

Mark Jacquemin

Netzmanagement im Luftverkehr

GABLER EDITION WISSENSCHAFT

Logistik und Verkehr

Herausgegeben von

Universitätsprofessor Dr. Heinz Isermann

In dieser Schriftenreihe werden aktuelle Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Forschung im Themenfeld Logistik und Verkehrsverkehrslehre präsentiert und zur Diskussion gestellt. Die Schriftenreihe will dabei ein Forum bieten für wissenschaftliche Beiträge, in denen praxisrelevante Problemstellungen unter Einsatz innovativer wissenschaftlicher Methoden gelöst werden.

Mark Jacquemin

Netzmanagement im Luftverkehr

Statische und dynamische
Planungsmodelle zur Gestaltung
von Hub&Spoke-Flugnetzwerken

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Heinz Isermann

Deutscher Universitäts-Verlag

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Dissertation Universität Frankfurt am Main, 2005

1. Auflage Februar 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Deutscher Universitäts-Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Brigitte Siegel / Stefanie Loyal

Der Deutsche Universitäts-Verlag ist ein Unternehmen von
Springer Science+Business Media.
www.duv.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Regine Zimmer, Dipl.-Designerin, Frankfurt/Main
Druck und Buchbinder: Rosch-Buch, Scheßlitz
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 3-8350-0215-5

Geleitwort

Fluggesellschaften erstellen ihre Transportleistungen unter Einsatz ihrer Transportsysteme. Diese lassen sich aus einer prozess- und ressourcenorientierten Perspektive (Produktionssystem) sowie aus einer institutionellen Perspektive (Institutionensystem) analysieren und unter Heranziehung von Zielkriterien bewerten. Als Reaktion auf die Deregulierung vieler Verkehrsgebiete im Luftverkehr haben viele international ausgerichtete Fluggesellschaften ihre Transportsysteme rekonfiguriert: Das ausschließlich auf Direktverkehre ausgerichtete Produktionssystem mutiert aus Kostengründen zu einer hybriden Hub&Spoke-Struktur bei Beibehaltung von Direktverkehren auf Flugverbindungen mit einem vergleichsweise hohen Transportaufkommen. Die durch die Hub&Spoke-Struktur definierten Hubflughäfen repräsentieren die Konsolidierungspunkte im Rahmen der zeitlichen und örtlichen Bündelung der indirekten Passagier- und Luftfrachtströme. Ebenso hat sich das Institutionensystem vieler Fluggesellschaften auf Grund der Veränderungen der Rahmenbedingungen auf den Luftverkehrsmärkten nachhaltig verändert: Viele Fluggesellschaften sind Mitglied einer strategischen Allianz geworden und haben damit die von ihnen angebotene Produktpalette erweitert.

Die vorliegende Arbeit von Mark Jacquemin widmet sich der strategisch ausgerichteten Netzentwicklung des Produktionssystems einer Fluggesellschaft bzw. einer Allianz von Luftverkehrsgesellschaften im Sinne der Struktur- und Ressourcenkonfiguration ihres hybriden Hub&Spoke-Produktionssystems. Durch die Strukturkonfiguration werden langfristig wirksame Entscheidungen hinsichtlich der zu bedienenden Flughäfen, der Streckenführung der angebotenen Flugverbindungen, der Anzahl und Lage der Hubflughäfen und ihrer Anbindung an die zu bedienenden Flughäfen getroffen. Die zur Erstellung der angebotenen Transportleistungen festzulegende Ressourcenkonfiguration umfasst Entscheidungen bezüglich der Kapazität und Technologie von Ressourcen, insbesondere der an Hubflughäfen vorzuhaltenden Kapazitäten und der art- und zahlenmäßigen Zusammensetzung der Flugzeugflotte.

Herr Jacquemin charakterisiert zunächst die Produktion von Transportleistungen im Luftverkehr. Es werden die Sach- und Formalziele einer Fluggesellschaft sowie die Betriebstypen einer Fluggesellschaft als Konkretisierung des Sachziels dargestellt. Die einem Markt zugeordnete Nachfrage lässt sich durch eine Nachfragematrix U darstellen, deren Koeffizienten U_{ij} die Periodennachfrage für Flugverbindungen von i nach j repräsentieren. Die Basis des Pro-

duktionsnetzwerks bildet das Angebotsnetzwerk. Dieses beschreibt, auf welchen Teilmärkten die betrachtete Fluggesellschaft in welcher Größenordnung Transportnachfrage bedienen will. Die Auswahl der zu bedienenden Teilmärkte sowie der auf diesen Teilmärkten angestrebte Marktanteil wird über einen Parameter β_{ij} mit $0 \leq \beta_{ij} \leq 1$ gesteuert. Eine im Angebotsnetzwerk festgelegte Teilmarktabdeckung setzt voraus, dass das disponierbare Produktionssystem der Fluggesellschaft in der Lage ist, die zur Bedienung der ausgewählten Teilmärkte notwendigen Transportleistungen zu erstellen. Über das Produktionsnetzwerk werden insbesondere die von der Fluggesellschaft angebotenen direkten und über mindestens einen Hubflughäfen führenden Transportrouten für die bedienten Teilmärkte spezifiziert. Im Falle einer direkten Transportroute von q nach s sind die Flughäfen über eine Flugverbindung direkt, d. h. ohne Zwischenstopps miteinander verbunden. Sofern mindestens ein Zwischenstopp notwendig ist, um s aus q zu erreichen, handelt es sich um eine indirekte Transportroute.

Auf Grund der Präzisierung des Begriffs Transportsystem und der Abgrenzung der beiden Subsysteme *Produktionssystem* und *Institutionensystem* erreicht Herr Jacquemin im Gegensatz zu vielen anderen Autoren eine konsistente Terminologie und eine klare Abgrenzung der Planungsaufgaben des Netzmanagements einer Fluggesellschaft. Die Planungsaufgaben lassen sich bezüglich des Planungshorizonts und der Planungsobjekte drei hierarchisch interdependenten Planungsebenen zuordnen: Netzentwicklung (Network Configuration), Netzplanung (Network Planning) und Netzsteuerung (Network Execution). Die auf den einzelnen Planungsebenen zu bewältigenden Planungsaufgaben sowie die notwendigen Interaktionen zur Berücksichtigung der vertikalen Interdependenzen zwischen den einzelnen Planungsebenen werden sorgfältig herausgearbeitet. Die Planungsaufgabe der Netzentwicklung widmet sich der zielgerichteten Generierung, Bewertung und Auswahl von Struktur- und Ressourcenkonfigurationen für das Produktionssystem einer Fluggesellschaft oder Allianz.

Mit der vorliegenden Arbeit bietet Herr Jacquemin den Entscheidungsträgern einer Fluggesellschaft durch eine realitätsnahe Weiterentwicklung bestehender Planungsmodelle eine Entscheidungsunterstützung zur Lösung der im Rahmen der Netzentwicklung identifizierten Planungsaufgaben an. Dazu greift er zunächst einige in der Literatur vorgestellte statische, deterministische Planungsmodelle zur Strukturkonfiguration von Hub&Spoke-Flugnetzen auf und erweitert bzw. modifiziert sie, um ihre Praxistauglichkeit zu erhöhen: Er führt eine detaillierte Analyse der Kapazitätsinanspruchnahme eines Hubknotens durch die Abwicklung des Inbound- und Outbound-Transportaufkommens durch und entwickelt unter Heranziehung der

Ergebnisse seiner Analyse Kapazitätsrestriktionen mit einer im Vergleich zu den in der Literatur publizierten Vorschlägen genaueren Erfassung der Kapazitätsinanspruchnahme. Die Ausrichtung der Zielgröße auf den durch das Produktionssystem erzielbaren Einzahlungsüberschuss statt auf Kosten bietet zum einen die Möglichkeit, ein differenziertes, auf die einzelnen Kundengruppen ausgerichtetes Leistungsangebot auf Basis ihrer Preisbereitschaften zu offerieren. Auf diese Weise lassen sich im Planungsmodell zusätzliche Freiheitsgrade erschließen, z.B. die Nichtbedienung eines Teilmarktes auf Grund fehlender bzw. (im Vergleich zu anderen Teilmärkten) zu geringer wirtschaftlicher Attraktivität. Zum anderen lassen sich durch die Ausrichtung der Zielfunktion auf Einzahlungsüberschüsse die investiven Auszahlungen für stationäre und nichtstationäre Kapazitäten im Produktionssystem explizit erfassen. Damit lässt sich auch die Gestaltung der nichtstationären Kapazitäten in Form von streckenlängenbezogenen und auf die täglichen Umläufe ausgerichtete flugzeugmusterbezogenen Kapazitäten in ein Planungsmodell integrieren.

Darüber hinaus wird die einperiodige Betrachtung zu einer mehrperiodigen Analyse erweitert, um Entscheidungen über die (Re-) Konfiguration der stationären und mobilen Ressourcen im Zeitablauf unter Berücksichtigung der zeitlich vertikalen Interdependenzen zu fundieren. Eine praxistaugliche Modellierung der hier skizzierten Planungssituation gelingt auf der Basis stochastisch-dynamischer Planungsmodelle, für die unter Einsatz von Verfahren der dynamischen Optimierung Politiken im Sinne einer zeitlichen Abfolge von (Re-) Konfigurationsentscheidungen ermittelt werden können. Hierzu erfolgt eine hierarchische Zerlegung der Planungsaufgaben und ihre Verteilung auf zwei miteinander zu koordinierende Planungsebenen. Auf der hierarchisch übergeordneten Top-Ebene werden Entscheidungen unter Risiko im Sinne mehrperiodiger (Des-) Investitionsstrategien zur (Re-) Konfiguration der im Produktionssystem einzusetzenden stationären und mobilen Ressourcen getroffen. Auf der hierarchisch untergeordneten Basisebene wird für jede Periode auf Basis der vorgegebenen Ressourcenkonfiguration eine Strukturkonfiguration des Produktionssystems ermittelt. Die beiden Planungsebenen sind über Top-Down und Bottom-Up-Kopplungsbeziehungen miteinander verknüpft. Das Top-Modell ermittelt auf der Basis der maximalen Einzahlungsüberschüsse der Basismodelle, der zu Grunde gelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten der berücksichtigten Nachfrageszenarien, der Finanzrestriktionen sowie der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers bedingt optimale Investitionsstrategien. Die hier entwickelten Planungsmodelle reduzieren die Kluft zwischen Theorie und Praxis nachhaltig und sind grundsätzlich geeignet, für zentrale Segmente des Flugnetzes einer Fluggesellschaft oder einer strategischen Allianz

Gestaltungsoptionen zu generieren und zu bewerten. Um das innovative Einsatzpotenzial der entwickelten stochastisch dynamischen Bewertungskonzepte für die Netzentwicklung von Fluggesellschaften nachvollziehbar aufzuzeigen, stellt Herr Jacquemin abschließend eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte prototypische Softwareapplikation zur Unterstützung der Netzentwicklung von Fluggesellschaften vor. Der Einsatz der Software-Applikation für ein Anwendungsbeispiel illustriert eindrucksvoll das Einsatzpotenzial der in dieser Arbeit entwickelten Planungskonzepte.

Die vorliegende Arbeit beeindruckt durch ihre Systematik, ihre Originalität und ihren konsequenten Praxisbezug. Sie leistet einen nachhaltigen Beitrag zum wissenschaftlichen und praktischen Fortschritt auf dem Gebiet des Netzmanagements von Fluggesellschaften.

Heinz Isermann

Vorwort

Im Fokus dieser Arbeit steht das praxisrelevante Problem der Gestaltung von Hub&Spoke-Systemen im Luftverkehr unter Einsatz von Planungsmodellen. Das hier zu Grunde liegende Hub Location Problem wird regelmäßig unter Einsatz deterministisch-statischer Planungsansätze gelöst. Dabei werden insbesondere zeitlich-vertikale Interdependenzen periodenbezogener Struktur- und Ressourcenkonfigurationen ignoriert. Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Arbeit, den Defiziten traditioneller Planungsansätze erfolgreich zu begegnen und der Luftverkehrspraxis eine fundierte Entscheidungsunterstützung für die auf der strategischen Planungsebene angesiedelte Netzentwicklung an die Hand zu geben.

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Seminar für Logistik und Verkehr entstanden. Sie wurde vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main im September 2005 als Dissertation angenommen. Ich möchte folgenden Menschen danken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Meinem akademischen Lehrer und Doktorvater Herrn Prof. Dr. Heinz Isermann danke ich in besonderer Weise für die Betreuung dieser Arbeit. Seine hervorragenden Vorlesungen im betriebswirtschaftlichen Spezialisierungsfach Logistik und Verkehr weckten bereits während meines Studiums das Interesse an der Lösung logistischer Problemstellungen unter Heranziehung von Planungsmodellen. Seine inhaltlichen Hinweise, seine konstruktive Kritik und sein persönliches Engagement haben den erfolgreichen Abschluss meines Promotionsprojektes nachhaltig gefördert. Ich danke ebenfalls Herrn Prof. Dr. Heinrich Rommelfanger, der als Zweitgutachter zahlreiche Anregungen gegeben hat. Sein Doktorandenkolloquium gab mir die Gelegenheit, Auszüge meiner Arbeit vor kompetentem Fachpublikum zu präsentieren. Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Kai Rannenberg und Herrn Prof. Dr. Uwe Walz, die trotz hoher eigener Arbeitsbelastung kurzfristig als Mitglieder der Prüfungskommission zur Verfügung standen.

Ein herzlicher Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen am Seminar für Logistik und Verkehr, die mich neben ihren eigenen Forschungsprojekten bei der Erstellung der Arbeit unterstützten. Herr PD Dr. Joachim Houtman hat stets Zeit gefunden, in abendlichen

Diskussionen viele Probleme zu lösen. Herr Dr. Richard Pibernik und Herr Dr. Eric Sucky haben durch ihre eigenen Forschungen entscheidende Anregungen für die in meiner Arbeit gewählte Vorgehensweise generiert. Obwohl die kritischen Einwände dieser drei herausragenden Wissenschaftler regelmäßig eine Überarbeitung der Gliederung erforderlich gemacht haben, bin ich für ihre Hartnäckigkeit sehr dankbar. Frau Dipl.-Kffr. Silke Heger und Frau Dipl.-Kffr. Gabi Albert-Bach danke ich, dass sie Rohversionen des Manuskriptes kritisch gelesen haben. Ein Dank geht auch an Herrn Dipl.-Kfm. Harald Kolbe, der mir als Hard- und Softwareexperte bei technischen Schwierigkeiten weitergeholfen hat. Frau Ursula Malzacher ist die gute Seele des Lehrstuhls. Ich danke ihr, dass sie zu allen Zeiten stets dafür gesorgt hat, dass das Arbeitsklima am Lehrstuhl für uns alle sehr angenehm blieb.

Zu großem Dank bin ich auch den Menschen außerhalb des Lehrstuhls verpflichtet. Herr Dipl.-Kfm. Lars Sauerhöfer wurde nicht müde, zahlreiche Rohversionen des Manuskriptes sorgfältig zu lesen sowie mich auf inhaltliche und formale Schwächen hinzuweisen. Seine kompetenten Verbesserungsvorschläge kamen stets zeitnah und haben an vielen Stellen zu einer Aufwertung der Arbeit geführt. Herr Dr. Michael Huth hat neben seinen zahlreichen Verbesserungsvorschlägen fantastische Arbeit bei der Programmierung der prototypischen Software-Applikation geleistet. Herr Dr. Peter Baumgart stand mir regelmäßig als kompetenter Luftfahrtexperte für Praxisfragen zur Verfügung.

Meiner Mutter Silvia Jacquemin danke ich dafür, dass sie trotz zahlreicher Stimmungsschwankungen ihres Sohnes nie die Geduld mit ihm verloren hat. Sie hat den Grundstein für alles gelegt, was ich heute bin. Ich bin mehr als erleichtert, dass sie ihren tapferen Kampf gegen die heimtückische Krebserkrankung gewonnen hat. Mom, danke für alles! Meinen Schwiegereltern Rosemarie und Gerhard Martin danke ich, dass sie mich trotz meiner Talentarmut regelmäßig zum Tennistraining gezwungen haben und mir damit Denkpausen verschaffen. Ich bin in der beneidenswerten Lage, eine fantastische Ehefrau an meiner Seite zu haben, die – im Vergleich zu mir – nie den Glauben an das erfolgreiche Ende der Promotion verloren hat. Sie hat nicht nur die Arbeit mehrfach Korrektur gelesen, sondern mich während den unvermeidlichen Tiefpunkten aufgebaut, meine soziale Vereinsamung verhindert und dadurch ein Leben nach der Promotion sichergestellt. Ich widme daher diese Arbeit in Dankbarkeit und Liebe Frau Dipl.-Kffr. Tanja Jacquemin.

Mark Jacquemin

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort.....	V
Vorwort	IX
Inhaltsverzeichnis.....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Verzeichnis der verwendeten Symbole.....	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXXIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit und Gang der Untersuchung	3
2 Grundlagen des Netzmanagements von Fluggesellschaften.....	6
2.1 Kapitelüberblick	6
2.2 Charakterisierung von Fluggesellschaften	6
2.3 Systeme und deren Repräsentation in Modellen	15
2.4 Systemtheoretische Betrachtung des Luftverkehrsmarktes.....	18
2.4.1 Das Nachfragesystem.....	19
2.4.2 Das Angebotssystem	25
2.5 Das Transportsystem einer Fluggesellschaft.....	32
2.5.1 Prozess- und ressourcenorientierte Perspektive des Transportsystems.....	32
2.5.2 Institutionelle Perspektive des Transportsystems	51
2.5.3 Verknüpfung der beiden Perspektiven	54
2.6 Das Netzmanagement einer Fluggesellschaft	57
2.6.1 Einführung in das Netzmanagement	57
2.6.2 Ziele und Aufgaben des Netzmanagements	61
2.6.2.1 Netzentwicklung.....	62
2.6.2.2 Netzplanung	65
2.6.2.3 Netzsteuerung.....	67
2.6.3 Analyse der Interdependenzen der Planungsaufgaben des Netzmanagements...	69

2.7 Einordnung der vorliegenden Arbeit in das Netzmanagement von Fluggesellschaften und weitere Vorgehensweise.....	71
3 Deterministisch-statische Planungsansätze zur isolierten Strukturkonfiguration von Hub&Spoke-Flugnetzwerken.....	73
3.1 Kapitelüberblick	73
3.2 Netzentwicklung als Führungsprozess	73
3.3 Hub&Spoke-Flugnetzwerke.....	79
3.3.1 Gestaltung von Hub&Spoke-Flugnetzwerken: Das Hub Location Problem	79
3.3.2 Ableitung unterschiedlicher Strukturalternativen	84
3.3.3 Problemklassen des Hub Location Problems	92
3.4 Planungsmodelle zur Lösung des p-Hub Median Problems	100
3.4.1 Das p-Hub Median Problem mit Einfachzuordnung	101
3.4.2 Das p-Hub Median Problem mit Mehrfachzuordnung.....	108
3.5 Planungsmodelle zur Lösung des Hub Location Problems im engeren Sinn	111
3.5.1 Das Hub Location Problem mit Einfachzuordnung	117
3.5.2 Das Hub Location Problem mit Mehrfachzuordnung	119
3.5.3 Erweiterung: Zulässigkeit von Direktverbindungen	122
3.5.3.1 Das Hub Location Problem mit Einfachzuordnung und Direktverbindungen.....	123
3.5.3.2 Das Hub Location Problem mit Mehrfachzuordnung und Direktverbindungen.....	127
3.6 Weitere Vorgehensweise.....	131
4 Deterministisch-statische Planungsansätze zur Struktur- und Ressourcenkonfiguration von Hub&Spoke-Flugnetzwerken	134
4.1 Kapitelüberblick	134
4.2 Berücksichtigung mengenabhängiger Transportkosten für Hubverbindungen.....	135
4.3 Berücksichtigung von hubknotenbezogenen Kapazitätsrestriktionen.....	143
4.3.1 Einstufige Hubknotenkapazitäten	145
4.3.2 Mehrstufige Hubknotenkapazitäten	152
4.4 Berücksichtigung von pfeilbezogenen Kapazitätsrestriktionen	156
4.4.1 Pfeilbezogene Gesamtkapazitäten	157
4.4.2 Pfeilbezogene Flugzeugkapazitäten	161

4.5 Berücksichtigung preisabhängiger Transportaufkommen	179
4.6 Weitere Vorgehensweise	182
5 Stochastisch-dynamische Planungsansätze zur Bewertung von	
Rekonfigurationsstrategien für Hub&Spoke-Flugnetzwerke	184
5.1 Kapitelüberblick	184
5.2 Kritische Würdigung der Grundmodelle	185
5.3 Stochastisch-dynamische Planungsmodelle	193
5.3.1 Konstitutive Merkmale und Lösungsmöglichkeiten	194
5.3.2 Beispiel für die Lösung eines stochastisch-dynamischen Planungsmodells unter Einsatz der Bellman'schen Funktionalgleichungsmethode	203
5.4 Hierarchische Zerlegung der Planungsaufgaben	209
5.5 Bewertungskonzept I: Ermittlung von dynamischen Rekonfigurationsstrategien für die Kapazitäten von Hubflughäfen	215
5.5.1 Einführende Überlegungen zum Bewertungskonzept I	215
5.5.2 Annahmen des Bewertungskonzepts I	218
5.5.3 Top-Modell I: Rekonfiguration der Hubknotenkapazitäten	221
5.5.4 Basis-Modell I: Strukturkonfiguration des Hub&Spoke-Flugnetzwerks	233
5.5.5 Lösungsmöglichkeiten für Bewertungskonzept I	240
5.6 Bewertungskonzept II: Ermittlung von dynamischen Rekonfigurationsstrategien für die Kapazitäten von Hubflughäfen und für den Flugzeugbestand	246
5.6.1 Einführende Überlegungen zum Bewertungskonzept II	246
5.6.2 Annahmen des Bewertungskonzepts II	248
5.6.3 Top-Modell II: Rekonfiguration der Hubknotenkapazitäten und des Flugzeugbestands	248
5.6.4 Basis-Modell II: Strukturkonfiguration für das Hub&Spoke-Flugnetzwerk	253
5.6.5 Lösungsmöglichkeiten für Bewertungskonzept II	254
5.7 Weitere Vorgehensweise	255
6 Informationssysteme zur Unterstützung des Netzmanagements	
von Fluggesellschaften	256
6.1 Kapitelüberblick	256
6.2 Betriebliche Informations- und Kommunikations-Systeme	256
6.2.1 Computerunterstützung von Aufgabenträgern	257

6.2.2 Entscheidungsunterstützungssysteme: Grundlagen und Funktionsweise	260
6.3 Aufbau der Entscheidungsunterstützungssysteme von Fluggesellschaften	265
6.4 Eine entscheidungsunterstützende Software-Applikation für die Netzentwicklung einer Fluggesellschaft	272
6.4.1 Überblick über den Aufbau der Software-Applikation	272
6.4.2 Illustratives Anwendungsbeispiel	276
6.4.3 Darstellung und Interpretation der durch die prototypische Software-Applikation gewonnenen Ergebnisse	290
7 Zusammenfassung und Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaktivitäten ...	295
Anhang	303
Anhang A-1: Lingo-Syntax und Solution Report für USAHLP	303
Anhang A-2: Lingo-Syntax und Solution Report für UMAHLP	305
Anhang A-3: Lingo-Syntax und Solution Report für USAHLPD	307
Anhang A-4: Lingo-Syntax und Solution Report für das modifizierte USAHLPD	309
Anhang A-5: Lingo-Syntax und Solution Report für Grundmodell I	311
Anhang A-6: Lingo-Syntax für Basis-Modell I bzw. II	313
Anhang A-7: Planungsrelevanten Daten für das Beispiel	315
Anhang A-8: Rechenergebnisse für das Anwendungsbeispiel	317
Literaturverzeichnis	321

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Überlagerungen der Einzugsgebiete der vier wichtigsten Hubflughäfen in Europa	21
Abbildung 2-2: Ausgewählte Topologien realer Produktionssysteme im Luftverkehr	41
Abbildung 2-3: Idealisierter Verlauf der Wellenmuster an einem Hubflughafen	42
Abbildung 2-4: Illustration des Institutionennetzwerks	52
Abbildung 2-5: Institutionelle sowie prozess- und ressourcenorientierte Perspektive	55
Abbildung 2-6: Vertikale Interdependenzen der Planungsaufgaben des Netzmanagements	70
Abbildung 3-1: Netzentwicklung als Führungsprozess	74
Abbildung 3-2: Zerlegung des Hub&Spoke-Flugnetzwerks in ein Zugangs- und Übertragungsnetzwerk	81
Abbildung 3-3: Darstellung alternativer Allokationsregeln und Hubpolitiken für das Zugangsnetzwerk	87
Abbildung 3-4: Quantifizierung der maximalen Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk	89
Abbildung 3-5: Ermittlung der Transportkosten für indirekte Transportrouten	105
Abbildung 3-6: Veränderung der Gesamtkosten bei Variation von p	121
Abbildung 4-1: Illustration des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors	137
Abbildung 4-2: Lineare Approximation der mengenabhängigen Transportkostenfunktion	138
Abbildung 4-3: Kapazitätsinanspruchnahme des Hubknotens k	149
Abbildung 4-4: Inanspruchnahme eines Pfeils durch nichtoriginäres Transportaufkommen	158
Abbildung 4-5: Idealisierter Verlauf des Nutzlast-Reichweiten-Diagramms	162
Abbildung 4-6: Ermittlung der Periodenkapazität eines Flugzeugs auf Basis täglicher Umläufe	164
Abbildung 4-7: Idealtypischer Verlauf der Preis-Absatz-Funktion für eine direkte Transportroute	180
Abbildung 5-1: Illustration von Relokationsentscheidungen im Zeitverlauf	190
Abbildung 5-2: Entscheidungsbaum für ein stochastisch-dynamisches Planungsmodell	199

Abbildung 5-3: Entscheidungsnetzwerk für das Kerosinbeispiel.....	205
Abbildung 5-4: Das hierarchische Konzept zur Unterstützung der Netzentwicklung.....	213
Abbildung 5-5: Konzeptioneller Aufbau des Bewertungskonzepts I	216
Abbildung 5-6: Rekonfigurationsmaßnahmen für jeden Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t	225
Abbildung 5-7: Illustration des stochastisch-dynamischen Entscheidungsprozesses.....	240
Abbildung 5-8: Hierarchische Koppelung zwischen Top- und Basis-Modell I	242
Abbildung 6-1: Systematisierung von Anwendungssoftware anhand der Aufgabenspezifität	258
Abbildung 6-2: Elemente eines Entscheidungsunterstützungssystems	262
Abbildung 6-3: Module der im Luftverkehr eingesetzten Entscheidungsunterstützungssysteme	267
Abbildung 6-4: Assistentenfunktion der Software-Applikation.....	273
Abbildung 6-5: Entscheidungsbaum in der Software-Applikation.....	274
Abbildung 6-6: Ermittlung von bedingt optimalen Rekonfigurationsstrategien	275
Abbildung 6-7: Nachfrageszenarien in den Perioden [1,2], [2,3] und [3,4]	278
Abbildung 6-8: Illustration der Rekonfigurationsalternativen für das Beispiel	280
Abbildung 6-9: Entscheidungsbaum für das Beispiel.....	290
Abbildung 6-10: Bewerteter Entscheidungsbaum für die Zentralhub-Strategie	292
Abbildung 6-11: Bewerteter Entscheidungsbaum für die Regionalhub-Strategie.....	293

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Einflussfaktoren der luftverkehrspezifischen Transportnachfrage	25
Tabelle 3-1:	Bestimmung der maximalen Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk.....	91
Tabelle 3-2:	Problemausprägungen des p-Hub Median Problems	101
Tabelle 3-3:	Problemausprägungen des Hub Location Problems.....	114
Tabelle 3-4:	Transportaufkommen zwischen i und j	114
Tabelle 3-5:	Stücktransportkosten von i nach j	115
Tabelle 3-6:	Kosten der Aktivierung eines Hubknotens k.....	115
Tabelle 3-7:	Konzeptioneller Aufbau des Lösungstableaus	116
Tabelle 3-8:	Lösungstableau für USAHLP.....	118
Tabelle 3-9:	Lösungstableau für UMAHLP	120
Tabelle 3-10:	Lösungstableau für USAHLPD.....	124
Tabelle 3-11:	Lösungstableau für das modifizierte USAHLPD.....	126
Tabelle 3-12:	Lösungstableau für Grundmodell I	132
Tabelle 4-1:	Leistungskennzahlen für ausgewählte Airbus-Flugzeuge.....	166
Tabelle 5-1:	Planungsrelevante Daten des Beispiels	204
Tabelle 5-2:	Lösungstableau für die erste Iteration	207
Tabelle 5-3:	Lösungstableau für die zweite Iteration	208
Tabelle 5-4:	Lösungstableau für die dritte Iteration	208
Tabelle 6-1:	Ausgewählte Anbieter von Entscheidungsunterstützungssystemen für Fluggesellschaften	272
Tabelle 6-2:	Nutzlastkapazitäten der beiden Flugzeugmuster.....	277
Tabelle 6-3:	Rekonfigurationsalternativen zum Zeitpunkt $t = 2$	282
Tabelle 6-4:	Rekonfigurationsalternativen zum Zeitpunkt $t = 3$	283
Tabelle 6-5:	Auszahlungen für hubknotenbezogene Erweiterungsmaßnahmen	286
Tabelle 6-6:	Auszahlungen für hubknotenbezogene Abbaumaßnahmen	286
Tabelle 6-7:	Auszahlungen zur Erweiterung des Flugzeugbestands	287
Tabelle 6-8:	Auszahlungen zur Reduzierung des Flugzeugbestands	287
Tabelle 6-9:	Summe der Auszahlungen der Rekonfigurationsalternativen.....	288
Tabelle 6-10:	Parameterausprägungen des Basis-Modells II zum Zeitpunkt $t = 0$	289

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Indizes

as	Index der Ausbaustufen eines potenziellen Hubknotens ($as = 1, 2, \dots, oas$)
az	Index der zulässigen Endzustände zum Endzeitpunkt $t = \tau$ ($az = 1, 2, \dots, mz$)
d	Index der Zielflughäfen (Zielknoten) im Produktionsnetzwerk ($d = 1, 2, \dots, pr, pr + 1, \dots, pn$)
f	Index der aktivierbaren Flugzeugmuster ($f = 1, 2, \dots, fm$)
fg	Index der Fluggesellschaften ($fg = 1, 2, \dots, af$)
g(t)	Index der Realisationen des stochastischen Transportaufkommens zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ ($g(t) = 1, 2, \dots, mr(t)$)
i	Index der Startflughäfen (Quellknoten) im Nachfrage- bzw. Produktionsnetzwerk ($i = 1, 2, \dots, pr, pr + 1, \dots, pn$)
$\hat{i}$	Index der Quellknoten im Institutionennetzwerk ($\hat{i} = 1, 2, \dots, ai$)
j	Index der Zielflughäfen (Zielknoten) im Nachfrage- bzw. Produktionsnetzwerk ($j = 1, 2, \dots, pr, pr + 1, \dots, pn$)
$\hat{j}$	Index der Zielknoten im Institutionennetzwerk ($\hat{j} = 1, 2, \dots, ai$)
k	Index der potenziellen Hubknoten im Produktionsnetzwerk ($k = 1, 2, \dots, ph$ und $ph \leq pr$)
ka	Index der Komponenten der vektorwertigen Knotenbewertung im Produktionsnetzwerk ($ka = 1, 2, \dots, oak$)
kb	Index der Komponenten der vektorwertigen Pfeilbewertung im Produktionsnetzwerk ($kb = 1, 2, \dots, okb$)
kc	Index der Komponenten der vektorwertigen Knotenbewertung im Institutionennetzwerk ($kc = 1, 2, \dots, okc$)
kd	Index der Komponenten der vektorwertigen Pfeilbewertung im Institutionennetzwerk ($kd = 1, 2, \dots, okd$)
m	Index der potenziellen Hubknoten im Produktionsnetzwerk ($k = 1, 2, \dots, ph$ und $ph \leq pr$)
n	Index der Knoten $v_{i_n}^{PR}$ einer Pfeilfolge ($n = 0, 1, \dots, \lambda, \lambda + 1, \dots, rt - 1$)

$o(t)$	Index der (Re-) Konfigurationsalternativen zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ ($o(t) = 1, 2, \dots, ra(t)$)
pm	Index der physischen Merkmale des Transportobjekts ($pm = 1, 2, \dots, opm$)
q	Index der Intervalle des Transportaufkommens zwischen zwei Hubknoten ($q = 1, 2, \dots, qi$)
r	Index der Startflughäfen (Quellknoten) im Produktionsnetzwerk ($r = 1, 2, \dots, pr, pr + 1, \dots, pn$)
t	Index der Zeitpunkte ($t = 1, 2, \dots, \psi, \psi + 1, \dots, \tau$)
vm	Index der Variablen der Marktreaktionsfunktion ($vm = 1, 2, \dots, me$)
zm	Index der zeitlichen Merkmale des Transportobjekts ($zm = 1, 2, \dots, ozm$)
η	Index der Kerosinbedarfe ($\eta = 1, 2$)
ω	Index der Hauptkombinationen HK_ω ($\omega = 1, 2, \dots, ah$)

Parameter und Variablen

$\vec{0}$	Nullvektor
$\mathbf{a}_t$	Vektorwertige Handlungsalternative zum Zeitpunkt t
$\mathbf{a}_t^{o(t)}$	$o(t)$ -te Handlungsalternative zum Zeitpunkt t
AC_q	Steigung der linear approximierten Transportkostenfunktion im q -ten Intervall
AF_t	Ausfallkosten zum Zeitpunkt t [GE]
$AK_{k,t}$	Auszahlungen für die Erweiterungsmaßnahme im Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [GE in t]
B_{ij}^f	Nutzlastkapazität eines Flugzeugs des Flugzeugmusters f auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ [ME/FZ]
$B_{ij,t}^f$	Nutzlastkapazität eines Flugzeugs des Flugzeugmusters f auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ in Periode $[t, t + 1]$ [ME/FZ]
$BK_{k,t}$	Periodenbezogene Kosten der Betriebsbereitschaft für die installierte Kapazität $\Gamma_{k,t}$ im Hubknoten k in Periode $[t, t + 1]$ [GE/ME]
C_{ij}	Stücktransportkosten von i nach j [GE/ME]

CV_{ij}	Variable Stücktransportkosten von i nach j [GE/ME]
$CV_{ij,t}$	Variable Stücktransportkosten von i nach j in Periode $[t, t + 1]$ [GE/ME]
D_{ij}	Distanz zwischen i und j [EE]
DB_{ij}	Stückdeckungsbeitrag auf der direkten Transportroute von i nach j [GE/ME]
DB_{ikmj}	Stückdeckungsbeitrag auf der indirekten Transportroute von i nach j über k und m [GE/ME]
FA_{ij}^f	Periodenbezogene Kosten der Aktivierung eines Flugzeugs des Flugzeugmusters f auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ [GE/FZ]
$FB_{ij,t}^f$	Periodenbezogene Kosten des Einsatzes eines Flugzeugs des Flugzeugmusters f auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ in Periode $[t, t + 1]$ [GE/FZ]
FC_q	Ordinatenabschnitt der linear approximierten Transportkostenfunktion im q-ten Intervall [ME/P]
$FE_{f,t}$	Investitionsauszahlungen für ein Flugzeug des Flugzeugmusters f zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [GE/FZ in t]
FK_k	Periodenbezogene Kosten der Aktivierung eines potenziellen Hubknotens k [GE/P]
FK_k^{as}	Periodenbezogene Kosten der Aktivierung eines potenziellen Hubknotens k mit Ausbaustufe as [GE/P]
$FR_{f,t}$	Desinvestitionsauszahlungen für ein Flugzeug des Flugzeugmusters f zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [GE/FZ in t]
FT_{ij}	Periodenbezogene Kosten der Aktivierung der Gesamtkapazität GK_{ij} auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ [GE/P]
GK_{ij}	Gesamtkapazität des potenziellen Pfeils $(i, j) \in E$ [ME/P]
$h_{k,t}$	Binäre Ausbauvariable für Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$
h_t	Ausbauvektor; ph-dimensionaler Vektor
IB_t	Maximales Investitionsbudget zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [GE in t]

$K_{t,t}$	Anzahl der nicht genutzten Flugzeuge des Flugzeugmusters f in Periode $[t, t + 1]$ [FZ/P]
$l(nd)$	Vektorwertige Knotenbewertung
$l(v_i^{IS})$	Vektorwertige Knotenbewertung im Institutionennetzwerk; okc-dimensionaler Vektor
$l(v_i^{PR})$	Vektorwertige Knotenbewertung im Produktionsnetzwerk; oka-dimensionaler Vektor
$\hat{l}(nd', nd'')$	Vektorwertige Pfeilbewertung
$\hat{l}(v_i^{IS}, v_j^{IS})$	Vektorwertige Pfeilbewertung im Institutionennetzwerk; okd-dimensionaler Vektor
$\hat{l}(v_i^{PR}, v_j^{PR})$	Skalare Pfeilbewertung im Nachfragenetzwerk
$\hat{l}(v_i^{PR}, v_j^{PR})$	Vektorwertige Pfeilbewertung im Produktionsnetzwerk; okb-dimensionaler Vektor
p	Anzahl zu aktivierender Hubknoten
P_{ij}^D	Durchschnittspreis pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer direkten Transportroute von i nach j [GE/ME]
$\bar{P}_{ij}^D$	Ausprägung des Durchschnittspreises P_{ij}^D für eine direkte Transportroute von i nach j [GE/ME]
$P_{ij,t}^D$	Durchschnittspreis in Periode $[t, t + 1]$ pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer direkten Transportroute von i nach j [GE/ME]
P_{ij}^{ID}	Durchschnittspreis pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer indirekten Transportroute von i nach j über k und m [GE/ME]
$\bar{P}_{ij}^{ID}$	Ausprägung des Durchschnittspreises P_{ij}^{ID} für eine indirekte Transportroute von i nach j über k und m [GE/ME]
$P_{ij,t}^{ID}$	Durchschnittspreis in Periode $[t, t + 1]$ pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer indirekten Transportroute von i nach j über k und m [GE/ME]
PK_t	Beschaffungspreis für Kerosin zum Zeitpunkt t [GE/ME]
PS_{ij}	Proportionalitätsfaktor von i nach j [GE/(ME · EE)]
r_t	Realisation des stochastischen Einflussvektors zum Zeitpunkt t

$\tilde{\mathbf{r}}_{[t,t+1]}$ bzw. $\tilde{\mathbf{r}}_t$	Stochastischer Einflussvektor zum Zeitpunkt t
$\mathbf{RK}_{k,t}$	Auszahlungen für die Abbaumaßnahme im Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [GE in t]
$\mathbf{RP}_{ij}$	Prohibitiv- oder Reservationspreis pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer direkten Transportroute von i nach j [GE/ME]
$\mathbf{RP}_{ikmj}$	Prohibitiv- oder Reservationspreis pro Passagier bzw. Luftfrachtsendung auf einer indirekten Transportroute von i nach j über k und m [GE/ME]
$\bar{\mathbf{s}}_1$	Deterministischer Zustandsvektor zum Zeitpunkt $t = 1$
$\mathbf{s}_t$	Zustandsvektor zum Zeitpunkt t
$\tilde{\mathbf{s}}_t$	Stochastischer Zustandsvektor zum Zeitpunkt t
$\mathbf{sp}(t)$	Zustand des Transportobjekts zum Zeitpunkt t ; $(\text{opm} + \text{ozm})$ -dimensionaler Vektor
$\mathbf{SK}_{r,t}$	Periodenbezogene Kosten der Betriebsbereitschaft für den nicht genutzten Flugzeugbestand des Flugzeugmusters f in Periode $[t, t + 1]$ [GE/FZ]
$\mathbf{SP}_{ij}$	Steigung der Preis-Absatz-Funktion für eine direkte Transportroute von i nach j $\left[\frac{[\text{GE}]/[\text{ME}]}{[\text{ME}]/[\text{P}]} \right]$
$\mathbf{SP}_{ikmj}$	Steigung der Preis-Absatz-Funktion für eine direkte Transportroute von i nach j über k und m $\left[\frac{[\text{GE}]/[\text{ME}]}{[\text{ME}]/[\text{P}]} \right]$
T_q	Stützstelle des q -ten Intervalls
u_{ij}	Binäre Aktivierungsvariable für den potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$
u_{ij}^f	Anzahl der zu beschaffenden Flugzeuge des Flugzeugmusters f , die auf dem potenziellen Pfeil $(i, j) \in E$ eingesetzt werden [FZ/P]
$ue_{ij,t}^f$	Anzahl der Flugzeuge des Flugzeugmusters f , die in Periode $[t, t + 1]$ auf dem Pfeil $(i, j) \in E$ eingesetzt werden [FZ/P]
U_{ij}	Transportnachfrage von i nach j [ME/P]
U	Nachfragematrix; $p_n \times p_n$ -dimensionale Matrix
$v_{k,t}$	Binäre Rückbauvariable für Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$

$\mathbf{v}_t$	Rückbauvektor; ph -dimensionaler Vektor
$wh_{f,t}$	Ganzzahlige Flottenerweiterungsvariable für Flugzeugmuster f zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [FZ/P]
$wr_{f,t}$	Ganzzahlige Flottenreduktionsvariable für Flugzeugmuster f zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [FZ/P]
W_{ij} bzw. W_{ij}^{fg}	Transportaufkommen der Fluggesellschaft fg von i nach j [ME/P]
W_{rd}	Transportaufkommen von r nach d [ME/P]
$W_{ij,t}$	Transportaufkommen von i nach j in Periode $[t, t + 1]$ [ME/P]
$\mathbf{W}^{AL}$	Angebotsmatrix einer Allianz AL ; $pn \times pn$ -dimensionale Matrix
$\mathbf{W}$ bzw. $\mathbf{W}^{fg}$	Angebotsmatrix der Fluggesellschaft fg ; $pn \times pn$ -dimensionale Matrix
$\tilde{\mathbf{W}}_{[t,t+1]}$ bzw. $\tilde{\mathbf{W}}_t$	Stochastische Angebotsmatrix zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$; $pn \times pn$ -dimensionale Matrix
x_{ij}	Allokationsvariable für eine direkte Transportroute von i nach j
$x_{ij,t}$	Allokationsvariable für eine direkte Transportroute von i nach j in Periode $[t, t + 1]$
x_{ikmj}	Allokationsvariable für eine indirekte Transportroute von i nach j über k und m
$x_{ikmj,t}$	Allokationsvariable für eine indirekte Transportroute von i nach j über k und m in Periode $[t, t + 1]$
x_{qkm}	Höhe des Transportflusses von k nach m im q -ten Intervall [ME/P]
x_{rkmd}	Binäre Allokationsvariable für eine indirekte Transportroute von r nach d über k und m
$x_{p_m}(t)$	Ausprägung des physischen Merkmals pm des Transportobjekts zum Zeitpunkt t
$x_{z_{zm}}(t)$	Ausprägung des zeitlichen Merkmals zm des Transportobjekts zum Zeitpunkt t
$\mathbf{x}_p(t)$	Vektor der physischen Merkmalsausprägungen des Transportobjekts zum Zeitpunkt t ; opm -dimensionaler Vektor

$\mathbf{xx}(t)$	Vektor der zeitlichen Merkmalsausprägungen des Transportobjekts zum Zeitpunkt t ; ozm -dimensionaler Vektor
y_k	Binäre Lokationsvariable für k
y_k^{as}	Binäre Ausbau- und Lokationsvariable für k mit Ausbaustufe as
y_{qkm}	Binärvariable des Ordinatenabschnitts im q -ten Intervall für den Transportfluss von k nach m
z_{ik}	Binäre Zugangsvariable von i nach k
z_{kk}	Binäre Lokationsvariable für k
α	Kostendegressionsfaktor für eine potenzielle Hubverbindung
α_1	Kostendegressionsfaktor für eine potenzielle Hubzugangsverbindung
α_2	Kostendegressionsfaktor für eine potenzielle Hubabgangsverbindung
β_{ij} bzw. β_{ij}^{fg}	Zielmarktanteil der Fluggesellschaft fg auf dem Teilmarkt $\langle v_i^{PR}, v_j^{PR} \rangle$
γ_{vm}	Variable der Marktreaktionsfunktion
δ	Anteil des zu bedienenden Transportaufkommens W_{ij}^{fg}
ε_{ij}^{fg}	Indirekter Netzeffekt einer Allianz AL auf dem Teilmarkt $\langle v_i^{PR}, v_j^{PR} \rangle$
θ	Funktionsparameter für die Funktion des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors $\alpha(x)$
$(1 + \pi)^t$	Auszungsfaktor $\left[\frac{GE \text{ in } t + 1}{GE \text{ in } t = 1} \right]$
π	Kalkulationszinssatz
π_{EK}	Eigenkapitalkostensatz
π_{FK}	Fremdkapitalkostensatz
χ	Funktionsparameter für die Funktion des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors $\alpha(x)$
Γ_k	Kapazität des potenziellen Hubknotens k [ME/P]
Γ_k^{as}	Kapazität des potenziellen Hubknotens k bei Implementierung der Ausbaustufe as [ME/P]
$\bar{\Gamma}_{k,0}$	Exogen gegebene Anfangskapazität des Hubknotens k zum Anfangszeitpunkt $t = 0$ [ME/P]

$\Gamma_{k,t}$	Kapazität des potenziellen Hubknotens k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [ME/P]
$\bar{\Gamma}_0$	Gegebener Vektor der Hubknotenkapazitäten (Startkonfiguration); ph-dimensionaler Vektor
Γ_t	Vektor der Hubknotenkapazitäten; ph-dimensionaler Vektor
$\Theta_{k,t}$	Kapazitätsrückgang für Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [ME/P]
$\Xi_{ij,t}$	Ersetzung für die pfeilbezogenen Kapazitätsrestriktionen
$\bar{\Pi}_{f,0}$	Exogen gegebener Anfangsbestand an Flugzeugen des Flugzeugmusters $f \in F$ zum Anfangszeitpunkt $t = 0$ [FZ/P]
$\Pi_{f,t}$	Anzahl der einsetzbaren Flugzeuge des Flugzeugmusters f zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [FZ/P]
Π_t	Vektor des Flugzeugbestands; fm-dimensionaler Vektor
$\Phi_{k,t}$	Ersetzung für die hubknotenbezogenen Kapazitätsrestriktionen
$\Omega_{k,t}$	Kapazitätszuwachs für Hubknoten k zum Anfangszeitpunkt t der Periode $[t, t + 1]$ [ME/P]

Funktionen und Funktionswerte

$AF(\dots)$	Antizipationsfunktion
$BEZ_{t+1}^{BM_I}(\dots)$	Funktion der Bruttoeinzahlungsüberschüsse des Basis-Modells I
$BEZ_{t+1}^{BM_II}(\dots)$	Funktion der Bruttoeinzahlungsüberschüsse des Basis-Modells II
$\widetilde{BEZ}_{t+1}^{BM_II}(\dots)$	Stochastische Bruttoeinzahlungsüberschüsse des Basis-Modells II
$BF_t^I(\dots)$	Bellman'sche Funktionalgleichung des Bewertungskonzepts I
$BF_t^{II}(\dots)$	Bellman'sche Funktionalgleichung des Bewertungskonzepts II
$EF(\dots)$	Erlösfunktion
$ENZ(\dots)$	Funktion des Barwerts der erwarteten Nettoeinzahlungsüberschüsse
$EZ(\dots)$	Funktion der Einzahlungen
$EZ\ddot{U}(\dots)$	Funktion der Einzahlungsüberschüsse
$FR(\dots)$	Markreaktionsfunktion

$FZ_t(\dots)$	Zustandstransformationsfunktion
HK	Zustandstransformationsvorschrift
$K(\dots)$	Kostenfunktion
$KR(\dots)$	Funktion des Kostenkriteriums
l	Knotenbewertungsfunktion
$\hat{l}$	Pfeilbewertungsfunktion
l^{IS}	Knotenbewertungsfunktion im Institutionennetzwerk
$\hat{l}^{IS}$	Pfeilbewertungsfunktion im Institutionennetzwerk
l^{PR}	Knotenbewertungsfunktion im Produktionsnetzwerk
$\hat{l}^{PR}$	Pfeilbewertungsfunktion im Nachfrage- bzw. Produktionsnetzwerk
NEZ	Nettoeinzahlungsüberschüsse
$\tilde{NEZ}_{t+1}^I(\dots)$	Stochastische Nettoeinzahlungsüberschüsse für Bewertungskonzept I
$\tilde{NEZ}_{t+1}^{II}(\dots)$	Stochastische Nettoeinzahlungsüberschüsse für Bewertungskonzept II
$p(\dots)$	Subjektive Eintrittswahrscheinlichkeit
$P_{ij}^D(\dots)$	Preis-Absatz-Funktion für eine direkte Transportroute
$P_{ij}^{ID}(\dots)$	Preis-Absatz-Funktion für eine indirekte Transportroute
$PZ_{(MA)}$	Maximale Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk mit Mehrfachzuordnung und ohne Direktverbindungen
$PZ_{(MAD)}$	Maximale Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk mit Mehrfachzuordnung und Direktverbindungen
$PZ_{(SA)}$	Maximale Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk mit Einfachzuordnung und ohne Direktverbindungen
$PZ_{(SAD)}$	Maximale Anzahl potenzieller Pfeile in einem Hub&Spoke-Flugnetzwerk mit Einfachzuordnung und Direktverbindungen
$TK_{km}(\dots)$	Nichtlineare mengenabhängige Transportkostenfunktion
$TK_{qkm}(\dots)$	Linear approximierte mengenabhängige Transportkostenfunktion im q-ten Intervall
$W_{ij}(\dots)$	Nachfragefunktion (Umkehrfunktion der Preis-Absatz-Funktion)
$\hat{z}_t(\dots)$	Bellman'sche Funktionalgleichung zum Zeitpunkt t

$\tilde{z}_{t+1}(\dots)$	Stufen- bzw. periodenbezogener Zielfunktionswert
$\alpha(\dots)$	Funktion des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors einer potenziellen Hubverbindung $(k, m) \in E_H$
$\alpha_1(\dots)$	Funktion des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors einer potenziellen Hubzugangsverbindung $(i, k) \in E_Z$
$\alpha_2(\dots)$	Funktion des mengenabhängigen Kostendegressionsfaktors einer potenziellen Hubabgangsverbindung $(m, j) \in E_A$

Mengen

A	Menge der aktivierbaren Ausbaustufen für einen potenziellen Hubknoten
$AL_t(s_t)$	Menge der zulässigen Handlungsalternativen zum Zeitpunkt t in Abhängigkeit des Systemzustands s_t
AR	Pfeilmenge („arrow“)
DR	Menge der potenziellen Pfeile, auf denen Direktverbindungen zulässig sind ($DR \subseteq E$)
E	Menge der potenziellen Pfeile im Produktionsnetzwerk
E^*	Menge der aktivierten Pfeile im Produktionsnetzwerk
E_A	Menge der potenziellen Hubabgangsverbindungen im Produktionsnetzwerk
E_A^*	Menge der aktivierten Hubabgangsverbindungen im Produktionsnetzwerk
E_{AN}	Menge der potenziellen Pfeile im Zugangsnetzwerk ($E_{AN} = E_Z \cup E_A \cup E_D$)
E_{AN}^*	Menge der aktivierten Pfeile im Zugangsnetzwerk ($E_{AN}^* = E_Z^* \cup E_A^* \cup E_D^*$)
E_D	Menge der potenziellen Direktverbindungen im Zugangsnetzwerk
E_D^*	Menge der aktivierten Direktverbindungen im Zugangsnetzwerk
E_H	Menge der potenziellen Hubverbindungen im Übertragungsnetzwerk
E_H^*	Menge der aktivierten Hubverbindungen im Übertragungsnetzwerk
E_Z	Menge der potenziellen Hubzugangsverbindungen im Zugangsnetzwerk
E_Z^*	Menge der aktivierten Hubzugangsverbindungen im Zugangsnetzwerk

$\hat{E}$	Menge der gesperrten Transportverbindungen im Produktionsnetzwerk
EL	Menge der Systemelemente
EN	Pfeilmenge im Nachfragenetzwerk
F	Menge der aktivierbaren Flugzeugmuster
H	Menge der potenziellen Hubknoten ($H \subseteq V$); $ H = ph$
H^*	Menge der aktivierten Hubknoten ($H^* \subseteq V^*$)
IE	Pfeilmenge im Institutionennetzwerk
IN_0	Menge der natürlichen Zahlen einschließlich Null
IR	Menge der reellen Zahlen
IR^+	Menge der positiven reellen Zahlen
IV	Knotenmenge im Institutionennetzwerk
MAL	Menge der Allianzmitglieder ($MAL \subseteq MFG$)
MFG	Menge der Fluggesellschaften
ND	Knotenmenge („nodes“)
$NF(v_k^{PR})$	Menge der Nachfolgerknoten des Hubknotens v_k^{PR} im Produktionsnetzwerk
R_t	Menge der Realisationen des Einflussvektors $\tilde{r}_t$ zum Zeitpunkt t
S_t	Menge der zulässigen Systemzustände zum Zeitpunkt t
SB	Menge der Systembeziehungen
UM	Menge der Elemente der Systemumwelt
XP_{pm}	Menge der zulässigen Endzustände des pm-ten physischen Merkmals des Transportobjekts
XZ_{zm}	Menge der zulässigen Endzustände des zm-ten zeitlichen Merkmals des Transportobjekts
V	Knotenmenge im Produktionsnetzwerk ($V \subseteq VN$); $ V = pr$
V^*	Knotenmenge eines gelösten Hub Location Problems
V_{AN}	Menge der potenziellen Nichthubknoten ($V_{AN} = V \setminus H$); $ V_{AN} = d$
V_{AN}^*	Menge der aktivierten Nichthubknoten ($V_{AN}^* = V^* \setminus H^*$)
$VG(v_k^{PR})$	Menge der Vorgängerknoten des Hubknotens v_k^{PR} im Produktionsnetzwerk
VN	Knotenmenge im Nachfragenetzwerk
ZS	Menge der zulässigen Endzustände des Transportobjekts
ZT	Menge der zulässigen indirekten Transportrouten

Allgemeine Symbole

AL	Allianz
AN*	Zugangsnetzwerk (Access Level Network) eines gelösten Hub Location Problems
EW	Erwartungswert
G	Graph
G*	Graph eines gelösten Hub Location Problems
HN*	Übertragungsnetzwerk (Hub Level Network) eines gelösten Hub Location Problems
IN	Instruktion
IN*	Optimale Instruktion
IS	Institutionenebene
nd	Knoten („node“)
PR	Prozess- und Ressourcenebene
PT	Punkt
RE	Reaktion
RE**	Ex-post Rückmeldung
SY	System
$TR_{\langle v_i^{PR}, v_j^{PR} \rangle}^D$	Direkte Transportroute von v_i^{PR} nach v_j^{PR}
$TR_{(ij)}^D$	Direkte Transportroute von i nach j (vereinfachte Schreibweise)
$TR_{\langle v_i^{PR}, v_j^{PR} \rangle}^{ID}$	Indirekte Transportroute von v_i^{PR} nach v_j^{PR}
$TR_{(ij)}^{ID}$	Indirekte Transportroute von i nach j (vereinfachte Schreibweise)
v^{IS}	Knoten im Institutionennetzwerk
v^{PR}	Knoten im Produktionsnetzwerk
ZF	Zustandsfolge
$\langle v_i^{PR}, v_j^{PR} \rangle$	Teilmarkt zwischen Knoten v_i^{PR} und v_j^{PR}
$\langle i, j \rangle$	Teilmarkt zwischen Knoten i und j (verkürzte Schreibweise)
$\overline{AB}$	Strecke zwischen Punkt A und Punkt B

Quantoren, Relationssymbole, logische Verknüpfungen, Mengenzugehörigkeit und Mengenoperationen

$\forall$	Allquantor; Für alle ...
$\wedge$	Konjunktion
$\vee$	Disjunktion
$\Rightarrow$	Implikation
$x \leq y$	x ist kleiner als oder gleich y
$x < y$	x ist kleiner y
$x \ll y$	x ist erheblich kleiner als y
$x \geq y$	x ist größer als oder gleich y
$x > y$	x ist größer y
$x \gg y$	x ist erheblich größer als y
$x = y$	x ist gleich y
$x \neq y$	x ist ungleich y
$x := y$	x ist definitionsgemäß gleich y
$\emptyset$	Leere Menge
$ A $	Mächtigkeit der Menge A
$a \in A$	a ist Element von A
$a \notin A$	a ist nicht Element von A
$A = B$	Mengengleichheit
$A \neq B$	Mengenungleichheit
$A \subseteq B$	A ist Teilmenge von B
$A \subset B$	A ist Teilmenge von B und A ist ungleich B; A ist echte Teilmenge von B
$A \subsetneq B$	A ist nicht Teilmenge von B
$[a, b]$	Geschlossenes Intervall; $[a, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$
$]a, b[$	Rechtsseitig offenes Intervall; $]a, b[= \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}$
$(a, b]$	Linksseitig offenes Intervall; $(a, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$
$A \cup B$	Vereinigungsmenge von A und B; $A \cup B := \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$
$A \cap B$	Mengendurchschnitt von A und B; $A \cap B := \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$
$A \setminus B$	Mengendifferenz von A zu B; $A \setminus B := \{x \mid x \in A \wedge x \notin B\}$
$A \times B$	Kartesisches Produkt der Mengen A und B; $A \times B := \{(x, y) \mid x \in A, y \in B\}$