

Leonid Jasvojn

# **Integration der Unsicherheitsaspekte in die Schedule-Optimierung**

Empirische Modellierung unter  
Anwendung der Fuzzy-Theorie  
am Beispiel des Luftverkehrs

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Heinrich Rommelfanger

Deutscher Universitäts-Verlag

## Inhaltsverzeichnis

Geleitwort.....	VII
Vorwort.....	IX
Inhaltsverzeichnis.....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XXI
Symbolverzeichnis.....	XXIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XXXI
<b>1</b>	<b>Einleitung..... 1</b>
1.1	Problemstellung..... 1
1.2	Flugplanoptimierung als ein Scheduling-Problem..... 2
1.3	Zielsetzung..... 3
1.4	Gang der Untersuchung..... 4
<b>2</b>	<b>Grundzüge der Luftverkehrswirtschaft und des Netzwerkmanagements..... 6</b>
2.1	Einführung..... 6
2.2	Grundlagen der Luftverkehrswirtschaft..... 6
2.2.1	Definition und Abgrenzung des Luftverkehrs..... 6
2.2.2	Eigenschaften der Produktion von Verkehrsleistungen..... 7
2.2.3	Charakteristika des Angebots..... 8
2.2.4	Charakteristika der Nachfrage..... 9
2.2.5	Entwicklung des Luftverkehrs..... 11
2.3	Entwicklung der wichtigsten politischen Rahmenbedingungen im Luftverkehr..... 12
2.3.1	Regulierung des Luftverkehrs in den USA und Europa..... 12
2.3.2	Deregulierungs- und Liberalisierungsprozess im Luftverkehr..... 13
2.3.3	Auswirkungen der Deregulierung und Liberalisierung auf die Luftverkehrsmärkte..... 15
2.3.3.1	Streckennetze und Flugangebot..... 16
2.3.3.2	Flugpreise..... 17
2.3.3.3	Wettbewerb und Marktstruktur..... 17
2.3.3.3.1	Wettbewerb zwischen etablierten und neuen Fluggesellschaften..... 17
2.3.3.3.2	Strategische Flugallianzen und Kooperationen..... 19
2.4	Grundzüge des Airline-Netzwerkmanagements..... 23
2.4.1	Aufgaben und Funktionen des Airline-Netzwerkmanagements..... 24
2.4.2	Grundgedanke der Netzwerkoptimierung..... 28
2.4.3	Airline-Netzwerke..... 30
2.4.4	Prozess der Flugplanung..... 35
<b>3</b>	<b>Quantitative Modelle zur Flugplanoptimierung..... 48</b>
3.1	Einführung..... 48

3.2	Quantitative Flugplanoptimierung.....	48
3.2.1	Überblick über die wichtigsten Kategorien der quantitativen Optimierungsmodelle in der Luftfahrtindustrie.....	48
3.2.2	Reihenfolge der Initialisierung der quantitativen Modelle zur Festlegung der optimalen Zeitenlagen der Flüge.....	49
3.2.3	Modelle zur Flugplanoptimierung.....	50
3.2.3.1	Darstellung der Flugnetzwerke im Rahmen der Graphentheorie.....	50
3.2.3.2	Scheduling-Modelle.....	51
3.2.3.2.1	Flugplanoptimierung mit Slot-Assignment-Modellen.....	52
3.2.3.2.2	Flugplanoptimierung mit Zeittafel-Modellen.....	56
3.2.3.2.3	Modelle zur simultanen Optimierung der Zeitenlagen und der Flugzeugzuordnung.....	58
3.2.3.3	Flugzeugrotationsmodelle mit Zeitenlagenverschiebungen.....	59
3.3	Lösungsverfahren der Flugplanoptimierungsmodelle.....	64
3.3.1	Überblick über die potenziellen Lösungsverfahren.....	64
3.3.2	Exakte Lösungsverfahren.....	66
3.3.2.1	Vollständige Enumeration.....	66
3.3.2.2	Schnittebenenverfahren.....	66
3.3.2.3	Entscheidungsbaumverfahren.....	66
3.3.2.3.1	Dynamische Optimierung.....	67
3.3.2.3.2	Begrenzte Enumeration.....	67
3.3.2.3.3	Branch-and-Bound-Verfahren.....	68
3.3.3	Heuristische Lösungsverfahren.....	69
3.3.3.1	Eigenschaften und Arten heuristischer Verfahren.....	69
3.3.3.2	Tabu-Suche.....	72
3.3.3.3	Simulated Annealing.....	76
3.3.3.4	Genetische Algorithmen.....	77
<b>4</b>	<b>Irregulärer Flugbetrieb.....</b>	<b>79</b>
4.1	Einführung.....	79
4.2	Entstehung, Entwicklung und Auswirkung von Flugverspätungen.....	79
4.2.1	Irreguläre Ereignisse als Ursache von Flugverspätungen.....	79
4.2.2	Entwicklung der Flugverspätungen.....	85
4.2.3	Alternative Reaktionsmöglichkeiten der Fluggesellschaften auf Flugverspätungen.....	87
4.2.3.1	Taktische Reaktionsmaßnahmen auf die Flugverspätungen.....	87
4.2.3.2	Strategische Reaktionsmaßnahmen auf die Flugverspätungen.....	90
4.2.4	Auswirkungen der Flugverspätungen aus Sicht der unterschiedlichen Beteiligten.....	92
4.2.4.1	Auswirkungen der Flugverspätungen auf die Fluggesellschaften.....	92
4.2.4.2	Auswirkungen der Flugverspätungen auf die Passagiere.....	104
4.3	Berücksichtigung der Unsicherheitsaspekte in der modernen Flugplanung.....	107

4.3.1	Modelle zur Flugplanwiederherstellung (Schedule Recovery Models).....	107
4.3.2	Messung und Optimierung der Robustheit und Zuverlässigkeit der Airline-Planung.....	110
4.3.2.1	Nicht stochastische Modelle zur Optimierung von Flugplänen.....	110
4.3.2.2	Stochastische Modelle zur Optimierung von Flugplänen.....	111
4.3.2.3	Simulationsbasierte Modelle zur Optimierung von Flugplänen.....	113
<b>5</b>	<b>Darstellung der Unsicherheitsaspekte mit Hilfe der Theorie der Fuzzy-Mengen.....</b>	<b>116</b>
5.1	Einführung.....	116
5.2	Grundlagen der Theorie der Fuzzy-Mengen.....	116
5.2.1	Grundgedanke und Definition von Fuzzy Mengen.....	116
5.2.2	Basisdefinitionen der Theorie der Fuzzy-Mengen.....	118
5.3	Modellierung der Unsicherheit mit Hilfe der Theorie der Fuzzy- Mengen.....	119
5.3.1	Gestalt und Interpretation der Zugehörigkeitsfunktionen.....	119
5.3.2	Rangordnung und Vergleich der als Fuzzy-Mengen dargestellten Ab- flugs- und Ankunftszeiten der Flüge.....	124
5.3.3	Herleitung der Zugehörigkeitsfunktionen für Fuzzy-Ankunfts- und Ab- flugszeiten.....	127
5.3.3.1	Ableitung der Zugehörigkeitsfunktionen aus Häufigkeiten sowie aus Wahrscheinlichkeits- bzw. Dichteverteilungen.....	128
5.3.3.2	Ableitung der Zugehörigkeitsfunktionen aus subjektiven Aussagen.....	132
5.4	Vor- und Nachteile der Abbildung von Unsicherheiten mit Hilfe der Theorie der Fuzzy-Mengen in der Flugplanoptimierung.....	134
<b>6</b>	<b>Einsatz der Modelle diskreter Entscheidungen zur Passagier- nachfrageschätzung auf Luftverkehrsmärkten.....</b>	<b>138</b>
6.1	Einführung.....	138
6.2	Überblick über die wichtigsten relevanten Modelle diskreter Entschei- dungen.....	138
6.2.1	Anforderungen an ein in einem Flugplanoptimierungsmodell zur Pas- sagier nachfrageschätzung eingesetztes Modell.....	139
6.2.2	Verhaltensannahmen der Individuen in Modellen diskreter Entschei- dungen.....	140
6.2.3	Struktur der Modelle diskreter Entscheidungen.....	142
6.2.4	Multinominale Logit-Modelle.....	144
6.2.5	Multinominale Probit-Modelle.....	149
6.3	Parameterschätzung und Teststatistik für Modelle diskreter Entschei- dungen.....	153
6.3.1	Parameterschätzung mit der Maximum-Likelihood und der Simulated- Maximum-Likelihood-Methode.....	153
6.3.2	Teststatistik.....	154
6.3.2.1	Signifikanztests.....	154

6.3.2.2	Anpassungstests.....	155
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines Fuzzy- und Marktmodell-basierten Flugplan- optimierungsmodells.....</b>	<b>158</b>
7.1	Einführung.....	158
7.2	Modellformulierung und -implementierung.....	161
7.2.1	Allgemeine Modellformulierung.....	161
7.2.2	Modellimplementierung.....	164
7.2.2.1	Struktur und Implementierung der Sub-Probleme.....	165
7.2.2.1.1	Sub-Problem 1: Generieren der Flugverbindungen.....	165
7.2.2.1.2	Sub-Problem 2: Flugplanbewertung.....	171
7.2.2.1.2.1	Schätzung der Passagiernachfrage und der zu erwartenden Passa- gierumsätze.....	172
7.2.2.1.2.2	Evaluierung der Verspätungskosten.....	179
7.2.2.2	Master-Problem.....	191
7.3	Empirische Bewertungs- und Optimierungsläufe.....	199
7.3.1	Bewertung und Optimierung der Flugpläne von American Airlines in Chicago O'Hare.....	201
7.3.2	Bewertung und Optimierung der Flugpläne von American Airlines in Dallas/Fort Worth.....	207
7.3.3	Bewertung und Optimierung der Flugpläne von Lufthansa in Frankfurt	212
7.3.4	Zusammenfassung der empirischen Ergebnisse.....	216
<b>8</b>	<b>Möglichkeiten des Modelleinsatzes in anderen Industrien.....</b>	<b>219</b>
8.1	Einführung.....	219
8.2	Modelleinsatz im Transportwesen.....	220
8.2.1	Auswirkungen auf das Master-Problem und Restriktionen.....	221
8.2.2	Auswirkungen auf das Sub-Problem 1.....	223
8.2.3	Auswirkungen auf das Sub-Problem 2.....	224
8.3	Modelleinsatz im Supply Chain Management und in der Logistik.....	226
8.3.1	Auswirkungen auf das Master-Problem und Restriktionen.....	227
8.3.2	Auswirkungen auf das Sub-Problem 1.....	229
8.3.3	Auswirkungen auf das Sub-Problem 2.....	229
<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>231</b>
	Anhang.....	235
	Literaturverzeichnis.....	242