem Simulationslauf zu Unterschreitungen der minimalen Ruhezeit für Übernachtungen (Parameter G.3 *pairingMinRest*) und zu keiner Überschreitung der maximal zulässigen Anzahl von Flight Legs innerhalb der Personalumläufe (Parameter F.2 *dutyMaxFlightLegs*) gekommen ist. Das entspricht zum einen den Nebenbedingungen, die während der Optimierung im Rahmen der Personaleinsatzplanerstellung eingehalten werden müssen, und zum anderen der Vorgabe, dass diese Planungsregeln nicht durch etwaige Recovery-Maßnahmen der AOC verletzt werden dürfen. Weiterhin werden durch die AOC im Simulationsverlauf keine Unterschreitungen der MCTs zugelassen (Parameter F.4 *mctReg* und F.6 *mctRot*), weshalb die aufgezeichnete Simulationsstatistik auch an diesen Stellen keine Verstöße gegen die Planungsregeln enthält. Abschließend ist noch festzustellen, dass zum Ende einer Simulation sämtliche Flight Legs und Jobs entweder ausgeführt oder durch die AOC gestrichen wurden. Einzige Ausnahme bilden an dieser Stelle einige Standby- und Reservejobs, auf deren Ausführung aufgrund vorangegangener Verspätungen oder Krankheitsereignisse seitens der AOC verzichtet wurde.

7.3.2 Validierung

Neben der technisch korrekten Umsetzung des Simulationsmodells ist zu überprüfen, ob es die Abarbeitung von Flug- und Personaleinsatzplänen mit ihren relevanten Abläufen und Wechselwirkungen hinreichend genau abbildet. Als Basis für deren Validierung wurden auf den Flugplan *LH_June07_Week_(Worst)* wechselnde AOC-Flug- und -Personaleinsatzplanstrategien angewendet (Parameter C.1 *reservePersonnelStrategy* und C.2 *reserveFleetStrategy*), um deren Auswirkungen auf den Simulationsverlauf zu beobachten und dem zu erwartenden Verhalten gegenüberzustellen. Mit jeweils 20 Simulationsläufen kamen die unterschiedlichen

Handlungsalternativen *No-Reserves*, *Limited-Reserves* und *Unlimited-Reserves* zum Einsatz. *No-Reserves* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die AOC im Falle einer Störung weder auf Flugzeug- noch auf Personalreserven zurückgreifen kann. Im *Limited-Reserves* Fall stehen nur solche Ersatzflugzeuge und -mitarbeiter zur Verfügung, die zuvor explizit eingeplant wurden. Bei *Unlimited-Reserves* kann die AOC darüber hinaus beliebig viele zusätzliche Reserven aktivieren.

Zunächst werden die Auswirkungen der AOC-Strategien auf die Verspätungsweitergabe während der Planumsetzung betrachtet, wobei zwischen der Weitergabe aufgrund gemeinsamer Flugzeug- und Personalressourcen der Flight Legs sowie deren Kombination differenziert wird (vgl. Abbildung 7.6). Erwartungsgemäß ist zu sehen, dass sich die Anzahl der Delay Propagations mit zunehmendem Ressourceneinsatz teilweise drastisch reduziert. Dabei nehmen die Verspätungen, die sich durch das Warten auf Flugpersonal begründen, den größten Teil ein. Dies ist dadurch zu erklären, dass ein Flight Leg immer nur einen Flugzeug-Nachfolger, aber mehrere Mitarbeiter-Nachfolger haben kann und die Chance für Störungen hier somit wesentlich größer ausfällt. Dass sich die Weitergabe von Mitarbeiterverspätungen im *Limited-* und im *Unlimited-Reserves*-Fall kaum unterscheiden, liegt darin begründet, dass auch *Limited-Reserves* ausreichend Ersatzpersonal an den entscheidenden Flughäfen, den Hubs Frankfurt und München, zur Verfügung stellt.

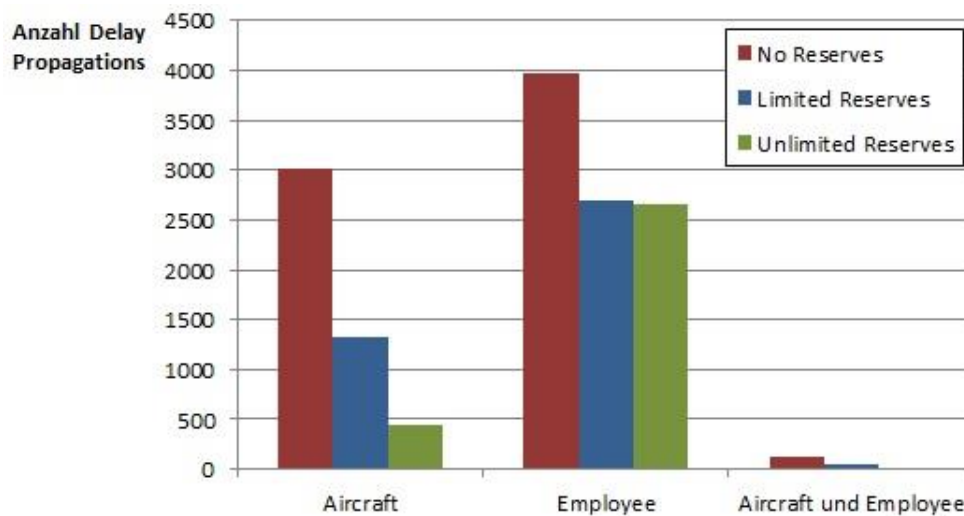


Abbildung 7.6: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Verspätungsweitergabe innerhalb des Flugplans LH_June07_Week_(Worst)

Wie der Ressourceneinsatz in den verschiedenen Szenarien dabei ausgefallen ist, wird in Abbildung 7.7 gezeigt. Es wird gegenübergestellt, welche Anteile der zuvor eingeplanten Reserve- und Standby-Ressourcen zum Einsatz oder nicht zum Einsatz kamen und wie viele Ersatzduties bereits im Vorfeld von der AOC gestrichen wurden. Bei den Reserve-Duties fällt auf, dass keinerlei Personalausfälle gezeigt werden. Dies liegt zum einen daran, dass diese Einsatzform nicht von Störungen in den Personalumläufen betroffen ist, und zum anderen daran, dass die krankheitsbedingten Reserve-Ausfälle deutlich unter einem Prozent liegen und deshalb hier nicht visualisiert sind. Ansonsten nimmt der Anteil eingesetzter Reserveressourcen über die drei AOC-Strategien zu, wobei *No-Reserves*

definitionsbedingt keinen Personalersatz vorsieht. Die Standby-Duties sind direkter Teil der geplanten Pairings, weshalb es hier zu großen, jedoch im Strategievergleich abnehmenden Anteilen gestrichener Einsätze kommt. Gleichzeitig nimmt der Anteil eingesetzter Standby-Ressourcen zu, wobei es bei *Unlimited-Reserves* der Fall zu sein scheint, dass es für die AOC im Hinblick auf die Störungsminimierung oftmals geeigneter ist, neu generierte, in Abbildung 7.7 nicht abgebildete Ressourcen einzusetzen, anstatt bereits geplante Standby-Duties zu verwenden.

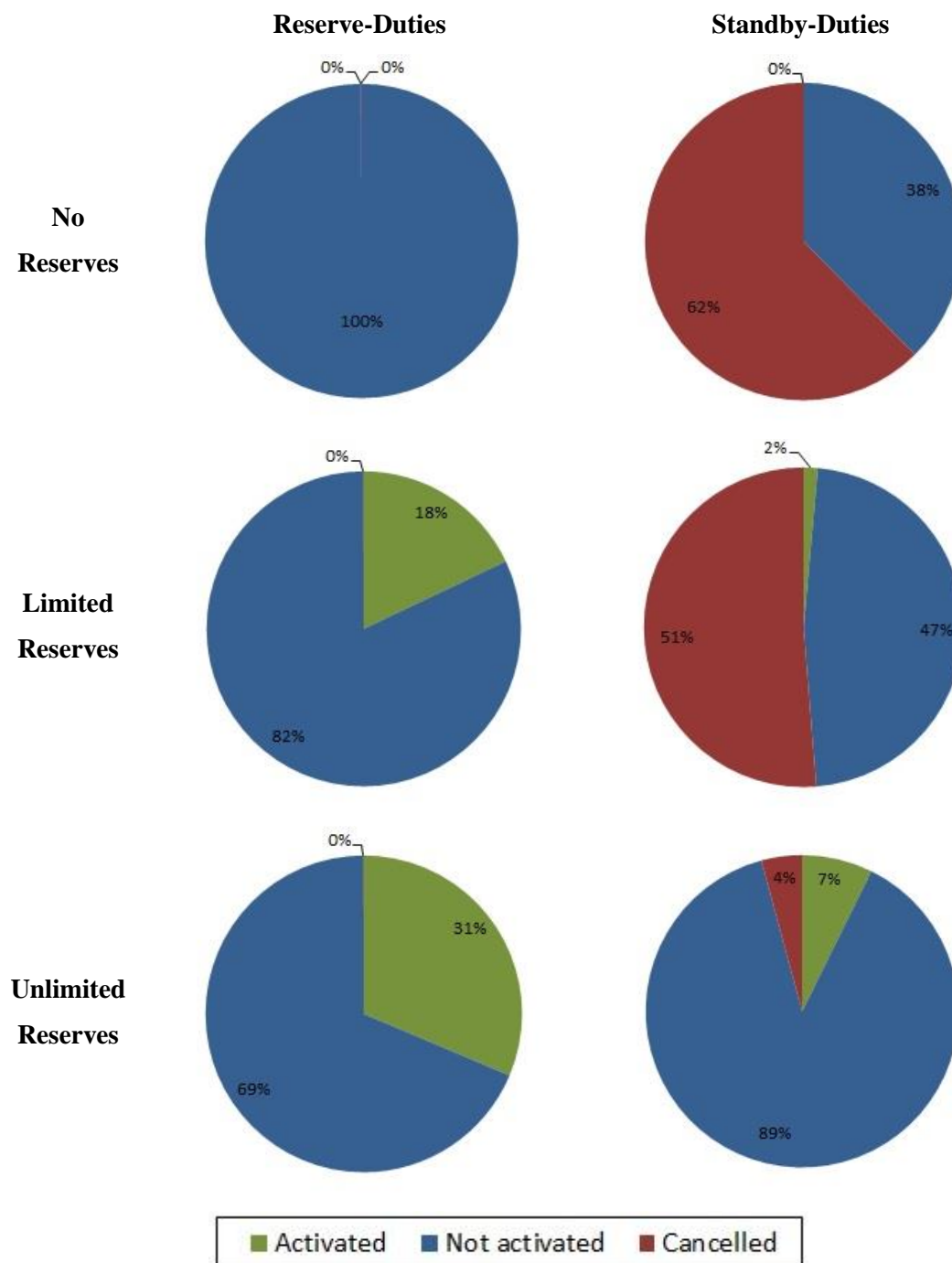


Abbildung 7.7: Personelle Auslastung eingeplanter Reserve- und Standby-Ressourcen unter Verwendung verschiedener AOC-Recoverystrategien (LH_June07_Week_(Worst))

Entgegen der Intuition haben die Kosten der Planimplementierung von *No-Reserves* über *Limited-Reserves* zu *Unlimited-Reserves* nicht stetig zugenommen. Relativ zum größtmöglichen Excessive Cost Value des Personaleinsatzplans verursachte *No-Reserves* einen Kostenfaktor von 30,212%, *Limited-Reserves* einen von 20,899% und *Unlimited-Reserves* einen Kostenfaktor von 33,15%. Dieser Umstand resultiert dadurch, dass den Aufwendungen für zusätzliche Ressourcen Einsparungen von Personal- und Hotelkosten durch vermiedene Übernachtungen und Wartezeiten innerhalb der Pairings gegenüberstehen.

Das Verhältnis der drei Excessive Cost Values wird auch indirekt in Abbildung 7.8 widergespiegelt. Hier werden die Häufigkeiten verschiedener Planungsregelverstöße vor dem Hintergrund der jeweilig verwendeten AOC-Recoverystrategie verglichen. Unter Beachtung der logarithmisch skalierten Y-Achse ist zu erkennen, dass die Überschreitung der maximalen Duty-Dauer den mit Abstand häufigsten Regelverstoß darstellt. Die Vorgabe der *No-Reserves* Strategie, immer alle Verspätungen von Vorgängerflügen auszusitzen, führt dazu, dass die maximale Duty-Dauer hier regelmäßig überschritten wird. Bei *Limited-* und *Unlimited-Reserves* fallen die entsprechenden Zahlen geringer aus. Sämtliche andere Regelverstoßtypen weisen gleichförmige Häufigkeitsmuster auf. Unter Berücksichtigung des zunehmend eingesetzten Standby- und Reservepersonals und der einhergehenden Änderungen des ursprünglichen Personaleinsatzplans erscheint dieses Verhalten durchaus plausibel.

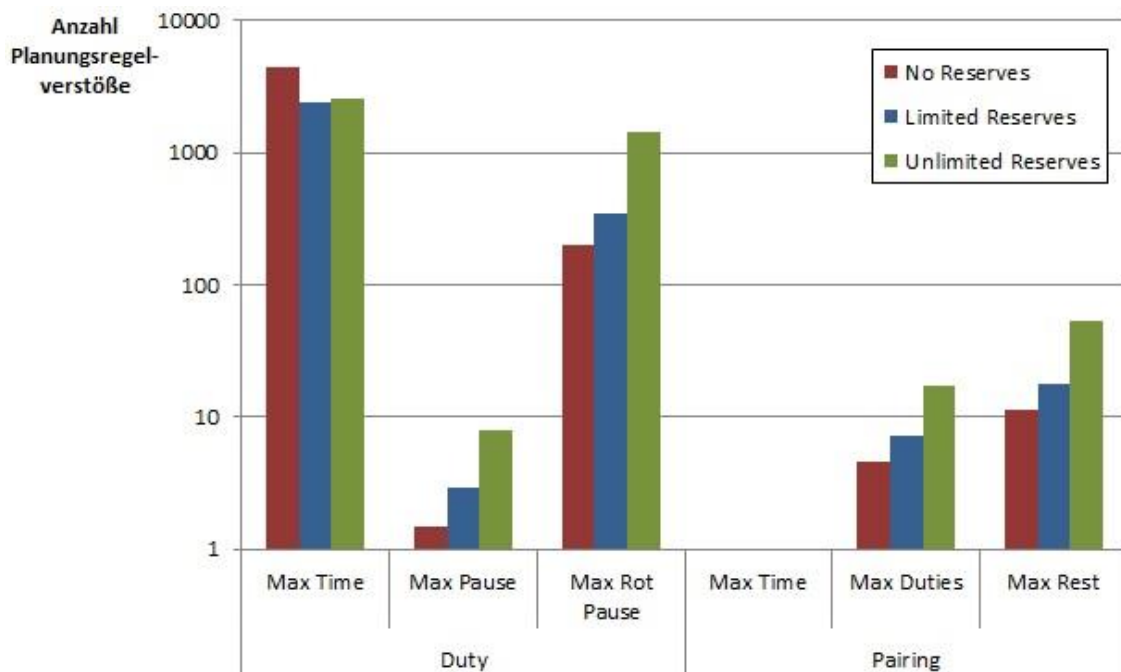


Abbildung 7.8: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Häufigkeiten von Planungsregelverstößen innerhalb des Personaleinsatzplans LH_June07_Week_(Worst)

Bisher wurde das Verhalten der Simulationsanwendung anhand eines Flugplans unter Verwendung wechselnder AOC-Recoverystrategien untersucht. Im Folgenden wird dem Plan

LH_June07_Week_(Worst) der Plan *LH_June07_Week_(Best)* gegenübergestellt, wobei beide Pläne mittels Simulated Annealing und mit dem Ziel erzeugt wurden, eine möglichst schlechte respektive gute Einsatzplanung zu erhalten. Auf diese Weise sollen neben den Auswirkungen der Strategien auch die der zugrunde liegenden Personaleinsatzpläne untersucht werden. Gleichzeitig erhält die AOC im *Limited-Reserves*-Fall die Vorgabe, alle Flüge auszuführen und somit keine Flugstreichungen vorzunehmen, um festzustellen, ob sich die Anwendung auch unter einem solch extremen Szenario plausibel verhält.

Im Vergleich zu Abbildung 7.6, welche die gemessenen Verspätungsweitergaben des Lufthansa-Sommerflugplans aus dem Jahr 2007 bei schlechter Personalplanung darstellt, zeigt Abbildung 7.9 die entsprechenden Daten bei guter Personaleinsatzplanung. Werden *No-* und *Unlimited-Reserves* betrachtet, kann auch hier festgestellt werden, dass eine Erhöhung von Flugzeug- und Personalressourcen zu erheblichen Verringerungen der Delay Propagation führt. Ebenso ist wiederum ersichtlich, dass der Personaleinsatz in diesem Zusammenhang die anfälligste Komponente darstellt. Auch wenn also das gleiche Muster wie schon zuvor zu erkennen ist, führt die optimierte Variante der Personaleinsatzplanung insgesamt zu weitaus weniger Verspätungsweitergaben. Wird nun aber der *Limited-Reserves*-Fall - an dieser Stelle ohne die Möglichkeit von Flugstreichungen - betrachtet, fällt der extreme Anstieg der Delay Propagation ins Auge. Wie anhand der sekundären Y-Achse in Abbildung 7.9 zu sehen ist, treten diese bis zu 30 mal häufiger auf als unter Anwendung der *No-Reserves*-Strategie. Vor dem Hintergrund der Vorgabe, dass jeder Anschlussflug auf seine Vorgänger ungeachtet der sich aufbauenden Verspätungsdauern zu warten hat, wäre es jedoch nicht plausibel, wenn diese Werte geringer ausfielen.

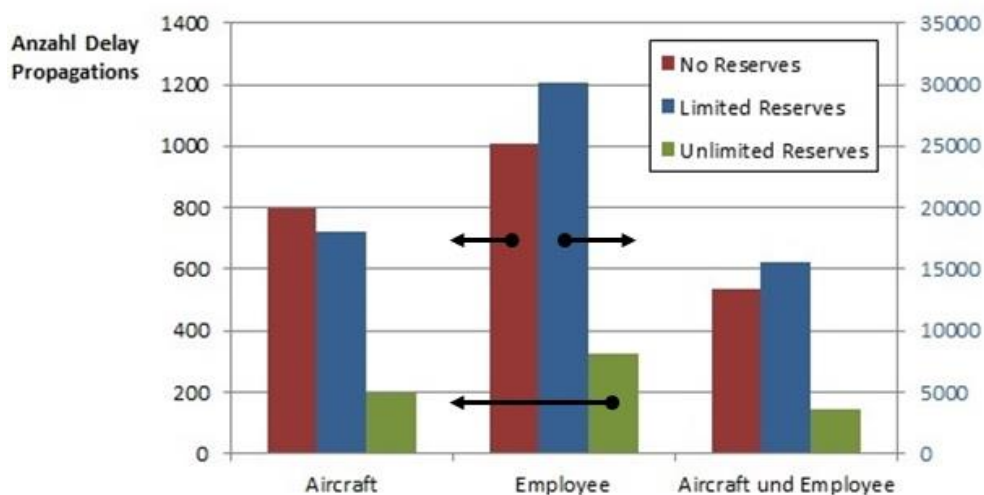


Abbildung 7.9: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Verspätungsweitergabe innerhalb des Flugplans *LH_June07_Week_(Best)*

Einen Überblick über die im Rahmen dieser Szenarien eingesetzten Reserve- und Standbyressourcen bietet Abbildung 7.10. Im Vergleich zu Abbildung 7.7 ist festzustellen, dass die bessere Einsatzplanung im *No-* und im *Unlimited-Reserves*-Fall zu wesentlich weniger Auslastung von

Ersatzpersonal geführt hat. Gleichzeitig haben auch die Anteile gestrichener Standby-Duties erheblich abgenommen, was eine Konsequenz der gesunkenen Delay Propagation ist. Im *Limited-Reserves*-Fall ist der Anteil aktivierten Reservepersonals nahezu doppelt so groß wie in der Testreihe zuvor. Auch wenn der Anteil gestrichener Standby-Duties auch hier signifikant zurückgegangen ist, scheint die AOC, wie schon zuvor, das Generieren neuer Ressourcen der Aktivierung von Standby-Duties vorzuziehen.

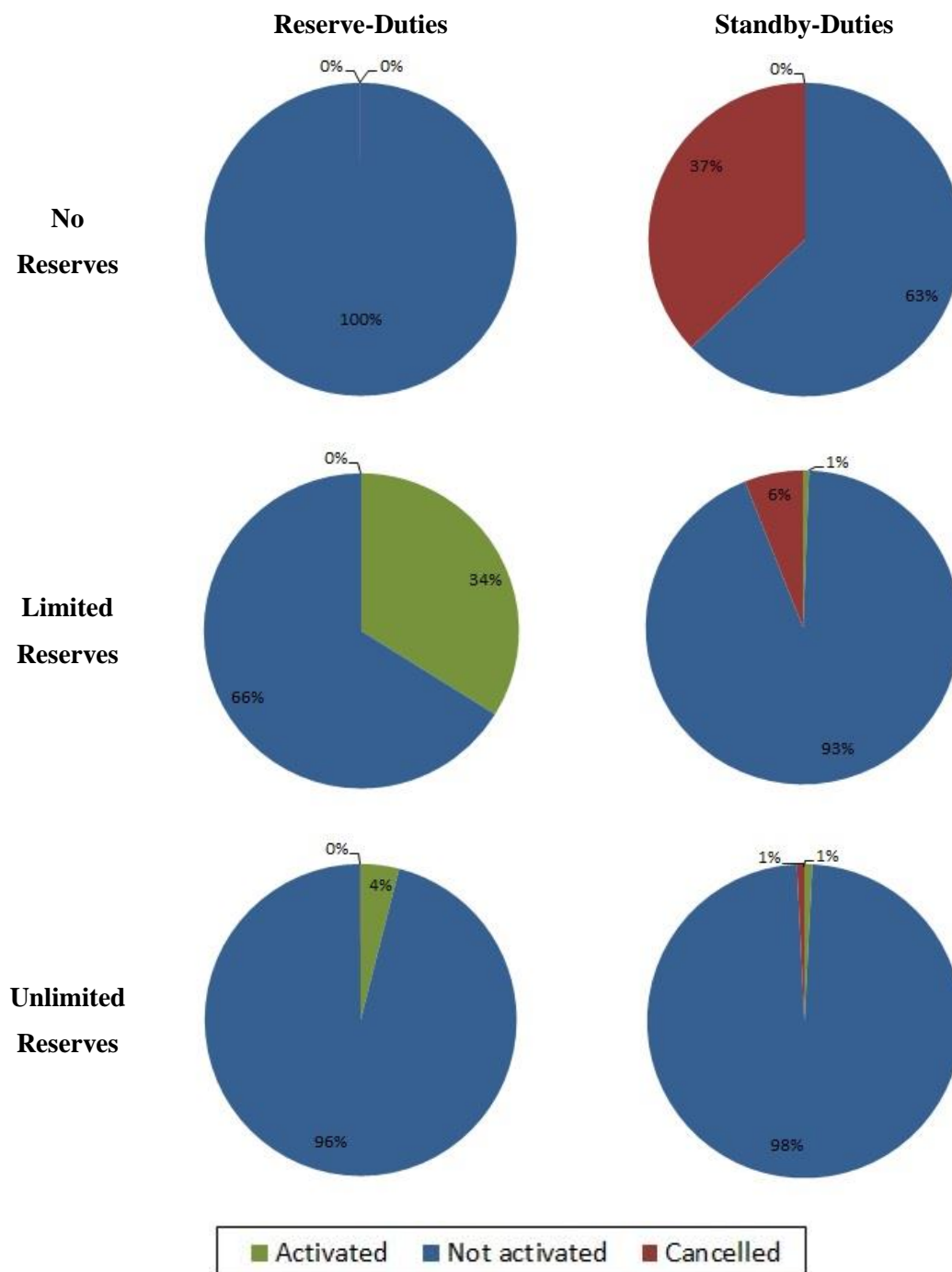


Abbildung 7.10: Personelle Auslastung eingeplanter Reserve- und Standby-Ressourcen unter Verwendung verschiedener AOC-Recoverystrategien (*LH_June07_Week_(Best)*)

Insgesamt orientiert sich der Einsatz der Personalressourcen dennoch deutlich an den sich verändernden Bedingungen, unabhängig davon, ob sich diese aus verschiedenen planerischen Vorgaben oder aus sich verändernden Handlungsstrategien während der Planimplementierung ergeben. Dies lässt sich auch an den verursachten Kosten ablesen. Während sich bei gut geplantem Personaleinsatz, im Vergleich zur zuvor durchgeführten Testreihe, die *No-Reserves*- und die *Unlimited-Reserves-Cost-Values* halbiert bzw. um ein Drittel reduziert haben, haben sich die Kosten im *Limited-Reserves*-Fall ohne Flugstreichungen entsprechend der in Abbildung 7.9 gezeigten exzessiven Verspätungsweitergaben verachtfacht. Weiterhin bleibt aber auch festzustellen, dass die Dimensionierung der personellen Ersatzressourcen und deren zeitliche und räumliche Verteilung auf die verschiedenen Flughäfen, welche es im Rahmen des Jobpairings zu Umläufen zu kombinieren gilt, nicht effizient gewählt wurde, was an den hohen Anteilen nicht aktivierten Personals zu erkennen ist. Obwohl ein gut durchgeführtes Jobpairing einen spürbar positiven Einfluss auf die Delay Propagation und somit auf die Stabilität der Flugplanumsetzung hat, lässt sich diese Fehlplanung nicht durch einen nachgelagerten Planungsschritt auffangen.

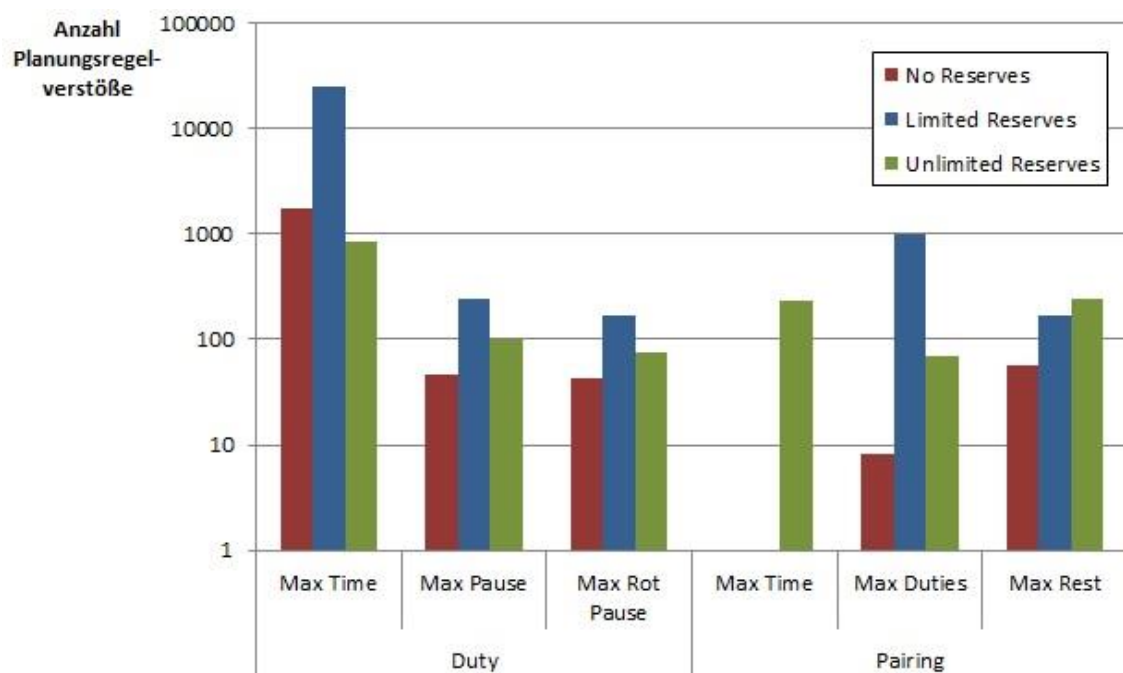


Abbildung 7.11: Auswirkungen verschiedener AOC-Strategien auf die Häufigkeiten von Planungsregelverstößen innerhalb des Personaleinsatzplans LH_June07_Week_(Best)

Bei der Betrachtung der Häufigkeiten von Planungsregelverstößen lassen sich, bezogen auf *No*- und auf *Unlimited-Reserves*, grundlegende Muster erkennen, die schon zuvor diskutiert wurden. Zum einen treten Verstöße gegen maximale Dutyzeiten am häufigsten auf. Zum anderen werden bei allen anderen Verstoßtypen bei *Unlimited-Reserves* mehr Regelverletzungen begangen als bei *No-Reserves*, was sich nach wie vor auf den Anstieg von Einsatzplanänderungen zurückführen lässt. Ein großer und zu erwartender Unterschied tritt im *Limited-Reserves*-Fall auf. Dadurch, dass hier die Durchführung

aller geplanten Flüge im Vordergrund steht, lässt sich ein massiver Anstieg von Verstößen gegen die Richtlinien der Personaleinsatzplanung nicht vermeiden.

Um zum Abschluss der Validierung einordnen zu können, inwieweit die erstellte Anwendung bei der Simulation von Flug- und Personaleinsatzplänen den Kenndaten europäischer Fluglinien entspricht, wird im Folgenden ein ergebnisbezogener Abgleich von simulierten und realen Verspätungsdaten durchgeführt. Hierfür wurden die Verspätungskennzahlen aller sechs diskutierten Simulationsszenarien zusammen mit denen der Lufthansa, der British Airways und den Durchschnittswerten von 48 europäischen Fluglinien in Abbildung 7.12 abgetragen (vgl. für die Daten der Jahre 2011, 2012 und Januar 2013 [Fli1] S. 5, [Fli2] S. 5 und [Fli3] S. 5).

Es sei an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, dass Verspätungen von weniger als 15 Minuten nicht als solche gewertet, sondern als *On-Time* deklariert werden. Verspätungen von 15 bis 29 Minuten gelten als *Late*, solche mit 30 bis 44 Minuten als *Very Late*. Verspätungen größeren Umfangs werden mit dem Begriff *Excessive* beschrieben. Weiterhin wird der Anteil gestrichener Flüge mit *Cancelled* betitelt und in dem Vergleich aufgeführt. Obwohl die Realdaten ebenfalls Anteile für umgeleitete Flüge von jeweils unter einem Prozent aufwiesen, werden sie in diesem Vergleich vernachlässigt, da das Simulationsmodell keine Flugumleitungen vorsieht. Insgesamt stehen bei diesem On-Time-Performance-Vergleich die Ankünfte der Flight Legs im Vordergrund. Verspätete Starts sind also nicht Teil der Darstellung.

Es ist zu erkennen, dass die On-Time-Statistiken der europäischen Fluglinien mit einem *On-Time*-Anteil von rund 80% und einem *Late*-Anteil von rund 10% recht ähnlich ausfallen. Von den Simulationsdaten passen die Ergebnisse des *LH_June07_Week_(Best)* und auch noch die des *LH_June07_Week_(Worst)*, jeweils unter Anwendung der *Unlimited-Reserves*-Strategie, am besten in dieses Bild. Dies erscheint insofern plausibel, als dass mittels *Unlimited-Reserves* Ersatzpersonal genau zu den Zeiten und an genau den Flughäfen eingesetzt werden kann, an denen auch eine der europäischen Fluglinien ihr Ersatzpersonal stationieren würde. Mit Hilfe der Möglichkeit, dynamisch Reserven erzeugen zu können, wird somit die fehlende Erfahrung bei der Dimensionierung und Stationierung von Personalressourcen, über die jede reale Fluglinie verfügt, ausgeglichen. Die Vergleichsszenarien *No-* und *Limited-Reserves* fallen dementsprechend aus dem Rahmen, auch wenn ihre Ergebnisse relativ zueinander wiederum plausibel erscheinen. Abschließend sei noch das Szenario *LH_June07_Week_(Best)* mit *Limited-Reserves* hervorgehoben. Entsprechend der Vorgabe wurden hier keine Flugstreichungen vorgenommen, was gleichzeitig aber zu einem Anteil exzessiv verspäteter Flüge von über 65% geführt hat.

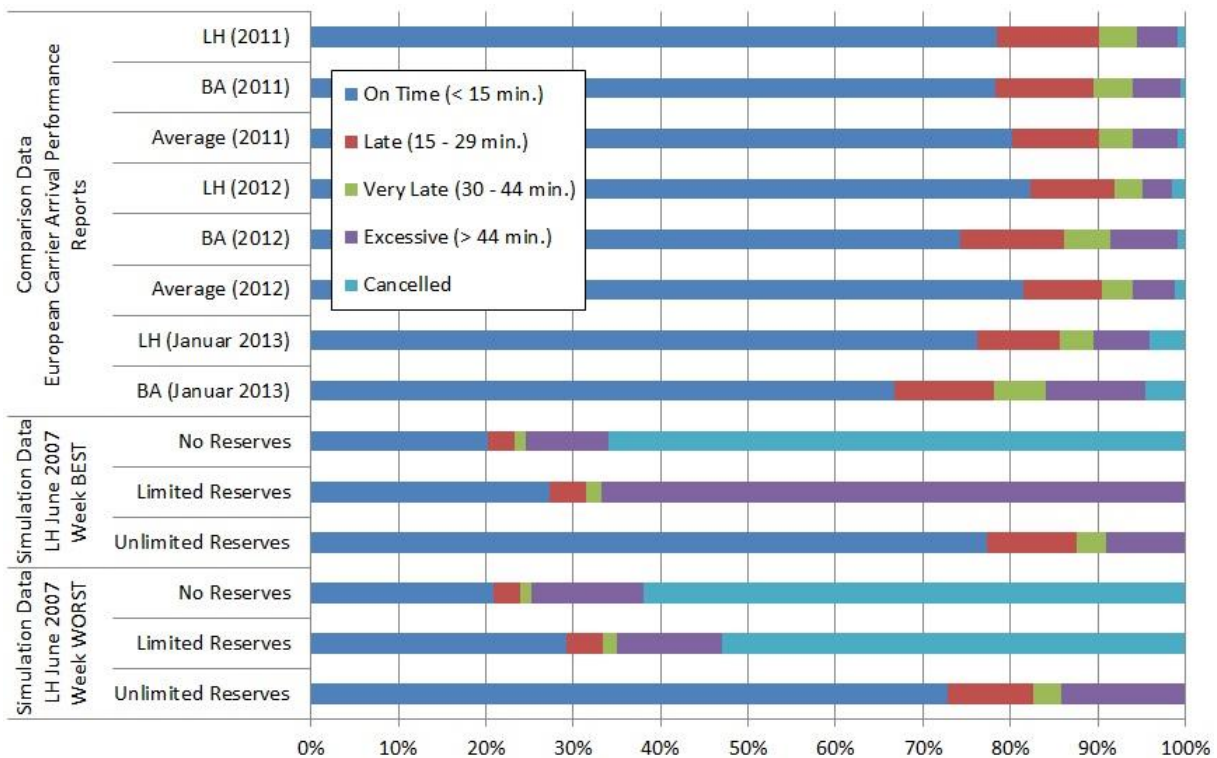


Abbildung 7.12: Abgleich der Simulationsergebnisse mit den On-Time-Performance-Daten europäischer Fluglinien aus den Jahren 2011, 2012 und Januar 2013

7.3.3 Leistungsanalyse

Nachdem in den vorigen beiden Abschnitten die Implementierung und die Konzipierung des Simulationsmodells weitestgehend verifiziert und validiert wurden, widmet sich dieser Abschnitt der Betrachtung der Leistungsfähigkeit der programmierten Simulationsanwendung. Um das Laufzeitverhalten vor dem Hintergrund verschieden großer Personaleinsatzpläne sichtbar zu machen, wurde der Einsatzplan *LH_June07_Week(Best)*, welcher für den Sommerflugplan der Lufthansa aus dem Jahr 2007 erstellt wurde, mit Planungshorizonten von einem Tag bis zu sieben Tagen berechnet. Die Kennzahlen der verschiedenen langen Personaleinsatzpläne sind in Tabelle 7.6 gegenübergestellt.

Planungshorizont	Flughäfen	Routen	Flight Legs	Jobs	Pairings	Employees
1 Tag	130	518	1.806	13.620	9.282	9.702
2 Tage	140	552	3.588	27.005	15.408	16.248
3 Tage	141	559	5.354	40.243	20.360	21.620
4 Tage	142	564	7.024	52.811	24.958	26.638
5 Tage	142	566	8.692	65.337	29.453	31.553
6 Tage	144	576	10.338	77.750	33.871	36.391
7 Tage	144	578	11.921	88.954	36.733	39.673

Tabelle 7.6: Kennzahlen der verschiedenen Planungshorizonte (Personaleinsatzplan: LH_June07_Week(Best))

Die Abläufe innerhalb einer Simulation lassen sich in eine Preprocessing-, eine Simulations- und eine Postprocessingphase unterteilen. Innerhalb des Preprocessings wird eine Verbindung zur Datenbank

aufgebaut, die Daten der verschiedenen Tabellen werden eingelesen (vgl. Abbildung 3.4) und in Form von objektorientierten Datenstrukturen bereitgestellt. Nachdem der Personaleinsatzplan mit sämtlichen Ereignissen in der Simulationsphase verarbeitet wurde, werden in der Postprocessingphase Daten aggregiert, Statistiken errechnet und die Ergebnisse zur weiteren Auswertung und Visualisierung in ein Excel-Template geschrieben.

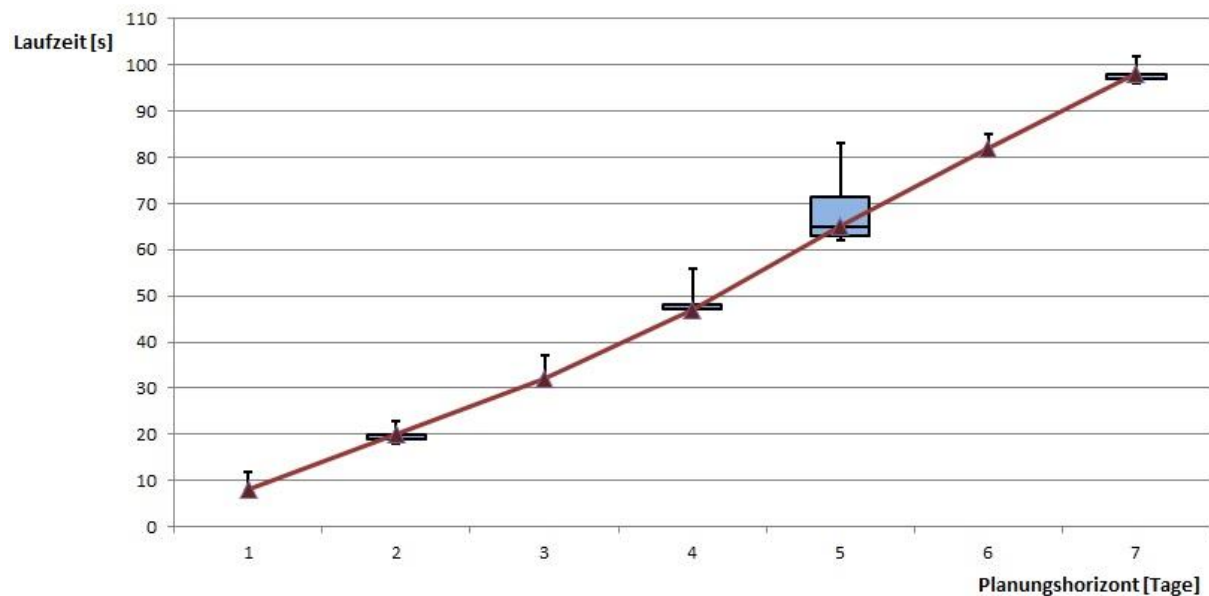


Abbildung 7.13: Durchschnittliche Programmlaufzeit in Abhängigkeit vom Planungshorizont des simulierten Personaleinsatzplans

Um Auswirkungen stochastischer Prozesse auf die im Folgenden aufgeführte Laufzeituntersuchung zu minimieren, wurden für jeden der sieben Planungshorizonte Testreihen á 100 Simulationsläufe angesetzt. In den gemessenen Laufzeiten sind dabei nur die Simulations- sowie die Postprocessingphase enthalten, da das Preprocessing nur jeweils einmal zu Beginn einer Testreihe durchgeführt werden muss. Da das Einlesen und Zusammenstellen der Daten darüber hinaus ohnehin nicht mehr als ein bis zwei Minuten benötigt, kann das Preprocessing in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Abbildung 7.13 zeigt in einem Box-Plot-Diagramm die durchschnittlichen Laufzeiten sowie die Größe ihrer Abweichungen. Der lineare Charakter der Laufzeitentwicklung ist hier sehr gut zu erkennen. Abbildung 7.14 zeigt die Zeiten der jeweils 100 Läufe noch einmal im Einzelnen. Hier wird ersichtlich, dass nach einer kurzen Einlaufphase zu Beginn einer Testreihe nahezu konstante Rechenzeiten erreicht werden, wobei für jeden weiteren simulierten Tag etwa 15 Sekunden pro Lauf hinzukommen. Die auffälligen vorübergehenden Abweichungen während des fünftägigen Planungshorizonts lassen sich vermutlich auf nicht beeinflussbare Prozessabläufe innerhalb des Betriebssystems zurückführen.

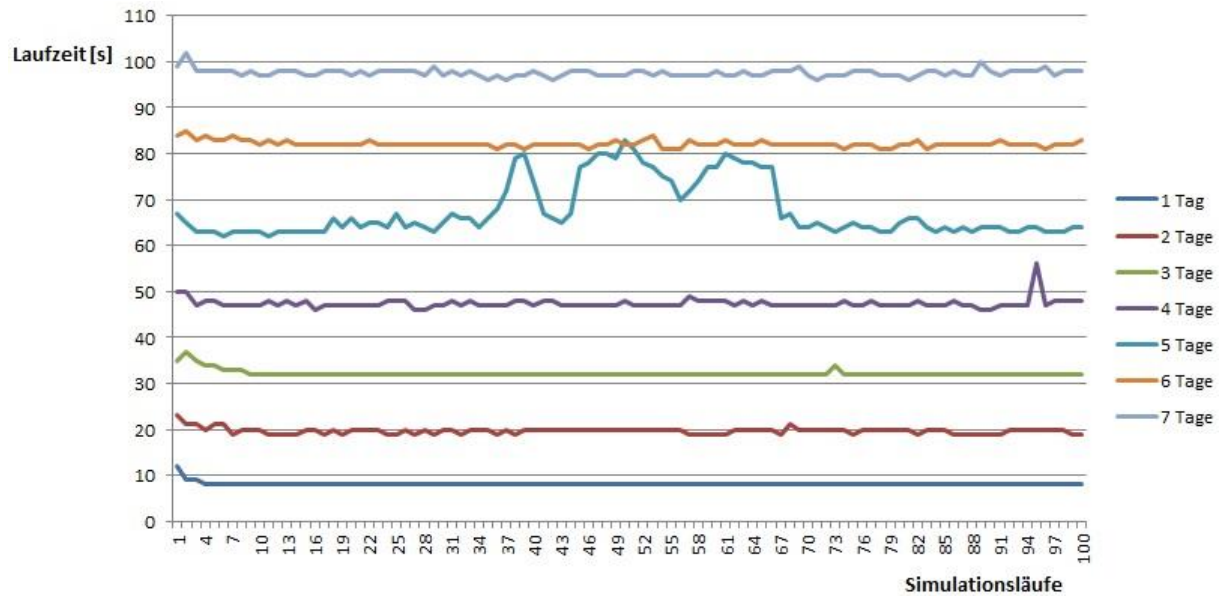


Abbildung 7.14: Entwicklung der Laufzeit innerhalb von Simulationsreihen

Da die Zeit, die ein Simulationslauf benötigt, im Wesentlichen von der Anzahl der zu verarbeitenden Ereignisse abhängt, werden im Weiteren die Belegung der für die Verwaltung der Ereignisse verwendeten Prioritätswarteschlange sowie die Häufigkeiten der verschiedenen Ereignistypen genauer betrachtet. Abbildung 7.15 zeigt in diesem Zusammenhang die Anzahl der vorgehaltenen Events im Zeitverlauf eines einwöchigen Einsatzplans. Um die Menge der zu erfassenden Daten einzuschränken, wurde der Inhalt der Warteschlange nur einmal pro simulierte Stunde protokolliert. Zu Beginn der Simulation ist die Warteschlange mit ca. 40.000 Events am längsten und verkürzt sich dann im weiteren Verlauf zunehmend, bis sie zum Simulationsende hin vollständig geleert ist. Aus der Abbildung wird ebenfalls ersichtlich, dass die *Briefing Start* Events den mit Abstand größten Anteil der Simulationsereignisse ausmachen. Abbildung 7.16, welche die fünf am häufigsten gemessenen Event-Typen gegenüberstellt, beziffert diesen Anteil mit 78%. Eine vollständige Übersicht über die gemessenen Häufigkeiten aller Event-Typen ist in Tabelle B.1 im Anhang einzusehen.

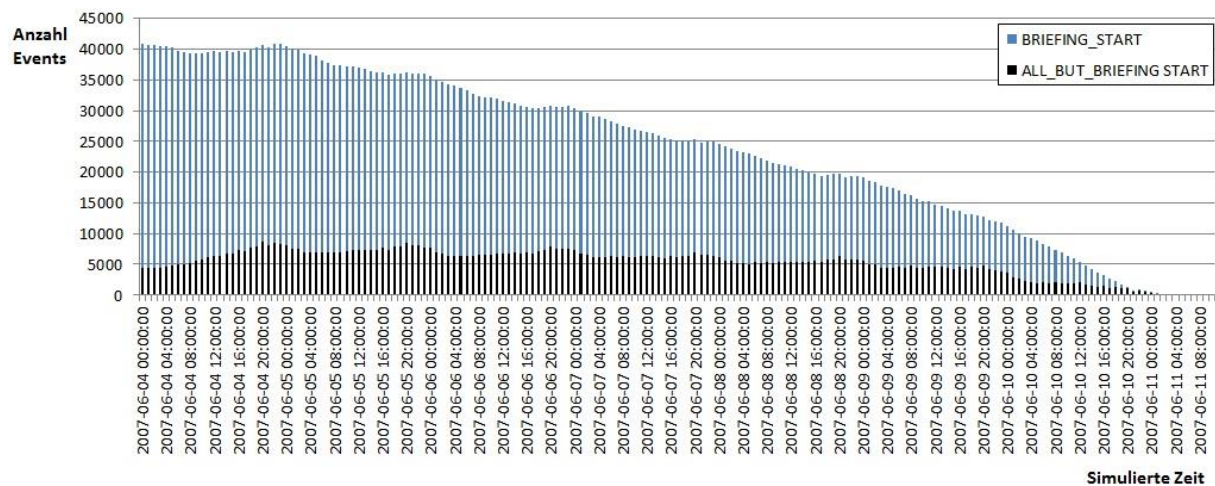


Abbildung 7.15: Belegung der Event-Queue im Simulationsverlauf mit Fokus auf Briefing-Start-Events

Es ist generell zu erwarten, dass die Events, die nach ihrer Erzeugung und Speicherung in der Warteschlange im Simulationsverlauf am längsten auf ihr Eintreten warten müssen, auch am häufigsten bei den stündlichen Messungen vorkommen. So wird ein *Briefing Start* Ereignis bspw. zum Ende einer Schicht in der Prioritätsschlange hinterlegt, aber erst nach der nächtlichen Ruhephase zu Beginn der nächsten Schicht am Morgen des nächsten Tages verarbeitet. Demgegenüber stehen bspw. die *Pax Boarding Start* Ereignisse, welche i.d.R. nach nur wenigen Minuten auf die *Crew Boarding Start* Ereignisse folgen (vgl. Abbildung 7.1). Ein weiterer Faktor, der die Häufigkeit von Ereignissen beeinflusst, ist der, mit welchen Entitäten die Ereignisse logisch verknüpft sind. So müssen *Briefing Start* Ereignisse zwangsläufig häufiger auftreten als *Preparation Starts*, da die Anzahl der Mitarbeiter-Entitäten um ein Vielfaches größer ist als die der Flugzeug-Entitäten.

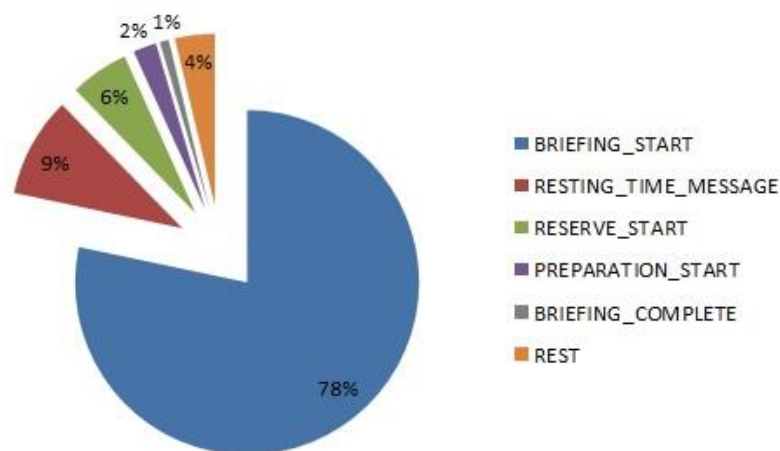


Abbildung 7.16: Absoluter Anteil der Event-Typen in der Simulation

Um neben den reinen Häufigkeiten der Ereignistypen auch deren zeitliche Entwicklung zu untersuchen, werden in Abbildung 7.17 einige von ihnen detaillierter betrachtet. Hier wurde auf die Darstellung der *Briefing Starts* und der weniger häufig vorkommenden Ereignistypen verzichtet, um Unübersichtlichkeit und die Verzerrung der Abbildungsachsen zu vermeiden. Anhand der Kurve der *Resting Time Messages* sind die sechs Nächte, die im Personaleinsatzplan enthalten sind und in denen die Zahl der Flüge weitaus geringer ist als am Tag, sehr gut zu erkennen. Reserve-Duties werden abseits der durch die Pairings festgelegten Umläufe mit normalen und Standby-Jobs geplant und sind während der Planumsetzung, wenn man von gelegentlichen krankheitsbedingten Ausfällen oder Verspätungen absieht, keinen stochastischen Einflüssen unterworfen. Das treppenförmige Abnehmen der *Reserve Starts* geht mit den Schichtwechseln alle acht Stunden konform. Auch die *Preparation Start* und *Briefing Complete* Events weisen ein täglich wiederkehrendes Muster auf, welches ebenfalls Tag- und Nachtphasen erkennen lässt. Da *Preparation Start* Events erst zu Beginn eines Tages ausgeführt werden, wächst deren Menge in der Nacht zuvor leicht an. Die Briefings der Flugzeugbesatzungen finden überwiegend am Tag statt. Abgesehen von den Initialereignissen, die der Prioritätsschlange bei Simulationsstart hinzugefügt werden und die im weiteren Verlauf konstant abnehmen, sind insgesamt gleichbleibende Muster erkennbar, anhand derer sich der eher konstante

Zeitbedarf, den die Erweiterung des Planungshorizonts um einen weiteren Tag mit sich bringt, gut erklären lässt.

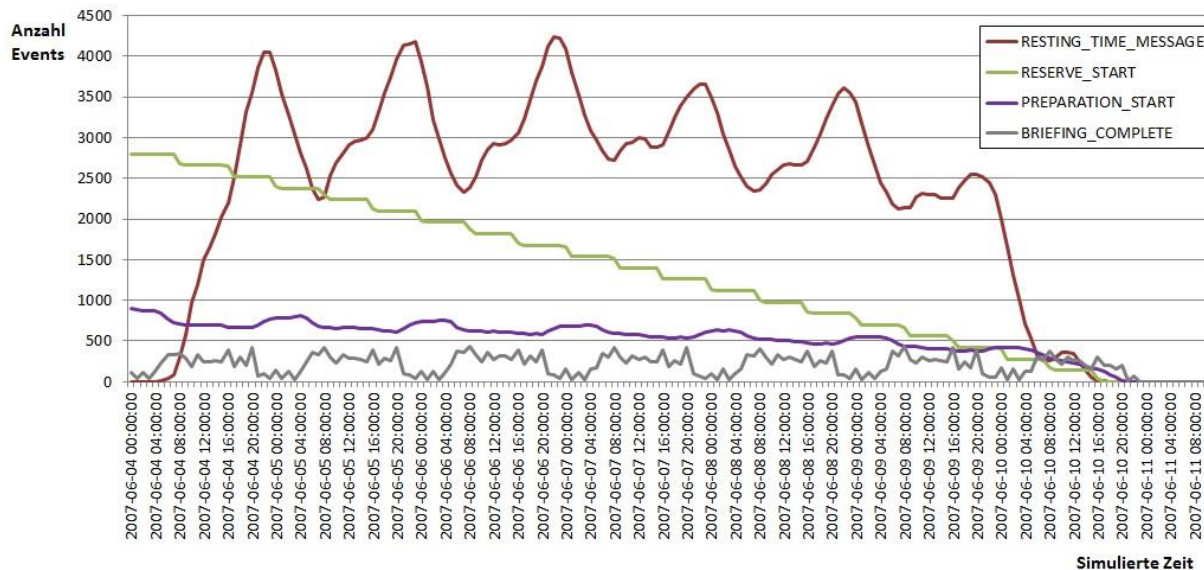


Abbildung 7.17: Entwicklung von Event-Häufigkeiten im Simulationsverlauf

7.4 Anwendung

7.4.1 Wissenschaftlicher Anwendungsfall: Untersuchung von Robustheitsindikatoren

Wie aus den Abschnitten 4.2.3 und 5.2.1 hervorgeht, können im Zuge der Erstellung von Flugpersonaleinsatzplänen eine ganze Reihe unterschiedlicher Robustheitsindikatoren herangezogen werden. Auch wenn sich einige von ihnen bereits seit langer Zeit in der Praxis bewährt haben, ist die Sinnhaftigkeit anderer noch nicht nachgewiesen. Insbesondere über kombinierte Anwendungen verschiedener Indikatoren und deren Auswirkungen auf die operative Umsetzung von Flug- und Einsatzplänen lassen sich in der Literatur nicht viele Informationen finden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungs- und Simulationsansätze können dazu verwendet werden, diese Aspekte näher zu untersuchen. Um das genaue Vorgehen hierfür zu demonstrieren, wird im Folgenden der von Dück et al. vorgestellte Untersuchungsprozess beispielhaft angewendet (vgl. [Dück] S. 3-4).

Dieser Prozess beginnt damit, für einen Flugplan eine Reihe von Personaleinsatzplänen zu erstellen (vgl. Abbildung 7.18). Dies geschieht mittels multikriterieller Optimierung und unter Verwendung zuvor spezifizierter Robustheitsindikatoren und deren Gewichtung innerhalb der Zielfunktion. Im Weiteren werden die Einsatzpläne unter Berücksichtigung von Störereignissen und der anzuwendenden Recoverystrategie simuliert und u.a. die Robustheit beschreibenden Messergebnisse erzeugt. Abschließend werden die die anonymen Einsatzpläne beschreibenden Parameter den die dynamischen Eigenschaften nachzeichnenden Messergebnissen gegenübergestellt. Im besten Fall können so Korrelationen nachgewiesen werden, die die Bewertung individueller

Robustheitsindikatoren zulassen und deren Tauglichkeit für die robuste Personaleinsatzplanung bestätigen.

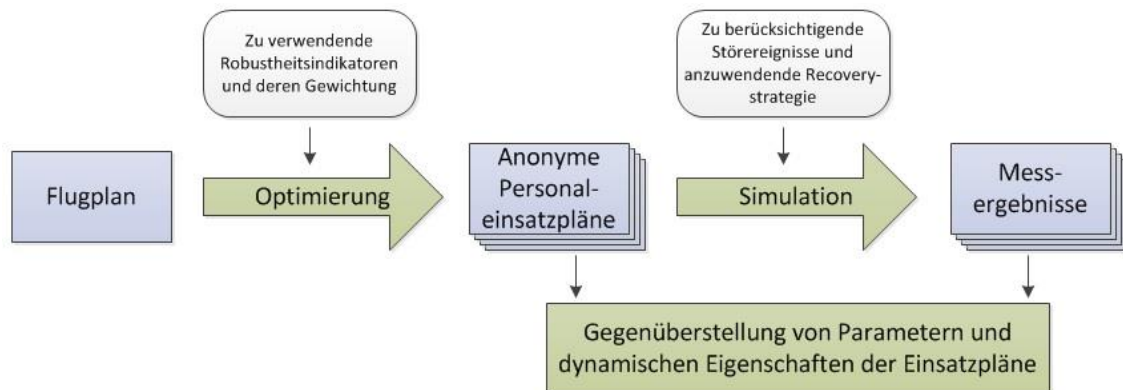


Abbildung 7.18: Prozess zur Untersuchung von Robustheitsindikatoren⁵⁵

Flugplan: Bei dem im Rahmen dieses Beispiels untersuchten Flugplan handelt es sich um einen einwöchigen Ausschnitt des Lufthansa Sommerflugplans aus dem Jahr 2007.

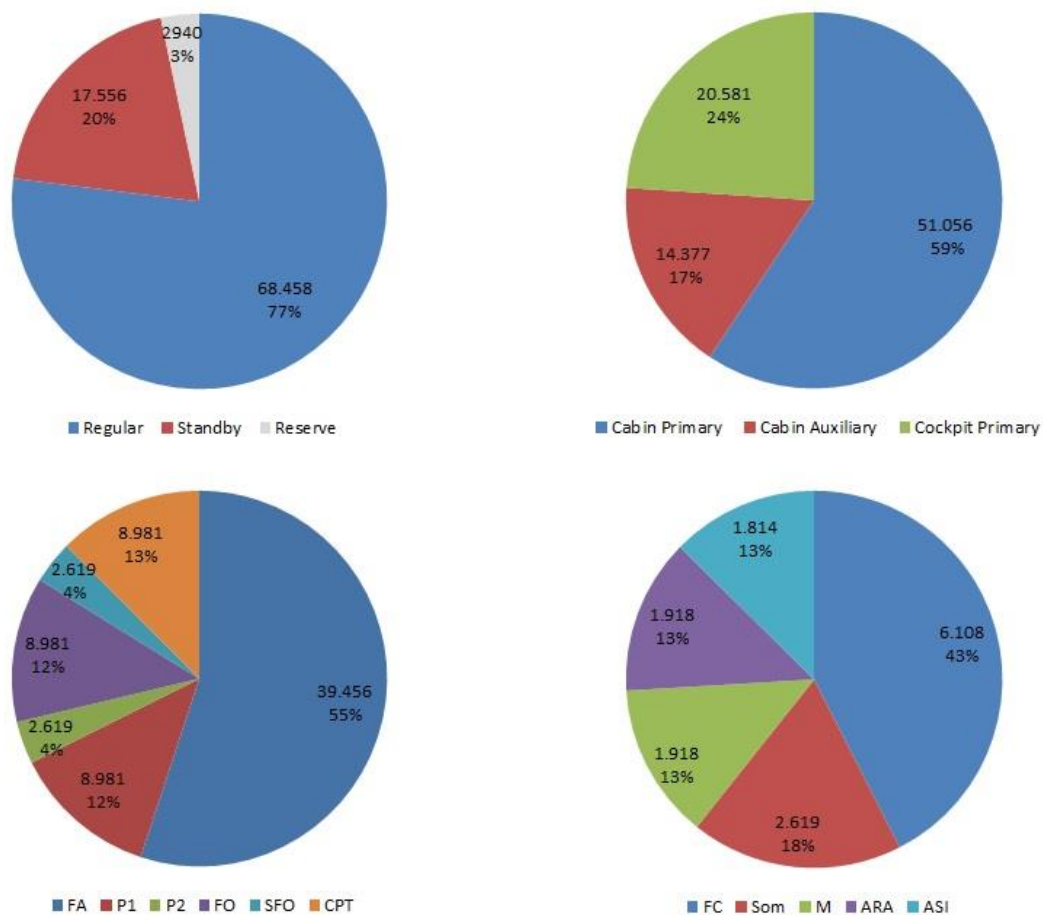


Abbildung 7.19: Aufschlüsselung des Aufgabenprofils des LH-Sommerflugplans 2007 anhand verschiedener Charakteristiken

⁵⁵ In Anlehnung an [Düick] S. 4.

Dieser Plan umfasst ein aus 144 Flughäfen und 578 Routen bestehendes Flugnetz und beinhaltet 88.954 Jobs, die es auf 7.385 Flügen und innerhalb von Standby- und Reserve-Duties auszuführen gilt. Da die Häufigkeiten der verschiedenen Aufgabentypen erheblichen Einfluss auf die Einsatzplanung von Flugpersonal haben, werden diese in Abbildung 7.19 genauer aufgeschlüsselt: Von den 88.954 Jobs des Flugplans werden die 2.940 Reserveaufgaben im Weiteren vernachlässigt, da sie während des Job Pairings nicht mit anderen Aufgaben zu Personalumläufen kombiniert werden (oben links). Während von den verbleibenden Jobs 24% dem Cockpit- und 76% dem Kabinenpersonal zuzuordnen sind, machen Primärjobs einen Anteil von 83% und Auxiliary Jobs einen Anteil von 17% aus (oben rechts). Die genaue Verteilung der sechs primären und fünf unterstützenden Aufgabentypen wird in Abbildung 7.19 unten links bzw. unten rechts dargestellt.

Optimierung: Für die Einsatzplanerstellung wird das in Kapitel 5 vorgestellte Job Pairing Optimierungsprogramm verwendet. Dessen Zielfunktion zeichnet sich durch die gleichzeitige Betrachtung von sechs sowohl auf Robustheit als auch auf Kosteneffizienz abzielende Indikatoren aus.

Gewichtungs-kombination	Excessive Cost	Buffer Violation	Rotation Change	Prim Config	Aux Config	Crewbase Violation
A	20%	0%	20%	20%	20%	20%
B	15%	25%	15%	15%	15%	15%
C	10%	50%	10%	10%	10%	10%
D	5%	75%	5%	5%	5%	5%
E	0%	100%	0%	0%	0%	0%
F	20%	20%	0%	20%	20%	20%
G	15%	15%	25%	15%	15%	15%
H	10%	10%	50%	10%	10%	10%
I	5%	5%	75%	5%	5%	5%
J	0%	0%	100%	0%	0%	0%
K	20%	20%	20%	0%	20%	20%
L	15%	15%	15%	25%	15%	15%
M	10%	10%	10%	50%	10%	10%
N	5%	5%	5%	75%	5%	5%
O	0%	0%	0%	100%	0%	0%
P	20%	20%	20%	20%	0%	20%
Q	15%	15%	15%	15%	25%	15%
R	10%	10%	10%	10%	50%	10%
S	5%	5%	5%	5%	75%	5%
T	0%	0%	0%	0%	100%	0%

Tabelle 7.7: Auflistung von 20 Kombinationen der während der Optimierung berücksichtigten Indikatorgewichte

Durch Variierung der jeweiligen Gewichtungen ergeben sich die in Tabelle 7.7 aufgeführten 20 Gewichtungskombinationen, die im Weiteren zu 20 unterschiedlichen Einsatzplänen führen. Dabei wurden die Gewichte nicht zufällig gewählt, sondern der *Buffer Violation*-, der *Rotation Change*-, der *Prim Config*- und der *Aux Config*-Indikator der Reihe nach fokussiert. Für jeden der Indikatoren

wurde die Gewichtung in fünf Stufen von 0% auf 100% erhöht, wobei die jeweilig anderen fünf Indikatoren gleich gewichtet wurden. Auf diese Weise wird eine Datengrundlage geschaffen, mit deren Hilfe kenntlich gemacht werden kann, inwiefern das Verändern einer Indikatorgewichtung Einfluss auf das Gesamtplanungsergebnis hat.

Anonyme Personaleinsatzpläne: Die Kenndaten der 20 erstellten Personaleinsatzpläne werden im Folgenden visualisiert, wobei die fünf Pläne, die jeweils zu einem der vier untersuchten Indikatoren gehören, separat dargestellt werden (vgl. Abbildungen 7.20 bis 7.23 unter Beachtung der in Tabelle 7.7 angegebenen Bezeichner für die Gewichtungskombinationen)⁵⁶. In allen vier Abbildungen sind wiederkehrende Muster zu erkennen. So beträgt der *Excessive Cost*-Value in allen Szenarien rund 25%. Und auch wenn der *Buffer Violation*- und der *Aux Config*-Value im Rahmen der jeweiligen zunehmenden Fokussierung fortlaufend verbessert werden konnten, liegen alle Werte unterhalb von 1%. Die übrigen drei Indikatoren weisen größere Variationen in ihren Zielerreichungsgraden auf. Am deutlichsten ist dies in allen Abbildungen für den *Prim Config*-Value zu sehen. Wird dieser mit 0% gewichtet, werden Werte zwischen 20% und 30% erreicht. Beträgt die Gewichtung jedoch mindestens 25%, so liegen die Werte ausnahmslos unter 2%.

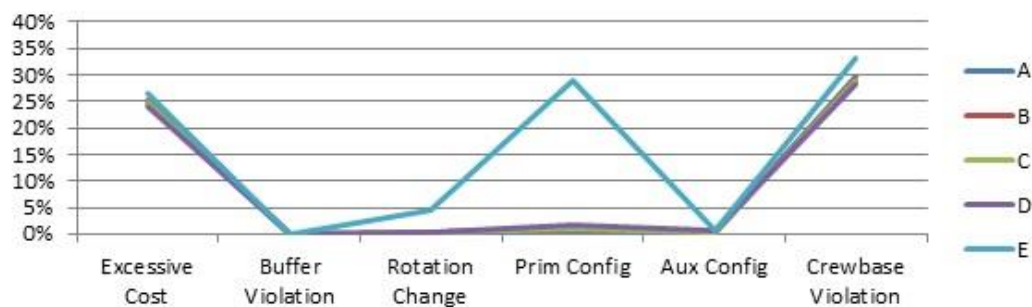


Abbildung 7.20: Parameterausprägungen der fünf den *Buffer Violation*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

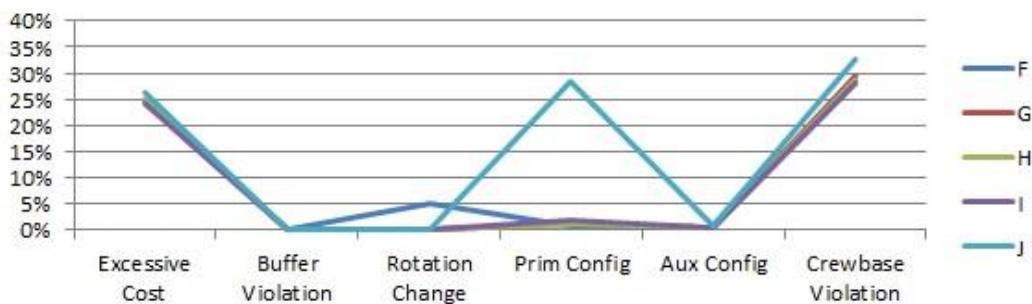


Abbildung 7.21: Parameterausprägungen der fünf den *Rotation Change*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

⁵⁶ Da viele der erzielten Parameterausprägungen im niedrigen Prozentbereich liegen, werden die Ergebnisse noch einmal explizit in Tabelle C.1 des Anhangs aufgeführt.

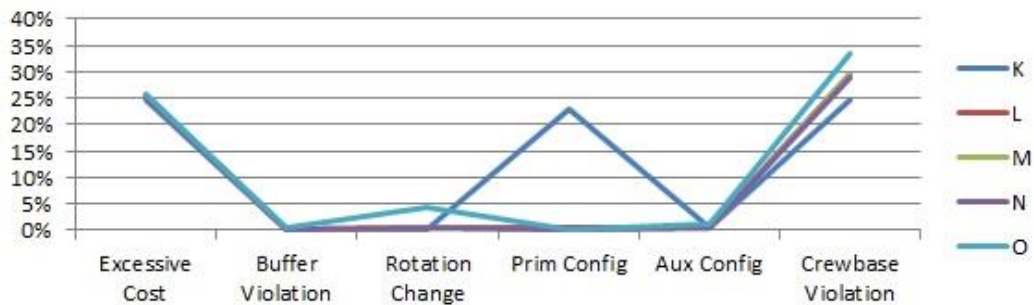


Abbildung 7.22: Parameterausprägungen der fünf den *Prim Config*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

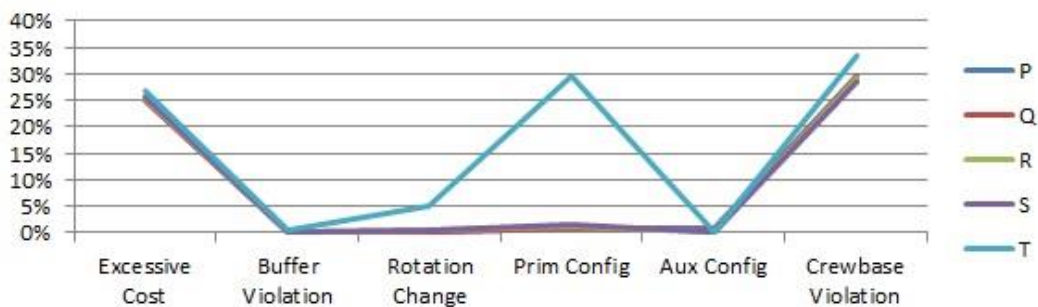


Abbildung 7.23: Parameterausprägungen der fünf den *Aux Config*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

Simulation: Im nächsten Schritt des Untersuchungsprozesses werden sämtliche Personaleinsatzpläne mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Simulationsansatz auf ihre dynamischen Eigenschaften hin untersucht und deren Robustheitsgrad gemessen. Wie in Abschnitt 4.2.4 erläutert, können zu diesem Zweck zahlreiche Kennzahlen herangezogen werden. An dieser Stelle wurde sich für die Betrachtung der kumulierten Flight Leg-Verspätungen entschieden. Da Robustheit i.d.R. nicht um jeden Preis angestrebt wird, wurden gleichzeitig auch die exzessiven Flugplankosten angegeben. Auch wenn diese Werte in Euro angegeben werden, stellen sie doch vielmehr einen relativen Bezug zueinander dar, als tatsächliche Kosten auszudrücken. Um die Ergebnisdaten greifbarer zu machen, werden sowohl Verspätungen als auch exzessive Kosten als Durchschnitt über alle Flight Legs angegeben. Alle 20 Personaleinsatzpläne wurden jeweils zehnmal simuliert. In sämtlichen Simulationsläufen kam die *No-Reserves-Recovery*-strategie zum Einsatz, um im Rahmen der Untersuchung von Robustheitsindikatoren den Einfluss von Ersatzressourcen auszublenden.

Messergebnisse: Wiederum die Bezeichner aus Tabelle 7.7 aufgreifend und der bereits verwendeten Szenarioaufteilung folgend, werden in den Abbildungen 7.24 bis 7.27 die Ergebnisse der insgesamt 200 Simulationsläufe dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die vier Kostenkurven die gleichen Tendenzen wie auch die vier Verspätungskurven aufweisen. Weiterhin sind jedoch kaum Abweichungen innerhalb der einzelnen Gewichtungsvariationen zu erkennen. Einzig die Auswirkungen der Nichtbeachtung von Rotationswechseln sind in sämtlichen Abbildungen sowohl in den Kosten- als auch den Verspätungskurven überdeutlich wahrzunehmen. Werden die

Rotationswechsel nicht mit mindestens 25% gewichtet, liegen Kosten und Verspätungen um ein Vielfaches höher als bei sämtlichen anderen Parameterkombinationen.

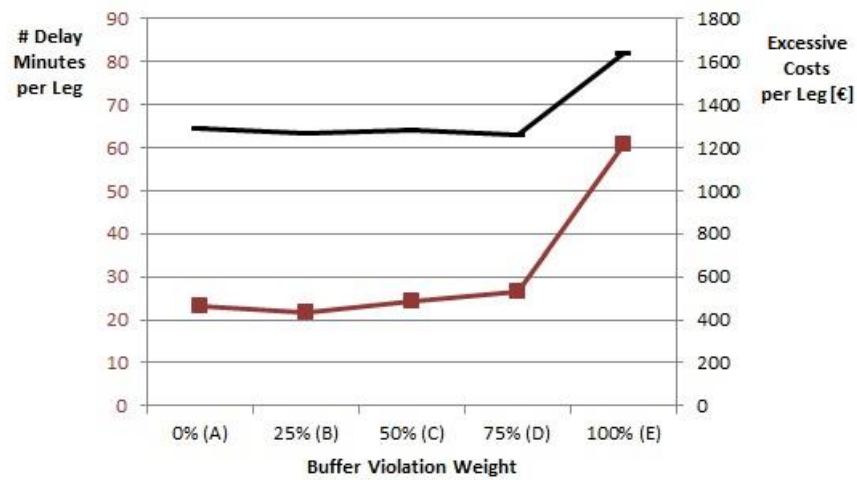


Abbildung 7.24: Simulationsergebnisse der fünf den *Buffer Violation*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

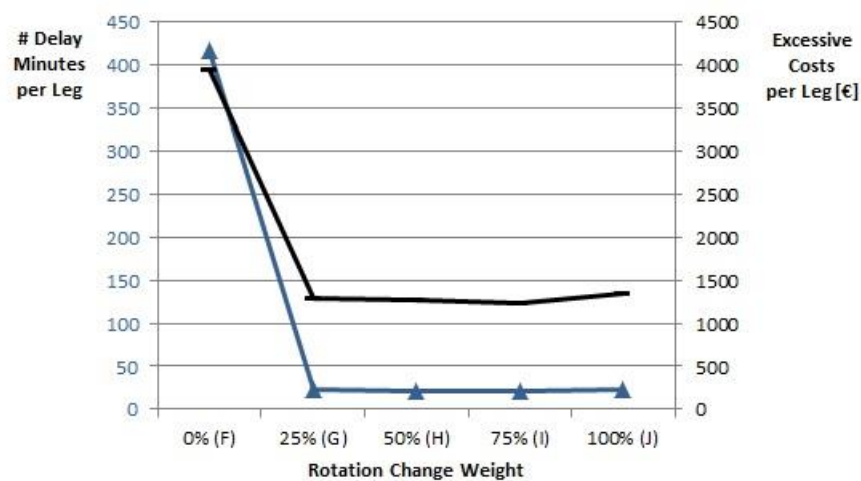


Abbildung 7.25: Simulationsergebnisse der fünf den *Rotation Change*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

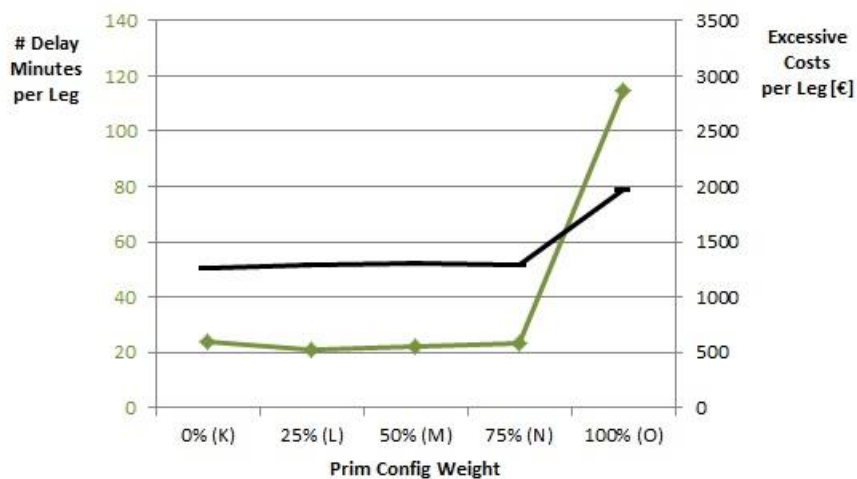


Abbildung 7.26: Simulationsergebnisse der fünf den *Prim Config*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

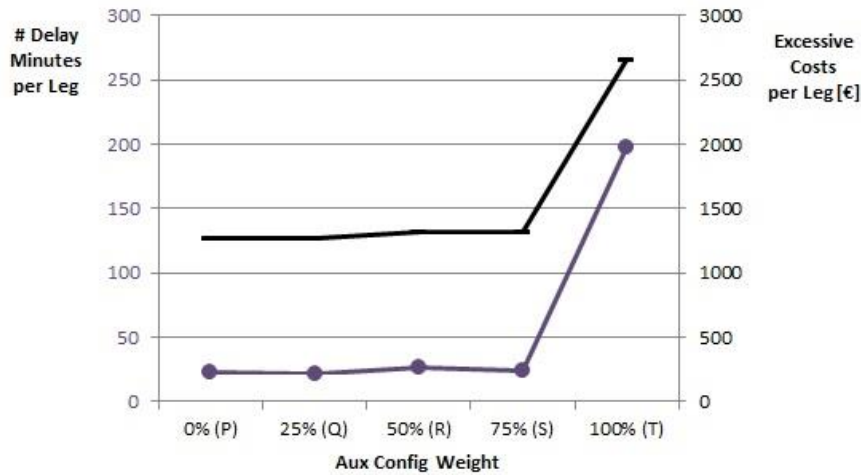


Abbildung 7.27: Simulationsergebnisse der fünf den *Aux Config*-Indikator fokussierenden Einsatzpläne

Gegenüberstellung von Parametern und dynamischen Eigenschaften der Einsatzpläne: Auch wenn die Optimierungs- und auch die Simulationsergebnisse in den weitesten Teilen nicht sehr sensibel auf die Gewichtungsänderungen reagieren, ist doch ein Effekt sehr schön und konsistent über die gesamte Testreihe zu beobachten. Wird dem *Rotation Change*-Parameter, wie in den Flugplanszenarien E, F, O und T, keinerlei Gewichtung zugesprochen, beträgt der in der Optimierung erreichte *Rotation Change*-Value jedes Mal mit rund 5% seine schlechteste Ausprägung. Während dieser Szenarien werden auch in der Simulation mit im Durchschnitt 180 Verspätungsminuten und 1200€ exzessiver Kosten pro Flug die schlechtesten Robustheits- und Kostenwerte erzielt. Die Höhe dieser extremen Werte ist, wie schon zuvor beschrieben, auf die *No-Reserves*-Strategie zurückzuführen und kann in diesem Zusammenhang regelmäßig gemessen werden. Wird der Parameter, wie in allen Szenarien außer E, F, O und T, hingegen mit mindestens 25% gewichtet, nähert sich der in der Optimierung erreichte Wert mit 0% seinem Optimum an, was sich in den Simulationsergebnissen durch das Ausbleiben negativer Effekte bemerkbar macht. Insgesamt wird also deutlich, dass eine Gewichtung des *Rotation Change*-Indikators von 25% ausreicht, um negative Auswirkungen auf die Planumsetzung zu vermeiden. Ob dies auf der anderen Seite auch mit weniger Gewichtung hätte erreicht werden können, kann aufgrund der für diese Untersuchung festgelegten Schrittlänge von 25% nicht beantwortet werden.

Ein weiterer Indikator, dessen Tauglichkeit im Zusammenhang mit Robustheit in der Literatur oftmals hervorgehoben wird, ist der *Buffer Violation*-Parameter. Dessen unterschiedliche Einstellungen haben jedoch keine Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse gezeigt. Dies ist durch die äußerst geringe Variation der in der Optimierung erzielten Parameterausprägungen zu erklären. Um festzustellen, warum in allen Optimierungsläufen an dieser Stelle ähnliche Werte erzielt wurden, müssten die Einsatzplanstrukturen und deren Wechselwirkungen mit den durch die ε -Constraint-Methodik zwingend einzuhaltenden MCTs genauer untersucht werden. Generell sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei der durchgeführten Untersuchung nur um eine Demonstration handelt.

Im komplexen Umfeld der Flugpersonaleinsatzplanung und bei gleichzeitiger Berücksichtigung von sechs Planungsindikatoren müssen Untersuchungen wesentlich größere und vielseitigere Testreihen beinhalten, um belastbare Ergebnisse zu erhalten und Wirkungszusammenhänge sicher nachzuweisen.

Dass die in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten Prim- und Aux Config-Parameter keinen direkten Einfluss auf die Robustheit haben, wird dadurch ersichtlich, dass sich die teilweise stark unterscheidenden Optimierungswerte nicht in den Simulationsergebnissen wiederfinden. Dies war so zu erwarten, da es im operativen Betrieb i.d.R. irrelevant ist, welche Aufgabentypen ein Flugdienstmitarbeiter an Bord eines Flugzeugs verrichtet. Interessanter ist die Tatsache, dass auch die simulierten Kosten durch die mit Hilfe der Indikatoren erzielten speziellen Jobkombinationen unbeeinflusst bleiben. So können die Qualifikationsanforderungen, die ein Einsatzplan an das Personal einer Fluglinie richtet, verringert werden, ohne dass damit hohe Kosten verbunden wären. Vor dem Hintergrund, dass die in Abbildung 7.19 dargestellten Anforderungen gleichbleiben, zeigen die Abbildungen 7.28 und 7.29 das im Rahmen dieser Testreihe vorliegende Potential zur Verringerung der Pairinganforderungen in Abhängigkeit zu den jeweiligen Indikatorgewichtungen. Aus Abbildung 7.28 wird ersichtlich, dass mit steigender Gewichtung die Anzahl der Pairings abnimmt, für die Primärqualifikationen der Ränge 2 und 3 benötigt werden. Abbildung 7.29 zeigt, dass ebenfalls die Anzahl der Pairings, für die viele Hilfsqualifikationen erforderlich sind, stark reduziert und gleichzeitig sogar die Gesamtzahl an Kabinen-Pairings verringert werden kann. Die dieserart freigewordenen Personalkapazitäten können an anderer Stelle eingeplant werden und tragen somit indirekt zur robusteren Gestaltung von Flug- und Personaleinsatzplänen bei.

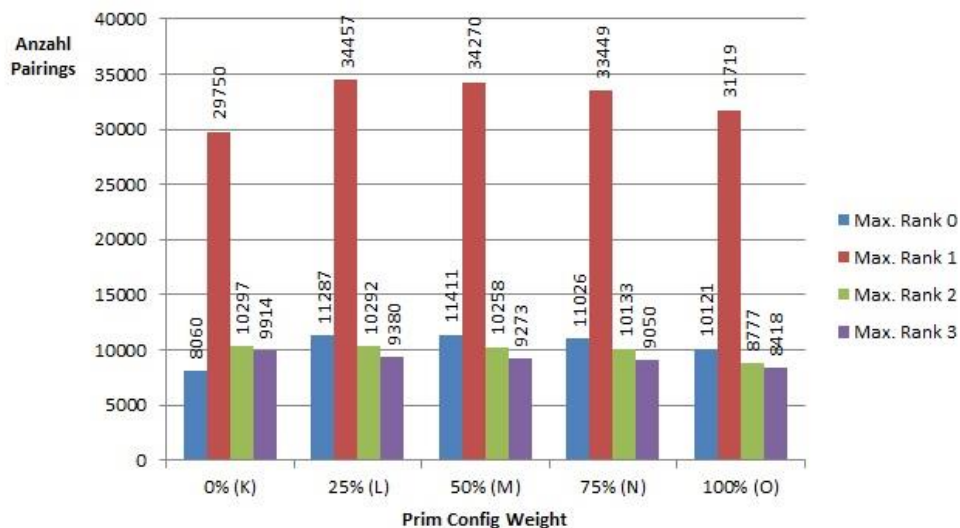


Abbildung 7.28: Anforderungsprofile der fünf *Prim Config*-Einsatzpläne (Fokus: Primary Qualifications)

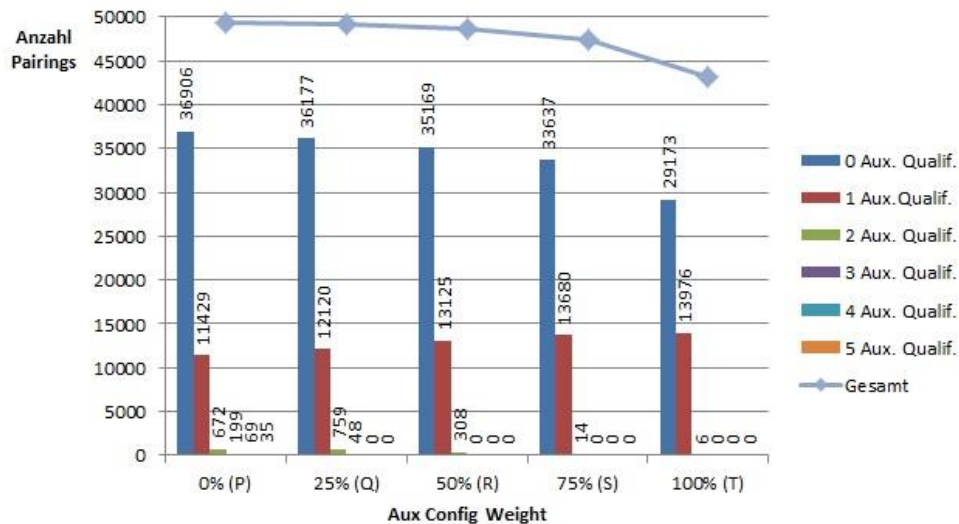


Abbildung 7.29: Anforderungsprofile der fünf *Aux Config*-Einsatzpläne (Fokus: Auxiliary Qualifications)

7.4.2 Praktischer Anwendungsfall: Steigerung der Robustheit eines Personaleinsatzplans

Die in dieser Arbeit entwickelten Optimierungs- und Simulationsansätze können neben eher wissenschaftlich geprägten Fragestellungen auch für praktische Problemstellungen der Flug- und Personaleinsatzplanung herangezogen werden. So können sie von Fluglinien dazu eingesetzt werden, erstellte Pläne anhand einer Vielzahl statischer Messparameter zu bewerten und darüber hinaus ihr Verhalten unter Berücksichtigung dynamischer Umweltbedingungen zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ermöglicht das Simulationsmodell eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Darstellung operativer Abläufe. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen können für die Verbesserung bestehender Einsatzpläne sowie für die Anpassung der Planungsprozesse selbst genutzt werden. Wie bei der Überarbeitung einer Personalplanung im Einzelnen vorgegangen werden kann, wird in Abbildung 7.30 dargestellt und im Folgenden anhand eines Beispiels demonstriert.

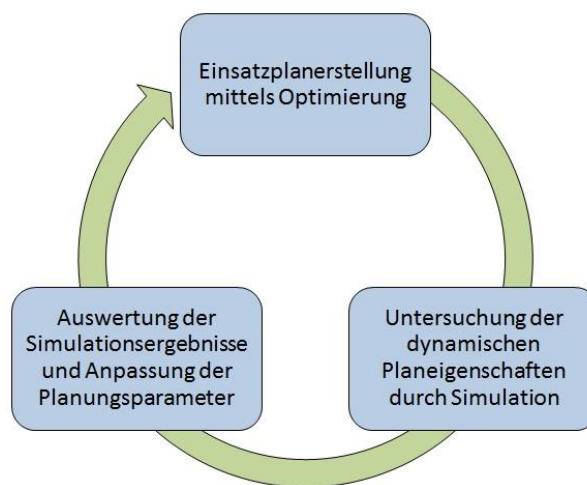


Abbildung 7.30: Prozess zur Verbesserung von Einsatzplaneigenschaften mittels Optimierung und Simulation

Ausgangspunkt ist der anonyme Personaleinsatzplan *LH_June07_Week_(Worst)*, der bereits in Abschnitt 7.3.2 beschrieben und dessen On-Time-Performance in Abbildung 7.12 im Vergleich zu

weiteren Einsatzplänen abgetragen wurde. Dass der Plan im Rahmen seiner simulierten Implementierung unterdurchschnittliche Pünktlichkeitswerte erzielt hat und viele Flüge von der AOC gestrichen wurden, geht aus der Abbildung hervor. Jedoch kann von ihr nicht abgeleitet werden, worin dies begründet liegt. Hierfür müssen wesentlich detailliertere Simulationsdaten betrachtet werden, die bspw. darüber Auskunft geben, wo und wann Ersatzpersonal zur Kompensation einer Flugplanstörung angefragt wurde. So zeigt Abbildung 7.31 zunächst einen flughafen- und stundengenauen Überblick darüber, wie oft solche Anfrageereignisse stattgefunden haben. Vor dem Hintergrund der H&S-Struktur des Lufhansa-Flugnetzes ist es nicht verwunderlich, dass die beiden Hubs FRA und MUC die größten Ausschläge zeigen, während sich die Spoke- und Shuttleflughäfen im Vergleich eher unauffällig verhalten⁵⁷. Nachdem die kritischen Stellen des Personaleinsatzplans dieserart identifiziert sind, kann der Detailgrad der Betrachtung noch weiter erhöht werden. Diesbezüglich zeigt Abbildung 7.32 die schon in der vorigen Abbildung dargestellte Zeitreihe des Frankfurter Flughafens, dieses Mal jedoch danach aufgeschlüsselt, welcher Ersatzpersonaltyp nachgefragt wurde (Standby oder Reserve), um welchen Crewtyp es dabei ging (Cabin oder Cockpit) und ob der Anfrage entsprochen werden konnte oder nicht (Found oder Not Found). Die Datenauswertung hat ergeben, dass die Anteile nicht gefundenen Reservepersonals durchgängig recht hoch sind, wodurch der Delay Propagation nicht ausreichend entgegengewirkt wurde und dies erheblich zum schlechten Abschneiden des Flugplans beigetragen hat.

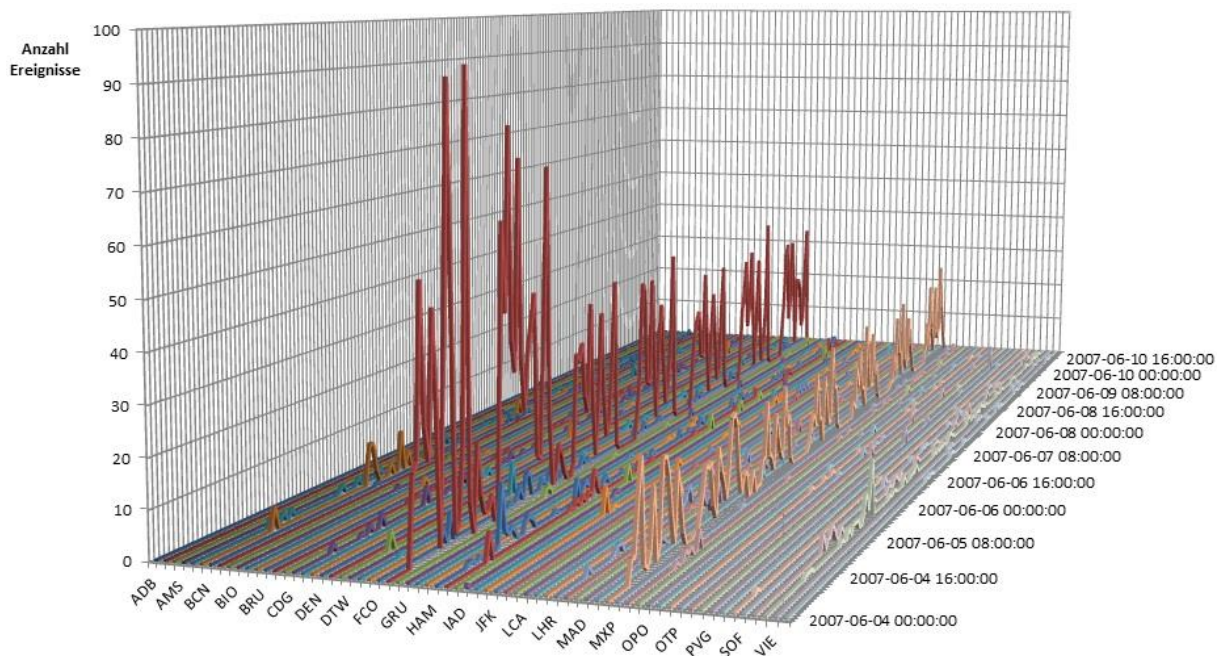


Abbildung 7.31: Zeitlich und räumlich aufgelöster Überblick über Ersatzpersonal-Anfragen des ursprünglichen Personaleinsatzplans (FRA in rot, MUC in beige)

⁵⁷ Innerhalb der simulierten Woche entfielen 2.693 Anfrageereignisse auf FRA, 1.005 auf MUC und 94 auf HAM. Alle weiteren 141 Flughäfen erhielten (teilw. erheblich) weniger Anfragen als HAM.

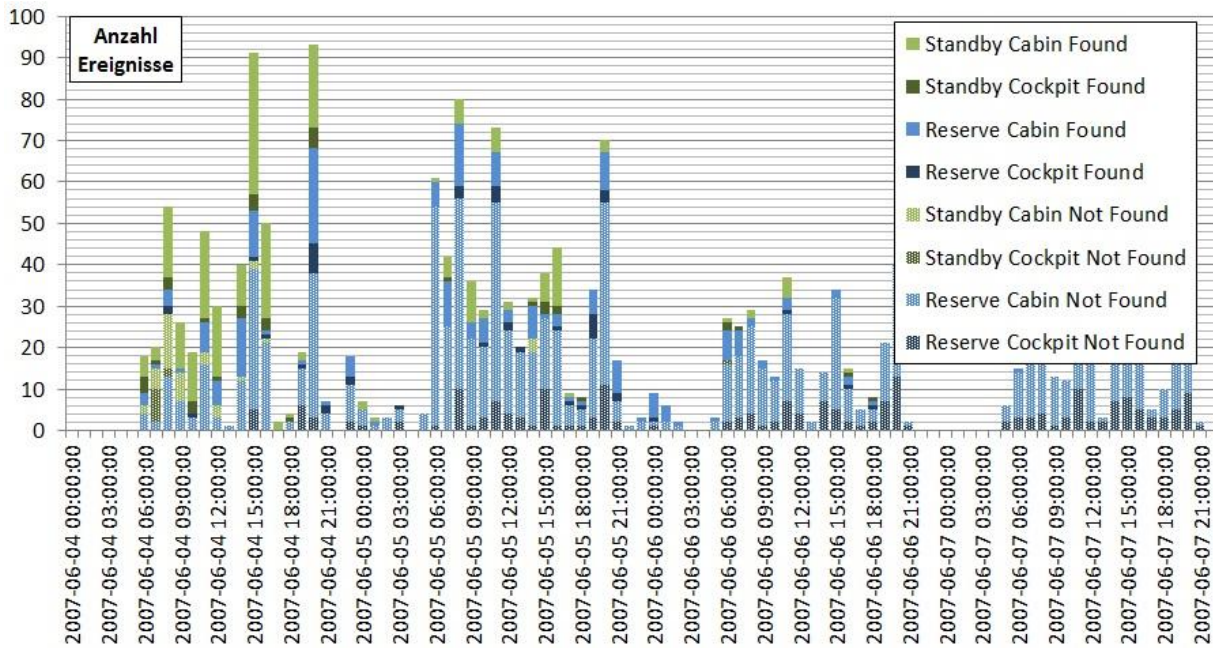


Abbildung 7.32: Zeitlich aufgelöster Überblick über die Typen der Ersatzpersonal-Anfragen am Flughafen FRA (Viertagesausschnitt des ursprünglichen Personaleinsatzplans)

Im Rahmen der Anpassung der Planungsparameter (vgl. Abbildung 7.30) wurde sich dafür entschieden, die an den beiden Hubs eingesetzten Reservekapazitäten zu verdoppeln. Gleichzeitig wurde jedoch darauf verzichtet, Reserven für die Zeiten zwischen 21 und 3 Uhr einzuplanen, da diese bisher nur sporadisch genutzt wurden.

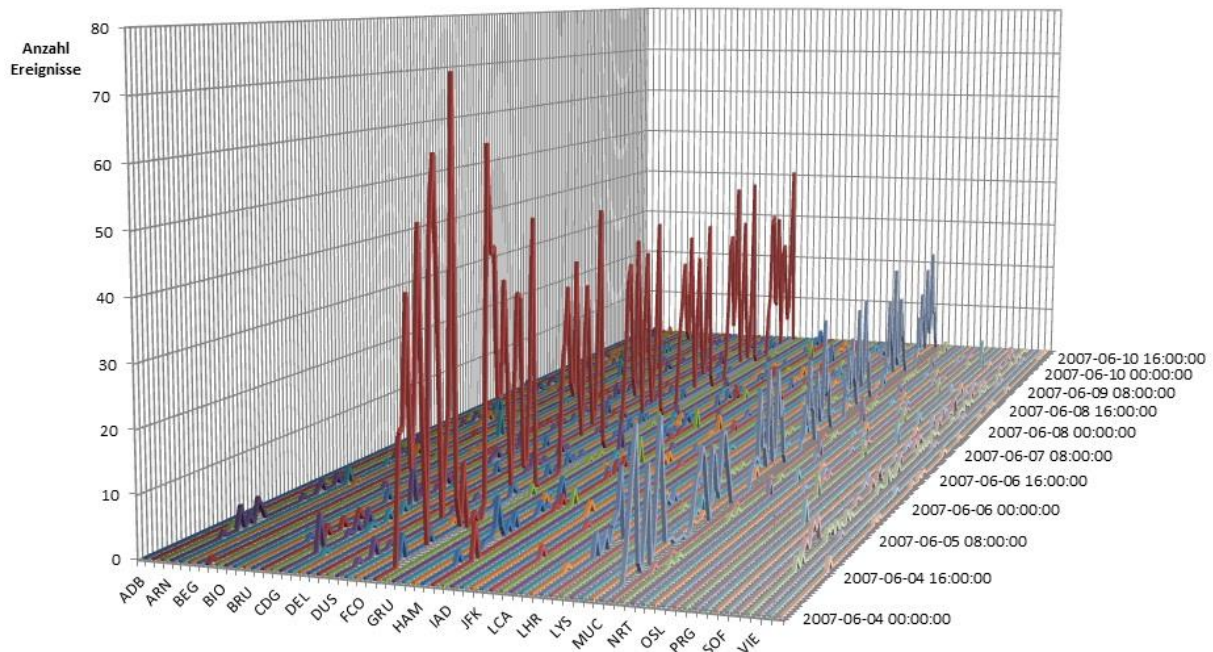


Abbildung 7.33: Zeitlich und räumlich aufgelöster Überblick über Ersatzpersonal-Anfragen des angepassten Personaleinsatzplans (FRA in rot, MUC in hellblau)

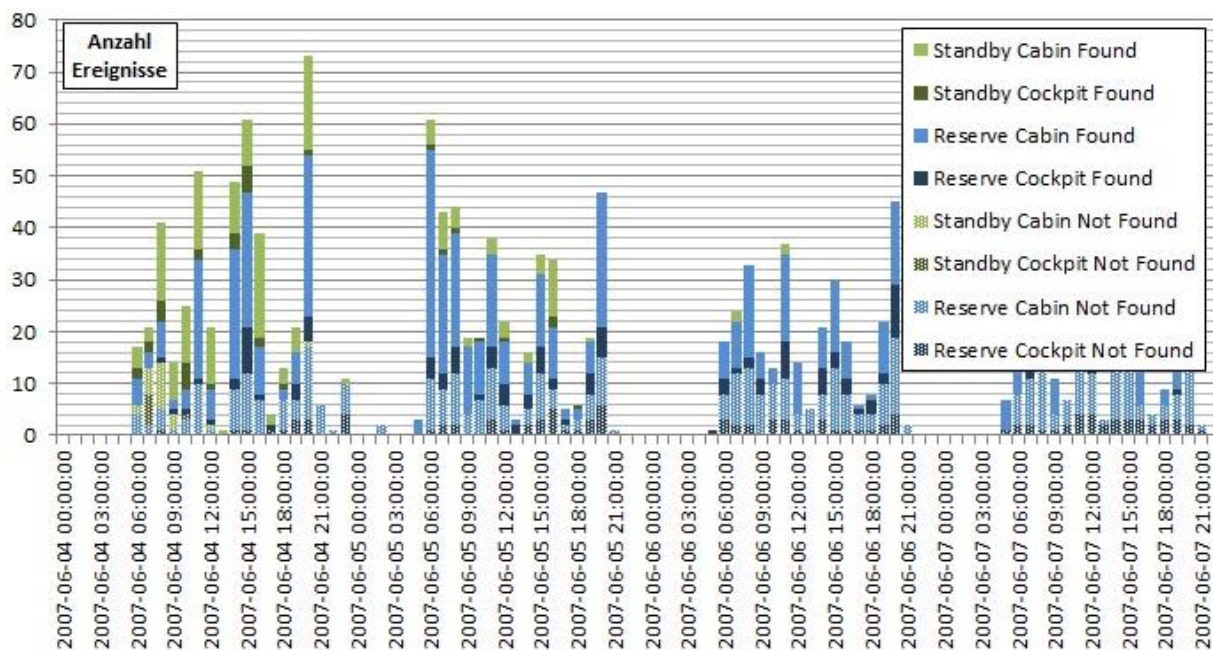


Abbildung 7.34: Zeitlich aufgelöster Überblick über die Typen der Ersatzpersonal-Anfragen am Flughafen FRA (Viertagesausschnitt des angepassten Personaleinsatzplans)

Vor dem Hintergrund, dass Reserveaufgaben nicht mit Regular- und Standby-Jobs zu Pairings kombiniert werden, und dadurch, dass an dieser Stelle nur Reserve-, nicht jedoch Standby-Kapazitäten umgeplant wurden, ist das erneute Optimieren des Job Pairing-Problems nicht nötig. Die Ergebnisse der Simulation des überarbeiteten Personaleinsatzplans sind, in Analogie zu den Ergebnisdarstellungen der vorigen Prozessiteration, in den Abbildungen 7.33 und 7.34 aufgeführt. Neben einer generellen Reduzierung der Anfrageereignisse ist gut zu erkennen, dass, im Vergleich zu vorher, einem größeren Teil von ihnen entsprochen werden konnte. Zurückgeführt auf den Abstraktionsgrad der On-Time-Performance zeigt Abbildung 7.35 die Verbesserungen in Bezug auf Pünktlichkeit und Flugstreichungen, die in dieser beispielhaften Prozessanwendung erreicht werden konnten.

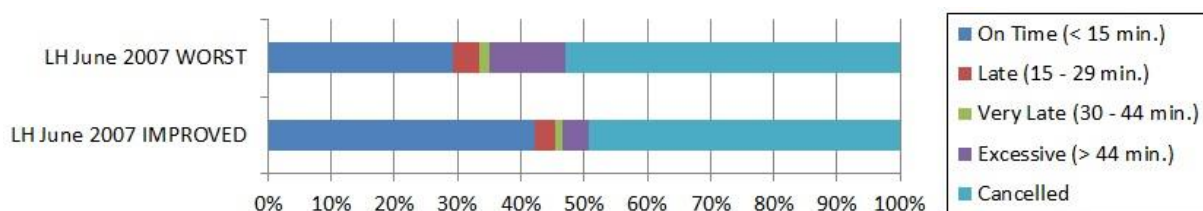


Abbildung 7.35: On-Time-Performance-Vergleich des ursprünglichen und des angepassten Personaleinsatzplans

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Nach einer Einführung in die Terminologie und die grundlegenden Zusammenhänge des Luftverkehrs wurden die wichtigsten am Boden und in der Luft stattfindenden Prozessabläufe von Flugzeugen, Crews und Passagieren beschrieben, die gemeinsam die grundlegende Dynamik des Luftverkehrssystems ausmachen. Um die Herausforderungen der Flugpersonaleinsatzplanung in diesem Rahmen einordnen und die Tragweite der hier getroffenen Entscheidungen abschätzen zu können, wurde im Anschluß der Gesamtplanungsprozess bis hin zum operativen Flugplanmanagement und -recovery beschrieben. Aufgrund seiner mehrjährigen Dauer, der sich dynamisch verändernden Bedingungen und vieler konkurrierender Zielvorgaben ist dieser Prozess durch eine enorme Komplexität gekennzeichnet.

Als nächstes wurde sich dem Aufbau eines konsistenten Datenbestandes gewidmet, der für die Untersuchung der Personaleinsatzplanung und deren Einfluss auf die Robustheit von Flugplänen unverzichtbar ist. Dieser umfasst im Wesentlichen Informationen über die Größe, Konfiguration und Zuweisung von Flugzeugflotten, über die Ausdehnung und Struktur von Flugnetzen und über die Umlauf- und Einsatzplanungen von Flugzeugen und Flugdienstmitarbeitern. Da nicht alle diese Informationen im benötigten Detailgrad durch öffentliche Quellen zugänglich gemacht werden, wurden für einige Planungsbereiche Datengeneratoren entwickelt und die Lücken im Datenbestand durch künstliche, inhaltlich plausible Datensätze geschlossen. Weiterhin wurde ein ganzheitliches Datenmodell konzipiert, in dem sämtliche Entitäten und deren Attribute und Beziehungen definiert wurden. Dieses wurde weiterhin in ein Datenbankschema überführt und in Form einer SQL-Datenbank umgesetzt.

In einem nächsten Schritt wurde das Crew Pairing Problem untersucht, das typischerweise für die anonyme Einsatzplanung von Flugzeugbesatzungen herangezogen wird. Neben verbreiteten Modellierungsalternativen wurde hierbei insbesondere die Robustheit von Flug- und Personaleinsatzplänen fokussiert. Es wurde deutlich, dass für die Erstellung störungsresistenter Pläne deren Stabilität und Flexibilität von entscheidender Bedeutung sind. In diesem Zusammenhang wurde sorgfältig herausgearbeitet, was diese beiden Begriffe im Kontext des Flugverkehrs bedeuten, mit welchen Indikatoren sie während der Planung angestrebt und wie sie im Nachhinein gemessen werden können. Da das CPP jedoch insgesamt dazu dient, Pairings für ganze Crewkomplemente zu berechnen, wird in seinem Rahmen von einzelnen Mitarbeitern und ihren individuellen Qualifikationen abstrahiert. Dies hat i.d.R. zur Folge, dass die einzelnen Legs eines Flugplans hinsichtlich ihrer Personal- und Qualifikationsanforderungen ebenfalls nur verallgemeinert behandelt werden. Obwohl dieser Detailgrad nicht für die Fragestellungen dieser Arbeit ausreicht, wurde für das CPP eine

vollständig mathematische Formulierung erarbeitet, um als Ausgangspunkt für ein detaillierteres Planungsmodell zu dienen. Um neben den Facetten der Problemstellung auch einen Überblick über die Methoden zu dessen Lösung zu gewinnen, wurden weiterhin die gängigsten exakten und heuristischen Lösungsverfahren behandelt.

Auf dieser Grundlage aufbauend wurde im Weiteren mit der Formulierung des Job Pairing Problems ein aufgabengenaue Ansatz zur anonymen Einsatzplanung konzipiert, der explizit die Qualifikationsprofile der Flugdienstmitarbeiter abbildet und diese heterogenen Jobanforderungen einzelner Flight Legs gegenüberstellt. Im Zuge dessen wurde ein im Vergleich zum Crew Pairing Problem detaillierteres mathematisches Optimierungsprogramm definiert, welches um eine Auswahl der zuvor beschriebenen Robustheitsindikatoren erweitert wurde. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die Verminderung von Flugzeugwechseln innerhalb der Personalumläufe, der strengen Einhaltung von minimalen Verbindungszeiten und der generellen Einplanung von möglichst langen Pufferzeiten zwischen einzelnen Flügen, die allesamt der Minimierung vermeidbarer Flugplankosten gegenübergestellt wurden. Neben diesen klassischen Indikatoren wurden darüber hinaus zwei weitere Indikatoren eingebettet, die speziell zum Zwecke der Schonung der Personalressource entworfen wurden und sich indirekt, durch freiwerdende Personalkapazitäten, positiv auf die Flexibilität von Einsatzplänen auswirken. Um den verschiedenen, teilweise gegenläufigen Zielsetzungen gerecht zu werden, wurde die Problemformulierung durch Verwendung eines Gewichtungsverfahrens und der ε -Constraint-Methodik um Elemente der multikriteriellen Optimierung ergänzt. Abschließend wurden für diese Problemstellung zwei spezifisch angepasste heuristische Lösungsverfahren entwickelt. Während das erste auf dem Simulated Annealing-Algorithmus basiert und die sog. ShiftJob-Nachbarschaftsrelation verwendet, beruht das zweite auf einer Abwandlung des Branch-and-Price-Verfahrens, welches durch einen Multilabel-Shortest-Path-Algorithmus komplementiert wird. Im Rahmen einer Validierung konnte für beide Heuristiken deren Nützlichkeit für die Lösung des JPP gezeigt werden.

Um die durch die Optimierung erzeugten individuellen Personaleinsatzpläne auch auf ihre dynamischen Eigenschaften hin untersuchen zu können, wurde sich im Weiteren mit Methoden und Modellen der Simulation beschäftigt. Hierfür wurde zunächst in ausgewählte Grundlagen der Modellierung und Simulation eingeführt, bevor mit SimAir, MEANS und SimOps bestehende Modelle untersucht wurden, die zur Simulation im Umfeld von Flugverkehrssystemen konzipiert wurden. Und obwohl sie in vielen Teilbereichen Modellierungen implementieren, die auch für die Zielsetzungen dieser Arbeit einiges Potential aufweisen, wurden sie nicht primär zur Untersuchung der Störungstoleranz von Personaleinsatzplänen unter Berücksichtigung dynamischer AOC-Recovery-Entscheidungen entwickelt. Da darüber hinaus keines der drei Modelle individuelle Personaleigenschaften und Anforderungsprofile abbildet, wurde der Fokus erweitert und nach personalorientierten Modellen auch außerhalb des Flugverkehrskontextes gesucht. So konnten weitere

für diese Arbeit hilfreiche Modellierungsansätze aus dem Umfeld von Einzelhandels- und Fertigungsbetrieben identifiziert werden. Um die im Rahmen dieser Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse zu strukturieren und hilfreiche Teilansätze hervorzuheben, wurden alle betrachteten Projekte und Studien anhand von sechs Kriterien bewertet, die ein Simulationsmodell erfüllen muss, um zu den in dieser Arbeit gestellten Forschungsfragen beitragen zu können.

Eine Kombination der nützlichen Komponenten als Ausgangspunkt nehmend, wurde daraufhin ein Simulationsmodell vorgestellt, das die operativen Prozesse von Flugpersonal auf individueller Ebene fokussiert und deren Umläufe, Aufgaben, Qualifikationen und Recovery-Prozeduren personengenau abbildet. Für das Modell wurde dabei ein mesoskopischer, dynamisch-stochastischer Simulationsansatz gewählt, dessen Ablauflogik auf der Verarbeitung diskreter Ereignisse basiert. Die Umsetzung des Modells in ein ereignisorientiertes Simulationsprogramm wurde dem objektorientierten Paradigma folgend in Java vorgenommen und umfasst ca. 14.500 Zeilen Quellcode. Das modular gestaltete Programm wird über ein Interface gesteuert, das mit 73 individuell zu belegenden Parametern ein breites Spektrum an inhaltlichen und technischen Einstellungs- und Auswertungsmöglichkeiten bietet. Während einer funktions- und ergebnisbezogenen Validierung konnte gezeigt werden, dass das Programm im Rahmen der operativen Abläufe das gewünschte Verhalten zeigt und auch die Anwendung verschiedener AOC-Recoverystrategien plausibel abbildet. Abschließend wurde es beispielhaft sowohl zur Untersuchung von Robustheitsindikatoren als auch zur Steigerung der Robustheit eines Personaleinsatzplans angewendet. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung von individuellen Anforderungen und Qualifikationen während der Planungsphase sowohl zur Schonung von Personalressourcen als auch zur Verbesserung von On-Time-Performances beiträgt.

8.2 Ausblick

In einem nächsten Schritt sollten die in dieser Arbeit entwickelten Optimierungs- und Simulationsverfahren weiteren Prüfungsmaßnahmen unterzogen werden, um deren Leistungsfähigkeit und Validität noch besser einschätzen zu können. Im Rahmen der Optimierung wäre es ungeachtet des erheblichen Rechenaufwands bspw. sinnvoll, eine größere Instanz des Job Pairing Problems exakt zu lösen, um die Qualität der beiden entwickelten heuristischen Lösungsverfahren weiter absichern zu können. Im Rahmen der Simulation sollte die funktionsbezogene, insbesondere aber auch die ergebnisbezogene Validierung vertieft werden. Im besten Fall würde dies in Kooperation mit einer Fluglinie erfolgen, da zum einen detaillierte Informationen zum Personalbestand und zu dessen Einsatzplanung und zum anderen umfangreichere Datensätze aus dem operativen Flugbetrieb benötigt würden. Die Nutzbarmachung von z.B. SimAir oder SimOps würde darüber hinaus einen modellbasierten Ergebnisvergleich und somit eine theoriebezogene Validierung ermöglichen.

Ist dies geschehen, sollte im Weiteren von der leichten Erweiterbarkeit der erstellten Modelle und Anwendungen profitiert werden. Da vor dem Hintergrund steigender Passagierzahlen und ausgelasteter Hub-Kapazitäten gerade im Bereich der robusten Flugverkehrsgestaltung noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, sollte der multikriterielle Optimierungsansatz um weitere in Abschnitt 4.2.3 beschriebener Robustheitsindikatoren ergänzt werden. Inwiefern Konzepte wie das der Short Cancellation Cycles oder das der Station Purity wirklich zu stabileren bzw. flexibleren Einsatzplänen führen, könnte so beantwortet werden. Der Simulationsansatz hingegen sollte um die bisher noch nicht berücksichtigten Passagierprozesse erweitert werden. Die Einbindung dynamischer Passagierflugmuster und orts- und zeitabhängiger Auslastungszahlen würde die Entscheidungsgrundlage, auf der AOC-Recoverystrategien geplant und umgesetzt werden, um eine entscheidende Komponente bereichern. Überhaupt sollte die Simulation um sämtliche Recoveryoptionen ergänzt werden, über die eine AOC üblicherweise verfügt. Dies würde neben dem Umleiten eigener Flüge, der Bereitstellung alternativer Verkehrsmittel und der Bezahlung von Hotelübernachtungen und anderer Passagierkompensationen auch das Buchen von Kapazitäten konkurrierender Fluglinien beinhalten.

Würde das im Simulationsmodell abgebildete Maßnahmenportfolio dieserart vervollständigt und mit operativen Echtzeitdaten aus dem Flugbetrieb einer Fluglinie gespeist, könnte es im Rahmen einer Onlinesimulation die Entscheidungsfindung einer AOC in einer Störungssituation unterstützen. Diese hätte dann die Möglichkeit, bei bspw. einem Flugzeugausfall, den laufenden realen Betriebstag in Form einer Simulation fortzuführen, um verschiedene Recovery-Maßnahmen und deren Auswirkungen durchzuspielen und die effektivste in Bezug auf Flugplankosten oder Passagierzufriedenheit zu identifizieren.

Eine weitere Entwicklungsmöglichkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungs- und Simulationsmethoden könnte in deren automatisierter Kopplung bestehen. In diesem Zusammenhang haben bspw. Persson et al. oder auch Conrady et al. Architekturdesigns vorgestellt, bei denen ein Modul zur multikriteriellen Optimierung komplexer Ablaufprobleme mit einem Bewertungsmodul, das mittels Simulation die dynamischen Eigenschaften der aktuellen Lösung quantifiziert, zu einem Feedback-Loop zusammengeschaltet werden (vgl. [Pers] S. 1761-1763 und [Ster] S. 343). Ähnlich gehen auch Lee et al. vor, die das SimAir-Programm mit einem Genetischen Algorithmus kombinieren und solange neue Flugplanszenarien erstellen und bewerten, bis ein gewisser Zielerreichungsgrad erfüllt wurde (vgl. [Lee]). Diese Vorgehensweise ließe sich ohne Weiteres auf das Job Pairing Problem und den Ansatz zur Simulation individueller Flugpersonaleinsatzpläne übertragen. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten zur robusten Flugverkehrsgestaltung könnte eine Automatisierung die gleichzeitige Untersuchung vieler verschiedener Planungsindikatoren und deren Wechselwirkungen erheblich erleichtern.

A Glossar der verwendeten Zeitbegriffe

In diesem Glossar werden die in dieser Arbeit verwendeten Zeitbegriffe definiert, erläutert, in Zusammenhang gesetzt und gegeneinander abgegrenzt (in teilw. veränderter Form entnommen aus [Ster] S. 149-150). Bei gleicher Wortbedeutung wird ein Querverweis angegeben. Darüber hinaus werden einige der in der Literatur häufig verwendeten Synonyme angegeben, um diese Arbeit vor deren Hintergrund einordnen zu können. Zum leichteren Verständnis ist diesem Glossar mit Abbildung A.1 eine erklärende Grafik angefügt.

Abflugzeit: (Lit.: Off-Block Time) Zeitpunkt, zu dem ein Flugzeug vom Gate abrollt bzw. die Parkposition verlässt. Die Abflugzeit markiert den Beginn eines Legs.

Ankunftszeit: (Lit.: On-Block Time) Zeitpunkt, zu dem ein Flugzeug seine Parkposition erreicht und evtl. an einem Gate andockt. Die Ankunftszeit markiert das Ende eines Legs.

Arbeitszeit: Siehe ‚Flight Duty Period‘.

Bereitschaftszeit: Die Zeit, in der sich das Personal auf Anordnung des Arbeitgebers bereithält. Diese umfasst Standby-, Airport-Standby- und Reserve12-Einsätze.

Block Time: (Lit.: Flying Time) Gesamte Zeit von dem Zeitpunkt an, zu dem ein Flugzeug mit eigener oder fremder Kraft zum Start abrollt (Abflugzeit), bis zu dem Zeitpunkt, zu dem es am Ende des Fluges zum Stillstand kommt (Ankunftszeit). Wird der Flug im Rahmen des Deadheadings oder des Aircraft Ferryings dazu genutzt, Mitglieder des Personals oder das Flugzeug zu repositionieren, wird die Block Time zumeist als Positionierungszeit, Dead-Head-Time oder Proceeding Time bezeichnet.

Blockzeit: Siehe ‚Block Time‘.

Briefing Time: (Lit.: Briefing Period) Die Zeit, die für das Briefing einer Crew vor ihrer Duty angesetzt wird.

Connecting Time: Die Zeitspanne, die Personen zwischen der Ankunft eines Flight Legs und des Abflugs eines anderen Flight Legs zur Verfügung steht. Die Minimallänge dieser Zeitspanne wird als Minimum Connecting Time (MCT) bezeichnet. Wenn Mitglieder des Personals innerhalb ihrer Duties das Flugzeug wechseln, wird die Connecting Time auch als Swap oder als Rotation Change Time bezeichnet, wobei dann noch entsprechende Vor- und Nachbereitungszeiten mit berücksichtigt werden müssen. Um diesen Unterschied kenntlich zu machen, kann zwischen Crew Connecting Time und Passenger Connecting Time differenziert werden. Separate MCTs für Flugverbindungen mit und ohne Umsteigevorgang sind möglich.

Debriefing Time: (Lit.: Debriefing Period) Die Zeit, die für das Debriefing einer Crew nach ihrer Duty angesetzt wird.

Endzeit: Die Endzeit markiert den Endzeitpunkt einer Duty und/oder eines Pairings.

Flight Duty Period: (Lit.: duty period, elapsed time) Umfasst die Blockzeiten, Zeiten für vor- und nachbereitende Arbeiten, Briefings und Debriefings, Sit und Connecting Times. Insgesamt stellt sie die gesamte Arbeitszeit dar, während der ein Beschäftigter dem Arbeitgeber zur Verfügung steht. Dazu zählen ebenfalls Bereitschafts- und Neutralzeiten. Innerhalb eines Pairings stellt die Flight Duty Period das Komplement zur Ruhezeit dar.

Flugdienstzeit: Siehe ‚Flight Duty Period‘.

Flugzeit: Siehe ‚Block Time‘.

Ground Time: Siehe ‚Turnaround Time‘.

Nachbereitungszeit: Die für die Nachbereitung eines Fluges einzuplanende Zeitspanne direkt nach der Block Time.

Neutralzeit: Als Neutralzeit wird die Arbeitszeit verstanden, bei der Flugpersonal nicht für die Ausführung von Flügen eingesetzt wird. In der Neutralzeit werden anderweitige Aufgaben, wie z.B. theoretische Schulungen, Trainings an Flugsimulatoren etc., durchgeführt.

Positionierungszeit: Siehe ‚Block Time‘.

Pufferzeit bzw. Zeitpuffer: Siehe ‚Sit Time‘.

Rest Period: Siehe ‚Ruhezeit‘.

Ruhezeit: Die Zeit zur Erholung einer Crew zwischen zwei aufeinanderfolgenden Duties innerhalb eines Pairings. Es handelt sich hierbei um eine zusammenhängende Zeitspanne, während der das Besatzungsmitglied von jeglicher Tätigkeit befreit ist. Im Rahmen von Layovern beinhaltet sie zumeist eine Übernachtung in einem Hotel. Die Ruhezeit stellt das Komplement zur Arbeitszeit innerhalb eines Pairings dar.

Service Time: Die Zeit innerhalb eines Pairings, in der die Crew arbeitsbezogenen Tätigkeiten nachgeht. Dies beinhaltet Briefing und Debriefing Times, Vor- und Nachbereitungszeiten, Block Times und Ruhezeiten. Damit ist die Service Time als komplementär zur Sit Time anzusehen.

Sit Time: Die unproduktive Zeit innerhalb eines Pairings, in der das Flugpersonal nicht arbeitsbezogenen Tätigkeiten nachgeht. Die Sit Time ist das Komplement zur Service Time. Aus Sicht der Flugplaner handelt es sich um Pufferzeiten bzw. Zeitpuffer, die sich entweder nicht vermeiden ließen oder gezielt, z.B. zur Förderung der Robustheit, eingeplant wurden.

Startzeit: Die Startzeit markiert den Startzeitpunkt einer Duty und/oder eines Pairings.

Swap Time: Siehe ‚Connecting Time‘.

Time Away From Base (TAFB): Die Zeit vom Beginn bis zum Ende eines Pairings. Die TAFB ist die Summe aus Service Time und Sit Time bzw. der Arbeits- und Ruhezeit eines Pairings.

Turnaroundzeit: (Lit.: Turn Time) Die Zeit, die zwischen der Ankunft und der Abfahrt eines Flugzeuges an einem Gate vergeht. Wird die Sichtweise von Mitarbeitern oder Fluggästen eingenommen, wird sie auch Ground Time genannt. Dann bezieht sie sich auf die gesamte Zeit zwischen zwei Flügen (nicht zwangsweise vom gleichen Flugzeug durchgeführt), die die Personen, z.B. bei Umsteigevorgängen, am Boden verbringen.

Umsteigezeit: Siehe ‚Connecting Time‘.

Vorbereitungszeit: Die für die Vorbereitung eines Fluges einzuplanende Zeitspanne direkt vor der Block Time.

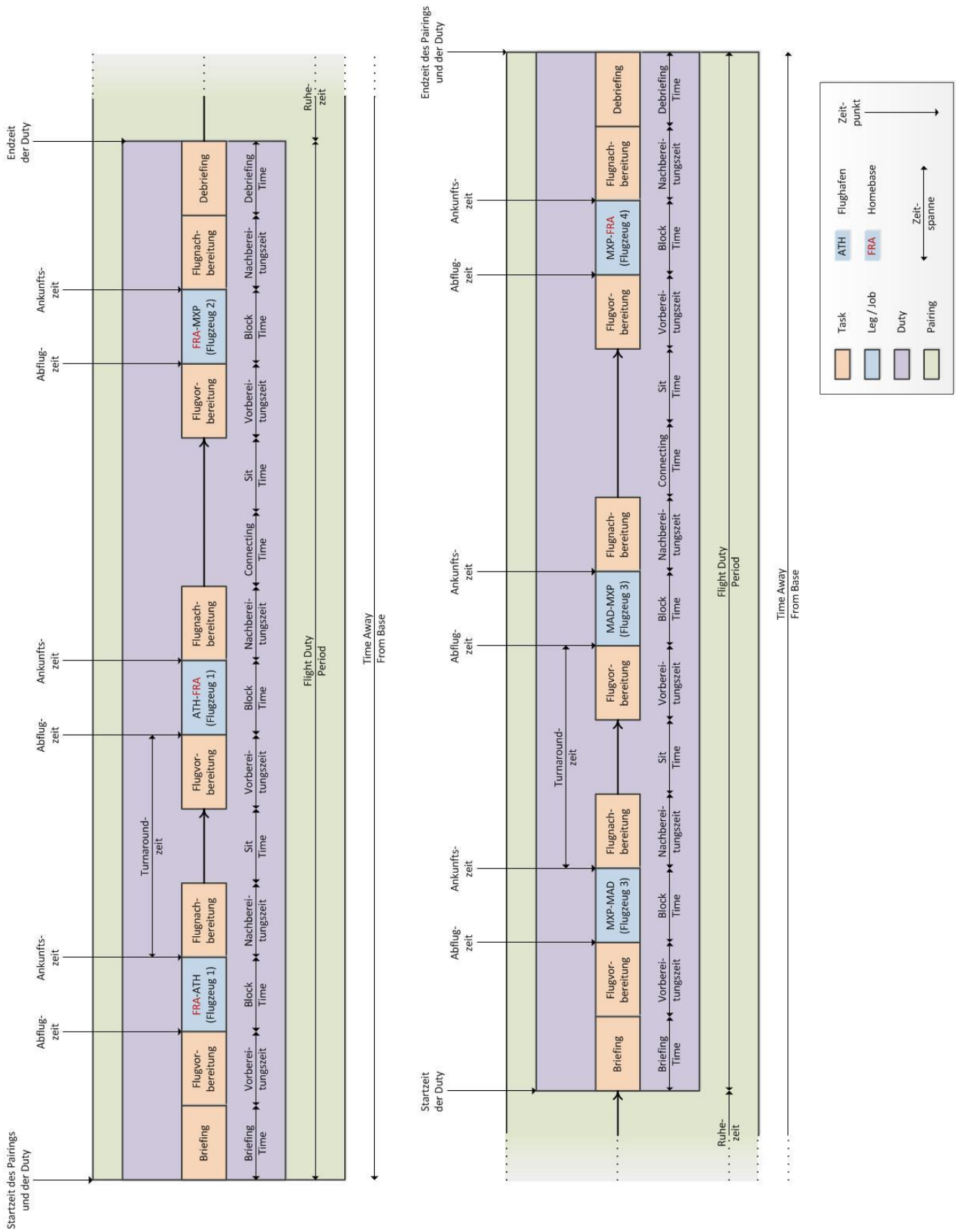


Abbildung A.1: Verwendete Zeitbegriffe im Überblick

B Übersicht über die typische Verteilung von Event-Typ-Häufigkeiten

Event-Typ	Gemessene Häufigkeit
BRIEFING_START	3.353.145
RESTING_TIME_MESSAGE	402.977
RESERVE_START	236.316
PREPARATION_START	93.510
BRIEFING_COMPLETE	36.511
DEBRIEFING_COMPLETE	23.930
STANDING_BY_COMPLETE	23.619
RESERVE_COMPLETE	23.212
LATE_APPEARANCE_MESSAGE	19.163
ARRIVAL	18.674
BRIEFING_TIME_MESSAGE	13.479
FLYING_TIME_MESSAGE	8.834
DEBRIEFING_TIME_MESSAGE	4.898
STANDING_BY_START	3.376
PREPARATION_COMPLETE	3.004
TRANSFER_COMPLETE	2.259
DEPARTURE	2.026
MAINTENANCE_COMPLETE	1.967
PREPARATION_TIME_MESSAGE	1.444
CREW_BOARDING_START	1.421
SICK_REPORT_MESSAGE	1.375
TRANSFER_TIME_MESSAGE	1.086
PAX_BOARDING_TIME_MESSAGE	995
PAX_DEBOARDING_COMPLETE	967
POSTPROCESSING_COMPLETE	949
CREW_DEBOARDING_COMPLETE	948
PAX_BOARDING_START	827
PAX_DEBOARDING_TIME_MESSAGE	499
CREW_DEBOARDING_TIME_MESSAGE	469
CREW_BOARDING_TIME_MESSAGE	446
POSTPROCESSING_TIME_MESSAGE	438
MAINTENANCE_TIME_MESSAGE	438
SIMULATION_COMPLETE	179
SIMULATION_START	0

Tabelle B.1: Übersicht über die typische Verteilung von Event-Typ-Häufigkeiten innerhalb von Simulationsläufen
(bei stündlicher Event-Queue-Betrachtung)

C Auflistung der in Kapitel 7.4.1 verwendeten Indiktorausprägungen

Gewichtungs-kombination	Excessive Cost	Buffer Violation	Rotation Change	Prim Config	Aux Config	Crewbase Violation
A	25,232%	0,038%	0,275%	0,781%	0,361%	29,678%
B	25,020%	0,001%	0,259%	0,990%	0,403%	29,356%
C	24,830%	0,000%	0,357%	1,160%	0,435%	28,796%
D	24,185%	0,000%	0,452%	1,624%	0,509%	28,244%
E	26,532%	0,000%	4,545%	28,846%	0,598%	33,218%
F	24,690%	0,068%	5,240%	0,771%	0,380%	28,790%
G	25,040%	0,000%	0,036%	1,034%	0,393%	29,498%
H	24,936%	0,000%	0,000%	1,201%	0,433%	28,844%
I	24,265%	0,000%	0,004%	1,795%	0,510%	28,175%
J	26,291%	0,000%	0,000%	28,354%	0,678%	32,775%
K	24,636%	0,001%	0,215%	22,803%	0,533%	24,506%
L	25,405%	0,004%	0,296%	0,465%	0,367%	29,622%
M	25,642%	0,007%	0,292%	0,158%	0,368%	29,504%
N	25,370%	0,008%	0,354%	0,116%	0,418%	28,933%
O	25,600%	0,314%	4,402%	0,062%	1,009%	33,427%
P	24,996%	0,004%	0,273%	0,800%	0,962%	29,684%
Q	25,125%	0,003%	0,273%	0,922%	0,346%	29,508%
R	25,339%	0,005%	0,304%	1,111%	0,112%	29,121%
S	25,606%	0,007%	0,421%	1,621%	0,005%	28,643%
T	26,903%	0,401%	5,088%	29,442%	0,002%	33,527%

Tabelle C.1: Auflistung der in Kapitel 7.4.1 durch Optimierung erzielten und im Rahmen der Simulation verwendeten Indiktorausprägungen

D Literaturverzeichnis

- [Agee] AGEEVA, Y. V.; CLARKE, J.-P.: *Approaches to Incorporating Robustness into Airline Scheduling*. Report-Nr. ICAT-2000-8, MIT International Center for Air Transportation, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [Apa2] *Apache POI – Download Release Artifacts*. URL: <https://poi.apache.org/download.html>, Abruf: 28.11.2016.
- [Apac] *Apache Friends: Download*. URL: <https://www.apachefriends.org/de/download.html>, Abruf: 15.11.2014.
- [Air1] *Airbus: Aircraft Families*. URL: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/>, Abruf: 13.10.2015.
- [Air2] *Airbus: Airbus Aircraft 2015 Average List Prices*. URL: <http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/new-airbus-aircraft-list-prices-for-2015/>, Abruf: 13.10.2015.
- [Air3] *Air Berlin: Die Flotte*. URL: <http://ir.airberlin.com/de/ir/fakten-zur-gruppe/die-flotte>, Abruf: 24.06.2016.
- [Airb] *Geschäftsbericht 2014*. Air Berlin PLC, 2014.
- [Arab] ARABEYRE, J. P.; FEARNLEY, J.; STEIGER, F. C.; TEATHER, W.: The Airline Crew Scheduling Problem: A Survey. In: *Transportation Science*, Bd. 3, Nr. 2, 1969, S. 140-163.
- [Airl] *Airline Route Maps*. URL: <http://www.airlineroutemaps.com/>, Abruf: 16.04.2014.
- [Bank] BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M.: *Discrete-event system simulation*. Pearson, 1984.
- [Barn] BARNHART, C.; SMITH, B.: *Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*. 4. Aufl., Springer, 2012.
- [Bian] BIAN, F.; BURKE, E.; JAIN, S.; KENDALL, G.: Making airline schedules more robust. In: *Proceedings of the first Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications*, MISTA, 2003, S. 678-695.
- [Birt] BIRTA, L. G.; ARBEZ, G.: *Modelling and Simulation – Exploring Dynamic System Behaviour*. Springer, London, 2007.
- [Boei] *Boeing: Prices*. URL: <http://www.boeing.com/company/about-bca/>, Abruf: 13.10.2015.
- [Bogu] BOGUS, T.: Planung effektiver Arbeits- und Pausenzeitregelungen mit Hilfe der personalorientierten Simulation. In: HEEL, J.; KRÜGER, J. (Hrsg.): *Personalorientierte Simulation – Praxis und Entwicklungspotential*, Shaker, Aachen, 1999, S. 97-112.
- [Born] BORNDÖRFER, R.; SCHELTEN, U.; SCHLECHTE, T.; WEIDER, S.: *A Column Generation Approach to Airline Crew Scheduling*. Report-Nr. 05-37, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, 2005.
- [Capr] CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; GUIDA, P. L.; TOTH, P.; VIGO, D.: Solution of Large-Scale Railway Crew Planning Problems: The Italian Experience. In: WILSON, N. H. M. (Hrsg.): *Computer-aided transit scheduling*, Springer, Berlin/Heidelberg, 1999, S. 1-18.
- [Clar] CLARKE, J. P.; MELCONIAN, T.; BLY, E.; RABBANI, F.: MEANS – MIT Extensible Air Network Simulation. In: *Simulation*, Bd. 83, Nr. 5, 2007, S. 385-399.
- [Clau] CLAUSEN, J.; LARSEN, A.; LARSEN, J.; REZANOVA, N. J.: Disruption management in the airline industry - Concepts, models and methods. In: *Computers & Operations Research*, Bd. 37, Nr. 5, 2010, S. 809-821.

- [Cohn] COHN, A. M.; BARNHART, C.: Improving crew scheduling by incorporating key maintenance routing decisions. In: *Operations Research*, Bd. 51, Nr. 3, 2003, S. 387-396.
- [Conr] CONRADY, R.; FICHERT, F.; STERZENBACH, R.: *Luftverkehr – Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. 5. Aufl., Oldenbourg, München, 2013.
- [Cord] CORDEAU, J. F.; STOJKOVIC, G.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.: Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. In: *Transportation Science*, Bd. 35, Nr. 4, 2001, S. 375-388.
- [Doer] DOERNER, K.; KOTSIS, G.; STAUSS, C: Rosterbuilder: An Architecture for Airline Rostering. In: *Information Technology & Tourism*, Bd. 6, Nr. 1, 2003, S. 69-83.
- [Dreo] DREO, A.; PETROWSKI, J.; SIARRY, P.; TAILLARD, E.: *Metaheuristics for Hard Optimization – Methods and Case Studies*. Springer, 2006.
- [Dück] DÜCK, V.; IONESCU, L.; KLIEWER, N.; SUHL, L.: Increasing stability of crew and aircraft schedules. In: *Transportation Research Part C*, Bd. 20, Nr. 1, 2011, S. 47-61.
- [Dud2] *Duden*. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Robustheit>, Abruf: 01.12.2015.
- [Dude] *Duden*. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Purser>, Abruf: 09.11.2015.
- [Eber] EBERTS, M.: Zu Hause auf der 747-8. In: Vorstand Lufthansa Passage (Hrsg.): *Lufthansa Passage – Das Mitarbeiter-Magazin*, Nr. 6, 2011, S. 66, 67.
- [Ehrg] EHRGOTT, M.; RYAN, D. M.: Constructing Robust Crew Schedules with Bicriteria Optimization. In: *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Bd. 11, Nr. 3, 2002, S. 139-150.
- [Ehrh] EHRHARDT, I.; MÜLLER, B. H.; GEBHARDT, H.: Personalintegration und Personalorientierung in der rechnergestützten Arbeitsvorbereitung. In: HEEL, J.; KRÜGER, J. (Hrsg.): *Personalorientierte Simulation – Praxis und Entwicklungspotential*, Aachen, 1999, S. 87-96.
- [Elma] ELMASRI, R. A.; NAVATHE, S. B.: *Grundlagen von Datenbanksystemen – Bachelorausgabe*. 3. Aufl., Pearson, München, 2009.
- [Emde] EMDEN-WEINERT, T.; PROKSCH, M.: Best Practice Simulated Annealing for the Airline Crew Scheduling Problem. In: *Journal of Heuristics*, Bd. 5, Nr. 4, 1999, S. 419-436.
- [Eur2] *CODA Digest – Delays to Air Transport in Europe - Annual 2011*. European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), Central Office for Delay Analysis (CODA), 2012.
- [Euro] The Commission of the European Communities: Commission Regulation (EC) No 859/2008. In: *Official Journal of the European Union*, Bd. L254, 2008, S. 1-238.
- [Eva2] EVANS, G. W.; TESHAM B. G.; UNGER, E.: A simulation model for evaluating personnel schedules in a hospital emergency department. In: *Proceedings of the 28th Winter Simulation Conference*, IEEE Computer Society, 1996, S. 1205-1209.
- [Evan] EVANS, G. W.; STUCKMAN, B.; MOLLAGHASEMI, M.: Multicriteria Optimization of Simulation Models. In: *Proceedings of the 23rd Winter Simulation Conference*, IEEE Computer Society, 1991, S. 894-900.
- [Faze] *Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation: Auswirkungen flexibler Arbeitszeitmodelle auf den Personaleinsatz und die Belastung des Personals – FAZEM*. URL: <http://www.fazem.de/fazem.htm>, Abruf: 21.10.2016.
- [Fli1] *2011 Year-end Report on Airport and Airline On-time Performance*. FlightStats Conducive Technology Corp., 2012, S. 1-8.
- [Fli2] *2012 Year-end Report on Airport and Airline On-time Performance*. FlightStats, Inc., 2013, S. 1-9.

- [Fli3] *Airline and Airport On-time Performance Report – Summary of Airline Arrivals and Airport Departures for the period January 1, 2013 through January 31, 2013*. FlightStats, Inc., 2013, S. 1-40.
- [Flug] *Flugbegleiter.net: Ablauf des Standby bei Lufthansa*. URL: <http://www.flugbegleiter.net/Dienstplane/LH-Standby.html>, Abruf: 05.11.2015.
- [Fuhr] FUHR, B.: *Robuste Flugplanung mittels stochastischer Modellierung*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2007.
- [Fuji] FUJIMOTO, R. M.: *Parallel and distributed simulation systems*. Wiley, New York, 2000.
- [Gaff] GAFFI, A.; NONATO, M.: An Integrated Approach to Extra-Urban Crew and Vehicle Scheduling. In: WILSON, N. H. M. (Hrsg.): *Computer-aided transit scheduling*, Springer, Berlin/Heidelberg, 1999, S. 103-128.
- [Gao] GAO, C.; JOHNSON, E.; SMITH, B.: Integrated Airline Fleet and Crew Robust Planning. In: *Transportation Science*, Bd. 43, Nr. 1, 2009, S. 2-16.
- [Gebh] GEBHARD, M.: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*. 1. Aufl., Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [Gopa] GOPALAKRISHNAN, B.; JOHNSON, E. L.: Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art. In: *Annals of Operations Research*, Bd. 140, Nr. 1, 2005, S. 305-337.
- [Grav] GRAVES, G. W.; MCBRIDE, R. D.; GERSHKOFF, I.; ANDERSON, D.; MAHIDHARA, D.: Flight Crew Scheduling. In: *Management Science*, Bd. 39, Nr. 6, 1993, S. 736-745.
- [Grot] GROTHKLAGS, S.: *Flottenzuweisung in der Flugplanung – Modelle, Komplexität und Lösungsverfahren*. Dissertation, Universität Paderborn, 2006.
- [Grün] GRÜNERT, T.; IRNICH, S.: *Optimierung im Transport – Band I: Grundlagen*. 1. Aufl., Shaker, 2005.
- [Guro] *Gurobi Optimizer – Der Löser für die mathematische Programmierung auf dem neusten Stand der Technik*. URL: <http://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer>, Abruf: 13.06.2016.
- [IBM] *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio – Toolkit zur Entwicklung von Optimierungsmodellen für die mathematische und Constraintprogrammierung*. URL: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ibmilogcpleoptistud>, Abruf: 13.06.2016.
- [Jägg] JÄGGI, F.: *Gestaltungsempfehlungen für Hub-and-Spoke-Netzwerke im europäischen Luftverkehr – Ein ressourcenbasierter Ansatz*. Dissertation, Universität St. Gallen, 2000.
- [John] JOHNSON, D. B.: Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks. In: *Journal of the Association for Computing Machinery*, Bd. 24, Nr. 1, 1977, S. 1-13.
- [Jüt2] JÜTTE, S.; MÜLLER, D.; THONEMANN, U. W.: Optimizing railway crew schedules with fairness preferences. In: *Journal of Scheduling*, Bd. 20, Nr. 1, 2017, S. 43-55.
- [Jütt] JÜTTE, S.; ALBERS, M.; THONEMANN, U. W.; HAASE, K.: Optimizing Railway Crew Scheduling at DB Schenker. In: *Interfaces*, Bd. 41, Nr. 2, 2011, S. 109-122.
- [Kaup] KAUPP, M.; PAULY, M.; PIBERNIK, R.: Simulationsgestützte Besetzungseinsatzplanung einer Luftverkehrsgesellschaft. In: KAUPP, M. (Hrsg.): *Simulation im Luftverkehr – Analyse, Modellierung, Implementierung, Ergebnisse*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1996, S. 111-211.
- [Kang] KANG, L. S.: *Degradable airline scheduling: an approach to improve operational robustness and differentiate service quality*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [Klab] KLABJAN, D.: Large-scale models in the airline industry. In: *Column generation*, Springer, 2005, S. 163-195.
- [Köni] KÖNIG, J.; STRAUSS, C.: Supplements in Airline Cabin Service. In: FESENMAIER, D.

- R.; KLEIN, S.; BUHALIS, D. (Hrsg.): *Information and Communication Technologies in Tourism 2000: Proceedings of the International Conference in Barcelona, Spain, 2000*. Springer, Wien, 2000, S. 365-374.
- [Kuc2] KUCKERTZ, P.: Current work on the optimization of flight personnel schedules within project DOGS. In: *Proceedings of Sommertreffen Verkehrssimulation 2012*, ASIM-Mitteilung AM 143, ARGESIM/ASIM Pub., TU Vienna/Austria, 2012, S. 19-22.
- [Kuc3] KUCKERTZ, P.; RANDERATH, H.: A model for airline personnel schedule simulation. In: *Proceedings of ASIM-Workshop STS/GMMS 2014*, ARGESIM Report 42, ASIM-Mitteilung AM 149, ARGESIM/ASIM Pub., TU Vienna/Austria, 2014, S. 171-180.
- [Kuck] KUCKERTZ, P.; ULLRICH, O.; RANDERATH, H.: A Simulation-based Approach on Robust Airline Job Pairing. In: *Simulation Notes Europe (SNE)*, Bd. 22, Nr. 2, 2012, S. 77-82.
- [Kwan] KWAN, A. S. K.; KWAN, R. S. K.; PARKER, M. E.; WREN, A.: Producing Train Driver Schedules under Differing Operating Strategies. In: WILSON, N. H. M. (Hrsg.): *Computer-aided transit scheduling*, Springer, Berlin/Heidelberg, 1999, S. 129-154.
- [Lavo] LAVOIE, S.; MINOUX, M.; ODIER, E.: A new approach for crew pairing problems by column generation with an application to air transportation. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 35, Nr. 1, 1988, S. 45-58.
- [Lee] LEE, L. H.; LEE, C. U.; TAN, Y. P.: A multi-objective genetic algorithm for robust flight scheduling using simulation. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 177, Nr. 3, 2007, S. 1948-1968.
- [Lee2] LEE, L. H.; HUANG, H. C.; LEE, C. et al.: Discrete event simulation model for airline operations: SIMAIR. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, Bd. 2, 2003, S. 1656-1662.
- [Lieb] LIEBL, F.: *Simulation: Problemorientierte Einführung*. 2. Aufl., Oldenbourg, München/Wien, 1995.
- [List] LISTES, O.; DEKKER, R.: A Scenario Aggregation-Based Approach for Determining a Robust Airline Fleet Composition for Dynamic Capacity Allocation. In: *Transportation Science*, Bd. 39, Nr. 3, 2005, S. 367-382.
- [Liu] LIU, Y.; TAKAKUWA, S.: Simulation-based personnel planning for materials handling at a cross-docking center under retail distribution environment. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 2009, S. 2414-2425.
- [Luf1] *Lufthansa Group: Investor Relations – Flotte*. URL: <http://investor-relations.lufthansagroup.com/de/fakten-zum-unternehmen/flotte.html>, Abruf: 13.10.2015.
- [Luf2] *Lufthansa: Cockpit Careers – Arbeitsalltag*. URL: <http://www.lufthansa-pilot.de/karriere/arbeitenleben/arbeitsalltag/arbeitsalltag.php>, Abruf: 09.11.2015.
- [Luf3] *Lufthansa: Sitzpläne Airbus A380-800*. URL: http://www.lufthansa.com/de/de/Sitzplaene_A380, Abruf: 23.06.2016.
- [Luf4] *Lufthansa Group: Unternehmen – Traumberuf Pilot*. URL: <http://www.lufthansagroup.com/de/unternehmen/themen/piloten-bei-lufthansa/traumberuf-pilot/briefing.html>, Abruf: 19.03.2017.
- [Luft] *Lufthansa Group: Unternehmen – Unternehmensprofil*. URL: <http://www.lufthansagroup.com/de/unternehmen/unternehmen/unternehmensprofil.html>, Abruf: 13.10.2015.
- [Lunz] LUNZE, G.: Verifizierung von Management-Entscheidungen im Personalwesen durch Simulation. In: HEEL, J.; KRÜGER, J. (Hrsg.): *Personalorientierte Simulation – Praxis und Entwicklungspotential*, Shaker, Aachen, 1999, S. 31-42.
- [Lüc1] LÜCKERATH, D.: *Ein Simulationsmodell für Öffentlichen Personennahverkehr mit*

- regelbasiertem Verkehrsmanagement*. Dissertation, Universität zu Köln, 2017.
- [Lüc2] LÜCKEMEYER, G.: *A Traffic Simulation System Increasing the Efficiency of Schedule Design for Public Transport Systems Based on Scarce Data*. Dissertation, Universität zu Köln, Shaker, Aachen, 2007.
- [Malc] MALCHEREK, D.: *Ein modulares Column Generation Framework zur effizienten Entwicklung von Crew Scheduling Software – Konzeption – Design – Anwendungen*. Dissertation, Universität zu Köln, Shaker, Aachen, 2010.
- [Maur] MAURER, P.: *Luftverkehrsmanagement – Basiswissen*. 2. Aufl., Oldenbourg, 2002.
- [März] MÄRZ, L.; WINTERER, T.; MAYRHOFER, W.; SIHN, W.: Integrierte Programm- und Personaleinsatzplanung sequenzierter Produktionslinien. In: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2011, S. 133-150.
- [Merc] MERCIER, A.; CORDEAU, J.-F.; SOUMIS, F.: A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem. In: *Computers & Operations Research*, Bd. 32, Nr. 6, 2005, S. 1451-1476.
- [Metr] METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER A. H.: Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. In: *The Journal of Chemical Physics*, Bd. 21, Nr. 6, 1953, S. 1087-1092.
- [Mute] MUTER, İ.; BIRBİL, Ş. İ.; BÜLBÜL, K.; ŞAHİN, G.; YENİGÜN, H.; TAŞ, D.; TÜZÜN, D.: Solving a robust airline crew pairing problem with column generation. In: *Computers & Operations Research*, Bd. 40, Nr. 3, 2013, S. 815-830.
- [Müll] MÜLLER, C.; KOC, E.; MOUELHI, M.; ÖZGÜR, Ç.; NOCHE, B.: Einsatz der Simulation zur Evaluation von Personaleinsatzplanungsergebnissen. In: DANGELMAIER, W.; LAROQUE, C.; KLAAS, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2013, S. 325-336.
- [Nolt] NOLTEMEIER, A.: *Modelle und Lösungsverfahren zur Generierung von Flugplänen*. Shaker, 2001.
- [Ope2] *Open Data Commons: Open Database License*. URL: <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/>, Abruf: 20.06.2014.
- [Open] *OpenFlights.org: Airport, airline and route data*. URL: openflights.org/data.html, Abruf: 24.06.2016.
- [Pers] PERSSON, A.; GRIMM, H.; NG, A.; LEZAMA, T. et al.: Simulation-Based Multi-Objective Optimization of a Real-World Scheduling Problem. In: *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, S. 1757-1764.
- [Pomp] POMPL, W.: *Luftverkehr – Eine ökonomische und politische Einführung*. 5. Aufl., Springer, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [ProF] *ProFlight – Bewegend real: Flugsimulatoren der Airline-Piloten*. URL: <https://www.proflight.com/de/flugsimulator/>, Abruf: 07.10.2016.
- [Rath] RATHERT, J.: *Branch-and-Price Verfahren für das Crew-Scheduling Problem*. Diplomarbeit, Universität zu Köln, 1998.
- [Ros3] ROSE, O.; MAJOHR, M. F.; ANGELIDIS, E.; PAPPERT, F. S.; NOACK, D.: Personaleinsatz- und Ablaufplanung für komplexe Montagelinien mit MARTA 2. In: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2011, S. 93-104.
- [Ros2] ROSENBERGER, J. M.; JOHNSON, E. L.; NEMHAUSER, G. L.: A Robust Fleet-Assignment Model with Hub Isolation and Short Cycles. In: *Transportation Science*, Bd. 38, Nr. 3, 2004, S. 357-368.
- [Rose] ROSENBERGER, J. M.; SCHAEFER, A. J.; GOLDSMAN, D.; JOHNSON, E. L.;

- KLEYWEGT, A. J.; NEMHAUSER, G. L.: A Stochastic Model of Airline Operations. In: *Transportation Science*, Bd. 36, Nr. 4, 2002, S. 357-377.
- [Ruth] RUTHER, S.; BOLAND, N.; ENGINEER, F. G.: Integrated aircraft routing, crew pairing, and tail assignment: branch-and-price with many pricing problems. In: *Transportation Science*, Bd. 51, Nr. 1, 2017, S. 177-195.
- [Rya2] RYAN, D. M.: The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Aircrew Rostering. In: *The Journal of the Operational Research Society*, Bd. 43, Nr. 5, 1992, S. 459-467.
- [Ryan] RYAN, D. M.; FOSTER, B. A.: An Integer Programming Approach to Scheduling. In: *Computer Scheduling of Public Transport*, North-Holland Publishing Company, 1981, S. 269-280.
- [Sadd] SADDOUNE, M.; DESAULNIERS, G.; ELHALLAOUI, I.; SOUMIS, F.: Integrated airline crew scheduling: A bi-dynamic constraint aggregation method using neighborhoods. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 212, Nr. 3, 2011, S. 445-454.
- [Sand] SANDHU, R.; KLABJAN, D.: Integrated Airline Fleeting and Crew-Pairing Decisions. In: *Operations Research*, Bd. 55, Nr. 3, 2007, S. 439-456.
- [Schä] SCHÄFER, M. S.: *Passenger Railway Crew Scheduling – Models, Methods, and Applications*. Dissertation, Universität zu Köln, Shaker, Aachen 2011.
- [Scha] SCHAEFER, A. J.; JOHNSON, E. L.; KLEYWEGT, A. J.; NEMHAUSER, G. L.: Airline Crew Scheduling Under Uncertainty. In: *Transportation Science*, Bd. 39, Nr. 3, 2005, S. 340-348.
- [Schl] SCHLEGEL, A.: *Bodenabfertigungsprozesse im Luftverkehr – Eine statistische Analyse am Beispiel der Deutschen Lufthansa AG am Flughafen Frankfurt/Main*. 1. Aufl., Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [Scho] SCHOLL, A.: *Robuste Planung und Optimierung*. Physica, Heidelberg, 2001.
- [Sheb] SHEBALOV, S.; KLABJAN, D.: Robust Airline Crew Pairing: Move-up Crews. In: *Transportation Science*, Bd. 40, Nr. 3, 2006, S. 300-312.
- [SimA] *SimAir: A Simulation of Airline Operations*. URL: <https://www.ise.nus.edu.sg/project/simair/index.html>, Abruf: 25.09.2016.
- [Smit] SMITH, B. C.; JOHNSON, E. L.: Robust Airline Fleet Assignment: Imposing Station Purity Using Station Decomposition. In: *Transportation Science*, Bd. 40, Nr. 4, 2006, S. 497-516.
- [Soh2] SOHONI, M. G.; JOHNSON, E. L.; BAILEY, T. G.: Long-Range Reserve Crew Manpower Planning. In: *Management Science*, Bd. 50, Nr. 6, 2004, S. 724-739.
- [Soho] SOHONI, M. G.; JOHNSON, E. L.; BAILEY, T. G.: Operational airline reserve crew planning. In: *Journal of Scheduling*, Bd. 9, Nr. 3, Springer, 2006, S. 203-221.
- [Sour] *A Java library for reading/writing Excel*. URL: <https://sourceforge.net/projects/jexcelapi/files/jexcelapi/>, Abruf: 28.11.2016.
- [TheA] *The Air DB*. URL: theairdb.com/index.html, Abruf: 16.04.2014.
- [Vanc] VANCE, P. H.; ATAMTÜRK, A.; BARNHART, C. et al.: A Heuristic Branch-and-Price Approach for the Airline Crew Pairing Problem. Report-Nr. TLI/LEC-97-06, Georgia Institute of Technology, 1997.
- [Vien] *Geschäftsbericht 2010*. Vienna International Airport, 2010.
- [Weid] WEIDE, O.; RYAN, D.; EHRGOTT, M.: An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. In: *Computers & Operations Research*, Bd. 37, Nr. 5, 2010, S. 833-844.
- [Weiß] WEIß, N.: Warum Marc nicht nach Dallas kam. In: Vorstand Lufthansa Passage (Hrsg.): *Lufthansa Passage – Das Mitarbeiter-Magazin*, Nr. 6, 2011, S. 70-72.

- [Wren] WREN, A.; GUALDA, N. D. F.: Integrated Scheduling of Buses and Drivers. In: WILSON, N. H. M. (Hrsg.): *Computer-aided transit scheduling*, Springer, Berlin/Heidelberg, 1999, S. 155-176.
- [Wu] WU, C.-L.: *Airline operations and delay management: insights from airline economics, networks and strategic schedule planning*. Ashgate Publishing, 2010.
- [Zülc] ZÜLCH, G.; STOWASSER, S.; BOGUS, T.: Arbeitszeitflexibilisierung im Einzelhandel. In: KNAUTH, P.; ZÜLCH, G. (Hrsg.): *Innovatives Arbeitszeitmanagement*, Shaker, Aachen, 2000, S. 113-136.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbstständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit - einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen -, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie - abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen - noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen dieser Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. Hubert Randerath betreut worden.

(Patrick Kuckertz)

- KUCKERTZ, P.; RANDERATH, H.: A model for airline personnel schedule simulation. In: *Proceedings of ASIM-Workshop STS/GMMS 2014*, ARGESIM Report 42, ASIM-Mitteilung AM 149, ARGESIM/ASIM Pub., TU Vienna/Austria, 2014, S. 171-180.
- KUCKERTZ, P.: Current work on the optimization of flight personnel schedules within project DOGS. In: *Proceedings of Sommertreffen Verkehrssimulation 2012*, ASIM-Mitteilung AM 143, ARGESIM/ASIM Pub., TU Vienna/Austria, 2012, S. 19-22.
- KUCKERTZ, P.; ULLRICH, O.; RANDERATH, H.: A Simulation-based Approach on Robust Airline Job Pairing. In: *Simulation Notes Europe (SNE)*, Bd. 22, Nr. 2, 2012, S. 77-82.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Patrick Kuckertz

Geburtsdatum/ -ort: 21. Juli 1981 in Frechen

Bisherige berufliche Tätigkeiten

Seit 04/2017 **Institut für elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) der
Forschungszentrum Jülich GmbH**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

03/2011 – 02/2016 **Institut für Informatik der Universität zu Köln**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

05/2011 – 07/2013 **Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik der
Technischen Hochschule Köln**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

10/2010 – 12/2010 **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Leipzig**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

07/2005 – 08/2010 **Zentrum für Angewandte Informatik der Universität zu Köln**
Studentische Hilfskraft

07/2003 – 02/2004 **CSC Ploenzke AG, Köln**
Junior Professional

Studium – Schulbildung

- 03/2011 – 01/2018 **Universität zu Köln**
Promotionsstudium im Bereich Informatik
- 04/2004 – 09/2010 **Universität zu Köln**
Studium der Wirtschaftsinformatik: Abschluss mit Diplom
- 09/2001 – 06/2003 **CSC Ploenzke AG, Köln / Friedrich Ebert Berufsschule, Wiesbaden**
Duale Ausbildung zum Fachinformatiker Anwendungsentwicklung
- 08/1992 – 06/2001 **Gymnasium der Stadt Frechen**
Erlangung der Hochschulreife