

Karsten Leibold

Optimierung von Flugplänen

Anwendung quantitativer Methoden
im Luftverkehr

Mit einem Geleitwort
von Prof. Dr. Dietrich Ohse

Deutscher Universitäts-Verlag

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	vii
Vorwort	ix
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxi
Abkürzungsverzeichnis	xxv
Symbolverzeichnis	xxix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Flugplanoptimierung als OR-Problem	3
1.3 Gang der Untersuchung	4
1.4 Glossar der wichtigsten Luftverkehrsbegriffe	5
2 Luftverkehr – eine Einführung	9
2.1 Grundlagen des Linienluftverkehrs	9
2.1.1 Charakteristik und Besonderheiten des Linienluftverkehrs	9
2.1.2 Staatliche Eingriffe in den Zivilluftverkehr	12
2.1.2.1 Die Regulierung des Luftverkehrs in den USA	12
2.1.2.2 Marktordnung in Europa vor der Liberalisierung	13
2.1.3 Die Deregulierung des zivilen Luftverkehrs	14
2.1.3.1 Deregulierung in den USA	14
2.1.3.2 Liberalisierung in Europa	14
2.1.4 Auswirkung der neuen Marktordnung	15
2.1.4.1 Hub and Spoke-Netzwerke	15
2.1.4.2 Fusionen, Beteiligungen und Kooperationsverträge	17
2.1.4.2.1 Historischer Rückblick	17
2.1.4.2.2 Strategische Allianzen im Luftverkehr	20
2.1.4.2.3 Ausbau der Marktposition durch Kooperation	22

2.1.4.3	Kapazitätsengpässe bei der Bereitstellung der Infrastruktur	22
2.1.5	Entwicklung des Weltlinienluftverkehrs	23
2.2	Grundlagen eines modernen Netzmanagements	26
2.2.1	Netzwerke im Luftverkehr	26
2.2.1.1	Netzwerkstrukturen	26
2.2.1.2	Netzmanagement	27
2.2.1.2.1	Einführung und allgemeine Charakteristik	27
2.2.1.2.2	Marktsicht versus Produktsicht	29
2.2.1.2.3	Verbindungsqualität	30
3	Operations Research im Luftverkehr	37
3.1	Einführung	37
3.2	Optimierung von Streckennetzwerken	39
3.2.1	Gegenstand der Optimierung	39
3.2.2	Phasen der Flugplanentwicklung	40
3.2.3	Formale Modellformulierung	46
3.2.3.1	Luftverkehrsnetze im Rahmen der Graphentheorie	46
3.2.3.2	Bestimmung sinnvoller O&D's	47
3.2.3.3	Slotzuordnung	50
3.2.3.3.1	Abgrenzung der relevanten Parameter und Variablen	50
3.2.3.3.2	Modellierung der Nebenbedingungen . .	52
3.2.3.4	Zielfunktion	54
4	Potentielle Lösungsverfahren	59
4.1	Mögliche Ansätze – ein Überblick	59
4.2	Exakte Lösungsverfahren	61
4.2.1	Schnittebenenverfahren	61
4.2.2	Entscheidungsbaumverfahren	62
4.3	Klassische Heuristiken	64
4.3.1	Vorstellung potentieller Ansätze	64
4.3.2	Exkurs: Skizzierung einer problemspezifischen Heuristik zur Huboptimierung	67
4.4	Meta-Heuristiken	68
4.4.1	Vorbemerkungen	68
4.4.2	Local Search-Verfahren	69
4.4.3	Tabu-Suche	71
4.4.3.1	Einführung	71
4.4.3.2	Mathematische Beschreibung der Tabu-Suche . .	72
4.4.3.3	Erweiterungen	74
4.4.3.3.1	Aspirationskriterium	74

4.4.3.3.2	Intensivierungs- und Diversifikationsstrategie	75
4.4.3.4	Feinabstimmung der Tabu-Suche	76
4.4.3.4.1	Vorbemerkung	76
4.4.3.4.2	Taktische Feinabstimmung	76
4.4.3.4.3	Technische Feinabstimmung	78
4.4.3.4.4	Feinabstimmung der Implementierung	79
4.4.4	Simulated Annealing	79
4.4.4.1	Einführung	79
4.4.4.2	Mathematische Beschreibung des SA-Ansatzes	81
4.4.4.3	Feinabstimmung des Simulated Annealing-Algorithmus	84
4.4.4.3.1	Vorbemerkung	84
4.4.4.3.2	Starttemperatur	85
4.4.4.3.3	Abkühlungsfunktion	86
4.4.4.3.4	Länge der Markov-Ketten	87
4.4.4.3.5	Abbruchkriterium	87
4.4.5	Genetische Algorithmen	88
4.4.5.1	Einführung	88
4.4.5.2	Grundlagen der Evolutionstheorie und der Genetik	89
4.4.5.3	Das Grundkonzept Genetischer Algorithmen	90
4.4.5.4	Exkurs: Beispielhafter Ablauf	92
5	Komplexitätsbetrachtung	95
5.1	Berechnungskomplexität	95
5.2	Parallelen zu bekannten Problemtypen	97
5.2.1	Slotallokation – Ein Zuordnungsproblem	97
5.2.2	O&D-Selektion – Ein Auswahlproblem	100
5.2.3	Rotationsplanung – Ein Tourenplanungsproblem	102
5.2.4	Ressourcenallokation – Ein Stundenplanproblem	107
5.3	Schlußfolgerung	109
6	Entwicklung eines Simulationsmodells	113
6.1	Grundlagen objektorientierter Modellierung	113
6.2	Anforderungen an die Datenorganisation	117
6.2.1	Grundlagen der physischen Datenorganisation	117
6.2.2	Logische Datenorganisation und physische Umsetzung	121
6.2.2.1	Identifikation der benötigten Basisdaten	121
6.2.2.2	Organisation der Basisdaten	123
6.2.2.3	Zusätzlich benötigte Steuerungsdaten	127
6.3	Implementierung der Algorithmen	132
6.3.1	Grundlagen	132
6.3.2	Tabu-Suche	136

6.3.2.1	Implementierung des Tabu-Suche-Algorithmus . . .	136
6.3.2.2	Feinabstimmung des Tabu-Suche-Algorithmus . . .	140
6.3.3	Simulated Annealing	142
6.4	Test und Feinabstimmung der Algorithmen	147
6.4.1	Vorstellung des Beispielszenarios	147
6.4.2	Optimierungsläufe	152
6.4.2.1	Optimierung mittels Tabu-Suche	152
6.4.2.2	Optimierung mittels Simulated Annealing	158
6.5	Schlußfolgerung	163
7	Einsatz hybrider Algorithmen	167
7.1	Entwicklung des hybriden Algorithmus TASA	167
7.1.1	Beschreibung des Algorithmus	167
7.1.2	Konvergenzbetrachtung	170
7.2	Verwendung des naturanalogen Verfahrens COSA	175
7.2.1	Beschreibung des Algorithmus	175
7.2.2	Konvergenzbetrachtung	180
7.3	Erweiterung von COSA	183
7.3.1	Entwicklung von COSTA	183
7.3.2	Konvergenzbetrachtung	188
7.4	Schlußfolgerung	191
8	Nachweis der Praxistauglichkeit	193
8.1	Problemstellung	193
8.2	Flugplanoptimierung unter idealen Bedingungen	196
8.2.1	Festlegung der Rahmenbedingungen	196
8.2.2	Optimierung mittels TASA	197
8.2.3	Optimierung mittels COSA	200
8.2.4	Optimierung mittels COSTA	203
8.3	Flugplanoptimierung unter realen Bedingungen	206
8.3.1	Festlegung der Rahmenbedingungen	206
8.3.2	Optimierung mittels TASA	207
8.3.3	Optimierung mittels COSTA	210
9	Schlußfolgerung und Ausblick	215
9.1	Status quo	215
9.2	Möglichkeiten der Weiterentwicklung	216
A	Optimierungsergebnisse aus Kapitel 6	219
A.1	Ausgangslösung	219
A.2	Tabu-Suche-Ergebnis: 1. Lauf	222
A.3	Tabu-Suche-Ergebnis: 2. Lauf	225
A.4	Simulated Annealing-Ergebnisse	228

B Optimierungsergebnisse aus Kapitel 7	231
B.1 TASA-Ergebnisse	231
B.2 COSA-Ergebnisse	236
B.3 COSTA-Ergebnisse	239
C Optimierungsergebnisse aus Kapitel 8	243
C.1 Optimierung unter idealen Umweltbedingungen	243
C.1.1 Ausgangslösung	243
C.1.2 TASA-Optimierungsergebnis	253
C.1.3 COSA-Optimierungsergebnis	263
C.1.4 COSTA-Optimierungsergebnis	270
C.2 Optimierung unter realen Umweltbedingungen	280
C.2.1 TASA-Optimierungsergebnis	280
C.2.2 COSTA-Optimierungsergebnis	288

Abbildungsverzeichnis

1.1	Marktsicht versus Produktionsperspektive	2
2.1	Freiheiten der Luft 1 - 8	11
2.2	Hub and Spoke-System versus Punkt zu Punkt-Verbindung	16
2.3	Entwicklung des Weltlinienluftverkehrs 1993 - 1998	24
2.4	Angebotene und nachgefragte Sitzkilometer 1993 - 1998	25
2.5	Netzwerkstrukturen	26
2.6	Entwicklung der Transfer-Passagierzahlen 1992 - 1997.	29
2.7	Marktsicht des O&D's FRA-NYC	30
2.8	Typische regionale Knotenstruktur europäischer Hubs	31
2.9	Definition des Umsteigezeitfensters	32
2.10	Geographischer Streckenverlauf	33
2.11	Dominierende Nonstop-Verbindung	33
2.12	Berücksichtigung eines Zeitpuffers	36
3.1	Phasen der Flugplanentwicklung	41
3.2	Entwicklung der Knotenstruktur	43
3.3	Aufbau einzelner Knoten	44
3.4	Überprüfung der operationellen Zulässigkeit	45
3.5	Darstellung eines Streckennetzwerkes als gerichteter Graph	47
3.6	Ermittlung des Umwegefaktors	48
3.7	Entfernungsberechnung mittels sphärischer Trigonometrie	49
3.8	Streckennetzwerk mit Transfer- und Nonstop-Verbindungen	50
3.9	Koordination der Vergabe von Inbound-Slots	52
3.10	Ermittlung der benötigten Umsteigezeit	55
3.11	Beispielszenario	57
4.1	Potentielle Lösungsverfahren	60
4.2	Komponenten einer Meta-Heuristik	70
4.3	Übergangswahrscheinlichkeiten	81
4.4	Aufbau eines Chromosoms	91
5.1	Zuordnung von Flügen zu Slots	97
5.2	Slotallokation als Zuordnungsmodell	98

5.3	Auswahl sinnvoller O&D's	100
5.4	Zusammenspiel von Slotallokation und Flottengröße	102
5.5	Bildung von Flugzeugrotationen	103
5.6	Flottenumlaufplanung als Capacitated Vehicle Routing-Problem	104
5.7	Ressourcenallokation als Stundenplanproblem	108
5.8	Komponenten des Huboptimierungsmodells	110
6.1	Bestandteile eines Objektes	114
6.2	Attribute und Methoden eines Objektes „Flugplanoptimierung“	115
6.3	Interaktion zwischen Objekten	115
6.4	Klasse als Vorlage für Objekte	116
6.5	Vererbungsbeziehung zwischen Klassen	117
6.6	Adreßverwaltung des Hauptspeichers	119
6.7	Einfach verkettete Adreßliste	119
6.8	Doppelt verkettete Adreßliste	120
6.9	Index-sequentielle Datenorganisation	121
6.10	Physische Datenorganisation der Outbound-Flüge	124
6.11	Slottausch von zwei Flügen	125
6.12	Adreßverkettung der Inbound- und Outbound-Slots	125
6.13	Organisatorische Einbettung der Distanzmatrix	127
6.14	Organisation der Konkurrenzflüge	128
6.15	Steuerung der Slotzuordnung	129
6.16	Flugzeugtyp-spezifische Bodenzeiten	130
6.17	Umlaufplanung eines Flugzeuges	131
6.18	Kapazitätsregulierung der Start- und Landezeiten	132
6.19	Tausch zweier Flüge	134
6.20	Verschieben eines Fluges	134
6.21	Tabu-Suche – erste Phase	137
6.22	Tabu-Suche – zweite Phase	139
6.23	Tabu-Suche – dritte Phase	140
6.24	Simulated Annealing – erste Phase	144
6.25	Simulated Annealing – zweite Phase	145
6.26	Simulated Annealing – dritte Phase	147
6.27	Ausgangslösung des Beispielszenarios	148
6.28	Insgesamt disponierbare Slots	152
6.29	Tabu-Suche-Optimierungsergebnis nach 100 Iterationen	154
6.30	Knotenstruktur der Ausgangslösung	155
6.31	Nachbarschaftslösungen mit identischem Zielfunktionswert	156
6.32	Tabu-Suche – zweiter Optimierungslauf	158
6.33	Temperaturverlauf	160
6.34	Verlauf der durchschnittlichen Akzeptanzwahrscheinlichkeit	160
6.35	Simulated Annealing-Optimierungsergebnis	162
6.36	Optimierungsergebnis mit „einzelnen Ausreißern“	163

6.37	Stärken und Schwächen von Tabu-Suche und Simulated Annealing	165
7.1	TASA – erste Phase	168
7.2	TASA – zweite Phase	170
7.3	TASA – dritte Phase	171
7.4	Verlauf des Zielfunktionswertes	173
7.5	Optimierungsergebnis des TASA-Ansatzes	174
7.6	COSA – erste Phase	176
7.7	COSA – zweite Phase	177
7.8	COSA – dritte Phase	179
7.9	Zielfunktionsgebirge mit Energiebarrieren	180
7.10	Optimierungsergebnis mittels COSA	182
7.11	Durchwanderung des Lösungsraums mittels COSA	184
7.12	Durchwanderung des Lösungsraums mittels COSTA	185
7.13	COSTA – erste Phase	186
7.14	COSTA – zweite Phase	187
7.15	COSTA – dritte Phase	188
7.16	Slotbelegung mittels COSTA	190
8.1	Knotenstruktur der Ausgangslösung	194
8.2	Umsteigezeiten des TASA-Optimierungsergebnisses	199
8.3	Wellenprofil des TASA-Optimierungsergebnisses	200
8.4	Wellenprofil des COSA-Optimierungsergebnisses	201
8.5	Umsteigezeiten des COSTA-Optimierungsergebnisses	205
8.6	Wellenprofil des COSTA-Optimierungsergebnisses	206
8.7	TASA-Umsteigezeiten unter realen Bedingungen	209
8.8	TASA-Knotenprofil unter realen Bedingungen	210
8.9	COSTA-Umsteigezeiten unter realen Bedingungen	212
8.10	COSTA-Knotenprofil unter realen Bedingungen	213

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterstelltes Passagieraufkommen für formale Betrachtung	27
2.2	MCT-Vergleich	32
3.1	O&D-Volumen, Umsteigezeit und Strafkosten	58
3.2	Berechnung des Zielfunktionswertes	58
4.1	Ausgangspopulation	92
4.2	Fitnekteilung der Ausgangspopulation	93
4.3	Ausgewählte Elternpaare	93
4.4	Rekombination	94
4.5	Population nach einer Rekombination	94
6.1	Destinationen des Beispielszenarios	147
6.2	Gültige Umsteigeverbindungen der Ausgangslösung	150
6.3	Dominierte Umsteigeverbindungen der Ausgangslösung	150
6.4	Bewertung der Ausgangssituation	151
6.5	Bewertung der ersten Tabu-Suche-Optimierung	153
6.6	Vergleich der Tabu-Suche-Ergebnisse	157
6.7	Optimierungsergebnis Simulated Annealing	162
7.1	Ergebnisse der TASA-Optimierung	174
7.2	Optimierungsergebnis von COSA	182
7.3	Optimierungsergebnis von COSTA	190
8.1	Angeflogene Destinationen	194
8.2	Bewertung der Ausgangssituation	195
8.3	Bodenzeit der beteiligten Flugzeugtypen	196
8.4	Zeitspannen für mehrmals täglich angeflogene Destinationen	197
8.5	TASA-Optimierungsergebnis unter idealen Bedingungen	199
8.6	COSA-Optimierungsergebnis unter idealen Bedingungen	201
8.7	COSTA Optimierungsergebnis unter idealen Bedingungen	204
8.8	Bodenzeit der beteiligten Flugzeugtypen	207
8.9	TASA-Optimierungsergebnis unter realen Bedingungen	208
8.10	COSTA-Optimierungsergebnis unter realen Bedingungen	211

A.1	Inbound-Flüge des Beispielszenarios	219
A.2	Outbound-Flüge des Beispielszenarios	220
A.3	Nonstop-Verbindungen der Konkurrenz	220
A.4	Zulässige O&D's	221
A.5	Inbound-Flüge des 1. Tabu-Suche-Laufs	222
A.6	Outbound-Flüge des 1. Tabu-Suche-Laufs	222
A.7	Gültige Umsteigeverbindungen des 1. Tabu-Suche-Laufs	223
A.8	Dominierte Umsteigeverbindungen des 1. Tabu-Suche-Laufs	224
A.9	Inbound-Flüge des 2. Tabu-Suche-Laufs	225
A.10	Outbound-Flüge des 2. Tabu-Suche-Laufs	225
A.11	Gültige Umsteigeverbindungen des 2. Tabu-Suche-Laufs	226
A.12	Dominierte Umsteigeverbindungen des 2. Tabu-Suche-Laufs	227
A.13	Inbound-Flüge des Simulated Annealing-Laufs	228
A.14	Outbound-Flüge des Simulated Annealing-Laufs	228
A.15	Gültige Umsteigeverbindungen des Simulated Annealing-Laufs	229
A.16	Dominierte Umsteigeverbindungen des Simulated Annealing-Laufs	230
B.1	Inbound-Flüge des TASA-Laufs	231
B.2	Outbound-Flüge des TASA-Laufs	232
B.3	Gültige Umsteigeverbindungen des TASA-Laufs	233
B.4	Dominierte Umsteigeverbindungen des TASA-Laufs	235
B.5	Inbound-Flüge des COSA-Laufs	236
B.6	Outbound-Flüge des COSA-Laufs	236
B.7	Gültige Umsteigeverbindungen des COSA-Laufs	237
B.8	Dominierte Umsteigeverbindungen des COSA-Laufs	238
B.9	Inbound-Flüge des COSTA-Laufs	239
B.10	Outbound-Flüge des COSTA-Laufs	239
B.11	Gültige Umsteigeverbindungen des COSTA-Laufs	240
B.12	Dominierte Umsteigeverbindungen des COSTA-Laufs	241
C.1	Inbound-Flüge der Ausgangslösung	243
C.2	Outbound-Flüge der Ausgangslösung	246
C.3	O&D-Gewichtung	248
C.4	Umsteigeverbindungen der HHN-Ausgangslösung	250
C.5	Inbound-Flüge des 1. TASA-Ergebnisses	253
C.6	Outbound-Flüge des 1. TASA-Ergebnisses	255
C.7	TASA O&D's unter idealen Bedingungen	257
C.8	COSA Inbound-Flüge unter idealen Bedingungen	263
C.9	COSA Outbound-Flüge unter idealen Bedingungen	265
C.10	COSA O&D's unter idealen Bedingungen	267
C.11	COSTA Inbound-Flüge unter idealen Bedingungen	270
C.12	COSTA Outbound-Flüge unter idealen Bedingungen	272
C.13	COSTA O&D's unter idealen Bedingungen	274

C.14 TASA Inbound-Flüge unter realen Bedingungen	280
C.15 TASA Outbound-Flüge unter realen Bedingungen	282
C.16 TASA O&D's unter realen Bedingungen	284
C.17 COSTA Inbound-Flüge unter realen Bedingungen	288
C.18 COSTA Outbound-Flüge unter realen Bedingungen	290
C.19 COSTA O&D's unter realen Bedingungen	292