

Verkehrsflussoptimierung durch Abflugplanung von Kurzstreckenflügen

Diplomarbeit

von

Philipp Jarvers



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Angewandte Wissenschaften

Institut für Informatik

2006

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Betreuer Wolfgang Hatzack von ATRiCS GmbH & Co. KG, der mir stets mit guten Ratschlägen und Ideen zur Seite stand. Auch an Helmut Hock von der Deutschen Flugsicherung GmbH und Dr. Gerrit Klempert von der Lufthansa AG geht mein herzlicher Dank, da ihre Bereitschaft zur Zusammenarbeit, sowie die freundliche Aufnahme die Arbeit sehr viel einfacher gestalteten. Ebenso möchte ich den Mitarbeitern der ATRiCS GmbH und Co. KG danken, denen ich ebenso einige gute Ratschläge und Tipps verdanke.

Mein Dank gilt auch meiner Freundin Anne, welche die notwendige Geduld aufbrachte und mich auch moralisch sehr unterstützte. Auch meinen Eltern vielen Dank für die geleistete Unterstützung, ohne diese wäre es mir so nicht möglich gewesen die Arbeit zu verfassen.

Schließlich geht mein Dank natürlich auch an Herrn Prof. Dr. Bernhard Nebel, der die Entstehung dieser Arbeit erst ermöglichte.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Freiburg im Januar 2006

Philipp Jarvers

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Abflugplanung von Kurzstreckenflügen an Zubringerflughäfen zum Zwecke der Verkehrsflussoptimierung im Bereich des Anfluglufttraums und der Landung an großen Drehkreuzflughäfen behandelt. Es wird die Problematik eines nicht optimierten Verkehrsflusses im Anflugbereich aufgezeigt und dargestellt, welches Vorgehen sich zur Lösungsfindung anbietet und welche Schwierigkeiten bei der Erstellung einer Lösung entstehen.

Die aufgezeigten Verfahren zur Lösungsfindung umfassen einen first-come-first-served-Ansatz sowie einen Branch-and-Bound-Ansatz, die im Hinblick auf das gegebene Problem angepasst und optimiert wurden.

Eine Anwendung auf realen, von Luftfahrtunternehmen zur Verfügung gestellten Daten erlaubt eine detaillierte und umfangreiche Auswertung und zeigt zudem die Möglichkeiten und zu erwartenden Ergebnisse eines potenziellen Einsatzes der beschriebenen Verfahren.

In einer Diskussion werden weitere mögliche Vorgehensweisen und potentielle Verbesserungen behandelt. Ein Ausblick auf weitere Maßnahmen in diesem Bereich sowie zukünftige Möglichkeiten zur Verkehrsflussoptimierung schließt die Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Zielsetzung	2
2 Motivation	4
2.1 Management des Luftverkehrs	4
2.1.1 Operative Planung	5
2.1.2 Taktische Planung	5
2.1.3 Strategische Planung	6
2.1.4 Notwendigkeit von Planung im Luftverkehr	6
2.2 Aktuelle Situation	7
2.2.1 Ballungen im Verkehrsstrom	8
2.2.2 Methoden der Sequenzierung	9
2.2.3 Verlauf eines Anflugs	11
2.2.4 Nachteile aktueller Verfahren	12
2.2.5 Situation in Frankfurt am Main	14
2.3 Aufgabenstellung	15
2.3.1 Grundlagen	15
2.3.2 Eine grafische Problemdarstellung	16
2.3.3 Problemumschreibung	17
3 Problembeschreibung	21
3.1 Formalisierung des Problems	21
3.1.1 Vorbereitungen	21
3.1.2 Das Problem P	22
3.1.3 Eine Erweiterung P'	23
3.2 Ein Beispiel	24
3.2.1 Stufe 1: Eingangsbelegungen und Vorbereitungen	24
3.2.2 Stufe 2: Finden einer Menge von Lösungskandidaten	26
3.2.3 Stufe 3: Finden einer optimalen Lösung	28
3.2.4 Abschluss	31
4 Lösungsansätze	32
4.1 Vorbereitungen	32
4.1.1 Komplexitätsbetrachtungen	33
4.2 First-Come-First-Served	34
4.2.1 Informelle Beschreibung	35

4.2.2	Formale Darstellung	37
4.2.3	Komplexitätsbetrachtungen	37
4.2.4	Grafisches Beispiel	39
4.3	Branch and Bound	40
4.3.1	Messgrößen	40
4.3.2	Einführung in das Verfahren	41
4.3.3	Baumstrukturen	43
4.3.4	Einschränkung des Suchbaumes	47
4.3.5	Zielfunktion	48
4.3.6	Verwendete Heuristik	49
4.3.7	Implementation	51
4.3.8	Komplexitätsbetrachtungen	53
4.3.9	Grafisches Beispiel	55
4.4	Bestimmung einer robusten Lösung	56
4.4.1	Monte-Carlo-Simulation	56
4.4.2	Vergleich der Szenarien	57
4.4.3	Lösungsbewertung	58
4.4.4	Laufzeitbetrachtung	60
4.5	Berechnung der Startzeiten	61
5	Evaluation	63
5.1	Eine praktische Anwendung	63
5.2	Datengrundlage	64
5.2.1	Verfügbare und verwendete Daten	64
5.2.2	Ungenauigkeiten	65
5.2.3	Analyse der erwarteten Landezeiten	66
5.3	Erwartungen	68
5.4	Vorbereitungen	70
5.4.1	Bestimmung relevanter Parameter	70
5.4.2	Festlegung der Parameter	72
5.5	Ergebnisse	74
5.5.1	Ergebnisse mit unterschiedlicher Optimierung	75
5.5.2	Vergleich FCFS und BnB	77
5.5.3	Potenzialbestimmung	78
5.6	Diskussion	79
6	Zusammenfassung und Ausblick	81
6.1	Zusammenfassung	81
6.2	Ausblick	81

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnungen und Organisationen der Luftfahrt

ADV	<i>Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATFM	<i>Air Traffic Flow Management</i>
CDM	<i>Collaborative Decision Making</i>
CFMU	<i>Central Flow Management Unit</i>
DFS	<i>Deutsche Flugsicherung GmbH</i>
DLH	<i>ICAO Code der Fluggesellschaft Deutsche Lufthansa AG</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organisation</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>

Sonstige Ankürzungen

BnB	<i>Branch-and-Bound</i>
FCFS	<i>first-come first-served</i>

Abkürzungen von Bezugszeiten

AIBT	<i>Actual In-Block Time</i>
ALDT	<i>Actual Landing Time</i>
AOBT	<i>Actual Off-Block Time</i>
ATOT	<i>Actual Take-Off Time</i>
CTOT	<i>Calculated Take-Off Time</i>
EIBT	<i>Estimated In-Block Time</i>
ELDT	<i>Estimated Landing Time</i>
EOBT	<i>Estimated Off-Block Time</i>
ETOT	<i>Estimated Take-Off Time</i>
EXIT	<i>Estimated Taxi-In Time</i>
QLDT	<i>Queued Landing Time</i>
SIBT	<i>Scheduled In-Block Time</i>
SLDT	<i>Scheduled Landing Time</i>
SOBT	<i>Scheduled Off-Block Time</i>
STOT	<i>Scheduled Take-Off Time</i>
TIBT	<i>Target In-Block Time</i>
TLDT	<i>Target Landing Time</i>
TOBT	<i>Target Off-Block Time</i>
TTOT	<i>Target Take-Off Time</i>

1 Einleitung

Das beständige Wachstum der Luftfahrtbranche ist neben anderen, heute großen Verkehrsbranchen ein überaus deutlich ausgeprägtes Beispiel dafür, wie sehr sich die Verkehrslandschaft der Industrienationen in den vergangenen Jahrzehnten gewandelt hat. Seit Beginn der 50er-Jahre im 20. Jahrhundert nahm der Luftverkehr nahezu kontinuierlich zu. Ein rasantes Wachstum ließ die Zahl der beförderten Passagiere ebenso wie die Anzahl der Flüge nach oben klettern. Selbst einschneidende Ereignisse, wie die Anschläge vom 11. September 2001, oder die beinahe regelmäßigen Meldungen über Flugzeugabstürze mit großen Verlusten von Menschenleben oder die Folgen der Ölkrisen in den 70er-Jahren konnten das Wachstum langfristig gesehen nicht maßgeblich behindern. Dennoch führten insbesondere Krisen stets zu Änderungen in der Betriebsweise und Innovationen im Bereich der Luftfahrt, von denen in der Regel auch später noch profitiert wird.

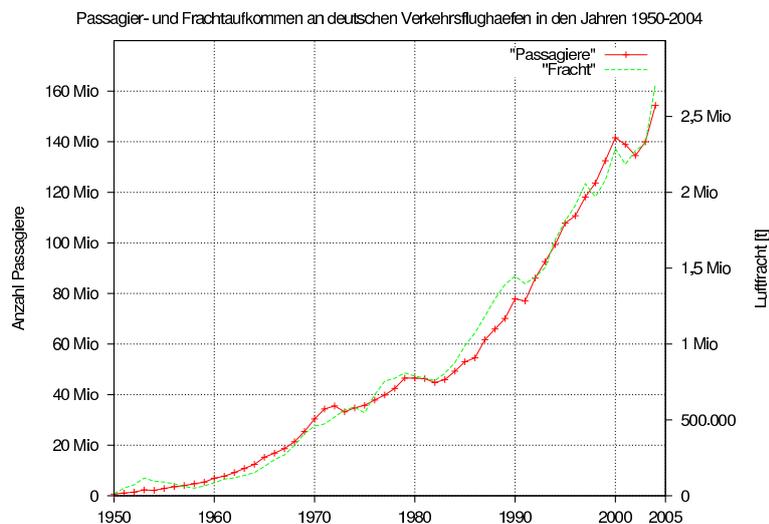


Abbildung 1.1: Wachstum in der Luftfahrtbranche 1950 bis 2004 (Quelle: ADV)

Auch wenn zur Zeit keine allzu offensichtliche Krise die Luftfahrtbranche bedrückt, so gibt es doch aufgrund verschiedener Anlässe und Änderungen stets Handlungsbedarf für beteiligte Unternehmen und Einrichtungen. So kam es innerhalb der letzten Jahre beispielsweise zu Änderungen im Angebot der Fluggesellschaften, was heute als sogenannte Low-Cost Airlines, bzw. Billigfluggesellschaften bekannt ist. Dem auch durch einen solchen Marktwandel erzeugten, beständigen Druck des anhaltenden Wettbewerbs und der Leistungssteigerung

ausgesetzt, gilt es für viele Unternehmen oder Organisationen, neue Ideen zur Effizienzsteigerung, bzw. Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit, zu finden. Somit ist es nicht verwunderlich, dass sich mehr und mehr die Einsatzbereiche der planenden Luftfahrt mit denen der Optimierungstheorie überlappen.

1.1 Ausgangssituation

Nachdem bereits in den 60er-Jahren erste Konferenzen zur Belegung der Start- und Landezeiten an großen Flughäfen durch die Fluggesellschaften stattfanden [8], mehrte sich der Einsatz zum Zwecke verbesserter Abläufe bis in die 80er-Jahre sogar dahingehend, dass in Europa mit der CFMU (*Central Flow Management Unit*) eine eigene Organisation für die Verkehrsflusssteuerung eingerichtet wurde [8,13]. Auch anschließend erlebte der Banchenzweig, der sich um die Optimierung bestehender Verfahren kümmert, auch durch die wachsende Computerindustrie einen deutlichen Aufschwung.

Heutzutage spielt die Optimierung in Vorgängen der Luftfahrt eine entscheidende Rolle. Neben Einrichtungen wie Arrival- und Departure-Managern, die heute vielerorts die Bewältigung von An- und Abflügen an Großflughäfen unterstützen, existieren viele weitere Systeme, die Abläufe an Flughäfen planen und optimieren, wie beispielsweise die zugehörigen Abfertigungsvorgänge bezüglich des Gepäcks, oder auch der Wartung von Maschinen.

Auch wegen der Vielzahl der zur Zeit bestehenden Systeme geht momentan der Trend dorthin, im Verbund mit anderen Unternehmen Gesamtkonzepte und übergreifende Systeme zu entwickeln. Bereits existierende, einzelne Komponenten sollen vereint zu möglichst noch besseren Ergebnissen bewegt werden und somit nachhaltige Effekte erzielen.

Das bedeutet jedoch nicht, dass einzelne Studien oder Untersuchungen bezüglich spezieller Sachverhalte keine große Aussicht auf Erfolg besitzen. Vielmehr gilt es auch weiterhin, an erfolgversprechenden Punkten gezielt Untersuchungen zu betreiben, inwiefern mögliche Eingriffe eine Verbesserung der Situation erbringen könnten.

Auch mit dem hier untersuchten Thema wird ein Sachverhalt betrachtet, der innerhalb eines großen Gesamtkonzepts möglicherweise sehr viel erfolgversprechender erscheinen könnte. Doch besteht vorerst die Frage, ob es sinnvoll ist, in diesem Bereich überhaupt weiteren Aufwand zur Situationsverbesserung zu betreiben und inwiefern ein Erfolg dabei abzusehen ist.

1.2 Zielsetzung

Mit dieser Arbeit soll vor allem ein Beitrag zur möglichen Verbesserung der aktuellen Situation an Großflughäfen, wie beispielsweise Frankfurt am Main, Charles de Gaulle in Paris, oder auch London Heathrow, geleistet werden. Dies betrifft insbesondere die aktuelle, wegen dadurch höheren Arbeitsbelastungen

der Lotsen ungewünschte Diskontinuität des Verkehrsflusses im Anflugbereich eines internationalen Großflughafens und die damit einhergehende Umwelt- und Lärmbelastung aktueller Verfahren, sowie die Pünktlichkeit ankommender Maschinen. Jegliche Verbesserung bezüglich dieser Punkte wird als ein Erfolg angesehen, sofern eine möglicherweise entstehende Benachteiligung anderer Indikatoren die Vorteile nicht überwiegt.

Im Folgenden wird anhand eines Branch-and-Bound-Algorithmus ein Verfahren entwickelt, um den eintreffenden Verkehrsfluss an Flughäfen insgesamt kontinuierlicher zu gestalten. Neben einer Entlastung der Lotsen lässt sich dadurch auch die Pünktlichkeit verbessern, sowie die Effizienz der Flüge erhöhen. Hierfür sollen die Abflugzeiten einiger Flüge zeitlich auf die Art verschoben werden, dass ihre voraussichtliche Landung zu solchen Zeiten stattfindet, zu denen sich ein Eingreifen des Lotsen zur Separierung reduziert, und somit eine Verlängerung der Flugwege und -zeiten nicht mehr oder weniger stark notwendig ist.

2 Motivation

Spricht man die Menschen in Europa oder anderen Industrienationen auf das Thema Luftfahrt an, so kommt den meisten wohl zuerst das gewöhnliche Verkehrsflugzeug in den Sinn, mit dem gelegentlich die Reise in den Urlaub stattfindet, bzw. der ein oder andere auch geschäftlich unterwegs ist. Dennoch ist dem Großteil der Bevölkerung klar, dass die Luftfahrt weit mehr ausmacht als das Fliegen von großen Passagiermaschinen oder das Steuern kleinerer Sportgeräte. Hierzu zählen beispielsweise ebenso die Ausübung der Luftverkehrskontrolle durch Fluglotsen, das Warten der Maschinen, Erstellen neuer Flugpläne und vieles mehr. Nur selten ist den Menschen jedoch bekannt, welche Probleme sich heutzutage neben denen der Umweltbelastung oder auch der Lärmbelastung im Luftverkehr auftun. Zu diesen weniger bekannten Sorgen der Luftfahrt zählt schon seit einigen Jahrzehnten die Planung des Verkehrs im Voraus zur gezielten Regulierung von Verkehrsabläufen. Hierunter fällt hauptsächlich das relativ umfassende Gebiet des Verkehrsflussmanagements, auf welches im Folgenden etwas ausführlicher eingegangen wird.

2.1 Management des Luftverkehrs

Das Verkehrsflussmanagement – in der Luftfahrtbranche auch als *Air Traffic Flow Management* (ATFM) bezeichnet [8,9,10,15] – ist neben der Flugzeugsteuerung oder etwa auch der Luftverkehrskontrolle eine weitere Domäne in der Luftfahrt, deren Maßnahmen neben den unmittelbaren operativen Eingriffen der Fluglotsen den Verkehr maßgeblich beeinflussen. Im Gegensatz zur Arbeit der Lotsen, dem *Air Traffic Control* (ATC), wirkt sich das ATFM jedoch zum großen Teil nicht unmittelbar auf den Verkehr aus. Vielmehr sind die Effekte oder Auswirkungen oft nur mittel- oder gar langfristig messbar. Verkehrsflussmanagement bedeutet einerseits ein Planen und Organisieren des Verkehrsflusses, andererseits aber auch ein nachhaltiges Vorbereiten von Flughäfen und anderen Einrichtungen auf den weiterhin wachsenden Verkehr und die somit steigende Zahl zu kontrollierender Flugzeuge. Zu möglichst jeder Zeit soll dabei stets mit einer der vorhandenen Kapazität angepassten Verkehrsmenge und einem möglichst kontinuierlichen Verkehrsfluss gerechnet werden können. Eingriffe in den Verkehrsablauf, die diese Ziele erreichen sollen, können prinzipiell verschiedener Natur sein.

2.1.1 Operative Planung

In der Regel übt der Lotse mittels Anweisungen und Freigaben einen direkten Einfluss auf das Verkehrsgeschehen aus, d.h. seine Eingriffe haben meist das Ziel, eine sofortige Auswirkung zur Folge zu haben. Vereinfacht gesehen besteht die Hauptaufgabe des Controllers darin, Konfliktsituationen zu vermeiden, d.h. für die Sicherheit der Flugobjekte auf deren Weg zum jeweiligen Bestimmungsort zu sorgen, was mittels der hierfür notwendigen Geschwindigkeits- und Richtungsanweisungen (einschließlich der Flughöhe) oder auch anderen Freigaben erreicht werden kann. Falls ein vorausschauendes Handeln beim Lotsen sinnvoll möglich ist, so beschränkt sich der planende Aspekt meistens auf sehr nahe Zeitpunkte in der Zukunft. So gilt es beispielsweise Annäherungen oder gar drohende Kollisionen innerhalb der nächsten wenigen Minuten zu vermeiden oder auch das Eintreffen eines Flugzeugs an einem strategisch wichtigen Wegpunkt innerhalb der nächsten Zeit zu planen. Diese sehr kurzfristige Planung, welche sich oftmals nur einem relativ kurzfristigen Blick in die Zukunft bedient, wird auch als *operative Planung* [15] bezeichnet, da sie unmittelbar aus dem operativen Betrieb heraus, also meist aufgrund der aktuellen Situation, erfolgt. Wegen der sich permanent ändernden Situation innerhalb eines Luftraumes ist die Verkehrsentwicklung ohne zusätzliche Hilfsmittel jedoch nur sehr schwer zu prognostizieren. Daher beschränkt sich der zeitliche Rahmen für die operative Planung, die auch als ablauforientierte Aktionsplanung bezeichnet wird, im Allgemeinen auf maximal eine halbe Stunde (30 Minuten) im Voraus.

2.1.2 Taktische Planung

Der kurzfristigen Planung stehen verkehrsregulierende Maßnahmen gegenüber, die noch nicht eingetretene Situationen verbessern, bzw. prognostizierte Probleme im Ansatz, d.h. frühstmöglich vermeiden wollen und hierzu je nach Planungsart entsprechend weit in die Zukunft blicken. Liegt der Eintritt der Flugereignisse zwischen 30 Minuten und 24 Stunden, so wird von *taktischer Planung* [15,12] gesprochen, welche mittelfristig in das Verkehrsgeschehen eingreift. Diese Art der Planung dient der Lösung aktueller Probleme auf vorausschauende Art und Weise, indem mittels der Kenntnis aktueller Luftraumkapazitäten und Navigationseinrichtungen versucht wird, vorherberechnete Situationen zur Lösungsfindung zu nutzen. Durch den Eingriff in den laufenden Betrieb mit den notwendigen Lenkungs- und Steuerungsmaßnahmen erhofft man sich für den genannten Zeitraum, also die mittelfristige Zukunft, eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit und indirekt, aufgrund der Vermeidung von Überlastungen, auch eine Erhöhung der Sicherheit entsprechender Verkehrsabläufe. Diese Art der Planung ist heutzutage aufgrund der Effektivität und der doch auch relativ großen Flexibilität ein wichtiger Bestandteil in den Planungsaktivitäten des Luftverkehrs, weshalb hierauf im weiteren Verlauf dieser Arbeit erneut Bezug genommen werden wird.

Ein Beispiel für den Anlass taktischer Planung ist eine für den Luftverkehr hinderliche Wettersituation, wie beispielsweise dichter Nebel. So wird bei nur

geringer Sicht wegen der größeren einzuhaltenen Abstände im Landeanflug unter anderem die Landekapazität eines Flughafens verringert. Übersteigt nun allerdings die Menge des ursprünglich geplanten Verkehrs die durch das Wetter verminderte Kapazität, können nicht alle Fluggesellschaften ihre Maschinen an dem betroffenen Flughafen derart zeitnah landen, wie sie es gerne täten. Um nun eine Überlast am Flughafen und der umgebenden Lufträume zu vermeiden, werden Flüge daher bereits vor deren Abflug am Boden verzögert oder notfalls ganz gestrichen. Diese Aktionen fallen somit aufgrund ihres mittelfristig vorbeugenden Effekts in den Bereich der taktischen Planung.

2.1.3 Strategische Planung

Zusätzlich findet nun auch Planung statt, die über den Zeitraum eines Tages deutlich hinausgeht: Beruhend auf langjährigen Erfahrungen und anhand von Prognosen und Statistiken werden teilweise weit im Voraus Entscheidungen über Verteilung von Ressourcen, wie beispielsweise Lande- oder Startzeiten getroffen. Die langfristige Verkehrsorganisation, welche die Umsetzungen von Verkehrsplänen bis zu 6 Monaten in der Zukunft umfasst, wird als *strategische Planung* [8,12] bezeichnet. Ziel ist es, von vornherein den Verkehr langfristig so zu regeln, dass möglichst wenige Konfliktsituationen mit den vorhandenen Kapazitäten entstehen. Hierzu zählen z.B. Überlegungen zum zukünftigen Verkehrsablauf bei größeren geplanten baulichen Veränderungen oder anderen Änderungen der Infrastruktur. Auch Planungen bezüglich An- und Abflugzeiten an großen Flughäfen für die jeweils kommende Saison, welche halbjährlich auf großen Scheduling-Konferenzen [8] zwischen Flughafenbetreibern und Fluggesellschaften verhandelt werden, gehören zur strategischen Planung. So ergeben sich als populärstes Resultat der strategischen Planung die in der Regel halbjährlich aktualisierten Flugpläne der Linienfluggesellschaften, nach denen sich letztendlich auch die Fluggäste und das Personal richten müssen. Weitere Beispiele sind Kriege oder auch Vulkanausbrüche, die Umwege um gewisse Lufträume erfordern und so die Streckenführung für längere Zeiträume beeinflussen können. Doch auch beliebte Großereignisse wie die Olympischen Spiele oder auch die Fußballweltmeisterschaft müssen bezüglich der Verkehrsführung langfristig mit eingeplant werden.

2.1.4 Notwendigkeit von Planung im Luftverkehr

Selbstverständlich ist es wegen der oftmals langen Vorlaufzeit und vielen Unsicherheiten nahezu unmöglich, strategische Pläne langfristig so umzusetzen, dass sie Konflikte vollständig vermeiden. Es sei hier als Beispiel die Planung eines Winterflugplans genannt, der die etwaige Auslastung eines Flughafens mindestens ein halbes Jahr im Voraus regelt. Die nun aber dennoch aufgrund potenzieller Unregelmäßigkeiten entstehenden Problemsituationen gilt es schließlich in einem weiteren Anlauf mittels der taktischen Planung zu mildern oder gar aufzulösen. So kann beispielsweise ein besonders verschneiter Wintertag mit besonderen Gefahren für die Maschinen und großem Aufwand für die Inbetrieb-

haltung des Flughafens unter Umständen die Flugpläne des gesamten Tages überflüssig werden lassen. Taktische Planung greift hier möglicherweise durch mittelfristige Streichung von Flügen ein, die den Flughafen anfliegen möchten und sorgt so für eine Entlastung der Situation. Konnte aber auch diese Planung eine Situation nicht vollständig von Konflikten befreien, so ist die Situation letztendlich nur noch durch operative Planung zu bewältigen und schlägt sich zu guter Letzt als Mehraufwand in der Arbeit der Lotsen und anderer Mitarbeiter nieder. Jedoch lässt sich hier nicht unbegrenzt durch zusätzlichen Einsatz von Arbeitskräften eine Steigerung der Effektivität erzielen, da zu viele andere Bedingungen, wie z.B. die Kapazitäten eines Flughafens, dies verhindern. Daher ist es für den langfristig funktionierenden und möglichst gleichmäßigen Verkehrsablauf in der Luftfahrt, ebenso wie in vielen anderen Verkehrsbereichen, sehr wichtig, dass alle Möglichkeiten der Planung sinnvoll genutzt und effektiv eingesetzt werden können.

Aufgrund der beständigen Zunahme des Luftverkehrs in den letzten Jahrzehnten wäre heute ein Szenario ohne jegliche vorausschauenden Maßnahmen unvorstellbar. Selbst in weniger verkehrsreichen Gebieten, in denen heute ein mäßiger, kontinuierlicher Verkehrsfluss herrscht, bestünde die Gefahr, dass es zu untragbaren Überlastungen des Luftraums und sehr langen Wartezeiten käme. Stellen, an denen sich mehrere stark frequentierte Flugrouten kreuzen, doch vor allem Flughäfen selbst sind besonders hervorzuhebende Ballungsräume, die bei rein nachfrageorientierten Flugzeiten und ohne Planungen in gewissen Zeiträumen unter einer immensen Auslastung zu leiden hätten, die ohne vorbeugende Eingriffe auch unweigerlich zur ernststen Bedrohung für alle Beteiligten werden würden. Würden beispielsweise alle Flugzeuge auf einem Großflughafen morgens zur selben Zeit aufbrechen wollen, so wären die Abflüge zwar Dank der Abfertigung durch die entsprechenden Lotsen sequenziert, dennoch müssten alle betroffenen Flugzeuge entsprechend ihrer Startposition lange warten bis sie starten könnten, obwohl sie bereits abflugfertig auf dem Vorfeld stünden. In der Luft wären Sektoren kurzfristig stark überlastet und liefen Gefahr für diese Zeiträume nicht kontrollierbar zu sein. Solche zeit- und ortsgebundenen Verkehrsverdichtungen entstehen vorwiegend aufgrund gleicher Interessen vieler Flugunternehmen, welche sich zum einen an der Nachfrage der Passagiere orientieren und zum anderen auf den Rahmenbedingungen eines Fluges, wie unter anderem Flugdauer und Nachtflugverbote, basieren. Das Verkehrsflussmanagement dient dem Zweck, durch Regulierung solche Verdichtungen auch zukünftig zu vermeiden, Verspätungen zu minimieren und zusätzlichen Kosten, die auch durch eben solche Verspätungen entstehen können, vorzubeugen.

2.2 Aktuelle Situation

Wie im vorhergehenden Abschnitt deutlich wurde, besteht ein wesentlicher Punkt des Problems darin, dass die Landekapazität eines Flughafens wegen der großen Menge von Flügen, die zeitgleich auf einen Flughafen zufliegen, über einen gewissen Zeitraum hinweg ausgereizt ist. Der heutige Verkehrsreichtum,

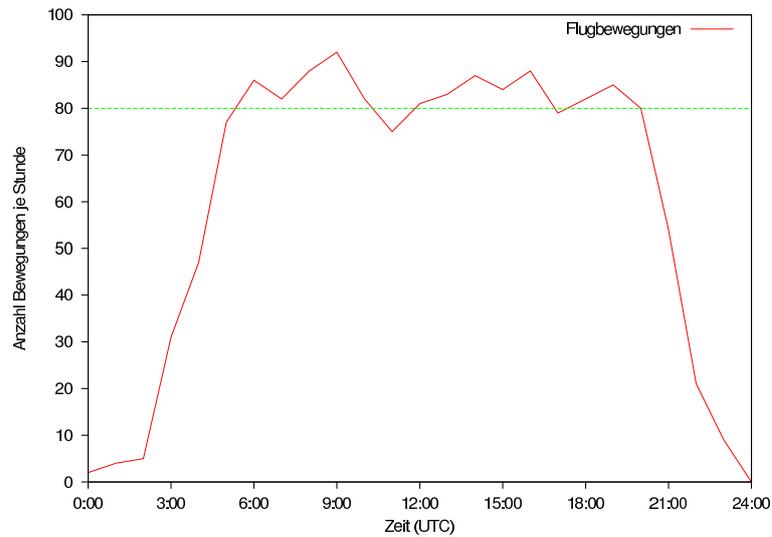


Abbildung 2.1: Verkehrsaufkommen eines einzelnen Tages im April 2005 in Frankfurt (Quelle: DFS)

sowie dessen Wachstum bilden hierbei die hauptsächliche Grundlage des eigentlichen Problems. Gäbe es beispielsweise nur sehr wenige Flugzeuge und flögen diese nur vereinzelt einen einzigen Flughafen an, so dass nur sehr selten zwei oder mehr Maschinen zugleich landen wollten, so bestünde diesbezüglich kein Bedarf, regulierend einzugreifen. Doch durch die enorme Nachfrage wächst der Markt beständig weiter und drängt aufgrund des steigenden Platz- und Kapazitätsbedarfs unnachgiebig nach größeren Flughäfen, verbesserten Maschinen und optimierten Verfahren. Im Anflug auf einen Flughafen befindliche Flugzeuge drohen dabei nicht selten in Konfliktsituationen mit anderen Maschinen zu geraten, die es spätestens im operativen Betrieb von Seiten der Lotsen auf Kosten der Effizienz und Pünktlichkeit aufzulösen gilt.

Wie in den vorhergehenden Abschnitten erläutert wurde, ist der Verkehr durch strategische Maßnahmen bereits derart im Voraus geplant, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens schwierig zu kontrollierender Situationen heutzutage relativ gering geworden ist. Zudem dient dies neben der Vermeidung eines unkontrollierbaren Chaos am Flughafen – und dadurch unkalkulierbaren Folgekosten – ebenso der Arbeitsentlastung zuständiger Lotsen und somit auch der Sicherheit beteiligter Flugzeuge. Mittel- und kurzfristig bieten zusätzlich Arrival- und Departure-Manager Vorschläge zur besseren Abarbeitung dar, so dass letztendlich mittels operativer Eingriffe einfacher eine kontinuierliche Lande- oder Startfolge der Maschinen hergestellt werden kann.

2.2.1 Ballungen im Verkehrsstrom

Doch trotz dieser vielen vorausschauenden Maßnahmen ergeben sich immer wieder Situationen, in denen der Verkehr nicht gleichmäßig, d.h. auch inner-

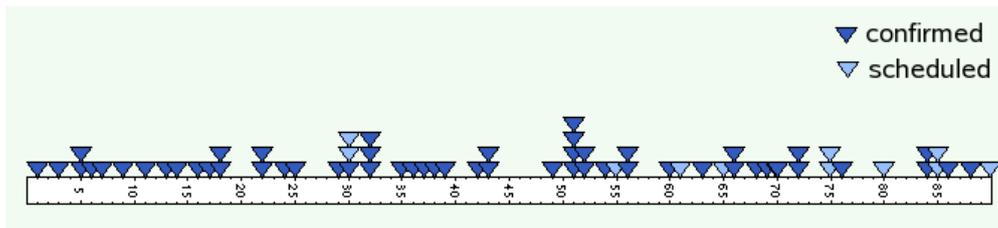


Abbildung 2.2: prognostizierter Anflugverkehr auf Frankfurt innerhalb eines 90-Minuten-Zeitraums zur Mittagszeit (Datenquelle: DFS)

halb verhältnismäßig kleiner Zeiträume nicht kontinuierlich, auftritt. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, zeigen sich diese Schwankungen über einen vollständigen Tag verteilt durchaus deutlich und verhalten sich zudem regelmäßig wiederkehrend, da sie auf der Nachfrage der Fluggesellschaften und den Vereinbarungen der erwähnten Scheduling-Konferenzen zur gemeinsamen Nutzung von Infrastrukturen beruhen. So finden sich sowohl für den Anflug als auch für den Abflug Häufungen in den Verkehrszahlen, die bereits bei Beobachtung des Verkehrs an den Start- und Landebahnen über einen einzigen Tag hinweg ihre Flughafen-typische Struktur zeigen.

Ganz anders verhalten sich diese Ballungen des Verkehrs jedoch im Luftraum, betrachtet man ihn innerhalb kleinerer Zeiträume: Wird beispielsweise der gesamte Anflugverkehr einige Zeit vor der Landung der jeweiligen Maschinen in einem Zeitraum von etwa 10 Minuten betrachtet, so wird man zwar eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das wiederholte Auftreten bestimmter Konstellationen einiger regelmäßig stattfindenden Flüge nicht von der Hand weisen können, doch die zeitliche Anordnung der Flüge untereinander wird stets variieren. Insgesamt finden sich so auch immer wieder Häufungen von Verkehrsteilnehmern im Anflugsstrom (siehe auch Abbildung 2.2), die auf diese Weise nicht bestehen bleiben können, sondern der Interaktion des Lotsen mit den jeweiligen Piloten erfordern. Denn würde man all diese, einen bestimmten Flughafen zugleich anfliegenden Maschinen unmittelbar in den direkten Anflug übergehen lassen, so wäre eine schnellstmögliche Abarbeitung des Anflugverkehrs zwar garantiert, doch die Sicherheit müsste hierfür vollständig außer Acht gelassen werden. Es käme zu Annäherungen der Flugzeuge untereinander, die nicht nur gegen die geltenden Sicherheitsrichtlinien verstoßen würden, so dass die akute Gefährdung von Menschenleben eine unmittelbar absehbare Folge wäre, sondern auch eine erhöhte Arbeitsbelastung für die jeweiligen Lotsen zur Folge hätte. Auch aus diesen Gründen, d.h. der leichteren Separierung des Anflugverkehrs, existieren heute nahezu an allen Großflughäfen spezielle Anflugverfahren.

2.2.2 Methoden der Sequenzierung

Diese Anflugverfahren sollen hauptsächlich der Staffelung des Verkehrs, also der sicheren Sequenzierung anfliegender Maschinen dienen und existieren somit zum Zwecke einer Separierung und Aufreihung der eintreffenden Flugzeuge gemäß

der geltenden Sicherheitsbestimmungen, sowie ihrer jeweiligen Eigenschaften, wie z.B. der Wirbelschleppenkategorie¹. Großteils bestehen sie aus festgelegten Flugrouten, Vorgaben für Flughöhen und Übergabepunkten an nachfolgende Controller-Positionen. Je nach geografischer Lage eines Flughafens und in Abhängigkeit der umliegenden Wohngebiete sehen diese Verfahren unterschiedlich aus und können sogar im monatlichen Turnus potenziellen Neuerungen angepasst werden. Doch mit diesen Vorgaben alleine ist der Anflugverkehr noch keinesfalls ausreichend sequenziert. Hierfür sind die herkömmlichen Maßnahmen der Lotsen nach wie vor unabkömmlich.

Prinzipiell existieren für alle Lotsen, die den Flugverkehr in der Luft kontrollieren, die folgenden drei Methoden, in die Flugbahn eines Flugzeugs steuernd einzugreifen:

- Änderung der horizontalen Flugrichtung
- Änderung der Geschwindigkeit
- Änderung der Flughöhe, bzw. der vertikalen Flugrichtung

Je nach Flugabschnitt wird allerdings nur eingeschränkt von diesen verschiedenen Möglichkeiten Gebrauch gemacht. Beispielsweise wird versucht, bei Flugzeugen im Streckenflug in vorhergesehenen Konfliktsituationen zu vermeiden, deren Flughöhe zu ändern, da es sich hier, verglichen mit den anderen Methoden der Separierung, um einen relativ kostspieligen Vorgang für ein Flugzeug handelt. Vielmehr erfolgt in der Regel eine frühe Anweisung zur Richtungsänderung und nur selten, vor allem jedoch was unmittelbar hintereinander fliegende Maschinen angeht, kann seitens der Piloten auch mit Anweisungen zur Geschwindigkeitsänderung gerechnet werden.

Anders jedoch beim Anflug auf einen Flughafen, wenn sich die Flugzeuge bereits in niedrigeren Flughöhen und häufig auch im Langsamflug befinden. Der vor dem Anfluglotsen zuständige Lotse nutzt für im Sinkflug befindliche Flugzeuge neben der Zuweisung verschiedener Zielflughöhen oftmals auch die Möglichkeit, auf die Geschwindigkeit der Maschinen Einfluss zu nehmen, bevor er sie anschließend dem zuständigen Anfluglotsen weiterreicht.

Der Anfluglotse selbst bedient sich nur noch in Ausnahmefällen der Möglichkeit, intensiver in das Geschehen einzugreifen: Im Allgemeinen werden nur noch bei Bedarf, also beispielsweise zur weiteren Separierung, Anweisungen bezüglich Höhen- oder Geschwindigkeitsänderungen gegeben, da die Piloten ihre Maschinen im Normalfall entlang der vordefinierten Anflugrouten steuern.

¹Hierbei handelt es sich um eine Klassifizierung von Flugzeugen, die die Maschinen gemäß der Ausmaße der im Flug erzeugten Luftturbulenzen, den sogenannten Wirbelschleppen, in die 3 Kategorien Light, Medium und Heavy einteilt.

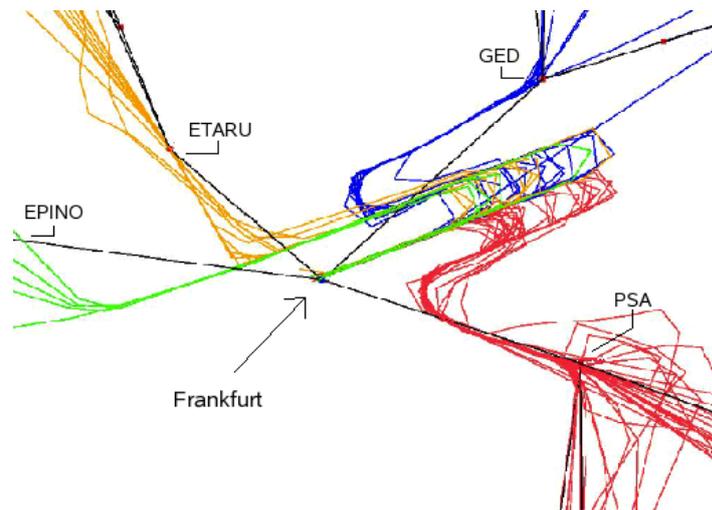


Abbildung 2.3: Anflugpfade in Frankfurt, Landerichtung 25 (Quelle: Lufthansa)

2.2.3 Verlauf eines Anflugs

Der Anflugluftraum eines Großflughafens besitzt zumindest in Europa in der Regel einige ganz bestimmte Wegpunkte, die im frühen Anflug auf einen solchen überflogen werden. Oftmals befinden sich diese so um den Flughafen herum verteilt, dass sich für Flüge aus einer bestimmten Himmelsrichtung jeweils ein konkreter Einflugpunkt ergibt, wie beispielsweise in Abbildung 2.3 für den Flughafen Frankfurt erkannt werden kann. Die Einflugpunkte besitzen hier die Bezeichner PSA, GED, ETARU und EPINO.

Bereits vor diesen Punkten findet bei den zuvor zuständigen Lotsen des unteren Luftraums bei Bedarf eine Vorstaffelung des Verkehrs statt. So wird zur Arbeitserleichterung des Anfluglotsen versucht, genau den Fall zu vermeiden, dass zwei oder mehrere Flugzeuge den Einflugpunkt in den Anflug-Luftraum zeitgleich überfliegen. Befinden sich die entsprechenden Maschinen zudem auf derselben Flughöhe, stellt dies natürlich auch ein massives Sicherheitsproblem dar. In der Regel werden aber zur Vermeidung von Konflikten in diesem Stadium, wie zuvor bereits angesprochen, weitere, d.h. entsprechend tiefer oder höher liegende Flughöhen für den Einflug freigegeben. So ist für den Fall, dass sich ein nahezu zeitgleicher Überflug nicht vermeiden lässt, die notwendige Sicherheit durch vertikale Separierung bereits gewährleistet, bzw. braucht vorerst nicht weiter berücksichtigt zu werden.

Nach dem Eintritt der Flugzeuge in den Anflug-Luftraum ist es oftmals die Aufgabe des jeweiligen Lotsen, den Verkehr aus den Einflugpunkten zu einem oder zwei Anflugströmen zu vereinen. Hier finden sich prinzipiell alle klassischen Hauptaufgaben des Anfluglotsen wieder. Mittels den oben genannten Methoden zur Herstellung einer Sequenz werden an den meisten Flughäfen die Flugzeuge vorerst in einen konfliktfreien Anflugstrom gebündelt, der sich zu

diesem Zeitpunkt meist im Gegenanflug auf die Landebahn befindet, d.h. die Piloten fliegen ihre Maschinen entgegengesetzt zur eigentlichen Landerichtung. Konfliktfrei ist dieser Strom insofern, dass sich nun nahezu alle Maschinen auch auf der gleichen Flughöhe befinden und dadurch untereinander bereits horizontale Abstände eingehalten werden müssen.

Sind die Verkehrsteilnehmer so mit nahezu gleicher Geschwindigkeit, Höhe und Flugrichtung entgegen der Landerichtung vorgestaffelt, kommt meist ein sogenannter *Director* ins Spiel. Je nach Anzahl oder Konstellation der Bahnen hat er einen, meist aber zwei Anflugströme auf den Endanflug einzudrehen. Oftmals kommt ein Verkehrsflughafen jedoch auch ohne einen solchen Director aus. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn ankommende Maschinen bereits unmittelbar auf den Endanflug zufliegen oder für einen ausgeprägten Gegenanflug nicht der nötige Platz vorhanden ist. Die Arbeitslast fällt dann dem Approach-Lotsen zu, wobei die Position je nach Luftraum- und Flughafenstruktur gegebenenfalls auch doppelt oder mehrfach besetzt sein können.

Die so entstandenen Anflugströme, oftmals aus verschiedenen Richtungen kommend, werden somit vereint und auf das ILS (Instrument Landing System), einer instrumentengestützten Einrichtung für den automatisierten Landeanflug, geführt. Dabei wird versucht, aus den anfliegenden Maschinen eine derart optimale Landesequenz herzustellen, dass die Abstände der Maschinen im Anflugstrom insgesamt möglichst gering ausfallen. Aufgrund der von Flugzeugen erzeugten Luftverwirbelungen gilt es hier auf horizontale Abstände zu achten, um einerseits dem Unwohlsein der Passagiere, andererseits jedoch natürlich auch strukturellen Überlastungen der Flugzeuge aufgrund der teilweise sehr kräftigen Turbulenzen vorzubeugen.

Um eine solche Sequenz letztendlich herstellen zu können, d.h. zur Wahrung der Abstände landender Maschinen, muss der Director die entsprechenden Flugzeuge einzeln, also nach und nach in den Endanflug umleiten. Dadurch ergeben sich für einige Maschinen längere Flugwege als für andere.

Diese verlängerten Flugwege finden sich jedoch nicht ausschließlich und erst beim Eindrehen vom Gegenanflug in den Endanflug, sondern kommen gelegentlich auch schon bei der bereits erwähnten Vorstaffelung durch den zuvor tätigen Lotsen vor, wie auch in Abbildung 2.3 zu erkennen ist. In der Fachwelt wird für diese Umwege umgangssprachlich gelegentlich der Begriff „Schweinehaken“ verwendet, der wohl aufgrund ihrer eigentümlichen Form entstand, betrachtet man die aufgezeichneten Verläufe der tatsächlich geflogenen Flugrouten bei Anflügen auf einen Flughafen.

2.2.4 Nachteile aktueller Verfahren

Die Existenz der sogenannten Schweinehaken ergibt sich aus der heutigen Abwicklung des Flugverkehrs und der hierfür eingeführten Verfahren, wie zum Beispiel die Verwendung spezieller Anflugrouten, den sogenannten Transitions, in Frankfurt oder auch in München. Sie sind quasi ein Mittel, um Ballungen im Verkehrsstrom durch operative Lotseninteraktion aufzulösen, bzw. von vorn-

herein zu vermeiden. Durch ihr Auftreten ergeben sich allerdings auch Nebeneffekte, die so nicht beabsichtigt sind.

So nimmt das Fliegen eines Umweges grundsätzlich einige Zeit in Anspruch, wodurch sich die Maschine länger in der Luft befindet. Das bedeutet für den Flug selbst einerseits natürlich eine Verspätung, wobei andererseits diese zusätzliche Flugzeitverlängerung von in der Regel nur wenigen Minuten nur in sehr seltenen Fällen für das Versäumnis anderer, anschließender Flüge verantwortlich ist. Gelegentlich ist an einem Flughafen jedoch eine solch große Nachfrage nach Landekapazität vorhanden, dass selbst die normalen Flugweg verlängernden Maßnahmen nicht mehr ausreichen und Piloten gezwungen sind, das Flugzeug in der Luft mehrere Warteschleifen drehen zu lassen. Gelingt es daher, auch nur in einem kleinen Umfang die Flugzeiten der Maschinen im Anflug zu verkürzen, so wird damit möglicherweise ein Beitrag zur Verbesserung der Pünktlichkeit gemacht, die für die gesamte Netzwerkstabilität so wichtig ist.

Ähnlich sieht dies auch bei den übrigen, unmittelbar durch den längeren Flugweg entstehenden Effekten aus: Nicht nur für die betreibende Fluggesellschaft ist der unliebsamste, mit der Verlängerung des Flugweges einhergehende Effekt der erhöhte Treibstoffverbrauch. Der damit verbundene Schadstoffausstoß schädigt die Umwelt und kostet die Betreiber, d.h. die Fluggesellschaft und Flughäfen, langfristig gesehen viel Geld. Letztendlich ist die Kostenfrage für die beteiligten Unternehmen der ausschlaggebende Punkt, mittels geeigneter Maßnahmen die Initiative zu ergreifen und sich Gedanken über weitere Entwicklungen und Möglichkeiten in diesem Bereich zu machen.

Desweiteren führen die oppositionellen Interessengruppen die Lärmbelastung durch Flugverkehr als negativen Effekt auf. Bei längerem Flugweg bleibt die Beschallung durch ein einzelnes Flugzeug länger erhalten, d.h. der Lärm insgesamt nimmt zu. Insbesondere betrifft die zusätzliche Lärmbelastung bei längeren Flugwegen, wie sie durch erflogene Umwege auftreten, weitere Landstriche, die bei weniger Verkehr gar nicht erst von Fluglärm betroffen wären. Die Lärmbelastung dehnt sich somit vor allem in der Fläche aus.

Im Grunde ist es nicht möglich, die Verfahren im Anfluglufttraum selbst so sinnvoll abzuändern, dass die verlängerten Flugwege gar nicht erst auftreten. Denn letztendlich müssen dicht beieinander fliegende Maschinen entweder durch die Regulierung der Geschwindigkeiten oder einer zusätzlichen Änderung der Flugrichtung so auf den Anflugpfad, bzw. die Landebahn ausgerichtet werden, dass stets ein ausreichender Abstand existiert. Da alle anfliegenden Maschinen landen wollen und zumindest im Endanflug schließlich auch dieselben Flughöhen befliegen müssen, fallen Steuerungsmaßnahmen bezüglich der Höhe in den letzten Flugminuten weitgehend weg. Da auch die Geschwindigkeitsänderungen wegen der verhältnismäßig kurzen Flugdauer innerhalb des Luftraums um einen Flughafen herum für eine vollständige Staffelung alleine oft nicht ausreicht, bleibt die Flugwegverlängerung zwangsläufig als letztes Mittel bestehen.

Neben der bereits angesprochenen Verlängerung der Flugdauer durch das Fliegen von Umwegen kann aber zumindest theoretisch eine weitere Verspätung durch verkehrsregulierende Maßnahmen auch alleine bezüglich der Geschwin-

digkeit stattfinden. Diese führte zwar wegen ihrer geringen Ausprägung in den meisten Fällen nicht unmittelbar zu verpassten Anschlussflügen oder dramatischen Verzögerungen, zeigt jedoch ebenso deutlich, dass eine gegenüber dem anderen Anflugverkehr ausgebremste Maschine zu diesem Zeitpunkt noch nicht unmittelbar zur Landung zugelassen werden könnte. Das bedeutet jedoch, die betroffene Maschine hätte zuvor schon langsamer fliegen, oder aber von vornherein später starten können.

Ein solcher Eingriff in das Verkehrsgeschehen, d.h. die Maßnahme zur Sequenzierung durch Anweidung von Geschwindigkeitsänderungen, findet in der Regel jedoch eher selten statt.

Wird der Zielflughafen nun von mehreren Flugzeugen simultan angeflogen, so dass für diese ein gleichzeitiger Aufenthalt im Endanflug prognostizierbar ist, so wird jedoch auch der positive Nutzen der Transitions offensichtlich: Während bei einem direkten Anflug zwar Flugstrecke eingespart wird, muss in einem solchen Fall jedoch frühzeitig und wegen der gleichen Anzahl Flugzeuge auf oft kürzerer Strecke unter mehr Arbeitsaufwand auf eine Separierung zum restlichen Verkehr geachtet werden, als dies bei Verwendung der Transitions nötig ist. Mit diesen wird eine dynamische Flugroute festgelegt und es kann ebenso ein vertikales Flugprofil durch die Transitions gegeben sein, wodurch der Approach-Lotse meist nur noch mittels Anweisungen zur Geschwindigkeit und eventuell zum Sinkverhalten den Verkehr bis in den Gegenanflug leitet.

Doch trotz dieser selbstverständlich auch effektiven Funktionsweise der Transitions und anderer Anflugverfahren lassen sich die zuvor aufgezeigten Nachteile nicht von der Hand weisen. Auf eben diesen soll im Anschluß an den folgenden Abschnitt die Formulierung des behandelten Problems aufbauen, so dass der darauf gerichtete Augenmerk insofern gerechtfertigt ist.

2.2.5 Situation in Frankfurt am Main

Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der internationale Flughafen Frankfurt am Main als reales Beispiel für die geschilderten Abläufe dienen, sowie für sämtliche nachfolgend anstehenden Untersuchungen als betrachteter Zielflughafen herangezogen werden. Insofern soll eine Festlegung hier aus dem Grund erfolgen, um bestimmte zu beachtende Luftraumstrukturen bereits beispielhaft konkretisieren zu können.

Wie bereits erwähnt, zeigt Abbildung 2.3 auf Seite 11 die Aufzeichnung mehrerer Anflugpfade im Anflugluftraum von Frankfurt und verdeutlicht so das Problem der verlängerten Flugwege. In diesen Luftraum einfliegende Maschinen treffen hier grundsätzlich an jeweils einem der vier Einflugpunkte Spessart (PSA), Gedern (GED), ETARU (heute ROLIS) oder EPINO (heute OSMAX) ein und folgen im Sinkflug den Transitions, d.h. den offiziell definierten Standardrouten, die sich bis zur Landebahn hin abfliegen lassen. In der Abbildung sind sie deutlich aufgrund der angezeigten Flugspuren entlang dieser zu erkennen. Diese Routen führen schließlich beidseitig parallel zur Landerichtung auf den Gegenanflug, bis sie sich mit einer entsprechenden 180-Grad-Kurve zur

Landebahn hin vereinen und direkt auf diese zuführen. Da der Lotse auch hier den Zeitpunkt des Eindrehens auf den Endanflug bestimmt, ist insofern bezüglich der Sequenzierung eine gewisse Flexibilität gewährleistet, da durch die jeweilige Ausdehnung des Gegenanflugs die Anflugstrecke entsprechend lange oder kurz ausfallen kann. Der Zeitpunkt dieser Kehrtwenden wird auch hier durch die Menge des zeitgleich anfliegenden Verkehrs, bzw. die einzuhaltenen Sicherheitsabstände der Flugzeuge untereinander beeinflusst, die je nach Situation, d.h. in Abhängigkeit von Wetter oder anderen Einflüssen, unterschiedliche Ausmaße annehmen können.

Auch in Frankfurt ist zudem ein Arrivalmanager, der sogenannte 4D-Planer [19], in Betrieb, der den Lotsen bei Entscheidungsfindungen und Strukturierung des ankommenden Verkehrs unterstützt. Das überwiegend operativ planende Verkehrsmanagement-System unterbreitet den Lotsen frühzeitig Vorschläge, wie eine möglichst optimale Anflugsequenz aussehen könnte, und stellt die aktuelle Situation sowie die Auswirkung potenzieller Eingriffe grafisch dar. Durch Entwicklung einer ebenso planenden Komponente für den abfliegenden Verkehr findet hier aktuell sogar eine Weiterentwicklung hin zu einem kooperativen An- und Abflugmanager statt, der in Zukunft für harmonischere Verkehrsabläufe vor Ort sorgen soll.

2.3 Aufgabenstellung

Trotz der aufgezeigten Nachteile ist es nun allerdings nicht das Ziel dieser Arbeit, Lösungen zu finden, die bestehende Verfahren ersetzen, da doch der Nutzen jener die im Verhältnis hierzu relativ gering erscheinenden Nachteile klar überwiegt. Viel mehr gilt es, eine den aktuellen Verfahren und Methoden aufsetzbare Lösung aufzuzeigen, die mit möglichst geringem Aufwand in das bestehende Gesamtsystem integriert werden kann.

Die eigentliche Aufgabe besteht darin, zu vermeiden, dass es überhaupt zu solchen Verkehrsballungen kommt, bzw. dass die Flüge vermehrt in engen Zeitfenstern an den Einflugpunkten ankommen. Es soll letztendlich eine Optimierung des Verkehrsflusses stattfinden, d.h. die Menge zur Landung eintreffender Flüge soll sich auch über kleinere Zeiträume möglichst im niedrigen Zahlenbereich und kontinuierlich verhalten. Zur Vermeidung der Verkehrsballungen, und somit auch längerer, unnötiger Flugwege im Anflug, bleibt letztendlich nur eine bereits vor dem Einflug in den Approach-Luftraum ansetzende Maßnahme. Welche Lösungswege prinzipiell existieren und wie eine sinnvolle Lösung aussehen kann, wird in den weiteren Abschnitten aufgezeigt.

2.3.1 Grundlagen

Bevor jedoch eine detailliertere Formulierung des Problems erfolgt, sollen insbesondere für die im Folgenden stattfindenden Betrachtungen in der Zukunft liegender Ereignisse unterschiedliche Abkürzungen erläutert werden [14].

So lässt sich grundsätzlich differenzieren zwischen den von vornherein, langfristig geplanten Zeiten, den sogenannten *scheduled times* (S) auf der einen Seite und den geschätzten Zeiten für den mittel- und kurzfristigen Eintritt von Ereignissen, den sogenannten *estimated times* (E) andererseits.

Zeiten, die von planenden Algorithmen berechnet werden, bekommen die Bezeichnung einer Zielzeit zugewiesen, d.h. es handelt sich hierbei um sogenannte *target times* (T).

Als letzte Gruppierung von Zeitangaben seien letztendlich noch die *actual times*, d.h. diejenigen Zeiten genannt, welche sich auf bereits eingetretene Ereignisse beziehen und deren tatsächliche Eintrittszeit bezeichnen.

Die für einen Flug hier relevanten Ereignisse sind insbesondere der Vorgang des *Off-Block* (OB), das heißt der Moment des Wegbewegens von der Parkposition oder vom Gate, der *Take-Off* (TO), d.h. der Startvorgang selbst, die *Landung* (LD) und der Vorgang des *On-Block*, d.h. das erneute Anlegen am Gate oder auch Halten auf der Parkposition, welches aus Gründen der Mehrdeutigkeit bei Abkürzungen im Folgenden nur noch als *In-Block* (IB) bezeichnet wird. Die sich aus diesen Buchstaben zusammensetzenden Abkürzungen schließen stets mit der Bezeichnung *times* (T) ab und bilden Begriffe wie *estimated landing time* (ELDT), *scheduled in-block time* (SIBT) oder auch *actual take-off time* (ATOT). Für eine vollständige Auflistung der hier verwendeten Abkürzungen sei an dieser Stelle auf das Abkürzungsverzeichnis am Anfang dieser Arbeit verwiesen.

2.3.2 Eine grafische Problemdarstellung

Zur anschaulichen Darstellung der Folgen und Auswirkungen von nicht optimierten Verkehrsflüssen, insbesondere was die Erzeugung von Verspätungen durch Sequenzierungsmaßnahmen angeht, eignet sich Abbildung 2.4. Hier sind ankommende Flüge bezüglich eines einzelnen Flughafens als Dreiecke auf einem Zeitstrahl aufgetragen, der als senkrechter, nach unten zeigender Pfeil dargestellt ist. Spätere Zeitpunkte liegen auf dem Zeitstrahl weiter oben als frühere Zeiten, d.h. eine Landung weiter unten dargestellter Flüge findet früher statt als die der darüber dargestellten Maschinen.

Rechts des Zeitstrahls ist für die auf der jeweiligen Position befindlichen Flugzeuge deren zeitliche Verzögerung gegenüber einem ungehinderten, direkten Anflug in solchen Zeiteinheiten angegeben, die einem mittleren Mindestabstand zweier Maschinen im Anflug entsprechen.

Angenommen alle ankommenden Maschinen könnten ohne Rücksicht auf den restlichen Verkehr unmittelbar so landen wie sie den Flughafen nach einem direkten Anflug erreichen, so ließe sich womöglich eine Anflugsequenz wie sie in Abbildung 2.4(a) dargestellt ist, realisieren. Bezüglich einer einzelnen Landebahn sind jedoch im Allgemeinen und insbesondere auch im Hinblick auf das in dieser Arbeit behandelte Problem keine gleichzeitigen Landungen mehrerer Maschinen möglich. Zudem muss ein gewisser Mindestabstand zwischen zwei aufeinanderfolgend landenden Flugzeugen eingehalten werden, der sich aufgrund annähernd gleicher Anfluggeschwindigkeiten auch als zeitlicher Abstand wie in

mehr Flugzeuge zugleich auf den Flughafen zufliegen und landen möchten, als dieser entsprechend seinen Kapazitäten in diesem Zeitraum aufnehmen kann. Aufgrund dieser zeitweisen Überlastung der Landebahn wegen den mehreren, in engen Zeiträumen zugleich ankommenden Maschinen, ergeben sich Situationen, in denen einige der Maschinen durch Fliegen von Umwegen oder Drosselung der Geschwindigkeit ihren Landezeitpunkt verzögern müssen. Will man nun die dadurch entstehenden längeren Flugwege und unnötigen Verzögerungen anfliegender Maschinen vermeiden, so gilt es, das voraussichtlich gleichzeitige Eintreffen mehrerer Maschinen am Zielflughafen, bzw. der Landebahn zu verhindern und somit das Verkehrsaufkommen über den Zeitraum zu glätten.

Zuvor wurde bereits verdeutlicht, dass die im Anflug verzögerten Flüge grundsätzlich schon hätten verspätet starten können, so dass sie zu gerade den Zeiten einträfen, zu denen Landungen ohne vorhergehende, die Flugzeit verlängernde Maßnahmen stattfinden könnten. Die so reduzierte Menge zugleich landen wollender Maschinen führt unmittelbar zu einem verbesserten Verkehrsfluss hinsichtlich der Verteilung des Verkehrs über die entsprechende Zeit. Zudem erspart eine solche Verschiebung des gesamten Fluges unter Umständen komplett die aufgrund von Sequenzierungsmaßnahmen nötige Flugzeit.

Andererseits ist eine Anwendung solcher Startverzögerungen auf die Menge aller anfliegenden Maschinen nur eingeschränkt praktikabel, da für Lang- oder auch Mittelstreckenflüge Prognosen bezüglich des Ankunftsverkehrs zum Zeitpunkt derer Landung wegen der langen Vorlaufzeiten verhältnismäßig schwierig sind. Auch aus Gründen der Machbarkeit, was ebenso die Datenverfügbarkeit und deren Genauigkeit angeht, erscheint eine Einschränkung der Menge bereits vor dem Start zu verzögernder Flüge sinnvoll.

In dieser Arbeit sollen nun speziell die Startzeiten von Kurzstreckenflügen verschoben werden. Im folgenden wird daher versucht, dies auf eine solche Art und Weise durchzuführen, dass ein hierdurch optimierter Verkehrsfluss entsteht.

Ein Verschieben der Startzeiten von Kurzstreckenflügen bedeutet nun formal eine Abbildung zu finden, die ausgehend von den erwarteten Landezeiten am Zielflughafen (*estimated landing times*, ELDT) einem jedem solchen Flug eine neue, optimierte Startzeit am Abflugort zuordnet. Hierzu werden zuerst jene Landezeiten berechnet, die eine durch ausbleibende Sequenzierungsmaßnahmen unverzögerte Landung versprechen (*target landing times*, TLDT), und anschließend werden anhand der geschätzten Flugdauer (*calculated flight time*, CFT) oder auch der bisherigen erwarteten Startzeit (*estimated take-off time*, ETOT) die neuen Soll-Startzeiten (*target take-off time*, TTOT) hergeleitet.

Diese so in Frage kommenden „freien“ Zeitpunkte für eine von Sequenzierung unbeeinflusste Landezeit müssen jedoch zuerst noch bestimmt werden, bevor eine Abbildung auf sie erstellt werden kann. Sie ergeben sich jedoch aus der Betrachtung der erwarteten Ankunftszeiten der Mittel- und Langstreckenflüge. Bei vermehrt auftretendem Verkehr im Anflugsektor ist es Aufgabe des Approach-Lotsen, mittels der beschriebenen Verfahren eine Sequenz und mitunter eine Separierung zeitgleich eintreffender Maschinen herzustellen, so dass diese sicher landen können. Dieses Verhalten des Lotsen im Anflugsektor des Flughafens wird bezüglich der Menge der Lang- und Mittelstrecke-, also Kontinental- und

Interkontinentalflüge gemäß einem first-come-first-served Verfahren simuliert, so dass anschließend ersichtlich wird, mit welchen tatsächlichen Landezeiten gerechnet werden kann. Erst nach der Anwendung dieses Sequenzierungsverfahrens sind die noch freien Landezeiten erkennbar, die von den Kurzstreckenflügen in Anspruch genommen werden können.

Die Hauptaufgabe besteht nun darin, eine Abbildung zu finden, die den Kurzstreckenflügen entsprechende Landezeitpunkte am Zielflughafen zuordnet, um diese anschließend in Startzeiten am Abflugort für die jeweiligen Flüge umzurechnen. Nach welchen Kriterien eine Zuordnung stattfindet, bestimmt sich durch die Anforderungen der Luftfahrt an eine mögliche Lösung:

Nicht jede beliebige Zuordnung wird hier aber als zufriedenstellende Lösung bewertet, d.h. an die möglichen Lösungen, bzw. Abbildungen der Flüge auf Lande-, bzw. Startzeiten, sind auch gewisse Bedingungen geknüpft. Einerseits ist das Ziel eines möglichen Verfahrens die Optimierung, sprich die Glättung des Verkehrsstroms, was jedoch schon unmittelbar durch die entsprechende Verschiebung der Flüge hervorgerufen wird. Als nützlicher Nebeneffekt hieraus ergibt sich schließlich eine durch Vermeidung von Umwegen oder Wartemanövern im Anflug deutlich reduzierte Flugdauer.

Dies soll jedoch nur durch ein zeitliches Verzögern der Starts an den Abflugorten der Kurzstreckenflüge erreicht werden. Ein Verfrühen des Abflugs ist aufgrund eng kalkulierter Bodenzeiten technisch nicht realisierbar und fällt von vornherein außer Betracht. Dennoch sind auch insbesondere jene Lösungen gesucht, deren Kurzstreckenflüge so positioniert sind, dass damit deren Verspätung am Zielflughafen möglichst gering ausfällt, d.h. eine möglichst hohe Pünktlichkeit erreicht wird. Ein weiteres Kriterium zur Bewertung einer möglichen Lösung ist schließlich die zur Verzögerung eines Fluges anfallende Zeitspanne, die möglichst gering ausfallen soll.

Zwischen diesen beiden zuletztgenannten Qualitätsmerkmalen, also der Pünktlichkeit am Zielflughafen und der während dem Anflug entstandenen Verspätung, soll schließlich mittels geeigneter Parameter eine Gewichtung stattfinden können, so dass ein Verfahren zur Findung einer Abbildung je nach Ansprüchen die Kriterien zu einem ganz bestimmten Verhältnis Einfluss nehmen lassen kann.

Dieses hier soweit beschriebene Problem der Findung einer Abbildung von der Menge der Kurzstreckenflüge auf die Menge freier Landezeiten, sowie die hierfür notwendigen Vorbereitungen, bilden jedoch nur den ersten Teil des Gesamtproblems zur Findung möglichst idealer Startzeiten für die Kurzstreckenflüge. Es soll letztendlich nicht nur eine einzige, theoretisch optimale Lösung für das Problem gefunden werden, sondern ein Teilziel ist es außerdem, eine auch in der Praxis möglichst verwendbare Lösung aufzeigen zu können. Dies bedeutet, dass die endgültige Lösung weiteren Ansprüchen gerecht werden muss, was insbesondere deren Robustheit, bzw. Stabilität betrifft. Mit dem Begriff der Robustheit ist hier folgendes zu verstehen: Sie stellt ein Maß für den Qualitätsverbleib einer Lösung nach Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation [3,5] auf alle erwartete Landezeiten (ELDT) der Kontinental- und Interkontinentalflüge, sowie alle Ziellandezeiten (TLDT) der Kurzstreckenflüge dar. So wird anhand von zufäl-

lig erzeugten Abweichungen das gesamte Szenario, d.h. jeder für eine Lösung relevanter Flug, gewissermaßen „verrauscht“ und anschließend das Ergebnis mit der ursprünglichen, unverrauschten Lösung verglichen.

Auf diese Weise soll im Folgenden versucht werden, bei der Verfügbarkeit einer gewissen Menge von Lösungen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Robustheit die insgesamt optimale Lösung aus der Menge der zuvor berechneten Lösungen zu bestimmen.

So soll letztendlich eine einerseits praxistaugliche, d.h. stabile Lösung gefunden werden können, die auch bei potenziellen Abweichungen im tatsächlichen Verkehrsgeschehen noch sinnvoll erscheint. Außerdem soll natürlich auch diese Lösung noch eine Effizienzsteigerung aufzeigen, so dass ihre Anwendung überhaupt von Nutzen ist. Inwiefern dieses Ziel mit den im Folgenden untersuchten Algorithmen und Verfahren gelöst werden kann, wird in den anschließenden Kapiteln näher erläutert.

3 Problembeschreibung

Das Hauptproblem bei der Findung von Startzeiten für Kurzstreckenflüge besteht prinzipiell darin, eine möglichst gute Abbildung von der Menge der Kurzstreckenflüge auf eine Menge voraussichtlich freier Landezeiten zu finden. Diese gesuchte Abbildung soll außerdem möglichst robust sein, d.h. bei möglichen Abweichungen von den erwarteten Ergebnissen möchte man dennoch eine Lösung möglichst hoher Qualität erhalten.

Das Problem wurde bereits informell beschrieben und soll hier nun auf eine abstrakte Ebene geführt und formalisiert werden. Zu Beginn gilt es hierbei, neben der Bestimmung der relevanten Kurzstreckenflüge vor allem die Menge freier Landezeiten zu berechnen. Im Anschluss wird schließlich auf das Kernproblem, d.h. der Findung einer optimalen Abbildung von der Menge der Kurzstreckenflüge auf die Menge freier Landezeiten, eingegangen. Eine Erweiterung beschreibt anschließend die Grundlage zur endgültigen Lösungsfindung unter Berücksichtigung der Robustheit bestimmter Lösungen.

3.1 Formalisierung des Problems

Das im Folgenden dargestellte Gesamtproblem besteht im Grunde aus einem dreistufigen Problem, dessen Schritte sich wie folgt darstellen:

1. Vorbereitungen wie Berechnung und Festlegung der zu verwendenden Mengen
2. Finden einer theoretisch optimalen Lösung.
3. Finden einer optimalen Lösung im Hinblick auf Robustheit.

3.1.1 Vorbereitungen

Bezüglich der folgenden Definitionen gilt es, sich auf einen einzelnen Flughafen festzulegen. Dieser sei hier mit g bezeichnet und besitzt im Rahmen dieser Arbeit eine eindeutige Nationalität, auf die Bezug genommen werden wird. Im Folgenden werden nun nur die Kurzstreckenflüge als solche bezeichnet, welche dieselbe Nationalität wie ihr Zielflughafen besitzen. Das mag vorerst etwas merkwürdig erscheinen, tatsächlich ist diese Einschränkung jedoch eher politisch als technisch bedingt.

Die *aktuelle Landekapazität* c des Flughafens g sei definiert als ein Maß dafür, wieviele Landungen an diesem Flughafen g innerhalb eines fest definierten Zeitraums stattfinden können.

Aus c ergibt sich somit unmittelbar ein Wert für den mittleren, zeitlichen Mindestabstand δ zweier landender Flugzeuge, der sich durch die Gleichung $\delta = \frac{1}{c}$ berechnet.

Sei V definiert als die Menge des *gesamten Luftverkehrs*, der den Flughafen g anfliegt, d.h. aller Flüge deren Ziel g ist.

Die Menge aller *Kurzstreckenflüge* F sei definiert als die Menge all jener Flüge, deren Zielflughafen g ist und deren Abflugort dieselbe Nationalität wie g besitzt.

Die Menge der *freien Landezeiten* T sei definiert als die Menge all jener Zeitpunkte in Intervallschreibweise, innerhalb derer eine Landung ohne die Flugzeit verlängernde Sequenzierungsmaßnahmen im Anflug erfolgen kann.

Formal stellt sich die Erstellung der Menge T dabei auf die folgende Art dar: Sei E die Menge aller *Mittel- und Langstreckenflüge*, so dass gilt: $E = V \setminus F$. Desweiteren sei L eine Menge von Zeitpunkten mit $T \subseteq L$.

Da wegen der begrenzten Kapazität des Flughafens zur Landung eines Fluges vor und nach diesem im mittleren, zeitlichen Abstand δ keine weiteren Landungen stattfinden können, wird durch die Landezeit t_e für jeden Flug $e \in E$ ein beidseitig offenes Zeitintervall $]e_l, e_r[$, $e_l = t_e - \delta$, $e_r = t_e + \delta$ belegt. Sei nun V_q eine beliebige Teilmenge von V , so dass also $V_q \subseteq V$ gilt, so existiert ein Verfahren q , welches basierend auf der Eingabe einer Menge von Flügen V_q und der Landekapazität c nach dem *first-come-first-served*-Prinzip die Sequenzierungsmaßnahmen des Anfluglotsen auf diesen Flügen simuliert, und somit jedem entsprechenden Flug eine neue Landezeit zuweist. Zur Bestimmung der freien Landezeiten für einzuplanende Landungen der Kurzstreckenflüge F ist zuerst eine Sequenzierung alleine bezüglich der Menge E notwendig, so dass das Verfahren q bezüglich der Menge $V_q = E$ auszuführen ist. Die so erhaltene sequenzierte Landezeit eines einzelnen Fluges sei hier demnach mit $q(e, c)$ bezeichnet.

Die Menge T ergibt sich damit folgendermaßen aus L :

$$T = L \setminus \{]e_l, e_r[\mid \forall e \in E : e_l = q(e, c) - \delta \wedge e_r = q(e, c) + \delta\}$$

Hierbei ist anzumerken, dass die Mengen T und L als kontinuierliche Mengen zu betrachten sind.

3.1.2 Das Problem P

Das zu betrachtende Optimierungsproblem P lässt sich nun als ein Tupel wie folgt darstellen:

$$P = (F, T, c, A, z)$$

Die Elemente des Problems P umfassen nun unter anderem eine endliche Menge F von Flügen, worunter, wie definiert, alle ankommenden Kurzstreckenflüge hinsichtlich eines bestimmten, fest vorgegebenen Flughafens zu verstehen sind. Desweiteren sei T eine Menge von genau solchen Zeitpunkten, zu denen eine Landung ohne Sequenzierungsmaßnahme möglich ist. Die Konstante c beschreibt ein Maß für die Landekapazität des betrachteten Zielflughafens. Sei A die Menge aller injektiven Abbildungen, welche allen Elementen der Menge F nun Elemente aus der gegebenen Menge T zuordnet mit

$$A = \{a : F \rightarrow T \mid \forall f, f' \in F : f \neq f' \Rightarrow a(f) \neq a(f')\}$$

Hierbei gelte zusätzlich, dass nur solche Abbildungen zulässig sind, deren Zuordnung so stattfindet, dass sich alle zugewiesenen Ziellandezeiten später oder genau zu den erwarteten Landezeiten der Flüge aus F befinden. Sei die erwartete Landezeit eines Fluges $f_i \in F$ bezeichnet mit $el dt(f_i)$ so gilt also:

$$\forall f_i \in F : el dt(f_i) \leq a(f_i)$$

Sei nun $z : A \rightarrow \mathbb{R}$ eine Zielfunktion, die jeder Abbildung a aus A einen Wert aus \mathbb{R} zuweist. Hierdurch lässt sich beispielsweise bezüglich einer Abbildung $a \in A$ eine Aussage über die Pünktlichkeit der mittels a geplanten Flüge machen.

Eine Lösung des Problems P

Eine einzelne Lösung ist nun formal vorerst definiert als ein $a \in A$. Eine Lösung $a^* \in A$ ist genau dann *optimal*, wenn gilt:

$$\nexists a \in A, a \neq a^* : z(a) < z(a^*)$$

Das heißt, bei der Bestimmung einer optimalen Lösung ist ein solches $a^* \in A$ gesucht, welches im Vergleich zu allen anderen $a \in A$ ein minimales $z(a^*)$ liefert.

3.1.3 Eine Erweiterung P'

Das Problem wird an dieser Stelle um die Betrachtung eines zusätzlichen Kriteriums, der Robustheit einer Lösung, erweitert. Aus bereits genannten Gründen wird die Betrachtung dieses Kriteriums in diesem Rahmen nicht mit der bisher beschriebenen Problemformulierung abgedeckt, sondern ein weiterer Schritt zur Findung einer endgültigen, optimalen Lösung unter Berücksichtigung des neuen Kriteriums eingeführt:

Für eine solche Umsetzung spielen ebenfalls wieder einige der nun bekannten Mengen eine Rolle; außerdem wird das Problem so erweitert, dass sich ein Optimierungsproblem P' folgendermaßen ergibt:

$$P' = (F, T, c, A', z')$$

Sei nun A' wie zuvor angegeben eine Teilmenge der zuvor spezifizierten Menge A , also $A' \subseteq A$ und somit folglich auch $|A'| \leq |A|$. A' beinhaltet so eine Auswahl möglicher Lösungen aus A und kann damit beispielsweise eine Sammlung vielversprechender Lösungskandidaten darstellen. Nun ist sicherlich interessant wenn eine optimale Lösung $a^* \in A$ in A' enthalten ist, dies soll jedoch bei diesem Problem nicht Bestandteil der Voraussetzungen sein.

Sei nun desweiteren z' definiert als eine Funktion $z' : A' \times \mathcal{P}(V) \rightarrow \mathbb{R}$, die somit für jedes $a' \in A'$ und $V_i \subseteq V$ ein $z'(a', V_i)$ aus \mathbb{R} liefert. Dieses z' kann nun beispielsweise eine Aussage bezüglich der Robustheit eines Szenarios machen, das basierend auf der Abbildung a' erstellt wurde. Mit einem solchen z' ließe sich somit die stabilste aller Lösung aus A' bestimmen.

Eine Lösung des Problems P'

Ein Lösungskandidat $a^* \in A'$ ist nun genau dann *optimal*, wenn gilt:

$$\nexists a' \in A' : z'(a', V) < z'(a^*, V)$$

Gesucht ist somit ein $a^* \in A'$, so dass $z'(a^*, V)$ im Vergleich zu allen $a' \in A'$ minimal ist.

3.2 Ein Beispiel

Um dem Leser die Problematik etwas anschaulicher aufzubereiten, sei an dieser Stelle ein Beispiel für die Problemsituation, sowie einer möglichen Lösung angeführt.

3.2.1 Stufe 1: Eingangsbelegungen und Vorbereitungen

Es gelte auch hier die Bedingung, dass Flüge nur auf spätere Zeitpunkte verschoben werden können. Ein Verkürzen der Flugzeit ohne geplante Eingriffe vor Beginn der Flugphase selbst wird dabei grundsätzlich ausgeschlossen.

Sei nun für dieses Beispiel die Kapazität des betrachteten Flughafens folgendermaßen bestimmt:

$$c = 60 \text{ Anflüge/h}$$

So ergibt sich ein mittlerer zeitlicher Mindestabstand δ zweier aufeinander folgenden Flugzeuge um von exakt einer Minute (wegen $\delta = \frac{1}{c}$). Seien die Menge der Kurzstreckenflüge F , sowie die die der sonstigen Flüge E als Mengen aus Tupeln der Art (*Rufzeichen*, *ELDT*)¹ wie folgt gegeben:

¹Die Angabe der Zeiten erfolgt hier stets in 4-Zifferdarstellung und gemäß der Universal Time Coordinated (UTC), d.h. 1000 steht für 10:00 Uhr UTC oder 11:00 Uhr MEZ.

$$\begin{aligned}
F &= \{(DLH001, 1000), (DLH002, 1006)\} \\
E &= \{(EIN001, 1000), (AFR002, 1000), (DLH003, 1001), \\
&\quad (ACA004, 1005)\}
\end{aligned}$$

Die erwarteten Landezeiten der Flüge in E und F sind außerdem in Tabelle 3.1 angegeben, sowie in Abbildung 3.1(a) auch auf einem Zeitstrahl dargestellt. Hierbei gilt wieder wie in vorhergehenden Beispielen, dass sich frühere Zeitpunkte auf dem Zeitstrahl weiter unten befinden als spätere.

Menge aller Flüge V			
Kurzstreckenflüge F		sonstige Flüge E	
Flugnr.	ELDT	Flugnr.	ELDT
DLH001	1000	EIN001	1000
DLH002	1006	AFR002	1000
		DLH003	1001
		ACA004	1005

Tabelle 3.1: Im Beispiel verwendete Flüge

Das Verfahren q , welches eine Menge von Flügen in Abhängigkeit von c sequenziert, soll nun auf die Menge der Flüge E angewendet werden. Es erzeugt so eine Menge $\{q(e, c) \mid e \in E\}$ von Zeitpunkten, die sich aus den ELDT ausschließlich der Flüge in E ergibt. Betrachtet man in diesem Beispiel die Flüge EIN001 und AFR002, so ist bezüglich einem der beiden eine Sequenzierungsmaßnahme seitens des Lotsen erforderlich, da deren ELDT mit jeweils 1000 keinen ausreichenden zeitlichen Unterschied aufweist, der zur Vermeidung einer Sequenzierung mindestens δ betragen müsste. Somit wird einer der beiden Flüge – hier zufällig der Flug EIN001 – auf die spätere Landezeit 1001 verzögert, die in ausreichendem zeitlichen Abstand zu der des vorhergehenden Fluges liegt. Dadurch muss nun aber auch der Flug DLH003 auf 1002 verzögert werden, da dessen Landung ansonsten zur gleichen Zeit wie die des Fluges EIN001 stattfinden würde. Der Flug ACA004 hingegen benötigt mangels zeitnah landenden Verkehrs keine Sequenzierung und kann seine ursprüngliche ELDT von 1005 beibehalten. Somit ergeben sich die neuen Landezeiten für die Flüge aus E wie folgt:

$$\{q(e, c) \mid e \in E\} = \{1000, 1001, 1002, 1005\}$$

Aufgrund dieser Menge lassen sich nun gemäß der in Abschnitt 3.1.1 gemachten Angaben die freien Landezeiten T wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned}
T &= L \setminus \{]1000 - \delta, 1000 + \delta[,]1001 - \delta, 1001 + \delta[,]1002 - \delta, 1002 + \delta[, \\
&\quad]1005 - \delta, 1005 + \delta\} \\
&= L \setminus \{]0959, 1001[,]1000, 1002[,]1001, 1003[,]1004, 1006\} \\
&= \{(-\infty, 0959], [1003, 1004], [1006, +\infty)\}
\end{aligned}$$

freie Landezeiten T	
1	... - 0959
2	1003 - 1004
3	1006 - ...

Tabelle 3.2: ermittelte freie Landezeiten

Die den Flügen E durch das Verfahren q zugewiesenen Zeiten sind in der Abbildung 3.1(b) dargestellt. Hier sind dadurch auch die freien Landezeiten T in Form von Balken entlang des Zeitstrahls sichtbar.

3.2.2 Stufe 2: Finden einer Menge von Lösungskandidaten

Die folgende Aufgabe besteht nun darin, die Menge der Abbildungen $a \in A$ zu bestimmen, so dass mittels einem a jedem Kurzstreckenflug aus F ein eigener freier Zeitpunkt aus T zur Landung zugewiesen wird. Dieser neue Landezeitpunkt sei im Folgenden als *target landing time* (TLDT) bezeichnet. Prinzipiell können hier nun viele verschiedene Belegungen angegeben werden, d.h. im Allgemeinen ist die Menge A sogar unendlich groß. In unserem Beispiel ist es somit möglich, dem Flug DLH001 einerseits die Zeit 1003, als auch den Landezeitpunkt 1004 zuzuweisen. Theoretisch ist aber auch eine Platzierung zwischen 1003 und 1004 möglich, oder auch die Zuweisung der TLDT um 1006 schließt sich vorerst nicht aus. Genauso lässt sich der Flug DLH002 nahezu beliebig platzieren.

Die Verwendung einer Zielfunktion $z : A \rightarrow \mathbb{R}$ liefert uns nun einen Wert $z(a)$ bezüglich einer Abbildung a , so dass über alle $a \in A$ gemäß dem $z(a)$ eine partielle Ordnung erstellt werden kann. Das Problem selbst besteht nun darin, ein solches a zu finden, für das $z(a)$ minimal ist.

Sei die Funktion z beispielsweise so bestimmt, dass sie die Summe aller Quadrate der Abstände von den neuen erwarteten Landezeiten zu den jeweils ursprünglichen ELDT berechnet, so wird damit letztendlich ein Maß für die Verschiebung der Kurzstreckenflüge angegeben, welches möglichst gering gehalten werden soll. Bezeichne $TLDT_i$ die Ziellandezeit und $ELDT_i$ die erwartete Landezeit eines Fluges i aus F , so sei die Funktion definiert als

$$z(a) = \sum_{i=0}^{|F|-1} (TLDT_i - ELDT_i)^2$$

Wird z.B. der Kurzstreckenflug DLH001 nun auf die Zeit 1006 gesetzt und der Flug DLH002 auf 1007, so ergibt sich für die somit als a_0 bezeichnete Abbildung $z(a_0)$ als

$$z(a_0) = (1006 - 1000)^2 + (1007 - 1006)^2 = 6^2 + 1^2 = 37$$

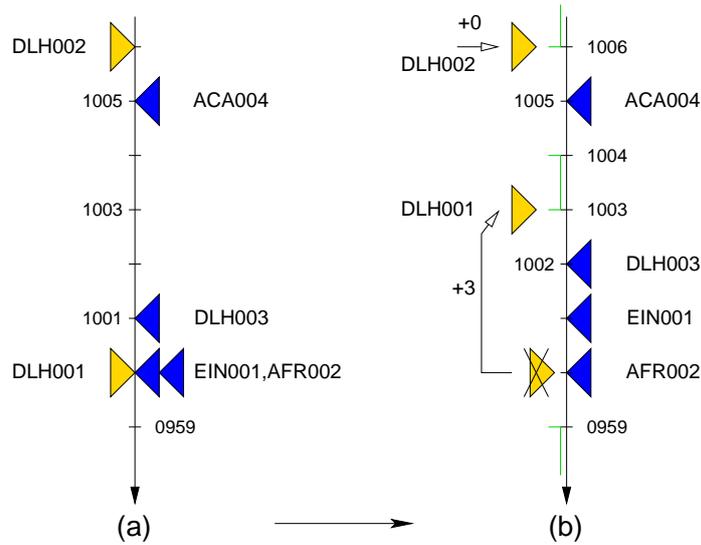


Abbildung 3.1: Darstellung der ELDTs und TLDTs

Der minimale Wert von $z(a)$ für eine Abbildung $a \in A$ ergibt sich in diesem Fall jedoch offensichtlich genau dann, wenn für jeden Flug die freie Ziellandezeit gewählt wird, die den geringst möglichen zeitlichen Abstand zu seiner ursprünglich erwarteten Landezeit besitzt. Im Beispiel ist das für den Flug DLH001 der Zeitpunkt 1003, für den Flug DLH002 hingegen die Zeit 1006. Sei dies die Abbildung a_1 und die Funktion $z(a_1)$ bestimmt in diesem Fall einen minimalen Wert wie folgt:

$$z(a_1) = (1003 - 1000)^2 + (1006 - 1006)^2 = 3^2 + 0^2 = 9$$

Diese Platzierung der Kurzstreckenflüge ist auch in Abbildung 3.1(b) dargestellt. Anstelle der Abstandskvadratbezüge bezüglich der neuen und alten erwarteten Landezeit lassen sich natürlich auch andere Werte in die Bewertungsfunktion $z(a)$ mit einbeziehen. So ist es beispielsweise möglich, unter Hinzunahme weiterer Angaben zu einem Flug, wie etwa der offiziell geplanten Ankunftszeit oder anderen Kriterien, eine Lösung zu bestimmen.

Nun gilt es mit der Festlegung der Teilmenge A' von A eine Vorauswahl zu untersuchender Lösungskandidaten zu treffen. Zu beachten ist nun alleine, dass die soeben als optimale Lösung gefundene Abbildung a_1 in A' enthalten ist. Sei als weiteres Element a_0 in A' enthalten, so ergibt sich das aktuelle Beispiel wie folgt:

$$\begin{aligned} A' &= \{a_0, a_1\} \subseteq A \\ a_0 &= \{DLH001 \rightarrow 1006, DLH002 \rightarrow 1007\} \\ a_1 &= \{DLH001 \rightarrow 1003, DLH002 \rightarrow 1006\} \end{aligned}$$

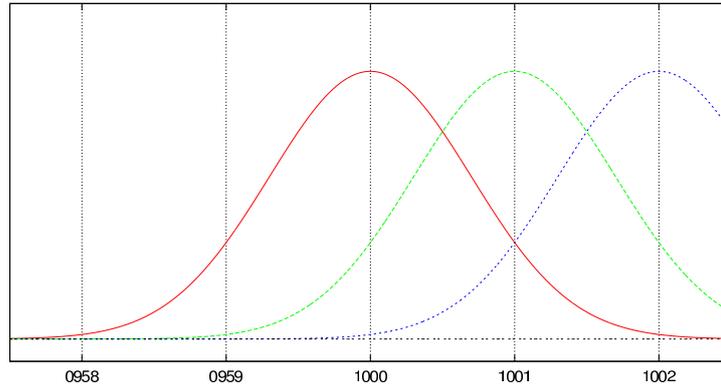


Abbildung 3.2: Standardverteilung für Monte-Carlo-Simulation

3.2.3 Stufe 3: Finden einer optimalen Lösung

Es werden in diesem Schritt nun alle Abbildungen in A' bezüglich der Robustheit untersucht. Wie zuvor erläutert, soll hierfür eine Monte-Carlo-Simulation [5] die Qualität der Lösungen unter möglichen äußeren Einflüssen aufzeigen. Hierfür erfahren nun jedoch nicht alleine die Kurzstreckenflüge eine zufällige Abweichung ihrer Ankunftszeitpunkte, sondern die Simulation erstreckt sich über alle Flüge die den gemeinsamen Flughafen anfliegen. Es handelt sich hierbei genauer um eine mehrfache Verrauschung der Werte, anhand derer im Anschluß eine Beurteilung der Robustheit stattfinden soll.

Unter Verrauschung ist die Abweichung eines Wertes gemäß einer kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsverteilung zu verstehen, die wie in Abbildung 3.2 mittels einer Gauß-Funktion dargestellt ist. Werden diese Gauß-Kurven nun wie abgebildet an den Zeitpositionen der Flüge angelegt, so erkennt man, dass sie sich je nach Position und Ausdehnung in der Breite überschneiden. Findet eine solche Überschneidung statt und werden die neuen erwarteten Landezeiten gemäß der Verteilung zugewiesen, so kann es zu Positionswechseln der entsprechenden Flüge im Anflug kommen. Sei im folgenden $n(v_i)$ eine Funktion, die für einen beliebigen Flug $v_i \in V$ einen gemäß einer solchen Gauß-Funktion zufällig erzeugten Wert zurückgibt.

Beispielsweise liefert eine solche einzelne Verrauschung des gesamten Szenarios, wie es in Abbildung 3.1(b) ersichtlich ist, mit der Abbildung a_1 die folgenden Zeiten:

<i>ACA004</i>	→	1004	<i>DLH002</i>	→	1006
<i>DLH003</i>	→	1002	<i>DLH001</i>	→	1002
<i>EIN001</i>	→	1002			
<i>AFR002</i>	→	0959			

Auf weitere Verrauschungen soll hier verzichtet werden, da schon die angegebenen Werte verdeutlichen, dass unter gegebenen Umständen, d.h. bei Berück-

sichtigung möglicher Einflüsse in der verbleibenden Zeit bis zur tatsächlichen Landung, gänzlich andere Zeitpunkte für die Landung eintreten können. Die nach der Verrauschung erwarteten Landezeitpunkte sind jedoch nun nicht direkt die soeben genannten, da auch hier wieder Konflikte zwischen Flügen auftreten können, wie diesmal beispielsweise an Flug EIN002 und DLH003 zu erkennen ist. D.h. es ist eine weitere Anwendung der Simulation des Lotsenverhaltens mittels dem Verfahren q notwendig, um die endgültigen Landezeiten einer solchen Situation zu erfahren. Diesmal werden jedoch alle Flüge betrachtet, da die Gesamtsituation betrachtet werden soll. Sei für die folgende Darstellung die Landezeit eines Fluges v_i nach normalerweise mehrfacher Hintereinanderausführung der Verrauschung und Sequenzierung aller Flüge $v_i \in V$ mit $q(n(v_i), c)$ angegeben. Die Menge aller so erzeugten Zeiten ergibt sich demnach wie folgt:

$$\begin{array}{ll} ACA004 & \rightarrow 1005 & DLH002 & \rightarrow 1006 \\ DLH003 & \rightarrow 1003 & DLH001 & \rightarrow 1004 \\ EIN001 & \rightarrow 1002 & & \\ AFR002 & \rightarrow 0959 & & \end{array}$$

Diese neuen Zeitangaben lassen erahnen, welche weitreichenden Änderungen mögliche Einflüsse, wie sie durch die Verrauschung simuliert werden, auf das tatsächlich stattfindende Geschehen haben können.

Nun soll die Funktion $z'(a', V)$ Auskunft über die Robustheit einer Lösung geben. Für gewöhnlich geschieht dies, indem das nach Anwendung einer Lösung a' insgesamt verrauschte und sequenzierte Szenario, so wie es eben erstellt wurde, mit genau demselben Szenario verglichen wird, nur dieses nicht verrauscht, aber dennoch sequenziert ist. Dieses unverrauschte, aber sequenzierte Szenario ist wiederum das in Abbildung 3.1(b) dargestellte.

Bezeichne $q(v_i, c)$ die Landezeit eines Fluges ohne Verwendung der Verrauschung, jedoch ebenso nach Anwendung einer Lösung und Sequenzierung des Szenarios, so könnte eine Funktion z' wie folgt aussehen:

$$z'(a', V) = \sum_{i=0}^{|V|-1} (q(n(v_i), c) - q(v_i, c))^2, v_i \in V$$

Wird dies auf das aktuelle Beispiel angewendet, so ergibt sich damit:

$$\begin{aligned} z'(a_1) &= (0959 - 1000)^2 + (1002 - 1001)^2 + (1003 - 1002)^2 + \\ &\quad (1005 - 1005)^2 + (1003 - 1004)^2 + (1006 - 1006)^2 = 4 \end{aligned}$$

Angenommen es wurde bereits ebenso eine Verrauschung auf a_0 durchgeführt und es ergibt sich ein $z'(a_0, V) = 0$, so folgt daraus, dass die Abbildung a_0 robuster als die Abbildung a_1 ist und die Abbildung a_0 wird als Lösung ausgewählt.

Nun wurde hier jedoch mit z' ausschließlich die Robustheit selbst betrachtet und der Nutzen der Lösung bleibt bislang außen vor. Daher ist für gewöhnlich

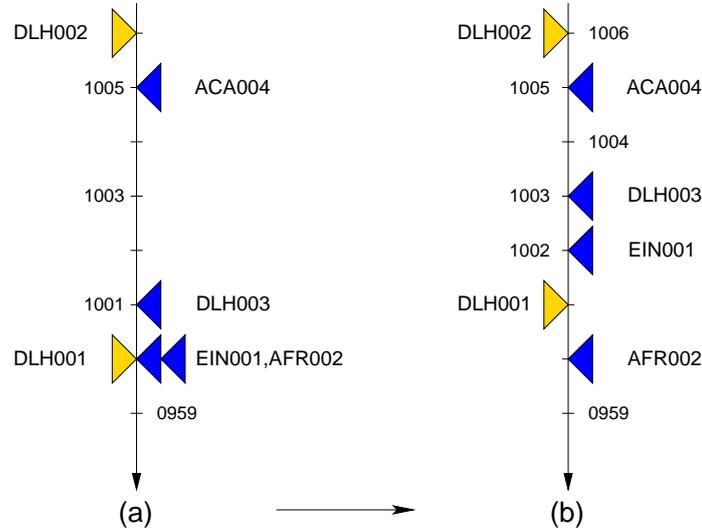


Abbildung 3.3: Erzeugung eines Standardszenarios

die Funktion z' so zu wählen, dass der Nutzen einer Lösung in die endgültige Bewertung mit einfließt, so dass z' sich beispielsweise durch Verwendung gewichtender Parameter $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_0^+$ und $\alpha + \beta = 1$ sowohl aus der Betrachtung der Robustheit, als auch des Nutzens zusammensetzt.

Zur Betrachtung des Nutzens, beispielsweise im Hinblick auf eine sich hier ergebende Gesamtverschiebung der Ankunftszeiten der Flüge durch eine Lösungsanwendung, gilt es nun allerdings, das Szenario nach Anwendung der Lösung a' und Sequenzierung mittels q genau dem Szenario gegenüberzustellen, welches keine Anwendung von a' erfuhr, aber dennoch sequenziert wurde. Ein solches Standardszenario ist in Abbildung 3.3(b) dargestellt und stellt die Situation an der Landebahn nach Sequenzierungsmaßnahmen durch den Lotsen, jedoch ohne Zuweisung von Startzeiten zu den Kurzstreckenflügen dar.

Sei die Landezeit eines Fluges aus dem Standardszenario hier als $q(v_i, c)$ bezeichnet, so könnte eine nun auch den Nutzen berücksichtigende Funktion z' folgendermaßen aussehen:

$$z'(a', V) = \alpha \cdot \sum_{i=0}^{|V|-1} (q(n(v_i), c) - q(v_i, c))^2 + \beta \cdot \sum_{i=0}^{|V|-1} (q(v_i, c) - q(\hat{v}_i, c))^2$$

Mit diesem z' und $\alpha = \beta = 0,5$ ergeben sich für die Abbildungen a_0 und a_1 die folgenden Werte, entnimmt man die entsprechenden Zeiten für die Nutzenberechnung der Abbildung 3.3(b) sowie der Abbildung 3.1(b), wobei für a_0 auf die Verwendung der alternativen Zeiten für die Kurzstreckenflüge, wie sie auf Seite 27 angegeben sind, geachtet werden muss:

$$z'(a_0) = 0,5 \cdot 0 +$$

$$\begin{aligned}
& 0,5 \cdot [(1000 - 1000)^2 + (1001 - 1002)^2 + (1002 - 1003)^2 + \\
& (1005 - 1005)^2 + (1006 - 1001)^2 + (1007 - 1006)^2] \\
& = 0 + 0,5 \cdot 28 = 14 \\
z'(a_1) & = 0,5 \cdot 4 + \\
& 0,5 \cdot [(1000 - 1000)^2 + (1001 - 1002)^2 + (1002 - 1003)^2 + \\
& (1005 - 1005)^2 + (1003 - 1001)^2 + (1006 - 1006)^2] \\
& = 0,5 \cdot 4 + 0,5 \cdot 6 = 5
\end{aligned}$$

Da somit $z'(a_1) = 5 < 14 = z'(a_0)$ gilt, ist die Abbildung aus A' für die sich ein minimales z' ergibt die Abbildung a_1 und diese wird somit als Lösung ausgewählt.

3.2.4 Abschluss

Als letzter Schritt ist nun abschließend noch nötig, die den Kurzstreckenflügen mittels der bestimmten Abbildung a zugewiesenen erwarteten Landezeiten in entsprechende, einzuhaltende Startzeiten am Abflugort umzurechnen. Auf eine Ausführung diesen Schrittes wird an dieser Stelle jedoch verzichtet, da er nicht eigentlicher Bestandteil des Problems ist. Hierauf wird in Kapitel 5 noch etwas detaillierter eingegangen werden.

Dieses Beispiel soll verdeutlichen, dass es nicht trivial ist, eine solche Lösung für das Problem zu bestimmen, für die ein z minimal wird. Je nach Anzahl der Kriterien und deren Verfügbarkeit, d.h. ob sie unmittelbar abgerufen werden können oder in jedem Schritt aufwendig berechnet werden müssen, gilt es zu überlegen, mittels welchem Algorithmus letztendlich eine mögliche Lösung bestimmt werden soll. Um hierauf eine Antwort geben zu können, werden im anschließenden Kapitel verschiedene Verfahren vorgestellt, die sich einmal mehr und einmal weniger für eine Lösungsfindung für dieses Problem eignen.

4 Lösungsansätze

Das zuvor aufgezeigte Optimierungsproblem P lässt sich grundsätzlich mittels verschiedener algorithmischer Ansätze lösen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden zur Bestimmung einer oder mehrerer geeigneter Abbildungen $a_i \in A$ beschränken sich jedoch auf zwei Ansätze, die sich zudem grundlegend unterscheiden.

Zum einen wird die Anwendung zweier verschiedener *first-come-first-served* (FCFS) Ansätze auf das Problem betrachtet, wobei hier jedoch ausschließlich eine einzelne Abbildung $a \in A$ gefunden wird.

Ein im Anschluß aufgezeigter Ansatz bedient sich des Konzepts des *Branch-and-Bound* (BnB). Dieser Algorithmus wurde so an das Problem angepasst, um in akzeptabler Zeit eine Menge von Abbildungen, also möglichen Lösungen, erhalten zu können.

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Ansätze vorgestellt und Verfahren zur Lösungsfindung mit diesen aufgezeigt. Zudem wird auf die Komplexität der angewandten Verfahren eingegangen. Hierauf folgt schließlich ein kurzer Abschnitt über weitere mögliche Verfahren und deren Einsatzmöglichkeit zur Lösung des Problems.

4.1 Vorbereitungen

Zur vorbereitenden Aufgabe für das Problem P gehört die Erstellung der Menge T freier Landezeiten für die Kurzstreckenflüge F . Dabei werden zuerst die Kontinental- und Interkontinentalflüge E mittels dem Verfahren q sequenziert, so dass anschließend die Menge der belegten und dadurch letztendlich die der freien Landezeiten bestimmt werden kann.

Der Algorithmus 1 gibt eine mögliche Implementation des Verfahrens q an und weist jedem Flug aus E in Abhängigkeit der Landekapazität c , bzw. dem sich unmittelbar dadurch ergebenden mittleren, zeitlichen Mindestabstand δ , eine sequenzierte Landezeit zu. Die Menge der Flüge E wird dem Algorithmus in Form eines nach den ELDT der Flüge sortierten Arrays e übergeben. Als Ausgabe erhält man ein wiederum sortiertes Array s , dem die neue, sequenzierte Landezeit eines Fluges aus E an der Stelle i im Array e entnommen werden kann. Somit gilt: $s = \text{queue}(e, \delta)$ und bezüglich des Verfahrens q ergibt sich somit $q(e[i], c) = s[i]$.

Die Berechnung der freien Landezeiten T aus den neuen erwarteten Landezeiten in s erfolgt gemäß der Gleichung auf Seite 22 und lässt sich ebenfalls in

Algorithmus 1 $\text{queue}(e, \delta)$

Eingabe:

sortiertes Array e mit Flügen,
mittlerer Mindestabstand δ

Ausgabe:

sortiertes Array s zu erwartender Landezeiten nach Sequenzierung

Ablauf:

```

s := ∅
if size(e) > 0 do
    s.append(eldt(e[0]))
    lastTime := eldt(e[0])
    for j from 1 to size(e)-1 do
        currentTime := eldt(e[j])
        // Flug zu früh für seinen Platz in der Sequenz?
        if currentTime < lastTime + δ then
            currentTime := lastTime + δ
        endif
        s.append(currentTime)
        lastTime := currentTime
    endfor
endif
return s

```

Form eines Algorithmus darstellen. Dieser ist in Algorithmus 2 angegeben und liefert ausgehend vom Array s eine Menge von Zeitintervallen, die die freien Landezeiten enthalten, beispielsweise ebenfalls in Form eines Arrays t .

4.1.1 Komplexitätsbetrachtungen

Sei das Array e mit m Elementen gefüllt, bzw. die Kardinalität der Menge aller sonstigen Flüge E bestimmt durch $|E| = m$. Falls e kein leeres Array ist (bzw. $m > 0$) wird im Algorithmus 1 eine for-Schleife genau $(m - 1)$ -mal durchlaufen, da sich innerhalb der Schleife keinerlei zusätzliches Abbruchkriterium befindet. Die somit lineare Laufzeit ist daher einfach mit $O(m)$ angegeben.

Aufgrund der untereinander existierenden Abhängigkeiten der neuen erwarteten Landezeiten in s ist eine Sortierung der Daten im Vorfeld allerdings unumgänglich. Die notwendige Sortierung gilt es allerdings im Hinblick auf die weiteren verwendeten Algorithmen bezüglich des gesamten betrachteten Verkehrs durchzuführen. Sei also $|F| = n$, so erhalten wir für die Kardinalität der Menge des gesamten Anflugverkehrs V : $|V| = |E| + |F| = m + n$. Für die Sortierung ist somit eine Laufzeit von $O((m+n) \cdot \log(m+n))$ notwendig, was letztendlich ebenso die Gesamtlaufzeit bestimmt. Bezüglich Algorithmen und der entsprechenden

Algorithmus 2 `getFreeIntervals(s, δ)`

Eingabe:sortiertes Array s mit Landezeiten nach Sequenzierung**Ausgabe:**sortiertes Array t mit freien Landezeitintervallen**Ablauf:**

```
t :=  $\emptyset$ 
if size(s)==0 do
    return t.append( $(-\infty, +\infty)$ );
else
    t.append( $(-\infty, s[0] - \delta)$ )
    previous := s[0]
    for j from 1 to size(s)-1 do
        if (s[j]-previous)  $\geq 2\delta$  do
            t.append([previous+ $\delta$ , s[j] -  $\delta$ ])
        endif
    endfor
    t.append([s[j] +  $\delta$ ,  $+\infty$ ))
endif
return t
```

Laufzeiten zur Sortierung wird auf die gängige Fachliteratur [4] verwiesen.

Der Algorithmus 2 besitzt ebenso wie Algorithmus 1 eine lineare Laufzeit in Abhängigkeit der Größe k des Arrays s , die demnach offensichtlich mit $O(k)$ angegeben werden kann. Da sich allerdings aus dem ersten Algorithmus ergibt, dass $k = m$ ist, gilt für Algorithmus 2 somit ebenso eine Laufzeit von $O(m)$.

Da der Algorithmus 2 die Ausgabe von Algorithmus 1 unmittelbar als Eingabe verwenden kann, entfallen weitere Überlegungen zur Laufzeit möglicher Zwischenschritte. Die Gesamtlaufzeit von der Laufzeit durch die notwendige Sortierung der Daten dominiert und ergibt sich somit auch als $O((m+n) \cdot \log(m+n))$.

4.2 First-Come-First-Served

Ein relativ einfacher Ansatz zur Findung einer Abbildung von der Menge der Kurzstreckenflüge F auf die freien Landezeiten T ist der *first-come-first-served*-Ansatz. Hierbei handelt es sich um ein bekanntes Verfahren, welches prinzipiell gemäß dem alten Sprichwort „wer zuerst kommt, mahlt zuerst“ funktioniert.

Wie im vorangehenden Kapitel dargestellt wurde, besteht die grundlegende Aufgabe der Algorithmen darin, eine Menge A' von Abbildungen der Art $a : F \rightarrow T$ aus A zu bestimmen. Einerseits ist jedoch ein minimales $z(a)$ ist mittels einem

FCFS-Verfahren nicht garantiert und oftmals auch nicht erreichbar, da das Verfahren selbst die Art der Erstellung einer solchen Abbildung a bereits vorgibt. Andererseits wird von diesem Verfahren nur eine einzige Abbildung a erzeugt. Sei diese einzelne erzeugte Abbildung im Folgenden als a_z bezeichnet.

Es stellt sich natürlich unmittelbar die Frage nach dem Sinn eines solchen Verfahrens, da hiermit zwar eine Abbildung erzeugt wird, also eine mögliche Lösung gefunden wird, diese jedoch einerseits nicht optimal ist und bislang ohne Vergleich zu anderen möglichen Abbildung auch keine weitere interessante Betrachtungen erlaubt. Der Zweck der hier verwendeten FCFS-Verfahren ist jedoch mit der relativ guten Laufzeit gerechtfertigt, auf welche gegen Ende dieses Abschnitts ausführlicher eingegangen wird. Somit existiert das hier aufgezeigte FCFS-Verfahren als eine Methode, um schnell eine Lösung zu finden, die für weitere Verfahren als Referenz dienen soll. Als ein eigenständiges Verfahren zum Lösen eines Optimierungsproblems kommt es hingegen selbstverständlich nicht in Frage.

Zieht man nun alle einzuhaltenden Bedingungen bezüglich einer Lösung in Betracht, so lässt sich recht leicht ein *first-come-first-served*-Verfahren für das Problem angeben. Eine vorerst informelle Beschreibung gestaltet sich dabei wie folgt.

4.2.1 Informelle Beschreibung

Einer Menge noch nicht gestarteter Kurzstreckenflügen sollen Zeitpunkte für den Start auf eine solche Weise zugeordnet werden, dass die aufgrund des restlichen Verkehrs notwendigen Sequenzierungsmaßnahmen überflüssig werden. Wie bereits geschildert, findet hierfür zuerst eine Zuordnung auf die Menge der ermittelten freien Landezeiten statt, was in diesem Fall nun nach dem Prinzip *first-come first-served* geschehen soll.

Der darauf aufbauende Algorithmus 3 auf Seite 38 nimmt neben den Mengen F und T auch den Wert der Konstanten c entgegen und bestimmt aufgrund dieser Eingaben eine injektive Abbildung von F nach T wie zuvor beschrieben.

Anhand dem mittleren zeitlichen Mindestabstand δ (das sich mittels der Formel $\delta = \frac{1}{c}$ aus der Landekapazität des Zielflughafens ergibt) ist dem Algorithmus bekannt ist, wo die Flugzeuge auf den Intervallen freier Landezeiten platziert werden dürfen.

Ein nun zu betrachtender Kurzstreckenflug, dessen Landung gemäß seiner ELDT eher stattfinden soll als die aller anderen Kurzstreckenflüge, hat nach FCFS auch den Anspruch auf die erste freie Landezeit. Seine TLDT bestimmt sich somit durch genau die freie Landezeit, die den geringsten zeitlichen Abstand zu seiner ELDT besitzt.

Um die Ziellandezeiten für die weiteren Maschinen zu finden, wird das entsprechende Intervall nun etwas weiter eingeschränkt, so dass für nachfolgende Flüge der soeben beschriebene Schritt wiederholt werden kann. Bezüglich der Reduktion der Intervalle ergeben sich jedoch grundsätzlich zwei unterschiedliche Fälle, die es näher zu betrachten gilt.

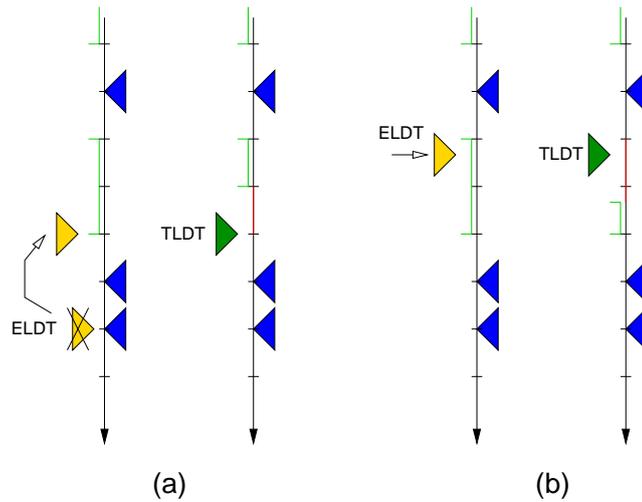


Abbildung 4.1: Zuweisung der Ziellandezeit mit Intervallen

1. Fall

Ist die ELDT eines Fluges dem nächsten Zeitintervall aus T zeitlich vorgelagert, so ergibt sich eine Zuweisung der Zeit am früheren Rand des Intervalls, wie in Abbildung 4.1(a) dargestellt ist. Das Intervall wird in einem solchen Fall maximal um die Dauer δ vermindert, insbesondere gilt bezüglich der Reduktion, dass sie bei Intervallgröße $size(i)$ des betrachteten Intervalls i die Dauer $\min(\delta, size(i))$ beträgt.

2. Fall

Liegt die ELDT des Fluges hingegen innerhalb eines Zeitintervalls aus T , so ergibt sich die TLDT unmittelbar aus der ELDT (siehe Abbildung 4.1(b)). Eine Einschränkung des Intervalls findet möglicherweise in größerem Umfang statt, als im vorhergehenden Fall, was jedoch nicht zwangsläufig der Fall ist, sitzt die ELDT beispielsweise bereits exakt auf einer Randzeit des Intervalls. Die erfolgte Verminderung beträgt hier somit bei zeitlicher Entfernung ϵ zum Rand des Intervalls $\min(\delta + \epsilon, 2\delta, size(i))$ mit wiederum der Intervallgröße $size(i)$ des Intervalls i , was maximal der Dauer 2δ entspricht.

Insbesondere kann in Fall 2 eine Spaltung des ursprünglichen Intervalls auftreten, was sich jedoch bezüglich des FCFS-Ansatzes gleichermaßen wie beim Verbleiben eines Teilintervalls vor der TLDT - wie beispielsweise in Abbildung 4.1 am rechten Rand dargestellt ist - verhält: Aufgrund der Tatsache, dass kein weiterer Kurzstreckenflug existiert, dessen ELDT zeitlich vor der TLDT (bzw. der ELDT) des aktuellen, das Teilintervall erzeugenden Fluges liegt, wird das zeitlich früher befindliche Intervall für weitere Betrachtungen uninteressant und kann aus T entfernt werden.

Diese beiden Fälle lassen sich nun folgendermaßen verallgemeinern: Generell findet aufgrund des soeben erläuterten Sachverhalts stets eine Einschränkung

der freien Landezeiten bis zur TLDT zuzüglich des Mindestabstands δ statt.

Nun kann wieder gemäß dem ersten Schritt bezüglich des nächsten Fluges, d.h. demjenigen, dessen Landung jetzt gemäß seiner ELDT als nächstes ansteht, nach einer freien Landezeit und somit einer Ziellandezeit Ausschau gehalten werden, um im Anschluß erneut die Menge der Landezeiten entsprechend zu limitieren.

Insgesamt ist die Menge jener gegebenen freien Landezeitpunkte stets so gewählt, dass auf jeden Fall für jeden Kurzstreckenflug aus F eine Landezeit aus der Menge T zugeordnet werden kann. Die Erstellung einer solchen Menge von Intervallen mit einer insgesamt minimalen Größe ist keinesfalls trivial, soll in dieser Arbeit jedoch nicht näher erläutert werden.

4.2.2 Formale Darstellung

Das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Verfahren zur Erstellung einer einzelnen Abbildung a_z nach dem FCFS-Prinzip ist im Algorithmus 3 mittels Pseudocode dargestellt. Neben der Eingabe der Mengen F und T in Form von entsprechend der Zeit sortierten Arrays f und i ist ebenso die Angabe des sich aus c ergebenden mittleren zeitlichen Mindestabstands notwendig.

Die Ausgabe des Arrays t beschreibt die Menge T_F der Ziellandeweiten für die Flüge F , die gemäß dem Array f sortiert ist und somit dem jeweiligen Flug $f[j]$ die Ziellandezeit $t[j]$ zuordnet. Formal gilt somit, dass sich die so erstellte Abbildung $a \in A$ darstellen lässt als

$$a_z = \{(f_j, t_j) \in F \times T_F \mid \forall j \in \{0, \dots, |F| - 1\}\}.$$

Das heißt es gilt $a_z(f[j]) = t[j]$, und aufgrund der Injektivität von a_z ist zudem auch $|F| = |T_F|$ wahr, so dass für alle $f[j]$ auch ein $t[j]$ existiert.

4.2.3 Komplexitätsbetrachtungen

Vorerst wird eine komplexitätstheoretische Betrachtung der Laufzeit des Verfahrens durchgeführt:

Die äußere for-Schleife wird $|F|$ -mal durchlaufen, wodurch sich generell mindestens eine ebenso große Laufzeit ergibt. Innerhalb eines jeden Schleifenaufrufs findet nun zusätzlich der Aufruf einer while-Schleife statt, die in Abhängigkeit der ELDT des aktuellen Fluges nach dem nächsten passenden Intervall sucht. Diese while-Schleife wird innerhalb eines einzelnen for-Schleifenaufrufs maximal $(|T|-1)$ -mal aufgerufen, da höchstens jedes Intervall außer dem letzten übersprungen wird, bis das für den aktuellen Flug passende Intervall gefunden ist. Da der aktuelle Index j über den Intervallen innerhalb der for-Schleife nicht zurückgesetzt wird, findet ein Aufruf der while-Schleife insgesamt ebenso maximal $(|T|-1)$ -mal statt, da T der Art gegeben ist, dass auch der letzte Flug aus F noch spätestens bezüglich dem letzten Intervall aus T eine TLDT zugewiesen bekommen kann.

Algorithmus 3 $\text{fcfs}(f, i, \delta)$

Eingabe:

sortiertes Array f mit Kurzstreckenflügen,
sortiertes Array i mit freien Landezeitintervallen,
Mindestabstand δ

Ausgabe:

Array t mit Ziellandezeiten

Ablauf:

```
 $t := \emptyset$ 
 $j := 0$ 
 $[l, r] := i[j]$ 
for  $k$  from 0 to  $\text{size}(f)-1$  do
    // Finde erstes Intervall für aktuellen Flug:
    while  $r < \text{eldt}(f[k])$  do
         $j++$ 
         $[l, r] := i[j]$ 
    endwhile
    if  $\text{eldt}(f[k]) < l$  then // Weise Ziellandezeit zu
         $\text{tldt} := l$ 
    else
         $\text{tldt} := \text{eldt}(f[k])$ 
    endif
     $t.\text{append}(\text{tldt})$ 
    if  $\text{tldt} + \delta \leq r$  then // Reduktion des Intervalls
         $[l, r] := [\text{tldt} + \delta, r]$ 
    else
         $j++$ 
         $[l, r] := i[j]$ 
    endif
endfor
return  $t$ 
```

Wir erhalten so also schlimmstenfalls eine Laufzeit von $O(|F| + |T|)$, was bedeutet, dass der Algorithmus in linearer Zeit bezüglich der Anzahl der Kurzstreckenflüge oder der Anzahl der Intervalle läuft, je nachdem welche Menge hier größer als die andere ist.

Der Speicherbedarf des Algorithmus ist ebenso linear und zwar bezüglich der Kardinalität der Menge F .

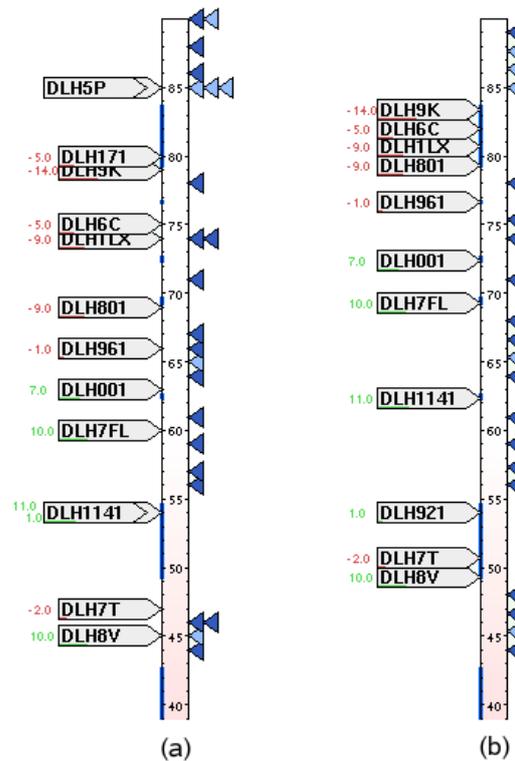


Abbildung 4.2: grafisches Beispiel für das FCFS-Verfahren

4.2.4 Grafisches Beispiel

Das FCFS-Verfahren ist in Abbildung 4.2 anhand eines Beispiels dargestellt. Beide Teilabbildungen (a) und (b) zeigen einen Zeitstrahl, der wie in den zuvor gezeigten Skizzen frühere Zeitpunkte weiter unten besitzt als spätere. Die Zahlen innerhalb des Balkens geben die Dauer bis zu dem auf der jeweiligen Höhe angezeigten Zeitpunkt in Minuten an. Auf der linken Seite des Balkens befinden sich grau dargestellt die zu behandelnden Kurzstreckenflüge F , die sich alle noch am Boden ihrer Abflugorte befinden, auf der rechten Seite des Zeitstrahls hingegen sind die Kontinental- und Interkontinentalflüge aufgetragen. Die Zahlen links der Flugdarstellungen bezeichnen die Verspätung eines Fluges bezüglich seiner geplanten Ankunftszeit und spielen im Rahmen dieses Beispiels noch keine Rolle.

Abbildung 4.2(a) zeigt nun die ursprünglich gegebene Situation, d.h. alle Flüge sind gemäß ihrer ELDT dargestellt. Mehrfach sind hier Zeitpunkte zu erkennen, zu denen mehr als nur eine Landung erwartet wird, so dass Sequenzierungsmaßnahmen seitens des Lotsen absehbar sind. Erkennbar ist dies vor am deutlichsten an den Gruppierungen der Flüge zu den Minuten 54 und 85.

Abbildung 4.2(b) stellt die Situation nun nach Eingriff des zuvor erläuterten FCFS-Verfahrens dar. Die im Beispiel verwendete Kapazität beträgt hier 45 Landungen je Stunde, so dass sich ein mittlerer Abstand von $1, \bar{3}$ Minuten,

bzw. 80 Sekunden ergibt. Alle Flüge außer den Kurzstreckenflügen wurden gemäß dem Algorithmus 1 sequenziert und sind in Abbildung 4.2(b) auch so dargestellt. Anschließend wurden, gemäß dem in Algorithmus 2 angegebenen Verfahren, die freien Landezeiten bestimmt, die den Kurzstreckenflügen mittels einer Abbildung a zugeordnet werden können. Diese freien Landezeiten sind seitlich des Balkens als markierte Bereiche oder einzelne Zeitpunkte dargestellt und verdeutlichen so, in welchen Zeitintervallen sich eine neue Landezeit für einen Kurzstreckenflug grundsätzlich befinden kann.

Die Kurzstreckenflüge F wurden hier nun nach dem FCFS-Prinzip auf die freien Landezeiten verschoben, so dass ein Flug mit früherer erwarteter Landezeit als ein später eintreffender Flug auf eine demnach frühere freie Landezeit gesetzt wurde als dieser. Das Prinzip des Verfahrens lässt sich in Abbildung 4.2 beispielsweise am Flug DLH001 nachempfinden: Obwohl die nächste freie Landezeit zur 69. Minute für ihn in Frage käme, muss er wegen des früher erwarteten Fluges DLH7FL auf eine spätere Zeit ausweichen, welchem es jedoch aufgrund des Fluges DLH1141 nicht besser erging.

4.3 Branch and Bound

Mit dem im Folgenden vorgestellten Ansatz des Branch-and-Bound (BnB) [6] soll ein Verfahren aufgezeigt werden, das sich ebenfalls zur Lösung des Problems eignet. Dabei wird nicht, wie beispielsweise im FCFS-Verfahren, nur eine einzelne, suboptimale Abbildung $a : F \rightarrow T$ gefunden, die sich einzig als Referenz zur optimalen Lösung darstellen lässt, sondern das Branch-and-Bound-Verfahren liefert eine optimale Abbildung $a \in A$, für die ein $z : A \rightarrow \mathbb{R}$ minimal ist. Zudem lässt sich durch das Sammeln der betrachteten Lösungen eine Menge von Lösungskandidaten A' erstellen, die im Anschluß auch bezüglich der Robustheit untersucht werden können. Wie genau dies funktionieren soll, ist in den folgenden Abschnitten erklärt.

4.3.1 Messgrößen

Vorab soll geklärt werden was genau in dieser Arbeit unter einer optimalen Abbildung $a \in A$ zu verstehen ist. Hierzu sind die relevanten Messgrößen, auch *Key Performance Indicators* (KPI) genannt, zu betrachten, da diese für Beurteilung der Qualität einer Lösung verantwortlich sind. Die hier verwendeten Messgrößen sind in Tabelle 4.1 angegeben und werden im folgenden auch vom Branch-and-Bound-Verfahren berücksichtigt.

Die Pünktlichkeit beschreibt dabei den zeitlichen Versatz eines Fluges von seiner entsprechend der gefundenen Abbildung a zugewiesenen Ziellandezeit TLDT zu seiner aus dem Flugplan berechneten Solllandezeit SLDT. Es werden letztendlich jedoch nur solche Pünktlichkeiten gewertet, die effektiv eine Verspätung bedeuten. Ankünfte die früher als geplant erfolgen, spielen in dieser Arbeit bei der Bewertung der Pünktlichkeit keine Rolle.

Größe	Bestimmung anhand einer Lösung
Pünktlichkeit	$\max(0, \text{TLDT} - \text{SLDT})$
Flugverzögerung	$\text{TLDT} - \text{ELDT}$
Flugzeitverkürzung	$(\text{QLDT}_1 - \text{ELDT}) - (\text{QLDT}_2 - \text{TLDT})$

Tabelle 4.1: Messgrößen zur Bestimmung einer optimale Lösung

Die Flugverzögerung betrifft die Dauer, um welche sich der Start eines Fluges aufgrund der Planung zeitlich nach hinten verschiebt. Dies entspricht dem Zeitunterschied der geplanten Ziellandezeit TLDT gegenüber der anfangs erwarteten Landezeit ELDT des Fluges, da die ELDT eine vorläufige Annahme darstellt, wann der Flug entsprechend seines aktuellen Status, jedoch unabhängig vom restlichen Verkehr, am Zielflughafen eintreffen könnte.

Die Flugzeitverkürzung ist schließlich die Zeit, um welche sich die Dauer eines Fluges nach Planung seiner TLDT verkürzt, berücksichtigt man die zusätzliche Flugdauer, die sich bei Sequenzierungsmaßnahmen ergeben, sollten diese notwendig werden. QLDT_1 beschreibt hier die sequenzierte Landezeit ohne planenden Eingriff in das Geschehen, wodurch $(\text{QLDT}_1 - \text{ELDT})$ die durch die Sequenzierung erforderliche zusätzliche Flugzeit ergibt. QLDT_2 hingegen soll die potentiell sequenzierte Ziellandezeit beschreiben und somit ist $(\text{QLDT}_2 - \text{TLDT})$ die erforderliche Flugzeitverlängerung nach einem planendem Eingriff.

Inwiefern diese Messgrößen nun in dieser Arbeit vom Verfahren verwendet und parametrisiert werden, wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

4.3.2 Einführung in das Verfahren

Die Grundidee des Branch-and-Bound ist das zielgerichtete Durchsuchen eines Baumes nach einer optimalen Lösung, der den kompletten Problemraum beschreibt. Der Baum ergibt sich aus einer Unterteilung des Problems in kleinere Teilprobleme, die in ihrer Summe das Problem vollständig beschreiben. Dieses Aufteilen wird auch als *Branching* bezeichnet, was dem Verfahren unter anderem seinen Namen gibt.

Beginnend bei der Wurzel eines solchen, aus kleinen Teilproblemen bestehenden Baumes, lässt sich mit jedem Pfad bis hin zu einem Blatt, eine einzelne Lösung des entsprechenden Problems beschreiben. Die Blätter eines solchen Baumes stellen somit die Menge der möglichen Lösungen dar, die Knoten hingegen sind Entscheidungspunkte, an denen zwischen zwei oder mehreren möglichen Lösungswegen ausgewählt wird.

Prinzipiell kann ein solcher Baum auf verschiedene Arten durchsucht werden, die neben der Tiefen- oder auch der Breitensuche noch andere, auch verbesserte Suchverfahren umfassen. Bezüglich dieser Arbeit finden jedoch ausschließlich Betrachtungen eines Baumes mittels der Tiefensuche statt, d.h. bei der Suche nach einer Lösung wird vorrangig ein einzelner Pfad bis hin zu einem Blatt verfolgt, bevor die zuletzt besuchten Knoten erneut aufgesucht werden, um von

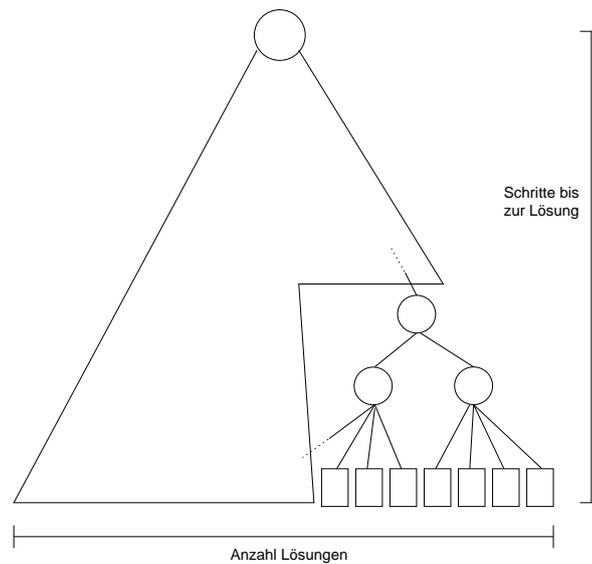


Abbildung 4.3: vollständiger Suchbaum

dort einen alternativen, noch nicht besuchten Pfad zu wählen. Ist an einem solchen Knoten kein weiterer unbesuchter Pfad mehr verfügbar, so wird der wiederum zuvor besuchte Knoten aufgesucht um an diesem ebenso einen alternativen Pfad zu betrachten. Die Tiefensuche ist beendet, wenn an der Wurzel kein weiterer Knoten und somit ein Pfad gefunden wird, der noch nicht besucht wurde.

Die dem BnB-Verfahren eigene Verbesserung des Durchsuchens eines solchen Baumes nach einer optimalen Lösung besteht nun darin, nicht alle Knoten abzulaufen und so schließlich alle Blätter, also alle möglichen Lösungen zu betrachten. Die Idee ist, die Tiefensuche an genau der Stelle abubrechen, wenn erkennbar ist, dass eine weitere Suche keine bessere Lösung erbringt, als bereits gefunden wurde. Statt daher den Pfad eines Baumes weiter in die Tiefe zu verfolgen, wird in anderen, noch nicht betrachteten Pfaden weiter nach besseren Lösungen zu suchen.

Eine Heuristik, d.h. eine geschickt gewählte, monotone Bewertungsfunktion, die den Aufwand für den Weg bis hin zu einer vollständigen Lösung schätzt, dient hierbei als Vorgehenshilfe, d.h. gemäß dieser wird entschieden, ob eine Suche an einem anderen Knoten nun fortgesetzt wird oder nicht. Hierfür existiert zudem ein Schwellwert, der anfangs einen beliebig großen Wert, beispielsweise $+\infty$, besitzt. Wird nun eine Lösung gefunden, so wird dem Schwellwert das Ergebnis der Bewertungsfunktion am Blatt der Lösung zugewiesen. Ein Abbruch der Suche erfolgt nun genau dann, wenn die Heuristik an einem beliebigen Knoten einen Wert erreicht, der größer als der aktuelle Schwellwert ist. Wird aber dennoch eine weitere Lösung gefunden, so bedeutet das folglich, dass diese Lösung einen geringeren Wert durch die Heuristik erhält, als die zuvor gefundene Lösung, aufgrund der der Schwellwert bestimmt wurde. Der Schwellwert erhält also den Wert der Bewertungsfunktion an der neuen Lösung, wodurch verhin-

dert wird, dass weiterhin Lösungen gefunden werden, für die die Heuristik ein schlechteres Ergebnis prognostiziert als für die aktuelle Lösung. Dieses Abbrechen der Suche bei Erreichen oder Überschreiten des aktuellen Schwellwertes wird auch *Bounding* genannt und, was den zeitlichen Teil der Namensgebung für das Verfahren ausmacht. Es dient vorrangig dem Einschränken des Suchraums, so dass die Laufzeit dadurch effizient verbessert werden kann. Für detailliertere Betrachtungen hierzu sei allerdings wiederum auf die Fachliteratur verwiesen [4].

4.3.3 Baumstrukturen

Prinzipiell lässt sich bei Angabe einer Menge von Kurzstreckenflügen F , sowie einer Menge von freien Landezeiten T schnell ein Konstrukt für einen Baum vorstellen, der an seinen Blättern alle möglichen Zuordnungen der Kurzstreckenflüge zu den freien Landezeiten besitzt. Es gilt jedoch im Folgenden die Bedingung zu berücksichtigen, dass die Lösungen ausschließlich aus injektiven Abbildungen bestehen sollen. Somit ist ausgeschlossen, dass beispielsweise zwei Flüge dieselbe Landezeit zugewiesen bekommen, was sich auch auf die Struktur des Suchbaums auswirkt.

Um eine klare Struktur des Baumes angeben zu können, gilt es jedoch systematisch vorzugehen. Es erfolgt somit zuerst eine Aufteilung des hier behandelten Problems in seine Teilprobleme. Eine solche Aufteilung kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen, deren beiden hierfür relevanten Formulierungen wie folgt lauten:

1. Weise einem Kurzstreckenflug eine freie Landezeit zu
2. Finde für eine mögliche freie Landezeit einen passenden Kurzstreckenflug.

Während die Menge der freien Landezeiten bislang als kontinuierliche Menge von Zeitpunkten betrachtet wurde, benötigt der 2. Ansatz scheinbar eine Diskretisierung der Zeit. Dieses Problem wird jedoch mittels der Verwendung des mittleren Mindestabstands δ umgangen, wie später gezeigt wird.

Angenommen, jeder Flug kann anfangs eine beliebige der freien Landezeiten einnehmen, also befindet sich gemäß seiner erwarteten Landezeit nicht später als die freien Landezeiten, und es existieren gerade so viele freie Landezeiten wie Flüge geplant werden sollen. Die Struktur eines Baumes nach Formulierung 1 entspricht in diesem Fall der Struktur eines Baumes gemäß der zweiten Formulierung eines Teilproblems mit der Ausnahme, dass die maßgebenden Parameter für den Branchingfaktor, bzw. die Tiefe, entsprechend vertauscht sind, wie der Abbildung 4.4 entnommen werden kann.

Die Unterschiede in den Strukturen verdeutlichen sich dann, wenn die Menge der Flüge F eine geringere Kardinalität besitzt als die Menge der freien Landezeiten T . Ein Baum der ersten Formulierung, wie er in Abbildung 4.4(a) zu

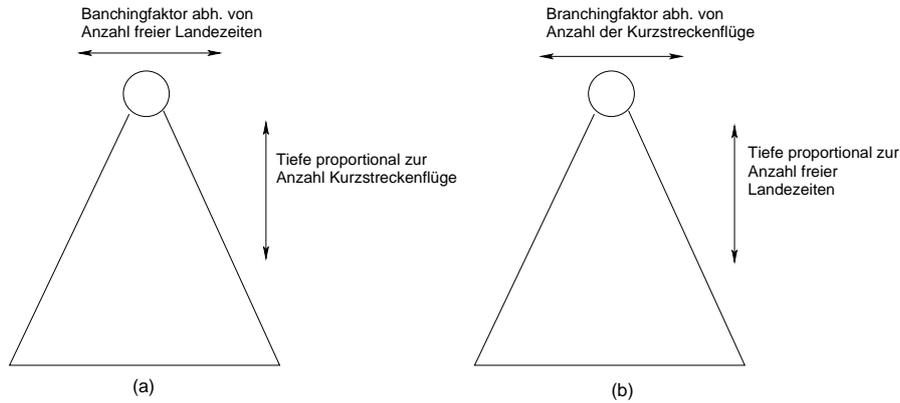


Abbildung 4.4: mögliche Baumstrukturen

sehen ist, wird einfach in der Tiefe $|F|$ abgeschnitten, da keine weiteren Flüge für eventuell noch weiterhin freien Landezeiten zur Betrachtung anstehen. Ein Beispielbaum ist in Grafik 4.5 dargestellt: 3 Kurzstreckenflügen soll hier jeweils eine von 4 freien Landezeiten zugewiesen werden, wobei ausgehend von der Wurzel zuerst einem ersten Flug eine Ziellandezeit zugeordnet wird. Die Verzweigung drückt dabei aus, dass dies verschiedene, nämlich noch alle vorhandenen freie Landezeiten sein können. In der nächsten Ebene des Baumes bekommt nun der zweite Flug eine der möglichen, noch unvergebenen Landezeiten zugewiesen. Die Verzweigung ist hierbei mit zunehmender Tiefe im Baum geringer als zuvor, da zumindest die zuvor vergebene Landezeit nicht mehr Bestandteil der Menge freier Landezeiten ist.

Die Größe der Lösungsmenge, bzw. die Kardinalität von A entspricht der Anzahl l_1 der Blätter im Baum und lässt sich offensichtlich aufgrund des Schnitts in Tiefe $|F|$ mittels der Formel

$$l_1 = \frac{|T|!}{(|T| - |F|)!}$$

bestimmen. Dies erklärt sich aufgrund der Anzahl $|T|!$ von Blättern eines vollständigen Baumes, abzüglich der Multiplikationen entsprechend der Verzweigung in den fehlenden Ebenen, welche wegen des Schnitts in Ebene $|F|$ genau $(|T| - |F|)$ viele Faktoren mit den Werten von $(|T| - |F|)$ bis 1 sind.

Die Anzahl k_1 der zu besuchenden Knoten im Baum ergibt sich jeweils durch Aufsummieren der Knoten in jedem Level. So ergibt sich von der Wurzel beginnend die Summe $1 + |T| + |T| \cdot (|T| - 1) + |T| \cdot (|T| - 1) \cdot (|T| - 2) + \dots$, welche endet, sobald die Ebene $|F| - 1$ erreicht ist. Folglich lässt sich die Anzahl der Knoten durch die folgende Formel bestimmen:

$$k_1 = \sum_{i=0}^{|F|-1} \frac{|T|!}{(|T| - i)!}$$

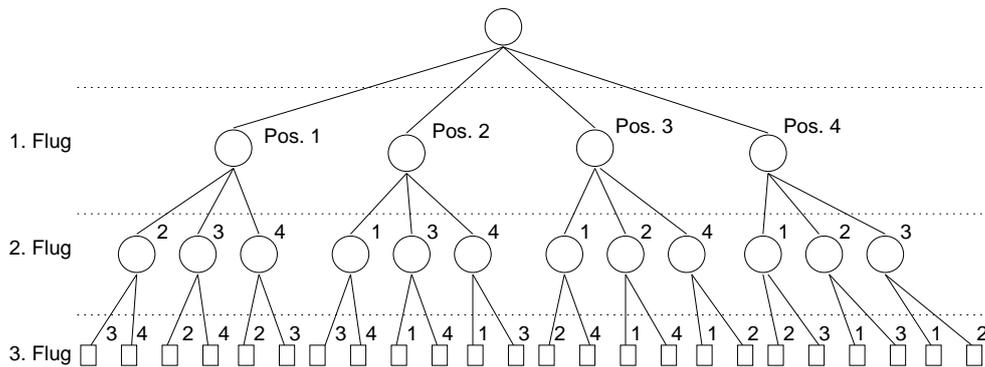


Abbildung 4.5: Baumstruktur 1 mit 4 Zeitpunkten und 3 Flügen

Je nach Granularität der Menge der freien Landezeiten T kann es hier aber theoretisch auch vorkommen, dass in Abhängigkeit vom Mindestabstand δ , mehr als nur eine Landezeit innerhalb eines Intervalls durch die Vergabe einer solchen abgedeckt werden, und damit für weitere Flüge weniger Zeitpunkte verfügbar bleiben. Andererseits ließen sich aber auch im Voraus die freien Landezeiten in solche Zeiten umrechnen, die von vornherein auch zu weiteren Kurzstreckenflügen ausreichend separiert sind. Mit der Verwendung solcher festen Landeslots wird der Suchbaum zwar aufgrund der unmittelbaren Verkleinerung der Menge betrachteter, freier Landezeiten weiter eingeschränkt, doch es ergeben sich Sonderfälle, welche die Bestimmung geeigneter Slots erschweren. Insbesondere sind beispielsweise Flüge, die sich bereits innerhalb eines Intervalls mit freien Landezeiten befinden, insofern benachteiligt, als dass sie im Falle der Existenz eines Versatzes zu einem solchen berechneten Slots stets erst zu einem Slot hin verschoben werden würden, anstelle ihre Position möglicherweise auch einmal beizubehalten.

Überlegt man sich nun eine mögliche Umsetzung für die zweite Formulierung eines Teilproblems, so lässt sich daraus ein Baum wie folgt erstellen: Anstelle in einer Ebene des Baumes die möglichen Landezeiten für einen einzelnen Flug zu variieren, lässt sich auch in einer Ebene für einen Zeitpunkt aus der Menge der freien Landezeiten der hierfür in Frage kommende Flug variieren. Der so entstehende Baum ist bei gleicher Anzahl Kurzstreckenflüge und freie Landezeiten in Abbildung 4.4(b) skizziert.

Abbildung 4.6 zeigt nun, wie sich die Struktur des Baumes ergibt, wenn eine geringere Menge von Flügen im Vergleich zur Anzahl der freien Landezeiten T vorliegt. Jene Zeitpunkte, die für eine Lösung unbelegt gelassen werden sollen, bedürfen einer Art Platzhalter im Baum, der in Form eines f-Knotens angegeben wird. Der so nicht symmetrische Baum enthält in seinen Blättern jedoch dieselben Lösungen, wie der zuvor aufgezeigte Baum, da ebenso eine vollständige Permutation der Kurzstreckenflüge F bezüglich der Menge der freien Landplätze stattfindet. Folglich muss auch die sich in diesem Fall ergebende Anzahl der Blätter l_2 , bzw. die Kardinalität der Lösungsmenge, dem Wert von l_1 entsprechen. Würde man also aus der Menge T der freien Landezeiten mit der

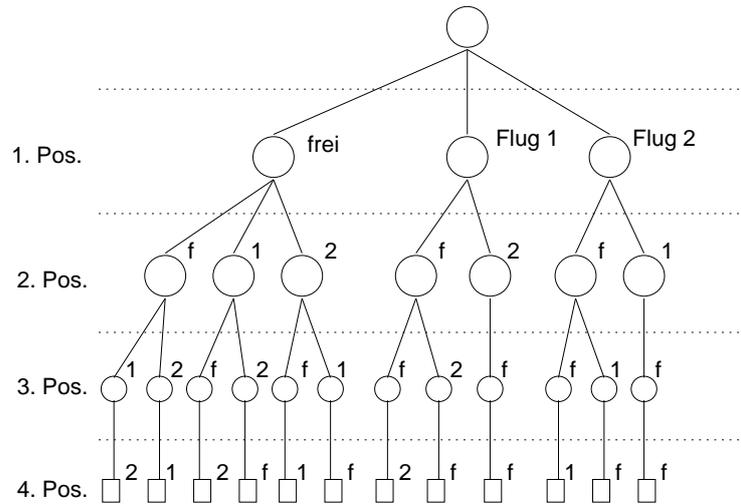


Abbildung 4.6: Baumstruktur 2 mit 2 Flügen und 4 Zeitpunkten

Kardinalität $|T|$ eine Menge von Plätzen auswählen, um diese mit Kurzstreckenflügen zu belegen, so wäre diese Teilmenge $|F|$ groß. Prinzipiell gibt es so $\binom{|T|}{|F|}$ Möglichkeiten, ausreichend viele Landeplätze auszuwählen, jedoch wird soweit eine Berücksichtigung der Reihenfolge ausgeschlossen. Diese ist jedoch durchaus relevant, daher muss jede Reihenfolge der Zuordnung eines Fluges zu einer Landezeit mit in Betracht gezogen werden. Für eine jede Auswahl von Landezeiten der Größe $|F|$ gibt es demnach $|F|!$ verschiedene Reihenfolgen, wodurch sich als Größe der Lösungsmenge $|F|! \binom{|T|}{|F|}$ Elemente ergeben. Somit ist l_2 bestimmt und es gilt außerdem:

$$l_2 = |F|! \binom{|T|}{|F|} = |F|! \frac{|T|!}{|F|! \cdot (|T| - |F|)!} = \frac{|T|!}{(|T| - |F|)!} = l_1$$

Die genaue Bestimmung der Anzahl k_2 der Knoten des an zweiter Stelle vorgestellten Baumes gestaltet sich deutlich aufwendiger, lässt sich jedoch für die aktuelle Betrachtung völlig ausreichend abschätzen. Betrachtet man den Beispielbaum in Abbildung 4.6, so wird deutlich, dass in der Tiefe 1 des Baumes wegen dem Platzhalterknoten zusammen stets $|F| + 1$ Knoten vorhanden sind. Die Verzweigung reduziert sich mit zunehmender Tiefe somit nicht auf eine solche Weise, dass beispielsweise eine Knotenzahl von $\frac{|F|!}{(|F|-d)!}$ je Tiefe d erreicht werden könnte, wie es im Baum zuvor mit $\frac{|T|!}{(|T|-d)!}$ der Fall war. Vielmehr wird in dem Pfad, der bis zur Tiefe $|T| - |F|$ ausschließlich Platzhalterknoten enthält, der Branchingfaktor bis zu eben dieser Tiefe $|T| - |F|$ beibehalten. Bedenkt man zudem, dass die maximale Tiefe d des Baumes mit $|T|$ bestimmt ist, so wird erkennbar, dass die Anzahl der Knoten sich nicht alleine anhand der Menge der Flüge aus F berechnen kann. Ein Obergrenze für die Anzahl der Knoten in diesem Baum ist jedoch aufgrund der Blattanzahl $l_2 = |F|! \binom{|T|}{|F|}$ und der Baumstruktur selbst durch die einfache Multiplikation dieser Zahl mit der Höhe des

Baumes gegeben. Wie unschwer zu erkennen ist, ergibt sich die kleinste mögliche Anzahl Knoten dann, wenn $|T| = |F|$ ist. Für eine Unter- und Obergrenze bezüglich der Anzahl Knoten in der zweiten Möglichkeit eines Baumes ergibt sich demnach folgendes:

$$\sum_{i=0}^{|T|-1} \frac{|F|!}{(|F|-i)!} \leq k_2 < |T| \cdot |F|! \binom{|T|}{|F|}$$

Ein solcher Baum wäre demnach deutlich größer als der zuvor betrachtete. Dennoch wurde für die Umsetzung des Algorithmus diese Struktur bevorzugt, da sie bei der weiteren Reduzierung des Problems gewisse Eigenschaften aufweist, welche die Baumgröße deutlich reduzieren und die Laufzeit des Problems so erheblich verkleinern.

4.3.4 Einschränkung des Suchbaumes

Aufgrund der Vorteile für die nachstehend angegebene Möglichkeit der Einschränkung des Suchraumes, wurde die zweite Variante der zuvor vorgestellten Suchbäume für die Implementierung gewählt. Um die Laufzeit weiter zu reduzieren, sowie von vornherein als ungeeignet betrachtete Kandidaten für Lösungen auszuschließen, wurde eine Modifizierung am gesamten Suchbaum vorgenommen.

Hinsichtlich dem Ziel, eine möglichst hohe Pünktlichkeit, sowie außerdem eine möglichst geringe Verzögerung des gesamten Fluges zu erreichen, erscheint es vorerst wenig sinnvoll, unbelegte Landezeiten zeitlich vor den Ziellandezeiten der Kurzstreckenflüge einzuplanen, insofern jene auch von eben diesen eingenommen werden könnten. Eine solche Planung hielte im Anflug unnötig Platz zu vorhergehenden Flügen, führt jedoch dadurch auch zu weiteren Verzögerungen der anschließend landenden Kurzstreckenflügen.

Aufgrund dieser Tatsache wurde ein kompakterer Ansatz des Problems realisiert, der prinzipiell nur solche Belegungen betrachtet, die keine freien Landezeiten vor den Ziellandezeiten jener Kurzstreckenflüge unbelegt lassen, welche auch zu solchen Zeiten noch hätten eingeplant werden können. Anschaulich lässt sich das Verfahren dadurch so beschreiben, dass der dem jeweiligen Flug entsprechend ersten, noch freien Landezeit dieser Flug unter Berücksichtigung aller möglichen Reihenfolgen der Menge der Flüge zugeordnet wird. Oder anders formuliert: Jeder Flug wird – wieder unter Berücksichtigung einer jeden möglichen Reihenfolge – einer für ihn ersten möglichen, noch freien Landezeit zugeordnet.

Der sich dadurch ergebende Suchbaum verringert sich deutlich auf einen symmetrischen Baum, dessen Größe nur noch von der Anzahl zu verplanender Kurzstreckenflüge abhängig ist.

Die Verzweigung an der Wurzel entspricht der Anzahl Kurzstreckenflüge, also $|F|$ und nimmt mit zunehmender Tiefe jeweils um eins ab, bis die Tiefe $|F|$ erreicht ist. Für den neuen Baum mit l Blättern ergibt sich somit die Menge der Blätter, bzw. die Anzahl l möglicher Lösungen mit $l = |F|!$. Die Anzahl k

der inneren Knoten lässt sich jetzt anhand der unteren Schranke des vorhergehenden Baumes bestimmen. Anstelle der Höhe $|T|$ hat der reduzierte Baum nur noch eine Höhe $|F|$. Damit ergibt sich folglich:

$$k = \sum_{i=0}^{|F|-1} \frac{|F|!}{(|F|-i)!} = \sum_{i=1}^{|F|} \frac{|F|!}{i!}$$

Das Aufrücken der Flüge auf ihre frühestmögliche freie Landezeit erfordert nun aber dennoch eine Separierung zwischen diesen. Hierbei ist der untereinander einzuhaltende Mindestabstand zweier Kurzstreckenflüge ebenso groß gewählt, wie der Abstand zum restlichen Verkehr, der bereits implizit durch die Intervallgrenzen der freien Landezeitintervalle gegeben wurde. Dieser Abstand δ wurde bereits zuvor mit der Formel $\delta = \frac{1}{c}$ hergeleitet, wobei c das Maß der Landekapazität des Flughafens beschreibt. Der Abstand ist damit gerade so groß gewählt, dass damit bezüglich der Kurzstreckenflüge theoretisch keine Sequenzierungsmaßnahmen erfolgen müssen, treffen die Flüge tatsächlich wie geplant ein. Die Flugzeit wird dadurch stets maximal reduziert, weshalb eine Zielfunktion diesbezüglich ebenfalls keine Betrachtungen anzustellen braucht.

4.3.5 Zielfunktion

Die Umsetzung eines BnB-Verfahren erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ziel, innerhalb eines begrenzten Zeitraums eine Menge A' inklusive einem optimalen a aus A gefunden zu haben. Überschreitet die Berechnungsdauer der Anwendung den hierfür angesetzten Zeitrahmen, so soll eine Menge A' mit dem bis dato besten gefundenen a aus A zurückgegeben werden. Es handelt sich somit um einen sogenannten Anytime-Algorithmus [7], dessen Laufzeit sich aufgrund einer gegebenen Zeitspanne einschränken lässt.

Die für eine Zielfunktion $z : A \rightarrow \mathbb{R}$ relevanten Messgrößen, wie sie in Tabelle 4.1 angegeben sind, sollen nun zur Bestimmung einer optimalen Lösung herangezogen werden. Im vorangehenden Abschnitt wurde dabei verdeutlicht, wie auf das Betrachten der Flugzeitverkürzung verzichtet werden kann: Aufgrund der Platzierung eines Fluges auf einen jeweils solchen erstmöglichen Zeitpunkt, zu dem keine Sequenzierung notwendig ist, wird stets seine größtmögliche Flugzeitverkürzung betrachtet.

Die Zielfunktion $z : A \rightarrow \mathbb{R}$ zur Bestimmung eines optimalen $a \in A$ wurde daher so gewählt, dass einerseits die Pünktlichkeit der Flüge, andererseits aber auch die Verzögerung eines jeden einzelnen Fluges zur Lösungsbewertung hinzugezogen wird.

Zur Beurteilung der Pünktlichkeit der Flüge wird ein Wert basierend auf den Abstandsquadraten der TLDT und SLDT ermittelt, so dass damit nun allerdings auch verfrühte Flüge mit höheren Werten und somit als ungewollt dargestellt werden. Es wird somit eine Lösung präferiert, bei der die Landung eines jeden Fluges möglichst nahe seiner geplanten Ankunftszeit liegt. Da verfrühte Flüge am Zielflughafen, insbesondere was den Flughafen Frankfurt anbelangt,

oftmals auf noch belegte Parkpositionen treffen, sind sie gezwungen auf das Freiwerden der Stellplätze zu warten und blockieren dadurch nicht selten auch die Rollwege.

Eine erste Teilfunktion $z_1(a)$ als Bestandteil der Funktion $z(a)$ stellt sich somit wie folgt dar:

$$z_1(a) = \sum_{i=0}^{|F|-1} (TLDT_i - SLDT_i)^2$$

Um nun für einen jeden Flug die Verzögerung seines Starts zu betrachten, wird die TLDT mit der ELDT verglichen und wiederum die Summe der Abstandsquadrate der Werte berechnet. Der Zweck des Vergleichs ist, Situationen als schlechter zu bewerten, in denen beispielsweise ein Flug zugunsten anderer Flüge sehr lange verzögert wird. Dieser Wert sorgt somit für eine möglichst gleichmäßige Verteilung der sich zwangsläufig ergebenden Startzeitverzögerungen auf alle Flüge und ist anhand der Zeilfunktion $z_2(a)$ wie folgt beschreibbar:

$$z_2(a) = \sum_{i=0}^{|F|-1} (TLDT_i - ELDT_i)^2$$

Um nun beide Bewertungen in einem gewissen Verhältnis zueinander zu berücksichtigen, ist in diesem Fall eine einfache Addition unter Verwendung entsprechender Parameter möglich, da sich die Größenordnungen der beiden Teilfunktionen mit der Einheit min^2 sehr ähnlich sind. Es ergibt sich somit die optimierende Funktion $z(a)$ folgendermaßen:

$$z(a) = \alpha \cdot z_1(a) + \beta \cdot z_2(a)$$

Wobei zu beachten ist, dass gilt: $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_0^+$ und $\alpha + \beta = 1$. Inwiefern die Wahl der Parameter α und β die Lösung beeinflusst wurde natürlich auch untersucht und wird im späteren Verlauf der Arbeit aufgezeigt.

4.3.6 Verwendete Heuristik

Ist also nun eine Lösung a vollständig gegeben, wie es an einem Blatt des Baumes der Fall ist, so können für sie die Gesamtkosten anhand der Funktion $z(a)$ bestimmt werden. Betrachtet man nun aber im Baum einen Knoten n , so gilt es zu entscheiden, ob hier die Tiefensuchen nach einer Lösung fortgesetzt werden soll oder nicht. Dabei spielen die geschätzten Kosten $f(n)$ bis zu einer möglichen Lösung eine wichtige Rolle. Sie sind zu berechnen mittels

$$f(n) = g(n) + h(n),$$

wobei $g(n)$ die tatsächlichen Kosten bis zum Knoten n angibt und die Heuristik $h(n)$ die geschätzten Kosten vom aktuellen Knoten n bis zum Blatt sind. Die

Funktion $g(n)$ richtet sich hier einfach nach der Zielfunktion $z(a)$, bestimmt also die Summe der Abstandsquadrate bis zum Knoten n . Für die Heuristik $h(n)$ kann man nun verschiedene Methoden angeben, ausgehend von einem Knoten n für die Kosten für die noch nachfolgend zu betrachtenden Flüge zu schätzen. Wichtig ist hierbei, dass $h(n)$ die tatsächlichen Kosten bis zur Lösung nicht überschätzt. Deswegen will eine Heuristik wohl überdacht sein, da andernfalls womöglich potentiell optimale Lösungen nicht gefunden werden.

Wie aus der Festlegung von z unmittelbar entnommen werden kann, sind die tatsächlichen Kosten k_i , die ein Kurzstreckenflug i mit seiner Platzierung auf die zugewiesene TLDT verursacht, wie folgt festgelegt:

$$k_i = \alpha(TLDT_i - SLDT_i)^2 + \beta(TLDT_i - ELDT_i)^2$$

Die tatsächlichen Kosten bis zur Lösung, bzw. einem Blatt des Baumes bestimmen sich für die noch nicht betrachteten Kurzstreckenflüge als Summe über den einzelnen Kosten der verbleibenden Flüge.

Es besteht nun durchaus die Möglichkeit, dass ein Kurzstreckenflug so gesehen gar keine Kosten verursacht, was insbesondere dann der Fall ist, wenn er sich bereits zu einer freien Landezeit befindet und außerdem absolut pünktlich ist, so dass gilt: $TLDT = ELDT = SLDT$. Der minimale Wert für k_i ist somit 0.

Eine Abschätzung kann nun beispielsweise folgendermaßen aussehen:

Seien hierfür die geschätzten Kosten für einen weiteren Flug i als h_i bezeichnet. Ausgehend von den kleinstmöglichen Kosten ergeben sich die Kosten für die Startverzögerung des Fluges in Abhängig der Position der ELDT relativ zum nächsten freien Landezeitintervall. Sitzt ein Flug gemäß seiner ELDT bereits innerhalb eines solchen Intervalls, so bekommt er im für ihn besten Fall keine neue TLDT, bzw. es gilt $TLDT = ELDT$, wie auch rückblickend in Abbildung 4.1(b) auf Seite 36 nachvollzogen werden kann. In einem solchen Fall betragen die Kosten also möglicherweise $k_i = 0$. Somit lässt sich die Startzeitverzögerung nur dann größer abschätzen, wenn die ELDT kleiner der frühestmöglichen TLDT ist (siehe Abbildung 4.1(a)). Sei diese frühestmögliche TLDT eines Fluges i hier als t_i bezeichnet. Es fallen somit für den Flug i mindestens die Kosten k_i der Differenz der beiden Werte an, bzw. des Abstandsquadrats der Werte multipliziert mit dem Faktor β , also $\beta \cdot (t_i - ELDT)^2$, um genau zu sein.

Ähnlich lässt sich nun auch die Pünktlichkeit abschätzen: Ist der Flug gemäß seiner ELDT absolut pünktlich, so kann es sein, dass er aufgrund einer Verschiebung auf eine freie Landezeit wieder unpünktlich wird, daher gilt es bezüglich der Pünktlichkeit ebenso die frühestmögliche freie Landezeit t_i zu betrachten. Ist die gemäß Zeitplan vorgesehene Landezeit SLDT nun größer als die Zeit t_i , so kann durch möglicherweise spätere Ziellandezeiten ein möglicherweise geringeres Abstandsquadrat $(TLDT - SLDT)^2$ existieren. Demnach besteht die Gefahr, dass in diesem Fall die tatsächlichen Kosten überschätzt werden. Ist die SLDT nun aber kleiner als t_i , d.h. hat der Flug tatsächlich eine Verspätung bei Einhalten seiner frühestmöglichen Ziellandezeit t_i , dann kann davon ausgegangen werden, dass die Verspätung durch noch spätere TLDT nicht verbessert wird. Demnach ist eine Abschätzung ausschließlich in dem Fall mit $\alpha \cdot (t_i - SLDT)^2$

möglich, wenn gilt $SLDT < t_i$.

Die Abschätzung h_i der Kosten eines einzelnen, noch nicht zugeordneten Fluges ergeben sich somit als

$$h_i = \begin{cases} \alpha \cdot (t_i - SLDT)^2 + \beta \cdot (t_i - ELDT)^2 & \text{falls } t_i > ELDT, t_i > SLDT \\ \alpha \cdot (t_i - SLDT)^2 + 0 & \text{falls } t_i \leq ELDT, t_i > SLDT \\ 0 + \beta \cdot (t_i - ELDT)^2 & \text{falls } t_i > ELDT, t_i \leq SLDT \\ 0 & \text{falls } t_i \leq ELDT, t_i \leq SLDT \end{cases}$$

Diese Betrachtungen gilt es nun für jeden noch nicht einer Ziellandezeit zugeordneten Kurzstreckenflug durchzuführen, und die sich ergebenden h_i aufzusummieren. Somit ist $h(n)$ für die hier betrachtete Implementation bestimmt als

$$h(n) = \sum_{i=n+1}^{|F|} h_i$$

Die Implementation dieser Heuristik ist in Algorithmus 4 angegeben.

4.3.7 Implementation

Die Implementation des Branch-and-Bound-Verfahrens selbst findet sich nun in Algorithmus 5 wieder. Es handelt sich hierbei um eine rekursive Funktion, die für sich mit jeder Betrachtung eines Kindes des aktuellen Knoten selbst aufruft. Die geschätzten Kosten der verbleibenden Kurzstreckenflüge werden hierbei mittels der Funktion $estimate(f, i, \alpha, \beta)$, wie sie in Algorithmus 4 angegeben ist und die zuvor eingeführte Heuristik $h(n)$ darstellt, der Variablen $estimateValue$ zugeordnet. Die geschätzten Gesamtkosten $f(n)$, die sich durch $f(n) = g(n) + h(n)$ vom aktuellen Knoten n aus ergeben, sind außerdem mittels der Variablen $total$ umgesetzt, wobei die bisherigen tatsächlichen Kosten $g(n)$ durch $currentValue$ angegeben sind.

Bevor nun für alle noch nicht eingeplanten Kurzstreckenflüge, d.h. für alle Kinder eines Knotens, die tatsächlichen Kosten berechnet werden und somit der Schritt in die Tiefe des Baumes stattfindet, werden die geschätzten Gesamtkosten mit den Kosten der aktuell besten Lösung verglichen, die im Folgenden als $currentMin$ bezeichnet werden. Ein weiteres Durchsuchen des Baumes nach unten erfolgt insbesondere nur dann, wenn absehbar ist, dass die Kosten der besten möglichen Lösung in diesem Teilbaum, die mit den geschätzten Gesamtkosten angegeben werden, nicht schlechter ist, als die Kosten der bereits gefundenen besten Lösung. D.h. es muss $f(n) < currentMin$ gelten. Zu beachten ist hierbei bezüglich Algorithmus 5, dass $currentMin$ eine global definierte Variable sein muss, da ansonsten der Wert nur für die Geschwisterknoten der bis dato besten Lösung behalten wird, und für weitere Knoten aufgrund der Rekursion nicht erreichbar ist, sofern diese nicht von der Funktion zurückgegeben werden.

Für einen jeden noch nicht eingeplanten Kurzstreckenflug $f[k]$ (nicht zu verwechseln mit der zuvor genannten Funktion $f(n)$ für die geschätzten Gesamtkosten im Knoten n) findet nun eine Verzweigung des Baumes statt und es folgt

Algorithmus 4 $estimate(f, i, \alpha, \beta)$

Eingabe:Array f der noch nicht betrachteten Kurzstreckenflüge,Array i der noch unbelegten freien Landezeitintervalle,Parameter α und β **Ausgabe:**geschätzter Restaufwand w **Ablauf:**

```
delay := 0
punctuality := 0
for k from 0 to size(f)-1 do
    j := 0
    [l, r] := i[j]
    while r < eldt(f[k])    // Finde nächstes Intervall

        j++
        [l, r] := i[j]
    endwhile
    if eldt(f[k]) < l then    // Schätze Flugverzögerung

        delay += (l-eldt(f[k]))2
    endif
    potentialTldt := max(l, eldt(f[k]))
    if sldt(f[k]) < potentialTldt then

        punctuality += (potentialTldt-sldt(f[k]))2
    endif
endfor
return  $\alpha \cdot punctuality + \beta \cdot delay$ 
```

die Zuweisung einer Ziellandezeit, sowie Berechnung der tatsächlichen Kosten der jeweiligen Teillösung mittels der Funktion $real(f[k], tldt, \alpha, \beta)$. Auf die detailliertere Darstellung einer möglichen Implementation dieser Funktion wurde hier verzichtet, da das Prinzip und die Funktionsweise in Abschnitt 4.3.6 bereits ausführlich erläutert wurde. Bei der Speicherung der zugewiesenen Ziellandezeit im Array a ist anzumerken, dass für einen Flug ein Wert $index(f[k])$ mitgeführt werden muss, der den ursprünglichen Index o des Fluges $f[o]$ liefert, um die Sortierung der TLDT im Array a gemäß der Sortierung der Flüge im ursprünglichen Array f aufrecht zu erhalten. Der Wert k im Algorithmus ist als Index für a ungeeignet, da k in jeder Ebene des Baumes nur von 0 bis zur Anzahl der noch nicht betrachteten Kurzstreckenflüge läuft und wegen der unterschiedlichen Belegung der Restmenge noch nicht betrachteter Flüge nicht deren ursprünglichen Index bezeichnet.

Ist so schließlich ein Blatt erreicht und sind die tatsächlichen Kosten hier niedriger als die Kosten der aktuell besten Lösung, so ist eine neue beste Lösung gefunden und die Kosten werden für weitere Vergleiche (global) in der Variablen *currentMin* gespeichert.

Liegt jedoch nicht ein Blatt vor, sondern ein weiterer regulärer Knoten, so wird der soeben eingeplante Kurstreckenflug aus der Menge noch zu betrachtender Flüge enternt und außerdem die Intervalle mit den freien Landezeiten um den von diesem Flug beanspruchten Platz reduziert. Basierend auf diesen neuen Bedingungen erfolgt nun der Aufruf für das BnB-Verfahren auf dem vorliegenden Teilbaum.

Wie anhand des Pseudocodes zu erkennen ist, werden alle gefundenen Lösung in einem Array *result* gespeichert. Dieses Array ist hierbei idealerweise ebenso wie *currentMin* global definiert, so dass die gefundenen Lösungen in der Reihenfolge eingefügt werden können, in der sie gefunden werden, wodurch sich ein von vorneherein sortiertes Array ergibt, welches die Lösungen enthält. Man erhält in diesem Verfahren somit eine Teilmenge A' aller möglichen Abbildung $a \in A$, so dass $A' \subseteq A$.

Um bei Verwendung des BnB-Verfahrens zur Bestimmung dieser Menge A' von Lösungen auch zeitnah garantiert eine Lösung zu erhalten, wurde der BnB-Algorithmus so erweitert, dass seine Laufzeit eine gegebene Dauer nicht überschreitet. Die hierfür erforderliche Erweiterung ist in Algorithmus 5 nicht angegeben, lässt sich jedoch beispielsweise einfach auf eine folgende Art und Weise implementieren: Die Umwandlung in einen sogenannten Anytime-Algorithmus kann einfach durch das Hinzufügen einer Kontrollstruktur außerhalb der for-Schleife erfolgen, so dass mit jedem Knotenaufruf geprüft wird, ob ein bestimmtes Zeitlimit bereits überschritten wurde. Bei einem so erzwungenen Abbruch gibt der Algorithmus die bis dato gefundenen Lösungen mitsamt der aktuell besten Lösung zurück. Wird der BnB-Algorithmus durch eine solche Laufzeitbegrenzung jedoch nicht vorzeitig abgebrochen, so ist zudem die optimale Lösung $a^* \in A$ in A' enthalten.

Das hier aufgezeigte BnB-Verfahren in Algorithmus 5 verwendet im Pseudocode Datenstrukturen, die bei tatsächlicher Verwendung womöglich schlechtere Laufzeiten erzeugen, als im folgenden Abschnitt angegeben. Welche Datenstrukturen hierfür jedoch am ehesten geeignet sind, bzw. die besten Laufzeiten ermöglichen, bleibt zu überprüfen und soll in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Die Laufzeitbetrachtungen sind aus diesem Grund im Folgenden nur oberflächlich behandelt worden.

4.3.8 Komplexitätsbetrachtungen

Die Laufzeit des gesamten BnB-Verfahrens, so wie es in Algorithmus 5 mittels Pseudocode dargestellt wurde, lässt sich maßgeblich schon durch die Betrachtung des Suchbaumes herleiten. Sei im Folgenden $m = |F|$, so besitzt der Baum die Höhe m und zu Beginn den maximalen Branchingfaktor m . Eine obere Schranke der Laufzeit lässt sich bezüglich des kompletten Baumes auf jeden

Fall mit $O(m^m)$ angeben. Da der Branchingfaktor mit zunehmender Tiefe im Baum jedoch kontinuierlich abnimmt, lässt sich eine etwas genauere Aussage über eine obere Schranke machen: Die Anzahl der Knoten im Baum wurde zuvor mit $k = \sum_{i=1}^m \frac{m!}{i!}$ bestimmt. Mit der Betrachtung der Blätter erweitert sich der Betrachtungsaufwand und somit die Summe um den Fall $i = 0$ auf $\sum_{i=0}^m \frac{m!}{i!}$. Damit ist der Aufwand jedoch nicht schlechter als $\sum_{i=0}^m m!$, was sich als $(m+1) \cdot m! = (m+1)!$ ergibt und sich somit eine geringere obere Schranke mit $O((m+1)!)$ angeben lässt.

Durch die Anwendung der Heuristik ändert sich die Gesamtlaufzeit des Algorithmus im *worst case* wie folgt: Da in jedem Knoten eine Überlegung hinsichtlich der verbleibenden Knoten gemäß $O(m)$ erfolgt, wächst die Gesamtlaufzeit im schlimmsten Fall nicht stärker als $O(m \cdot (m+1)!)$.

Um diese Laufzeit nun in den meisten Fällen zu verbessern, werden mittels der angegebenen Heuristik die Restkosten abgeschätzt. Die Kunst besteht nun darin, mittels einer verhältnismäßig guten Heuristik die noch folgenden Kosten so abzuschätzen, dass die Schätzung möglichst oft nahe den tatsächlichen Kosten erfolgt, und so möglichst häufig zu einem frühen Abschneiden von Teilbäumen führt.

Beschreibe d_n die Tiefe des Baumes am aktuellen Knoten n , so besitzt die Funktion der hier verwendeten Heuristik $h(n)$ offensichtlich keine schlechtere Laufzeit als $(m - d_n)$, also $O(m)$.

Im besten Fall wird der Baum einmal in die Tiefe durchsucht und die optimale Lösung beim ersten besuchten Blatt gefunden. Da jedoch mit jedem Schritt in die Tiefe für jeweils alle verbleibenden Kurzstreckenflüge die geschätzten Kosten berechnet werden, bildet sich somit für den einzelnen Pfad die minimale Laufzeit aus der Summe der Anzahl der noch nicht betrachteten Flüge wie folgt:

$$\sum_{d_n=0}^{m-1} (m - d_n) = \sum_{d_n=1}^m d_n = \frac{m \cdot (m+1)}{2}$$

Damit ist die untere Schranke der Laufzeit in diesem Fall mit $O(m^2)$ angeben. Selbstverständlich ließe sich auch speziell für den Fall, dass noch keine Lösung gefunden wurde, also der erste Pfad überhaupt in die Tiefe verfolgt wird, eine Anwendung der Heuristik einsparen und so die Laufzeit im *best case* auf $O(m)$ verbessern, doch handelt es sich hierbei bereits um eine Erweiterungsmöglichkeit, die an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden soll.

Im Normalfall wird jedoch mittels der Heuristikfunktion eine Schätzung berechnet, die zu einem früheren Abbruch der Suche führt und so für eine bessere Laufzeit sorgt. Wie genau hierbei die Heuristik schätzt ist der oben gemachten Angabe zur Heuristikfunktion zu entnehmen und lässt sich in Worten folgendermaßen ausdrücken:

Liegt ein Flug zeitlich vor einem für ihn nächstmöglichen Zeitintervall und ist die SLDT früher als die potentielle TLDT, die sich hier für den Flug aus der linken Intervallgrenze ergibt, so entspricht die Abschätzung der verbleibenden Kosten exakt den minimalen tatsächlichen Kosten für die verbleibenden Flüge. Somit

ist die Heuristik in genau solchen Fällen vollkommen, da sie die Kosten entsprechend korrekt voraussagt. Sind die Voraussetzungen jedoch so nicht gegeben, d.h. liegt die ELDT eines Fluges innerhalb eines Intervalls, oder befindet sich die langfristig geplante Ankunft eines Flug nach seiner bestmöglichen Ziellandezeit, so ist eine Aussage über die minimalen tatsächlichen Restkosten entsprechend nur teilweise, d.h. entweder die Pünktlichkeit oder aber die Flugverzögerung möglich, oder es verbleibt ausschließlich die Möglichkeit der Schätzung mit der unteren Schranke 0. Demnach bedarf es zur genaueren Betrachtung der Situation einer empirischen Analyse der Verteilung der ELDT aller Flüge relativ zu ihren nächstmöglichen Intervallen freier Landezeiten, sowie der Zeitpunkte der SLDT relativ zu den bestmöglichen potentiellen Ziellandezeiten. Dies übersteigt jedoch den Aufgabenbereich dieser Arbeit und lässt Raum für weitergehende Untersuchungen.

Im Hinblick auf die Möglichkeit, mittels der Angabe einer Zeitspanne die Laufzeit des Algorithmus zu begrenzen, macht es Sinn, das Verfahren auch für Berechnungen einzusetzen, die ein gewisse Dauer nicht überschreiten dürfen. Die effektive Laufzeit des Anytime-Algorithmus kann daher als konstant angegeben werden. Soll zusätzlich berücksichtigt werden, dass auf jeden Fall eine Lösung zurückgegeben wird, so entspricht die effektive Laufzeit der minimalen Laufzeit für den *best case*.

4.3.9 Grafisches Beispiel

Um einen anschaulichen, unmittelbaren Vergleich zum Ergebnis des FCFS-Verfahrens angeben zu können, sei hier auf Abbildung 4.2 auf Seite 39 verwiesen, in der eine Situation mittels den ELDT, als auch den TLDT nach Anwendung des FCFS-Verfahrens angezeigt wird. Abbildung 4.7 zeigt nun bezüglich derselben Situation einen Vergleich des BnB-Verfahrens zum FCFS-Verfahren an. Zu beachten sind hier nun die Zahlenangaben seitlich der dargestellten Kurzstreckenflüge. Sie geben die jeweils erwartete Pünktlichkeit am Zielflughafen in Minuten an (Verspätungen sind durch negative Zahlen erkennbar), die auch vom BnB-Verfahren berücksichtigt werden. Die zuvor eingeführten Faktoren α und β für den Einfluss der Pünktlichkeit, bzw. der Startverzögerung auf die optimale Lösung wurden hier jeweils auf den Wert 0,5 gesetzt, so dass in etwa gleichem Maße die Existenz von sogenannten Ausreißern vermieden wird, wie die Pünktlichkeit der Flüge eine Rolle spielt.

Deutlich sind in 4.7(b) die Auswirkungen der Optimierung bezüglich der Pünktlichkeit zu erkennen, die beispielsweise bewirken, dass der Flug DLH801 eine frühere Ziellandezeit zugeordnet bekommt, als die ursprünglich vor ihm zur Landung erwarteten Flüge DLH7FL und DLH001, sowie DLH961. Der Einfluss der Optimierung bezüglich der Flugverzögerung macht sich beispielsweise dadurch bemerkbar, dass ein einzelner Flug nicht allzu weit zugunsten vieler anderer Flüge nach hinten verschoben wird. In diesem Beispiel ist dies jedoch bei keinem Flug so anschaulich der Fall, dass der Effekt mit dem Einfluss der Flugverzögerung erklärbar wäre.

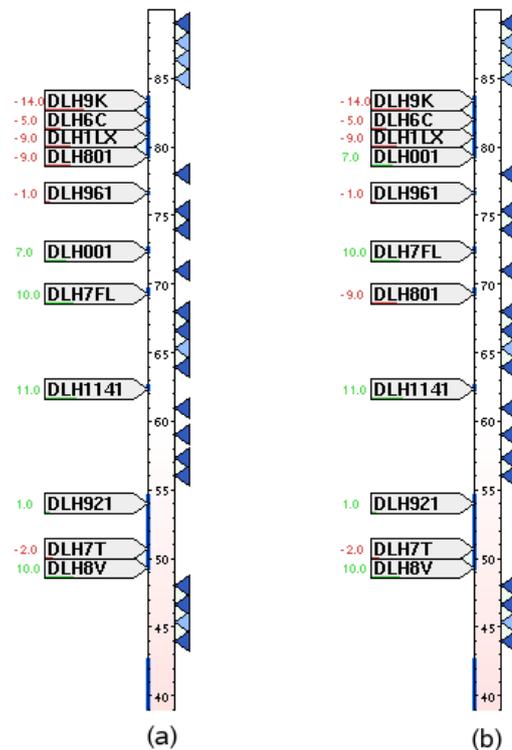


Abbildung 4.7: Unterschiede der Ergebnisse im BnB- und FCFS-Verfahren

4.4 Bestimmung einer robusten Lösung

Im Anschluß an die Bestimmung einer Menge A' von Abbildungen, bzw. möglichen Lösungen, gilt es nun, aus allen Elementen in A' die optimale Lösung gemäß z' , d.h. unter zusätzlicher Berücksichtigung der Robustheit der Lösung auszuwählen. Hierfür ist jedoch zuerst die Anwendung einer einfachen Monte-Carlo-Simulation notwendig, um die Robustheit einer Lösung bewerten zu können.

4.4.1 Monte-Carlo-Simulation

Um das Verhalten einer Situation unter möglichen äußeren Einflüssen zu untersuchen, wird nun die ELDT eines jeden Fluges mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, und so mögliche Variation bezüglich der tatsächlichen Landezeit im Rahmen dieser Unsicherheit betrachtet. Letztendlich kann sich so, ausgehend von einer Situation die auf den ELDT aller Flüge basiert, eine vollständig andere Landesequenz ergeben. Daher werden mehrere solcher möglichen Abweichungen für einen jeden Flug betrachtet und anschließend mit der ursprünglichen Situation, die auf den durchgeführten Optimierungen beruht, verglichen.

Bezüglich eines einzelnen Fluges findet die Zuweisung einer Unsicherheit auf die

folgende Weise statt: Gemäß einer Gauß- oder Normalverteilung, wie sie beispielsweise in Abbildung 3.2 angegeben ist, wird eine zufällige Abweichung der ELDT berechnet und anstelle dieser verwendet. Dies geschieht für alle ELDT der Kontinental- und Interkontinentalflüge sowie für alle bezüglich einer Lösung zuvor ermittelten TLDT der Kurzstreckenflüge.

Auf einer solchen, auch als verrauschtes Szenario bezeichneten Situation wird nun wieder die Simulation einer Sequenzierung angewendet, was mittels der in Algorithmus 1 auf Seite 33 angegebenen Methode erfolgen kann. Nur ist hier jetzt zu beachten, dass als Eingabe die Menge V aller Flüge verwendet und von diesen jeweils deren verrauschte Landezeit betrachtet wird.

Bezüglich der Sequenzierung muss an dieser Stelle jedoch der folgende Punkt beachtet werden: Da es aufgrund der Verrauschung vorkommen kann, dass die zeitliche Reihenfolge der Flüge nun eine andere ist als die Reihenfolge zuvor, welche auf der ELDT basiert, ist es für die Verwendung des genannten Sequenzierungsalgorithmus wichtig, eine Sortierung gemäß der neuen, verrauschten Zeiten herzustellen. Hier macht es aus implementatorischer Sicht Sinn, die sich die aufgrund der Sortierung ergebende Permutation der Flüge zu merken, um nach der Durchführung der Sequenzierung die ursprüngliche Reihenfolge der Flüge schnell wiederherstellen zu können, damit ein Vergleich der Szenarien entsprechend leichter stattfinden kann.

Da mit einem solchen einmaligen Verrauschen und anschließendem Sequenzieren nur eine Möglichkeit der Abweichung durch beliebige äußere Einflüsse betrachtet wird, ist es sinnvoll, den Vorgang mehrfach zu wiederholen. Welche Anzahl von Iterationen hier als geeignet erscheint, hängt im Allgemeinen vom jeweils betrachteten Problem ab und wird bezüglich des vorliegenden Problems im anschließenden Kapitel näher untersucht.

4.4.2 Vergleich der Szenarien

Bevor auf die weiteren Methoden der Bestimmung einer gemäß einem z' optimalen Lösung eingegangen wird, soll ein Gesamtüberblick über die hierfür notwendigen Vergleiche der Szenarien das Verständnis der nachfolgenden Vorgänge erleichtern. Abbildung 4.8 zeigt hierfür ausgehend vom Ausgangsszenario auf Grundlage der ELDTs in der Mitte, welche Szenarien erstellt werden, bzw. miteinander verglichen werden müssen, um entsprechend sinnvolle Aussagen zu erhalten.

Der Vergleich von Szenarien bezüglich des Nutzens oder auch der Robustheit finden immer auf der Basis sequenzierter Szenarien statt. Der Grund ist der, dass für einen sinnvollen Vergleich ein gemeinsamer Bezugspunkt gefunden werden muss, den hier die Landebahn, bzw. der Landezeitpunkt eines jeden Fluges darstellt. Die Landezeiten liegen jedoch nach den Sequenzierungsmaßnahmen des Anfluglotsen, weshalb die Simulation einer Sequenzierung unerlässlich ist.

Die eigentliche Lösung ist Bestandteil des Lösungsszenarios (b), welches aufgrund der zuvor durchgeführten Rechnung aus dem Ausgangsszenario (a) hervorgeht. Es wurde beispielsweise mittels einem der aufgeführten Verfahren er-

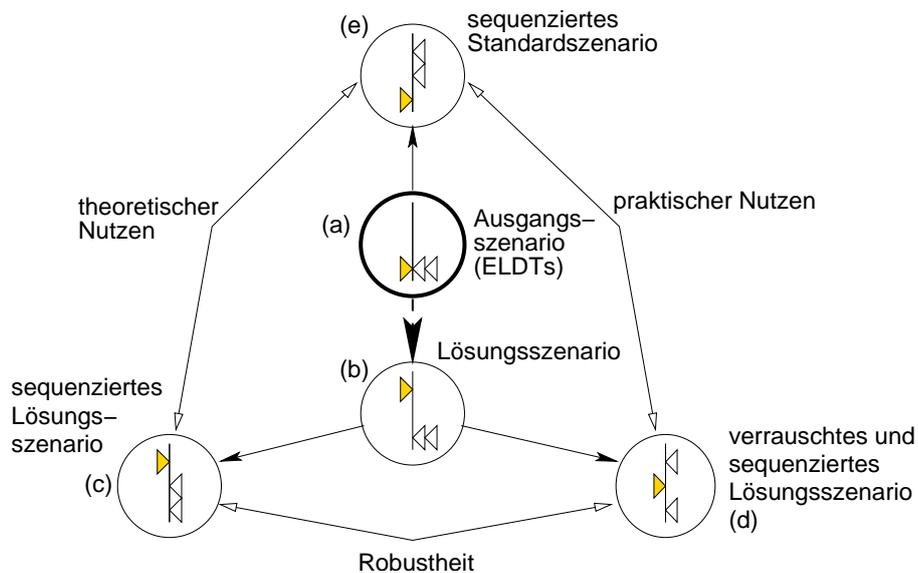


Abbildung 4.8: Vergleich der verschiedenen Szenarien

zeugt und wird so als bereits gegeben angenommen. Wie in der Abbildung an der Stelle (c) zu erkennen ist, kann hieraus nun ein sequenziertes Szenario erstellt werden, das heißt alle Flüge werden den sich ergebenden Sequenzierungsmaßnahmen unterworfen und man erhält so eine Situation, wie sie sich an der Landebahn ergäbe, wäre eine gefundene Lösung angewendet worden. Andererseits lässt sich ebenso ein mehrfach verraushtes und jeweils anschließend sequenziertes Lösungsszenario (d) erstellen. Werden nun diese beiden Szenarien entsprechend miteinander verglichen, so erhält man eine Aussage über die Robustheit der verwendeten Lösung.

Möchte man den Nutzen eines gesamten Szenarios untersuchen, so bedarf es zuerst der Bestimmung eines sequenzierten Standardszenarios (e). Das heißt, die in der Ausgangssituation (a) gegebenen erwarteten Landezeiten der Flüge werden einer Sequenzierung unterworfen, wodurch sich eine erwartete Situation an der Landebahn ergibt, wie sie ohne planende Eingriffe voraussichtlich stattfindet. Nur durch den Vergleich eines solchen Szenarios mit einem sequenzierten Lösungsszenario (c) lässt sich nun im Hinblick auf die Pünktlichkeit, Flugzeitverkürzung oder auch der Flugverzögerung eine Aussage bezüglich des Nutzens einer Lösung machen.

Möchte man nun auch Aussagen über den praktischen Nutzen einer Lösung machen, so ist das verrauschte und sequenzierte Lösungsszenario mit dem Standardszenario zu vergleichen.

4.4.3 Lösungsbewertung

Nach, bzw. auch bereits während den mehreren Iterationen der Verrauschung und Sequenzierung der verschiedenen Lösungen lassen sich nun die zuvor genannten Messgrößen einer jeden Lösung bestimmen. Um die entsprechenden

Werte aus einem vielfach verrauschten Lösungsszenario mit den Ergebnissen der nicht verrauschten Situation vergleichen zu können, wird hier der Mittelwert der jeweiligen Messgröße aus allen verrauschten und sequenzierten Lösungsszenarien bestimmt und der jeweils ermittelten Messgröße des unverrauschten aber sequenzierten Lösungsszenarios gegenübergestellt. Die so festgestellten Unterschiede sollen möglichst Auskunft darüber geben, inwiefern mögliche äußere Einflüsse die Situation, bzw. das Szenario beeinträchtigen und sich auf die unterschiedlichen Messgrößen wie Pünktlichkeit, Flugzeitverkürzung und Flugverzögerung auswirken. Je geringer die Unterschiede zwischen den Szenarien ausfallen, desto stabiler ist das Lösungsszenario und desto höher ist somit die Robustheit der Lösung.

Ziel ist es nun, eine optimale Lösung a^* aus der zuvor erstellten Menge A' auszuwählen. Die Lösung a^* ist genau dann optimal, wenn ein entsprechendes $z'(a^*, V)$ minimal ist, d.h. dass kein weiteres a' in A' existiert, für das $z'(a', V)$ kleiner als $z'(a^*, V)$ ist.

Die Funktion $z' : A' \times \mathcal{P}(V) \rightarrow \mathbb{R}$ ist im Folgenden festgelegt als eine Funktion, welche einerseits bezüglich aller Flüge im Szenario die Robustheit einer Lösung beurteilt, andererseits aber auch den Nutzen einer Lösung zur Bewertung dieser hinzuzieht.

Die Robustheit lässt sich dabei wie folgt bestimmen: Es sei hierfür der Zeitpunkt *noised landing time* (NLDT) als der Zeitpunkt eingeführt, der sich durch das einmalige Verrauschen der TLDT eines Kurzstreckenfluges, bzw. der ELDT eines anderen Fluges ergibt. Wird nun im Anschluß an jede Iteration der Verrauschung aller TLDTs und ELDTs zu NLDTs und Sequenzierung aller NLDTs mittels dem Verfahren q die Summe aller Abstandquadrate über eben diesen sequenzierten NLDTs und den nicht verrauschten aber sequenzierten TLDTs und ELDTs aller Flüge berechnet, so kann dieser Wert als ein Maß für die Robustheit einer Lösung dienen.

Zur leserlicheren Darstellung sollen die vereinfachten Schreibweisen $NLDT_j^q$, $TLDT_j^q$ und $ELDT_j^q$ eingeführt werden und für einen Flug $v_j \in V$ im Folgenden die gemäß q und in Abhängigkeit von c sequenzierte NLDT, TLDT oder ELDT angeben. Beschreibe n die Anzahl der Iterationen, so lässt sich die Robustheit einer n -fach verrauschten Lösung anhand der Funktion $z'_1(a', V)$ wie folgt berechnen:

$$z'_1(a', V) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{|V|-1} (NLDT_j^q - \left\{ \begin{array}{ll} TLDT_j^q & \text{falls } v_j \in F \\ ELDT_j^q & \text{falls } v_j \in E \end{array} \right\})^2, v_j \in V$$

Ebenso lässt sich nun bezüglich einer jeden Iteration der Nutzen anhand der Pünktlichkeit, der Flugverzögerung und der Flugzeitverkürzung berechnen. Sei der Nutzen einer Lösung a' mit $z'_2(a', V)$ bezeichnet und beschreibe z'_3 die Pünktlichkeit, z'_4 die Flugverzögerung und z'_5 die Flugzeitverkürzung, so sieht

eine Berechnung dieser wie folgt aus:

$$z'_3(a', V) = \sum_{j=0}^{|V|-1} (NLDT_j^q - SLDT_j)^2$$

$$z'_4(a', V) = \sum_{j=0}^{|V|-1} (NLDT_j^q - ELDT_j)^2$$

$$z'_5(a', V) = \sum_{j=0}^{|V|-1} (ELDT_j^q - ELDT_j)^2$$

$$z'_2(a', V) = \sum_{i=0}^n (u \cdot z'_3(a', V) + v \cdot z'_4(a', V) + w \cdot z'_5(a', V))$$

Durch Gewichtung der hier verwendeten Parameter u , v und w lassen sich wiederum Präferenzen innerhalb des Nutzens formulieren. Werden die Parameter u , v und w so gewählt, dass $u + v + w = 1$ mit $u, v, w \in \mathbb{R}_0^+$, so befinden sich z'_1 und z'_2 in ähnlichen Größenbereichen und es kann $z'(a', V)$ bestimmt werden mit

$$z'(a', V) = \gamma \cdot z'_1(a', V) + \phi \cdot z'_2(a', V)$$

Wobei auch hier wiederum gilt: $\gamma, \phi \in \mathbb{R}_0^+ : \gamma + \phi = 1$. Eine Lösung a^* für die diese Berechnung den besten Wert im Vergleich zu allen anderen a' aus A' ergibt, ist die gesuchte optimale Lösung.

4.4.4 Laufzeitbetrachtung

Die Verrauschung eines Szenarios mit insgesamt $|V| = |F| + |E|$ Flügen entspricht der Erzeugung von $|V|$ Zufallszeiten. Die anschließende Sequenzierung alleine bedarf ebenso der Laufzeit $O(|V|)$, wie in Abschnitt 4.1.1 verdeutlicht worden ist. Die allerdings ein jedesmal zur so vereinfachten Sequenzierung notwendige Sortierung benötigt die Laufzeit $O(|V| \cdot \log |V|)$ und bestimmt somit die gesamte Laufzeit einer einzelnen Iteration.

Bei einer Ausführung von n Iterationen je Szenario bedarf es daher mindestens $n \cdot |V| \cdot \log |V|$ Schritte, zudem werden diese in Abhängigkeit der Kardinalität von A' , sprich der sich dadurch ergebenden Anzahl zu betrachtender Lösungen, vervielfacht.

Die Gesamtlaufzeit für die Erstellung und Bestimmung der Messgrößen aller verrauschten Szenarien beläuft sich somit auf $O(|V| \cdot \log |V|)$, was aufgrund der notwendigen Sortierung nicht weiter verbessert werden kann.

4.5 Berechnung der Startzeiten

Mittels der zuvor genannten Verfahren und Methoden lässt sich nun zwar eine Menge möglicher Lösungen bestimmen und daraus gemäß der Robustheit sowie dem entsprechenden Nutzen eine optimale Lösung auswählen, doch es fehlt nach wie vor ein wichtiger Schritt zur Umsetzung einer solchen berechneten Lösung. Dieser wichtige Schritt ist das Umrechnen der Ziellandezeiten aller Kurzstreckenflüge in entsprechende Startzeiten.

Der Vorgang, um die Startzeiten der Flüge aufgrund ihrer Ziellandezeiten zu berechnen, kann sich auf mehrere mögliche Arten darstellen: Einerseits ist es natürlich einfach zu behaupten, dass wenn ein Flug zu einer gewissen Zeit t_1 landen will, er zu einer ganz bestimmten Zeit t_2 starten muss. Dies setzt allerdings die Kenntnis einer exakten, im voraus berechneten Flugdauer (*calculated flight time*, CFT) eines jeden Kurzstreckenfluges voraus. Da der Flug aber noch nicht stattgefunden hat und somit nur auf Erfahrungswerte oder anderweitige Schätzungen und Kalkulationen zurückgegriffen werden kann, ist eine solche Angabe einer Flugdauer auch wieder mit einer gewissen Unsicherheit belastet. Dennoch sollte vor allem durch die Berücksichtigung der Robustheit einer Lösung mittels einer solchen Zeit ein sinnvolles Ergebnis zu erzielen sein, da mit der in der ELDT vorhandenen und mittels der Robustheitsbetrachtung abgedeckten Unsicherheit ebenso in gewissem Maße eine Restflugzeit geschätzt wird. Die sogenannte Zielstartzeit (*target take-off time*, TTOT) ergibt sich anhand der CFT nun durch die folgende einfache Rechnung:

$$TTOT = TLDT - CFT$$

Es existiert jedoch noch zumindest eine weitere Möglichkeit, die Zielstartzeit eines Fluges zu bestimmen. Anstelle auf die Flugzeit zurückzugreifen, kann auch eine bereits existierende geschätzte Startzeit (*estimated take-off time*, ETOT) verwendet werden. Hierbei wird einfach der Unterschied zwischen der TLDT und der ELDT am Zielflughafen – und somit die Verschiebung der Ankunft eines Fluges ohne Rücksicht auf eine Sequenzierung – auf den Startflughafen projiziert. Dieselbe zeitliche Verschiebung muss nun also auch auf die ETOT angewendet werden, um dem Flug die entsprechende Zielstartzeit mitteilen zu können. Die Rechnung hierfür sieht wie folgt aus:

$$TTOT = ETOT + (TLDT - ELDT)$$

Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Verhalten der ETOT mit dem der ELDT korrelieren muss. Inwiefern dies der Fall ist wurde in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht.

Dies sind jedoch nur Überlegungen, die erst vorrangig bei der Umsetzung des Gesamtverfahrens in ein reales System bedacht werden müssen. Zur Bestimmung der Startzeiten von Kurzstreckenflügen und der Evaluation eines zu einem festen Zeitpunkt betrachteten Verkehrsstroms reicht der Bezug auf die Ziellandezeiten völlig aus.

Algorithmus 5 $\text{bnb}(m, f, i, a, \text{currentValue}, \alpha, \beta)$

Eingabe:

Anzahl m der noch nicht eingeplanten Kurzstreckenflüge,
Array f der Kurzstreckenflüge,
Array i der freien Landezeitintervalle,
Array a mit der aktuell (Teil-)Lösung,
anfangs leeres Array r ,
 currentValue als bisherige tatsächlichen Kosten (anfangs 0),
Parameter α und β

Ausgabe: -**Ablauf:**

```
estimateValue := estimate( $f, i, \alpha, \beta$ )
total := currentValue + estimateValue
if total < currentMin then
    for  $k$  from size( $f$ )-1 downto 0 do
         $j := 0$ 
         $[l, r] := i[j]$ 
        // Bestimme nächstes Intervall des aktuellen Fluges:
        while  $r < \text{eldt}(f[k])$  do
             $j++$ 
             $[l, r] := i[j]$ 
        endwhile
        // Weise Ziellandezeit zu:
        if  $\text{eldt}(f[k]) < l$  then
             $\text{tldt} := l$ 
        else
             $\text{tldt} := \text{eldt}(f[k])$ 
        endif
         $a[\text{index}(f[k])] := \text{tldt}$  // Speichere Teillösung
         $\text{realValue} := \text{real}(f[k], \text{tldt}, \alpha, \beta)$ 
         $\text{value} := \text{currentValue} + \text{realValue}$ 
        if  $m == 0$  then // an einem Blatt:
            if currentMin < value then
                currentMin := value
                results.prepend( $a$ ) // Speichere Lösung
                value := heuristic
            endif
        else // an einem Knoten:
             $f.\text{remove}(k)$ 
             $i.\text{reduceBy}([\text{tldt} - \delta, \text{tldt} + \delta])$  // reduziere Intervall
             $\text{bnb}(m-1, f, i, a, \text{value}, \alpha, \beta)$ 
        endif
    endfor
endif
return
```

5 Evaluation

5.1 Eine praktische Anwendung

Das in Kapitel 3 beschriebene Problem stellt ein abstrahiertes Abbild realer Gegebenheiten dar. Die zur Lösung des Problems verwendeten Verfahren wurden in Kapitel 4 vorgestellt und es gilt nun eine Anwendung dieser Verfahren auf einer realen Situation durchzuführen. Mit Hilfe dieser Umsetzung soll so für ein tatsächlich existierendes Problem letztendlich eine praktisch umsetzbare Lösung aufgezeigt werden können.

Die Anforderungen an ein in der Praxis funktionierendes System sind jedoch weitaus höher, als die bisherige Abstrahierung des Problems erkennen lässt. So gilt es zusätzlich zu den bekannten Aufgaben der Auswahl, Anwendung und Auswertung von Algorithmen auch das Format, die Qualität und Aussagekraft der Eingangsinformationen zu beachten. Diese müssen speziell bezüglich der oben genannten Merkmale analysiert, bewertet und für Zwecke der Weiterverwendung in ein einheitliches Format konvertiert werden. Erst anschließend ist es möglich, basierend auf diesen Daten und im Hinblick auf deren Aussagekraft mittels Anwendung der implementierten Verfahren auch verwendbare Informationen zu erhalten. Die so gewonnenen Daten gilt es im Anschluß schließlich zu interpretieren und analysieren, so dass die Auswirkungen jeglicher vorgenommener Eingriffe auch auf diese zurückgeführt werden können.

Eine zu diesem Zweck entwickelte Anwendung enthält eine Implementation des aufgezeigten First-Come-First-Served-Algorithmus, sowie eine Umsetzung des zuvor geschilderten Branch-and-Bound-Verfahrens. Auch das Einlesen der Rohdaten, sowie deren Aufbereitung für die weitere Verwendung wurde in den Funktionsumfang dieser Anwendung aufgenommen. Neben der Ausgabe eines Lösungsvorschlags für die entsprechenden abflugbereiten Flüge ist das Programm zudem in der Lage, während der Laufzeit Informationen zur weiteren Auswertungen und Datenanalyse auszugeben. Mit Hilfe dieser entwickelten Software werden im Folgenden die Algorithmen praktisch angewendet sowie die erzeugten Ergebnisse aufgezeigt.

In diesem Kapitel wird nun anhand realer, aufgezeichneter Daten eine Untersuchung durchgeführt, inwiefern das Eingreifen in den Verkehrsfluss mittels der aufgezeigten Verfahren die Situation im Hinblick auf die Messgrößen verbessern könnte. Hierfür werden vorerst die Eingangsdaten analysiert, anschließend die notwendigen Parameter zur Durchführung der Berechnungen bestimmt und schließlich die Verfahren angewendet. Die Ergebnisse werden dargestellt und interpretiert, so dass bezüglich der Qualität und weiteren Verwendbarkeit der Ergebnisse sinnvolle Aussagen gemacht werden können.

5.2 Datengrundlage

Die im folgenden anschließenden Untersuchungen basieren auf Datengrundlagen, welche dem sogenannten *Local Decision Support System* (LDSS) der DFS entspringen. Hierbei handelt es sich um einen Informationspool bezüglich verkehrstechnischer Ereignisse und Eigenschaften von kontrollierten Flügen die in einem relevanten Zusammenhang zu einem Flughafen stehen. Im gemeinsamen Interesse der Betreiber wurde 1999 die Entscheidung getroffen, ein solches System zu realisieren, um auch kollaborative Innovationsarbeit auf einer gemeinsamen Datenbasis zu fördern.

Das LDSS-System basiert im wesentlichen auf dem Datenbanksystem STANLY (*Statistics and Analysis System*) der Deutschen Flugsicherung (DFS), welches bereits einen Großteil der Daten bereithält. Doch auch Informationen aus dem Lufthansa-System, sowie dem FRAPORT-Informationssystem werden in diesem Datenpool zusammengeführt. So werden für statistische Zwecke und andere Untersuchungen Daten über jede Flughafen-relevante Flugbewegungen und weitere wichtige Ereignisse gesammelt, wie zum Beispiel Start- und Landezeiten, benutzter Stellplatz und Start- oder Landebahn, aber auch Informationen zu geplanten oder gar erwarteten Zeiten, wie etwa der geplanten Startzeit am Abflugort oder beispielsweise der erwarteten Ankunftszeit am Zielflughafen sind dem System entnehmbar.

Bei den zugrunde liegenden Daten dieses Systems, welches sich nun schon seit einigen Jahren in Betrieb befindet, handelt es sich um regelmäßige Aufzeichnungen zu Fluginformationen von sämtlichem so erfassten Verkehr über den gesamten Zeitraum seit der Inbetriebnahme hinweg. Die Daten werden hierbei in regelmäßigen Abständen von jeweils fünf Minuten in Datenbanksystemen manifestiert, um später für statistische Auswertungen und andere Untersuchungen verfügbar zu sein. Zu einem jeden solchen Zeitpunkt können somit bezüglich eines Fluges Informationen zu dessen bisherigen Ereigniszeiten, geplanten Zeiten, sowie den erwarteten Zeiten und einigen weiteren Attributen wie Flugzeugtyp, Rufzeichen und einigen anderen, abgerufen werden.

5.2.1 Verfügbare und verwendete Daten

Für die nachfolgend anstehenden Untersuchungen, und natürlich auch für viele Analysen anderer Nutzer des Systems, steht somit eine große Menge an Informationen zur Verfügung. Selbstverständlich wurde für die Arbeit aus der grundsätzlich verfügbaren Menge an Daten eine bestimmte Auswahl getroffen, um den Aufwand und Datenumfang bezüglich der Analyse einzuschränken. Zur Verfügung standen insgesamt drei unterschiedliche Tagesdatensätze aus dem LDSS-System, die aufgezeichnete Informationen eines jeweils vollen Tages bezüglich des gesamten kontrollierten Verkehrs in Frankfurt am Main enthalten. Die Datensätze wurden im Vorfeld auf ihre Eigenschaften hinsichtlich der Datenqualität und Zuverlässigkeit untersucht und anschließend für die Anwendung der Verfahren erneut eine engere Auswahl getroffen. Die Berechnungen und Evaluierungen in dieser Arbeit basieren so auf einem einzelnen Tagesdatensatz, der

für die später angestellten Untersuchungen anhand der vorgestellten Lösungsverfahren die beste Datengrundlage bietet.

Auf diese bezüglich der Datenqualität durchgeführte Untersuchung wird im Folgenden etwas näher eingegangen: Die drei ursprünglich verfügbaren, aufgezeichneten Datensätze enthalten jeweils Daten von Tagen aus dem Jahr 2005, bzw. den Monaten April, Oktober und November. Hierbei herrschten an jedem dieser Tage unterschiedliche Voraussetzungen, was sowohl das Wetter als auch die Auslastung des Flughafens betrifft und sich somit auch auf die geplanten Flüge an diesen Tagen auswirkt. So führt beispielsweise ein von Schneestürmen geprägter Wintertag zu Streichungen von Flügen und somit weniger aufgezeichneten Informationen. Ein solcher Tag wäre zudem kaum repräsentativ, was die ermittelten Ergebnisse anbelangt.

Ein einzelner Tagesatz besteht grundsätzlich aus mehreren Dateien, in denen jeweils für einen Zeitabschnitt von fünf Minuten die zuletzt aktuellen Daten bezüglich der Fluginformationen aller relevanten Flüge enthalten sind. Insgesamt wird ein vollständiger Tag somit anhand von 288 Dateien beschrieben.

Eine einzelne Datei enthält, wie bereits erwähnt, Informationen aller Flüge von oder nach Frankfurt, sobald ein solcher von den die Daten einspeisenden Systemen erfasst wird, bzw. den Systemen sein Flugplan bekannt ist und der Flug zeitnah stattfinden soll.

So ist auch jedem Flug, der mit Ziel Frankfurt stattfindet, vor der eigentlichen Landung eine prognostizierte Landezeit, also eine ELDT zu entnehmen, auf der die grundlegenden Berechnungen der beschriebenen Lösungsverfahren basieren.

5.2.2 Ungenauigkeiten

Während die Aktualität der aufgezeichneten Daten von den 5-Minuten-Intervallen abhängt, werden die enthaltenen Ereigniszeiten hingegen auf die Minute genau angegeben. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass auch die Daten bezüglich eines einzelnen Attributes mehreren Quellen entspringen können, so dass stets seitens des Systems nach einem festgelegten Regelwerk und vor der eigentlichen Speicherung der Daten entschieden wird, welcher Quelle nun die höchste Priorität eingeräumt wird. Über die tatsächliche Ungenauigkeit der Zeitangaben zu bereits stattgefundenen Ereignissen lässt sich daher auf den ersten Blick nichts genaueres aussagen und eine detailliertere Betrachtung ist an dieser Stelle auch nicht angebracht.

Anders gestaltet sich die Situation, wenn man die Aussagen bezüglich der erwarteten Ereignisse eines Fluges betrachtet, d.h. zum Beispiel die erwartete Landezeit ELDT. Hier ist es sehr im Interesse dieser Arbeit, eine Aussage über die Genauigkeit der erwarteten, also der vorhergesagten Zeiten zu erhalten. Dabei handelt es sich natürlich nicht um unmittelbare Messungen, deren Ungenauigkeit eine Rolle spielen, sondern die vorausliegenden Zeitangaben werden gemäß bestimmter Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Entfernung und Geschwindigkeit, geschätzt. Die Beurteilung der Qualität einer einzelnen geschätzten Zeit kann

demnach ausschließlich nachträglich durch einen unmittelbaren Vergleich zum tatsächlich Zeitpunkt des eingetretenen Ereignisses festgestellt werden.

Im Folgenden wird eine Analyse vorgestellt, die vorhandene Ungenauigkeiten bezüglich der Zeitangaben zukünftiger Ereignisse aufzeigt. Aufgrund der eingeschränkten Relevanz solcher Ungenauigkeiten beschränkt sich die Analyse auf die erwarteten Landezeiten, also die ELDT aller Flüge nach Frankfurt. Die Genauigkeit dieser Zeitangaben ist allerdings von bedeutendem Interesse, da hierauf letztendlich auch die Annahmen der Restflugzeit der Algorithmen beruhen.

5.2.3 Analyse der erwarteten Landezeiten

Um eine qualitative Aussage bezüglich der verfügbaren ELDTs zu treffen, gilt es diese mit der jeweiligen, nach der Landung festgestellten, tatsächlichen Landezeit zu vergleichen. Diese wahre Landezeit wird im Folgenden auch als *actual landing time* (ALDT) bezeichnet. Für einen solchen Vergleich wurde für jeden Flug nach Frankfurt die jeweils erst nach der jeweiligen Landung ermittelbare tatsächliche Landezeit den aufgezeichneten Daten entnommen und den ELDTs gegenübergestellt. Dies fand für jede verfügbare Angabe einer ELDT zu einem Flug bis hin zur Landung desselben statt.

Betrachtet man nun für alle ankommenden Flüge eines Tages den Unterschied der erwarteten zur wahren Landezeit in Abhängigkeit zur tatsächlichen Restflugzeit, so ergibt sich eine Grafik wie sie in Abbildung 5.1 dargestellt ist. Die hier angezeigte Verteilung der Unterschiede von ELDT zu ALDT lässt folgendes erkennen: Während im Zeitraum bis 30 Minuten vor der jeweiligen Landung alle ELDTs nur innerhalb eines verhältnismäßig engen Zeitintervalls vom tatsächlichen Landezeitpunkt abweichen, zeigt sich in den Zeitabschnitten davor, d.h. bei mehr als 30 Minuten vor der eigentlichen Landung, eine sehr viel breitere Streuung. Zusätzlich ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmendem Abstand zum Landezeitpunkt die Größe der angezeigten Datenmenge abnimmt.

Die Abnahme der Datenmenge ergibt sich dadurch, dass die Anzahl der verfügbaren Flugdaten, denen überhaupt eine ELDT entnommen werden kann, unmittelbar vor der Landung um ein Vielfaches höher ist als beispielsweise eine Stunde vor dem Landungszeitpunkt. Diese Zunahme der verfügbaren ELDTs mit geringer werdendem zeitlichen Abstand zur Landung lässt sich auf folgende Weise erklären:

Einerseits ist der Effekt auf das Hinzukommen jener Kontinentalflügen zurückzuführen, deren Abflugort derart nahe am Zielflughafen liegt, dass die verhältnismäßig kurze Flugdauer zu einer relativ späten Radarerfassung führt. So liegt beispielsweise der Flughafen Zürich nur knapp 40 Flugminuten von Frankfurt entfernt, und die erst im Flug verfügbaren ELDT werden somit frühestens 40 Minuten vor der jeweiligen Landung der Flüge angegeben. Zum anderen kommt es je nach Anflugrichtung zu einer unterschiedlich frühen Radarerfassung der Flüge, da die entsprechende Abdeckung der Radareinrichtungen der DFS vom Standort Frankfurt am Main aus gesehen keinesfalls konzentrisch ist.

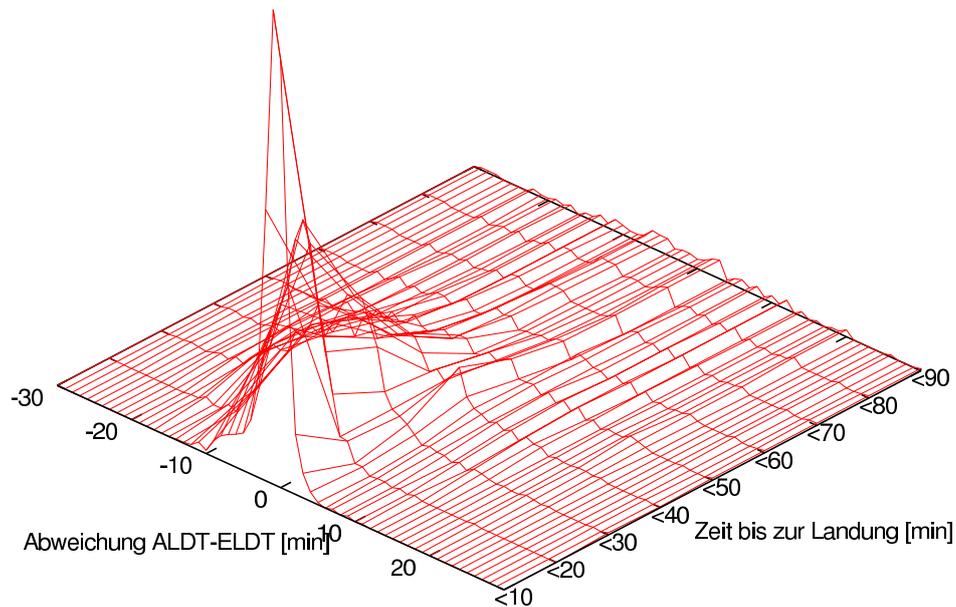


Abbildung 5.1: Vergleich der ELDT bezüglich der ALDT

Somit beginnt das Erscheinen verlässlicher ELDT frühestens etwa 50 Minuten vor der tatsächlichen Landung der Maschinen, während für die Zeit davor auf alternative Datengrundlagen zurückgegriffen werden muss. In solchen Fällen wird in den nachfolgenden Berechnungen einfach auf die SLDT der Flüge zurückgegriffen, da nach wie vor mit dem Eintreffen des Fluges an der Landebahn gemäß seiner laut Zeitplan geplanten Zeit gerechnet werden kann.

Abbildung 5.2 zeigt eine Auswahl der berechneten Annäherungen an die ermittelte Anzahl der entsprechenden Abweichungen der ELDT zur jeweiligen ALDT. Die Annäherung geschah auf Basis der Gleichung einer Gaußverteilung $g(x)$ und fand automatisiert mittels dem Programm *gnuplot* statt. Die zugrundeliegende Gauß-Funktion $g(x)$ wurde hierbei wie folgt angegeben, so dass die Standardabweichung σ und der Erwartungswert μ entsprechend der vorliegenden Verteilung angenähert werden konnte:

$$g(x) = \frac{n}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Eine Annäherung erfolgte für alle verfügbaren Unterschiede aus jeweils einem 10-Minuten-Intervall ab 90 Minuten vor der Landung. Im linken Schaubild der Abbildung 5.2 ist die Verteilung, sowie eine Annäherung an diese für die Abweichungen bis zu 10 Minuten vor der Landung angezeigt, im rechten Teil der Abbildung ist auf dieselbe Weise mit einem Bereich von 41 bis 50 Minuten vor der Landung ein deutlich früherer Zeitraum dargestellt. Deutlich erkennbar sind hier die sehr stark ausgeprägten Unterschiede hinsichtlich des Datenumfangs n sowie der Standardabweichung σ und des Erwartungswertes μ .

Zum Vergleich der Verteilung der Daten an den entsprechenden Tagen sind die

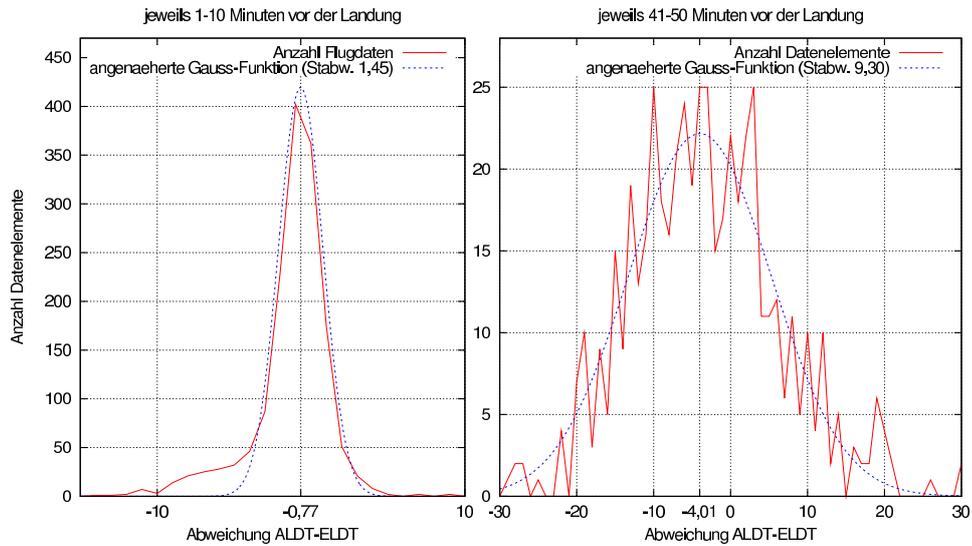


Abbildung 5.2: Annäherung einer Normalverteilung an die jeweiligen ELDT-Abweichungen

Daten der verfügbaren Tagessätze analysiert worden und in Tabelle 5.1 angegeben. Dabei zeigen sich neben der unterschiedlichen Ausprägung der Standardabweichung σ der Verteilungen auch ein deutlicher Unterschied bezüglich der Entwicklung des Erwartungswertes im Verlauf eines Fluges bis zur Landung. Dies lässt auf weitere Abhängigkeiten der Werte schließen, die hier jedoch nur vermutet werden können. So zählen zu den relevanten Einflüssen auf die Flugbedingungen neben dem Wetter beispielsweise auch die jeweils gewählte Abflugroute und vor allem die Anflugroute am entsprechenden Flughafen, was die Schätzungen der Landezeit eventuell zusätzlich beeinflussen kann.

Aufgrund der erkennbaren Eigenschaften der verfügbaren Daten wurde eine engere Auswahl der Daten für weitere Untersuchungen getroffen. Die im Folgenden durchgeführten Analysen unter Verwendung der Lösungsverfahren beziehen sich daher alle auf einen einzelnen, im Besonderen auf den in Tabelle 5.1 dargestellten Tag 2. Die Auswahl ist zum einen mit der vergleichsweise hohen Verfügbarkeit von erwarteten Landezeiten auch zu Zeitpunkten lange vor der Landung begründet. Auf der anderen Seite ergeben sich für die Standardabweichung σ und den Erwartungswert μ dadurch verhältnismäßig stabile Werte, wohingegen die Parameter einer Normalverteilung bei sehr viel geringeren Stichprobengrößen schnell zu wenig repräsentativen Ergebnissen führen kann, wie es vermutlich bei den Tagen 1 und 3 in Tabelle 5.1 der Fall ist.

5.3 Erwartungen

Die Aufgabe der Lösungsbewertung gestaltet sich im Hinblick auf die Qualität der Daten denkbar schwierig. So soll anhand der gegebenen Daten, deren

Rest- Flugzeit	Tag 1			Tag 2			Tag 3		
	n	σ	μ	n	σ	μ	n	σ	μ
1 - 10	1537	1,87	-0,36	1522	1,45	-0,77	1356	1,62	-1,14
11 - 20	1400	4,44	-4,39	1386	3,08	-4,41	1235	3,58	1,43
21 - 30	1330	6,11	-5,57	1258	5,23	-5,71	1182	4,55	2,59
31 - 40	979	7,86	-5,71	889	7,67	-5,88	887	6,64	2,00
41 - 50	526	10,48	0,63	525	9,30	-4,01	437	8,39	-1,10
51 - 60	248	13,67	6,67	351	9,66	-3,13	137	9,10	-7,68
61 - 70	138	19,98	11,82	295	9,19	-2,66	50	9,64	-11,04
71 - 80	90	21,15	2,12	283	9,45	-2,71	26	8,57	-10,43
81 - 90	66	8,55	-7,07	280	9,65	-2,47	21	14,16	-12,90

Tabelle 5.1: Verteilungswerte der ELDT gegenüber der ALDT mit Datenumfang n , Standardabweichung σ und Erwartungswert μ einer angepassten Normalverteilung

Unsicherheit soeben aufgezeigt wurde, ein Vorschlag für Startzeiten von Kurzstreckenflüge berechnet werden, so dass diese inmitten des restlichen Verkehrs just zu solchen Zeiten ankommen, zu denen möglichst wenig Sequenzierungsmaßnahmen notwendig sind. Im Hinblick auf die Unsicherheit mit der eine Situation tatsächlich so eintritt wie sie geplant wurde, erscheint es bei einmaliger Betrachtung sehr unwahrscheinlich, dass durch solche Eingriffe überhaupt ein positiver Effekt erzielt werden kann. Dies zeigt einmal mehr wie wichtig die Betrachtung der Robustheit einer Lösung ist. So wird unter Hinzunahme der Parameter der ermittelten Normalverteilungen die Unsicherheit mit berücksichtigt und deren Einfluss auf eine Lösung bedacht. Nur durch das sehr häufig wiederholte Verrauschen und Untersuchen der so gewonnenen Einzelszenarien wird der langfristige Effekt dargestellt, den die Eingriffe in einer realistischen Umgebung bewirken können. Auf diese Weise wird letztendlich verdeutlicht, ob und wie die geplanten Eingriffe die Effizienz steigern können.

In Anbetracht der geschilderten Qualität der hier untersuchten Daten, insbesondere im Hinblick auf die Aussagekraft der erwarteten Landezeiten, stellt sich somit die Frage, ob ein Algorithmus dennoch in der Lage sein kann, Ergebnisse zu liefern, die in der Realität eine sinnvolle Verwendung finden. Prinzipiell lässt sich natürlich erst im Anschluß an die Auswertung der Ergebnisse eindeutig beantworten, ob eine Effizienzsteigerung erzielt werden kann. Doch die Erwartungen an ein optimierendes Verfahren sind nicht gering, wenn vor Augen geführt wird, welchen Einfluss eine Verschiebung der Kurzstreckenflüge haben kann.

Dass ein Effekt erzielt werden wird ist offensichtlich. Es wird zudem erwartet, dass zumindest im Hinblick auf einzelne Messgrößen Effizienzsteigerungen erzielt werden können. Ob die Effekte jedoch nun auch im Hinblick auf den gesamten Verkehrsfluss eine Effizienzsteigerung bedeuten, sei vorerst dahingestellt.

5.4 Vorbereitungen

5.4.1 Bestimmung relevanter Parameter

Im vorangehenden Kapitel wurde aufgezeigt, welche Parameter ein Verfahren entgegennimmt, um entsprechend dieser eine Lösung zu bestimmen. Diese Parameter, oder auch Variablen, werden an dieser Stelle erneut zusammengefasst, um einen Überblick über die insgesamt möglichen Einstellungen zur Lösung eines Problems zu erhalten. Tabelle 5.2 enthält eine Liste der zu beachtenden Parameter, die sowohl Einstellungen der Algorithmen betreffen, als auch allgemeingültige Variablen setzen.

Parameter	Beschreibung/Stichwort	Wertebereich	Einheit
c	Landekapazität	$0, ..100 \in \mathbb{N}$	<i>Flüge/h</i>
$range$	Größe des betrachteten Zeitraums	$30, .., 150 \in \mathbb{N}$	<i>min</i>
n	Anzahl Verrauschungssiterationen	$6, .., 6000 \in \mathbb{N}$	<i>Iterationen</i>
$runtime$	maximale Laufzeit des BnB	$1, .., 300 \in \mathbb{N}$	<i>s</i>
max	max. Anzahl Lösungen des BnB	$10, .. \in \mathbb{N}$	<i>Lösungen</i>
α	Pünktlichkeitsoptimierung in BnB	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
β	Opt. der Flugverzögerung in BnB	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
γ	Gewichtung der Robustheit	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
ϕ	Gewichtung des Nutzens	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
u	Pünktlichkeit im Nutzen	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
v	Flugverzögerung im Nutzen	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>
w	Flugzeitverkürzung im Nutzen	$0, .., 1 \in \mathbb{R}$	<i>Anteil</i>

Tabelle 5.2: Auflistung der relevanten Parameter

Bei der Anwendung der Verfahren auf ein reales Problem müssen nun neben den Variablen der Verfahren, bzw. Algorithmen selbst, weitere, allgemeingültige Einschränkungen, bzw. Festlegungen erfolgen, die daher vorrangig behandelt werden sollen:

Hierzu zählt unter anderem der betrachtete Zeitraum, innerhalb dem die Untersuchungen und Planungen des Anflugverkehrs stattfinden sollen. Diese Variable soll im Folgenden die Bezeichnung *range* besitzen. Wie leicht nachvollziehbar ist, geht mit einer Einschränkung des Zeitraums auch eine Einschränkung der Menge der zu betrachtenden Kurzstreckenflüge sowie der Menge des Restverkehrs einher. Der sinnvoll verwendbare Zeitraum ist einerseits bereits wegen der erst mittelfristig, d.h. frühestens 4 Stunden vor Flugbeginn verfügbaren ELDTs der Kurzstreckenflüge eingeschränkt. Andererseits macht es auch Sinn, den Zeitraum nicht allzu groß zu wählen, um nicht allzuweit im Voraus für Kurzstreckenflüge Ziellandezeiten berechnen zu müssen, die ohnehin erst kurz vor dem Start Verwendung finden. Zudem wirkt sich ein kleinerer betrachteter Zeitraum wegen der wahrscheinlich geringeren Anzahl Kurzstreckenflüge positiv auf die Laufzeit der Verfahren aus. Die letztendlich gewählte Größe des Zeit-

raums ist jedoch vorerst nicht starr festgelegt und wird für die später folgende Anwendung der Verfahren auf das Problem als Parameter mit angegeben.

Ein weiterer nicht festgelegter Einflussfaktor ist die Landekapazität c des Ziel-flughafens. Im Unterschied zur Größe des Zeitraums wirkt sich dieser Parameter unmittelbar auf die Ergebnisse selbst aus, so dass diesem Wert eine ungleich größere Bedeutung zukommt. Die Landekapazität wird daher bei der späteren Anwendung ebenso genauer betrachtet und entsprechend evaluiert. Auch wenn in Tabelle 5.2 ein Wertebereich von 10 bis 100 Flügen je Stunde angegeben ist, so ist es doch wichtig, einen realistischen Wert für den entsprechenden Flughafen, hier Frankfurt am Main, zu wählen. Insofern kommen wohl am ehesten Werte zwischen 40 und 50 Flügen je Stunde in Frage.

Das First-Come-First-Served-Verfahren zur Erstellung einer Abbildung von der Menge der Kurzstreckenflüge auf die Menge der freien Landezeiten bedarf keiner weiteren Parameter, somit fällt hier eine nähere Betrachtung diesbezüglich weg. Das Branch-and-Bound-Verfahren hingegen lässt sich anhand verschiedener Einstellungen für eine entsprechende Lösungsfindung konfigurieren, so dass hier mehrere relevante Parameter angegeben werden können, die sich wie folgt darstellen:

Mittels einem Parameter *runtime* kann eine maximale Laufzeit des Algorithmus angegeben werden, so dass nach Überschreiten dieser Zeitdauer ein Abbruch der weiteren Suche nach einer optimalen Lösung stattfindet und nur die bisher betrachteten Lösungen zurückgegeben werden. Die Existenz dieses Parameters dient dem frühzeitigen Abbruch des BnB-Verfahrens, falls die durch das Verfahren bedingte Laufzeit die angegebene Zeitspanne übersteigen sollte. Da für eine Berechnung eines Vorschlags bis zur Aktualität des nächsten Datensatzes eine Dauer von 5 Minuten existiert, ist eine maximale Laufzeit zumindest knapp unterhalb dieser Zeitspanne angebracht. Eine Zeitspanne von 30 Sekunden wurde für die meisten Fälle sogar als ausreichend lange betrachtet, da aufgrund der oftmals nur geringen Anzahl Kurzstreckenflüge innerhalb eines festen Zeitraums der BnB-Algorithmus verhältnismäßig schnell terminiert. Bei unter 10 Flügen geschieht dies in der Regel bereits nach wenigen Sekunden, wobei die Menge der Flüge wiederum von der Größe des betrachteten Zeitraums abhängt.

Anzumerken ist hier auch, dass die nach dem BnB-Verfahren anschließende Untersuchung der Menge von Lösungskandidaten mit der Evaluierung einer Lösung hinsichtlich der Robustheit und des Nutzens ebenso eine gewisse Zeit benötigt und deshalb auch hierfür eine gewisse Dauer eingeplant werden muss.

Mittels dem Parameter *max* lässt sich die maximale Anzahl der vom BnB-Algorithmus zurückgegebenen Lösungen bestimmen, so dass damit die Menge der hinsichtlich des Nutzens und der Robustheit zu untersuchenden Lösungskandidaten eingeschränkt werden kann. Dabei bleiben jedoch stets die bezüglich der Bewertung durch das BnB-Verfahren besseren Lösungen in der Menge der Lösungskandidaten erhalten.

Die Parameter α und β bestimmen die Gewichtung einer Optimierung bezüglich der Pünktlichkeit, bzw. einer Optimierung zugunsten der Flugverzögerung

innerhalb des Branch-and-Bound-Verfahrens. Da α und β in der Summe stets 1 ergeben, ergibt sich der eine Wert aus dem anderen, also gilt $\beta = 1 - \alpha$ und umgekehrt.

Werden nun höchstens *max* Lösungen vom BnB-Verfahren zurückgegeben, so werden diese hinsichtlich der Robustheit sowie des Nutzens bewertet. Inwiefern die endgültige Bewertung hierbei von der Robustheit abhängt, wird vom gewichtenden Parameter γ angegeben. Die Gewichtung des Nutzens ϕ ergibt sich somit als $\phi = 1 - \gamma$ genauso wie umgekehrt.

Der Nutzen lässt sich im Hinblick auf die Auswahl einer optimalen Lösung genauer betrachten: Die Parameter u , v und w geben dabei an, zu welchem Verhältnis sich der Nutzen aus den Größen Pünktlichkeit, Flugverzögerung und Flugzeitverkürzung zusammensetzt. Es gilt erneut, dass die Summe der Parameter stets 1 ergibt, so dass sich der jeweils dritte Parameter aus den Werten der beiden anderen bestimmen lässt.

5.4.2 Festlegung der Parameter

Bevor schließlich die Ergebnisse der Anwendung der Verfahren auf das reale Problem aufgeführt werden können, gilt es die Parameter auf gewisse Werte festzulegen, bzw. mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Belegungen zu untersuchen. Da nicht alle möglichen Einstellungen untersucht werden können – es ergibt sich bereits aufgrund der Kontinuität einiger Wertebereiche eine beliebig große Menge möglicher Einstellungen – wird im Folgenden eine Festlegung auf gewisse zu untersuchende Parameterwerte durchgeführt und begründet.

Im Vorfeld der Belegung weiterer Parameter soll der Blick zuerst auf die notwendige Anzahl der Iterationen zur Verrauschung und anschließender Sequenzierung eines Szenarios gerichtet werden. Hierzu fand eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der verrauschten Szenarios statt, von denen eine repräsentative Auswertung in Abbildung 5.3 dargestellt ist. Die Variablen der zur Verrauschung verwendeten Normalverteilung beruhen auf der Qualitätsanalyse der Eingangsdaten und soll somit möglichst realistische Zufallsszenarien erzeugen.

Restflugzeit	Standardabweichung	Erwartungswert
1 - 10	1,5	-0,1
11 - 20	3,1	-4,4
21 - 30	5,2	-5,7
31 - 40	7,7	-5,9
41 - 50	9,3	-4,0
51 - 60	9,7	-3,1
61 - ...	9,2	-2,7

Tabelle 5.3: gewählte Werte für die Normalverteilung zur Verrauschung

Die verwendeten Werte sind in Tabelle 5.3 angezeigt. Sie wurden auf eine Dezimalstelle nach dem Komma gerundet und für Zeitpunkte die mehr als 70

Minuten vor der Landung liegen wurde die Standardabweichung, bzw. der Erwartungswert der Flüge im Zeitraum 61 bis 70 Minuten vor der Landung gewählt.

Es wurde zum einen bezüglich der Pünktlichkeit und zum anderen bezüglich der Startzeitverschiebung die Werte mehrerer verrauschter und unverrauschter Lösungen miteinander verglichen und anschließend die Standardabweichung über der Menge sich ergebender Werte ermittelt. Das Ergebnis, wie es in Abbildung 5.3 dargestellt ist, lässt erkennen, dass sich die Standardabweichung mit zunehmender Verrauschung einem positiven Wert annähert, der voraussichtlich kleiner als der bei maximaler angewandter Verrauschung erhaltene Wert ist. Um den Aufwand der Verrauschung einer Lösung für die folgenden Untersuchungen in einem solchen Zeitrahmen ausführen zu können, so dass sowohl die Bestimmung der Menge von Lösungen als auch deren Betrachtung bezüglich der Robustheit und des Nutzens möglichst innerhalb des zuvor genannten 5-Minuten-Zeitraums geschehen kann, wurde für die folgenden Untersuchungen die Anzahl der Iterationen auf 500 festgelegt. Dieser Wert weist für diese Zwecke eine als ausreichend groß betrachtete Verrauschungsanzahl auf, wie auch den Grafiken in Abbildung entnommen werden kann.

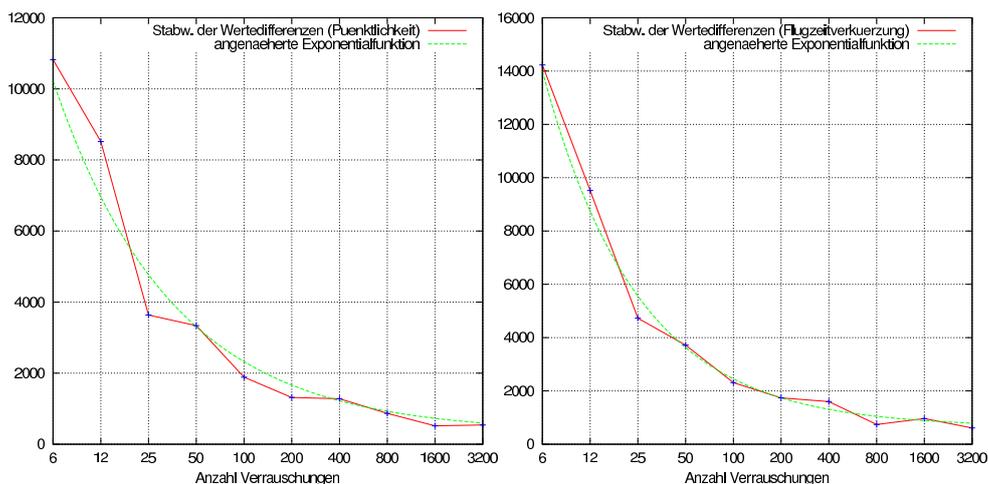


Abbildung 5.3: Verhalten von Wertedifferenzen verrauschter und unverrauschter Lösungen bzgl. der Pünktlichkeit und der Flugzeitverkürzung

Die Wahl der Ausprägung des Parameters *runtime* erfolgte fest auf 30 Sekunden, da, wie bereits erwähnt, für den Großteil der Szenarien diese Zeitspanne zur Bestimmung der theoretisch optimalen Lösung ausreicht, und auf diese Art zudem unter Berücksichtigung der anschließenden Verfahren zur Auswahl einer Lösung noch zeitnah ein Lösungsvorschlag erstellt werden kann.

Der Parameter *max* wurde auf den Wert 20 gesetzt, um damit die Anzahl der gewählten Lösungskandidaten noch oben zu beschränken. Somit findet auch zusätzlich eine Begrenzung der Gesamtlaufzeit der Lösungsbestimmung statt,

Parameter	Bezeichner	Wert
c	Landekapazität	40 / 42
$range$	Größe des betrachteten Zeitraums	60 / 90
n	Anzahl Verrauschungsiterationen	500
$runtime$	maximale Laufzeit des BnB	30 s
max	max. Anzahl Lösungen des BnB	20
α	Pünktlichkeitsoptimierung in BnB	0 / 0,25 / 0,5 / 0,75 / 1
β	Opt. der Flugverzögerung in BnB	1 / 0,75 / 0,5 / 0,25 / 0
γ	Gewichtung der Robustheit	0,5
ϕ	Gewichtung des Nutzens	0,5
u	Pünktlichkeit im Nutzen	1,0
v	Flugverzögerung im Nutzen	0,0
w	Flugzeitverkürzung im Nutzen	0,0

Tabelle 5.4: Wertebelegungen der Parameter

so dass eine Lösung weiterhin zeitnah gefunden wird.

Die restlichen Parameter wurden anhand verschiedener Wertebelegungen auf ihre Auswirkungen hin untersucht und entsprechende Ergebnisse bestimmt. Um den Umfang der hier aufgeführten Evaluation verhältnismäßig gering zu halten, werden die Parameter für die nachfolgenden Untersuchungen so gewählt, wie sie in Tabelle 5.4 aufgeführt sind: Die Gewichtung der Robustheit einer Lösung gegenüber ihrem Nutzen erfolgte hierbei zum jeweils gleichen Anteil. Zudem wurde der Nutzen ausschließlich auf der Pünktlichkeit basierend bewertet, da die Flugverzögerung sowie die Flugzeitverkürzung bereits durch das Branch-and-Bound-Verfahren, bzw. die Art der Lösungserstellung maßgeblich zur Konstruktion einer Lösung beitragen.

5.5 Ergebnisse

Die Betrachtung des in den Daten enthaltenen, aufgezeichneten Anflugverkehrs über den gesamten Tag hinweg zeigt sich in Abbildung 5.4. Deutlich erkennbar ist die typische Ausprägung der Gesamtverkehrsmenge über den Tagesverlauf hinweg. So finden zu den vier geschäftigeren Hauptverkehrszeiten deutlich mehr Anflüge auf Frankfurt statt als in den Zeiten dazwischen. Außerdem kann der Abbildung deutlich das Verhältnis der Kurzstreckenflüge zum Gesamtverkehr entnommen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Menge der Kurzstreckenflüge nur bedingt durch die Wahl eines größeren Zeitfensters als 60 Minuten eine Anzahl von 10 Flügen erreichen oder übersteigen kann. Mit der relativ geringen Menge zu betrachtender Flüge kann somit auch bei Verwendung des Branch-and-Bound-Verfahrens mit einer zeitnahen Bestimmung einer optimalen Lösung gerechnet werden.

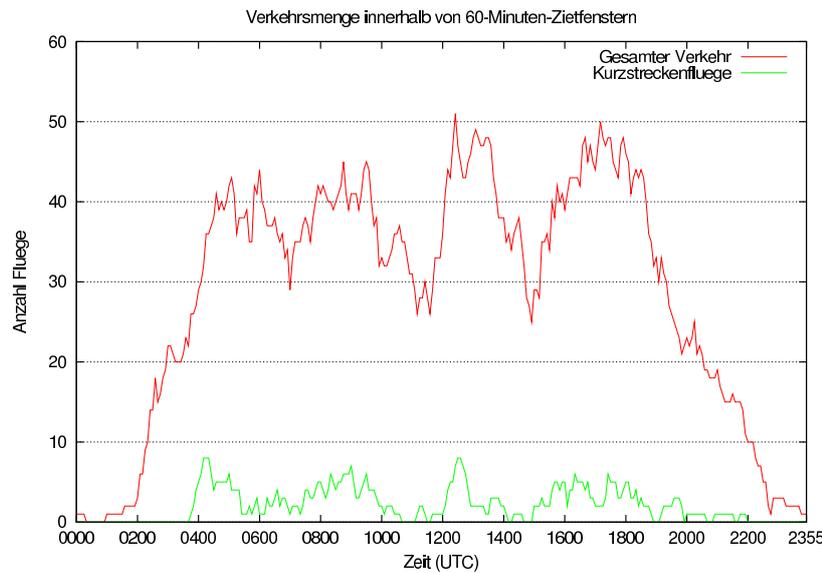


Abbildung 5.4: Verkehrsmengen im Tagesverlauf

5.5.1 Ergebnisse mit unterschiedlicher Optimierung

Um nun zuerst die Belegung der Parameter des Branch-and-Bound-Verfahrens bestimmen zu können, seien die Werte der Parameter c und $range$ auf einen fixen Wert festgelegt. Für die im folgenden dargestellten Ergebnisse ist somit von einer aktuellen Landekapazität von 40 Flügen je Stunde sowie einer Betrachtung des Zeitraums bis 60 Minuten vor der Landung ausgegangen worden. Die Werte der Parameter α und β zur Gewichtung der Pünktlichkeit, bzw. der Flugverzögerung während der Optimierung wurden wie in Tabelle 5.4 angegeben variiert und der Effekt hinsichtlich der Messgrößen Pünktlichkeit und Flugzeitverkürzung bezüglich des gesamten Verkehrs sowie über den ganzen Tag betrachtet.

Die Flugzeitverkürzung verändert sich hierbei wohlbemerkt nicht in Abhängigkeit der Verfahren oder auch der verwendeten Gewichtungparameter zur Lösungsbewertung, da sie ausschließlich die Verkürzung der Flugdauer aufgrund Einsparungen der Sequenzierungsmaßnahmen angibt. Da aber jeder Kurzstreckenflug unabhängig vom verwendeten Verfahren gleichermaßen so auf eine freie Landezeit gesetzt wird, dass theoretisch keine Sequenzierung bezüglich diesen Flügen notwendig ist, bedeutet das, dass stets die gleiche Dauer angegeben wird.

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse der beiden Parameter bezüglich der Gesamtpünktlichkeit über einen gesamten Tag zeigt sich in den Abbildungen 5.5 und 5.6. Hier ist einmal das jeweilige Szenario der optimalen Lösung unverrauscht dem entsprechenden Standardszenario gegenübergestellt worden, das andere Mal wurde das entsprechende verrauschte Szenario mit dem jeweiligen Standardszenario verglichen. Die Werte geben dabei eine prozentuale Verschlechterung der Pünktlichkeit im Vergleich zum Standardszenario an. Die Mit-

telwerte der so gemachten Vergleiche aller Szenarien eines Tages zeigen, dass der Effekt durch die Gewichtung der Parameter im Hinblick auf die Pünktlichkeit nur sehr gering ist. Eine erhöhte Gewichtung der Pünktlichkeit führt in beiden Fällen scheinbar zu einer sehr geringen Verbesserung zugunsten der Gesamtpünktlichkeit, wobei sich im Falle des verrauschten Szenarios der Effekt mit großer Pünktlichkeitsgewichtung wieder umzukehren scheint.

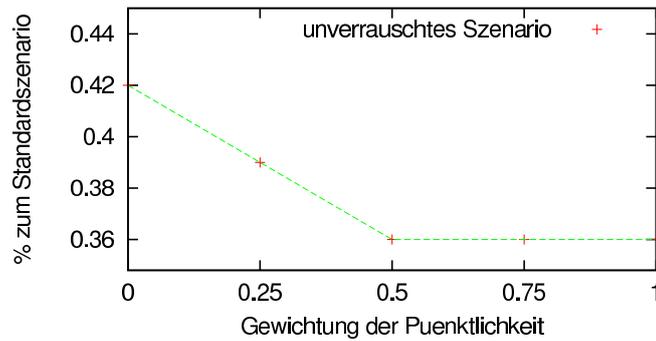


Abbildung 5.5: Gesamtpünktlichkeit des unverrauschten Szenarios im Vergleich zum Standardszenario

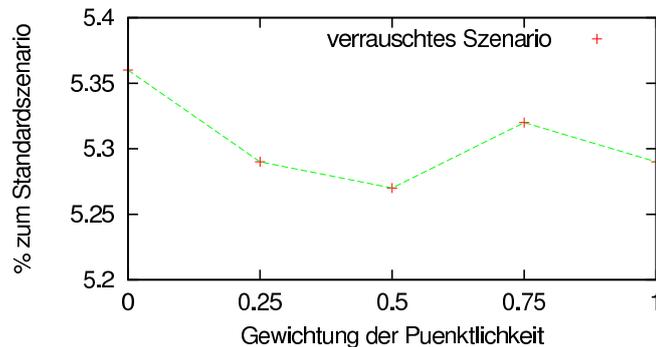


Abbildung 5.6: Gesamtpünktlichkeit des verrauschten Szenarios im Vergleich zum Standardszenario

Aufgrund der zwar geringen, aber doch nicht ganz zu leugnenden Effekte auch unter Berücksichtigung der Robustheit wurden die Parameter für die nachfolgenden Untersuchungen auf jeweils den Wert 0,5 eingestellt.

Anhand der Grafiken lässt sich zudem die Gesamtpünktlichkeit eines optimalen, sowie eines verrauschten Szenarios gegenüber dem Standardszenario ablesen, wodurch damit schon eine Aussage bezüglich des Nutzens der Verfahren im Hinblick auf diese Gesamtpünktlichkeit gemacht werden kann. Um auf diese Werte jedoch genauer einzugehen und vor allem um sie im Zusammenhang mit anderen Größen zu betrachten, bedarf es einer eingehenderen Analysen der gesamten Daten. So wird im Folgenden auf einige Einzelszenarien etwas genauer eingegangen und gezeigt, inwiefern sich die Messgrößen nach Anwendung der

Lösungsverfahren verhalten.

5.5.2 Vergleich FCFS und BnB

Im Folgenden wird nun das FCFS-Verfahren dem BnB-Verfahren gegenübergestellt und die Ergebnisse aus vier ausgewählten Datensätzen wiederum anhand der maßgebenden Messgröße Pünktlichkeit miteinander verglichen. Die hierzu gewählten Datensätze betreffen die Betrachtung der erwarteten Landezeiten der Flüge zu den Zeitpunkten wie sie in Tabelle 5.5 angegeben sind. Neben der Pünktlichkeit ist auch die Flugzeitverkürzung angegeben, die zwar aufgrund der Art der Erstellung einer Lösung stets gleich groß ist, jedoch somit den Nutzen einer Anwendung der Lösungsverfahren zusätzlich verdeutlicht. Die verwendeten Abkürzungen stehen dabei für Standardszenario (Std.), Lösungsszenario (Lsg.) sowie verrauschtes Lösungsszenario (v.Lsg.).

Messgrößen bzgl. aller Flüge in Minuten		04:10			09:00		
		Std.	Lsg.	v.Lsg.	Std.	Lsg.	v.Lsg.
Pünktlichkeit	BnB	205	204,5	245,85	1235	1212,0	1283,95
	FCFS	205	216,0	252,98	1235	1220,0	1293,16
Flugzeitverk.	BnB	0	42,5	28,73	0	69,5	45,33
	FCFS	0	42,5	27,01	0	69,5	43,12

Messgrößen bzgl. aller Flüge in Minuten		12:30			15:55		
		Std.	Lsg.	v.Lsg.	Std.	Lsg.	v.Lsg.
Pünktlichkeit	BnB	1315	1300,5	1366,50	749	742,5	817,62
	FCFS	1315	1303,5	1374,09	749	742,5	818,82
Flugzeitverk.	BnB	0	129,0	87,57	0	56,0	10,17
	FCFS	0	129,0	81,37	0	56,0	11,29

Tabelle 5.5: absoluter Vergleich des FCFS- zum BnB-Verfahren

Zur Erinnerung sei angemerkt, dass die Werte zur Pünktlichkeit Verspätungen beschreiben. Die zum Teil erheblichen Pünktlichkeitswerte sind beeinflusst durch einzelne sehr stark verspätete Flüge unter den Mittel- und Langstreckenflügen, so dass ein absoluter Vergleich der Zahlen angebracht erscheint. Die Ergebnisse des relativen Vergleichs sind in Tabelle 5.6 aufgeführt und geben jeweils die Veränderung des entsprechenden Wertes relativ zum Wert des Standardszenarios wieder, bzw. im Falle der Flugzeitverkürzung die Reduktion der möglichen Einsparungen von Flugzeit nach einer Verrauschung.

Wie in Tabelle 5.6 erkennbar ist, kann in den meisten Fällen sowohl mittels dem BnB-Verfahren als auch dem FCFS-Verfahren eine Verbesserung der Gesamtpünktlichkeit erzielt werden. Hierbei schneidet das BnB-Verfahren erwartungsgemäß besser ab, da es die Lösungen bereits im Hinblick auf die Pünktlichkeit der Kurzstreckenflüge optimiert. Es können jedoch Fälle auftreten, in denen das FCFS-Verfahren ein ebenso gutes Ergebnis liefert wie das BnB-Verfahren. Das

relativer Vergleich der Messungen (%)		04:10		09:00	
		Lsg.	v.Lsg.	Lsg.	v.Lsg.
Pünktlichkeit	BnB	-0,02	+20,0	-1,9	+3,9
	FCFS	+5,4	+23,4	-1,2	+4,7
Flugzeitverk.	BnB	-	-32,4	-	-34,8
	FCFS	-	-36,4	-	-38,0

relativer Vergleich der Messungen (%)		12:30		15:55	
		Lsg.	v.Lsg.	Lsg.	v.Lsg.
Pünktlichkeit	BnB	-1,1	+39,2	-0,9	+9,2
	FCFS	-0,9	+44,9	-0,9	+9,3
Flugzeitverk.	BnB	-	-32,1	-	-81,8
	FCFS	-	-36,9	-	-79,8

Tabelle 5.6: relativer Vergleich des FCFS- zum BnB-Verfahren

ist zum Beispiel dann möglich, wenn nur sehr wenige Kurzstreckenflüge zu verschieben sind, oder aber die Flüge beispielsweise alle gleichermaßen pünktlich sind.

Einen deutlichen Effekt ruft das Verrauschen einer Lösung hervor. Die theoretisch mögliche Effizienzsteigerung, die im Hinblick auf die Gesamtpünktlichkeit oder auch die Flugzeitverkürzung gegeben ist, findet sich beim Vergleich eines verrauschten Lösungsszenarios mit dem Standardszenario im Hinblick auf die Pünktlichkeit nicht mehr und bezüglich der Flugzeitverkürzung nur noch eingeschränkt wieder. So wird die Pünktlichkeit zwar grundsätzlich verschlechtert, die Verkürzung der Flugdauer bleibt jedoch auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten weiter nachweisbar. Dies allein zeigt schon, dass mittels der Anwendung der gezeigten Lösungsverfahren an einigen Stellen tatsächlich positive Effekte erzielt werden können, auch wenn eventuell andere Messgrößen, wie in diesem Fall die Gesamtpünktlichkeit, weniger gute Ergebnisse zeigen.

Inwiefern nun eine mögliche Verbesserung der Eingangsdaten eine Steigerung der in der Realität zu erwartenden Ergebnisse mit sich bringt, wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

5.5.3 Potenzialbestimmung

Bedenkt man die Qualität der Eingangsdaten, so besagt die Betrachtung der verrauschten Lösungsszenarien, dass selbst unter realistischen Bedingungen einige der Messgrößen einen positiven Effekt aufzeigen und somit eine Effizienzsteigerung diesbezüglich zu beobachten ist. So ist trotz der massiven Unsicherheit bezüglich des tatsächlichen Landezeitpunkts ausgehen von den erwarteten Landezeiten, ein Ergebnis zu erzielen, das in gewissen Bereichen enorme Einsparungen erreichen kann: So bedeutet bereits eine geringe tägliche Verkürzung der Gesamtflugzeit über mehrere Wochen oder Monate hinweg ein enormes Einspa-

rungspotenzial bezüglich des Treibstoffs und somit der erzeugten Schadstoffe. Inwiefern nun ein Lösungsverfahren bessere Ergebnisse erzielen kann, sei am Beispiel des Datensatzes 09:00 gezeigt. Dabei wurde die sogenannte Verrauschungsmaske, d.h. die in Tabelle 5.3 angegebenen Werte in einzelnen Schritten um jeweils 20 Prozent reduziert und stets die Werte der Messgrößen diesbezüglich ermittelt. Das Ergebnis diesbezüglich ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Während sich der relative Unterschied der verrauschten zur optimalen Lösung im Hinblick auf die Pünktlichkeit proportional zur Verbesserung der Qualität der Eingangsdaten dem Wert 0 nähert, beschreibt das Verhalten des relativen Unterschieds der Flugzeitverkürzung mit Verrauschung zur bestmöglichen Flugzeitverkürzung eine Kurve, die trotz erster Steigerung der Datenqualität erst langsam, zuletzt dann aber schneller gegen den Wert 0 geht. Dies weist auf den höheren Aufwand bezüglich einer notwendigen Qualitätssteigerung zur Erzielung deutlich besserer Ergebnisse hin. D.h. will man bezüglich der Flugzeitverkürzung nicht knapp 36 % Abstrich vom der bestmöglichen Ergebnis hinnehmen, sondern nur 50% davon, also etwa 18%, so ist mit einer Steigerung der Qualität der Eingangsdaten ein enormer Aufwand zu betreiben. Insbesondere muss hierzu die Unsicherheit der ELDT auf etwa 20% der aktuellen Unsicherheit reduziert werden.

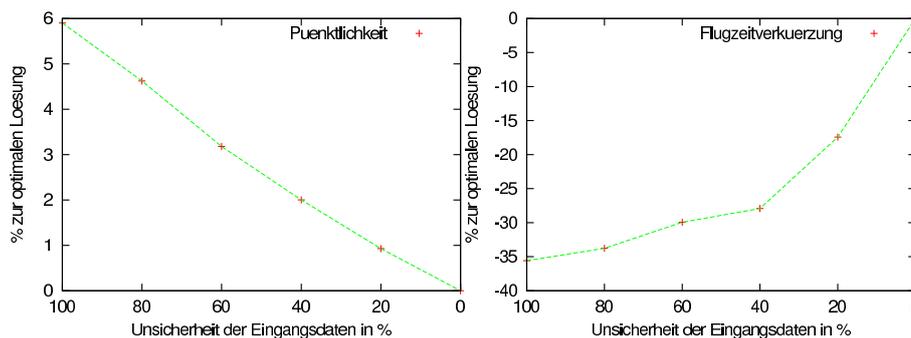


Abbildung 5.7: Verhalten relativer Messgrößen bei Qualitätssteigerung

Da gerade die Flugzeitverkürzung jedoch auch bei Berücksichtigung der Robustheit einen positiven Effekt zeigt, wie Tabelle 5.5 auf Seite 77 entnommen werden kann, dürfte eine solche Strategie weniger interessant sein. Viel größer ist das Interesse an der Verbesserung der Pünktlichkeit, bzw. Reduzierung der Verspätungen, wegen der ebenso möglichen Effizienzsteigerung diesbezüglich und der Verschlechterung der Pünktlichkeit aufgrund der Verrauschung. Hier hat die Reduzierung der Unsicherheit der Eingangsdaten jedoch eine Auswirkung proportional zur Steigerung der Pünktlichkeit bei Betrachtung der Robustheit.

5.6 Diskussion

Hinsichtlich der Evaluierung der gezeigten Ergebnisse besteht grundsätzlich die Möglichkeit, weitere Messgrößen einzuführen und an die erstellten Lösungsze-

narien anzulegen. Mögliche Größen sind beispielsweise weitere Pünktlichkeitsmessungen auf Basis anderer Messmethoden, oder auch die Bestimmung des Arbeitsaufwands für den Lotsen. Letzteres ließe sich durch die Ermittlung der vorraussichtlichen Anzahl Flüge innerhalb kleiner Zeiträume von beispielsweise 5 Minuten bestimmen, indem ab einer Überschreitung einer gewissen Menge von Flügen innerhalb eines solchen Zeitraums von einer Überlast gesprochen wird. Zählt man die so entstandenen Überlastungsfälle zusammen, so lässt sich damit wiederum ein Maß für die Notwendigkeit von Sequenzierungen angeben, was letztendlich Arbeitsaufwand für den Anfluglotsen bedeutet.

Andere Messmethoden für die Pünktlichkeit ist zum Beispiel das Zählen all jener Flüge die eine gewisse Verspätung erreicht haben. Flüge, die zwar auch zu spät sind, deren Verspätung aber nur wenige Minuten umfasst, könnten so weiterhin als pünktlich gewertet werden.

Anhand verschiedener Methoden zur Bestimmung eigener Messgrößen lassen sich möglicherweise weitere interessante Aussagen bezüglich der Evaluierung und der Ergebnisse machen. Dies soll jedoch an dieser Stelle nicht mehr erfolgen, da es über den Rahmen dieser Arbeit hinaus geht.

Prinzipiell ließe sich bezüglich der hier vollführten Zuweisung von Kurzstreckenflügen zu Startzeiten noch zu untersuchen, inwiefern sich eine solche Zuweisung über mehrere Nacheinanderausführungen des Gesamtverfahrens anhand mehrerer einzelner, aufeinander folgender Datensätze verhält. Die Frage lautet dabei, ob ein Flug mit jeder neuen Berechnung einer optimalen Startzeit nach jeweils 5 Minuten eine vollständig andere Zuweisung bekommt als zuvor, oder ob sich die Zuweisungen nur geringfügig der neuen Verkehrssituation anpassen. Dies gilt es vor einem potenziellen Einsatz in einem operativen System ganz besonders zu untersuchen.

Die hier gezeigten Verfahren und Methoden erheben zudem keinen Anspruch auf Vollkommenheit. Es sind mit Sicherheit noch mehrere Verbesserungen möglich, die eventuell sogar noch weitere Effizienzsteigerungen möglich machen. Dies betrifft jedoch nicht nur das hier gezeigte Gesamtverfahren, sondern ebenso beispielsweise die Häufigkeit der Datenzulieferung und die Datenqualität. In der Analyse der Eingangsdaten sowie der Potenzialanalyse wurde aufgezeigt, dass hier mit einer Verbesserung der Qualität durchaus Effizienzsteigerungen erwartet werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde auf die Problematik der nur selten kontinuierlichen Anflugströme und die sich dadurch ergebenden Konsequenzen an Großflughäfen eingegangen. Darauf aufbauend lässt sich das hier betrachtete Problem der Optimierung des Verkehrsflusses im Anflugbereich eines Flughafens formulieren, welches im Anschluß an die Situationsdarstellung umfassend beschrieben wurde.

Es folgte eine Formalisierung der 3-stufigen Problematik, sowie eine formale Beschreibung der Vorgänge zur Findung möglicher Lösungen. Die im Vorfeld hierzu notwendigen Schritte, das Bestimmen einer Menge von Lösungskandidaten, sowie das anschließende Auswählen einer bestmöglichen Lösung wurden zudem an einem Beispiel vorgeführt.

Es folgte die Darstellung zweier prinzipiell unterschiedlicher Ansätze zur Bestimmung einer Lösung zum genannten Problem. Zum einen umfasste dies einen Branch-and-Bound Ansatz mit der Möglichkeit des frühzeitigen Abbruchs der Suche nach einer optimalen Lösung, zum anderen wurde ein einfacher First-Come-First-Served-Ansatz zur Bestimmung einer einzelnen Lösung vorgestellt. Zusätzlich wurde hierbei auf die notwendige Vorbereitung der zu handhabenden Daten eingegangen. Schließlich wurde mit dem Verfahren zur Bestimmung einer insgesamt optimalen Lösung im Hinblick auf die Robustheit und den Gesamtnutzen gezeigt, wie die Bewertung von Lösungen unter Rücksichtnahme auf mögliche äußere Einflüsse aussehen kann.

Eine im Anschluß erfolgte Evaluation der Verfahren anhand aufgezeichneter Daten bezüglich des Flughafens Frankfurt am Main zeigte die zu erwartenden Effekte hinsichtlich der angelegten Messgrößen Pünktlichkeit, Flugzeitverkürzung und Flugverzögerung. Hierbei wurde auf die Qualität der Eingangsdaten ebenso Rücksicht genommen, wie auf die notwendige Betrachtung der entsprechenden Parameter zur Justierung des Gesamtverfahrens. Eine Diskussion im Anschluss geht auf einige offene Fragestellungen ein und versucht die Erfahrungen der Untersuchungen festzuhalten.

6.2 Ausblick

Diese Arbeit zeigt die Möglichkeit der Anwendung von Standardverfahren der Informatik, insbesondere das First-Come-First-Served sowie das Branch-and-Bound-Verfahren, auf ein reales Problem in der Umwelt. Sie zeigt dabei auf,

wie unter gewissen Umständen, wie beispielsweise bei Betrachtung von mit Unsicherheiten belasteter Eingangsdaten, dennoch sinnvolle Ergebnisse erzielt werden können.

Für die Luftfahrtbranche, und insbesondere für das Fachgebiet des Air Traffic Flow Managements, stellt diese Arbeit einen weiteren Schritt zur Erkenntnis von Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Luftverkehr dar. Während Entwicklungen und Forschungsprojekte im Bereich der Luftfahrt immer mehr auf gemeinsamer Basis und unter dem Stichwort Collaborative Decision Making stattfinden, bleibt es wichtig, mittels einzelner Untersuchungen auch die kleineren Teilgebiete zu betrachten und Lösungsmöglichkeiten für diese aufzuzeigen. So besteht der Bereich Planung in der Luftfahrt heute aus vielen Einzelsystemen, die alle einen Teilaspekt des Verkehrs planen.

Auch wenn der aktuelle Trend zur Zeit dahin geht, dass sich immer mehr Systeme um die mittelfristige Planung in Verkehrsbereichen kümmern, nicht nur was den Luftverkehr, sondern beispielsweise auch den Straßenverkehr angeht, so ist es doch fraglich wie weit eine solche Entwicklung reichen kann. Wird es in Zukunft möglich sein, mit dem Auto ohne manuelle Eingriffe, nur auf der Grundlage und Steuerung eines bezüglich des Restverkehrs und anderen Hindernissen planenden Systems, zum Einkaufen in die Stadt zu fahren? Diese Frage lässt sich ebenso auf die Luftfahrt übertragen und erscheint hier vielleicht sogar noch weniger abwegig als im Straßenverkehr. Doch unabhängig davon, wie sich die Situation diesbezüglich entwickelt, darf man mit Sicherheit gespannt sein, wie sich die Situation bezüglich des Luftverkehrs entwickelt.

Literaturverzeichnis

- [1] PAPANIMITRIOU, CHRISTOS H./ STEIGLITZ, KENNETH: Combinatorial Optimization, *Algorithms and Complexity*, Englewood Cliffs, New Jersey 1982, S.433ff
- [2] RUSSELL, STUART J./ NORVIG, PETER: Artificial Intelligence, *A Modern Approach*, Englewood Cliffs, New Jersey 1995, S.53ff
- [3] SHAPIRO, STUART C. (ed.-in-chief): Encyclopedia of Artificial Intelligence, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York 1987.
- [4] OTTMANN, T./ WIDMAYER, P.: Algorithmen und Datenstrukturen, Spektrum, Heidelberg, 1996.
- [5] BINDER, K./HEERMANN, D. W.: Monte Carlo simulation in statistical physics, *an introduction*, Berlin, 2002.
- [6] DAKIN, R. J.: A tree-search algorithm for mixed integer programming problems. In: *The Computer Journal*, Volume 8, S. 250-255, 1965
- [7] DEAN, T. L.: Intrancibility and time-dependent planning. In: *Workshop on Reasoning about Actions and Plans*, 1987.
- [8] SCHALLER, WOLF-DIETER: „Slot“ is the Magic Word, *FRA's Role within the International Scheduling Network*, Technical Report, Flughafen Frankfurt Main/AG, 1995.
- [9] EUROCONTROL PERFORMANCE REVIEW COMMISSION: Performance Review Report 7, *An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2003*, Brussels (Belgium), April 2004
- [10] EUROCONTROL PERFORMANCE REVIEW COMMISSION: Performance Review Report 8, *An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2004*, Brussels (Belgium), April 2005
- [11] EUROCONTROL PERFORMANCE REVIEW COMMISSION: A comparison of performance in selected US and European En-route Centres, Brussel (Belgium), May 2003
- [12] EUROCONTROL: Air Traffic Management Strategy for the years 2000+, Volume 1+2, *2003 Edition*, Brussels (Belgium), July 2003
- [13] EUROCONTROL: EUROCONTROL History 1963-2003, *40 years of service to European aviation* unter: <http://www.eurocontrol.int/corporate/gallery/content/public/docs/pdf/aboutus/history.pdf>, Zugriff am 10.08.2005

- [14] EUROCONTROL: Abbreviations and Acronyms, Stand 17.11.2005, unter: http://www.euro-cdm.org/CDM_Acronyms_Definitions.doc, Zugriff am 20.01.2006
- [15] MENSEN, HEINRICH: Moderne Flugsicherung, Organisation Verfahren Technik, 2. Auflage, Springer Verlag,1993.
- [16] EUROPÄISCHE UNION: Zuweisung von Zeitnischen unter: <http://europa.eu.int/scadplus/leg/de/lvb/l24085.htm>, Zugriff am 19.10.2005
- [17] LEE, KATHARINE K./ DAVIS, THOMAS J.: The Development of the Final Approach Spacing Tool (FAST): *A Cooperative Controller-Engineer Design Approach*, NASA Ames Research Center, Moffet Field, California, August 1995.
- [18] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: TARMAC, Projekt Rollverkehrsmanagement (1998-2001), *Projektinformationen des DLR - Programmdirektion Luftfahrt* unter: <http://www.dlr.de/Tarmac>, Zugriff am 07.11.2005
- [19] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: 4D-Planer, Planungsanzeige für die Approach-Lotsen, unter: <http://www.dlr.de/fl/produkte/lg/4dplaner.htm>, Zugriff am 20.01.2006