

**Simultane Erstellung von Flugplänen mit Genetischen Algorithmen –
Konzeptioneller Planungsansatz und Entwicklung eines Prototypen**

Tobias Grosche, Franz Rothlauf, Armin Heinzl

Working Paper 8 / 2003
March 2003

Working Papers in Information Systems 1

University of Mannheim
Department of Information Systems 1
D-68131 Mannheim/Germany
Phone +49 621 1811691, Fax +49 621 1811692
E-Mail: wifo1@uni-mannheim.de
Internet: <http://www.bwl.uni-mannheim.de/wifo1>

Simultane Erstellung von Flugplänen mit Genetischen Algorithmen – Konzeptioneller Planungsansatz und Entwicklung eines Prototypen

Autoren:

Dipl.-Kfm. Tobias Grosche
Dr. Franz Rothlauf
Prof. Dr. Armin Heinzl

Anschrift:

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik I
Universität Mannheim
Schloss
68131 Mannheim
E-Mail: {grosche | rothlauf | heinzl}@bwl.uni-mannheim.de

Zusammenfassung:

In diesem Beitrag wird ein Simultanplanungsansatz für die Flugplanerstellung vorgestellt. Bisherige Ansätze zur Flugplanerstellung separieren das Problem und lassen deshalb Interdependenzen zwischen den Problemvariablen unberücksichtigt. In dem vorgestellten Planungsansatz werden mittels eines Genetischen Algorithmus komplette Flugpläne mit den darin implizit enthaltenen Interdependenzen erstellt und optimiert. Somit sind bei Anwendung dieses Planungsverfahrens bessere Flugpläne zu erwarten. Ergebnisse eines Prototypen zeigen, dass das Planungsverfahren in der Lage ist, gültige Lösungen zu erzeugen und eine zielgerichtete Suche hin zu qualitativ hochwertigen Lösungen sicherzustellen.

Stichworte: Flugplanung, Flugplanerstellung, Genetische Algorithmen, Simultanplanung, Luftfahrt, prototypische Implementierung, Planungskonzept

Abstract:

A schedule is the central element of an airline, thus, its construction is one of the most important planning tasks for each airline. Because of its complexity, airline scheduling is performed by decomposing the overall problem into subproblems and by solving these subproblems in a stepwise process. Therefore, in this planning approach, interdependencies between the subproblems can not be considered.

This paper presents a conceptual approach for simultaneous airline scheduling. By using genetic algorithms, complete schedules are constructed and optimized. Thus, interdependencies are implicitly considered and better schedules could be achieved. Results of a first prototype give proof of the concept.

Keywords: airline scheduling, schedule construction, genetic algorithms, simultaneous planning, conceptual approach, prototype

Gliederung:

1.	Einleitung	3
2.	Traditioneller Planungsansatz	5
2.1.	Planungsprozess	5
2.2.	Planungshorizont	7
2.3.	IT-Unterstützung bei der Flugplanerstellung	7
2.4.	Bewertung	8
3.	Simultaner Planungsansatz.....	8
3.1.	Genetische Algorithmen.....	9
3.2.	Planungskonzept	10
3.2.1.	Repräsentation.....	10
3.2.2.	Operatoren	12
3.2.3.	Fitnessbewertung	15
3.3.	Prototypische Implementierung des simultanen Planungsansatzes	18
3.3.1.	Modifikationen	19
3.3.2.	TestszENARIO	19
3.3.3.	Ergebnisse	20
3.3.4.	Bewertung des Prototypen.....	22
4.	Fazit	23

Simultane Erstellung von Flugplänen mit Genetischen Algorithmen – Konzeptioneller Planungsansatz und Entwicklung eines Prototypen

1. Einleitung

Flugzeuge sind in den letzten Jahrzehnten zu einem Massenverkehrsmittel geworden. In Zeiten der zunehmenden Globalisierung und der damit gestiegenen Nachfrage nach Beförderungsdienstleistungen von Personen und Gütern nimmt die Luftfahrt einen hohen Stellenwert ein. Das Passagieraufkommen auf Linienflügen im Jahr 2002 betrug mit insgesamt 1,6 Mrd. Passagieren über 25% der Weltbevölkerung [ICA003, 25]. Das weitere Wachstum im Luftverkehr ist unbestritten, Prognosen erwarten trotz kurzfristiger Einbrüche ein langfristiges Wachstum zwischen 4 und 6% [Airb02, 4; ATAA02b; ICA002, 26].

Trotz dieser erfolgversprechenden Aussichten wird das Wettbewerbsumfeld auf dem Passagierreisemarkt immer härter. Der stärkere Wettbewerb seit der Deregulierung des Luftverkehrs in den USA 1978 und der Errichtung des Europäischen Binnenmarktes 1993 sowie das vermehrte Auftreten sogenannter „no-frills-Airlines“ setzen vor allem die etablierten Fluggesellschaften unter Kostendruck. So sank der durchschnittliche Ertrag pro Sitzplatzkilometer in den letzten 20 Jahren um ungefähr die Hälfte [ATAA03a; CoRe02, 7].

Der wesentliche Erfolgsfaktor einer Fluggesellschaft ist das Angebot an Flügen in Form eines Flugplans. „A schedule can make or break an airline“ [Well94]. Ein Flugplan beinhaltet für die vorgegebene Planungsperiode das Streckennetz einschließlich der Zwischenlandungen und Anschlussverbindungen, die Bedienfrequenz jeder Strecke, die Abflug- und Ankunftszeiten und damit auch die Reisezeiten, die auf den Flügen eingesetzten Flugzeugmuster sowie – aus der Anbieterperspektive – die Zuordnung vorhandener Flugzeuge zu den Flügen [Pomp02, 95; Suhl95, 4].

Dem Flugplan kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu, da fast alle operativen Tätigkeiten einer Fluggesellschaft auf dem Flugplan basieren [BaTa97, 438; Suhl95, 7; Teod88, 172]. Durch den Flugplan werden die Kosten für Treibstoff, Personal, Lande- und Überflugsgebühren, Wartung, Bodendienste, etc. schon zum Erstellungszeitpunkt des Flugplans und damit lange vor ihrer Realisierung determiniert [BaTa97, 436; Teod88, 178]. Insgesamt bestimmt der Flugplan durchschnittlich 75% aller der Fluggesellschaft entstehenden Kosten [ATAA02a, 16; ATAA03b]. Auch werden aufgrund der hohen strategischen Bedeutung werden aus dem Flugplan teilweise Vorgaben für Investitionen abgeleitet [Suhl93, 544].

Ein optimaler Flugplan stellt die effizienteste und effektivste Verteilung der begrenzten Ressourcen Flugzeuge und Personal bei einem gleichzeitig höchsten Maß an Entgegenkommen gegenüber den Wünschen der potentiellen Nachfragern dar [EtMa85, 127; Krüg80, 59; Teod88, 176]. Somit kommt der Erstellung eines Flugplans zentrale Bedeutung für den Erfolg einer Fluggesellschaft zu; sie stellt aber zugleich eine der aufwendigsten und komplexesten Planungsaufgaben dar, die das Unternehmen lösen muss [Well94, 254]. Wurden bisher überwiegend historisch gewachsene Flugpläne an einigen Stellen modifiziert und verbessert, so ist es mittlerweile aufgrund des starken Wettbewerbsdrucks in immer stärkerem Maße notwendig, regelmäßig völlig neue Flugpläne zu erstellen [BaSc96, 19].

Als allgemeines Modell lässt sich das Flugplanerstellungproblem folgendermaßen formulieren [EtMa85, 128; Suhl95, 12]:

Gegeben ist:

1. Informationen über die Nachfrage mit daran geknüpften Erlösen für jede einzelne Strecke über die Tageszeit und die Wochentage des Planungshorizontes,
2. Strecken- und Flughafencharakteristiken: Entfernungen, Öffnungszeiten, Bodenzeiten, betriebliche Einschränkungen (Curfew Restrictions),
3. Flugzeugcharakteristiken: Flugzeiten, Betriebskosten, Wartungsrestriktionen,
4. Sonstige betriebliche und durch das Management vorgegebene Nebenbedingungen.

Gesucht ist:

Eine Kombination von Flügen mit zugeordneten Flugzeugen und Abflug- und Ankunftszeiten, die den Gewinn maximiert.

Aufgrund seiner enormen Komplexität, der großen Anzahl an unabhängigen Designvariablen sowie der starken Interdependenzen zwischen einzelnen Lösungsteilen ist das Flugplanerstellungproblem schon für kleinere Probleminstanzen mit traditionellen Optimierungsverfahren kaum optimal lösbar. Aus diesem Grund erfolgt die Lösung des Flugplanerstellungproblems bisher in einem schrittweisen Ansatz. Dabei wird versucht, das Gesamtproblem in weniger komplexe Teilprobleme zu zerlegen und diese in einem sequentiellen Prozess aufeinander aufbauend zu lösen. Interdependenzen zwischen diesen Teilproblemen bleiben so allerdings größtenteils unberücksichtigt. Diese Interdependenzen könnten nur durch einen umfassenden simultanen Planungsansatz berücksichtigt werden. Das Ziel dieses Beitrages ist die Konzeption eines simultanen Planungsansatzes für die Flugplanerstellung. Hierbei soll das Flugplanungsproblem durch den Einsatz von Genetischen Algorithmen (GA) gelöst werden, ohne das Problem in einzelne Teilprobleme zu zerle-

gen. Da durch die simultane Lösung die Interdependenzen zwischen einzelnen Teilproblemen berücksichtigt werden können, sind qualitativ bessere Lösungen zu erwarten.

In einem zweiten Schritt wird ein Prototyp vorgestellt. Dieser Prototyp dient dazu, einen Nachweis über die Tauglichkeit des vorgestellten Planungskonzept zu erbringen. Dazu erfolgt die Erstellung und Optimierung von Flugplänen für ein Testszenario.

Dieser Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Um einen Überblick über die mit der Flugplanerstellung verbundenen Aufgaben zu geben, wird im anschließenden Kapitel der bisherige sequentielle Planungsansatz mit seinen Teilproblemen erläutert. Nach einer kurzen Darstellung der IT-Unterstützung bei der Flugplanerstellung in der Praxis und einer abschließenden Bewertung erfolgt im dritten Kapitel die Erläuterung des neuen Planungsansatzes. Da dem Planungsmodell ein GA zugrunde liegt, wird eingangs eine kurze Einführung in dieses Optimierungsverfahren gegeben. Nach der Darstellung des neuen Planungskonzepts werden der entwickelte Prototyp und die mit seiner Anwendung auf ein Testszenario ermittelten Ergebnisse vorgestellt. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem kurzen Ausblick.

2. Traditioneller Planungsansatz

Im Folgenden wird der traditionelle Planungsprozess zur Erstellung von Flugplänen vorgestellt. Nach einer kurzen Darstellung der Flugplanerstellung in der Praxis und der IT-Unterstützung erfolgt abschließend eine kritische Bewertung dieses Vorgehens.

2.1. Planungsprozess

Etschmaier und Mathaisel betonen in einer der ersten Publikationen über die Erstellung von Flugplänen die Komplexität, welche die Formulierung des Problems in einem geschlossenen mathematischen Modell mit sich bringt und welche eine Lösung mit exakten standardisierten Algorithmen praktisch unmöglich macht [EtMa85]. Als Ausweg schlagen sie einen iterativen Zwei-Phasen-Prozess zur Flugplanerstellung vor: In einem ersten Schritt entwirft eine zentrale Planungsabteilung einen groben Flugplan (Schedule Construction), den im darauffolgenden Schritt alle betroffenen Abteilungen der Fluggesellschaft bewerten (Schedule Evaluation). Iterativ wird auf Basis dieser Bewertungen nun wiederum so lange ein neuer Flugplan entworfen und einer erneuten Bewertung unterzogen, bis entweder die verfügbare Planungszeit abgelaufen oder ein Konsens unter den Abteilungen erreicht ist. Die Erstellung des Flugplans (Schedule Construction) kann dabei entweder direkt oder schrittweise erfolgen. Bei dem direkten Ansatz werden mit heuristischen Methoden sequentiell Flüge ausgewählt und leicht modifiziert. Bei dem schrittweisen Ansatz werden

wählt und leicht modifiziert. Bei dem schrittweisen Ansatz werden einzelne Probleme sequentiell gelöst, wobei die Lösung eines Problems als Restriktion für ein nachfolgendes Problem eingeht. Sowohl in der Literatur als auch teilweise in der Praxis wird vor allem dieser schrittweise Ansatz verfolgt. Die geringere Komplexität der Teilprobleme erlaubt dabei meist den Einsatz standardisierter Lösungsalgorithmen.

Die folgende Tabelle enthält diese Teilprobleme sowie eine kurze Erklärung der Arbeitsinhalte [Ante98, 516; Suhl95, 10].

Tabelle 1: Teilprobleme bei der Erstellung von Flugplänen

Problem	Inhalt
Nachfrageprognose	Prognose der Nachfrage nach Flugreisen zwischen Städten/Regionen
Zielmarktauswahl	Auswahl der Zielmärkte (Städte, Regionen), welche die Fluggesellschaft bedienen möchte
Flughafenwahl	Auswahl der zu benutzenden Flughäfen einer Stadt/Region
Flugsegmentwahl	Auswahl der einzelnen Teilstrecken, um die Zielmärkte zu bedienen (ein Flugsegment bezeichnet dabei einen Direktflug zwischen zwei Flughäfen; ein Flug dagegen kann aus einem oder mehreren aneinandergehängten Flugsegmenten bestehen)
Frequenzzuweisung	Zuweisung der Bedienungshäufigkeit zu jedem Flug bzw. Flugsegment
Kapazitätszuweisung	Zuweisung der Gesamtkapazität zu jedem Flug bzw. Flugsegment
Abflugzeitenbestimmung	Bestimmung der Abflugzeiten für jedes Flugsegment
Ankunftszeitenbestimmung	Bestimmung der Ankunftszeit für jedes Flugsegment
Flottenzuordnung	Zuweisung eines Flugzeugtyps zu jedem Flugsegment
Rotationsplanung	Anordnung aller Flugsegmente in eine Sequenz von Flugsegmenten, die von einem Flugzeug zyklisch abgeflogen werden kann (Rotation)
Flugzeugzuordnung	Zuordnung tatsächlicher Flugzeuge zu jeder Rotation

Jedes dieser Teilprobleme muss für die Erstellung von gültigen Flugplänen gelöst werden, allerdings existieren sowohl in der Praxis als auch in der Theorie unterschiedliche Vorschläge für die Reihenfolge der Abarbeitung dieser Schritte [Suhl93, 544]. Teilweise erfolgt eine Aggregation der Schritte zu Problemen höherer Komplexität, so dass der Flugplanerstellungsprozess in 4-6 einzelnen Phasen dargestellt werden kann. Beispiele für diese Phasen sind: Marktbewertung, Netzwerkplanung, Flugzeitenplanung, Flugzeugeinsatzplanung. Manche der Teilprobleme können dabei teilweise nicht eindeutig einer aggregierten Phase zugeordnet werden. Weiterhin existieren verschiedene Aggregationsansätze und damit verbundene Lösungsreihenfolgen, deren vollständige Darstellung an dieser Stelle zu weit ginge. Es sei verwiesen auf [Ante98; BaLS98; BaTa97; EtMa85; GrCM98; Math97; Suhl95].

Gemeinsam ist allen Ansätzen, dass die aggregierten Teilprobleme sequentiell abgearbeitet werden. Für einzelne Elementarprobleme, insbesondere für die Flottenzuordnung und die Rotationsplanung, sind Optimierungsverfahren aus der Graphentheorie oder auch aus der Produktionswirtschaft einsetzbar. Für andere Planungsschritte (wie z.B. Flughafenwahl oder Ankunftszeitenbestimmung) hingegen existieren bisher noch keine Optimierungsverfahren.

2.2. Planungshorizont

Flugpläne besitzen i.d.R. eine Gültigkeit von 6 Monaten [Suhl93, 543; Well94]. Sie bestehen meist aus einem Flugprogramm, welches zyklisch wiederholt wird. Daher erfolgt die Planung von Langstreckenflügen im Allgemeinen auf einer wöchentlichen, die von Kurzstreckenflüge hingegen auf einer täglichen Basis [Poll82, 149; SSQW94, 105; Tall96, 237]. Durch die Erstellung von „Musterwochen“ bzw. „Mustertagen“ wird sowohl die Transparenz und Übersichtlichkeit für den Kunden erhöht, als auch die Komplexität des Planungsproblems verringert.

Bei der Erstellung von Flugplänen ist zu berücksichtigen, dass die langfristige Planung nur für „abstrakte“ Flugzeugtypen erfolgt; die Zuordnung konkreter (d.h. eindeutig identifizierbarer) Flugzeuge geschieht im operativen Betrieb, um weitere Faktoren wie z.B. Wartungsarbeiten berücksichtigen zu können.

Nach der Erstellung des Flugplans hat die Besatzungseinsatzplanung zu erfolgen. Durch die Zuordnung einzelner Besatzungsmitglieder zu den geplanten Flügen werden Einsatzpläne für einzelne Crewmitglieder erstellt. Aufgrund zahlreicher rechtlicher und betrieblicher Restriktionen handelt es sich hierbei um ein weiteres sehr komplexes Planungsproblem, auf das allerdings in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen werden soll (Vgl. dafür z.B. [Mell99; Suhl95, 26]).

2.3. IT-Unterstützung bei der Flugplanerstellung

In der Praxis werden viele Planungsschritte bei der Erstellung eines Flugplans von erfahrenen menschlichen Planern durchgeführt. Seit den 90er Jahren können diese Planer bei automatisierbaren Routinearbeiten sowie einzelnen Planungsschritten (wie z.B. Flugzeitenplanung und Flugzeugeinsatzplanung) auf Entscheidungsunterstützungssysteme zurückgreifen. Für einen erfahrenen Planer besteht außerdem die Möglichkeit, durch die Veränderung von Plandaten in einem inkrementellen Prozess bessere Flugpläne zu erarbeiten.

Planungsschritte auf vorgelagerten Ebenen erfolgen meist nach wie vor manuell. So bestimmen z.B. Produkt-Manager, die jeweils für eine bestimmte geographische Region verantwortlich sind, das Soll-Flugprogramm, das aus Flügen für jede Verbindung und jeden Tag mit zugeordneten Flugzeugtypen und Zeitfenstern besteht. Auf Basis dieses vorgegebenen Flugprogramms nehmen anschließend automatisierte Flugplanungssysteme die Durchführbarkeitsuntersuchung, Erarbeitung, Bewertung und Optimierung von Rotationen und Flugplänen vor [EtMa85, 129; Fran90, 254; KoAc99, 53; Mell99, 2; RuKo97; Suhl93, 544; Suhl95, 97].

2.4. Bewertung

Im Allgemeinen ist es für die Ermittlung einer optimalen Lösung von Planungsproblemen notwendig, alle die Zielgröße beeinflussenden Daten und Variablen simultan zu bestimmen, um so ihre gegenseitigen Interdependenzen vollständig berücksichtigen zu können [Hax74, 15; Hein89, 692; Kilg73, 16]. Die Erstellung von Flugplänen erfolgt dagegen bisher in einem schrittweisen Vorgehen, da ein umfassender simultaner Planungsansatz aufgrund der Notwendigkeit eines hohen Maßes an Detailtreue bei der Darstellung des Problems und der damit verbundenen Komplexität als nicht durchführbar erscheint. Durch das schrittweise Vorgehen bleiben allerdings die Interdependenzen zwischen den in den Teilproblemen enthaltenen Problemvariablen unberücksichtigt. Optimiert werden einzelne Schritte, deren Ergebnisse Restriktionen für nachgelagerte Planungsschritte darstellen und sich somit als nachteilig in Bezug auf die Gesamtplanung erweisen können [Mell99, 3; Stin74, 28].

Die sich daran anschließende rollierende Überarbeitung zur Berücksichtigung der Interdependenzen führt zu zusätzlichen Kosten und kann das grundsätzliche Problem der Nichtberücksichtigung von Interdependenzen nicht beheben. So ist es z.B. möglich, dass erst bei der Flugzeug- oder Besatzungseinsatzplanung erkannt wird, dass ein bis dahin geplanter Flugplan nicht mit den vorhandenen Ressourcen realisierbar ist [BBBE97, 3]. Dasselbe gilt auch für die Flugzeugsatzplanung. Die Zuordnung bestimmter Flugzeugtypen ohne die Berücksichtigung von tatsächlich vorhandenem Fluggerät bzw. dessen Anzahl und deren Wartungsrestriktionen ist problematisch und kann zu ungültigen Flugplänen führen.

3. Simultaner Planungsansatz

Um die Nachteiligkeit des sequentiellen Vorgehens zu umgehen, beinhalten aktuellere Publikationen zum Teil Planungsansätze, die einzelne Teilprobleme integrieren. Entweder wird durch (zahlreiche) Iterationsschleifen zwischen zwei Elementarproblemen eine „quasi-simultane“ Planung zu erreichen versucht, oder es erfolgen Erweiterungen bestehender Problemmodelle und -lösungsverfahren eines Teilproblems, um die Einflüsse eines weiteren Problems zu berücksichtigen (vgl. dafür z.B. [BaLS98; BBCJ98; CHJN96; DDDS97; Poll74; Suhl95, 106]). Die meisten dieser Ansätze beziehen sich dabei auf die Integration von zwei Problemen (meist Flotteneinsatzplanung und Rotationsplanung); ein Ansatz, der den gesamten Flugplanerstellungsprozess umfasst, existiert bisher nicht [BaLS98, 386].

Bei dem in diesem Beitrag präsentierten Konzept wird dagegen das gesamte Flugplanerstellungsproblem simultan gelöst und dadurch die vorhandenen Interdependenzen zwischen

den Teilproblemen berücksichtigt. Im Vergleich zum traditionellen Ansatz können somit bessere Lösungen gefunden werden.

Planungsgegenstand ist der komplette Flugplan, der implizit die mit dem traditionellen Planungsansatz ermittelten Teillösungen enthält. Bevor der Ansatz detailliert vorgestellt wird, erfolgt eine kurze Einführung in Genetische Algorithmen, welche dem Verfahren zugrunde liegen. Abschließend wird anhand eines entwickelten Prototypen der Nachweis der Tauglichkeit dieses Planungskonzepts erbracht.

3.1. Genetische Algorithmen

Als Optimierungsverfahren kommen Genetische Algorithmen (GA) zum Einsatz. Diese in den 60er Jahren von John Holland [Holl75] entwickelten Metaheuristiken sind besonders zur Lösung von Problemen geeignet, für die keine Spezialverfahren bekannt sind oder bei denen traditionelle Optimierungsverfahren aufgrund von Nichtlinearitäten, Diskontinuitäten und Multimodalität versagen [RuSc94, 236]. GA orientieren sich an den Prinzipien der Evolution („survival of the fittest“) und wenden die Operatoren Selektion, Rekombination und Mutation auf eine Population von Individuen über eine große Zahl an Generationen an. Ein Individuum stellt dabei eine mögliche Lösung eines Optimierungsproblems dar. In diesen werden die Entscheidungsvariablen des Problems in Analogie zur Natur als Zeichenketten kodiert (ähnlich biologischen Erbinformationen in DNS-Ketten). Durch Rekombination und Mutation werden in jeder Generation neue Lösungen erzeugt, die Eigenschaften ihrer Vorgänger „erben“. Rekombination erzeugt aus mehreren (in der Regel zwei) Individuen neue Individuen mit ähnlichen Eigenschaften, indem ein Austausch von Teilen ihrer Zeichenketten erfolgt. Durch Mutation werden kleine Änderungen an einem Individuum vorgenommen.

Die Fitness bzw. Qualität jedes Individuums, also die Güte der durch das Individuum repräsentierten Lösung bezogen auf die Zielkriterien des Problems, wird mit Hilfe einer aus den Zielkriterien abgeleiteten Fitnessfunktion gemessen. Die Selektion kann anhand der Fitness der Individuen bessere Lösungen bevorzugen, damit diese ihre charakteristischen Eigenschaften an Nachkommen vererben. Mit dem Selektionsoperator werden in der Regel zusätzliche Kopien der Individuen mit hoher Fitness in die Population eingebracht und Individuen mit niedriger Fitness aus der Population entfernt. Der prinzipielle Ablauf eines GA ist in Abbildung 1 dargestellt. Für weiterführende Informationen zu GA sei verwiesen auf [Gold89; Niss95; Niss97].

```

Erzeuge Startpopulation
Wiederhole
    Rekombination von Individuen
    Mutation einzelner Individuen
    Bewertung aller Individuen
    Selektion
Bis Abbruchkriterium erfüllt

```

Abbildung 1: Prinzipieller Ablauf eines GA

3.2. Planungskonzept

Die Anwendung eines GA zur Lösung konkreter Problemstellungen erfordert die problem-spezifische Anpassung seiner Elemente. Die folgenden Ausführungen beschreiben im Detail, wie GA für das Flugplanerstellungsproblem eingesetzt werden können.

3.2.1. Repräsentation

Da ein Individuum einen kompletten Flugplan darstellen soll, muss ein Individuum alle für die Erstellung eines vollständigen Flugplanes relevanten Entscheidungsvariablen kodieren. Zusammen mit festen Daten wie z.B. Blockzeiten, minimalen Bodenzeiten etc. kann so aus einem Individuum ein kompletter Flugplan bestimmt werden. Die Blockzeit bezeichnet den Zeitraum vom Schließen der Türen vor dem Start bis zum Öffnen der Türen nach der Landung am Zielflughafen. Die minimale Bodenzeit ist für die Abfertigung des Flugzeugs notwendig und beinhaltet Aktivitäten wie z.B. Reinigen, Tanken etc.

Konkret kodiert ein Individuum den Flugplan eines Flugzeuges für einen Tag als eine Kette von Flughäfen. Das Flugzeug fliegt diese Flughäfen in der vorgegebenen Reihenfolge an. Darüber hinaus ist jedem Flughafen eine über die notwendige minimale Bodenzeit hinausgehende Zeit zugeordnet, in der das Flugzeug vor dem nachfolgenden Flug am Boden verbleibt.

Zur Verdeutlichung dieses Repräsentationskonzepts soll das folgende Beispiel dienen: Die minimale Bodenzeit für jeden Flughafen (DUS, FRA, MAD, MUC, OSL, ROM, ZRH) betrage einheitlich 40 Minuten, die Blockzeiten in Minuten zwischen den Flughäfen gibt folgende Matrix wieder:

	DUS	FRA	MAD	MUC	OSL	ROM	ZRH
DUS		50	160	70	110	150	80
FRA	50		150	70	130	130	70
MAD	160	150		160	220	140	130
MUC	70	70	160		140	90	60
OSL	110	130	220	140		230	150
ROM	150	130	140	90	230		90
ZRH	80	70	130	60	150	90	

Unter Berücksichtigung dieser Daten repräsentiert das folgende Individuum den in Abbildung 2 und 3 dargestellten Flugplan:

Individuum:

FRA	6:20	OSL	0:10	MUC	0:30	ZRH	0:20	MAD	0:30	MUC	0:20
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Flug	Zeit
FRA - OSL	06:20 - 08:30
OSL - MUC	09:20 - 11:40
MUC - ZRH	12:50 - 13:50
ZRH - MAD	14:50 - 17:00
MAD - MUC	18:10 - 20:50
MUC - FRA	21:50 - 23:00

Abbildung 2: Flugplan (in Tabellenform)

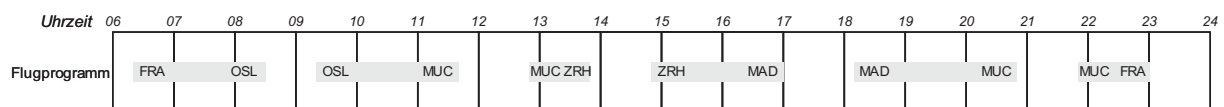


Abbildung 3: Flugplan (als Blockdiagramm)

Die Startzeit eines Fluges zu einer im Individuum nachfolgend kodierten Stadt bestimmt sich demnach aus der vorherigen Ankunftszeit, der minimalen Bodenzeit sowie der in dem Individuum kodierten zusätzlichen Bodenzeit. Bei einem einzigen Flugzeug bezeichnet der letzte Flughafen im Individuum den Ausgangspunkt für den letzten Flug des Tages, der wiederum zu dem ersten im Individuum aufgeführten Flughafen führt. Damit ist sichergestellt, dass das Flugzeug das Flugprogramm am nächsten Tag wieder ausführen kann.

Bei mehreren Flugzeugen werden mehrere Tagesprogramme gemäß dem obigen Schema kodiert und in einem Individuum zusammengefügt. Das Ergebnis ist eine einzige Rotation bestehend aus der gegebenen Anzahl an Flugzeugen und der gleichen Anzahl an Tagesprogrammen. Jedes der Flugzeuge fliegt dabei dasselbe Programm jeweils um einen Tag versetzt. Der letzte Flug eines Tages führt zu dem Flughafen, der in dem nachfolgenden Tagesprogramm an erster Stelle steht.

Zur Berücksichtigung mehrerer (verschiedener) Rotationen wird in einem Individuum durch eine Art Schalter nach jedem Tagesprogramm kodiert, ob das nachfolgende Tagesprogramm in derselben Rotation enthalten ist (\Rightarrow) oder zu einer anderen Rotation gehört (\Leftarrow).

Das folgende Individuum enthält drei Tagesprogramme, zwischen denen der „Rotationschalter“ kodiert ist:

Individuum:

FRA	6:20	OSL	...	MUC	0:20	\Rightarrow	DUS	6:30	ZRH	...	MAD	0:30	\Leftarrow	ZRH	6:00	MUC	...	MUC	0:10
-----	------	-----	-----	-----	------	---------------	-----	------	-----	-----	-----	------	--------------	-----	------	-----	-----	-----	------

Nur die beiden ersten Tagespläne bilden zusammen eine eigene Rotation, so dass in diesem Beispiel zwei Rotationen existieren:

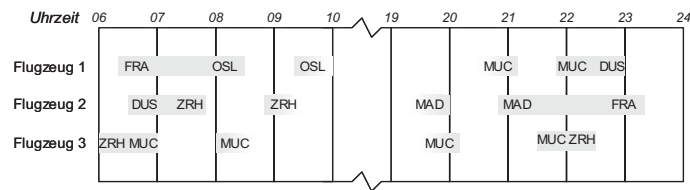


Abbildung 4: Flugplan mit drei Tagesplänen und zwei Rotationen

Die Berücksichtigung verschiedener Flugzeugtypen hat keinen Einfluss auf das verwendete Repräsentationsschema. Allerdings muss bei der Generierung des Flugplans aus der Zeichenkette des Individuums beachtet werden, dass Rotationen nur aus demselben Flugzeugtypen bestehen können.

Das folgende Individuum mit drei Tagesprogrammen dient hier als Beispiel:

Individuum:

FRA	6:20	OSL	...	MUC	0:20	⇒	DUS	6:30	ZRH	...	MAD	0:30	⇒	ZRH	6:00	MUC	...	MUC	0:10
-----	------	-----	-----	-----	------	---	-----	------	-----	-----	-----	------	---	-----	------	-----	-----	-----	------

Kodieren die ersten beiden Tagespläne denselben Flugzeugtyp und der dritte einen anderen, ergibt sich der Flugplan aus Abbildung 4. Stellen dagegen die letzten beiden Tagespläne denselben Typ dar, gilt folgender Flugplan:

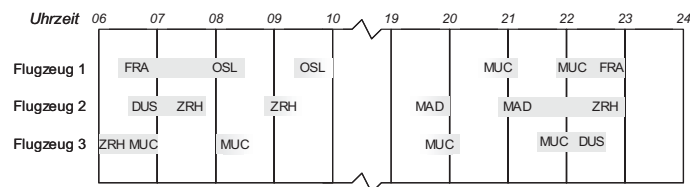


Abbildung 5: Flugplan (Flugzeug 1 ist ein anderer Flugzeugtyp als Flugzeuge 2 und 3)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem vorgestellten Repräsentationsschema jeder praktisch relevante Flugplan als Zeichenkette eines Individuums kodiert werden kann. Erfolgt die Planung für Musterwochen anstelle von Mustertagen, ist entsprechend ein Wochenplan pro Flugzeug zu generieren. Die durchschnittliche Länge eines Individuums erhöht sich somit um den Faktor 7.

3.2.2. Operatoren

Durch die genetischen Operatoren Rekombination und Mutation werden gefundene Lösungen verändert und so der gesamte Lösungsraum durchsucht. Da die Operatoren neue Lösungen auf Basis schon vorhandener Lösungen erzeugen und Lösungen durch Zeichenketten kodiert sind, müssen Rekombinations- und Mutationsoperatoren an die verwendete Repräsentation angepasst werden [Roth02].

Rekombination:

Mit einer festzulegenden Wahrscheinlichkeit werden zwei (oder mehrere) Individuen miteinander rekombiniert und so neue Individuen mit ähnlichen Eigenschaften erzeugt. Übliche und in der Praxis bewährte Crossover-Verfahren sind Single- und Multi-Point-Crossover [Ackl87; DeJo75]. Beim Single-Point-Crossover erfolgt die Bildung neuer Individuen durch den Austausch von Teilen des Individuums nach einer zufällig bestimmten Position. Beim Multi-Point-Crossover existieren mehrere solcher Positionen, so dass mehrere Segmente der Zeichenkette ausgetauscht werden können.

Im Folgenden soll die Anpassung des Single-Point-Crossovers an das Flugplanungsproblem unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2.1. eingeführten Repräsentation beschrieben werden. Zur Anwendung des Operators dient ein zufällig bestimmter konkreter Zeitpunkt als Crossover-Position. Anschließend wird das Flugprogramm, welches nach dem gewählten Zeitpunkt stattfindet, zwischen den Individuen ausgetauscht. Damit die Anzahl der Tagespläne und somit die Gültigkeit der Flugpläne erhalten bleibt, darf die Kombination von Flugplänen nur bei jeweils dem gleichen Tagesprogramm erfolgen. Außerdem sind nur solche Crossover-Punkte zulässig, die gewährleisten, dass die Rekombination nicht zu Flugplänen führt, die Restriktionen wie z.B. Flugzeugreichweiten oder Curfew Restrictions verletzen.

Die folgenden beiden Tagespläne stellen Ausschnitte kompletter Flugpläne dar. In ihnen wurde die Uhrzeit 11:50 als Crossover-Punkt ausgewählt.

Individuum 1:

FRA	6:20	OSL	0:10	MUC	0:30	ZRH	0:20	MAD	0:30	MUC	0:20
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Individuum 2:

ROM	6:50	MAD	0:20	DUS	0:30	ROM	0:50	FRA	0:30
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Das Flugprogramm aus dem ersten Individuum wird nach der Stadt MUC mit dem Flugprogramm des zweiten Individuums nach MAD ausgetauscht. Somit ergeben sich die folgenden beiden Individuen:

Individuum' 1:

FRA	6:20	OSL	0:10	MUC	0:30	DUS	0:30	ROM	0:50	FRA	0:30
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Individuum' 2:

ROM	6:50	MAD	0:20	ZRH	0:20	MAD	0:30	MUC	0:20
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------

Durch die Rekombination werden Flüge an den Crossover-Punkten durch neue Flüge ersetzt und Flüge zwischen den Flugplänen ausgetauscht. Die folgende Abbildung veranschaulicht dies anhand des obigen Beispiels:

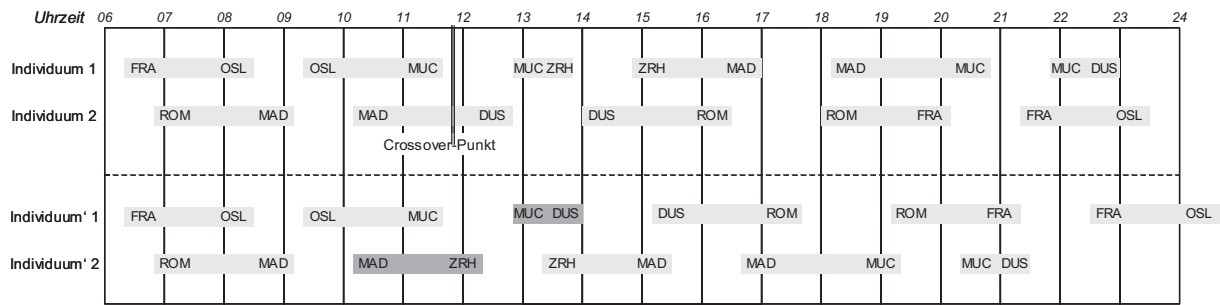


Abbildung 6: Rekombination von zwei Individuen

Mutation:

Der Mutationsoperator verändert mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Informationen in den Individuen zufällig. Für das Flugplanerstellungsproblem kann der Mutationsoperator demnach Städte in dem Individuum zufällig durch andere ersetzen. So werden zwei bisherige Flüge gelöscht und zwei neue Flüge gebildet. Neben den Städten sind die Zeitintervalle, die das Flugzeug über die minimale Bodenzeit hinaus am Flughafen wartet, und die Markierungen für die Rotationen im Individuum kodiert. Der Mutationsoperator kann die Zeitintervalle verändern, wodurch sich die Abflugzeiten der nachfolgenden Flüge verschieben. Ändert der Operator die Markierungen zwischen den Tagesplänen, erfolgt die Bildung anderer Rotationen.

Allerdings können sowohl die dargestellten Mutations- als auch Rekombinationsoperatoren die Flottenzuordnung bestehender Flüge nicht verändern, da nur zwischen gleichen Tagesplänen rekombiniert bzw. in ihnen mutiert wird und diese Tagespläne bestimmten Flugzeugtypen zugeordnet sind. Dieses Problem kann mit einer speziellen Mutationsvariante behoben werden: in einem Individuum werden zeitlich gleich lange, zufällig bestimmte Teilabschnitte vertauscht. So kann eine Zuordnung der Flüge in diesen Abschnitten zu anderen Tagesplänen und damit auch anderen Flugzeugtypen erfolgen. Allerdings muss dabei sichergestellt sein, dass keine ungültigen Flugpläne gebildet werden, wenn z.B. Flugzeugtypen mit kleiner Reichweite Langstreckenflüge übernehmen sollen.

Die folgende Abbildung veranschaulicht diesen speziellen Mutationsoperator:

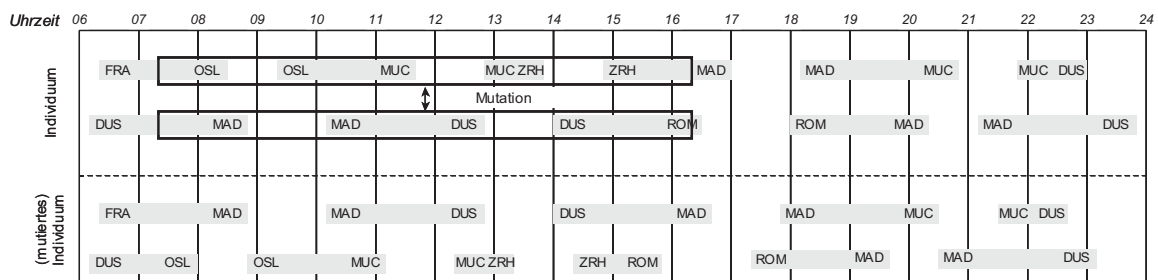


Abbildung 7: Austausch von Teilabschnitten zwischen zwei Tagesplänen in einem Individuum

Zeitanpassung:

Durch die Kodierung der zusätzlichen Bodenzeiten in den Individuen hängen die konkreten Abflugzeiten von den vorher stattfindenden Flügen ab. Wird nun ein Flug durch Rekombination oder Mutation verändert oder ausgetauscht, verschieben sich durch die veränderte Blockzeit die Abflugzeiten der nachfolgenden Flüge, was u.U. sogar zur Ungültigkeit des Flugplans führen kann.

Um sicherzustellen, dass möglichst viele Abflugzeiten im Vergleich zum Vorgängerindividuum erhalten bleiben, soll durch eine nachgeschaltete Zeitanpassung sichergestellt werden, dass die Gesamtsumme der Zeitabweichungen zwischen den Flügen im neu erzeugten Individuum und der Vorlage minimal ist. Ausgehend von dem Flug, den der genetische Operator verändert hat, werden nach und nach die umgebenden Flüge durch Anpassen der zusätzlichen Bodenzeit verschoben, so dass sie möglichst denen des Vorgängerindividuums entsprechen. Die folgende Abbildung veranschaulicht dieses Vorgehen anhand des im Beispiel aus Abbildung 6 durch Rekombination erzeugten ersten Individuums:

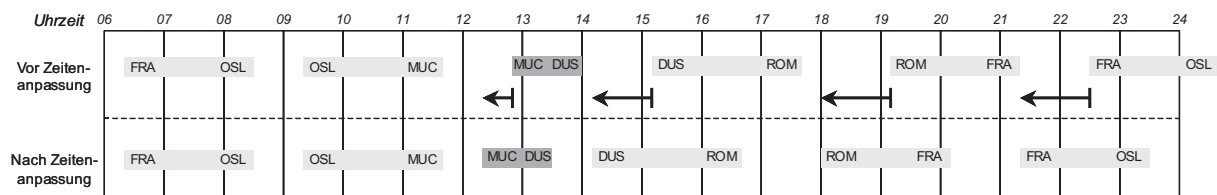


Abbildung 8: Zeitanpassung

Trotz dieser Zeitanpassung können (ungültige) Individuen entstehen, in denen zu viele Flüge an einem Tag stattfinden sollen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn wiederholt Kurzstreckenflüge durch Langstreckenflüge ersetzt werden. Genauso kann der umgekehrte Fall eintreten, dass nämlich relativ wenig Flüge an einem Tag stattfinden, was zu schlechten Flugplänen führt. Dieses Problem muss durch die Einführung eines weiteren Operators, der Flüge löscht oder neu einfügt, behoben werden.

3.2.3. Fitnessbewertung

Um die Qualität von Flugplänen zu beurteilen und um Selektionsoperatoren sinnvoll einsetzen zu können, muss es möglich sein, eine Bewertung der Individuen anhand der Zielkriterien des Problems vornehmen zu können. Da Individuen komplette Flugpläne repräsentieren, bezieht sich auch die Fitnessbewertung auf komplette Flugpläne. Unterstellt man, dass Fluggesellschaften ihren Gewinn maximieren möchten, bedeutet dies, dass für die zu evaluierenden Flugpläne der Gewinn ermittelt werden muss, den die Fluggesellschaft bei Durchführung des Plans erwartet.

Für die Bestimmung des gesamten erwarteten Gewinns sind die voraussichtlichen Kosten und Erlöse pro Flug zu bestimmen. Die Kosten sind zum überwiegenden Teil durch die durchzuführenden Flüge festgelegt. Da in dem zu evaluierenden Flugplan die Daten eines jeden Fluges festgelegt sind, können die Flugkosten (z.B. Landegebühren, Treibstoffkosten etc.) leicht ermittelt werden. Die Erlöse setzen sich aus der voraussichtlichen Anzahl an beförderten Passagieren und den durchschnittlichen, im Voraus geschätzten Ticketpreisen zusammen. Durchschnittliche Ticketpreise können aufgrund von Erfahrungswerten recht gut abgeschätzt werden (durch Preis- und Mengensteuerungsmechanismen wie z.B. dem Yield Management von Fluggesellschaften stehen genaue Ticketpreise zum Zeitpunkt der Flugplanerstellung ohnehin noch nicht fest), wohingegen die Ermittlung der zu erwartenden Anzahl der beförderten Passagiere die Hauptschwierigkeit bei der Fitnessbewertung darstellt. Die zu erwartende Nachfrage nach einem bestimmten Flug zum Abflugszeitpunkt T von Flughafen i zum Flughafen j kann hierbei als das Produkt von drei Faktoren modelliert werden. Diese drei Faktoren sind:

- die gesamte Marktgröße $MG_{i,j}$, welche die geschätzte, durchschnittliche Gesamtzahl an Passagieren angibt, die im betrachteten Planungszeitraum von Flughafen i nach Flughafen j fliegen möchten,
- die sogenannte Time-of-Day-Kurve $TD_{i,j}(t)$, die angibt, wie sich die Gesamtnachfrage über einen Tag verteilt. Sie besitzt aufgrund des morgendlichen und abendlichen Geschäftsreiseverkehrs i.d.R. zwei Nachfragspitzen,
- und die individuelle (relative) Attraktivität $A_{i,j}(t, T)$ des Fluges, welche als die Bereitschaft eines Passagiers, mit dem betrachteten Flug zum Zeitpunkt T zu fliegen, interpretiert werden kann.

Das Produkt aus der Marktgröße und der Nachfrageverteilung drückt die zum jeweiligen Zeitpunkt vorhandene Nachfrage nach einer entsprechenden Verbindung aus. Die folgende Abbildung stellt $MG_{i,j} \cdot TD_{i,j}(t)$ graphisch dar:

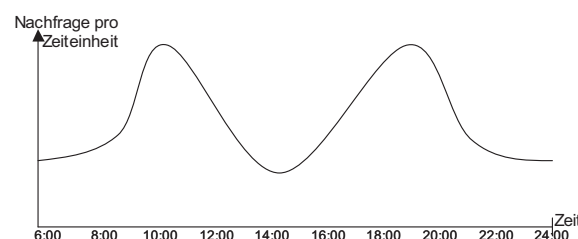


Abbildung 9: Nachfrage pro Zeiteinheit

Diese Nachfrage verteilt sich nun auf alle Flüge, die auf der Strecke in dem betrachteten Zeitraum angeboten werden. Passagiere, die zu einem bestimmten Zeitpunkt t fliegen möchten, sind hierbei zu 100% bereit, einen Flug zu wählen, der an eben diesem Zeitpunkt stattfindet, und beurteilen dementsprechend die Attraktivität dieses Fluges zum Zeitpunkt $T = t$ als maximal. Mit wachsendem zeitlichen Abstand des angebotenen Abflugzeitpunktes T zum gewünschten Abflugzeitpunkt t nimmt die Attraktivität eines angebotenen Fluges hingegen schnell ab. Die Attraktivität eines Fluges kann somit z.B. durch Funktionen des

Typs $A_{i,j}(t, T) = \gamma \cdot e^{-\frac{|T-t|^\alpha}{\beta}}$ beschrieben werden. Diese normalverteilten Funktionen haben zum Abflugszeitpunkt bei $T = t$ ein Maximum. Mit zunehmenden $|T - t|$ nimmt die Attraktivität eines Fluges hingegen exponentiell ab. Die Parameter α , β und γ unterscheiden sich für unterschiedliche Fluggesellschaften und müssen problemspezifisch ermittelt werden.

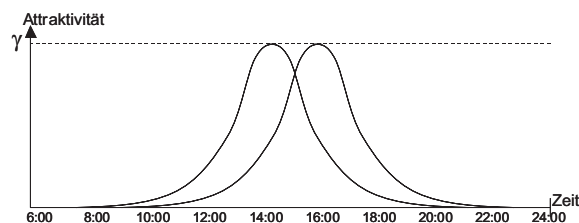


Abbildung 10: Attraktivität von zwei Flügen

Die absolute Nachfrage $PAX_{i,j}(T)$ nach einem Flug von i nach j zum Zeitpunkt T ergibt sich für jeden Zeitpunkt t als das Produkt der Nachfrage pro Zeiteinheit zu diesem Zeitpunkt t und der Attraktivität dieses Fluges zum Zeitpunkt t . Ist die Gesamtattraktivität aller

k angebotenen Flüge $GA_{i,j}(t) = \sum_{q=1}^k A_{i,j}(T_q, t)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt t kleiner als

γ (z.B. zu einem Zeitpunkt vor 12:00 Uhr in Abbildung 10), wird ein gewisser Prozentsatz $(1 - GA_{i,j}(t))$ der zu diesem Zeitpunkt nachfragenden Passagiere überhaupt nicht fliegen. Ist andererseits die Gesamtnachfrage größer als γ (z.B. zum Zeitpunkt 15:00 Uhr in Abbildung 10), verteilt sich die Gesamtnachfrage zu diesem Zeitpunkt t entsprechend der relativen

Attraktivität $\frac{A_{i,j}(T, t)}{GA_{i,j}(t)}$ auf die einzelnen Flüge.

Somit berechnet sich die gesamte Nachfrage nach einem bestimmten Flug zum Zeitpunkt T als

$$PAX_{i,j}(T) = MG_{i,j} \cdot \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} TD_{i,j}(t) \cdot \frac{A_{i,j}(T, t)}{\max(GA_{i,j}(t), 1)} dt.$$

t_{\min} und t_{\max} bezeichnen hierbei die Grenzen des betrachteten Zeitraums.

In diesem Bewertungsmodell kann mit geringem Aufwand die unterschiedliche Attraktivität von Flügen durch das Verändern der Parameter α , β und γ in der zugehörigen Attraktivitätsfunktion $A_{i,j}(t, T)$ berücksichtigt werden. Anschaulich verändert sich dadurch die Höhe des Maximums sowie die Form der Attraktivitätskurve. Mögliche Attraktivitätsunterschiede sind z.B. der auf einem Flug angebotene Service, der eingesetzte Flugzeugtyp, die Anzahl der angebotenen Anschlussverbindungen für diese Strecke oder die Präsenz der Fluggesellschaft in einem Markt. So wird z.B. durch ein großes Flugangebot die Wahrnehmung der Fluggesellschaft erhöht und die Attraktivität der Flüge dieser Fluggesellschaft steigt.

Mit Hilfe von $PAX_{i,j}(T)$ ist die zu erwartende absolute Nachfrage nach einem Flug bestimmbar. Die Anzahl transportierter Passagiere kann allerdings davon abweichen, falls aufgrund eigener Kapazitätsbeschränkungen die Nachfrage nicht komplett befriedigt werden kann oder im Falle einer Kapazitätsbeschränkung bei konkurrierenden Flügen zusätzliche Nachfrage auftritt.

3.3. Prototypische Implementierung des simultanen Planungsansatzes

Der in Abschnitt 3.2 vorgestellte Planungsansatz stellt ein neues, innovatives Konzept für die Lösung des Flugplanerstellungproblems dar. Als Nachweis der Leistungsfähigkeit des Konzepts soll mit Hilfe eines Prototypen die Frage untersucht werden, ob auf Grundlage des vorliegenden Konzepts praxistaugliche Flugpläne erzeugt und durch den Einsatz von GA verbessert werden können.

Die Entwicklung des Prototypen erfolgte in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen aus der Praxis, das als externes Dienstleistungsunternehmen die Flugplanerstellung einer mittelgroßen europäischen Fluggesellschaft betreut. Das Streckennetz der Fluggesellschaft besitzt die Form eines Sterns mit dem Heimatflughafen als Zentrum.

Der Aufbau des Prototypen entspricht dem oben skizzierten Planungskonzept. Um die Entwicklung und die Laufzeiten zu beschleunigen, wurden allerdings Vereinfachungen implementiert, die jedoch den grundsätzlichen Nachweis der Leistungsfähigkeit des Prototypen nicht beeinträchtigen.

Der Prototyp wurde ANSI-konform in C++ unter SuSE Linux 7.0 realisiert. Durch den Verzicht auf die Verwendung von grafischen Benutzerschnittstellen sind lauffähige Versionen für unterschiedliche Betriebssysteme problemlos möglich. Im Rahmen der prototypischen Implementierung wurden Linux- und Win32-kompatible Versionen des Prototyps erstellt. Der Prototyp wurde konsequent objektorientiert unter Verwendung der Klassen GA, Flug,

Flugplan, Flugzeug, Segment, Flughafen und Flugzeug-Segment implementiert. Der Test des Prototyps erfolgte an einem konkreten Realszenario.

3.3.1. Modifikationen

Im Vergleich zu dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Planungskonzept existiert nur ein einziger Flugzeugtyp sowie eine Rotation über alle zu planenden Flugzeuge. Des Weiteren wurden im Prototypen Veränderungen an den verwendeten Operatoren vorgenommen. Die Rekombination setzt sich aus einem modifizierten Single-Point-Crossover mit nachgeschalteter Reparatur des Individuums zusammen. Hierbei wird als möglicher Crossover-Punkt nur der jeweils letzte Flug eines Flugzeuges verwendet. Verletzt die Rekombination die von der Fluggesellschaft geforderte sternförmige Struktur des Streckennetzes, wird mit Hilfe eines zusätzlichen Reparaturoperators durch Löschen von Flügen oder Einfügen von Verbindungsflügen diese Sternstruktur wieder hergestellt. Mutationen sind im Prototypen nicht implementiert.

3.3.2. TestszENARIO

Das TestszENARIO umfasst einen Ausschnitt des momentanen Flugprogramms der beteiligten Fluggesellschaft. Die betrachtete Flotte besteht hierbei aus acht Flugzeugen, und es sollen insgesamt zwölf verschiedene Flughäfen angefliegen werden. Berücksichtigung finden weiterhin die unterschiedlichen Öffnungszeiten der Flughäfen sowie – für die Fitnessberücksichtigung – alle andere Flüge, die mit den Flügen der betrachteten Flotte konkurrieren. Als Kosten werden Flughafen- und Landegebühren, Personalkosten (Flugzeugbesatzung), sowie passagier- und distanzabhängige Treibstoffkosten berücksichtigt. Zur Berechnung der Erlöse konnte auf geschätzte Durchschnittserlöse je Passagier und je Flugkilometer zurückgegriffen werden. Weitergehende Verfeinerungen der Kosten und Erlöse sind prinzipiell problemlos möglich.

Um eine große Diversifikation sicherzustellen, erfolgt die Initialisierung der Startpopulation des GA mit zufälligen Flugplänen. Als Selektionsverfahren wird die $(\mu + \lambda)$ -Selektionsstrategie verwendet [BäSc93; Schw75]. Bei diesem Selektionsverfahren werden aus μ Individuen durch Rekombination in jeder Generation λ neue Individuen erzeugt. Der Selektionsoperator wählt für die nächste Generation aus den nun insgesamt $(\mu + \lambda)$ Individuen die μ Individuen mit der höchsten Fitness aus. Die λ Individuen mit der niedrigsten Fitness werden nicht mehr berücksichtigt. Als Abbruchkriterium dient die Unterschreitung einer relativen Fehlerabweichung: $\frac{Fitness_{\max} - Fitness_{\min}}{Fitness_{\max}} < 0,01$.

3.3.3. Ergebnisse

Für den Nachweis der Leistungsfähigkeit des Prototypen sind zwei Aspekte genauer zu untersuchen. Zum einen ist die Frage zu klären, ob durch den GA überhaupt gültige Lösungen erzeugt werden können und ob die verwendeten Operatoren eine zielgerichtete Suche hin zu qualitativ hochwertigen Lösungen sicherstellen. Die verwendete Fitnessfunktion bestimmt dabei die Qualität der gefundenen Lösungen. Daher muss in einem zweiten Schritt geklärt werden, ob die gefundenen Lösungen sinnvoll sind, die Bewertung von Lösungen durch die in Abschnitt 3.2.3. vorgestellte Fitnessfunktion also eine realitätsnahe Flugplanbewertung garantiert. Um dies zu überprüfen, soll die im GA verwendete Flugplanbewertungsmethode mit einer genaueren, aber wesentlich zeitaufwendigeren kommerziellen Flugplanbewertungsmethode verglichen werden.

Durch die Initialisierung, welche nur gültige Flugpläne erzeugt, und den modifizierten Rekombinationsoperator, welcher keine ungültigen Lösungen zulässt, wird sichergestellt, dass der vorgestellte Optimierungsansatz nur gültige Lösungen erzeugen kann. Zur Beantwortung der Frage, ob der GA in akzeptabler Zeit zielgerichtet hin zu qualitativ guten Lösungen konvergiert, dienen die nachfolgend präsentierten Ergebnisse von ausgewählten Optimierungsläufen. Hierbei werden durch GA mit unterschiedlichen Populationsgrößen optimale Flugpläne für das oben skizzierte Testproblem ermittelt. Alle Ergebnisse sind gemittelt über 100 Durchläufe.

Abbildung 11 zeigt beispielhaft für einen GA mit 6400 Individuen ($\mu = \lambda = 6400$) die mittlere Fitness der Population sowie die Fitness des besten bzw. schlechtesten Individuums über den Zeitablauf. Es zeigt sich, dass innerhalb von 60 Generationen der Mittelwert ca. um den Faktor drei ansteigt. Gleichzeitig steigt auch die Fitness des besten Individuums während der Optimierung um mehr als 50% an. Die Population konvergiert und die Fitness des schlechtesten Individuums nähert sich der des besten an. Es ist zu erkennen, dass der GA eine zielgerichtete Suche hin zu guten Lösungen ermöglicht.

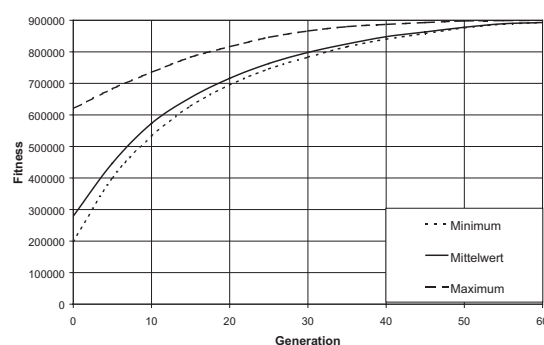


Abbildung 11: Minimum, Mittelwert und Maximum der Fitness

Theoretische Arbeiten haben gezeigt, dass bei der Verwendung von Crossover-basierten GA die Qualität einer Lösung proportional zu $1 - e^{-N}$ ist, wobei $N = \mu$ die verwendete Populationsgröße darstellt [HCGM99]. Mit zunehmender Populationsgröße steigt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein GA die optimale Lösung findet. Abbildung 12 zeigt, wie die Fitness des besten Individuums am Ende eines Optimierungslaufs von der verwendeten Populationsgröße $N = \mu$ abhängt. Die Qualität der gefundenen Lösungen steigt mit zunehmender Populationsgröße und konvergiert gegen einen Grenzwert (die optimale Lösung wird sicher gefunden).

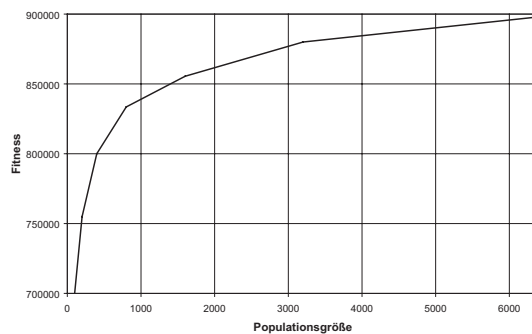


Abbildung 12: Fitness der Lösung in Abhängigkeit von der Populationsgröße

Abbildung 13 beschreibt die Abhängigkeit der Rechenzeit von der verwendeten Populationsgröße. Es ist erkennbar, dass die Rechenzeit ungefähr linear mit der verwendeten Populationsgröße ansteigt.

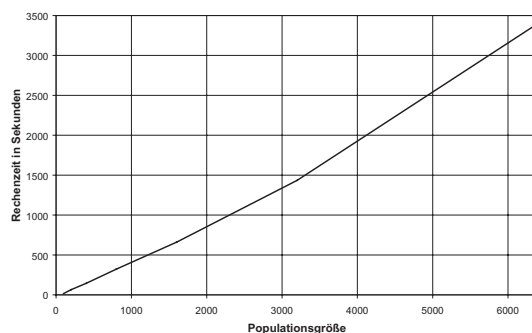


Abbildung 13: Gesamte Rechenzeit in Abhängigkeit von der Populationsgröße

In einem zweiten Schritt soll eine genauere Untersuchung der Güte der in Abschnitt 3.2.3. vorgestellten Fitnessfunktion erfolgen. Es muss betrachtet werden, ob die vom GA ermittelten Lösungen auch wirklich sinnvoll sind, also auch in der Realität bessere Flugpläne darstellen. Diese Untersuchung ist notwendig, da die hier vorgestellte Fitnessbewertung eine erhebliche Vereinfachung bisheriger Flugplanbewertungsmethoden darstellt. Diese Vereinfachung ist allerdings erforderlich, um schnelle Fitnessbewertungen innerhalb von wenigen Sekunden durchführen zu können. Da klassische Flugplanbewertungswerkzeuge wesentlich

mehr Einflussfaktoren berücksichtigen, benötigen sie für eine einzige Flugplanbewertung bis zu mehrere Stunden Zeit und können daher nur sehr eingeschränkt in GA-basierten Simultanplanungsverfahren Verwendung finden.

Zum Vergleich werden zehn verschiedene, voneinander unabhängige Flugpläne einerseits mit der im GA verwendeten Fitnessfunktion und andererseits mit dem von der Fluggesellschaft benutzten Bewertungsmodell evaluiert. Da im GA nur relative Fitnessvergleiche stattfinden, ist die absolute Bewertung der Individuen nicht relevant. Wichtig sind ausschließlich die relativen Fitnessunterschiede zwischen Individuen. Abbildung 14 stellt den Vergleich grafisch dar. Die Korrelation der beiden Bewertungen beträgt 0,65. Lässt man den Flugplan (S9), der aus noch genauer zu betrachtenden Gründen deutlich unterschiedlich bewertet wurde, als Ausreißer unberücksichtigt, beträgt die Korrelation sogar 0,90.

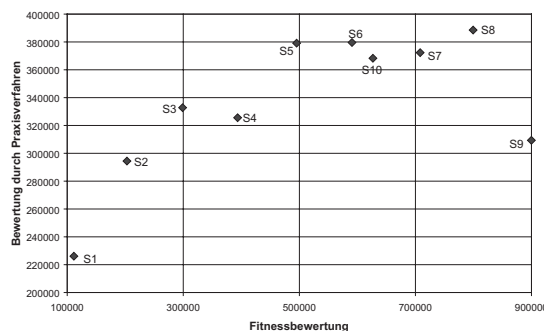


Abbildung 14: Bewertung von Flugplänen durch Fitnessfunktion und Praxisverfahren

3.3.4. Bewertung des Prototypen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit Hilfe des Prototypen der Nachweis erbracht werden kann, dass das vorgestellte simultane Planungskonzept geeignet ist, Flugpläne zu erstellen und zu optimieren. Der Prototyp sucht zielgerichtet nach guten Lösungen, welche sowohl von klassischen Bewertungswerkzeugen als qualitativ hochwertig bewertet, als auch von menschlichen Flugplanexperten als sinnvoll und aussichtsreich betrachtet werden. Zwar sind in diesem Prototyp verschiedene Vereinfachungen gegenüber dem theoretischen Konzept realisiert worden, sie stellen allerdings den grundsätzlichen Nachweis des Konzepts nicht in Frage. Durch ihre Einschränkungen wird zwar die Laufzeit des Optimierungsverfahrens beschleunigt, gleichzeitig aber die Lösungsgüte auch reduziert. So fehlt z.B. durch die Nichtberücksichtigung der Mutation ein lokaler Suchoperator, der bestehende Lösungen inkrementell verbessern kann. Des Weiteren sind durch die Vorgabe einer begrenzten Anzahl an möglichen Crossover-Punkten die Möglichkeiten der Rekombination eingeschränkt. Würden diese Vereinfachungen aufgehoben werden, kann man mit einer Verbesserung der Lösungsqualität rechnen, allerdings stiege auch die Laufzeit des Verfahrens.

Auch die Fitnessbewertung lässt noch Raum für Verbesserungen und Erweiterungen offen. So soll in weiteren Arbeiten versucht werden, die Korrelation zwischen der Fitnessabschätzung durch die vorgestellte Fitnessbewertungsfunktion und den Flugplanbewertungsmodellen der Praxis weiter zu erhöhen. Da mit zunehmender Anzahl an Generationen die Population konvergiert und sich die Fitnessunterschiede zwischen den Individuen reduzieren, erscheint es sinnvoll, die Genauigkeit der Fitnessabschätzung entsprechend zu erhöhen.

4. Fazit

Die Erstellung von qualitativ hochwertigen Flugplänen ist von entscheidender Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg von Fluggesellschaften. Da allerdings die zahlreichen unabhängigen Entscheidungsvariablen und deren Interdependenzen zu einer hohen Komplexität dieses Planungsproblems führen, werden Flugpläne bisher in einem sequentiellen Prozess erstellt. Dazu erfolgt die Zerlegung des Gesamtproblems in weniger komplexe Teilprobleme und deren anschließende schrittweise Lösung. Da durch dieses Vorgehen bestehende Interdependenzen zwischen den Teilproblemen unberücksichtigt bleiben, verspricht ein Planungsansatz auf Basis des gesamten Flugplans eine höhere Lösungsqualität und damit bessere Flugpläne.

Gegenstand dieses Beitrags ist die Konzeption eines Simultanplanungsansatzes, durch den das Flugplanerstellungproblem mit Hilfe von Genetischen Algorithmen (GA) gelöst wird. Die Planung erfolgt dabei auf Basis kompletter Flugpläne, in denen alle Interdependenzen implizit berücksichtigt sind. Darüber hinaus werden in diesem Beitrag erste Ergebnisse eines Prototyps präsentiert, welche den Nachweis der prinzipiellen Tauglichkeit des Planungsansatzes erbringen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Planungsverfahren in der Lage ist, gültige Lösungen zu erzeugen und eine zielgerichtete Suche hin zu qualitativ hochwertigen Lösungen sicherzustellen. Die Güte der gefundenen Lösungen wird hierbei durch einen Vergleich mit einem in der Praxis eingesetzten kommerziellen Flugplanbewertungsprogramm sichergestellt.

Obwohl anhand des vorgestellten Prototyps die prinzipielle Leistungsfähigkeit des vorgestellten Simultanplanungsansatzes demonstriert werden kann, lassen die vorgestellten Ergebnisse jedoch noch keine abschließende Beurteilung der Praxistauglichkeit des Simultanplanungsansatzes zu. Deshalb wird im Moment daran gearbeitet, sowohl die Lösungsqualität des GA durch die Weiterentwicklung der eingesetzten Suchoperatoren zu erhöhen, als auch das Planungskonzept für die gesamte Flotte einer Fluggesellschaft ohne besondere Vereinfachungen und Restriktionen anzuwenden. Notwendig ist auch die Berücksichtigung

von extern vorgegebenen Zeitfenstern (Slots) für die Start- und Landezeiten einer Fluggesellschaft. Des Weiteren ist die Fitnessfunktion zu erweitern, so dass anstelle der rein segmentbasierten Bewertung auch Anschlussflüge berücksichtigt werden können.

Diese Erweiterungen sollen einen Einsatz des vorgestellten Planungskonzeptes in der Praxis ermöglichen. In einer Studie von Barnhart et al. [BaLS98] wird bereits durch die simultane Lösung der beiden Teilprobleme Flotteneinsatzplanung und Besatzungseinsatzplanung eine Kostenreduktion von insgesamt bis zu 3,5% im Vergleich zur sequentiellen Lösung erreicht. In unserem Planungsansatz ist ein Großteil der bisherigen Teilprobleme enthalten. Insofern ist davon auszugehen, dass sein erfolgreicher Praxiseinsatz eine deutlich höhere Kostenreduktion ermöglicht und einen nicht unerheblichen positiven Beitrag zum wirtschaftlichen Ergebnis einer Fluggesellschaft leisten kann.

Literatur

- [Ackl87]
Ackley, D. H.: A Connectionist Machine for Genetic Hill Climbing. Kluwer Academic, Boston 1987.
- [Airb02]
Airbus: Global Market Forecast 2001-2020. Blagnac-Cedex 2002.
- [Ante98]
Antes, J.: Structuring the Process of Airline Scheduling. In: *Kischka, P. (Hrsg.):* Operations Research Proceedings 1997. Springer, Berlin 1998, S. 515 – 520.
- [ATAA02a]
Air Transport Association of America: 2002 Annual Report. Washington 2002.
- [ATAA02b]
Air Transport Association of America: FAA Releases Aviation Forecast.
<http://www.airlines.org/public/news/pda.asp?nid=5229>, 2002-03-12, Abruf am 2003-03-22.
- [ATAA03a]
Air Transport Association of America: Annual Passenger Prices (Yield).
<http://www.airlines.org/public/industry/pda.asp?nid=1035>, 2003-01-14, Abruf am 2003-03-22.
- [ATAA03b]
Air Transport Association of America: The Airline Handbook – Online Version.
<http://www.air-transport.org/public/publications/display1.asp?nid=961>, 2003-01-28, Abruf am 2003-03-22.
- [BaLS98]
Barnhart, C.; Lu, F.; Sheno, R.: Integrated Airline Schedule Planning. In: *Yu, G. (Hrsg.):* Operations Research in the Airline Industry. Kluwer, Boston 1998, S. 384 – 403.
- [BäSc93]
Bäck, T.; Schwefel, H.-P.: An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization. In: *Evolutionary Computation 1 (1993) 1*, S. 1 – 23.
- [BaSc96]
Bachem, A.; Schrader, R.: Jahresbericht der Arbeitsgruppe Prof. Dr. A. Bachem/Prof. Dr. R. Schrader 1995/96. Mathematisches Institut und Institut für Informatik der Universität zu Köln, 1996.
- [BaTa97]
Barnhart, C.; Talluri, K. T.: Airline Operations Research. In: *ReVelle, C.; McGarity, A. E. (Hrsg.):* Design and Operation of Civil and Environmental Engineering Systems, John Wiley & Sons, Chichester 1997, S. 435 – 469.
- [BBBE97]
Bachem, A.; Bodmann, M.; Bolz, G.; Emden-Weinert, T.; Erdmann, A.; Kiahaschemi, M.; Monien, B.; Prömel, H. J.; Schepers, J., Schrader, R.; Schulze, J.; Tschöke, S.: Verbundprojekt PARALOR: Parallele Algorithmen zur Wegeoptimierung in Flugplanung und Logistik. Beitrag zur Statustagung des BMBF HPSC 97. In: *Wolf, G.; Krahl, R. (Hrsg.):* Paralleles Höchstleistungsrechnen und seine Anwendungen. München 1997.
- [BBCJ98]
Barnhart, C.; Boland, N. L.; Clarke, L. W.; Johnson, E. L.; et al.: Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing. In: *Transportation Science 32 (1998) 3*, S. 208 – 220.

- [CHJN96]
Clarke, L.; Hane, C. A.; Johnson, E. L.; Nemhauser, G. L.: Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment. In: *Transportation Science* 30 (1996) 3, S. 249 – 260.
- [CoRe02]
Costaguta, A. A.; Resiak, G.: Regional Differences Persist in Operating Economics of International Airlines. In: *ICAO Journal* 57 (2002) 6, S. 7 – 11.
- [DeJo75]
De Jong, K. A.: An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems. Promotion an der University of Michigan, Ann Arbor 1975.
- [DDDS97]
Desaulniers, G.; Desrosiers, J.; Dumas, Y.; Solomon, M. M.; Soumis, F.: Daily Aircraft Routing and Scheduling. In: *Management Science* 43 (1997) 6, S. 841 – 855.
- [EtMa85]
Etschmaier, M. M.; Mathaisel, D. F. X.: Airline Scheduling: An Overview. In: *Transportation Science* 19 (1985) 2, S. 127 – 138.
- [Fran90]
Franken, R.: Objektorientierte Gestaltung von Planungsunterstützungssystemen für die Produktionsplanung - Dargestellt am Beispiel der Kapazitäts- und Flugplanung der Deutschen Lufthansa AG. In: *Wirtschaftsinformatik* 32 (1990) 3, S. 253 – 262.
- [Gold89]
Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading 1989.
- [GrCM98]
Grandeau, S. C.; Clarke, M. D.; Mathaisel, D. F. X.: The Processes of Airline System Operations Control. In: *Yu, G. (Hrsg.): Operations Research in the Airline Industry.* Kluwer, Boston 1998, S. 312 – 369.
- [Hax74]
Hax, H.: Entscheidungsmodelle in der Unternehmung. Rowohlt, Hamburg 1974.
- [HCGM99]
Harik, G.; Cantú-Paz, E.; Goldberg, D. E.; Miller, B. L.: The Gambler's Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Populations. In: *Evolutionary Computation* 7 (1999) 3, S. 231 – 253.
- [Hein89]
Heinhold, M.: Simultane Unternehmensplanungsmodelle - ein Irrweg? In: *DBW (Die Betriebswirtschaft)* 49 (1989) 6, S. 689 – 708.
- [Holl75]
Holland, J. H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor 1975.
- [ICA002]
ICAO: Annual Civil Aviation Report. In: *ICAO Journal* 57 (2002) 6, S. 12 – 46.
- [ICA003]
ICAO: ICAO Update. In: *ICAO Journal* 58 (2003) 1, S. 25 – 27.
- [Kilg73]
Kilger, W.: Optimale Produktions- und Absatzplanung. Westdeutscher Verlag, Opladen 1973.
- [KoAc99]
Kontogiorgis, S.; Acharya, S.: US Airways Automates its Weekend Fleet Assignment. In: *Interfaces* 29 (1999) 3, S. 52 – 62.

- [Krüg80]
Krüger, W.: Fallstudie Friedrichshafen zu Planungsproblemen einer Regionalluftverkehrsgesellschaft. Duncker & Humblot, Berlin 1980.
- [Math97]
Mathaisel, F. X.: Decision Support for Airline Schedule Planning. In: Journal of Combinatorial Optimization (1997) 1, S. 251 – 275.
- [Mell99]
Mellouli, T.: Standardisierte Decision-Support-Komponenten für Ressourceneinsatzplanung und Störungsmanagement bei Bahn-, Regionalbus- und Fluggesellschaften. Konferenzbeitrag für das 3. Meistersingentreffen, Schloss Thurnau 1999-11-25.
- [Niss95]
Nissen, V.: Evolutionäre Algorithmen. In: Wirtschaftsinformatik 37(1995) 4, S. 393 – 397.
- [Niss97]
Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Vieweg, Braunschweig 1997.
- [Poll74]
Pollack, M.: Some Aspects of the Aircraft Scheduling Problem, In: Transportation Research 8 (1974), S. 233 – 243.
- [Poll82]
Pollack, M.: Airline Route-Frequency Planning: Some Design Trade-Offs. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 16 (1982) 2, S. 149 – 159.
- [Pomp02]
Pompl, W.: Luftverkehr: eine ökonomische und politische Einführung. 4. Auflage, Springer, Berlin 2002.
- [RuKo97]
Rushmeier, R. A.; Kontogiorgis, S. A.: Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment. In: Transportation Science 31 (1997) 2, S. 159 – 169.
- [RuSc94]
Rudolph, G.; Schwefel, H.-P.: Evolutionäre Algorithmen: Ein robustes Optimierkonzept. In: Physikalische Blätter 50 (1994) 3, S. 236 – 239.
- [Roth02]
Rothlauf, F.: Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms. Physica-Verlag, Heidelberg 2002.
- [Schw75]
Schwefel, H.-P.: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Berlin 1975.
- [Stin74]
Stinnes, A.-H.: Simultane Produktionsprogramm-, Kapazitäts- und Preisplanung in Unternehmungen mit saisonalem Absatzverlauf mit Hilfe von Methoden des Operations Research. Dissertation an Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1974.
- [SSQW94]
Subramanian, R.; Scheff, R. P.; Quillinan, J. D.; Wiper, D. S.; Marsten, R. E.: Coldstart: Fleet Assignment at Delta Airlines. In: Interfaces 24 (1994) 1, S. 104 – 120.
- [Suhl93]
Suhl, L.: Entscheidungsunterstützende Systeme bei der Produktionsplanung in Fluggesellschaften. In: Wirtschaftsinformatik 35 (1993) 6, S. 542 – 550.

[Suhl95]

Suhl, L.: Computer-Aided Scheduling, An Airline Perspective. Gabler, Wiesbaden 1995.

[Tall96]

Talluri, K. T.: Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment. In: Transportation Science 30 (1996) 3, S. 237 – 248.

[Teod88]

Teodorovic, D.: Airline Operations Research. Gordon and Breach Science Publishers, New York 1988.

[Well94]

Wells, A. T.: Air Transportation: A Management Perspective. Brooks/Cole Publishing, Wadsworth 1994.