

# **EIN MODELL ZUR STRATEGISCHEN NETZWERKPLANUNG IM PASSAGIERLUFTVERKEHR UNTER WETTBEWERBSBEDINGUNGEN**

Dr.rer.pol. M. Ch. Gelhausen  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Flughafenwesen und Luftverkehr  
Linder Höhe, 51147 Köln

## **Zusammenfassung**

Gegenstand dieses Beitrages ist ein Modell zur strategischen Netzwerkplanung in Passagierluftverkehrsmärkten unter Wettbewerbsbedingungen. Hierbei werden insbesondere drei verschiedene Typen von Marktteilnehmern betrachtet: Passagiere, Fluggesellschaften und Flughäfen. Die Passagiernachfrage verschiedener Märkte wird anhand von Nachfragefunktionen modelliert, welche die Wahl von Flughafen und Flugroute mit einbeziehen. Die Spezifikation dieser Nachfragefunktionen berücksichtigt die Heterogenität verschiedener Flugangebote auf einer bestimmten Origin-Destination (O-D) Relation, so dass sowohl Nachfragegenerierungseffekte als auch Nachfragedistributionseffekte zusätzlicher bzw. veränderter Flugangebote berücksichtigt werden können. Die O-D Passagiernachfrage verschiedener Märkte ist in diesem Modell daher nicht exogen gegeben, sondern wird modellendogen in Abhängigkeit von Angebots- und Nachfragecharakteristika bestimmt.

Angebotsseitige Wettbewerbsbeziehungen, insbesondere zwischen Fluggesellschaften, werden anhand eines spieltheoretischen Modells abgebildet. Obwohl der Schwerpunkt hierbei auf den Fluggesellschaften liegt, können Flughäfen in das Wettbewerbsmodell zusätzlich mit einbezogen werden. Die angebotsseitigen Wettbewerbsbeziehungen werden im Rahmen eines heterogenen Cournot-Mengenwettbewerbs modelliert. Weiterhin verfügen die Fluggesellschaften und Flughäfen jeweils über unvollständige Information bezüglich der Eigenschaften ihrer Konkurrenten, wie z.B. individuelle Kosten- und Reaktionsfunktionen, und werden im Rahmen eines dynamischen Lernprozesses angepasst. Wesentliche methodische Elemente des Modells sind neben einem spieltheoretischen Rahmen nichtlineare Programmierung und diskrete Entscheidungsmodelle. Aufgrund der komplexen dynamischen Struktur des Modells wird ein sogenanntes heuristisches Gleichgewichtskonzept entwickelt.

Aus einer übergeordneten Perspektive betrachtet ist ein wesentliches Ziel dieses Modells die Analyse und Prognose langfristiger Marktentwicklungen im Passagierluftverkehr. Auf der Unternehmensebene stellt dieses Modell ein quantitatives Werkzeug zur strategischen Netzwerkplanung dar. Aufgrund des spieltheoretischen Konzepts und dem Einbezug unvollständiger Information ist es z.B. möglich, Markteintritts- oder Abwehrstrategien fundiert zu evaluieren.

## **1. EINLEITUNG**

Seit einigen Jahren nimmt das Interesse an der modellhaften Abbildung von Wettbewerbsbeziehungen in Passagierluftverkehrsmärkten stetig zu. Fortschritte in der mathematischen Modellierung sowie die kontinuierliche Zunahme der Rechnerleistung stellen eine Grundvoraussetzung für die Modellierung dar; der wesentliche anwendungsbezogene Treiber dieser Entwicklung ist die fortschreitende Liberalisierung der Luftverkehrsmärkte und die dadurch verursachte zunehmende Bedeutung von Wettbewerb innerhalb dieser Märkte. Hierdurch entstanden neue Geschäftsmodelle, wie z.B. das der Low-Cost Carrier (LCC). Vor mehr als 30 Jahren verabschiedete der US-Kongress den US Airline Deregulation Act (z.B. [1]) welcher den Start für Liberalisierungsbestrebungen in weiteren Ländern darstellt. Z.B. startete die Liberalisierung des Luftverkehrs in Australien Anfang der 1980er (z.B. [2]) und in Europa Ende der 1980er (z.B. [3]). Zuvor waren nationale Luftverkehrsmärkte weitgehend durch monopolistische Strukturen geprägt, so dass nur eine Fluggesellschaft bzw. wenige regulierte Fluggesellschaften diese bedienten und der

internationale Luftverkehr durch bilaterale Abkommen geregelt wurde.

Entsprechend den Wettbewerbsstrukturen von Luftverkehrsmärkten werden in dieser Arbeit drei verschiedene Modellklassen unterschieden: Monopolmodelle, Oligopolmodelle ohne komplexe Netzwerkstrukturen und daher nur beschränkt einsetzbar sowie Oligopolmodelle mit komplexen Netzwerkstrukturen, welche ein breiteres Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten abdecken.

Monopolmodelle dienen im Wesentlichen der Optimierung von Flügen innerhalb eines Hub-&-Spoke Netzwerkes einer Monopolfuggesellschaft, da in solchen Netzwerkstrukturen die Koordinierungskosten der ausschlaggebende Faktor sind. Beispiele für diese Modellklasse sind [4] bis [7]. Teilweise unterscheiden sich diese Modelle in ihren Möglichkeiten zur Abbildung komplexer Netzwerkstrukturen und sind nur für bestimmte Fragestellungen geeignet (z.B. [8] und [9]).

Oligopolmodelle ohne komplexe Netzwerkstrukturen sind

in der Regel ausschließlich auf bestimmte Fragestellungen ausgerichtet. Typischerweise behandeln sie Fragen der sozialen Wohlfahrt unter verschiedenen Wettbewerbsregimen, Vergleiche zwischen Hub-&Spoke und Point-to-Point Netzwerken sowie Markteintritt und Marktzutrittsbeschränkung. Beispiele für solche Modelle sind [10] bis [16].

Oligopolmodelle mit komplexen Netzwerkstrukturen sind prinzipiell auf beliebige Netzwerk- und Wettbewerbsstrukturen anwendbar und weisen das größte Anwendungsspektrum der drei genannten Modellklassen auf. Beispiele umfassen z.B. [17] bis [27].

Wie relevant sind Oligopolmodelle mit komplexen Netzwerkstrukturen? Hendricks et al. [28] analysieren Netzwerkwahl (Hub-&Spoke vs. Point-to-Point, nicht nur Luftverkehr) eines Monopolcarriers und zeigen, dass hierfür sogenannte „Economies of Density“ eines O-D Marktes entscheidend sind. Anhand eines weiterentwickelten Modells untersuchen die Autoren die marktzutrittsabschreckende Wirkung eines Hub-&Spoke Netzwerkes [29] sowie ein Duopol mit zwei großen Carriern, welche ihre Netzwerkstrukturen frei wählen können [30]. Die Autoren argumentieren, dass der Hub-&Spoke Carrier über einen Wettbewerbsvorteil gegenüber dem Point-to-Point Carrier verfügt, da dieser eine höhere Produktivität wegen leichter zu erreichender Economies of Density besitzt. Folglich würde die Anzahl der Point-to-Point Carrier im Zeitablauf abnehmen, argumentieren die Autoren.

Theorie und Empirie zeigen, dass ein Hub-&Spoke Netzwerk nicht unter allen Bedingungen optimal sein muss und dass der Einfluss der LCC, welche hauptsächlich auf Point-to-Point Netzwerken operieren, langfristig nicht zu vernachlässigen ist und sie mit Hub-&Spoke Carriern konkurrieren können (z.B. [31] bis [36]).

Gegenstand dieser Arbeit ist ein Passagierluftverkehrsmodell mit Wettbewerb, welches eine beliebige Anzahl an Fluggesellschaften und Flughäfen sowie beliebige Netzwerkstrukturen zulässt. Die Passagiernachfrage stellt keine feste Eingangsgröße dar, sondern wird modellendogen bestimmt. Wettbewerbsbeziehungen werden mit Hilfe spieltheoretischer Konzepte modelliert. Neu an dem vorgestellten Ansatz sind die Art und Weise wie die Passagierluftverkehrsnachfrage, unvollständige Information der Wettbewerber und der Lernprozess modelliert wird sowie das angewendete Gleichgewichtskonzept. Ein wesentliches Ziel des Modells ist die Erklärung dynamischer Entwicklungen von Luftverkehrsmärkten, wobei unvollständige Information und Lernprozesse in Bezug auf Markteintritt und Marktzutrittsabwehr eine wichtige Rolle spielen.

## 2. METHODISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1 Spieltheorie

Spieltheorie ist interaktive Entscheidungstheorie: Ein spieltheoretisches Modell besteht aus einer endlichen Anzahl  $N$  von Spielern, wobei jeder Spieler über eine nichtleere Aktionenmenge  $A_i$  mit Elementen  $a_i$  und eine Präferenzrelation  $\succsim_i$  auf der Menge der Aktionenprofile  $a = (a_j)_{j \in N}$  verfügt. Ein Aktionenprofil  $a$  bezeichnet ein Spielergebnis und die Menge der Spielergebnisse bzw. Aktionenprofile

wird mit  $A = \times_{j \in N} A_j$  bezeichnet. Diese Definition verdeutlicht den Unterschied zwischen einem spieltheoretischen und einem entscheidungstheoretischen Problem: Für einen einzelnen Spieler sind nicht nur seine eigene Entscheidung, sondern auch die Entscheidungen seiner Mitspieler relevant, so dass die Präferenzrelation jedes Spielers auf der Menge der Aktionenprofile  $A$  und nicht auf seiner eigenen Aktionenmenge  $A_i$  definiert ist [37].

Das bekannteste spieltheoretische Lösungskonzept stellt das Nash-Gleichgewicht dar [38]. Ein Nash-Gleichgewicht kann anschaulich als ein Aktionenprofil bezeichnet werden, in welchem die Aktion eines jeden Spielers eine beste Antwort gegeben die Aktionen aller Mitspieler darstellt, so dass niemand einen Anreiz hat, seine Aktion einseitig zu ändern. D.h. ein Nash-Gleichgewicht eines Spiels  $\langle N, (A_i), (\succsim_i) \rangle$  ist ein Aktionenprofil  $a^* \in A$  mit der Eigenschaft, dass für jeden Spieler  $i \in N$   $(a^*_i, a^*_i) \succsim_i (a^*_i, a_i)$  für alle  $a_i \in A_i$  gilt. Hierbei beschreibt  $a_{-i}$  ein Aktionenprofil exklusive die Aktion von Spieler  $i$ . Jeder Spieler verfügt annahmegemäß über alle entscheidungsrelevanten Informationen des Spiels und handelt rational. Das Konzept eines Nash-Gleichgewichts sagt nichts darüber aus, wie der Gleichgewichtszustand erreicht wird [37].

In einem wiederholten Spiel wird das sogenannte Stufenspiel in jeder Periode  $t \in \{0, 1, \dots\}$  wiederholt, wobei die Periodenanzahl sowohl endlich als auch unendlich sein kann. Die Entscheidung eines Spielers in einem einzelnen Stufenspiel wird als Aktion und sein Verhalten im wiederholten Spiel als Strategie bezeichnet. In dieser Arbeit werden wiederholte Spiele mit perfektem Monitoring betrachtet, d.h. alle Spieler können das gewählte Aktionenprofil am Ende jeder Periode beobachten [39]. Das wiederholte Nash-Gleichgewicht des Stufenspiels bildet ebenfalls ein Nash-Gleichgewicht des wiederholten Spiels [39].

Spieltheorie beschäftigt sich hauptsächlich mit Gleichgewichtsanalyse, jedoch kann die daraus folgende Annahme, dass die Spieler ohne Umwege das Nash-Gleichgewicht identifizieren und spielen, so dass das Gleichgewicht als allgemein bekannt vorausgesetzt werden kann, häufig angezweifelt werden [40]. Lerneffekte gewinnen an Bedeutung, wenn die Spieler während des Spiels neue entscheidungsrelevante Information erwerben, was typischerweise in wiederholten Spielen der Fall ist. Dies kann Auswirkungen auf das zu erreichende Nash-Gleichgewicht haben, falls eines existiert. In dieser Arbeit sind insbesondere die Lernkonzepte „Fictitious Play“ und „Smooth Fictitious Play“ von Interesse.

Fictitious Play [41], [42] stellt eines der ersten Lernkonzepte dar. Obwohl es ursprünglich nicht als solches entwickelt wurde, sondern eine iterative Methode zum Auffinden von Nash-Gleichgewichten in Nullsummenspielen darstellt, wird es aufgrund seiner intuitiven Update-Regel als einfaches Lernmodell aufgefasst: Jeder Spieler wählt in jeder Periode eine beste Antwort auf die prognostizierten Aktionen seiner Mitspieler, wobei von diesen angenommen wird, dass sie eine gemischte Strategie basierend der

empirischen Verteilung der von ihnen zuvor gewählten Aktionen spielen. Spieler berücksichtigen hierbei nur ihre eigenen Auszahlungen und nicht die ihrer Mitspieler [43]. Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass, zumindest asymptotisch, vergangene Aktionen eines Spielers ein geeigneter Indikator für seine zukünftigen Aktionen darstellen [44]. Smooth Fictitious Play wurde erstmals von Fudenberg und Kreps [44] analysiert: Spieler wählen eine verrauschte beste Antwort, wobei das Rauschen mit zunehmendem Spielfortschritt abnimmt. Das Zufallsnutzenmodell bietet eine Grundlage für Smooth Fictitious Play: Auch wenn Spieler nicht zwischen verschiedenen Aktionen indifferent sind, wählen sie zufällig ihre beste Antwort aus, um sich vor Fehlern aufgrund falscher Annahmen über das Verhalten ihrer Mitspieler zu schützen [45].

## 2.2 Diskrete Entscheidungsmodelle

Den Kernpunkt diskreter Entscheidungsmodelle stellt die Hypothese individueller Nutzenmaximierung dar: Der Entscheider bewertet die ihm zur Auswahl stehenden Alternativen anhand seiner individuellen Nutzenfunktion und wählt diejenige mit dem höchsten Nutzenwert aus. Von außen ist dieses Entscheidungsverhalten nicht vollständig beobachtbar, so dass der Nutzen aus externer Perspektive betrachtet eine Zufallsvariable darstellt. Der Nutzen  $U_i$  von Alternative  $i$  besteht aus einem deterministischen Teil  $V_i$  und einem additiven stochastischen Teil  $\varepsilon_i$  [46]:

$$(1) \quad U_i = V_i + \varepsilon_i$$

Zusätzlich erlaubt die stochastische Komponente die Abbildung eingeschränkt rationalen Verhaltens seitens des Entscheiders sowie Schwierigkeiten bei der exakten Messung der entscheidungsrelevanten Alternativenmerkmale [47], [48]. Daher sind aus einer externen Perspektive nur Wahrscheinlichkeitsaussagen bezüglich der nutzenmaximalen Alternative möglich.

Spezielle diskrete Entscheidungsmodelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Annahmen in Bezug auf die Spezifikation der stochastischen Nutzenkomponente. Das Logit-Modell stellt das bekannteste diskrete Entscheidungsmodell dar und unterstellt unabhängig und identisch Gumbel-verteilte stochastische Nutzenkomponenten. Die Alternativenauswahlwahrscheinlichkeiten werden berechnet als [46]:

$$(2) \quad P_i = \frac{e^{\mu U_i}}{\sum_j e^{\mu U_j}}$$

Der Skalierungsparameter  $\mu$  der Gumbel-Verteilung wird üblicherweise auf einen Wert von eins fixiert, so dass die Parameter der Nutzenfunktion identifiziert werden können [49].

## 3. DAS MODELL

Der in dieser Arbeit gewählte Modellansatz stellt eine Mischung aus spieltheoretischen und entscheidungstheoretischen Elementen dar, was an der Art und Weise deutlich wird, wie die zukünftigen Aktionen von Wettbewerbern

abgeschätzt werden und Marktein- und -austritt modelliert wird. Infolgedessen ist dieser Abschnitt zweigeteilt: Der erste Teil stellt das statische 1-Perioden-Entscheidungsproblem jeder Gruppe von Marktteilnehmern dar, d.h. Fluggesellschaften, Flughäfen und Flugpassagieren. Der zweite Teil behandelt die Modellierung dynamischer Marktentwicklungen und umfasst Lernen und Prognose von Wettbewerberaktionen, Marktein- und -austritt sowie das verwendete Gleichgewichtskonzept.

Das Modell ist modular aufgebaut, so dass es der konkreten Problemstellung angepasst werden kann. Beispielsweise können Flughäfen als aktive Spieler ausgeblendet werden, wenn sie in staatlicher Hand oder derart reguliert sind, so dass sie keine originäre Wettbewerbsstrategie verfolgen und Kapazitätsentscheidungen nicht in der Hand des entsprechenden Flughafens liegen. Stattdessen folgen Kapazitätsentscheidungen politischen oder Umweltvorgaben staatlicher Stellen [27]. Flughafenkapazitäten und -gebühren stellen in diesem Fall fixe Inputs für den Entscheidungsprozess der Fluggesellschaften dar.

### 3.1 Das statische 1-Perioden-Entscheidungsproblem der Marktteure

#### Abkürzungen

$C_{atijm}^{ac}$	Sonstige flugzeugbezogene Kosten von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow j$ für Flugzeugtyp $m$
$C_{atklj}^p$	Sonstige passagierbezogene Kosten von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$
$C_{itam}^{ac}$	Sonstige Kosten pro Flugzeug vom Typ $m$ der Fluggesellschaft $a$ von Flughafen $i$ in Periode $t$
$C_{it}^{rf}$	Fixe S/L-Bahnkosten von Flughafen $i$ in Periode $t$
$C_{it}^{rv}$	Variable S/L-Bahnkosten von Flughafen $i$ in Periode $t$
$C_{it}^{tf}$	Fixe Terminalkosten von Flughafen $i$ in Periode $t$
$C_{it}^{tv}$	Variable Terminalkosten von Flughafen $i$ in Periode $t$
$f_{atijkl}$	Flugfrequenz von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$
$F_{mi}$	Spezifischer S/L-Bahnkapazitätsbedarf von Flugzeugtyp $m$ auf Flughafen $i$
$G_{ai}$	Menge von Fluggesellschaften, welche bei der Kapazitätszuteilung an Flughafen $i$ gegenüber Fluggesellschaft $a$ bevorrechtigt sind
$i$	Zinssatz
$P_{atklj}$	Ticketpreis von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$
$P_{it}^f$	Passagiergebühren für einsteigende Passagiere an Flughafen $i$ in Periode $t$
$P_{it}^t$	Passagiergebühren für umsteigende Passagiere an Flughafen $i$ in Periode $t$

$P_{itm}^l$	Landengebühren für Flugzeuge vom Typ $m$ an Flughafen $i$ in Periode $t$	$\beta_{briklj}^{atiklj}$	Homogenitätskoeffizient der inversen Nachfragefunktion $P_{atiklj}$ , welcher die Ähnlichkeit zwischen einem Flug von Fluggesellschaft $a$ auf der Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ und einem alternativen Flug auf einer beliebigen Flugroute in Periode $t$ misst
$P_{atikljn}$	Wahrscheinlichkeit aus Sicht von Fluggesellschaft $a$ , dass in Periode $t$ $n$ Wettbewerber auf der Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ aktiv sind	$\Delta^{atmopn} \int_{briklj}$	Zunahme der Flugfrequenz von Fluggesellschaft $b$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ in Periode $t$ , wenn Fluggesellschaft $a$ ihre angebotene Sitzplatzkapazität auf Flugroute $m \rightarrow o \rightarrow p \rightarrow n$ in Periode $t$ marginal erhöht
$q_{atikljn}$	Element $n$ des Vektors der Angebotseigenschaften von Fluggesellschaft $a$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ in Periode $t$	$\Delta^{atmopn} x_{briklj}$	Zunahme der Sitzplatzkapazität von Fluggesellschaft $b$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ in Periode $t$ , wenn Fluggesellschaft $a$ ihre angebotene Sitzplatzkapazität auf Flugroute $m \rightarrow o \rightarrow p \rightarrow n$ in Periode $t$ marginal erhöht
$S_{aijm}$	Sitzplatzkapazität von Flugzeugtyp $m$ von Fluggesellschaft $a$ auf Flug $i \rightarrow j$	$\Delta^{atmopn} x_{briklj}^t$	Prognosewert von $\Delta^{atmopn} x_{b(t+1)iklj}$ in Periode $t$
$S_{itklj}$	Anzahl der aktiven Wettbewerber auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ in Periode $t$	$\pi_{atiklj}$	Gewinn von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$
$V$	Menge der zulässigen Kombinationen von $i, k, l$ and $j$	$\pi_{atikljn}$	Gewinn von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$ , auf welcher $n$ Fluggesellschaften aktiv sind
$V_t(S_t)$	Wert von Zustand $S_t$	$\pi_a^{lp}$	Zukünftige Gewinne (LTP) von Fluggesellschaft $a$
$x_{atiklj}$	Angebotene Sitzplatzkapazität von Fluggesellschaft $a$ in Periode $t$ auf Flugroute $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$	$\pi_a^{stp}$	Kurzfristige Gewinne (STP) von Fluggesellschaft $a$
$x_t$	Entscheidung in Periode $t$	$\pi_t$	Gewinn in Periode $t$
$y_{atijm}$	Anzahl der Flugzeuge vom Typ $m$ von Fluggesellschaft $a$ auf Flug $i \rightarrow j$ in Periode $t$		
$z_{it}^r$	Angebotene S/L-Bahnpkapazität von Flughafen $i$ in Periode $t$		
$z_{it}^t$	Angebotene Terminalkapazität von Flughafen $i$ in Periode $t$		
$\alpha_{atikljn}$	Koeffizient $n$ der inversen Nachfragefunktion $P_{atiklj}$		
$\alpha_{it}^f$	Koeffizient der inversen Nachfragefunktion $P_{it}^f$		
$\alpha_{it}^t$	Koeffizient der inversen Nachfragefunktion $P_{it}^t$		
$\alpha_{itm}^l$	Koeffizient der inversen Nachfragefunktion $P_{itm}^l$		
$\phi_{atikljn}$	Koeffizient $n$ der Marktein-/austritt Wahrscheinlichkeitsfunktion (MEEP) $P_{atikljn}$		

### Fluggesellschaften

Dieser Abschnitt beschreibt das statische 1-Perioden-Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft, d.h. das Ziel der Gewinnmaximierung in einer einzelnen Periode. Die strategischen Entscheidungsvariablen konkurrierender Fluggesellschaften und Flughäfen werden als gegeben vorausgesetzt.

$$(3) \quad \text{Max } \pi_{at}^l(x_{at}, y_{at}) = \sum_{\substack{i,k,l,j \\ i \neq j, j \neq k, k \neq l, \\ i \neq k, j \neq l, i \neq l}} \left( (P_{atiklj}(\dots) - C_{atiklj}^p - P_{it}^f(z^t) - P_{kt}^t(z^t) - P_{lt}^t(z^t)) * x_{atiklj} \right) +$$

$$(4) \quad \sum_{\substack{i,k,j \\ i \neq k, \\ k \neq j, i \neq j}} \left( (P_{atikkj}(\dots) - C_{atikkj}^p - P_{it}^f(z^t) - P_{kt}^t(z^t)) * x_{atikkj} \right) +$$

$$(5) \quad \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \left( (P_{atijij}(\dots) - C_{atijij}^p - P_{it}^f(z^t)) * x_{atijij} \right) -$$

$$(6) \quad \sum_{\substack{i,j,m \\ i \neq j}} \left( C_{atijm}^{ac} + P_{itm}^l(z^r) \right) * y_{atijm}$$



Unter den Nebenbedingungen:

$$(7) \quad \sum_{\substack{k,l \\ i \neq j, k \neq l, \\ i \neq l}} (x_{atijkl} + x_{atkijl} + x_{atklji}) \leq \sum_m S_{aijm} * y_{atijm} \quad \forall i, j$$

$$(8) \quad y_{atijm} = y_{atjim} \quad \forall i, j, m; i \neq j$$

$$(9) \quad 2 * \sum_{\substack{a \in G_{ai} \cup \{a\}, j, m \\ i \neq j}} F_{mi} * y_{atijm} \leq z_{it}^r \quad \forall i$$

$$(10) \quad \sum_{\substack{a \in G_{ai} \cup \{a\}, k, l, j \\ i \neq j, j \neq k, k \neq l, \\ i \neq k, j \neq l, i \neq l}} (2 * (x_{atijkl} + x_{atkijl}) + x_{atikjl} + x_{atklji}) + \\ \sum_{\substack{a \in G_{ai} \cup \{a\}, k, l \\ i \neq k, k \neq l, \\ i \neq l}} (2 * x_{atkiil} + x_{atikkil} + x_{atklil}) + \sum_{\substack{a \in G_{ai} \cup \{a\}, j, d \\ i \neq j}} (x_{atijj} + x_{atjjii}) \leq z_{it}^l \quad \forall i$$

$$(11) \quad \sum_m y_{atijm} \geq f_{atijkl} \quad \forall i, k, l, j \quad i \neq j, i \neq k, i \neq l$$

$$(12) \quad \sum_m y_{atijm} \geq f_{atkijl} \quad \forall i, k, l, j \quad i \neq j, k \neq l$$

$$(13) \quad \sum_m y_{atijm} \geq f_{aklij} \quad \forall i, k, l, j \quad i \neq j, i \neq k, j \neq k, j \neq l$$

$$(14) \quad x_{atijkl} \geq 0 \quad \forall i, k, l, j, \\ y_{atijm} \in N \cup 0 \quad \forall i, j, m$$

(3) bis (6) beschreiben die 1-Perioden-Zielfunktion einer Fluggesellschaft. Ganzzahligkeitsbedingungen können falls notwendig durch eine entsprechende Skalierung der Perioden relaxiert werden, so dass deren Verletzung akzeptiert werden kann, z.B. kann eine Periode ein Jahr statt einen Monat oder einer Woche betragen. Dies hängt insbesondere von der Größe und Komplexität der konkreten Problemstellung ab. Strategische Entscheidungsvariablen einer Fluggesellschaft sind die angebotene Sitzplatzkapazität pro Flugroute sowie die Anzahl der Flüge zwischen zwei Flughäfen. Aus Gründen einer einheitlichen Darstellung wird die angebotene Sitzplatzkapazität unabhängig von der tatsächlichen Anzahl der Zwischenstopps grundsätzlich mit vier tief gestellten Kleinbuchstaben redundant indexiert. Passagierbezogene Kosten werden unterteilt in passagierbezogene Flughafenengebühren sowie sonstige passagierbezogene Kosten. Analog zu [50] werden Flughafenengebühren in Passagiergebühren, welche an den Startflughafen bezahlt werden, und flugzeugtypbezogene Landegebühren, welche an den Zielflughafen abgeführt werden, unterteilt. Passagiergebühren werden weiterhin nach Einsteiger und Umsteiger unterschieden. Dieses einfache Gebührenschemata ermöglicht ausreichend Flexibilität zur zusätzlichen Berücksichtigung weiterer Aspekte, wie z.B. Nacht- und Lärmgebühren. Die Nachfragefunktion, bzw. die inverse Nachfragefunktion  $P^a(\dots)$  ist pro Flugroute definiert, wobei (...) die unabhängigen Variablen der inversen Nachfragefunktion bezeichnet, wie angebotene Sitzplatzkapazität, Flugdauer, Anzahl der Zwischenstopps, sowie die angebotene Sitzplatzkapazität und Anzahl der Flüge von konkurrierenden Fluggesellschaften. (3) bezieht sich auf Flüge mit zwei Zwischenstopps, (4) bezieht sich auf Flüge mit einem Zwischenstopp und (5) bezieht sich auf Direktflüge. Das Modell kann analog auf Flüge mit mehr als zwei Zwischenstopps erweitert werden, jedoch umfassen die meisten Flüge nur maximal zwei Zwischenstopps, so dass ein expliziter Einbezug solcher Flüge nur die Darstellung verkomplizieren würde, ohne

neue inhaltliche Einsichten zu gewinnen. (6) beschreibt die Fixkosten eines Fluges, welche aus den Betriebskosten eines Flugzeuges und den entsprechenden Landegebühren bestehen.

(7) bis (13) bilden die Nebenbedingungen, welche eine Fluggesellschaft in ihrer Netzwerkplanung berücksichtigen muss. Nebenbedingung (7) stellt sicher, dass ausreichend Flugzeugkapazität auf jedem Flug bereit steht. Nebenbedingung (8) sorgt für einen ausgeglichenen Flugzeugmix in beide Richtungen, wodurch die nachfolgende taktische und operative Planung vereinfacht wird [5]. (9) beschreibt die Kapazitätsbeschränkungen an jedem Flughafen, wobei das Summenzeichen die betrachtete Fluggesellschaft sowie diejenigen umfasst, welche z.B. aufgrund von Großvaterrechten gegenüber der betrachteten bevorrechtigt sind. Jedes Flugzeug benötigt sowohl für seinen Start als auch für seine Landung ein gewisses Maß an Kapazität, welches durch  $F_{mi}$  abgebildet wird, so dass die Kapazitätsinanspruchnahme sowohl flugzeugtyp- als auch flughafenspezifisch modelliert werden kann. (10) beschreibt die zur Verfügung stehende Terminalkapazität gegliedert nach Flügen mit zwei, einem und keinem Zwischenstopp, wobei hier wie bei (9) Bevorrechtigungen zu beachten sind. Umsteigepassagiere nutzen die Terminalkapazität für Ankunft und Abflug, wohingegen Ein- und Aussteiger die Terminalkapazität nur jeweils einmal belasten. (11) bis (13) synchronisieren die Anzahl der Flüge zwischen zwei Flughäfen mit der entsprechenden Flugfrequenz der inversen Nachfragefunktion, d.h. erstere darf nicht unter letzterer liegen. (14) definiert den Wertebereich der strategischen Entscheidungsvariablen.

Da Gegenstand dieser Arbeit die langfristige strategische Netzwerkplanung einer Fluggesellschaft ist, werden keine komplexen Preisstrategien berücksichtigt [27]. Verschiedene Preissegmente wie beispielsweise Economy, Business und First Class sind in der Modellformulierung aus

Gründen der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt, jedoch kann dies durch Vervielfachung der O-D Relationen entsprechend der Anzahl der verschiedenen Preissegmente mit einer jeweils preissegmentspezifischen inversen Nachfragefunktion erreicht werden.

### Flughäfen

Dieser Abschnitt beschreibt das statische 1-Perioden-Entscheidungsproblem eines Flughafens mit einer originären Wettbewerbsstrategie, d.h. das Ziel der Gewinnmaximierung in einer einzelnen Periode.

$$(15) \quad \text{Max } \pi_{it}^{ap} (z_{it}^r, z_{it}^t) = \sum_{a,j,m} (P_{itm}^l(\dots) - C_{itam}^{ac}) * y_{atjim} +$$

$$\sum_{\substack{a,k,l,j \\ i \neq j, j \neq k, k \neq l, \\ i \neq k, j \neq l, i \neq l}} ((P_{it}^t(\dots) - C_{it}^t) * (x_{atkiil} + x_{atklil}) + (P_{it}^f(\dots) - C_{it}^f) * x_{atijkl}) +$$

$$(16) \quad \sum_{\substack{a,k,l \\ i \neq k, \\ k \neq l, i \neq l}} ((P_{it}^t(\dots) - C_{it}^t) * x_{atkiil} + (P_{it}^f(\dots) - C_{it}^f) * x_{atklil}) +$$

$$\sum_{\substack{a,j \\ i \neq j}} ((P_{it}^f(\dots) - C_{it}^f) * x_{atijij}) -$$

$$(17) \quad C_{it}^{tf} - C_{it}^{tv} * z_{it}^t -$$

$$(18) \quad C_{it}^{rf} - C_{it}^{rv} * z_{it}^r$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$(19) \quad 2 * \sum_{\substack{a,j,m \\ i \neq j}} F_{mi} * z_{atjim} \leq z_{it}^r$$

$$(20) \quad \sum_{\substack{a,k,l,j \\ i \neq j, j \neq k, k \neq l, \\ i \neq k, j \neq l, i \neq l}} (2 * (x_{atkiil} + x_{atklil}) + x_{atijkl} + x_{atklji}) +$$

$$\sum_{\substack{a,k,l \\ i \neq k, k \neq l, \\ i \neq l}} (2 * x_{atkiil} + x_{atklil} + x_{atklil}) + \sum_{\substack{a,j \\ i \neq j}} (x_{atijij} + x_{atjiii}) \leq z_{it}^t$$

$$(21) \quad z_{it}^r, z_{it}^t \geq 0$$

(15) bis (18) beschreiben die 1-Perioden-Zielfunktion eines Flughafens. Die Entscheidungsvariablen umfassen die angebotene Terminal- und S/L-Bahnapazität, so dass sie gegenüber den Fluggesellschaften entsprechend ihrer angebotenen Kapazität Passagier- und Landegebühren kommunizieren. Der Zusammenhang zwischen angebotener Kapazität und Gebühren werden durch flughafenspezifische inverse Nachfragefunktionen mit unabhängigen Variablen (...) beschrieben. Um die Modelldarstellung übersichtlich zu gestalten werden Passagiergebühren unabhängig von deren Reiseziel nur nach Ein-/Aussteiger sowie Umsteiger unterschieden, die Struktur kann jedoch beliebig verfeinert werden. Entsprechend werden Landegebühren nur nach Flugzeugtyp unterteilt. (15) stellt die flugzeugbezogenen und (16) die passagierbezogenen Einnahmen und Ausgaben dar. (17) und (18) modellieren die Kosten der Bereitstellung von Terminal- und S/L-Bahnapazität, wobei diese jeweils aus einem fixen und einem variablen Anteil entsprechend des angebotenen Kapazitätsniveaus bestehen.

(19) bis (21) stellen die Nebenbedingungen dar, die jeder Flughafen bei seinen Entscheidungen zu berücksichtigen hat. Nebenbedingung (19) stellt sicher, dass die Anzahl der Flugbewegungen nicht seine S/L-Bahnapazität überschreitet und (20) verlangt, dass seine Terminalkapazität mindestens dem Passagieraufkommen entspricht. (21)

definiert den Wertebereich der strategischen Entscheidungsvariablen.

### Passagiere

Die Passagiernachfrage wird pro Fluggesellschaft und Flugroute modelliert. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz basiert auf dem Grundgedanken des sogenannten „Full Price Demand Model“ [51], [16], [11] und dem Produkteigenschaftsansatz von Lancaster [52]. Die Nachfrage einer Fluggesellschaft ist sowohl von der angebotenen Sitzplatzkapazität abhängig, als auch von der Qualität des Angebots, z.B. in Bezug auf Preis, Flugdauer und -frequenz, Anzahl Zwischenstopps und Komfort [53], [54], [55]. Zusätzlich spielen solche Flüge eine Rolle, welche in einer Substitutionsbeziehung zum betrachteten Flug stehen, wobei der Grad der Substitution je nach Flugroute und Angebotsqualität variiert. Dieser Ansatz ermöglicht die Abbildung von Wettbewerb mit homogenen, als auch mit heterogenen Produkten, wobei letzterer für die betrachtete Aufgabenstellung von größerer Bedeutung ist. Oum et al. [16] sprechen in diesem Zusammenhang von Fluggesellschaften als Mehrproduktunternehmen, welche O-D Relationen und entsprechende Flugrouten auswählen, welche sie in ihr Angebot aufnehmen.

Fluggesellschaften werden als Cournot-Wettbewerber

modelliert. Ihre strategischen Entscheidungsvariablen stellen die Anzahl an Flügen sowie die angebotene Sitzplatzkapazität auf einer Flugroute dar, so dass die inverse Nachfragefunktion definiert wird als:

$$(22) \quad P_{atiklj} = \alpha_{atiklj1} - \alpha_{atiklj2} * \sum_{\substack{b, \\ mopn \in V}} \beta_{btmopn}^{atiklj} * x_{btmopn} + \sum_{n>2} \alpha_{atikljn} * q_{atikljn}$$

Das Summenzeichen in (22) stellt die gewichtete Summe der Flugrouteneigenschaften dar und beschreibt die Passagierpräferenzen hinsichtlich der Angebotsqualität. Der Koeffizient  $\beta_{btiklj}^{atiklj}$  entspricht einem Homogenitätsmaß und ist für Werte zwischen null und eins definiert. Je näher dieser Koeffizient sich einem Wert von eins nähert, desto stärker sind die Ähnlichkeiten und damit das Substitutionspotenzial zwischen zwei Angeboten aus Sicht eines Passagiers.

Ähnlichkeiten zwischen zwei Angeboten hängen in diesem Modell von der Euklidischen Distanz der Vektoren der entsprechenden Angebotsqualitäten ab, so dass  $\beta_{btiklj}^{atiklj}$  definiert ist als:

$$(23) \quad \beta_{btmopn}^{atiklj} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sum_{n>2} \alpha_{atikljn} * (q_{btmopn} - q_{atikljn})^2}}$$

Um den Rechenaufwand in großen Anwendungen zu begrenzen, kann für  $\beta_{btiklj}^{atiklj}$  eine untere Grenze definiert werden, ab der ein alternatives Angebot als relevantes Substitut betrachtet wird.

(22) und (23) verdeutlichen, wie das Preissetzungsverhalten auf einer bestimmten Flugroute durch die Eigenschaften anderer Flugrouten beeinflusst wird: Je höher das Substitutionspotential, desto höher ist der Preisdruck, so dass die erzielbaren Ticketpreise sowohl von der Qualität der betrachteten Flugroute abhängen, als auch von der Qualität alternativer Flugrouten.

### 3.2 Modellierung dynamischer Marktentwicklungen

#### Empirische Reaktionsfunktion und Lernprozess

Reaktionen von Wettbewerbern auf eigene Aktionen werden in dieser Arbeit nicht durch Introspektion modelliert, d.h. sich in die Lage des anderen versetzen, dessen Entscheidungsproblem lösen und hierbei wiederum alle Interdependenzen mit anderen Wettbewerbern beachten, so dass auf analytischem Weg seine Reaktionsfunktion bestimmt wird, welche dann in das eigene Entscheidungsproblem eingesetzt wird, um dann gemäß der eigenen Zielfunktion eine optimale Entscheidung zu treffen. Diese Vorgehensweise wäre bereits in einer Vielzahl von realistischen Fällen auf Grund der vorliegenden Problemstruktur kaum durchführbar; zudem unterstellt dieser Ansatz perfekt rationale Entscheider mit unbeschränkter Problemlösungskapazität. Daher stellt der Ansatz dieser Arbeit eine zumindest teilweise Abkehr von den zuvor definierten Entscheidern dar, hin zu Verhalten, welches stärker auf in der Vergangenheit beobachteten Aktionen basiert: Jede

Fluggesellschaft schätzt das zukünftige Verhalten ihrer Wettbewerber auf Basis sogenannter empirischer Reaktionsfunktionen (Empirical Reaction Function, ERF) ein, welche individuelles Verhalten lokal approximieren:

$$(24) \quad x_{btiklj} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} x_{b(t-1)iklj} + \Delta^{atmopn} x_{btiklj} * \\ \left( x_{atmopn} - x_{a(t-1)mopn} \right); 0 \end{array} \right\}$$

$$\forall b \neq a; mopn, iklj \in V$$

Rosenthal [55] plädiert in seiner Arbeit anstatt einer komplexen spieltheoretischen Analyse für einen entscheidungstheoretischen Ansatz, um die strategischen Reaktionen von Wettbewerbern einzuschätzen, wobei Kreps und Wilson [56] seine ad-hoc Einschätzung des Wettbewerberverhaltens kritisieren. In dieser Arbeit basiert die Einschätzung des Wettbewerberverhaltens auf tatsächlich in der Vergangenheit beobachteten Aktionen, wobei jeder Spieler über eine Anfangseinschätzung verfügt, welche durch exponentielle Glättung jede Periode aktualisiert wird:

$$(25) \quad \Delta^{atmopn} x_{b(t+1)iklj} = (1 - \delta) * \Delta^{atmopn} x_{btiklj}^{t-1} + \delta * \Delta^{atmopn} x_{btiklj} \quad \forall b; mopn, iklj \in V$$

Der Parameter  $\delta$  liegt zwischen null und eins: Je näher er an eins liegt, desto stärker ist der Einfluss näher zurückliegender Beobachtungen auf die Einschätzung zukünftigen Verhaltens.

Flugfrequenz ist eine wichtige Variable, welche die Angebotsqualität bestimmt und dadurch auch (23) sowie den zu erzielenden Ticketpreis (22) beeinflusst. Das ERF-Konzept findet daher Anwendung zur Prognose der angebotenen Flugfrequenz von Wettbewerbern auf verschiedenen Flugrouten (vergleiche mit (24)):

$$(26) \quad f_{btiklj} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} f_{b(t-1)iklj} + \Delta^{atmopn} f_{btiklj} * \\ \left( x_{atmopn} - x_{a(t-1)mopn} \right); 0 \end{array} \right\}$$

$$\forall b \neq a; mopn, iklj \in V$$

Individuelle Einschätzungen bezüglich zukünftigen Wettbewerberverhaltens werden entsprechend (25) jede Periode aktualisiert. Weitere Angebotseigenschaften umfassen Flugdauer, Anzahl Zwischenstopps, Komfort und Ticketpreis. Die ersten drei Variablen sind implizit in der Definition „Sitzplatzkapazität pro Flugroute“ enthalten und die letztgenannte Variable ist abhängig, da Fluggesellschaften als Cournot-Wettbewerber modelliert werden. Verschieden Flugzeugtypen, welche sich auf einer gegebenen Flugroute in Komfort und Flugdauer unterscheiden, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt, können aber bei Bedarf ohne Probleme in das Modell integriert werden.

Wettbewerber sind aus Sicht einer Fluggesellschaft durch ihre ERFs hinreichend beschrieben. Fluggesellschaften werden in dieser Arbeit in reale und virtuelle unterteilt, welche zusätzlich nach Typ von Fluggesellschaft unterschieden werden können, wie z.B. Full Service Network Carrier (FSNC) und LCC. Reale Fluggesellschaften sind zu einem gegebenen Zeitpunkt auf einer Flugroute aktiv, wohingegen virtuelle Fluggesellschaften zurzeit nicht aktiv sind, aber in Zukunft aktiv sein können. Die ERFs realer

Fluggesellschaften werden auf Basis ihres eigenen Verhaltens aktualisiert, wohingegen die ERFs virtueller Fluggesellschaften auf Basis des durchschnittlich beobachteten Verhaltens von Fluggesellschaften ihres Typs aktualisiert werden.

Die Nachfrage nach Terminal- und S/L-Bahnpkapazität stellt eine aus Passagier- und Flugzeugbewegungen abgeleitete Nachfrage dar. Diese wird auf Basis von inversen Nachfragefunktionen  $P_{it}^f(z_{it}^f)$ ,  $P_{it}^s(z_{it}^s)$  und  $P_{im}^l(z_{im}^l)$  modelliert, welche von der angebotenen Terminal- und S/L-Bahnpkapazität eines Flughafens abhängig sind. Inverse Passagiernachfragefunktionen basieren auf umfangreichen empirischen Datensätzen, wohingegen die inversen Nachfragefunktionen von Fluggesellschaften sich auf eine kleine Auswahl an Fluggesellschaften beziehen, welche sich bezüglich ihrer individuellen Eigenschaften von Fall zu Fall erheblich unterscheiden können und im Zeitablauf nicht zu vernachlässigenden Schwankungen unterliegen kann, da neue Fluggesellschaften in den Markt eintreten und alte den Markt verlassen bzw. einen Wandel vollziehen. Daher wird die Struktur der ERFs verwendet, um die inversen Nachfragefunktionen von Fluggesellschaften abzubilden und jede Periode zu aktualisieren:

$$(27) \quad \begin{aligned} P_{it}^f &= P_{i(t-1)}^f + \alpha_{it}^f * (z_{i(t-1)}^f - z_{it}^f), \\ P_{it}^s &= P_{i(t-1)}^s + \alpha_{it}^s * (z_{i(t-1)}^s - z_{it}^s), \\ P_{im}^l &= P_{i(t-1)m}^l + \alpha_{im}^l * (z_{i(t-1)}^l - z_{im}^l) \quad \forall m \end{aligned}$$

Die Parameter  $\alpha_{it}^f$ ,  $\alpha_{it}^s$  und  $\alpha_{im}^l$  werden entsprechend (25) jede Periode aktualisiert. Der Wettbewerb zwischen Flughäfen wird in diesem Modell im Vergleich zum Wettbewerb zwischen Fluggesellschaften hauptsächlich wegen ihrer fixen Lage und dem dadurch beschränkten strategischen Handlungsraum als schwach ausgeprägt angenommen, so dass Flughäfen als regional beschränkte Monopolisten modelliert werden. Zunehmende Distanz zwischen den Flughäfen und bindende Kapazitätsrestriktionen vermindern den Wettbewerbsdruck zwischen Flughäfen zusätzlich.

### Marktein-/austritt Wahrscheinlichkeitsfunktion

Eine Reihe von spieltheoretischen Lernmodellen basieren ausschließlich auf der Beobachtung vergangenen Verhaltens, so dass der Lernmechanismus vergleichsweise einfach aufgebaut ist. In der Realität nutzen erfahrene Spieler zusätzlich Informationen über ihre Mitspieler, insbesondere in Bezug auf deren mögliche Auszahlungen und Rationalität [40]. Informationen über vergangene Aktionen werden in dieser Arbeit durch das ERF-Konzept abgebildet. Zusätzliche Informationen über das Verhalten von Wettbewerbern, z.B. deren Auszahlungen und Rationalität werden durch die sogenannte Marktein-/austritt Wahrscheinlichkeitsfunktion (Market Entry/Exit Probability Function, MEEP) beschrieben, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Anzahl an Marktteilnehmern auf einer bestimmten Flugroute aktiv sind. Marktein- und -austritt werden aus Sicht der Marktteilnehmer als ein „Zug der Natur“ modelliert, so dass diese prinzipiell Zufallsergebnisse darstellen, welche durch entsprechende Aktionen von Marktteilnehmern zum Teil beeinflusst werden können. Die Höhe der in einem Markt erzielbaren Gewinne

stellt eine wichtige Einflussgröße zur Erklärung der Anzahl der in Zukunft zu erwartenden Marktteilnehmer dar: Je höher der in einem Markt erzielbare Gewinn ist, desto mehr zukünftige Marktteilnehmer werden angezogen, bzw. desto wahrscheinlicher ist es, dass bisherige Marktteilnehmer in Zukunft in diesem Markt aktiv bleiben. Aus der Sicht eines einzelnen Marktteilnehmers sind „durchschnittlich“ in einem Markt zu erzielenden Gewinne nicht vollständig beobachtbar, so dass in dieser Arbeit jeweils die Sicht eines einzelnen Marktteilnehmers eingenommen wird und aufgrund der tendenziell positiven Korrelation der individuellen Gewinne verschiedener Wettbewerber in einem bestimmten Markt der Zusammenhang zwischen den von ihm zu erzielenden Gewinnen als Proxy-Variable und der Anzahl der zukünftigen Marktteilnehmer abgeleitet wird. Dieser Ansatz zur Modellierung der Anzahl zukünftiger Marktteilnehmer entspricht Rosenthals [55] Vorgehensweise, so dass die Wettbewerbsintensität eines Marktes als Zufallseignis beschrieben wird, wobei die verschiedenen Marktteilnehmer individuelle Wahrscheinlichkeitseinschätzungen bilden. Jeder Marktteilnehmer schätzt den empirischen Zusammenhang zwischen seinem aktuell maximal erzielbaren Gewinn und der Anzahl der zukünftigen Wettbewerber in einem bestimmten Markt:

$$(28) \quad P_{atikljn} = \frac{e^{U_{atikljn}}}{\sum_m e^{U_{atikljm}}} \quad \forall iklj \in V$$

$$(29) \quad U_{atikljn} = \phi_{atiklj1} + \phi_{atiklj2} * \pi_{a(t-1)ikljn} \quad \forall iklj \in V; \phi_{atiklj2} \geq 0$$

Üblicherweise nimmt mit ansteigendem Index  $n$   $\phi_{atiklj1}$  ab und  $\phi_{atiklj2}$  zu, falls die Anzahl der zukünftigen Wettbewerber mit den erzielbaren Gewinnen zunimmt. (30) und (31) zeigen, dass die Kosten zur Abwehr von Wettbewerb je nach Fluggesellschaft unterschiedlich sind und sich in den Parametern von (32) niederschlagen, d.h. ob ein Wettbewerber eher stark oder schwach ist. Dadurch werden z.B. Überlegungen zur Abwehr zukünftiger Konkurrenten direkt mit dem individuellen Gewinnstreben einer Fluggesellschaft verknüpft. Der grundsätzliche Zusammenhang, welcher durch die MEEPs beschrieben wird, ist in einem Markt allgemein bekannt, die individuell geschätzten Funktionen sind nur dem entsprechenden Marktteilnehmer bekannt.

### Heuristisches Gleichgewichtskonzept

Wettbewerbsstrategien von Flughäfen basieren in diesem Modell auf inversen Nachfragefunktionen der Fluggesellschaften (27). Sie agieren als lokale Monopolisten und ihre Aktionen variieren a priori nicht von Periode zu Periode, da sie zeitlich unabhängig sind. Aus diesem Grund ist für Flughäfen das Ziel der Periodengewinnmaximierung äquivalent zu Kapitalwertmaximierung.

Dies gilt nicht für die Zielfunktion einer Fluggesellschaft, da zeitliche strategische Interdependenzen existieren, welche durch ERFs (24), (26) und MEEPs (28) abgebildet werden. Marktzutrittsabwehr stellt ein Beispiel solcher zeitlicher strategischer Interdependenzen dar. Daher stehen in diesem Kapitel Fluggesellschaften im Vordergrund.

Abbildung 1 zeigt einen stochastischen Entscheidungsprozess mit unendlichem Zeithorizont. Ein Markt wird jeweils durch eine einzelne Flugroute  $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$  definiert.



Verschiedene Märkte sind durch inverse Passagiernachfragefunktionen (22) und ERFs (24), (26) verbunden. Kreise entsprechen Zustände  $S_{tiklj} = n$ , welche einem 1-

Perioden-Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft zum Zeitpunkt  $t$  in Markt  $i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j$  mit  $n$  Wettbewerbern entsprechen ((3) - (14), (24), (26) und (28)). Da in den meisten Fällen nur wenige verschiedene Fluggesellschaften zu einem Zeitpunkt in einem Markt aktiv sind, ist der Wert von  $n$  typischerweise klein. Zu Beginn jedes neuen Planungszyklus einer Fluggesellschaft werden die strategischen Entscheidungsvariablen für jede Periode im Voraus festgelegt, so dass der erwartete Kapitalwert maximiert wird; hierbei wird auf den Informationsstand zurückgegriffen, welcher zu Beginn des Planungszyklus vorliegt. Verschiedene Zustände unterscheiden sich hinsichtlich ihres Zeitindex  $t$  und der Anzahl  $n$  der Wettbewerber mit spezifischen, aus Sicht der betrachteten Fluggesellschaft entscheidungsrelevanten Charakteristika ( $\rightarrow$  ERFs). Flughäfen agieren definitionsgemäß zeitlich vor den Fluggesellschaften und ihr Entscheidungsproblem ist durch (15) bis (21) und (27) gegeben. Daher sind alle Fluggesellschaften zum Zeitpunkt ihrer Entscheidung über die verfügbaren Kapazitäten und relevanten Gebühren an allen Flughäfen informiert.

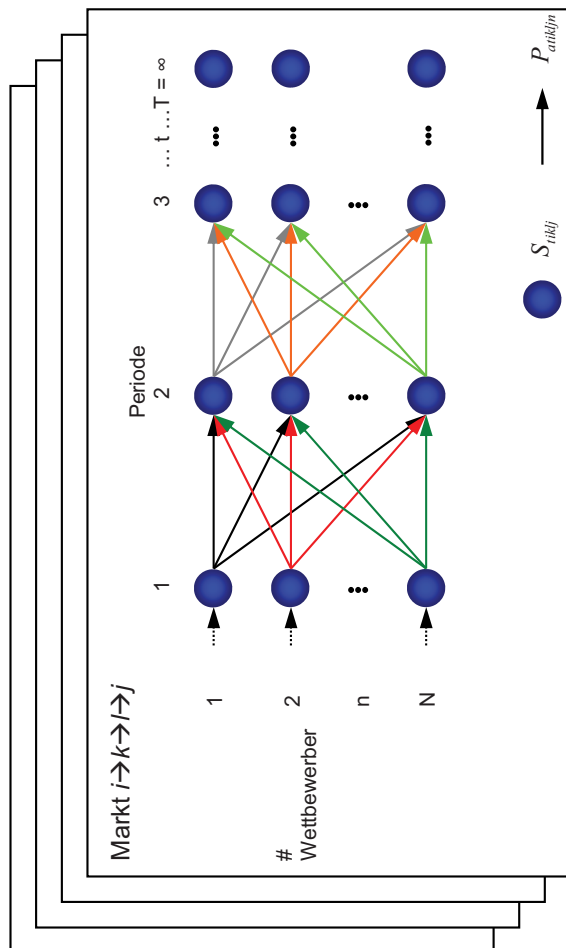


Abbildung 1: Strategisches Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft

Pfeile, welche Zustände verbinden, bezeichnen Übergangswahrscheinlichkeiten  $P_{atikljin}$  (MEEPs) zwischen diesen Zuständen. Gepunktete Pfeile beschreiben die

initialen Zustandswahrscheinlichkeiten von Periode 1. Die Werte von Pfeilen gleicher Farbe addieren sich zu einem Wert von 1.

Ein dynamisches stochastisches Programm umfasst typischerweise maximal zwei bis drei verschiedene Perioden, sofern es für realitätsnahe Probleme noch handhabbar sein soll [57]. Die Komplexität des in Abbildung 1 dargestellten Entscheidungsproblems nimmt mit der Anzahl modellierter Perioden deutlich zu, jedoch stellt die Begrenzung des Problems auf einige (wenige) Perioden aufgrund von Reputationseffekten keine zufriedenstellende Lösung dar: Eine Fluggesellschaft hat tendenziell einen Anreiz, sich im Vergleich zu 1-Perioden-Gewinnmaximierung in frühen Perioden aggressiver zu Verhalten, d.h. auf potentielle Gewinne zu verzichten, um in späteren Perioden geringeren Wettbewerbsdruck aufgrund geringerer Wettbewerberzahl ausgesetzt zu sein und dadurch Aussicht auf höhere Gewinne zu haben. Gibt es eine endgültig letzte Periode im Modell, so hat die Fluggesellschaft keinen Anreiz mehr, ihre Reputation über diese Periode hinaus aufrecht zu erhalten („Reputation Milking“), jedoch ist diese „letzte“ Periode nur modellhaft und in der Realität normalerweise nicht gegeben. Daher besteht die Tendenz, in dieser Periode Zustände mit einer geringeren Anzahl an Wettbewerbern zu unterbewerten (siehe auch (33)). Solange die Anzahl der modellierten Perioden innerhalb eines Planungszyklus ausreichend hoch ist und weit über den Beginn des nächsten Planungszyklus hinausreicht, stellt dies kein großes Problem dar, jedoch ist gerade diese Vorgehensweise aus rechentechnischer Sicht als problematisch einzuschätzen. Das Ziel dieses Abschnittes ist es daher, eine geeignete Approximation für das in Abbildung 1 dargestellte Entscheidungsproblem zu entwickeln.

Methodische Grundlage der Approximation ist Bellmans Optimalitätsprinzip (z.B. [58]):

$$(33) \quad x_t^*(S_t) = \max_{x_t} \left( \pi_t(S_t, x_t) + \frac{1}{1+i} * V_{t+1}(S_{t+1}) \right)$$

$x_t$  bezeichnet die Entscheidung und  $S_t$  den aktuellen Zustand in Periode  $t$ .  $x_t$  wird so gewählt, dass die Summe aus 1-Perioden-Gewinn  $\pi_t(x_t, S_t)$  sowie dem abdiskontierten Wert des dadurch erreichenden Zustandes  $S_{t+1}$ ,

welcher durch  $\frac{1}{1+i} * V_{t+1}(S_{t+1})$  gegeben ist, maximiert

wird. Abbildung 2 und 3 verdeutlichen diesen Ansatz. Nachfolgend wird der 1-Perioden-Gewinn als „kurzfristiger Gewinn“ (STP) und der abdiskontierte Wert von Zustand  $S_{t+1}$  als „langfristiger Gewinn“ (LTP) bezeichnet, siehe auch (33).

STP wird als Spiel modelliert, welches zwei Perioden umfasst, so dass Reputationseffekte berücksichtigt werden können und LTP wird als Nash-Gleichgewicht eines unendlich wiederholten Spiels mit abdiskontierten Auszahlungen modelliert. Das Stufenspiel des LTP umfasst wie STP zwei Perioden, um Reputationseffekte einbeziehen zu können. Das wiederholte Spielen des Nash-Gleichgewichts des Stufenspiels stellt ein Nash-Gleichgewicht des unendlich wiederholten Spiels dar [39].

Als Nebenbedingung wird die Gleichheit der Entscheidung in Periode  $t$  und  $(t+1)$  im LTP Stufenspiel gefordert. Sofern der Zinssatz null beträgt, hat dies keine Auswirkungen auf das Nash-Gleichgewicht, ist der Zinssatz positiv, so ist die Strategie kein Nash-Gleichgewicht mehr, sondern nur eine Approximation, welche mit zunehmendem Zinssatz schlechter wird. Trotz dieses Defizits wird aus Gründen, welche im Folgenden noch erläutert werden, diese Approximation verwendet. Zudem ist der relevante Zinssatz üblicherweise gering.

Das STP-Entscheidungsproblem besteht soweit wie möglich aus realen Fluggesellschaften und wird durch virtuelle entsprechend ergänzt. Das STP-Entscheidungsproblem bildet den unmittelbare Wettbewerb zwischen aktiven Fluggesellschaften ab. Das LTP-Entscheidungsproblem modelliert die langfristige strategische Position einer Fluggesellschaft im Wettbewerb, und es werden ausschließlich virtuelle Wettbewerber verwendet. Um die Verbindung zwischen STP- und LTP-Entscheidungsproblem herzustellen, sind die Entscheidungen einer Fluggesellschaft in Periode 2 und  $t$  definitionsgemäß identisch, so dass die Tendenz zum Reputation Milking in Periode 2 unterbunden wird.

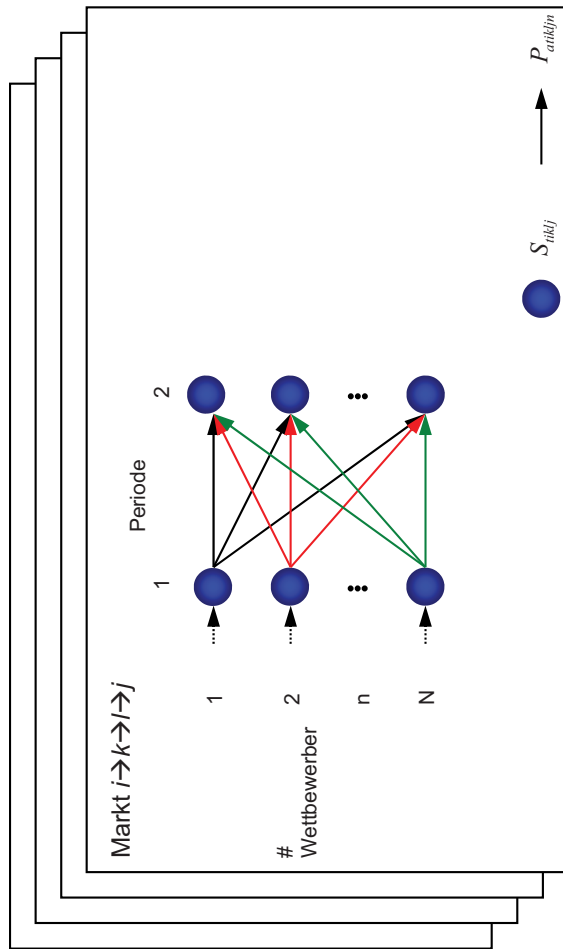


Abbildung 2: Modellierung des STP-Entscheidungsproblems einer Fluggesellschaft

Das STP-Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft  $a$  kann formalisiert werden als:

$$(34) \quad \text{Max } \pi_a^{stp}(x_a, y_a) = \sum_{iklj \in V, n, m} \left( P_{a1ikljn} * \left( \pi_{a1ikljn} + \frac{1}{1+i} * P_{a2ikljm} * \pi_{a2ikljm} \right) \right)$$

Unter den Nebenbedingungen: (7) – (14)

$$(35) \quad x_{a2} = x_{at} \quad \forall t > 2$$

$P_{a1ikljn}$  entsprechen initialen Zustandswahrscheinlichkeiten für Periode 1 und sind als gepunktete Pfeile in Abbildung 2 dargestellt.  $P_{a2ikljm}$  sind vom erreichbaren Gewinn und damit von der Anzahl der Wettbewerber in Periode 1 der betrachteten Fluggesellschaft abhängig. Anders als im Fall von (3) – (6) wird in (34) der Gewinn einer Fluggesellschaft zur besseren Übersicht nach Flugrouten ( $iklj$ ) differenziert.  $\pi_{a1ikljn}$  enthält implizit die ERFs der entsprechenden Fluggesellschaft. Im Nash-Gleichgewicht maximiert jede Fluggesellschaft (34) unter den Nebenbedingungen (7) – (14) und (35).

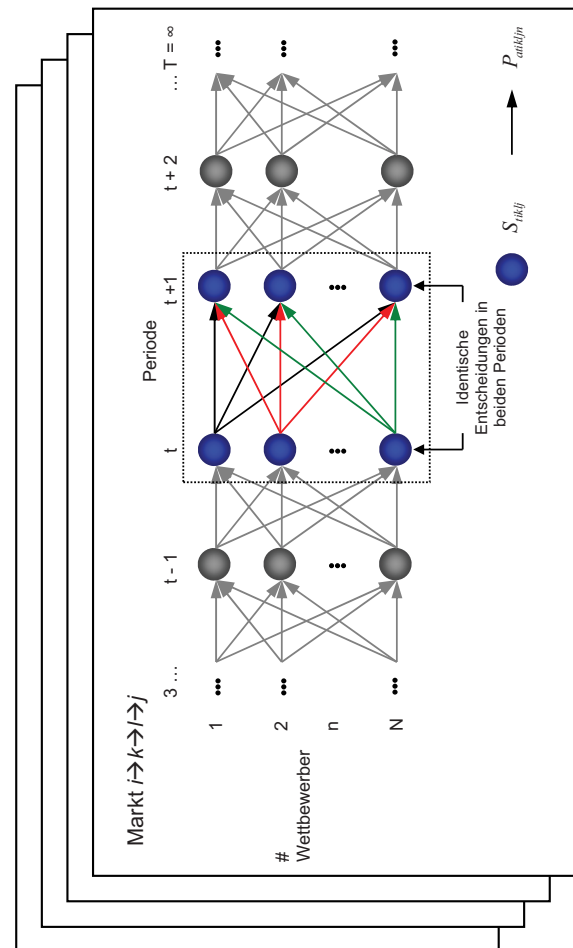


Abbildung 3: Modellierung des LTP-Entscheidungsproblems einer Fluggesellschaft

Das LTP-Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft  $a$  kann formalisiert werden als:

$$(36) \quad \text{Max } \pi_a^{lp}(x_a, y_a) = \frac{1}{i(1+i)^2} \sum_{iklj \in V, n, m} \left( P_{atikljn} * \left( \pi_{atikljn} + \frac{1}{1+i} * P_{a(t+1)ikljm} * \pi_{a(t+1)ikljm} \right) \right)$$

Unter den Nebenbedingungen: (7) – (14) und (35)

$P_{atikljn}$  stellen die Zustandswahrscheinlichkeiten in Periode  $t$  dar und werden durch einen Schätzwert initialisiert, z.B. auf Basis des STP-Entscheidungsproblems. Anschließend werden diese in jedem Planungszyklus auf Basis der tatsächlich beobachteten Zahl der Wettbewerber anhand exponentieller Glättung aktualisiert. Entsprechend zum STP-Entscheidungsproblem hängt der Wert von  $P_{a(t+1)ikljm}$  von den erzielbaren Gewinnen und damit der Anzahl der Wettbewerber in Periode  $t$  ab. Der Gewinn aus Periode  $(t+1)$  wird auf Periode  $t$  abdiskontiert, so dass anschließend der Barwert der unendlichen Summe der Stufenspie-

le von Periode 3 bis unendlich berechnet wird.

Das vollständige Entscheidungsproblem einer Fluggesellschaft, welches approximativ Kapitalwertmaximierung abbildet, ist durch die Summe aus (34) und (36), sowie die Nebenbedingungen (7) – (14) und (35), gegeben, wobei (35) durch Einsetzen aufgelöst wird. Aufgrund des Modellierungsansatzes gibt es zwei verschiedene Perioden, für welche unterschiedliche Entscheidungen zu treffen sind, da die Entscheidungen der Perioden 2,  $t$  und  $(t+1)$  definitionsgemäß identisch sind. Dadurch wird die Anzahl der Entscheidungsvariablen gegenüber dem ursprünglichen Entscheidungsproblem von Abbildung 1 erheblich reduziert, was die Hauptmotivation für die beschriebene Vorgehensweise ist. Sofern die Aufgabenstellung es erlaubt, kann das STP-Entscheidungsproblem auf mehr als zwei Perioden erweitert werden, was die Genauigkeit des Modells erhöht. Abbildung 4 fasst den Modellablauf zusammen.

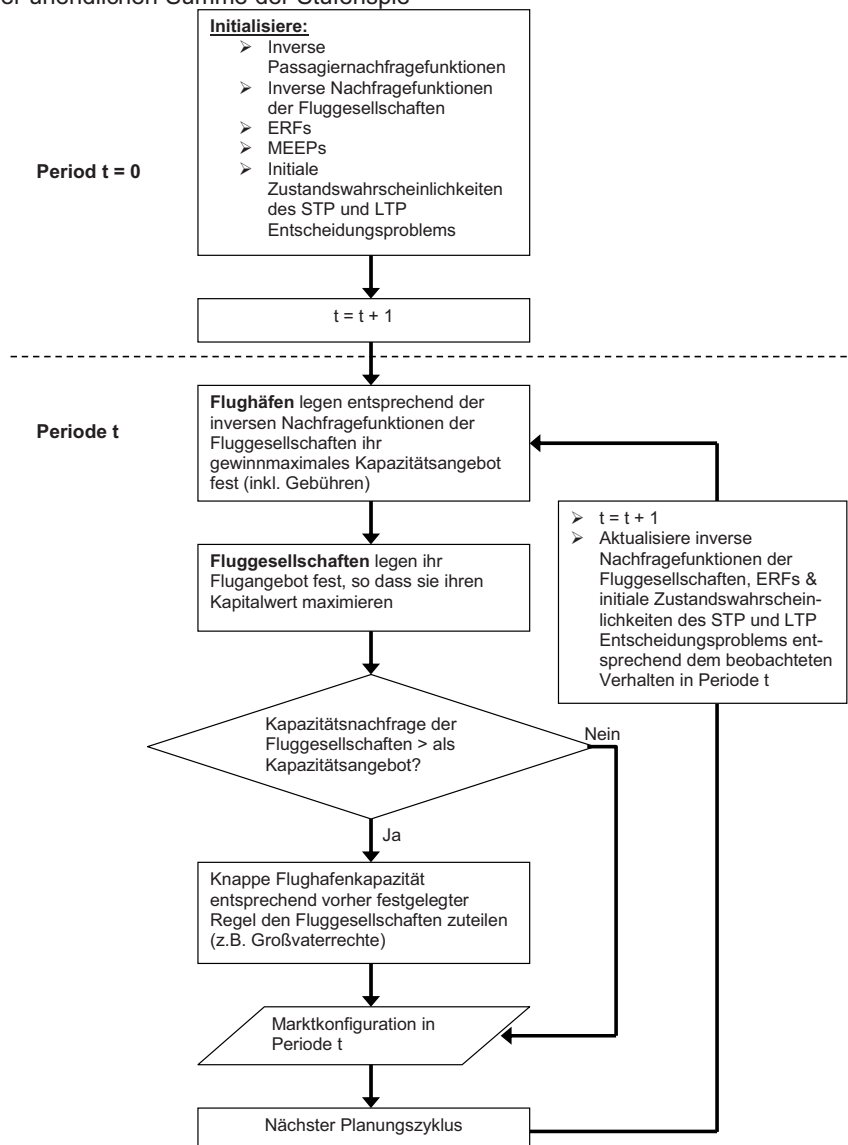


Abbildung 4: Modellablauf

Um Startwerte zu erhalten, wird das Modell für einige Perioden durchlaufen. Die Modellergebnisse der ersten

Perioden variieren mit den Startwerten, so dass diese entsprechend vorsichtig zu interpretieren sind. Das Modell kann nach einiger Zeit eine stabile Marktstruktur heraus-

bilden, welche in dieser Arbeit als „Langfristgleichgewicht“ bezeichnet wird, da gegeben den individuellen Informationsstand der Marktteilnehmer zu Beginn einer Periode das Ergebnis jeder Periode definitionsgemäß ein Nash-Gleichgewicht darstellt. Der iterative Ansatz dieses Modells, welcher zur Modellierung von Lerneffekten und dynamischen Marktentwicklungen gewählt wird, findet in statischen Modellen zur Identifikation von Nash-Gleichgewichten Anwendung (z.B. [20], [24], [25] und [27]). Adler [27] stellt fest, dass ein solches Nash-Gleichgewicht nicht zwangsläufig existieren muss oder eindeutig ist. Damit ein eindeutiges Nash-Gleichgewicht existiert, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein [27]:

- Die Strategiemenge eines Spielers ist beschränkt, konvex und abgeschlossen.
- Die Gewinnfunktion jedes Spielers ist konkav in Bezug auf fixe Wettbewerberstrategien
- Alle Gewinnfunktionen sind stetig über die Strategiemengen aller Spieler

Üblicherweise kann die Konkavität der Gewinnfunktionen nicht garantiert werden. Adler [27] und Hansen [20] bezeichnen Situationen, in welchen das Modell zwischen verschiedenen Zuständen pendelt ohne zu konvergieren bzw. in welchen die Mehrheit der Entscheidungsvariablen konvergiert als sogenanntes „Quasi-Gleichgewicht“. Ein Grund für das Fehlen eines stabilen Gleichgewichts ist ein sogenannter „leerer Kern“ [32], [59], [60]. Eine Marktkonfiguration ist „im Kern“, wenn es keine Gruppe bzw. Teilmenge von Marktteilnehmern gibt, die sich durch Austausch von Gütern und Leistungen untereinander verbessern kann [59]. Solche Situationen können z.B. durch folgende Ereignisse begünstigt werden [59], [60]:

- Die Existenz von Fixkosten und eine geringe Variation der minimalen Durchschnittskosten zwischen den Anbietern
- Eine geringe Nachfrageelastizität
- Hohe Anbieterkapazität im Vergleich zur Marktgröße

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Modellierung von Lernprozessen und dynamischen Marktentwicklungen liegt, schränkt die Nichtexistenz eines Langfristgleichgewichts den Anwendungsbereich des Modells nicht ein.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Gegenstand dieser Arbeit ist die Abbildung von Wettbewerb in Passagierluftverkehrsmärkten, wobei der Schwerpunkt auf der Modellierung des Verhaltens von Fluggesellschaften, Flughäfen und Passagieren liegt. Fluggesellschaften und Flughäfen maximieren annahmegemäß ihren Kapitalwert bzw. Periodengewinn und Passagiere sind Nutzenmaximierer. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, welche hauptsächlich die langfristigen Gleichgewichtseigenschaften eines Luftverkehrsmarktes analysieren, liegt der Schwerpunkt dieses Modells auf Lerneffekten und dynamischen Marktentwicklungen im Zeitablauf, wobei sich nicht notwendigerweise ein langfristiges Marktgleichgewicht ergeben muss. Der gewählte Ansatz umfasst sowohl entscheidungstheoretische als auch spieltheoretische Elemente: Es wird eine sogenannte empirische Reaktionsfunktion als auch Marktein-/austritt Wahrscheinlichkeitsfunktion definiert, um Wettbewerberreaktionen und Marktein- und -austritt zu modellieren. Ein Kernelement

des Modells ist das Lernverhalten von Fluggesellschaften und Flughäfen auf Basis beobachteten Verhaltens von Marktteilnehmern. Fluggesellschaften berücksichtigen in ihren strategischen Entscheidungen die möglichen Auswirkungen auf zukünftigen Marktein- und -austritt, so dass sie ihre Entscheidungen am erwarteten Kapitalwert ausrichten. Da dieses Vorgehen die Modellkomplexität erhöht, wird ein sogenanntes heuristisches Gleichgewichtskonzept entwickelt.

Im Rahmen von Markteintritt und Markteintrittsabwehr spielt Seltens Chain Store Paradox [61] eine wichtige Rolle: In einem Spiel über mehrere Perioden mit vollständiger Information bezüglich der Auszahlungen der Spieler stellt Markteintrittsabwehr kein perfektes Gleichgewicht dar und ist daher auch nicht rational. Der Grund hierfür ist, dass es „Common Knowledge“ [62], [63] ist, dass Kooperation die beste Antwort auf einen Markteintritt darstellt und umgekehrt, so dass Reputationseffekte keine Rolle spielen [64]. Jedoch stellt die Annahme vollständiger Information in Bezug auf realistische Problemstellungen eine strenge Annahme dar [64].

Die Modelle von Kreps und Wilson [56] und Milgrom und Roberts [64] versuchen, Seltens Chain Store Paradox zu erklären und aufzulösen, indem sie unvollständige Information bezüglich des Monopolisten aus Sicht potentieller neuer Wettbewerber annehmen.

Das Modell von Kreps und Wilson enthält eine (geringe) Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass eine aggressive Reaktion des Monopolisten für diesen unmittelbar profitabler ist als Kooperation, falls Markteintritt droht. Wahrscheinlichkeit  $p$  wird in jeder Runde des Spiels auf Basis des beobachteten Verhaltens aktualisiert. Konkrete Modellergebnisse basieren auf der Festlegung von  $p$ , was wiederum eine ad-hoc Annahme darstellt.

Im Modell von Milgrom und Roberts herrscht unvollständige Information über die tatsächlichen Eigenschaften des Monopolisten. Es existiert jeweils eine (geringe) Wahrscheinlichkeit, dass der Monopolist immer aggressiv oder kooperativ auf Markteintritt reagiert. Diese beiden Wahrscheinlichkeiten spiegeln die Zweifel potentieller neuer Wettbewerber bezüglich der wahren Eigenschaften des Monopolisten, bzw. dass ihre Annahmen über das Verhaltensmuster des Monopolisten korrekt sind, wider

In dieser Arbeit wird unvollständige Information bezüglich der Wettbewerbseigenschaften anhand von sogenannten ERFs und MEEPs modelliert. Im Gegensatz zu den beiden oben genannten Modellen von Kreps und Wilson sowie Milgrom und Roberts hängt die Marktein-/austrittswahrscheinlichkeit nicht von der gesamten Historie des Spiels ab bzw. wurde einmal Markteintritt zugelassen, heißt das nicht, dass in Zukunft aggressives Abwehrverhalten grundsätzlich keine Wirkung mehr erzielt, so dass die Wahrscheinlichkeit von Marktein- und -austritt in einer Periode nur vom Zustand und den Entscheidungen in der unmittelbar vorangehenden Periode abhängt. Die Informationen, über welche ein Spieler in diesem Spiel verfügt, basiert auf Vergangenheitsbeobachtungen ( $\rightarrow$  ERFs) sowie ökonomischen Funktionen ( $\rightarrow$  MEEPs).



## 5. LITERATUR

- [1] Goetz, A.R. und Vowles, T.M. (2009), "The good, the bad, and the ugly: 30 years of US airline regulation", *Journal of Transport Geography*, 17(4), 251-263.
- [2] Hooper, P. (1998), "Airline competition and deregulation in developed and developing country contexts – Australia and India", *Journal of Transport Geography*, 6(2), 105-116.
- [3] Ehmer, H., Berster, P., Basedow, J. und Jung, C. (2002), "Liberalisierung im Luftverkehr Deutschlands – Analyse und wettbewerbspolitische Empfehlungen", German Aerospace Center (DLR), Cologne, 2002.
- [4] Gordon, S. (1974), "Relationships between economics of scale and the shape of air transportation networks", PhD dissertation, Cambridge, MA, 1974.
- [5] Jacquemin, M. (2006), "Netzmanagement im Luftverkehr – Statische und dynamische Planungsmodelle zur Gestaltung von Hub&Spoke-Flugnetzwerken", PhD dissertation, Wiesbaden, 2006.
- [6] Jeng, C.Y. (1987), "Routing strategies for an idealized airline network", PhD dissertation, Berkeley, CA, 1987.
- [7] Miller, R. (1963), "Domestic airline efficiency", MIT-Press, Cambridge, MA, 1963.
- [8] Berechman, J. und Shy, O. (1996), "The structure of airline equilibrium networks", in: van den Bergh, J.C.J.M., Nijkamp, P. und Rietveld, P., editors, (1996): Recent advances in spatial equilibrium modelling, 138-155, Springer, Berlin.
- [9] Brueckner, J.K. und Zhang, Y. (2001), "A model of scheduling in airline networks – how a hub-and-spoke system affects flight frequency, fares and welfare", *Journal of Transport Economics and Policy*, 35(2), 195-222.
- [10] Douglas, G. und Miller, J. (1974), "Economic regulation of domestic air transportation: Theory and policy", The Brookings Institution, Washington, DC.
- [11] Panzar, J.C. (1979), "Equilibrium and welfare in unregulated airline markets", *The American Economic Review*, 69(2), 92-95.
- [12] Panzar, J.C. (1980), "Regulation, deregulation, and economic efficiency: The case of the CAB", *The American Economic Review*, 70(2), 311-315.
- [13] Schipper, Y., Rietveld, P. und Nijkamp, P. (2003), "Airline deregulation and external costs: a welfare analysis", *Transportation Research Part B*, 37(8), 699-718.
- [14] Zhang, A. (1996), "An analysis of fortress hubs in airline networks", *Journal of Transport Economics and Policy*, 30.
- [15] Pels, E. (2009), "Network competition in the open aviation area", *Journal of Air Transport Management*, 15(2), 83-89.
- [16] Oum, T.H., Zhang, A. und Zhang, Y. (1995), "Airline network rivalry", *The Canadian Journal of Economics*, 28(4a), 836-857.
- [17] Dobson, G. und Lederer, P.J. (1993), "Airline scheduling and routing in a hub-and-spoke system", *Transportation Science*, 27(3), 281-297.
- [18] Kanafani, A. und Ghobrial, A.A. (1985), "Airline hubbing – some implications for airport economics", *Transportation Research Part A*, 19(1), 15-27.
- [19] Hansen, M. (1990), "Airline competition in a hub-dominated environment: an application of noncooperative game theory", *Transportation Research Part B*, 24(1), 27-43.
- [20] Hansen, M. und Kanafani, A. (1990), "Airline hubbing and airport economics in the pacific market", *Transportation Research Part A*, 24(3), 217-230.
- [21] Takebayashi, M. (2009), "Airlines' behavior for choice of aircraft size and network design: bi-level model", *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Air Transport Research Society World Conference 2009*, 1-12, Abu Dhabi, VAE, 27-30 June 2009.
- [22] Takebayashi, M. und Kanafani, A. (2005), "Network competition in air transportation markets: bi-level approach", *Research in Transportation Economics*, 13, 101-119.
- [23] Hong, S. und Harker, P.T. (1992), "Air traffic network equilibrium: toward frequency, price and slot priority analysis", *Transportation Research Part B*, 26(4), 307-323.
- [24] Evans, A.D., Schäfer, A. und Dray, L. (2008), "Modelling airline network routing and scheduling under airport capacity constraints", 8<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 1-13, Anchorage, Alaska, 14-19 September 2008.
- [25] Evans, A.D. und Schäfer, A. (2009), "Simulating flight routing network responses to airport capacity constraints in the US", 9<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integrations and Operations Conference, 1-13, Hilton Head, South Carolina, 21-23 September 2009.
- [26] Adler, N. (2001), "Competition in a deregulated air transport market", *European Journal of Operational Research*, 129(2), 337-345.
- [27] Adler, N. (2005), "Hub-spoke network choice under competition with an application to western Europe", *Transportation Science*, 39(1), 58-72.
- [28] Hendricks, K., Piccione, M. und Tan, G. (1995), "The economics of hubs: the case of monopoly", *Review of Economic Studies*, 62(1), 83-99.
- [29] Hendricks, K., Piccione, M. und Tan, G. (1997), "Entry and exit in hub-spoke networks", *RAND Journal of Economics*, 28(2), 291-303.
- [30] Hendricks, K., Piccione, M. und Tan, G. (1999), "Equilibria in networks", *Econometrica*, 67(6), 1407-1434.
- [31] Dennis, N. (2007), "End of the free lunch? The response of traditional European airlines to the low-cost carrier threat", *Journal of Air Transport Management*, 13(5), 311-321.
- [32] Gillen, D. und Morrison, W.G. (2005), "Regulation, competition and network evolution in aviation", *Journal of Air Transport Management*, 11(3), 161-174.
- [33] Mason, K.J. (2001), "Marketing low-cost airline services to business travelers", *Journal of Air Transport Management*, 7(2), 103-109.
- [34] Mason, K.J. und Alamdari, F. (2007), "EU network carriers, low cost carriers and consumer behaviour: A Delphi study of future trends", *Journal of Air Transport Management*, 13(5), 299-310.
- [35] Pels, E., Nijkamp, P. und Rietveld, P. (2000), "A note on the optimality of airline networks", *Economic Letters*, 69(3), 429-434.
- [36] Vowles, T.M. (2001), "The 'Southwest Effect' in multi-airport regions", *Journal of Air Transport Management*, 7(4), 251-258.

- [37] Osborne, M.J. und Rubinstein, A. (1994), "A course in game theory", MIT Press, MA, 1994.
- [38] Nash, J.R. (1950), "Non-cooperative games", PhD dissertation, Princeton, NJ, 1950.
- [39] Mailath, G.J. und Samuelson, L. (2006), "Repeated games and reputations", Oxford University Press, Oxford, 2006.
- [40] Milgrom, P. und Roberts, J. (1991), "Adaptive and sophisticated learning in normal form games", *Games and Economic Behavior*, 3(1), 82-100.
- [41] Brown, G.W. (1951), "Iterative solutions of games by fictitious play", in: Koopmans, T.C., editor, (1951): *activity analysis of production and allocation*, Wiley, New York.
- [42] Robinson, J. (1951), "An iterative method of solving a game", *Annals of Mathematics*, 54(2), 296-301.
- [43] Shoham, Y. und Leyton-Brown, K. (2009), "Multi-agent systems – algorithmic, game-theoretic, and logical foundations", Cambridge University Press, Cambridge, MA, 2009.
- [44] Fudenberg, D. und Kreps, D.M. (1993), "Learning mixed equilibria", *Games and Economic Behavior*, 5(3), 320-367.
- [45] Fudenberg, D. und Levine, D.K. (1998), "The theory of learning in games", MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
- [46] McFadden, D. (1974), "Conditional logit analysis", in: Zarembka, P., editor, (1974): *frontiers in econometrics*, 105-142, Academic Press, New York.
- [47] Maier, G. und Weiss, P. (1990), "Modelle diskreter Entscheidungen – Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften", Springer, Wien, 1990.
- [48] Manski, C. F. (1977), "The structure of random utility models", *Theory and Decision* 8(3), 229-254.
- [49] Ben-Akiva, M. und Lerman, S. (1985), "Discrete choice analysis: theory and applications to travel demand", Cambridge University Press, Cambridge, MA, 1985.
- [50] Adler, N. und Berechman, J. (2001), "Evaluating optimal multi-hub networks in a deregulated aviation market with an application to western Europe", *Transportation Research Part A*, 35(5), 373-390.
- [51] De Vany, A. (1974), "The revealed value of time in air travel", *Review of Economics and Statistics*, 56(1), 77-82.
- [52] Lancaster, K.J. (1966), "A new approach to consumer theory", *The Journal of Political Economy*, 74(2), 132-157.
- [53] Alamdari, F.E. und Black, I.G. (1992), "Passengers' choice of airline under competition: the use of the logit model", *Transport Reviews*, 12(2), 153-170.
- [54] Hess, S., Adler, T. und Polak, J.W. (2007), "Modeling airport and airline choice behaviour with the use of stated preference survey data", *Transportation Research Part E*, 43(3), 221-233.
- [55] Rosenthal, R.W. (1981), "Games of perfect information, predatory pricing and the chain-store paradox", *Journal of Economic Theory*, 25(1), 92-100.
- [56] Kreps, D.M. und Wilson, R. (1982), "Reputation and imperfect information", *Journal of Economic Theory*, 27(2), 253-279.
- [57] Schrage, L. (2006), "Optimization modeling with LINGO", Chicago, IL, 2006.
- [58] Powel, W.B. (2007), "Approximate dynamic programming – solving the curses of dimensionality", Wiley, Hoboken, NJ, 2007.
- [59] Button, K. (2003), "Does the theory of the "core" explain why airlines fail to cover their long-run costs of capital?", *Journal of Air Transport Management*, 9(1), 5-14.
- [60] Button, K. und Nijkamp, P. (1998), "Economic stability in network industries", *Transportation research Part E*, 34(1), 13-24.
- [61] Selten, R. (1978), "The chain-store paradox", *Theory and Decision*, 9(2), 127-159.
- [62] Aumann, R. (1976), "Agreeing to disagree", *Annals of Statistics*, 4(6), 1236-1239.
- [63] Milgrom, P. (1981), "An axiomatic characterization of common knowledge", *Econometrica*, 49(1), 219-222.
- [64] Milgrom, P. und Roberts, J. (1982), "Predation, reputation, and entry deterrence", *Journal of Economic Theory*, 27(2), 280-312.