

Airline Schedule Planning

Grundlagen und aktuelle Entwicklungen

Dipl.-Wirtsch.-Inform. Jochen Gönsch, Augsburg

Da das Produktportfolio einer Fluggesellschaft im Wesentlichen von ihrem Flugplan abhängt, ist dieser von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung. Der vorliegende Beitrag gibt einen Einblick in den Prozess der Flugplangestaltung und stellt die üblicherweise betrachteten Teilprobleme dar. Darüber hinaus werden aktuelle Ansätze aufgezeigt, die eine Verbesserung der Planungsergebnisse durch eine Integration verschiedener Teilprobleme oder die Flexibilisierung der Flottenzuweisung anstreben.

Jochen Gönsch ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Analytics & Optimization der Universität Augsburg. Bevorzugte Forschungsgebiete: Revenue Management, Airline Schedule Planning, Customer Choice Modelling.

1. Planungsprozesse im Passagierluftverkehr

Im Zuge der Globalisierung gewinnt die Passagierluftfahrt zunehmend an Bedeutung. Dies zeigt sich in einem stetigen Anstieg der Zahl der geflogenen Meilen wie auch des Passagieraufkommens. Dieser langfristige Aufwärtstrend wird jedoch immer wieder von Ereignissen wie dem Ausbruch der Infektionskrankheit SARS Ende 2002 oder den Anschlägen vom 11. September 2003 unterbrochen. Nach einer Erholung in den letzten Jahren, die auch von fallenden Treibstoffpreisen begünstigt wurde, hat sich die Ertragssituation vieler Fluggesellschaften 2008 als Folge der allgemeinen Wirtschaftskrise drastisch verschlechtert. Auch für die Jahre 2009 und 2010 erwartet der Branchenverband *IATA* erhebliche, wenn auch zunehmend geringere Verluste (*IATA*, 2009). Darüber hinaus führen Überkapazitäten in zahlreichen Märkten zu einer weiteren Verschärfung des Konkurrenzdrucks.

Um in diesem Umfeld bestehen zu können, sind Fluggesellschaften gezwungen, ihre Ressourcen effektiv zu nutzen. Unverzichtbar ist ein aus Sicht der potenziellen Passagiere möglichst attraktiver Flugplan, sowohl im Hinblick auf die angebotenen Verbindungen als auch die Flugzeiten. Gleichzeitig müssen die bei der Durchführung der geplanten Flüge entstehenden Kosten berücksichtigt werden. Die Gestaltung entsprechender Flugpläne auf mittel- bis langfristiger Planungsebene ist Gegenstand des im vorliegenden Beitrag betrachteten **Airline Schedule Planning**. Aufbauend auf dem so festgelegten Kapazitätsangebot ist es Aufgabe des **Revenue Management** (vgl. z.B. *Petric/Gönsch/Steinhardt*, 2008, oder *Klein/Steinhardt*, 2008), über die Verfügbarkeit vordefinierter Tarife für die einzelnen Flüge – und damit letztlich die den Kunden angebotenen Preise – zu entscheiden, um eine erlösmaximale Kapazitätsverwendung sicherzustellen.

Die Erstellung eines Flugplanes ist ein äußerst komplexer Prozess. Neben der erwarteten Nachfrage und den zur Verfügung stehenden Flugzeugtypen sind zahlreiche Einschränkungen wie Nachtflugverbote (Curfews) und Wartungsintervalle zu berücksichtigen. Darüber hinaus müssen passende Einsatzpläne für Kabinen- und Cockpitpersonal erstellt werden müssen. Man unterscheidet daher mehrere, interdependente Teilprobleme, die häufig wie in *Abb. 1* definiert werden. Da es bisher nicht möglich ist, ein lösbares, integriertes Modell zu formulieren, werden diese im Rahmen einer Sukzessivplanung sequenziell gelöst.

Aufgabe des **Forecasting** ist es, die für die nachfolgenden Optimierungsprobleme benötigten Daten zur Verfügung zu stellen. Hierzu zählen etwa Prognosen hinsichtlich Nachfrage, Kosten und Erlösen. Darauf aufbauend wird im **Schedule Design** über die zu bedienenden Flugstrecken entschieden und es werden die Frequenzen sowie die Abflug- und Ankunftszeiten festgelegt. Anschließend ordnet das **Fleet Assignment** jedem der so definierten Flüge einen der verfügbaren Flugzeugtypen zu. Das **Aircraft Maintenance Routing** bestimmt, welche Flugzeuge die Flüge ausführen. Das **Crew Scheduling** schließlich weist jedem Flug eine Besatzung zu.

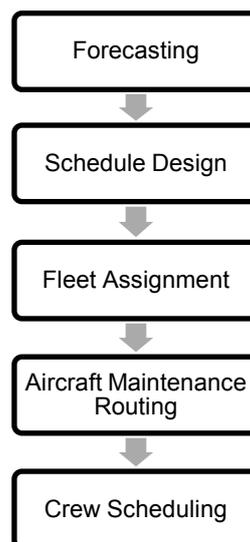


Abb. 1: Teilprobleme des Airline Schedule Planning

2. Teilprobleme des Airline Schedule Planning

2.1. Forecasting

Zentraler Gegenstand des Forecasting ist die Nachfrageprognose, der in Forschung und Praxis eine entsprechend hohe Aufmerksamkeit zuteilwird. Sie basiert heute meist auf der Betrachtung von Märkten. In einem solchen Markt werden alle Passagiere mit gleichem Start- und Zielflughafen zusammengefasst (vgl. *Abb. 2*). In der Regel können die Reisenden in einem Markt zwischen mehreren Verbindungen (**Itineraries**) wählen. Angeboten werden können beispielsweise Direktflüge zu verschiedenen Zeiten, aber auch Umsteigeverbindungen, die aus mehreren einzelnen Flügen, sogenannten **Legs**, bestehen. Die Prognose der Nachfrage erfolgt nun in mehreren Schritten.

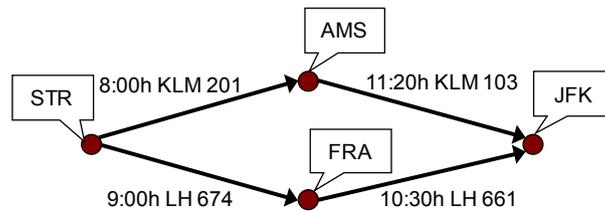


Abb. 2: Beispielhafte Darstellung des Marktes Stuttgart – New York mit zwei Itineraries

Zunächst wird die Gesamtzahl aller Passagiere, die bei ausreichender Kapazität vom Start- zum Zielort reisen möchten, bestimmt. Diese **Marktgröße** ist unabhängig vom Angebot und kann damit eigentlich nicht direkt beobachtet werden. In der Praxis geht man jedoch insbesondere bei einer kleineren Veränderung des Angebotes nicht von Auswirkungen auf die Gesamtzahl der Passagiere im Markt aus. In diesem statischen Kontext wird einfach die Passagierzahl der Vorperiode, ggf. unter Verwendung einer Zeitreihe, als Grundlage für den Planungszeitraum genutzt. Eine Übersicht verschiedener theoretischer Ansätze ist in *Hsu/Wu* (1997) enthalten.

Im nächsten Schritt wird diese Nachfrage auf die von allen im Markt aktiven Fluggesellschaften angebotenen Verbindungen verteilt. Die verwendeten Modelle bilden heute meist das individuelle Entscheidungsverhalten der Passagiere ab und basieren entweder auf dem Quality of Service Index (QSI) oder der Discrete Choice Theorie. Die vergleichsweise einfachen **QSI-Modelle** (vgl. z.B. *Clark*, 2007) wurden ursprünglich vom amerikanischen *Civil Aeronautics Board* propagiert und werden auch heute noch in der Praxis angewendet. Zur Erklärung des Wahlverhaltens zwischen den angebotenen Verbindungen werden zunächst mögliche Einflussfaktoren wie Abflugzeit, Flugdauer oder Zahl der Umstiege identifiziert. Dann erfolgt für diese Einflussfaktoren jeweils die Bestimmung von Koeffizienten, die ihre Wichtigkeit für die Passagiere ausdrücken. Nun lässt sich jedem Itinerary ein sogenannter QSI-Score zuordnen, der sich aus der mit den Koeffizienten gewichteten Summe der Einflussfaktoren ergibt und die Attraktivität der Verbindung widerspiegelt. Der Marktanteil einer Verbindung i entspricht im QSI-Modell dann dem Verhältnis des Scores einer Verbindung $QSI(i)$ zur Summe der Scores aller Verbindungen des entsprechenden Marktes \mathcal{C} :

$$share(i) = \frac{QSI(i)}{\sum_{j \in \mathcal{C}} QSI(j)} \quad (1)$$

Im Gegensatz zu den intuitiven QSI-Modellen besitzen die **Discrete Choice Ansätze** (vgl. z.B. *Ben-Akiva/Lerman*, 1985, oder, für eine deutschsprachige Einführung, *Gönsch/Klein/Steinhardt*, 2008) eine Fundierung in der Theorie der individuellen Nutzenmaximierung. Auch hier wird aus Einflussfaktoren und Koeffizienten eine gewichtete Summe gebildet, die allerdings als Nutzen $U(i)$

der Verbindung interpretiert wird. Zusammen mit einigen weiteren Annahmen ergibt sich dann beispielsweise im grundlegenden Logit-Modell der Marktanteil zu

$$share(i) = \frac{e^{V(i)}}{\sum_{j \in \mathcal{C}} e^{V(j)}} \quad (2)$$

Während in der Literatur bereits seit Jahrzehnten ausschließlich Discrete Choice Modelle betrachtet werden (vgl. z.B. *Coldren et al.*, 2003, für die beispielhafte Analyse nordamerikanischer Märkte), so setzten sich diese in der Praxis erst in den letzten Jahren durch.

Weitere wichtige Größen stellen Kosten und Erlöse dar. Da eine Fluggesellschaft eine Vielzahl unterschiedlicher Tarife anbietet, deren Verfügbarkeit dynamisch von Revenue Management-Systemen gesteuert wird, ist eine exakte Prognose und Modellierung der Erlöse äußerst schwierig. Da sich die Preise noch dazu am Wettbewerb orientieren, arbeitet man meist mit Durchschnittswerten, die in der Praxis ggf. noch einmal manuell angepasst werden, um bestimmte erwartete Entwicklungen zu berücksichtigen.

2.2. Schedule Design

Das Schedule Design, das als komplexestes der Teilprobleme des Airline Schedule Planning gilt, kann in zwei aufeinander aufbauende Probleme untergliedert werden. Diese lassen sich folgendermaßen skizzieren:

- Das **Frequency Planning** legt die Zahl der täglichen oder wöchentlichen Flüge und Verbindungen in einem Markt fest. Berücksichtigt werden hier neben der Nachfragehöhe auch Charakteristika des Marktes wie der Anteil von Geschäfts- und Urlaubsreisenden oder die Entfernung.
- Anschließend ist zu entscheiden, zu welchen Tageszeiten diese Flüge ausgeführt werden sollen. Neben Wünschen der Passagiere wie günstigen Zeiten und guten Umsteigeverbindungen dürfen im **Timetable Development** auch die Anforderungen der noch folgenden Teilprobleme nicht völlig vernachlässigt werden. So sollten die Abflugzeiten so gewählt werden, dass die einzelnen Flugzeuge möglichst viele Flüge durchführen können.

Modelle, die einen komplett neuen Flugplan bestimmen, stellen hohe Anforderungen an die verfügbare Datengrundlage und sind bis heute nur eingeschränkt lösbar. Darüber hinaus ist in der Praxis eine möglichst hohe Ähnlichkeit des neuen Flugplanes zum vorhergehenden gewünscht, damit beispielsweise Stammkunden weiterhin zu den gewohnten Zeiten fliegen können. Aus diesen Gründen griffen Fluggesellschaften anfangs häufig nicht auf Optimierungsmodelle zurück und nahmen stattdessen manuell inkrementelle Verbesserungen am Flugplan der Vorperiode vor. Erst in den vergangenen Jahren wurden praxistaugliche Optimierungsansätze entwickelt, die inkrementell Verbesse-

rungen an einem bestehenden Flugplan vornehmen, indem sie beispielsweise die Aufnahme vordefinierter, als *candidate flights* bezeichneter Flüge prüfen. Diese Vorgehensweise wird auch als **Schedule Development** bezeichnet. Für eine weiterführende Darstellung des Schedule Design mit zahlreichen Referenzen auf verschiedene Modelle sei beispielsweise auf *Lohatepanont (2002)* sowie *Barnhart/Belobaba/Odoni (2003)* verwiesen.

2.3. Fleet Assignment

Nachdem im Schedule Design die auszuführenden Flüge definiert wurden, ist im Fleet Assignment jedem dieser Flüge kostenminimal ein Flugzeugtyp zuzuordnen. Die betrachteten Kosten setzen sich aus operativen Kosten wie Treibstoff und Landegebühren sowie sogenannten **Spill-Kosten** zusammen. Spill-Kosten bilden als Opportunitätskosten den entgangenen Gewinn ab, wenn sich aufgrund eines zu geringen Sitzplatzangebotes nicht die komplette Nachfrage bedienen lässt. Kann ein Teil der „gespillten“ Passagiere auf einem anderen Flug befördert werden, so bezeichnet man dies als **Recapture**. Daneben sind zahlreiche weitere Nebenbedingungen wie Reichweiten, Nachtflugverbote oder Lärmschutzauflagen an den Flughäfen zu beachten. Das Fleet Assignment wird meist als ein Mehrgüter-Netzwerkflussproblem (vgl. z.B. *Ahuja/Magnati/Orlin, 1993*) in dem Flugzeugtypen durch ein sogenanntes **Timespace-Network** „fließen“, modelliert. *Abb. 3* zeigt die zweidimensionale Darstellung eines solchen Netzes für einen Tag, in der eine Dimension für den Zeitablauf und die zweite für verschiedene Flughäfen steht.

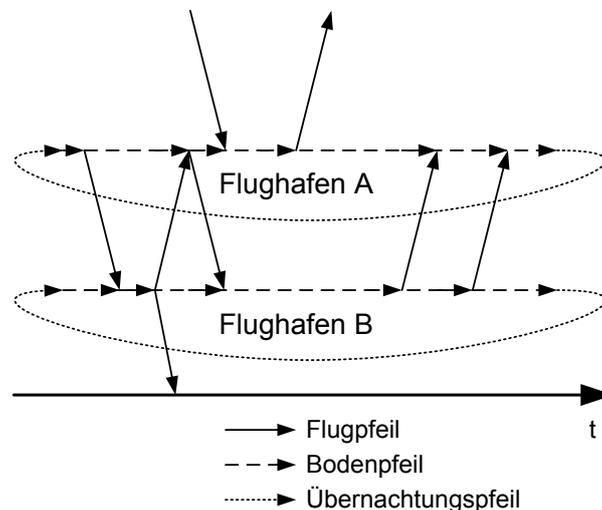


Abb. 3: Ausschnitt aus einem Timespace-Network

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden ein sehr einfaches Modell dargestellt. Zahlreiche Literaturhinweise zu komplexeren Ansätzen sowie ähnliche Modelle finden sich in *Gopalan/Talluri (1998)* und *Barnhart/Cohn (2004)*. Die Menge \mathcal{N} der Knoten dieses Netzes repräsentiert die im Flugplan festgelegten Abflugs- und Ankunftsereignisse mit Zeitpunkt und Flughafen. Die Menge \mathcal{M} besteht aus den Flug-, Boden- und Übernachtungspfeilen. Die in \mathcal{L} zusammengefassten **Flugpfeile** repräsentieren jeweils einen Flug, ein Leg, des Flugplanes und beinhalten auch die Zeit, die

ein Flugzeug vor und nach dem Flug am Boden verbringen muss, damit beispielsweise Passagiere ein- und aussteigen können oder Treibstoff nachgetankt werden kann. **Bodenpfeile** (\mathcal{B}) stehen für Flugzeuge, die zwischen zwei Flügen warten. Ein geschlossener Fluss innerhalb des Netzes wird durch die **Übernachtungspfeile** (\mathcal{U}) ermöglicht, die die an einem Flughafen über Nacht verweilenden Maschinen repräsentieren. Für jeden Knoten $n \in \mathcal{N}$ enthält $\mathcal{I}(n)$ alle eingehenden, $\mathcal{O}(n)$ alle abgehenden Pfeile.

Für jeden Flugzeugtyp $j \in \mathcal{T}$ der zur Verfügung stehenden Typen \mathcal{T} gibt C_j die Zahl der Maschinen an. Die Kosten, die eine Zuordnung von Flugzeugtyp j zu einem Pfeil i verursacht, werden durch c_{ij} ausgedrückt und sind für Boden- und Übernachtungspfeile 0. Für Fluglegs ($i \in \mathcal{L}$) bezeichnet c_{ij} die entstehenden Kosten inklusive möglicher Spill-Kosten, falls die Nachfrage nach Leg i die Sitzplatzkapazität des Typs j übersteigt. Recapture-Effekte werden zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

Die Entscheidungsvariablen x_{ij} des Modells geben an, ob Flugleg $i \in \mathcal{L}$ von einer Maschine des Typs j geflogen wird ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$). Für Boden- und Übernachtungspfeile ($i \notin \mathcal{L}$) gibt x_{ij} die Zahl der Maschinen an, die am Boden- bzw. über Nacht verweilen.

Ein Modell zur Minimierung der Kosten lässt sich nun wie folgt formulieren:

$$\text{Min } \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{T}} c_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{j \in \mathcal{T}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{L} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}(n)} x_{ij} - \sum_{i \in \mathcal{O}(n)} x_{ij} = 0 \quad \forall n \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{T} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij} \leq C_j \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall i \in \mathcal{M}, j \in \mathcal{T} \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{T} \quad (8)$$

In diesem Modell minimiert die Zielfunktion (3) die durch die Zuweisung der Flugzeugtypen zu den Fluglegs entstehenden Kosten, während die drei folgenden Nebenbedingungen (4)–(6) lediglich die grundlegenden Restriktionen im Fleet Assignment abbilden. Die erste Gruppe von Nebenbedingungen (4) erzwingt, dass jedem Flugleg genau ein Flugzeugtyp zugeordnet wird. Mit Hilfe sogenann-

ter Flusserhaltungsbedingungen (5) wird sichergestellt, dass in jedem Knoten genau so viele Flugzeuge eines Typs über Boden-, Flug- und Übernachtungspfeile ankommen wie abgehen. Die Bedingungen (6) gewährleisten, dass nicht mehr Flugzeuge eines Typs verwendet werden als zur Verfügung stehen. Hierzu wird ein beliebiger Zeitpunkt gewählt und alle zu diesem am Boden oder in der Luft befindlichen Flugzeuge gezählt. Sieht man von Nachtflügen ab, so können wie hier einfach die den Übernachtungspfeilen zugeordneten Maschinen betrachtet werden. Schließlich schränken (7) und (8) den Wertebereich der Entscheidungsvariablen entsprechend der obigen Erläuterung ein.

Quantitative Fleet Assignment-Modelle sind in der Praxis weit verbreitet und führen zu erheblichen Einsparungen. So berichten beispielsweise *Rushmeier/Kontogiorgis* (1997), dass die Gesellschaft USAir ihre Kosten um jährlich \$15 Millionen senken konnte.

2.4. Aircraft Maintenance Routing

Durch die Zuordnung der Flugzeugtypen zu den Flügen im Fleet Assignment zerfällt das Flugnetz in verschiedene Subnetze, die jeweils einem Flugzeugtyp entsprechen. Im Aircraft Maintenance Routing wird für jedes Subnetz festgelegt, welche individuellen Flugzeuge des betreffenden Typs die einzelnen Legs fliegen. Hierzu werden für jede Maschine sogenannte **Routings** und **Rotationen** betrachtet. Ein Routing bezeichnet eine Abfolge von Flügen, in der der Startflughafen eines Fluges immer dem Zielflughafen des vorherigen entspricht und in der alle Flüge von einer Maschine geflogen werden. Eine Rotation ist ein Routing, bei dem der Startflughafen des ersten Fluges dem Zielflughafen des letzten Fluges entspricht. Die Rotation jedes Flugzeuges muss in regelmäßigen Abständen bestimmte Flughäfen, sogenannte Wartungsbasen, enthalten, damit die nach einer bestimmten Flugzeit erforderlichen Wartungsarbeiten durchgeführt werden können. So schreibt die amerikanische Flugaufsichtsbehörde *FAA* beispielsweise nach maximal 65 Flugstunden eine Sichtkontrolle aller wichtigen Systeme eines Flugzeuges vor.

Die Modellierung kann an dieser Stelle nur knapp skizziert werden. Für eine ausführlichere Darstellung mit Diskussion verschiedener Ansätze sei auf *Gopalan/Talluri* (1998) verwiesen. Das Aircraft Maintenance Routing Problem lässt sich als Zirkulationsflussproblem mit zusätzlichen Nebenbedingungen (vgl. z.B. *Domschke*, 2007) modellieren. Die Entscheidungsvariablen entsprechen Abfolgen von Fluglegs (sog. Strings), wobei jeder String an einer Wartungsbasis beginnt und endet sowie die maximale Flugdauer zwischen zwei Wartungen nicht überschreitet. Ist ein String in der Lösung enthalten, so bedeutet dies, dass ein Flugzeug alle Legs nacheinander fliegt und dann gewartet wird. Die Nebenbedingungen des Modells bestehen im Wesentlichen aus zwei Gruppen. Überdeckungsbedingungen erzwingen, dass jedes Leg in genau einem ausgewählten String enthalten ist, also jedes Leg von genau einem Flugzeug geflogen wird. Zählbedingungen begrenzen die Zahl der verwendeten Flugzeuge und stellen sicher, dass nicht mehr Maschinen als vorhanden eingesetzt werden. In der Praxis stellt es heute kein Problem mehr dar, zulässige Lösungen für das

Aircraft Maintenance Routing zu finden, sofern diese existieren, was jedoch aufgrund des sequentiellen Ansatzes, in dem zuerst das Fleet Assignment vorgenommen wird, nicht garantiert ist.

2.5. Crew Scheduling

Im letzten Teilschritt des Airline Schedule Planning, dem Crew Scheduling, wird jedem Flugleg eine geeignete Besatzung zugeordnet. Da Personalkosten nach dem Treibstoff den zweitgrößten Kostenblock einer Fluggesellschaft bilden, kommt dem Crew Scheduling in der Praxis eine hohe Bedeutung zu. Gleichzeitig sind die erforderlichen Daten wie Personalkosten sowie regulatorische und arbeitsrechtliche Bedingungen im Vorhinein relativ gut bekannt. Aufgrund der Größe des Problems kann eine manuelle Lösung jedoch nur schwerlich erfolgen. Dies führte dazu, dass bereits relativ früh, maßgeblich getrieben von entsprechenden Forschungsabteilungen der Fluggesellschaften, mathematische Ansätze entwickelt und eingesetzt wurden, wie *Arabeyre et al. (1969)* am Beispiel von vier bedeutenden Fluggesellschaften zeigen. Einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklung von Lösungsverfahren stellt die Arbeit von *Lavoie/Minoux/Odier (1988)* dar, auf der zahlreiche weitere Forschungen sowie heute eingesetzte Softwareprodukte basieren.

Die Planung erfolgt unabhängig für das Kabinenpersonal (**Cabin-Crew**) und die Besatzung des Cockpits (**Cockpit-Crew**). Häufig steht die Cockpit-Crew im Fokus, da Piloten den größeren Kostenblock darstellen und weniger flexibel eingesetzt werden können als Kabinenpersonal, weil sie oftmals nur für wenige, einander ähnliche Flugzeugtypen ausgebildet sind. Darüber hinaus ist die Modellierung einfacher, da eine Cockpit-Crew während eines Arbeitstages zusammen bleibt, während die Zusammensetzung der Cabin-Crew wechseln kann, da ihre Größe von der Zahl der Passagiere abhängt.

Das Crew Scheduling gliedert sich in zwei sukzessiv betrachtete Teilprobleme, die sich als Set-Partitioning-Probleme modellieren lassen. Im **Crew Pairing** werden Fluglegs, die nacheinander von einer Crew geflogen werden sollen, zusammengefasst. Auch nachdem Einschränkungen wie maximale Arbeitszeitlängen und notwendige Pausen berücksichtigt werden, können sich hier für eine größere Fluggesellschaft mehrere Milliarden möglicher Pairings ergeben. Im zweiten Schritt, dem **Crew Assignment**, werden die Pairings zu Dienstplänen, sogenannten Bidlines oder Rosters, die beispielsweise einen Monat umfassen, zusammengefasst. Das in den USA verbreitete Bidline-Verfahren ordnet die fertigen Dienstpläne anschließend den einzelnen Angestellten unter Berücksichtigung ihrer Präferenzen zu. Dagegen konstruiert das insbesondere in Europa verbreitete Rostering die Dienstpläne bereits für bestimmte Angestellte, so dass bei ihrer Erstellung individuelle Anforderungen und Wünsche berücksichtigt werden können.

Im Folgenden wird ein einfaches Crew Pairing Problem illustriert. Für eine ausführliche Darstellung verschiedener Modellierungsansätze und Lösungsalgorithmen sei auf *Barnhart et al. (2003)*

verwiesen. Ausgangspunkt der Formulierung ist die Menge \mathcal{P} aller möglichen Pairings. Wie oben dargestellt, kann diese Menge zwar sehr groß sein, jedoch lässt sich durch ihre Verwendung die Modellierung erheblich vereinfachen, da alle Anforderungen an Pairings bereits bei der Konstruktion von \mathcal{P} berücksichtigt werden können. Damit gehen in das Modell beispielsweise nur Abfolgen von Fluglegs ein, die von einer Crew geflogen werden können. So können jedem Pairing $p \in \mathcal{P}$ unmittelbar die Kosten c_p zugeordnet werden, die bei seiner Ausführung entstehen, ohne die meist nichtlinearen Kostenfunktionen, die die mit einem Pairing verbundenen Kosten errechnen, im Optimierungsmodell berücksichtigen zu müssen. Für jedes Pairing p existiert eine binäre Entscheidungsvariable x_p , die genau dann den Wert 1 annimmt, wenn das Pairing p in der Lösung enthalten ist, also die entsprechende Abfolge von Fluglegs auch tatsächlich von einer Crew geflogen wird. Binäre Koeffizienten a_{lp} geben für jeden Flugleg l aus der Menge aller Fluglegs \mathcal{L} und jedes Pairing p an, ob Flugleg l in Pairing p enthalten ist ($a_{lp} = 1$) oder nicht. Das Crew Pairing Problem lässt sich nun wie folgt formulieren:

$$\min \sum_{p \in \mathcal{P}} c_p x_p \quad (9)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} a_{lp} x_p = 1 \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (10)$$

$$x_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in \mathcal{P}. \quad (11)$$

Die Zielfunktion (9) minimiert die aus den ausgewählten Pairings resultierenden Gesamtkosten. Zusammen mit der Einschränkung der Entscheidungsvariablen auf binäre Werte (11) stellen die Nebenbedingungen (10), sogenannte Überdeckungsbedingungen, sicher, dass jedes Flugleg in genau einem der ausgewählten Pairings enthalten ist.

3. Aktuelle Entwicklungen

3.1. Integration von Phasen

Die dargestellten Teilprobleme des Airline Schedule Planning erfahren jeweils bereits seit Jahrzehnten in Forschung und Praxis ein starkes Interesse. Jedoch ermöglicht der wissenschaftliche wie technische Fortschritt erst in jüngster Zeit zunehmend eine integrierte Betrachtung und damit eine erhebliche Verbesserung der Lösungsqualität im Vergleich zur sequentiellen Vorgehensweise. Integrierte Modelle umfassen meist das Fleet Assignment, das entweder gemeinsam mit den nachgelagerten Phasen (vgl. z.B. *Papadakos, 2009*, für eine Integration von Fleet Assignment, Aircraft Maintenance Routing und Crew Scheduling) oder dem vorgelagerten Schedule Design betrachtet wird. Diese Integration von Schedule Design und Fleet Assignment betrachten etwa *Lohatepa-*

nont/Barnhart (2004), die ein Fleet Assignment Problem um die Unterscheidung zwischen Legs, die auf jeden Fall bedient werden müssen und solchen, die optional geflogen werden können, erweitern. Dagegen ermöglichen *Desaulniers et al.* (1997) und *Rexing et al.* (2000) das Verschieben der Legs eines Schedules innerhalb vorgegebener Zeitfenster, um so eine bessere Flottenzuordnung erreichen zu können. Auch eine Integration verschiedener Teilprobleme ohne Einbeziehung des Fleet Assignment wurde bereits untersucht, beispielsweise des Crew Scheduling und Aircraft Maintenance Routing durch *Cohn/Barnhart* (2002) oder des Crew Scheduling und Schedule Design durch *Klabjan et al.* (2002).

3.2. Kurzfristige Anpassung der Flottenzuweisung an die Nachfrage

Gewöhnlich findet die Flottenzuweisung im Airline Schedule Planning mehrere Monate vor Abflug statt. Allerdings ist die Nachfrageprognose zu diesem Zeitpunkt noch vergleichsweise ungenau, während sie im weiteren Zeitablauf immer präziser wird. Daher liegt es nahe, die Flottenzuweisung so spät wie möglich vorzunehmen. Möglichen Vorteilen im Fleet Assignment stehen jedoch negative operative Auswirkungen, wie beispielsweise Schwierigkeiten bei der kurzfristigen Änderung des Einsatzplanes einer Crew, entgegen. Das Potenzial dieses als **Demand Driven Dispatch (D³)** bekannten Konzepts zeigte die bis heute viel zitierte Arbeit von *Berge/Hopperstad* (1993). Aktuelle Publikationen aus diesem Bereich stammen von *Sherali/Zhu* (2008) und *Jacobs/Smith/Johnson* (2008). Diese berücksichtigen bereits bei einer initialen Flottenzuweisung die Möglichkeit einer späteren, nachfragegetriebenen Änderung bzw. die in der Praxis weit verbreitete Steuerung der Nachfrage durch ein modernes O&D-basiertes Revenue Management System.

4. Fazit

Der Flugplan entscheidet maßgeblich über Angebot und Kosten einer Fluggesellschaft. Entsprechend groß war bereits früh das Interesse an Optimierungsmethoden. Aufgrund der enormen Komplexität und Größe wird der Prozess der Flugplanerstellung in sequentiell betrachtete Teilprobleme gegliedert, wobei jeweils der Gestaltungsspielraum der nachfolgenden Phasen eingeschränkt wird. Erst in jüngster Zeit ist die Lösung von Modellen, die verschiedene der Teilprobleme integrieren, möglich geworden. So lässt sich der mit dem sequentiellen Vorgehen verbundene Verlust an Lösungsqualität vermeiden. Ebenfalls recht neu ist die Idee, die Flottenzuweisung kurzfristig an die Nachfrage anzupassen. Beide Bereiche erfahren zurzeit reges Interesse, wie eine Vielzahl aktueller Publikationen zeigt. Zahlreiche Teilprobleme des Airline Schedule Planning lassen sich mit ihren Lösungsverfahren auf andere Branchen, beispielsweise den Schienenverkehr, übertragen (vgl. z.B. *Caprara et al.*, 1998).

Literatur

- Ahuja, R.K., T.L. Magnati, J.B. Orlin*, Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications, Englewood Cliffs, New Jersey 1993.
- Arabeyre, J.P., J. Fearnley, F.C. Steiger, W. Weather*, The Airline Crew Scheduling Problem: A Survey, in: *Transportation Science*, 3. Jg. (1969), 140–163.
- Barnhart, C., P. Belobaba, A.R. Odoni*, Applications of Operations Research in the Air Transport Industry, in: *Transportation Science*, 37. Jg. (2003), S. 368–391.
- Barnhart, C., A.M. Cohn*, Airline Schedule Planning: Accomplishments and Opportunities, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 6. Jg. (2004), S. 3–22.
- Barnhart, C., A.M. Cohn, E.L. Johnson, D. Klabjan, G.L. Nemhauser, P.H. Vance*, Airline Crew Scheduling, in: *R.W. Hall* (Hrsg.), *Handbook of Transportation Science*, 2. Aufl., Boston 2003.
- Ben-Akiva, M., S.R. Lerman*, Discrete Choice Analysis – Theory and Application to Travel Demand, Cambridge – London 1985.
- Berge, M.E., C.A. Hopperstad*, Demand Driven Dispatch: A Method for Dynamic Aircraft Capacity Assignment, Models and Algorithms, in: *Operations Research*, 41. Jg. (1993), S. 153–168.
- Caprara, A., P. Toth, D. Vigo, M. Fischetti*, Modeling and Solving the Crew Rostering Problem, in: *Operations Research*, 46. Jg. (1998), S. 820–830.
- Clark, P.*, *Buying the Big Jets*, Aldershot 2007.
- Cohn, A.M., C. Barnhart*, Improving Crew Scheduling by Incorporating Key Maintenance Routing Decisions, in: *Operations Research*, 51. Jg. (2003), S. 387–396.
- Coldren, C.M., F.S. Koppelman, K. Kasturirangan, A. Mukherjee*, Modeling Aggregate Air-Travel Itinerary Shares: Logit Model Development at a Major US Airline, in: *Journal of Air Transport Management*, 9. Jg. (2003), S. 361–369.
- Desaulniers, G., J. Desrosiers, Y. Dumas, M.M. Solomon, F. Sourmis*, Daily Aircraft Routing and Scheduling, in: *Management Science*, 43. Jg. (1997), S. 841–855.
- Domschke, W.*, *Logistik: Transport*, 5. Aufl., München 2007.
- Gönsch, J., R. Klein und C. Steinhardt*, Discrete Choice Modelling (Teil 1) – Grundlagen, in: *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 37. Jg. (2008), S. 356–362.
- Gopalan, R., K.T. Talluri*, Mathematical Models in Airline Schedule Planning: A Survey, in: *Annals of Operations Research*, 76. Jg. (1998), S. 155–185.
- Hsu, C., Y. Wu*, The Market Size of a City-Pair Route at an Airport, in: *Annals of Regional Science* 31. Jg. (1997), S. 391–409.
- IATA*, *Financial Forecast*, in: *Industry Outlook 2009*.
- Jacobs, T.L., B.C. Smith, E.L. Johnson*, Incorporating Network Flow Effects into the Airline Fleet Assignment Process, in: *Transportation Science*, 42. Jg. (2008), S. 514–529.
- Klabjan, D., E.L. Johnson, G.L. Nemhauser, E. Gelman, S. Ramaswamy*, Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints, in: *Transportation Science*, 36. Jg. (2002), S. 337–348.
- Klein, R., C. Steinhardt*, *Revenue Management – Grundlagen und Mathematische Methoden*, Berlin 2008.

- Lavoie, S., M. Minoux, E. Odier*, A New Approach for Crew Pairing Problems by Column Generation with an Application to Air Transportation, in: *European Journal of Operational Research*, 35. Jg. (1988), S. 45–58.
- Lohatepanont, M.*, *Airline Fleet Assignment and Schedule Design: Integrated Models and Algorithms*, Massachusetts Institute of Technology, Boston 2002.
- Lohatepanont, M., C. Barnhart*, *Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment*, in: *Transportation Science*, 38. Jg. (2004), S. 19–32.
- Papadakos, N.*, *Integrated Airline Scheduling*, in: *Computers & Operations Research*, 36. Jg. (2009), S. 176–195.
- Petrack, A., J. Gönsch, C. Steinhardt*, *Revenue Management mit flexiblen Produkten – Erfolgversprechende Steuerungsmöglichkeit oder einfach nur ein Marketing-Gag?*, in: *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 37. Jg. (2008), S. 14–20.
- Rexing, B., C. Barnhart, T. Kniker, A. Jarrah, N. Krishnamurthy*, *Airline Fleet Assignment with Time Windows*, in: *Transportation Science*, 34. Jg. (2000), S. 1–20.
- Rushmeier, R.A., S.A. Kontogiorgis*, *Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment*. *Transportation Science*, 31. Jg. (1997), S. 159–169.
- Sherali, H.D., X. Zhu*, *Two-Stage Fleet Assignment Model Considering Stochastic Passenger Demands*, in: *Operations Research*, 56. Jg. (2008), S. 383–399.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.15358/0340-1650-2010-5-230

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20220622-100023-9

Dies ist das "Authors Accepted Manuscript" von: Gönsch, J (2010): Airline Schedule Planning : Grundlagen und aktuelle Entwicklungen. WiSt -Wirtschaftswissenschaftliches Studium 39, Heft 5, S. 230-235.
Die finale Version des Artikels (Version of Record) ist verfügbar unter: <https://doi.org/10.15358/0340-1650-2010-5-230>

Alle Rechte vorbehalten.