

Technische Universität Berlin
Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Luft- und Raumfahrt

**Steigerung der Flughafen-Kapazität durch Modellierung und
Optimierung von Flughafen-Boden-Rollverkehr –
Ein Beitrag zu einem künftigen Rollführungssystem
(A-SMGCS)**

von Dipl.-Ing. Torsten Busacker
geb. am 11. Januar 1974 in Berlin-Lichterfelde

Von der Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Wissenschaftliche Aussprache am 14. Dezember 2004

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Fricke
Prof. Dr. rer. nat. Rolf H. Möhring
Prof. Dr.-Ing. Peter Wolf

Berlin 2005
D 83

« Ninety percent of aviation is on the ground.
Only ten percent is in the air. »

Glenn Curtiss (1878-1930)

Flugzeugkonstrukteur

Luftfahrtpionier

Unternehmer

KURZFASSUNG

Thema der vorliegenden Arbeit ist die Optimierung von Flughafen-Boden-Rollverkehr.

Weltweit steigt die Nachfrage nach Luftverkehr. Damit steigt auch die Anzahl der Flugbewegungen an Flughäfen. Insbesondere große Drehkreuzflughäfen stoßen weltweit schon heute an ihre Kapazitätsgrenzen. Kapazitätserweiterungen durch Neu- oder Ausbauten sind aber nur noch in Ausnahmefällen möglich. Besondere Bedeutung kommt daher der effizienteren Nutzung der bestehenden Infrastruktur zu.

Der Boden-Rollverkehr wurde bisher weitgehend als unbegrenzte Ressource angesehen. Eine genaue Analyse zeigt aber, dass der Rollverkehr durchaus ein Kapazitätsengpass sein kann. Durch die Planung und Optimierung der Routenführung des Rollverkehrs soll daher ein Effizienzgewinn erzielt werden.

Ein solches Optimierungsverfahren stellt als Planungskomponente zugleich einen wichtigen Bestandteil eines künftigen Rollverkehrsführungssystems (A-SMGCS) dar.

Eine Analyse des Rollverkehrs, seiner Funktion im Betriebsablauf und seiner für eine Modellierung wichtigen Eigenschaften führt zum Optimierungsziel der minimalen mittleren Rollzeiten.

Ausgehend von dieser Zielsetzung wird eine Zielfunktion formuliert, deren Nebenbedingungen die Systemeigenschaften des Rollverkehrs mathematisch beschreiben. Es wird ein Algorithmus entwickelt, der kürzeste konfliktfreie Rollrouten mit Hilfe von Zeitfenstern und zielgerichteter Suche plant.

Zur Validierung dieses Rollverkehrs-Algorithmus wird ein großer Verkehrsflughafen graphentheoretisch modelliert. Mit Hilfe des neuen Algorithmus werden dann realistische Rollverkehrs-Szenarien optimiert. Die Validierung selbst erfolgt sodann durch den Vergleich mit echten, im Flugbetrieb gemessenen Rollverkehrszeiten.

Der Vergleich ergibt, dass der neue Algorithmus einen deutlichen Effizienzgewinn gegenüber dem heutigen Rollverkehrsbetrieb ermöglicht. Die Zeitersparnis für jeden Rollvorgang beträgt im Mittel mindestens ca. 5%, wobei besonders hervorzuheben ist, dass der Algorithmus in keinem untersuchten Fall im Mittel schlechter abschnitt als die Realität. Die maximale erreichte Zeitersparnis lag in allen untersuchten Szenarien konsistent bei deutlich über 20%.

Damit wurde gezeigt, dass die Optimierung des Rollverkehrs das Potenzial besitzt, den Flughafenbetrieb effizienter zu machen. Zugleich wurde bewiesen, dass der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus grundsätzlich geeignet ist, dieses Potenzial zu erschließen.

ABSTRACT

This thesis presents a new algorithm for Airport Ground Traffic Optimization.

Demand for air transportation is constantly growing world-wide, and with it the number of aircraft movements at airports. Especially big hub airports in a number of countries are already operating close to or above their respective capacity limits. However, enhancement of airport capacity by building new airports or extending the existing ones is not usually an option. Hence, exploiting the existing infrastructure efficiently is of paramount concern.

Aprons and taxiways have up till now been usually regarded as an unlimited resource. Thorough analysis proves, however, that taxi traffic can indeed become a limiting factor in certain instances. Thus, it is hoped that planning and optimizing taxi routing will lead to greater efficiency.

Optimization of taxi traffic will also be required as a planning component of a future Advanced Airport Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS).

An analysis of taxi traffic, of its role in airport operations and of its properties which affect modelling makes clear the necessity to minimize average taxi times.

This necessity is translated into an objective function, the side conditions of which describe the system properties of taxi traffic mathematically. An algorithm is developed that plans shortest conflict-free taxi routes by means of time windows and targeted search.

This taxi traffic algorithm is validated by being applied to the graph model of a large airport. Using the new algorithm, realistic taxi traffic scenarios are optimized. Validation itself is achieved by comparing the optimization results with actual taxi times observed in real-life airport operations.

The result of this comparison is that the new algorithm increases efficiency significantly beyond present taxi operating procedures. The time saved per taxi roll is about 5% on average. It is especially noteworthy that in none of the instances studied does the algorithm perform worse than the present operations. The maximum time saved was consistently above 20% in all the scenarios studied.

It was thus proved that optimizing taxi traffic has the potential to make airport operations more efficient. It was also shown that the algorithm presented in this thesis might help turn this potential into actual savings.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin mit einem Stipendium des DFG-Graduiertenkollegs „Stochastische Modellierung und quantitative Analyse großer Systeme in den Ingenieurwissenschaften“ (GrK 621/1).

Herrn Professor Fricke bin ich zu bleibendem Dank verpflichtet für seine Unterstützung meiner Bewerbung für das Graduiertenkolleg, für seine fachlichen Anregungen und für die reibungslose organisatorische Betreuung meiner Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn Professor Möhring für seine Geduld und seine wertvollen fachlichen Anregungen sowie für die Übernahme eines Koreferats. Herrn Professor Wolf danke ich für seine Unterstützung durch die Übernahme eines weiteren Koreferats.

Der Dank für wertvolle Anregungen in vielen Diskussionen und Gesprächen gilt ebenfalls allen Professoren des Graduiertenkollegs, dessen Sprecher Herr Professor Hommel ist, sowie meinen Mit-Stipendiaten; ferner Dr. Armin Zimmermann und Dr. Katinka Wolter.

Danken möchte ich auch Herrn Professor Reichmuth und seinem damaligen Team in der Abteilung Luftverkehrssysteme sowie Dr. Dietmar Böhme, beide am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig, das mir für über ein Jahr eine zweite fachliche Heimstatt und darüber hinaus noch wertvolle Unterstützung gewährt hat.

Der Firma CSC Ploenzke in Wiesbaden danke ich für die finanzielle Förderung meiner Arbeit in Teilbereichen.

Noch viele andere haben mich in den letzten drei Jahren auf verschiedene Weise unterstützt.

Ich danke ...

- ... dem Flughafen Frankfurt / Main, insbesondere Stefan Mael, für wertvolle Daten sowie Bild- und Kartenmaterial;
- ... dem Flughafen Köln / Bonn für einen tiefen Einblick in den Betrieb von Vorfeld und Rollverkehr;
- ... dem Flughafen München ebenfalls für Einblick in die Probleme des Rollverkehrs und des Einsatzes neuer Systeme;
- ... der Airbus Deutschland GmbH für Daten;
- ... Rainer Flicker, Institut für Luft- und Raumfahrt und Christian Liebchen, Institut für Mathematik (beide TU Berlin) für ihre Hilfsbereitschaft und ihre Hinweise in den Bereichen Mathematik und Algorithmen, sowie Edmond Bouchot für die Implementierung des vorgestellten Algorithmus;
- ... Dr. Sandra Hupka, Dr. Ralf Kohlen, Jörg Bauer (Deutsche Lufthansa AG), Susann Engert, Patrick Rismont und Steven Wilmot, die das Lektorat übernommen und einige wichtige Anregungen beigetragen haben, sowie
- ... all den Kollegen, jetzigen und ehemaligen, am Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr der TU Berlin, die in den letzten drei Jahren für ein produktives Arbeitsklima gesorgt haben!

Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern Horst und Christiane Busacker und meiner Schwester Tanja, die mich in den Jahren meiner Ausbildung (und natürlich auch schon davor) auf vielfältige Weise unterstützt und gefördert haben.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	V
ABSTRACT	VII
DANKSAGUNG	IX
INHALTSVERZEICHNIS	XI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
GLOSSAR.....	XVII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gegenstand der Arbeit	1
1.3 Vorgehensweise	3
2 FLUGHAFENKAPAZITÄT UND ROLLVERKEHR.....	5
2.1 Flughäfen im System Luftverkehr.....	5
2.1.1 Die wirtschaftliche Bedeutung des Luftverkehrs und der Flughäfen	5
2.1.2 Das System Flughafen.....	6
2.1.3 Klassifizierung von Flughäfen	9
2.2 Rollverkehr und Flughafenbetrieb	9
2.2.1 Die Funktionsbereiche Rollfeld und Vorfeld.....	10
2.2.2 Rollverkehrsführung	12
2.2.3 Aktuelle betriebliche Verfahren	14
2.2.4 Technische Systeme im Einsatz.....	16
2.2.5 Technische Systeme für zukünftigen Einsatz.....	18
2.2.6 Entwicklungsbedarf der Rollverkehrsüberwachung.....	19
2.2.7 A-SMGCS.....	21
2.2.8 Rollverkehrsplanung.....	23
2.2.9 Rollverkehrssimulation.....	24
2.3 Kapazitätsengpässe im System Flughafen.....	25
2.4 Ansätze zur Steigerung der Flughafenkapazität	28
2.4.1 Fließender Luftverkehr (Airborne Traffic)	28
2.4.2 Start- und Landebahnsystem.....	28
2.4.3 Gate-Zuweisung.....	29
2.4.4 Rollverkehr.....	29
2.4.5 Ansatz dieser Arbeit.....	34
3 MODELLIERUNG DES ROLLVERKEHRS	35
3.1 Vorgehen	35
3.2 Grundbegriffe der Graphentheorie.....	35
3.2.1 Entwicklung der Graphentheorie	35
3.2.2 Ungerichtete Graphen.....	36

3.2.3	Digraphen	38
3.2.4	Kette, Pfad und Weg.....	39
3.2.5	Datenstrukturen zur Speicherung von Graphen	40
3.3	Verkehrsmodellierung durch Netzwerke	42
3.3.1	Eigenschaften von Netzwerken.....	42
3.3.2	FIFO-Netzwerke	44
3.3.3	Kostenfunktion.....	44
3.3.4	Zeitfenster	45
3.3.5	Zeitexpansion	46
3.3.6	Zeitfenster als Label	47
3.4	Algorithmen für Verkehrsnetzwerke	49
3.4.1	Graphenalgorithmen und Suchverfahren.....	49
3.4.2	Klassen von Optimierungsproblemen	53
3.4.3	Der Dijkstra-Algorithmus.....	54
3.4.4	Algorithmus mit Zeitfenster	56
3.5	Komplexitätstheorie	60
3.5.1	Bit-Komplexität.....	60
3.5.2	NP-Vollständigkeit	60
3.6	Bestimmung des Optimierungsziels.....	62
3.6.1	Festlegung einer Zielgröße	62
3.6.2	Formulierung der Zielfunktion.....	65
3.6.3	Nebenbedingung der festen Reihenfolge.....	66
3.7	Modellierung der Flughafen-Topologie.....	68
3.7.1	Konstruktion des Basisgraphen	68
3.7.2	Abbildung einspuriger Rollwege	71
3.7.3	Zellularisierung langer Kanten	72
3.7.4	Modellierung der Flugzeuge.....	76
3.8	Kurvenkompensation	76
3.8.1	Dual Graph.....	77
3.8.2	Expanded Network	78
3.8.3	Arc-Label Shortest Path	79
3.9	Neuer Rollverkehrs-Algorithmus.....	83
3.10	Implementierung in MATLAB.....	87
4	VALIDIERUNG DES OPTIMIERUNGSMODELLS	89
4.1	Methode.....	89
4.2	Datengrundlage	89
4.2.1	Erforderliche Datenqualität	89
4.2.2	Flughafen Frankfurt/Main	90
4.2.3	Modellierung des Ein-Spur-Betriebs.....	91
4.2.4	Rohdaten des realen Rollverkehrs	92
4.2.5	Gewinnung relevanter Daten des realen Rollverkehrs.....	96
4.2.6	Charakteristika des realen Rollverkehrs.....	98
4.2.7	Entwurf geeigneter Optimierungsszenarien.....	99

4.3	Ergebnisse	101
4.3.1	Ausgabe des Planungsalgorithmus	101
4.3.2	Auswertung der Szenarien	102
4.3.3	Inbound 25R – B24	102
4.3.4	Inbound 25L – C4	106
4.3.5	Outbound A17 – 18W	109
4.3.6	Outbound D3 – 25R	112
4.3.7	Einfluss der Reihenfolge	115
4.4	Ergebnisbewertung	117
5	DISKUSSION UND AUSBLICK	121
5.1	Diskussion	121
5.1.1	Ansatz	121
5.1.2	Ergebnisse	123
5.2	Ausblick	124
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	127
	TABELLENVERZEICHNIS	129
	LITERATURVERZEICHNIS	131
	LEBENS LAUF	138

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC	Air Canada (IATA-Kürzel)
AIP	Luftfahrthandbuch (Aeronautical Information Publication)
AM	Airport Machine®
AOBT	Actual Off-Block Time
APT	Actual Parking Time
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ATA	Actual Time of Arrival
ATD	Actual Time of Departure
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management
ATOT	Actual Take-Off Time
AWOP	All-Weather Operations Panel
BETA	Operational Benefit Evaluation by Testing an A-SMGCS
BFS	Breadth First Search
BA-FVK	Betriebsanweisung für den Flugverkehrskontrolldienst
CAPTS	Cooperative Area Precision Tracking System
CDG	Flughafen Paris-Charles de Gaulle (IATA-Kürzel)
CFMU	Central Flow Management Unit (angesiedelt bei der Eurocontrol, Brüssel)
CGN	Flughafen Köln/Bonn (IATA-Kürzel)
CTR	Kontrollzone (Control Zone) – Luftraum in unmittelbarer Umgebung des Flughafens (ICAO Typ D) zur sicheren Abwicklung von An- und Abflügen / Starts und Landungen
DAYTRI	Daily Traffic Information System
DEFAMM	Development of Demonstration Facilities for Airport Movement Guidance, Control and Management
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DTOP	Dual Threshold Operations
EN	Air Dolomiti (IATA-Kürzel)
FAA	Federal Aviation Administration (amerikanische Zivilluftfahrtverwaltung)
FRA	Flughafen Frankfurt/Main (IATA-Kürzel)
FRAPORT	Frankfurt Airport Services Worldwide, vorm. Flughafen Frankfurt/Main AG
FIFO	First In – First Out (siehe Glossar)
GPS	Global Positioning System
GRD	Ground (entspr. Flugsicherungsbereich „Rollverkehr“)
HALS	High Approach Landing System
HAM	Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel (IATA-Kürzel)

IATA	International Air Transport Association (Internationale Organisation von Luftverkehrsgesellschaften)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Internationale Zivilluftfahrt-Organisation); Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UNO)
IFR	Instrumentenflugregeln (Instrument Flight Rules)
ILS	Instrumentenlandesystem
JFK	Flughafen New York – John F. Kennedy (IATA-Kürzel)
LGW	Flughafen London-Gatwick (IATA-Kürzel)
LH	Deutsche Lufthansa (IATA-Kürzel)
LHR	Flughafen London-Heathrow (IATA-Kürzel)
LIFO	Last In – First Out
LIN	Flughafen Mailand–Linate (IATA-Kürzel)
LIZ	Lage- und Informationszentrum der DFS (Situation and Information Centre)
MUC	Flughafen München (IATA-Kürzel)
MXP	Flughafen Mailand-Malpensa (IATA-Kürzel)
NAN	not a number (keine Zahl, bzw. „nicht definiert“)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖNV	Öffentlicher Nahverkehr
OFB	Off-Block Time (siehe Glossar unter „Blockzeit“)
ONB	On-Block Time (dto.)
OOOI	Erhebungsverfahren für die Pünktlichkeit von Flügen, die für jeden einzelnen Flug anhand der vier Zeiten für Off blocks – Off wheels – On wheels – Time In festgestellt wird.
PAX	Anzahl der Passagiere an Bord
SIMMOD	Simulation Model für die Simulation eines Flughafens und des Flughafen-Nahbereichs (entwickelt von der FAA)
SK	SAS – Scandinavian Airlines (IATA-Kürzel)
STA	Scheduled Time of Arrival
STD	Scheduled Time of Departure
TFN	Flughafen Tenerife Norte – Los Rodeos (IATA-Kürzel)
TAAM	Total Airport and Air Space Modeller®
TARMAC	Taxi and Ramp Management and Control
TMA	Nahverkehrsbereich (Terminal Control Area) – Luftraum in Flughafennähe (ICAO Typ E) zur sicheren Abwicklung des IFR/VFR-Mischverkehrs
TPE	Flughafen Taipeh – Chiang Kai Chek (IATA-Kürzel)
TWR	Tower (entspr. Flugsicherungsbereichen Start-/ Landebahnen sowie Anflug)
UPAX	Anzahl der Umsteigepassagiere an Bord
VFR	Sichtflugregeln (Visual Flight Rules)
YYZ	Flughafen Toronto Lester B. Pearson (IATA-Kürzel)

GLOSSAR

Blockzeit	Die Blockzeit ist die Zeit zwischen dem Losrollen eines Flugzeugs vom Flugsteig am Abflughafen (der <i>Off-Block Time</i> , so benannt nach dem Wegnehmen der Bremsklötze, engl. Stop-blocks) und dem Parken am Zielflughafen (der <i>On-Block Time</i> , vom Anlegen der Bremsklötze).
Eurocontrol	European Organisation for the Safety of Air Navigation (Europäische Flugsicherheitsagentur). Die Eurocontrol arbeitet an der Harmonisierung der verschiedenen europäischen Flugsicherungssysteme. Sie betreibt u.a. eine eigene Forschungseinrichtung in Brétigny-sur-Orge (Frankreich) und die Central Flow Management Unit (CFMU) in Brüssel, die europaweit für die Verwaltung der ATC-Slots zuständig ist (s. „Slot“).
FIFO	„ <i>First in – first out</i> “; im Rahmen dieser Arbeit: Funktionsweise von Netzwerk-Bögen (s. Kap. 3.3.2); ansonsten auch Prioritätsregel für die Bearbeitung von Listen oder den Betrieb von Speicher (Informatik; Gegensatz: LIFO).
Flugbewegung	Eine Flugbewegung bedeutet „ein Start oder eine Landung“. Ein <i>Turn-around</i> (s. dort) eines Flugzeugs an einem Flughafen, das heißt eine Landung und ein anschließender Start, geht also mit 2 Flugbewegungen in die Gesamtbilanz ein.
ICAO-Luftraumtypen	In jedem ICAO-Luftraumtyp gelten bestimmte Standards und Verkehrsregeln zur Abwicklung des Luftverkehrs, die international weitestgehend einheitlich sind. Es gibt Lufträume in den Klassen A (völlig kontrollierter Luftraum; VFR-Verkehr verboten) bis F (völlig unkontrollierter Luftraum; Einhaltung von Staffelungsabständen durch jeden Piloten selbst). Die Einteilung des Luftraums in die verschiedenen Luftraum-Typen ist jedoch national verschieden.
Koordinationsseckwert	Der Koordinationseckwert eines Flughafens legt die Anzahl der Flugbewegungen fest, die pro rollierender Stunde geplant werden können. Hierbei wird von Instrumentenflugbedingungen ausgegangen, d.h. bei besserem Wetter kann die Gesamtzahl der Flugbewegungen, die abgewickelt werden können, zum Teil erheblich darüber liegen. Für Frankfurt/Main liegt der Koordinationseckwert seit dem Sommerflugplan 2004 bei 80 Starts und Landungen pro Stunde (6-14 Uhr) bzw. bei 81 Starts und Landungen pro Stunde (14-22 Uhr) (<i>Gesamtkoordinationseckwert</i>).

Push-back	Das Zurückstoßen des Flugzeugs vom Flugsteig am Terminal (ausgeführt durch Schlepper) vor dem Anlassen der Triebwerke. Bei entsprechender Gestaltung des Terminals ist kein Push-back erforderlich, weil die Flugzeuge aus eigener Kraft ihre Position verlassen können.
Slot	„Zeitnische“ zum Durchführen eines Starts oder einer Landung auf einem Flughafen (Airport-Slot) oder zum Durchfliegen eines bestimmten Streckenabschnittes (ATC-Slot). In der Regel muss ein Slot innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, meistens 15 Minuten, genutzt werden und verfällt im Falle der Nicht-Nutzung.
Turn-around	Der Begriff „Turn-around“ bezeichnet im engeren Sinne alle Vorgänge zwischen der On-Block Time (siehe „Blockzeit“) und der Off-Block Time, oder im weiteren Sinne den Prozess zwischen der Landung eines Flugzeugs an einem Flughafen und dem anschließenden Start zum nächsten Zielflughafen. Dazu gehören z.B. das Aussteigen der Passagiere und das Entladen der Fracht, ggf. Reinigung und Betankung sowie das anschließende neue Beladen / Einsteigen der Passagiere für den nächsten Flug; bei der weiter gefassten Definition zusätzlich Taxi-in und Taxi-out. Je nach Größe des Flugzeugs und Herkunfts- bzw. Zielort variiert die mindestens erforderliche Zeit für einen Turn-around zwischen ungefähr 20 Minuten (z.B. ein Flugzeug mit 100 Sitzen zwischen zwei Inlandsflügen) und 75-90 Minuten (z.B. ein Großraumflugzeug zwischen zwei Interkontinentalflügen). Die für einen Turn-around benötigte Zeit gilt auch als Maß für die Effizienz einer Fluggesellschaft; so genannte Billigfluggesellschaften erzielen einen Teil ihrer Kostenvorteile aus besonders kurzen Turn-arounds. Dies erlaubt eine längere (umsatzbringende) Beschäftigung des Flugzeugs pro Tag. Dafür nehmen diese Fluggesellschaften zum Teil in Kauf, ausschließlich kleine und abgelegene Flughäfen zu bedienen, da dort die Rollentfernungen kurz und damit die Taxi-Zeiten gering sind. Durch ein geringeres Verkehrsaufkommen ist außerdem das Risiko von verkehrsbedingten Verspätungen geringer. Der Erlösvorteil ergibt sich in diesem Fall nicht ausschließlich aus den kürzeren Taxi-Zeiten, sondern auch durch die höhere Zuverlässigkeit der Flugpläne, da es weniger mögliche Verspätungsquellen gibt.
Verspätung	Ankunft oder Abflug, die gegenüber dem Flugplan verspätet sind

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation

Trotz bereits großer Zuwächse in der Vergangenheit erfreut sich der Weltluftverkehr auch weiterhin eines dynamischen Wachstums. Die Gesamtanzahl der Flugbewegungen (das heißt Starts und Landungen) aller deutscher Flughäfen hat sich zwischen 1986 und 1999 von 900.000 auf 1,8 Millionen verdoppelt. /BMV00/ Trotz eines krisenbedingt etwas langsameren Verkehrswachstums in den letzten Jahren wächst die Nachfrage nach Luftverkehr weiter. Hierbei ist auch zu bedenken, dass selbst bei tendenziell abnehmenden Zuwachsraten, wie diese infolge von zunehmender Marktsättigung beispielsweise in den USA zu beobachten sind, das jährliche Verkehrsaufkommen in absoluten Zahlen auch dort weiter steigt.

Dies stellt die Luftverkehrs-Infrastruktur, die vor allem aus den Luftverkehrsrouten und den dazugehörigen Flugsicherungseinrichtungen auf der einen sowie den Flughäfen auf der anderen Seite besteht, vor ständig wachsende Herausforderungen.

Während bis vor ungefähr 5 Jahren in Europa die Flughäfen im wesentlichen noch über ausreichend Kapazität für Wachstum verfügten und Kapazitätsengpässe am Boden nur in den USA zu beobachten waren, hat das Wachstum mittlerweile die Kapazitätsreserven zentraler Flughäfen auch in Europa aufgezehrt. Eine Erhöhung der Flughafenkapazität durch Ausbauten oder Neubauten von Flughäfen ist in fast allen entwickelten Ländern aus verschiedenen Gründen jedoch nur noch sehr begrenzt oder überhaupt nicht mehr möglich. Steigende Verspätungen im Luftverkehr sind die Folge.

Folglich sind die Flughäfen und ihre Träger darauf angewiesen, die vorhandene Flughafen-Infrastruktur optimal zu nutzen beziehungsweise bei Neubauten eine optimale Planung zu gewährleisten, um gegenüber steigenden Anforderungen bezüglich der Zahl der Flugbewegungen auch künftig gewappnet zu sein.

1.2 Gegenstand der Arbeit

Schwerpunkte bisheriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten waren neben einer Erhöhung oder effizienteren Nutzung der Luftraumkapazität (z.B. durch Ground Holding) im Bereich der Flughäfen die effizientere Nutzung des Start- und Landebahnsystems z.B. durch die Suche nach einer die Kapazität erhöhenden Reihenfolge für Landungen oder Starts (Anflug- bzw. Abflug-Sequenzierung) oder

die effizientere Nutzung der knappen Flugsteige an Terminals¹. Das Rollfeld und das Vorfeld wurden hingegen bisher zumeist als unbegrenzte Ressource angesehen.

Die Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich des Rollverkehrs in den letzten zehn Jahren standen dabei zumeist im Kontext der Entwicklung eines Rollführungssystems (Advanced Surface Movement Guidance and Control System, A-SMGCS-Konzept der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO). Hierbei gilt es zunächst das Problem einer automatischen Erkennung und Überwachung der am Boden rollenden Flugzeuge zu lösen. Motiviert waren diese Arbeiten in erster Linie durch das Streben nach mehr Unabhängigkeit von Wettereinflüssen, insbesondere von den Sichtbedingungen, da der Rollverkehr bis heute weitgehend nach Sicht durchgeführt wird. Ziele waren hierbei eine verbesserte Pünktlichkeit bei schlechter Sicht sowie eine Verbesserung der Sicherheit.

Weniger Beachtung fand in diesem Zusammenhang die Frage der Kapazität des Vorfeldes, beziehungsweise eine mögliche Beschleunigung jedes einzelnen Rollvorgangs durch optimal geplante Rollrouten.

Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Stelle an. Es wird ein Modell entwickelt, das den Rollverkehr am Boden beschreibt. Mit Hilfe dieses Modells sollen dann optimale Rollrouten geplant werden. Das Modell ist mit Hilfe realer Rollverkehrsdaten zu validieren, und das Potenzial einer Optimierung des Rollverkehrs ist zu quantifizieren.

Die Implementierung dieses Modells fügt sich als Planungskomponente in ein zukünftiges Rollführungssystem ein.

Die vom Modell zu generierenden Aussagen beschränken sich dabei auf den Rollverkehr am Boden, das heißt eine globale „Verspätung“ eines Fluges kann keine Zielgröße im Sinne des hier vorgestellten Optimierungsverfahrens sein. Start- und Landebahnen oder der Luftraum sind nicht Teil des hier entwickelten Modells. Diese Beschränkung auf den Rollverkehr hat vor allem den Grund, dass die Ursachen für Verspätungen am Boden und in der Luft zum Teil sehr verschieden sind, und ein umfassenderes Modell mit den zur Verfügung stehenden Mitteln einer mathematischen Optimierung daher nicht mehr zugänglich gewesen wäre.

Allerdings kann das hier entwickelte Modell als Modul zur Schaffung eines ganzheitlich nahtlosen Air Traffic Management Ansatzes „Gate to Gate“ beitragen. Ziel dieses Ansatzes ist eine Verbesserung der Zuverlässigkeit der Flugplanung durch die Einbeziehung aller Prozessschritte eines Fluges in die Planung.

¹ siehe hierzu zum Beispiel /Mang85/, /Rich93/, /Rich94/, /Chen96/, /Shum96/, /Chen98/, /Idris99/, /Puje00/, /Beas00/, /Idris01/, /Idris02/

1.3 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Dissertation wird zunächst ein Überblick über verschiedene Einflussgrößen gegeben, die die Kapazität eines Flughafens limitieren können. Dann wird detailliert auf Planung und Betrieb der Flughafen-Funktionsbereiche „Rollfeld“ und „Vorfeld“ eingegangen. Die gängigen technischen Systeme, die heute die Überwachung und Steuerung des Rollverkehrs unterstützen, werden vorgestellt. Außerdem wird ein Blick auf die verschiedenen Betriebsphilosophien in den Vereinigten Staaten und in Europa geworfen. Anschließend wird auf die Entwicklungsrichtung im Bereich des Rollverkehrsmanagements eingegangen. Hieraus leitet sich der Bedarf für ein Modul zur Rollroutenplanung und –optimierung ab (Kapitel 2).

Hierzu ist zunächst die Festlegung des Optimierungsziels erforderlich. Eine Zielfunktion legt als Optimierungsziel die Minimierung der mittleren Rollzeit fest, beziehungsweise die Minimierung der Summe aller Rollzeiten.

Die Graphentheorie ist die Grundlage für das zu einer Optimierung erforderliche und zu entwickelnde Modell des Rollverkehrs. Aus geeigneten Graphenalgorithmien wird ein Verfahren zur Bestimmung des kürzesten Weges mit zeitabhängig nicht verfügbaren Ressourcen (Kanten) abgeleitet, das heißt es wird ein Algorithmus entwickelt, der die Zielfunktion umsetzt. Die Zielfunktion geht von der Prämisse aus, dass durch die Minimierung der für jede einzelne Rollroute benötigten Rollzeit die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert wird, weil die Belegung insgesamt abnimmt. Eine Minimierung jeder einzelnen Rollroute wird vor allem dadurch erreicht, dass für den Optimierungsalgorithmus mit Ausnahme der Kollisionsfreiheit sämtliche Restriktionen der Rollverkehrsführung auf dem Flughafen, welche durch Betriebsvorschriften oder Regelsätze gegeben sind, aufgehoben werden. Der Algorithmus hat also bei der Planung einer Rollroute alle noch freien Ressourcen zur Verfügung. Die Sicherheit des Rollverkehrs wird dadurch gewährleistet, dass der Optimierungsalgorithmus sämtliche Rollvorgänge konfliktfrei plant, so dass gefährliche Begegnungen ausgeschlossen werden können, sofern sich die Piloten an die vom Algorithmus generierten Rollanweisungen halten. Das erhoffte Optimierungspotenzial erklärt sich vor allem daraus, dass bei hohem Verkehrsaufkommen auf dem Rollfeld ein Rollverkehrslotse, der alle Rollvorgänge planen, führen und überwachen muss, schnell an seine Grenzen stoßen kann. Er wird dann zur Wahrung der Sicherheit, die das oberste Ziel sämtlicher Verkehrsführung sein muss, eher konservativ planen. Er kann beispielsweise zusätzliche Sicherheitsabstände vorsehen oder aber manche Rollvorgänge bewusst verzögern, um seine Aufmerksamkeit nicht mehreren potenziellen Konfliktpunkten zugleich widmen zu müssen. Ein Planungsalgorithmus kann hingegen die zur Verfügung stehenden Res-

sourcen voll einplanen, da insbesondere die Verteilung der Aufmerksamkeit auf mehrere potenzielle Konfliktpunkte keinerlei Problem darstellt (Kapitel 3).

Das neue Optimierungsverfahren wurde in der Entwicklungsumgebung MATLAB implementiert.

Mit Hilfe dieser Implementierung folgt die Validierung dieses neu entwickelten Optimierungsalgorithmus unter Verwendung realistischer Rollverkehrsszenarien. Hierbei wird zunächst von Rollvorgängen in einer festen Reihenfolge ausgegangen, wobei im Anschluss der Nachweis geführt wird, dass die Reihenfolge der Planung der Rollrouten keinen nennenswerten Einfluss auf die Gesamt-Performance des Algorithmus hat. Ziel dieser Validierung ist es letztlich, das Verbesserungspotenzial mathematischer Optimierung gegenüber der heute im realen Rollverkehrsbetrieb üblichen händischen Zuweisung von Rollrouten zu belegen oder zu widerlegen.

Dazu werden die Ergebnisse der Optimierung in einer eingehenden Analyse mit den Leistungskennziffern des realen Systems verglichen (Kapitel 4). Eine grobe Abschätzung des Einsparpotenzials durch kürzere Rollzeiten verdeutlicht die Relevanz des Themas der Arbeit. Es wird hierbei allerdings nur die direkte Ersparnis durch Verkürzung der Rollzeiten quantifiziert; die zusätzlich zu berücksichtigenden Effizienzgewinne durch eine erhöhte Zuverlässigkeit der Planung sind nicht ohne weiteres zu quantifizieren, dürften tendenziell jedoch noch größer sein.

Abschließend werden die erhaltenen Ergebnisse diskutiert, und es wird in einem Fazit eine Empfehlung zur Richtung weiterer Forschung abgeleitet. Die Kernfrage der vorliegenden Arbeit, die es hierbei letztlich zu beantworten gilt, ist, ob das Verbesserungspotenzial einer Optimierung des Rollverkehrs in Form eines Entscheidungsunterstützungswerkzeugs für die Rollverkehrslotsen den nicht unerheblichen Entwicklungsaufwand rechtfertigt (Kapitel 5).

2 FLUGHAFENKAPAZITÄT UND ROLLVERKEHR

2.1 Flughäfen im System Luftverkehr

2.1.1 Die wirtschaftliche Bedeutung des Luftverkehrs und der Flughäfen

Als der jüngste Massenverkehrsträger weist der Luftverkehr die mit Abstand höchsten Wachstumsraten aller Verkehrsträger auf. Weltweit ist der Luftverkehr im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts um durchschnittlich 6 Prozent pro Jahr gewachsen, wobei alle Phasen der Stagnation hierbei bereits mit eingerechnet sind. In diesem Zeitraum hat sich der Verkehr dreimal verdoppelt, so dass die Verkehrsleistung des Luftverkehrs heute den 8-fachen Umfang hat wie noch vor 35 Jahren. /Neuf03/

Im Jahr 2000 reisten weltweit 1,7 Milliarden Passagiere mit dem Flugzeug. Der Gesamtumsatz des Weltluftverkehrs bewegte sich in der Größenordnung von 1 Billion US-Dollar ($1 \cdot 10^{12}$ US-\$). Dies entspricht etwa 10 Prozent des Bruttoinlandsproduktes der Vereinigten Staaten. In Europa weisen Regionen mit Flughäfen, die eine internationale Drehscheibenfunktion haben, im nationalen Vergleich Spitzenwerte beim Bruttoinlandsprodukt je Einwohner auf. /BMV00/ In Deutschland sind hierbei rund 145.000 Personen direkt an Flughäfen beschäftigt. Der Flughafen Frankfurt ist mit 58.000 Beschäftigten einer der größten Arbeitgeber in Deutschland². Außer diesen direkten Beschäftigten erzeugt der Luftverkehr jedoch durch indirekte, induzierte und katalysierte Beschäftigungseffekte weitere 484.000 Arbeitsplätze in der Bundesrepublik.

Hierbei noch nicht erfasst ist der Wertschöpfungsbeitrag des Luftverkehrs durch gesamtwirtschaftliche Effekte wie die Notwendigkeit von Flugverbindungen für fast alle Zweige einer globalisierten Wirtschaft, den Handel mit hochwertigen Gütern, die eine hohe Transportqualität benötigen, oder die besondere Attraktivität von flughafennahen Standorten für Investitionen, die in zahlreichen Studien belegt sind³.

Luftverkehr ist also nach allen Maßstäben in sich selbst eine zentrale wirtschaftliche Aktivität entwickelter Volkswirtschaften und über die eigene wirtschaftliche Bedeutung hinaus auch ein wichtiger Standortfaktor für eine prosperierende Volkswirtschaft.

Flughäfen sind die Schnittstelle zwischen Luftverkehr und Landverkehr. Als solche haben sie am Wachstum des Luftverkehrs direkten Anteil. Ihr einwandfreies Funk-

² Hiervon sind ca. 12.500 Beschäftigte Mitarbeiter des Flughafenbetreibers Fraport AG, die übrigen sind bei Behördenstellen, den Luftverkehrsgesellschaften oder sonstigen Unternehmen (wie z.B. Logistikdienstleistern, Reisebüros, im Handel oder bei anderen Dienstleistungsunternehmen) beschäftigt. /FRA99/

³ siehe hierzu z.B. /Bau99/, /Weim01/, /Nico03/, /Rüru01/ oder /BMV00/

tionieren ist die entscheidende Voraussetzung dafür, dass sich der Luftverkehr weiterhin mit dem dynamischen Wachstum entwickeln kann, welches von allen seriösen Quellen prognostiziert wird. /Airb02/, /Boei03/ Obwohl sich insbesondere im Land mit dem höchsten Luftverkehrsaufkommen der Welt, den USA, in den letzten beiden Jahrzehnten eine Verlangsamung des Luftverkehrswachstums infolge von Sättigungstendenzen beobachten ließ, nimmt das Verkehrswachstum selbst dort in absoluten Zahlen keineswegs ab, das heißt die jährliche Zusatznachfrage an Kapazität bleibt gleich. /Neuf03/ Da ein Festschreiben des Luftverkehrsvolumens auf dem jetzigen Stand nicht nur den Verzicht auf das Entstehen neuer Arbeitsplätze und anderer positiver wirtschaftlicher Effekte, sondern durch den Verlust der Wachstumsdynamik sogar den Verlust bestehender Arbeitsplätze bedeuten würde /BMV00/, kann die Wichtigkeit der Sicherstellung der Wachstumsfähigkeit der Flughäfen gar nicht hoch genug eingeschätzt werden.

2.1.2 Das System Flughafen

Seine Funktion als Schnittstelle zwischen Luftverkehr und Landverkehr bedingt, dass Planung und Betrieb eines Flughafens den Rahmenbedingungen und Anforderungen mehrerer Verkehrsträger gleichzeitig unterworfen sind.

Die wichtigsten Systemelemente des Flughafens als Verkehrsknotenpunkt sind

- im Luftraum der Flughafen-Nahbereich (Kontrollzone CTR, Luftraum ICAO Typ D),
- das Rollfeld, bestehend aus Start- und Landebahn-System und den Rollwegen /Fri00/,
- das Vorfeld mit den Flugzeugpark- und –abfertigungspositionen,
- das Terminalgebäude mit Flugsteigen und allen sonstigen für die Passagiere wichtigen Einrichtungen für den Personenumschlag, entsprechend Hallen und Flächen für Frachturnschlag,
- weitere Betriebsanlagen wie Tanklager, Wartungshallen, Feuerwache, etc.,
- die landseitigen Verkehrseinrichtungen (Bahnhof, Vorfahrten, Parkflächen / Parkhäuser) sowie
- die landseitige Anbindung (Autobahn-, Straßen- und Schienenanschluss).

Abbildung 2-1 zeigt einen Überblick des Flughafens Frankfurt, in dem einige dieser Elemente kenntlich gemacht sind.



Foto: Fraport AG

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1 - Start-/ Landebahn Nord | 2 - Rollwege |
| 3 - Vorfeld | 4 - Terminal / Abfertigung |
| 5 - Terminal / Flugsteige | 6 - sonstige Betriebsgebäude |
| 7 - Vorfahrten / Landseite | 8 - Anbindung |

Abb. 2-1: Systemelemente des Flughafens Frankfurt/Main
(eigene Darstellung)

Diese Elemente sind zur Erfüllung ihrer Funktion auf ein Zusammenwirken mit den jeweils anderen Elementen angewiesen. Daher ist bei der Planung jedes einzelnen Elementes darauf zu achten, dass das Ziel eine funktionstüchtige, leistungsfähige und flexible Gesamtanlage ist. /Wolf81/ So sind z.B. die Vorfelder mit den Terminalgebäuden zu verzahnen, mit denen sie in Verbindung stehen; zugleich müssen die Vorfelder aber auch gut in das Rollwegenetz und das Gesamt-Layout des Flughafens eingepasst sein. Diesen Aspekten stets übergeordnet ist die Forderung, dass sich der Flughafen natürlich als Ganzes in seine Umgebung einfügen muss. Das Diagramm auf der folgenden Seite verdeutlicht die Vielzahl gegenseitiger Abhängigkeiten in funktionaler Hinsicht:

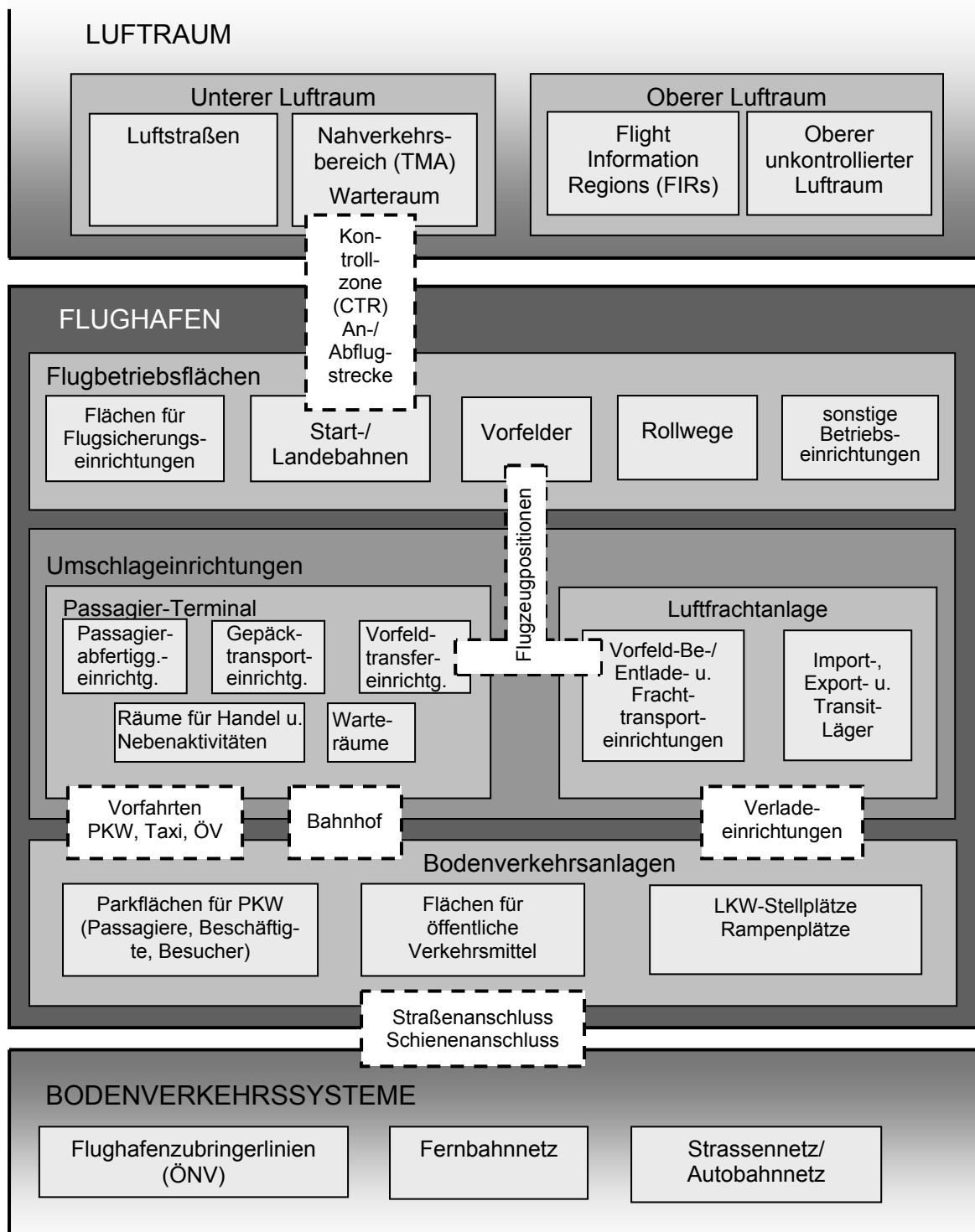


Abb. 2-2: Verknüpfung der Systemelemente eines Verkehrsflughafens
(in Anlehnung an /Wolf81/)

2.1.3 Klassifizierung von Flughäfen

Um international vergleichbare Bedingungen an Flughäfen zu schaffen, hat die internationale Zivilluftfahrt-Organisation ICAO Empfehlungen ausgesprochen, an denen sich Planung, Bau und Betrieb von Flughäfen weltweit orientieren. Diese Empfehlungen werden im „Aerodrome Design Manual“ veröffentlicht. Ihr Zweck ist unter anderem, einheitliche Richtlinien für die Dimensionierung von Start- und Landebahnen, Rollwegen, Flugzeugpositionen und Terminals zu Grunde zu legen. Die Dimensionierung ergibt sich in Abhängigkeit vom jeweils erwarteten Verkehrsaufkommen und der maximalen Größenklasse der erwarteten Flugzeuge, die den Flughafen anfliegen sollen. Die ICAO hat entsprechend der Größe der erwarteten Flugzeuge sechs Flughafen-Klassen definiert⁴:

Code- buchstabe	Flügelspannweite (Wing span, WS)	Hauptfahrwerksbreite (Outer main gear wheel span, OMG)
A	WS < 15 m	OMG < 4,5 m
B	15 m ≤ WS < 24 m	4,5 m ≤ OMG < 6 m
C	24 m ≤ WS < 36 m	4,5 m ≤ OMG < 9 m
D	36 m ≤ WS < 52 m	9 m ≤ OMG < 14 m
E	52 m ≤ WS < 65 m	9 m ≤ OMG < 14 m
F	65 m ≤ WS < 80 m	14 m ≤ OMG < 16 m

Tabelle 1: ICAO Flughafen-Bezugscodes /ICAO99/

2.2 Rollverkehr und Flughafenbetrieb

In diesem Kapitel werden die betrieblichen und technischen Gegebenheiten der Rollverkehrsüberwachung und –steuerung vorgestellt. Darüber hinaus wird auf Maßnahmen und Forschungsvorhaben eingegangen, deren Ziel es ist, die Abwicklung des Rollverkehrs sicherer und zuverlässiger zu machen.

Ziel dieses Kapitels ist es, die Systemeigenschaften zu beschreiben, die der Modellierung in Kapitel 3 zu Grunde liegen. Wie in Kapitel 1 ausgeführt, ist das Erkenntnisobjekt der vorliegenden Arbeit der Rollverkehr der Flugzeuge am Boden. Der Verkehr der Flugzeuge im Flughafen-Nahbereich (Terminal Area) ist daher ebenso

⁴ Zusätzlich zu diesen sechs Größenklassen existieren noch vier Start-/Landebahnklassen mit Code-Nummern von 1 bis 4. Code-Nummer 4 umfasst alle Start- und Landebahnen mit einer Länge von über 1800 m (Aeroplane Reference Field Length). Da praktisch alle internationalen Verkehrsflughäfen, die potenziell Kapazitätsengpässe im Rollverkehrsbereich haben und damit für eine Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit in Frage kommen, der Klasse 4 angehören, wird auf eine Darstellung der Startbahn-Größenklassen in dieser Arbeit verzichtet.

wenig Gegenstand der folgenden Ausführungen wie die Optimierung der Landereihenfolge, der Start-/ Landebahnbelegung oder die Optimierung der Verteilung der Flugzeuge auf die Flugsteige (Gate-Belegung). Ziel der vorliegenden Arbeit ist es vielmehr, Kapazität und Zuverlässigkeit des Rollverkehrs am Boden zu steigern.

2.2.1 Die Funktionsbereiche Rollfeld und Vorfeld

Der Teil eines Flughafens, auf dem Flugzeuge am Boden rollen, setzt sich aus dem Rollfeld und dem Vorfeld zusammen. Das Rollfeld umfasst nach der Definition in /Fri00/ das Start- und Landebahnsystem, die Zu- und Abrollwege der Start- und Landebahnen sowie das Rollwegenetz, das die verschiedenen Systemelemente des Flughafens luftseitig miteinander verbindet (s. Abbildung 2-2).

Da im Rahmen dieser Arbeit der Rollverkehr am Boden betrachtet werden soll, werden die Start- und Landebahnen aus dem zu entwickelnden Modell ausgeklammert, da ihre Benutzung und Freigabe sich in jedem Fall eher nach den Erfordernissen des fliegenden Verkehrs als nach den am Boden rollenden Flugzeugen richtet.

Das Vorfeld (Apron) schließt an das Rollfeld an und wird landseitig vom Terminalgebäude, Hangars, Zäunen oder sonstigen Betriebsflächen begrenzt, die keine Flugzeuge tragen. Dies können beispielsweise gänzlich unbefestigte Flächen, Straßenzufahrten o.ä. sein.

Das Rollfeld (mit Ausnahme der Start- und Landebahnen) und das Vorfeld haben im Betriebsablauf des Flughafens vielfältige Aufgaben:

- Flugzeuge rollen hier beladen von der Landebahn zu Positionen am Terminal oder zu Vorfeld-Abfertigungspositionen oder von diesen beladen wieder zur Startbahn.
- Flugzeuge rollen ohne Ladung zu oder von sonstigen Betriebsflächen und Einrichtungen, z.B. einer Luftwerft. Solche Rollvorgänge schließen auch die Rollvorgänge voll betankter Flugzeuge ohne Nutzlast ein, die z.B. zu Überführungsflügen starten.
- Flugzeuge halten im Laufe ihrer Rollvorgänge vorübergehend an, oder aber sie werden auf Parkpositionen abgestellt.
- Flugzeuge werden auf den Vorfeldern be- und entladen, d.h. Fracht und Passagiere werden ausgetauscht.
- Flugzeuge werden auf den Vorfeldern mit Treibstoff und sonstigen Betriebsgütern versorgt sowie auch von innen wie von außen gereinigt, gewartet und enteist.

- Sonstige Fahrzeuge befahren das Vorfeld, die für die Versorgung der Flugzeuge notwendig sind, z.B. Passagierbusse, Tankwagen, Cateringfahrzeuge, Cargo Loader etc.

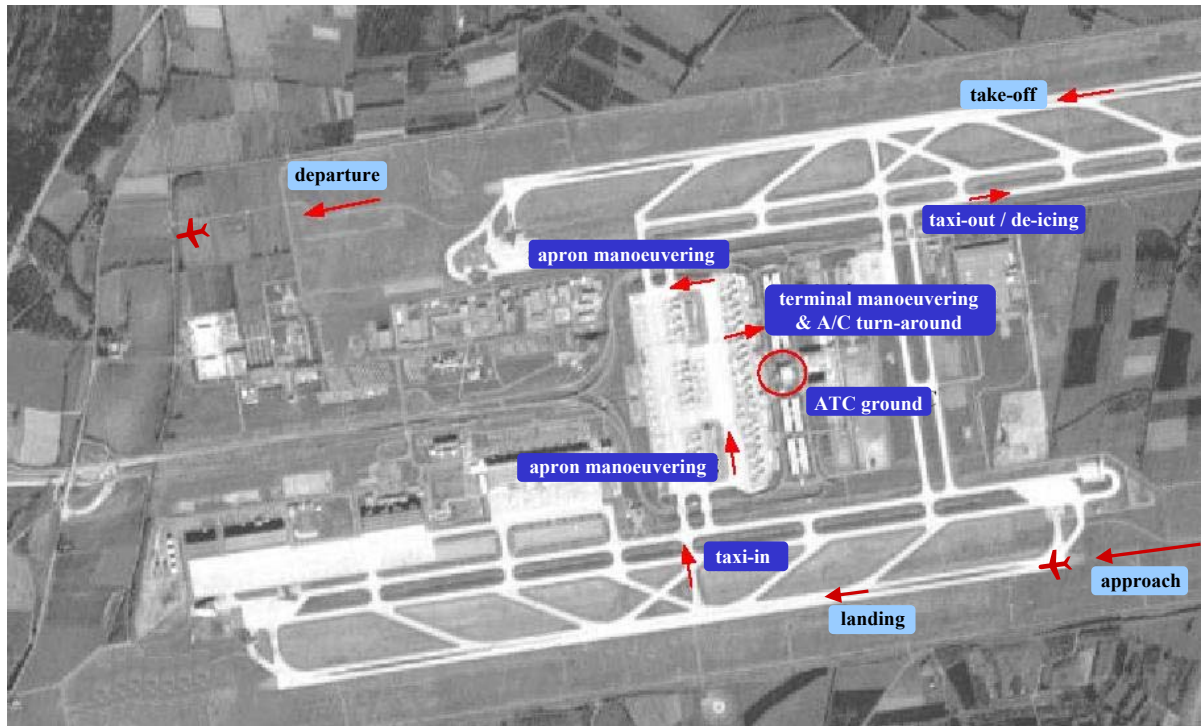


Foto: Flughafen München GmbH

Abb. 2-3: Prozesskette Boden-Rollverkehr
(eigene Darstellung in Anlehnung an /Eck03/)

Bild 2-3 zeigt die wesentlichen Prozessschritte für den Aufenthalt eines Flugzeugs an einem Flughafen, d.h. seine Landung, das anschließende Rollen zum Vorfeld (Taxi-in), eventuelles Manövrieren auf dem Vorfeld (Apron manoeuvring), das Einparken auf einer Terminal- oder Vorfeldposition mit anschließendem Ent- und Beladen sowie gegebenenfalls das Auftanken des Flugzeugs (der eigentliche Turn-around), das Zurückstoßen vom Terminal mit anschließendem Losrollen (Apron manoeuvring), das Rollen zum Startbahnkopf (Taxi-out), eventuell ein Enteisungsvorgang (De-icing) und der anschließende Start (Take-off).

Rollfeld und Vorfeld als Verkehrsbereiche setzen sich aus verschiedenen Elementen zusammen. Die wichtigsten hiervon sind:

- Rollwege:
 - Rollwege (Taxiways), u.U. mit Kurven
 - Schnellrollwege (High-speed taxiways)
 - Flugzeugposition-Erschließungsrollwege (Aircraft stand taxilanes)
 - nur in einer Richtung befahrbare Rollwege (one-way taxiways)

- Landebahn-Abrollbahnen:
 - Abrollbahnen (Runway exits)
 - Schnellabrollbahnen (High-speed exits)
- Rollwegkreuzungen
- Rollhaltepunkte bzw. – marken
- Rollwege auf Brücken bzw. Überführungen
- Haltebuchten / Ausweichstellen (By-pass taxiways)
- Flugzeugpositionen:
 - Parkpositionen am Terminal
 - Vorfeld-Parkpositionen
 - Zwischenparkpositionen (Remote holdings)
 - Abstellpositionen

Für die Dimensionierung der Rollwege liegen Empfehlungen der ICAO vor, die sich an den Flughafen-Bezugscode (s. Kapitel 2.1.3) orientieren. Ein Auszug aus dem Aerodrome Design Manual, Part 2, zeigt wichtige Eckwerte der Dimensionierung von Rollwegen:

Eigenschaft:	Code-Buchstabe					
	A	B	C	D	E	F
Breite der Rollweg-Befestigung (z.B. Beton)	7,5 m	10,5m	18 m	23 m	23 m	25 m
gesamte hindernisfreie Breite (taxiway strip)	32,5 m	43 m	52 m	81 m	95 m	115 m
Abstand zw. Rollweg-Mittellinie und Start-/Landebahn-Mittellinie (IFR, Klasse 4)	-	-	-	176 m	182,5 m	190 m
Abstand Rollweg-Mittellinie zu Rollweg-Mittellinie	23,75 m	33,5 m	44 m	66,5 m	80 m	97,5 m
maximal zulässige Steigung	3 %	3 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %

Tabelle 2: Kenngrößen der Rollweg-Dimensionierung /ICAO99/

2.2.2 Rollverkehrsführung

Die Funktion „Rollverkehrsführung“ wird international mit dem von der ICAO geprägten Begriff „Surface Movement Guidance and Control System (SMGCS)“ bezeichnet. Damit sind alle Systeme und Prozesse gemeint, die dazu dienen, den

Rollverkehr zu erfassen, zu kontrollieren, zu planen und zu führen, mithin die klassischen Funktionen der Flugsicherung für den Verkehr am Boden wahrzunehmen. Die einzelnen Funktionen bauen dabei aufeinander auf. Zusätzlich ist eine Rückkopplung vorhanden, da Ort und Richtung jedes einzelnen Flugzeugs nach dem steuernden Eingriff des Lotsen natürlich weiterhin zu überprüfen sind, um bei Erreichen eines Zwischenhalts eine neue Rollanweisung zu generieren und zu übermitteln. Die Funktion „Planung“ ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit:

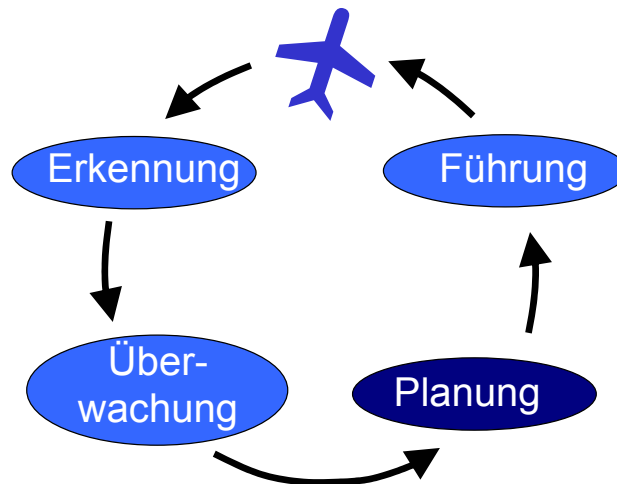


Abb. 2-4: Funktionen der Rollverkehrsführung
(eigene Darstellung)

Allerdings wird der Begriff „Rollverkehrsführung“ in der Literatur für eine im Vergleich zur heutigen betrieblichen Praxis (s. Kapitel 2.2.3) stärker automatisierte Abwicklung des Rollverkehrs verwendet, wie die folgende Definition zeigt, die /Glas93/ entnommen ist:

„[Rollverkehrsführung bezeichnet] die Gesamtheit aller technischen Einrichtungen und Verfahren für die teil- oder vollautomatisierte, rechnergestützte Erfassung, Kontrolle, Ablaufplanung und Führung des Rollverkehrs [...], um einen sicheren und zügigen Verkehrsfluss auf der Bewegungsfläche eines Flughafens zu gewährleisten.“

(/Glas93/, zitiert in /Mei98/)

Das All Weather Operations Panel (AWOP) der Internationalen Zivilluftfahrt - Organisation ICAO hat darüber hinaus Standards für die Entwicklung eines zukünftigen, autonomen und wetterunabhängigen Rollführungssystems definiert, das den Begriff SMGCS um den Begriff „Advanced“ zu einem künftigen, vollautomatischen „A-SMGCS“ erweitert. /Mei98/ (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.7)

2.2.3 Aktuelle betriebliche Verfahren

In der täglichen Praxis des Flugbetriebs wird die Führung des Rollverkehrs von Rollverkehrslotsen und Piloten weitgehend manuell vorgenommen.

Die an der Kontrolle und Führung des Rollverkehrs am Boden beteiligten Personen sind Tower-Lotsen, Ground- bzw. Apron-Lotsen sowie die Piloten und die Fahrer von Flugzeugen und Fahrzeugen, die sich auf Vorfeldern und Rollfeldern bewegen. Die Tower-Lotsen sind allein für die Belegung der Start- und Landebahnen verantwortlich; sie erteilen die Freigaben für Starts und Landungen, aber auch für jedes sonstige Befahren aktiver Start- und Landebahnen, z.B. durch Schneeräumfahrzeuge, oder für das Queren einer aktiven Bahn durch rollende Flugzeuge. Die Verantwortung für den übrigen Rollverkehr liegt bei den Ground-Lotsen, die mit den Piloten auf separaten Frequenzen kommunizieren⁵. In der Regel beginnt die Verantwortung der Ground-Lotsen unmittelbar mit dem Verlassen der Landebahn⁶. Je nach Zweckmäßigkeit und Flughafen-Topologie kann die Verantwortung auf mehrere Ground-Lotsen verteilt sein, z.B. bei mehreren räumlich getrennten oder sehr großen Vorfeldern, oder zwischen Rollfeld und Vorfeld (Apron). In Deutschland sind auf wenigen großen Flughäfen die Ground- bzw. Apron-Lotsen



Foto: DLR

Abb. 2-5: Lotsenarbeitsplätze im Tower, Flughafen München

⁵ Auch die Ground-Lotsen sitzen in der Regel im Kontrollturm, oft sogar im selben Raum wie die Tower-Lotsen. Der Begriff „Ground“ (GND) bezeichnet ausschließlich deren Verantwortungsbereich.

⁶ Standardmäßig lautet die letzte Anweisung, die der Tower-Lotse über Funk an einen gerade gelandeten Piloten gibt: „Upon vacating runway, contact [Name des Flughafens] ground on [GRD-Frequenz]“.

Angestellte der Flughafen-Betreibergesellschaft⁷. Auf den meisten Flughäfen jedoch ist die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) sowohl für den an- und abfliegenden als auch für den am Boden rollenden Verkehr verantwortlich. Die Tower-Lotsen sind immer Angestellte der DFS.

Rollverkehrsführung wird heute weitgehend manuell durchgeführt. Die Rollverkehrslotsen (Ground- oder Apron-Lotsen) beobachten den Verkehr vom Kontrollturm aus visuell (ggf. mit Fernglas) und hören Positionsmeldungen von Piloten über Sprechfunk (siehe Abbildung 2-5). Daraufhin legen sie im Rahmen der flughafen-spezifischen Betriebsverfahren die von den Flugzeugen zu befolgenden Rollrouten im eigenen Ermessen fest. Ebenfalls über Sprechfunk geben sie Rollanweisungen an die Piloten. In Europa sind diese Anweisungen in der Regel relativ detailliert. Die genaue Folge der zu befahrenden Taxiways bis zum Ziel wird vorgegeben. Auf großen, verkehrsreichen Flughäfen mit langen Rollrouten wird hierbei in der Regel über mehrere Zwischenpunkte geführt, an denen jeweils auf eine neue Freigabe zu warten ist.

Auf der freigegebenen Rollstrecke ist der Pilot jedoch selbst für die Einhaltung von Sicherheitsabständen, Vorfahrtsregeln etc. verantwortlich. Hierbei wie auch bei der Identifikation der vom Rollverkehrslotsen freigegebenen Rollstrecke helfen genaue Flugplatzkarten (s. Abbildung 2-7). Abbildung 2-6 zeigt die verschiedenen Funktionen der Rollverkehrsführung in ihrem zeitlichen Ablauf und ihrer Zuordnung zu den verschiedenen Akteuren.



Abb. 2-6: Struktur der Rollverkehrsfunktionen und -prozesse
 (eigene Darstellung, bereits veröffentlicht in /Busa02/)

⁷ Frankfurt/Main (FRA), Hamburg (HAM) und München (MUC)

In Nordamerika ist allerdings die Verantwortung jedes einzelnen Piloten noch ungleich größer: hier ist es oftmals sogar üblich, dass Piloten nach dem Verlassen der Landebahn einfach die Anweisung bekommen: „Taxi to your gate“. /Kron02/ Anschließend navigiert der Pilot dann auf dem Flughafen selbst wie ein Autofahrer im Straßenverkehr. Hierbei unterstützen ihn ebenfalls Flugplatzkarten. Piloten schätzen dieses Verfahren als effizient, da nicht an Holding-Punkten auf den „Rückruf“ des Rollverkehrslotsen gewartet werden muss. Das folgende Beispiel einer Flugplatzkarte des Flughafens Toronto macht allerdings deutlich, dass die Informationen, die der Pilot verarbeiten muss, oftmals sehr verwirrend sind und dieses Verfahren daher oft auch das Risiko großer Verspätungen birgt. Dies gilt umso mehr bei dichter werdendem Verkehr: es ist klar, dass ohne die zentrale Allokation von Ressourcen diese nicht optimal genutzt werden können; es wird also Kapazität verschenkt.

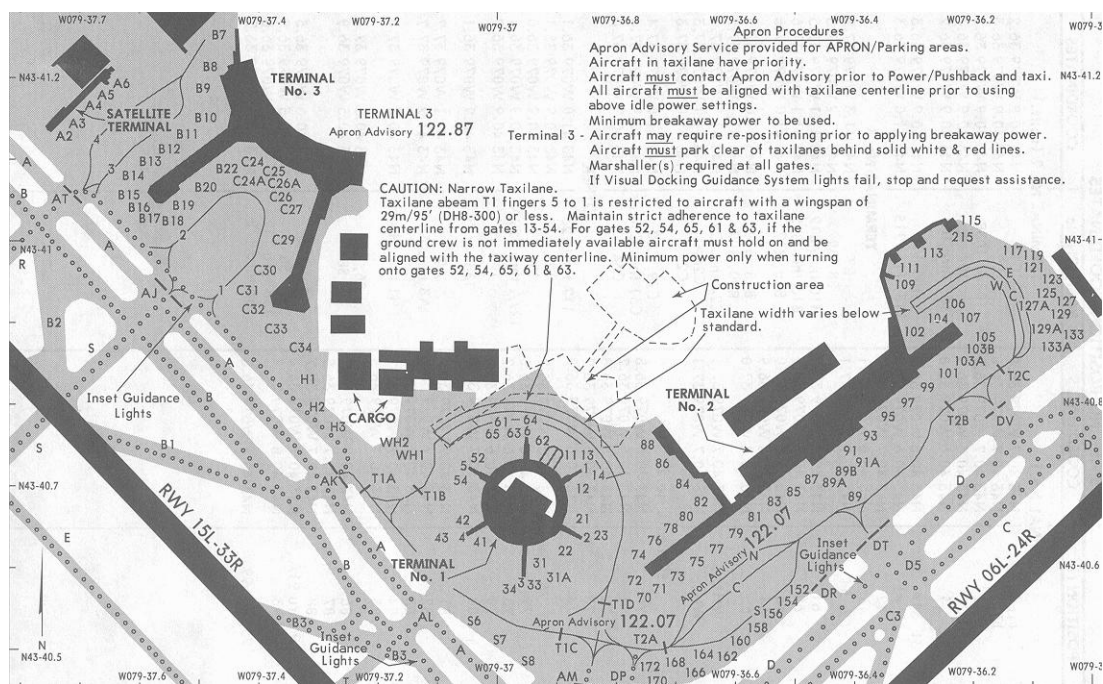


Abb. 2-7: Rollverkehrskarte (Taxi Chart) Flughafen Toronto (YYZ) (Ausschnitt)
(Quelle: Jeppesen Airway Manual)

2.2.4 Technische Systeme im Einsatz

Die Rollverkehrslotsen werden bei der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Steuerung des Rollverkehrs durch einige technische Systeme unterstützt.

Wichtigstes technisches Hilfsmittel ist der **Sprechfunk**. Der Frequenzbereich, der dem Flugfunk zugewiesen ist, reicht von 117,975 bis 137,000 MHz. Jeder Bereich,

der von Lotsen betreut wird, ist unter seiner charakteristischen Frequenz erreichbar. So wechselt z.B. ein Pilot nach erfolgter Landung beim Verlassen der Landebahn von der Frequenz des Towerlotsen auf die des zuständigen Ground-Lotsen.

Das **Flughafenradar** ist im Normalfall ein Primärradarsystem. Die Flugzeuge werden als Punkte auf dem Radarschirm abgebildet; sie können in der Regel nicht mit weiteren Informationen (Labels) korreliert werden⁸. Häufig werden diese Systeme unter Produktnamen wie z.B. ASDE (Airport Surface Detection Equipment) geführt. Die neutrale Bezeichnung lautet SMR (Surface Movement Radar).

Diese Systeme arbeiten mit mechanisch schnell rotierenden Antennen (Umlaufzeit ca. 1 sec.) und als Impuls-Radar bei einer Frequenz von ca. 20 GHz.

Das Sekundärradarsystem **SSR Mode A/C** ist als **Anflugradar** in Verwendung. Auch Sekundärradare arbeiten mit mechanisch rotierenden Antennen (Umlaufzeit ca. 4,8 sec.) und senden auf einer Frequenz von 1030 MHz. Hierbei wird das Flugzeug nicht nur wie beim Primärradar als Radar-Echo erkannt, sondern zusätzlich sendet ein im Flugzeug eingebauter Transponder auf einer anderen Frequenz (1090 MHz) mit genau definierter Antwortverzögerung eine Antwort. Die Antwort enthält im Mode A ein 12-bit-Datenwort, das der Pilot am Transponder für jeden Flug neu auf einen von der Flugsicherung vergebenen Wert einstellt („Squawk“-Code). /Fri96/ Aus der Laufzeit von der Abfrage bis zur Antwort und der Richtung der Antenne lässt sich dann die Position eines bestimmten Flugzeugs bestimmen.

Während diese Art von Sekundärradar für den fliegenden Verkehr weit verbreitet und das damit mögliche Labelling von Flugzeugen (d.h. dem Flugzeug wird in der Darstellung auf dem Radarschirm ein Label sichtbar zugeordnet, das Informationen über Flugnummer, Flugziel, Flugzeugtyp etc. enthält) sehr nützlich ist, ist es für die automatische Erfassung von Rollverkehr leider nicht von Nutzen. Dies hat vor allem zwei Gründe: zum einen ist die Entfernungsmessung durch Bestimmung eines Laufzeitunterschieds relativ ungenau (Auflösung ca. 100 m), was für die Ortung von Vorfeldverkehr keinesfalls ausreichend ist. Zusätzlich können sich Transponder-Antworten bei geringen Laufzeitunterschieden überlagern und sind dann nicht mehr decodierbar. /Mei98/ Zum anderen ist die Zahl der Transponder, die das Sekundärradar zur selben Zeit auflösen kann, begrenzt. Daher müssen Transponder am Boden stehender Flugzeuge abgeschaltet werden⁹.

Für die automatische Erfassung und Ortung von Rollverkehr am Boden kommt das Sekundärradar SSR Mode A/C daher nicht in Frage. /Mei98/

⁸ 2002 war am Flughafen München ein Labeling-System im Prototypen-Stadium realisiert, das Label der landenden Flugzeuge am Boden fortschreibt. Mit Zuverlässigkeits-Quoten von lediglich 80-90% war dieses System jedoch nicht zuverlässig genug, um z.B. bei schlechter Sicht die Flugzeuge nach Radar zu steuern.

⁹ Bei modernen Verkehrsflugzeugen wird der Mode A/C-Transponder im Normalfall im Moment des Aufsetzens durch einen Schalter im Fahrwerk automatisch abgeschaltet.

Anflugradare **SSR Mode S** stellen eine Erweiterung von SSR Mode A/C dar. Der wichtigste Unterschied ist, dass jedem Transponder ein unveränderlicher 24-bit-Code beim Einbau in ein Flugzeug fest zugeordnet wird, und die Transponder somit selektiv abgefragt werden können.

Die Transponder werden zwar am Boden nicht abgeschaltet, aber aufgrund der Antennencharakteristik sowie aus operationellen Gründen ist auch das SSR Mode S – Radar für die Erfassung von Verkehrsteilnehmern am Boden nicht geeignet.
/Mei98/

2.2.5 Technische Systeme für zukünftigen Einsatz

Außer den im vorigen Kapitel genannten, international gängigen Systemen zur Unterstützung der Abwicklung des Rollverkehrs sollen an dieser Stelle zwei Entwicklungen genannt werden, die in Zukunft eine größere Rolle bei der Rollverkehrsüberwachung spielen könnten, aber aus verschiedenen Gründen bisher noch nicht flächendeckend im Einsatz sind.

Auf Basis von SSR Mode S (siehe voriges Kapitel) wurde von der Firma Airsys ATM (früher: Siemens) gemeinsam mit dem Flughafen Frankfurt das System **TACSYS/CAPTS** entwickelt, ein Ortungssystem, das nach dem Multilaterationsprinzip arbeitet. Dabei werden die von den SSR Mode S – Transpondern gesendeten Squitter-Signale von mehreren, über den Flughafen verteilten Stationen empfangen. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten zu den verschiedenen Antennen, deren genaue Positionen bekannt sind, berechnet dieses System den Standort des Transponders. Zusätzlich findet eine Fusion mit Primärradar-Daten statt. Die Lageinformation ist viel genauer als bei SSR Mode S ohne Multilateration; die Position der Antenne am Flugzeug kann auf ungefähr 5m genau¹⁰ geortet werden¹¹.

Zusätzlich wurde am Flughafen Frankfurt eine Labeling-Komponente implementiert, die in der Bildschirm-Darstellung den Flugzeugen ihre jeweilige Kennung und die wichtigsten Daten zuordnet.

TACSYS/CAPTS ist am Flughafen Frankfurt/Main seit dem 01. Mai 2004 in der betrieblichen Erprobung; es liegen noch keine Erfahrungen mit der Akzeptanz des Systems durch die Rollverkehrslotsen vor.

Ein anderes Verfahren, das häufig mit der weiteren Entwicklung der Navigation in Verbindung gebracht wird (nicht nur im Luftverkehr) ist die **Satellitennavigation**. Drei verschiedene Systeme aus dieser Gruppe sind in Betrieb oder in Planung: das

¹⁰ In den Höfen zwischen den Terminal-Bereichen A und B sowie B und C wird durch Abschattungs-Effekte diese Ortungsgenauigkeit nicht erreicht.

¹¹ Allerdings ist damit noch nicht die genaue Ausdehnung des Flugzeugs bekannt. Erst diese Information, zusammen mit der genauen Richtung der Flugzeug-Längsachse, würde ein vollständiges Bild der Vorfeld-Belegung ergeben.

amerikanische **Global Positioning System (GPS)**, das russische **GLONASS** sowie das europäische **GALILEO**. Kernstück eines Satellitennavigationssystems sind Satelliten (beim GPS: 24 Stück), die auf Erdumlaufbahnen kreisen, ihre genaue Position kennen sowie mit je einer Atomuhr ausgestattet sind. Jeder dieser Satelliten funkt ununterbrochen seine Kennung, seine Position und die genaue Uhrzeit zur Erde. GPS-Empfänger am Boden oder innerhalb der Erdatmosphäre (also beispielsweise in Flugzeugen) empfangen diese Signale und können, sofern die Signale von mindestens vier Satelliten empfangen werden, daraus ihre Position bestimmen. Diese Ortung funktioniert in drei Dimensionen; es wird also nicht nur die Information über die genauen geographischen Koordinaten gewonnen, sondern zusätzlich eine Höheninformation, was dieses System für eine Anwendung in der Luftfahrt besonders interessant macht. Die Genauigkeit liegt derzeit bei ca. 15 m (vertikal) bzw. 30 m (lateral). Der Fehler hängt v.a. von der aktuellen Konstellation der Satelliten ab und ist daher zeitlich unterschiedlich groß, aber in einer Region zu einer bestimmten Zeit für alle Empfänger derselbe. Daher kann durch eine Bodenstation, die ihre genaue Position kennt, ein Korrekturfaktor ermittelt und an die Empfänger in einer Region übermittelt werden (Reichweite 300-500km). Dieses Verfahren wird Ground Based Augmentation System (GBAS) genannt. Die Genauigkeit kann damit auf 4-6 m verbessert werden.

GPS ist als Navigationsverfahren im Streckenflug zugelassen (*primary means of navigation*), allerdings nicht als alleiniges Navigationsverfahren (*sole means of navigation*). Für Anflüge ist die Zertifizierung von GPS in Vorbereitung¹². Hierfür müssen allerdings zunächst neue Verfahrenskriterien entwickelt werden, da sich GPS von der Funktionsweise her grundlegend von den bisherigen, winkelbasierten Anflughilfen (ILS) unterscheidet. /Schu04/ /Doe04/

Das in dieser Arbeit (Kapitel 3) entwickelte Optimierungsverfahren für den Rollverkehr benötigt, um automatisch ablaufen zu können, genaue Positionsinformationen aller Flugzeuge auf dem Rollfeld. Diese könnten entweder aus traditionell arbeitenden A-SMGCS-Systemen kommen wie den in Kapitel 2.2.7 skizzierten, oder aber mit Satellitennavigation gewonnen werden. Die grundsätzliche Funktionsweise und Wirksamkeit des Optimierungsverfahrens ist in beiden Fällen dieselbe.

2.2.6 Entwicklungsbedarf der Rollverkehrsüberwachung

Die in Kapitel 2.2.4 genannten Systeme, die heute zur Rollverkehrsüberwachung eingesetzt werden, sind recht elementare Hilfen für die Ortung von Rollverkehr. Dennoch sind noch nicht einmal sie an allen großen Flughäfen vorhanden. Nur

¹² Zunächst nur Betriebsstufe I, d.h. spätestens in einer Höhe von 60m/200ft muss Sichtkontakt zur Bahn bestehen (*Decision Height*).

Sprechfunk ist ein Minimal-Standard, der garantiert an jedem Flughafen anzutreffen ist. So verfügen beispielsweise so wichtige Flughäfen wie New York – John F. Kennedy (JFK; 30 Mio. Passagiere im Jahr) oder Mailand – Linate (LIN; 14 Mio. Passagiere im Jahr)¹³ nicht über ein Bodenradar. /Delv01/

Die Tatsache, dass die Rollverkehrslotsen auf Sichtkontakt zu jedem einzelnen Flugzeug angewiesen sind, führt dazu, dass bei einer Verschlechterung der Außensicht z.B. durch Nebel der Vorfeld-Betrieb stark beeinträchtigt wird, weil die Lotsen Flugzeuge nicht mehr eindeutig identifizieren können. Obwohl entsprechend ausgerüstete Flugzeuge auf Landebahnen, die mit einem Instrumenten-Landesystem der Kategorie IIIc ausgestattet sind, vollautomatisch landen können, sind auch deren Piloten für ihre Navigation am Boden nach dem heutigen Stand der Technik auf Außensicht angewiesen.

Dies führt dazu, dass die Kapazität des Rollfeldes bei schlechter werdender Sicht stark abnimmt, und dass Verspätungen stark zunehmen. Dies ist der Ansatzpunkt für ein A-SMGCS, wie es die ICAO definiert hat. Verschiedene Entwicklungsprojekte der letzten Jahre hatten zum Ziel, im Rahmen des A-SMGCS-Konzeptes den Automatisierungsgrad der Rollverkehrsführung zu erhöhen und den Vorfeldbetrieb damit unabhängiger von Witterungseinflüssen zu machen. Einige dieser Projekte werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

Abgesehen von den Kapazitätseinbußen, die bei schlechter Sicht auftreten, stellt die fehlende Möglichkeit zur Ortung auf Roll- und Vorfeldern allerdings auch ein ernsthaftes Sicherheitsproblem dar. In den letzten Jahren haben einige schwere Unglücke erneut ins Bewusstsein gerufen, dass das Rollen am Boden eine gefährliche Phase jedes Fluges ist. Am 31. Oktober 2000 begann eine Boeing 747-400 der Singapore Airlines mit dem Ziel Los Angeles auf dem Flughafen Taipeh (Taiwan) ihren Startlauf auf einer wegen Bauarbeiten gesperrten Startbahn und kollidierte einige 100 m später mit einem Schaufelbagger. 81 Passagiere verloren ihr Leben. Am 08. Oktober 2001 folgte auf dem Flughafen Mailand-Linate der Pilot eines Geschäftsreise-Jets vom Typ Cessna Citation CJ2 beim Taxiing in dichtem Nebel etliche Minuten lang einem anderen als dem ihm zugewiesenen Rollweg, überrollte nacheinander vier Stop-Zeichen, ohne per Funk Kontakt mit dem Tower aufzunehmen, und geriet so auf die aktive Startbahn, wo er den Startlauf einer Boeing MD-87 der skandinavischen Fluggesellschaft SAS kreuzte. Diese wurde so schwer beschädigt, dass sie nicht mehr steuerbar war und in einen Hangar raste. Hierbei waren 118 Menschenleben zu beklagen. /Kam04/ Beide Unfälle ereigne-

¹³ Die genannten Passagierzahlen beziehen sich auf die Jahre 2002 (JFK) und 1997 (LIN). Der Grund hierfür ist, dass seit der Inbetriebnahme des Flughafens Mailand-Malpensa im Jahr 1998 die Verkehrszahlen am Flughafen Linate stark zurückgegangen sind; die Passagierzahl des Jahres 1997 ist die des letzten kompletten Verkehrsjahres vor der Öffnung von Malpensa.

ten sich bei schlechter Sicht (wegen eines Unwetters im Fall von Taipeh, wegen Nebels in Mailand) und hatten als gemeinsame Hauptursache, dass die Piloten beim Rollen auf dem Flughafen die Orientierung verloren hatten. Dennoch hätten beide Unfälle vermieden werden können, wenn den Rollverkehrslotsen durch ein Bodenradar der tatsächliche Aufenthaltsort der jeweiligen Flugzeuge bekannt gewesen wäre, und sie die Piloten rechtzeitig auf ihren Irrtum hätten aufmerksam machen können. /Flt04/

Fehlende Orientierung auf dem Rollfeld ist einer Untersuchung der Eurocontrol zufolge die dritthäufigste Ursache für Unfälle am Boden. Starten ohne Starterlaubnis und Rollen auf die Startbahn ohne Freigabe führen noch häufiger zu Unfällen. /Lear04/ Beunruhigt sind Flugsicherheitsexperten vor allem deswegen, weil diese Tatsachen seit langer Zeit bekannt sind. Auch der schwerste Unfall in der Geschichte der Zivilluftfahrt, die Kollision zweier Boeing 747 am 27. März 1977 auf dem Flughafen Teneriffa-Los Rodeos (TFN), bei der 583 Menschen ihr Leben verloren, geschah beim Rollen am Boden in schlechter Sicht¹⁴. Wie die Unfälle vom Oktober 2000 und vom Oktober 2001 zeigen, haben sich Ausrüstung und Verfahren seitdem nicht entscheidend verbessert. Experten befürchten sogar, dass mit ähnlichen Unfällen bis zur flächendeckenden Einführung von A-SMGCS auch weiterhin gerechnet werden muss. /Flt04/

2.2.7 A-SMGCS

Das All Weather Operations Panel (AWOP) der Internationalen Zivilluftfahrt – Organisation ICAO hat mit seinen Standards für die Entwicklung eines zukünftigen Rollführungssystems (Advanced Surface Movement Guidance and Control System – A-SMGCS) das Ziel einer größeren Automatisierung der Überwachung und Führung des Rollverkehrs formuliert:

“An Advanced SMGCS (A-SMGCS) is expected to provide adequate capacity and safety in relation to the specific weather conditions, traffic density and aerodrome layout by use of modern technologies and a high level of integration between the various functionalities.”

(zitiert in /Klei97/)

Wichtigstes Ziel eines A-SMGCS ist es, den Lotsen eine automatische Lagedarstellung des am Boden rollenden Verkehrs zur Verfügung zu stellen, wobei neben der

¹⁴ Unfallursache war in diesem Fall allerdings nicht wie 2000 in Taipeh und 2001 in Mailand-Linate, dass Piloten am Boden die Orientierung verloren hatten, sondern das Starten ohne Startfreigabe, bis heute die häufigste Unfallursache am Boden. Dennoch hätte ein A-SMGCS auch diesen Unfall verhindern können, weil der drohende Zusammenstoß im Tower noch rechtzeitig hätte bemerkt werden können.

Erfassung der Flugzeuge auch die automatische Erkennung (*Labeling*) eine wichtige Forderung ist.

Zudem wird eine direkte Kommunikation von Bord- und Bodensystemen („Data Link“) angestrebt, d.h. die von der Flugsicherung generierten Anweisungen können ohne die Benutzung von Sprechfunk ins Cockpit übertragen werden. Hierdurch hofft man, die Kommunikation noch zuverlässiger zu machen.

Die Arbeiten im AWOP gehen hierbei von einem modularen Gesamtsystem aus, das sich in die Systeme zur Koordination und Steuerung anderer Flugphasen nahtlos einpasst und so letztendlich eine Führung von Flügen „Gate to Gate“ ermöglicht. /Klei97/

Mehrere Forschungsprojekte wurden in den letzten Jahren durchgeführt zur Entwicklung von Systemen, welche den Lotsen eine genauere Ortung und vor allem Identifizierung rollender Objekte ermöglichen sollten.

Das vom DLR in Braunschweig entwickelte System **TARMAC** (Taxi and Ramp Management and Control) stellt die vollständige Umsetzung eines funktionsfähigen A-SMGCS dar. Während der Projektlaufzeit (1997-2001) wurden die Komponenten

- *Controller Machine Interface* (TARMAC-PL) als Arbeitsplatz für den Lotsen,
- *Communication, Navigation, Surveillance* (TARMAC-CNS) als integriertes Multi-Sensor-System zur kontinuierlichen Ermittlung der Vorfeld-Verkehrslage, einschließlich Sensordatenfusion und Kommunikation der Lage,
- *Airborne System* (TARMAC-AS) zur Darstellung der mit TARMAC gewonnenen Information auf dem Navigation Display im Cockpit sowie
- TARMAC-EP als *Test- und Demonstrationsprogramm* unter realistischen Bedingungen

implementiert. Hierbei wurde allerdings auf ältere Entwicklungen aufgebaut. TARMAC ist als Entwicklungs- und Demonstrationssystem mit Funktionalitäten zu Analyse, Test und Simulation ausgestattet worden, die über die Erfordernisse eines alltagstauglichen A-SMGCS hinausgehen. Dafür wurden bewusst Abstriche bei anderen operationellen Eigenschaften in Kauf genommen, insbesondere bei der Echtzeitfähigkeit, der Zuverlässigkeit sowie der Berücksichtigung aller möglichen Betriebszustände. /DLR99/ Außer am Flughafen Braunschweig fand im Jahr 2000 auch ein Feldversuch des TARMAC-Systems am Flughafen Zürich statt.

Im Gegensatz dazu hatte das im 4. Rahmenprogramm der Europäischen Union geförderte Projekt **DEFAMM** (Development of Demonstration Facilities for Airport

Movement Guidance, Control and Management; Laufzeit 1995 bis 1998) das Ziel, ein funktionsfähiges A-SMGCS als Demonstrator aus bereits am Markt befindlichen Standardkomponenten aufzubauen. Dies gelang nur zum Teil, bzw. nicht mit der wünschenswerten Zuverlässigkeit. Die Erkenntnisse dieses Projektes halfen aber, die Anforderungen an TARMAC als Entwicklungsplattform zu präzisieren. /Klei97/

Das Anschlussprojekt von DEFAMM war das im 5. Rahmenprogramm der EU geförderte Projekt **BETA** (Operational Benefit Evaluation by Testing an A-SMGCS). Unter Federführung des DLR wurde von 2000 bis 2002 daran gearbeitet, mit TARMAC als technischem und konzeptionellem Rückgrat den Praxisnutzen, aber auch die praktische Umsetzbarkeit eines A-SMGCS nachzuweisen. /Roed00/ Obwohl nicht alle Ziele des Forschungsvorhabens erreicht wurden, war BETA dennoch ein großer Erfolg, da erstmals alle wesentlichen Komponenten eines A-SMGCS zusammen im planmäßigen Flugbetrieb getestet werden konnten. Diese Tests fanden an den Flughäfen Hamburg, Braunschweig und Prag statt. Einer der Höhepunkte der Arbeit an BETA war es beispielsweise, einen planmäßigen Turn-around der British Airways am Flughafen Prag vollständig ohne Sprechfunk-Kontakt zwischen Lotsen und Piloten, ausschließlich durch eine Data Link-Verbindung, abzuwickeln.

Insgesamt lässt sich also ein langsamer, aber stetiger Fortschritt der technischen Systeme im Bereich der Rollverkehrsüberwachung konstatieren. Das Interesse dieser Arbeit richtet sich dabei in erster Linie auf den Schritt der Planung (Abbildung 2-4). Im folgenden Kapitel soll daher auf diesen Aspekt bei bisherigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben eingegangen werden.

2.2.8 Rollverkehrsplanung

Die im vorigen Kapitel beschriebene automatische Überwachung und Erfassung des Rollverkehrs ist die Voraussetzung dafür, dass die verschiedenen, miteinander um die Ressourcen des Vorfeldes konkurrierenden Rollverkehrsvorgänge automatisch geplant werden können. Bisher geschieht die Planung durch die Rollverkehrslotsen manuell, das heißt aufgrund der gerade vorliegenden Informationen (Kontrollstreifen, vor allem aber Sichtinformation) im eigenen Ermessen und aufgrund von Erfahrung. Die Routen, die die Lotsen den Flugzeugen zuweisen, ergeben sich ebenfalls aus der Erfahrung heraus, welche Routen günstig sind bei bestimmten Verkehrsmustern und Betriebsrichtungen, aufgrund von Richtlinien, allerdings auch nach der Maßgabe, dass der Lotse den Überblick über das gesamte Verkehrsgeschehen nicht verlieren darf. So könnte z.B. eine „Einbahnregelung“ für bestimmte Rollwegabschnitte dadurch geboten sein, dass dann alle Flugzeuge in einer Richtung denselben Rollweg benutzen – selbst wenn dadurch einzelne Flugzeuge einen Umweg in Kauf nehmen müssen.

Sobald die Komponenten „Erkennung“ und „Überwachung“ im Rahmen eines A-SMGCS im Praxiseinsatz sind, wird eine automatisierte Planung möglich, d.h. die strategische Planung der anliegenden Rollverkehrsvorgänge mit Rechnerunterstützung.

In den vorgestellten Forschungsvorhaben der letzten Jahre war eine Planungskomponente ursprünglich jeweils mit vorgesehen. Allerdings ist diese erst dann sinnvoll, wenn die im Rollverkehrsführungs-Regelkreis (Abbildung 2-4) vorgeschalteten Prozessschritte „Erkennung“ und „Überwachung“ so zuverlässig und genau erfolgen, dass ein Planungsalgorithmus eine zuverlässige Grundlage für die Generierung von Vorschlägen hat. Geht der Planungs-Algorithmus von unzutreffenden oder ungenauen Positionsangaben für die zu planenden Flugzeuge aus, so werden die Vorschläge mit hoher Wahrscheinlichkeit obsolet sein.

Dies war der Fall beim Projekt BETA. In diesem Projekt, obwohl es das fortschrittlichste der bisher implementierten A-SMGCS war, war die Ortungsgenauigkeit noch nicht hoch genug, um sinnvoll automatisch planen zu können. Deshalb wurde auf die Umsetzung einer Planungskomponente verzichtet. /BETA02/

Die Vorschläge müssen mindestens die Qualität der Planung der Lotsen erreichen, um die Einführung eines A-SMGCS rechtfertigen zu können. Erfahrungen mit der Einführung bisheriger technischer Neuerungen folgend, muss die Qualität der automatisierten Planung sogar deutlich höher sein als die der Planung von Hand, damit diese sich durchsetzen kann. Im Fall eines Misserfolgs wäre die Akzeptanz weiterer technischer Neuerungen durch die Lotsen möglicherweise reduziert. Deswegen, aber natürlich auch wegen der stets zu garantierenden höchstmöglichen Sicherheit bei der Abwicklung des Verkehrs ist also ein Praxistest für einen zu entwickelnden Planungsalgorithmus nicht zu früh anzusetzen.

2.2.9 Rollverkehrssimulation

Die Simulation von Rollverkehr und von Luftverkehr erfolgt vor allem mit zwei Zielen: zum einen ist es durch Simulation möglich, Betriebsabläufe nachzubilden und auszutesten, ohne die Änderungen in der betrieblichen Wirklichkeit vorzunehmen. Zum anderen wird (v.a. Rollverkehr) simuliert mit dem Ziel, die Kapazität eines gegebenen oder geplanten Layouts zu ermitteln. Die dabei zum Einsatz kommenden Simulationsmodelle nehmen zumeist ein stochastisches Auftreten der Verkehrsvorgänge (Verspätungen) an, nicht jedoch stochastisch verteilte Dauern für einzelne Ereignisse.

Beispiele für Luftverkehrs-Simulationen, die bei Flughäfen, Forschungseinrichtungen oder der Flugsicherung eingesetzt werden, sind SIMMOD (SIMulation

MODEL), ursprünglich von der US-Luftfahrtbehörde FAA entwickelt und frei verfügbar, TAAM (Total Airport and Airspace Model) oder The Airport Machine (AM).

Die Simulation spielt außer in der Planung neuer Infrastruktur auch in der Systementwicklung eine große Rolle, weil das Zusammenspiel vieler Komponenten zunächst mit simulierten Ereignissen getestet werden kann. Außer dem Vorteil deutlich geringerer Kosten können mit einer Simulation oftmals auch Situationen oder Systemzustände untersucht werden, die im täglichen Betrieb so gut wie nie vorkommen.

In der Simulation von Straßenverkehr oder Fußgängerverkehr wird unterschieden zwischen makroskopischer und mikroskopischer Simulation des Verkehrs. Bei der makroskopischen Simulation erfolgt die Darstellung des Verkehrs als Verkehrsfluss ohne Betrachtung der einzelnen Verkehrsteilnehmer (Fußgänger oder Fahrzeuge). Hierbei werden Analogien zur Strömungsmechanik genutzt, um das Verhalten des fließenden Verkehrs adäquat darzustellen. Dieser Ansatz hat für Verkehrsströme (beispielsweise Autoverkehr in der Stadt oder auf der Autobahn sowie Fußgänger) eine lange Tradition und ist nach wie vor weit verbreitet.

Die mikroskopische Simulation, die in letzter Zeit mit der Zunahme preiswert verfügbarer Rechenleistung einen starken Bedeutungszuwachs erfahren hat, modelliert hingegen jeden einzelnen Verkehrsteilnehmer mit den ihm eigenen Verhaltensweisen. Hiermit können gerade komplexe Systeme gut abgebildet werden, weil das Verhalten jedes einzelnen Systemelementes modelliert werden kann. Allerdings ist dafür oftmals der Kalibrierungsaufwand einer mikroskopischen Simulation unverhältnismäßig hoch.

2.3 Kapazitätsengpässe im System Flughafen

Gründe dafür, dass ein Flughafen nicht die gesamte Nachfrage nach Start- und Landerechten (Slots) befriedigen kann, können an verschiedenen Stellen innerhalb oder außerhalb des Systems zu finden sein. Die Kapazität reduzierende oder begrenzende Faktoren können sein:

- Start- und Landebahnkapazität
- Anzahl der verfügbaren Flugsteige (Gates)
- Engpässe an vor- bzw. nachgelagerten Stellen (z.B. Luftstraßen oder Zielflughafen)
- landseitige Engpässe (Terminalgebäude, Zufahrten)
- Engpässe des Boden-Rollverkehrs (Rollwege, Vorfelder)

- Umweltfaktoren (Emissionen von Lärm oder Schadstoffen)
- Wetter (z.B. durch reduzierte Kapazität bei einer bestimmten Windrichtung)¹⁵
- Fluglotsen-Arbeitsbelastung
- Sicherheit

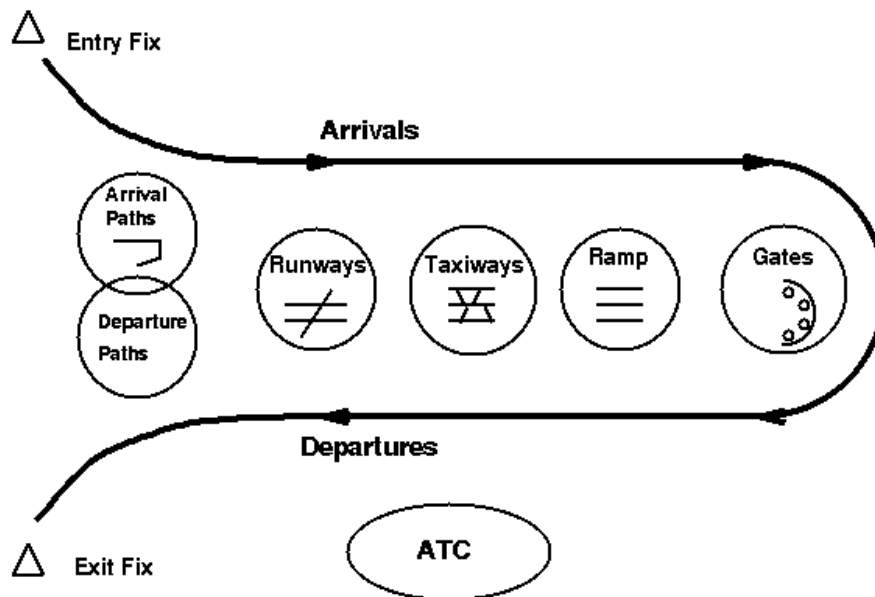


Abb. 2-8: Prozessschritte am Flughafen / mögliche Kapazitätsengpässe /Clar03/

Viele Flughäfen verfügen nicht über genügend Start- und Landebahnpkapazität, um die gesamte Nachfrage nach Slots zu befriedigen. Die einzelnen Staaten haben daher Flughafenkoordinatoren ernannt, die die knappe Ressource „Slots“ so an die nachfragenden Fluggesellschaften verteilen sollen, dass der Gesamtnutzen maximiert wird¹⁶. Es wird hierbei zwischen „koordinierten“ und „vollkoordinierten“ Flughäfen unterschieden. An koordinierten Flughäfen kommt es nur in einzelnen Zeitenlagen des Tages zu einem Nachfrageüberhang nach Slots. Hier findet deshalb keine Slotvergabe durch einen Koordinator statt, sondern ein „Schedule Facilitator“ spricht „Schedule Movement Advices“ aus, also Empfehlungen zur Verschiebung von Flügen in weniger nachgefragte Zeitenlagen. Beispiele für Flughäfen in dieser Situation sind die Flughäfen Hamburg oder Köln/Bonn. An vollkoordinierten Flughäfen hingegen besteht den ganzen Tag über ein Nachfrageüberhang nach Slots. Diese werden daher durch einen Koordinator vergeben und sind bindend. /EU93/ /EU04/ Dies trifft auf viele Flughäfen zu, so zum Beispiel die Flughäfen

¹⁵ Z.B. reduziert sich am Flughafen Boston/Logan bei ungünstiger Windrichtung die Start- und Landebahnpkapazität um über 30%.

¹⁶ In der Bundesrepublik Deutschland wird diese Funktion derzeit von Claus Ulrich wahrgenommen.

Frankfurt/Main (Bau einer vierten Bahn in Vorbereitung), London-Gatwick (nur eine Start- und Landebahn bei 30 Mio. Passagieren/Jahr), London-Heathrow, Paris-Charles de Gaulle oder Mailand-Malpensa. In der Literatur wird die Start- und Landebahnkapazität als häufigster und wichtigster Kapazitätsengpass angesehen. /Neuf03/

An anderen Flughäfen ist die Terminal-Kapazität der Engpass, so z.B. in Berlin-Tegel, wo nicht ausreichend Gates zur Verfügung stehen. Dieser Engpass lässt sich aber (wie das Beispiel Tegel zeigt) im Vergleich zu den vorgenannten leichter behelfsmäßig beheben, weil es (zumindest in Europa) nach wie vor nicht unüblich ist, Flüge mit fahrbaren Treppen auf dem Vorfeld abzufertigen. Allerdings kann auch die Kapazität der Warteräume für bereits eingeecheckte Passagiere ein Engpass sein.

Nachgelagerte Faktoren, die die Kapazität eines Flughafens negativ beeinflussen können, sind der umgebende Luftraum, bestimmte Luftstrassen oder Engpässe am Zielflughafen. Letztere beide Faktoren gelten naturgemäß nur für Abflüge, die dasselbe Zielgebiet (z.B. Nordatlantik) oder denselben Zielflughafen haben.

Der umgebende Luftraum kann ein Kapazitäts-Engpass sein, sofern natürliche Gegebenheiten (Berge, lärmschutzbedürftige besiedelte Gebiete) oder die räumliche Nähe mehrerer Flughäfen eine Abstimmung erforderlich machen. Ein Beispiel für dieses Problem ist das Multi-Flughafen-System von New York, bei dem die An- und Abflüge von 4 Flughäfen abgestimmt werden müssen (Abb. 2-9).

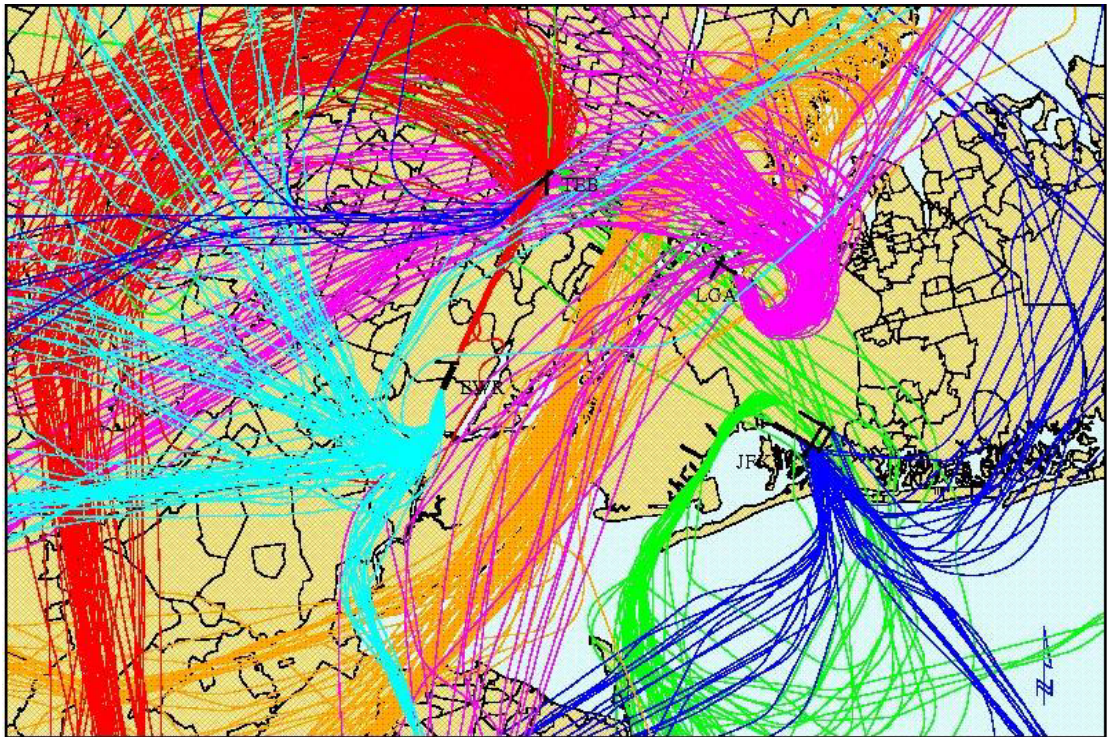


Abb. 2-9: An- und Abflugspuren zu den 4 New Yorker Flughäfen
JFK, Newark, LaGuardia und Teterboro /Clar03/

Außer diesen gängigen Engpässen gibt es aber auch noch andere Probleme, die einzelne Flughäfen betreffen können, und die von den individuellen Gegebenheiten vor Ort abhängen. So kommt es z.B. am Flughafen New York-Newark während der Stoßzeiten zu Staus, weil die Vorfahrten nicht mit dem Passagierwachstum Schritt gehalten haben und folglich zu bestimmten Zeiten nicht so viele Passagiere am Terminal abgesetzt werden, mit dem Taxi vorfahren oder aussteigen können, wie im Terminal abgefertigt werden und in Flugzeugen den Flughafen verlassen könnten. /Clar03/ Überraschender Weise war dieses Problem den am Prozess Beteiligten lange Zeit nicht bewusst, so dass der limitierende Faktor in Newark zunächst an anderen Stellen vermutet und gesucht wurde.

Ein anderer, häufig unterschätzter Engpassfaktor ist der Rollverkehr. Lange Zeit wurden Rollwege als unbegrenzte Ressource angesehen, die immer dann im gewünschten Umfang zur Verfügung stand, wenn die Start- und Landebahnen oder der Vorfeld/Gate-Bereich Verkehr erzeugten. Statistische Analysen belegen jedoch, dass dies immer weniger der Fall ist (s. Kapitel 2.4.4).

2.4 Ansätze zur Steigerung der Flughafenkapazität

2.4.1 Fließender Luftverkehr (Airborne Traffic)

Schon seit langem wird in einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen und Forschungsprojekten versucht, das Kapazitätsproblem von verschiedenen Seiten her anzugehen. Zunächst konzentrierten sich diese Maßnahmen auf die Flüssigkeit des Verkehrs insgesamt. Flüge wurden nicht mehr nur von den Flughäfen ausgehend geplant, sondern es werden seitdem von der europäischen Flugsicherungsbehörde Eurocontrol, und hier der Central Flow Management Unit (CFMU), nur noch solche Flüge geplant, für die Zeitnischen (Slots) für den gesamten Flugweg und für die Landung bereitgestellt werden können.

2.4.2 Start- und Landebahnsystem

Hinsichtlich der Flughäfen konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf den Bereich des Start- und Landebahn-Systems, wobei durch verschiedene Maßnahmen die mögliche Zahl landender oder startender Flugzeuge vergrößert werden konnte. Beispiele sind ein computergestütztes Festlegen der Landereihenfolge (Approach Sequencing), das durch ein ausgeklügeltes Aufeinanderfolgen von Flugzeugen verschiedener Gewichtsklassen, die daher verschiedene Staffelungsabstände einhalten müssen, erreicht werden kann. Ein anderes Beispiel sind Versuche mit einer verschobenen Landebahnschwelle (HALS/DTOP High Approach Landing System/Dual Threshold Operations) in Frankfurt. Diese Systeme, gepaart mit Verbesserungen beim Flugbetrieb unter schlechten Wetterverhältnissen (Instrumentenlandesysteme

höherer Kategorien), bewirkten immerhin, dass festgelegte Koordinationseckwerte für maximal abzuwickelnde Flüge nun auch tatsächlich unter allen Wetterbedingungen erreicht wurden.

Der Beitrag solcher Systeme zur Steigerung der Kapazität des Start- und Landebahnsystems als solches ist jedoch insofern begrenzt, als dass die Festlegung der Landereihenfolge jeweils nur für wenige Flugzeuge im Voraus erfolgen kann. Das tatsächliche Eintreffen der einzelnen Flugzeuge im Anflugbereich eines Flughafens ist entscheidend für die Festlegung der Landereihenfolge durch den Lotsen. Abweichungen von wenigen Minuten können die Entscheidungssituation hierbei bereits grundlegend verändern. Bei Flugdauern von bis zu 14 Stunden muss mit solchen Abweichungen jedoch stets gerechnet werden.

2.4.3 Gate-Zuweisung

Ein anderer Bereich, in dem rechnerbasierte Planungsunterstützung eine Verkürzung der Durchlaufzeiten (Turn-around), kürzere Wartezeiten und eine bessere Ausnutzung der Ressourcen gewährleisten soll, ist die Zuweisung der Abfertigungspositionen am Terminal (Gates) und auf dem Vorfeld. Gates unterscheiden sich durch die Größe landseitig vorzuhaltender Abfertigungseinrichtungen, z.B. der Warteräume für die bereits eingetragenen Passagiere oder die Möglichkeit, Passagiere ankommender Flüge aus Nicht-Schengen-Staaten¹⁷ nach dem Aussteigen zunächst einer Passkontrolle zuzuleiten. Die entsprechende Zuweisung der Gates zu ankommenden und abgehenden Flügen wird an fast allen Flughäfen bisher durch den Flughafen oder die Vorfeldkontrolle von Hand vorgenommen. Da die Komplexität des Problems der Gate-Zuweisung mit der Zahl der Gates und ggf. der Terminals stark ansteigt, sind in den letzten Jahren verschiedene rechnergestützte Verfahren und Modelle zur Verbesserung der Gate-Ausnutzung entwickelt und erprobt worden. /Chen96/, /Chen98/, /Mang85/, /Icte03/

2.4.4 Rollverkehr

Das Problem des Rollverkehrs als Kapazitäts-Engpass wurde erst später als die Kapazität des Start- und Landebahnsystems in Angriff genommen. In den gängigen Standardwerken zur Flughafenplanung wird das Thema in der Regel nur am Rande gestreift, oder es wird sogar explizit gesagt, dass die Rollwege an sich keine Kapazitätsprobleme kennen. /Horo94/

Diese Behauptung kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit anhand geeigneter Daten widerlegt werden.

¹⁷ Passagiere, die aus Mitgliedstaaten der EU einreisen, die das Schengener Abkommen ratifiziert haben, gelten als Inlandspassagiere.

Die folgende Grafik (Abbildung 2-10) zeigt die Aufteilung der Verspätungen am Flughafen Frankfurt nach Verspätungsursachen aufgeschlüsselt. Nach den wetterbedingten Verspätungen liegt die Flughafenkapazität mit 28,7% aller Verspätungen bereits an zweiter Stelle der Verspätungsursachen.

Dies lässt sich zumindest zum Teil auf Kapazitätsengpässe des Boden-Rollverkehrs zurückführen, da in Frankfurt als vollkoordiniertem Flughafen von vorneherein nur so viele Flüge geplant werden, wie Start- und Landerechte zur Verfügung stehen (Koordinationseckwert). Da zudem das Wetter als mögliche Ursache für ein Abfallen der tatsächlichen Kapazität über einen bestimmten Zeitraum separat erfasst wird, fallen in die Kategorie „Flughafenkapazität“ vor allem zwei Arten von Verzögerungen: Rollverkehrsbedingte Verzögerungen und Probleme mit der Anzahl zur Verfügung stehender Gates einerseits, sowie ungeplante Häufungen von Ankünften im Luftraum aufgrund stochastischer Abweichungen von den geplanten Flugzeiten¹⁸ andererseits.

Die Gate-Kapazität wird bei der Flugplanung mit berücksichtigt; zudem werden selbst Langstreckenflüge in Frankfurt bisweilen mit Fahrtreppen auf dem Vorfeld abgefertigt. Die Gate-Kapazität kann also in der Verspätungsursache „Flughafenkapazität“ keine große Rolle spielen¹⁹. Die Abweichungen von der geplanten Blockzeit wiederum gleichen sich zum Teil untereinander aus. Daher ergibt sich, dass Rollverkehrsverzögerungen die bei weitem überwiegende Ursache in der Ursachenkategorie „Flughafen-Kapazität“ sind.

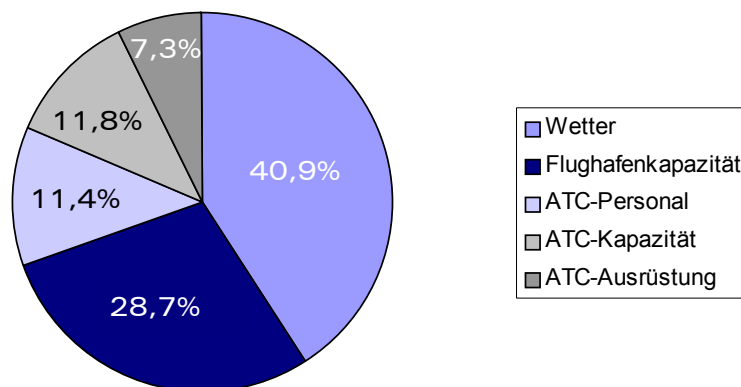


Abb. 2-10: Ursachen für verspätete Flüge am Flughafen Frankfurt/Main, Juli 2002 /DFS02/

¹⁸ Je länger ein Flug, desto wahrscheinlicher sind Abweichungen der geplanten Flugzeit auf Grund der Windverhältnisse. Hierbei kommen allerdings nicht nur Verspätungen, sondern auch zu frühe Ankünfte vor. Auch Abflugverspätungen fallen natürlich in diese Kategorie, sofern sie nicht während des Fluges wieder aufgeholt werden können.

¹⁹ Dies gilt wohlgerneht nur für die Gate-Kapazität als *Verspätungsursache*; die Flughafenkapazität bzw. die Anzahl der planbaren Flüge kann durch die Gate-Kapazität sehr wohl eingeschränkt werden.

Auch die Daten anderer Flughäfen belegen diese Vermutung. Die Auswertung von Daten der Lufthansa und der Iberia für An- und Abflüge in Madrid zeigen eine grosse Streuung der Werte insbesondere hin zu längeren Rollzeiten (Abbildung 2-11).

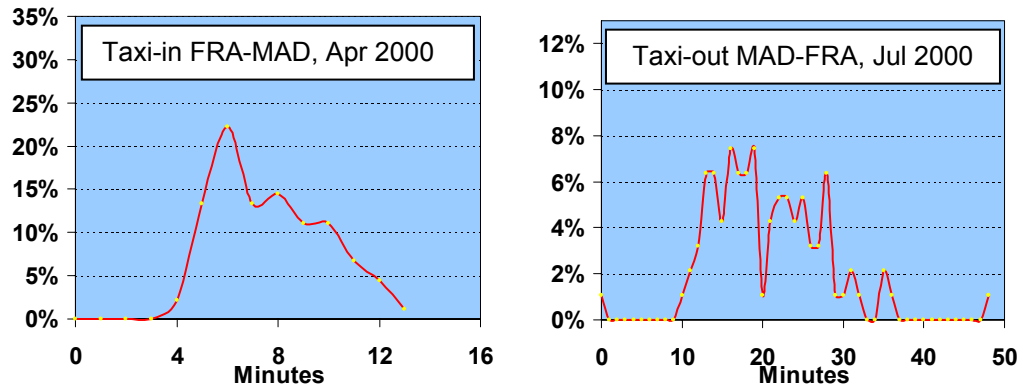


Abb. 2-11: Verteilung der Zeiten für Taxi-in und Taxi-out, Flüge Frankfurt-Madrid vv., Flughafen Madrid /Schn02/

Die offenkundig starke Abweichung der Daten von einer Normalverteilung zeigt, dass die Abweichung strukturelle Ursachen haben muss und sich keineswegs bloß mit zufälliger Streuung erklären lässt.

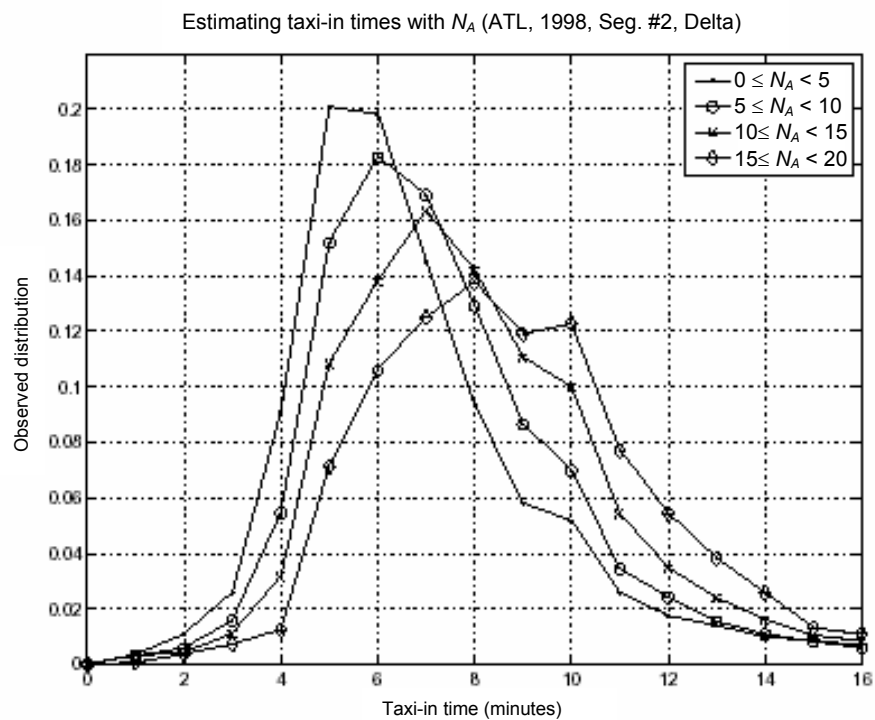


Abb. 2-12: Verteilung der Zeiten für das Taxi-in in Abhängigkeit der Zahl auf dem Vorfeld verkehrender Flugzeuge (N_A), Flughafen Atlanta /Carr01/

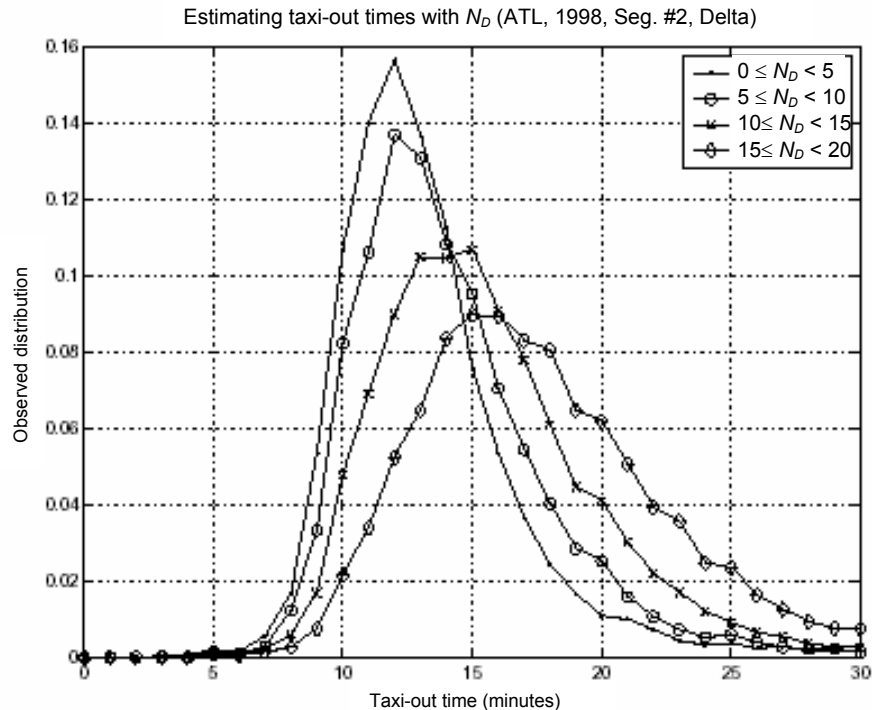


Abb. 2-13: Verteilung der Zeiten für das Taxi-out in Abhängigkeit der Zahl auf dem Vorfeld verkehrender Flugzeuge (N_D), Flughafen Atlanta /Carr01/

Sehr ähnliche Verteilungen sind bei entsprechenden Untersuchungen an nord-amerikanischen Flughäfen zu beobachten. Die Abbildungen 2-12 und 2-13 zeigen Daten von Taxi-in und Taxi-out auf dem Flughafen Atlanta.

Bemerkenswert ist hierbei zum einen die Tatsache, dass es sich um eine gegenüber der Normalverteilung nach rechts „verzerrte“ Verteilung handelt, wie sie z.B. durch eine Erlang-Verteilung beschrieben wird. Noch interessanter ist jedoch, dass die Form der Verteilung von der Rollverkehrsdichte auf dem Vorfeld nur mittelbar abhängig ist. Selbst bei weniger als 5 Flugzeugen, die auf dem Vorfeld eines Flughafens der Größe von Atlanta unterwegs sind, und wo folglich so gut wie keine gegenseitige Beeinflussung oder Behinderung der Rollvorgänge anzunehmen ist, liegt eindeutig eine Erlang-Verteilung und keine Normalverteilung vor. Die asymmetrische Verzerrung in Richtung längerer Rollzeiten muss folglich im Rollvorgang selbst, d.h. in der Interaktion von Pilot, Flugzeug, Rollverkehrslotse und Rollweg-System des Flughafens begründet sein. Sie lässt sich nicht in erster Linie mit Staus auf dem Rollfeld erklären.

Als Illustration für die besondere Störungsempfindlichkeit des Rollverkehrs, die das Auftreten einer Erlang-Verteilung erklären kann, sei an dieser Stelle ein Beispiel angeführt. Außer der begrenzten Anzahl von Gates und sonstigen Abfertigungspositionen ist ein zentrales Problem, dass aufgrund der Topologie vieler Vorfelder manche Rollwege oder -vorgänge einander blockieren.

In Abhängigkeit vom Layout des Terminals kann z.B. ein Zurückstoßen (Push-back) eines Flugzeugs von einem Gate weitere Gates blockieren. Abbildung 2-14 zeigt diesen Zusammenhang für den Flughafen Frankfurt/Main.



Foto: Dennis Bauer

Abb. 2-14: Flughafen Frankfurt/Main, Terminal 1: Teile der Flugsteige A (links) und B (rechts)

Durch die „Buchten“ zwischen den Flugsteigen A/B und B/C am Terminal 1 blockiert das Zurückstoßen (Push-back) eines Flugzeugs von einem der Flugsteige in diesem Bereich mehrere andere Flugsteige, die in dieser Zeit von anderen Flugzeugen nicht erreicht oder verlassen werden können.

Erst nach erfolgtem Push-back können die Triebwerke angelassen werden, was wiederum Voraussetzung für das Losrollen eines Flugzeugs ist. Ein kompletter Push-back-Vorgang dauert laut Beobachtungen am Flughafen Frankfurt in der Praxis z.B. bei einem Flugzeug vom Typ Boeing 747 zwischen 2 und 7 Minuten, wobei die Rollverkehrslotsen keine Möglichkeit haben, für einen konkreten Vorgang die Dauer vorher abzuschätzen. Dies erklärt die Instabilität des Prozesses und macht deutlich, warum eine effiziente Planung in diesem Bereich so schwierig, zugleich aber auch so wichtig ist.

Ein anderer Indikator für die im Vergleich zu den sonstigen Kapazitätsproblemen der Flughäfen noch schneller steigenden Probleme des Rollverkehrs ist der wachsende Platzbedarf größerer Flugzeuge auf dem Vorfeld. Während größere Flugzeuge in der Regel als eine Lösung des Problems der Flughafenkapazität angesehen werden, weil sie einen gleich großen oder nur unwesentlich größeren Bedarf an

Start- und Landebahnkapazität haben im Vergleich zu kleineren Flugzeugen, und damit einen geringeren Bedarf an Start- und Landebahnkapazität pro Sitzplatz, stellt sich die Lage am Boden anders dar. Wie Abbildung 2-15 zeigt, steigt mit größer werdenden Flugzeugen der Bedarf an Vorfeldfläche pro Flugzeug, und zwar fast linear mit der Anzahl der Passagiere.

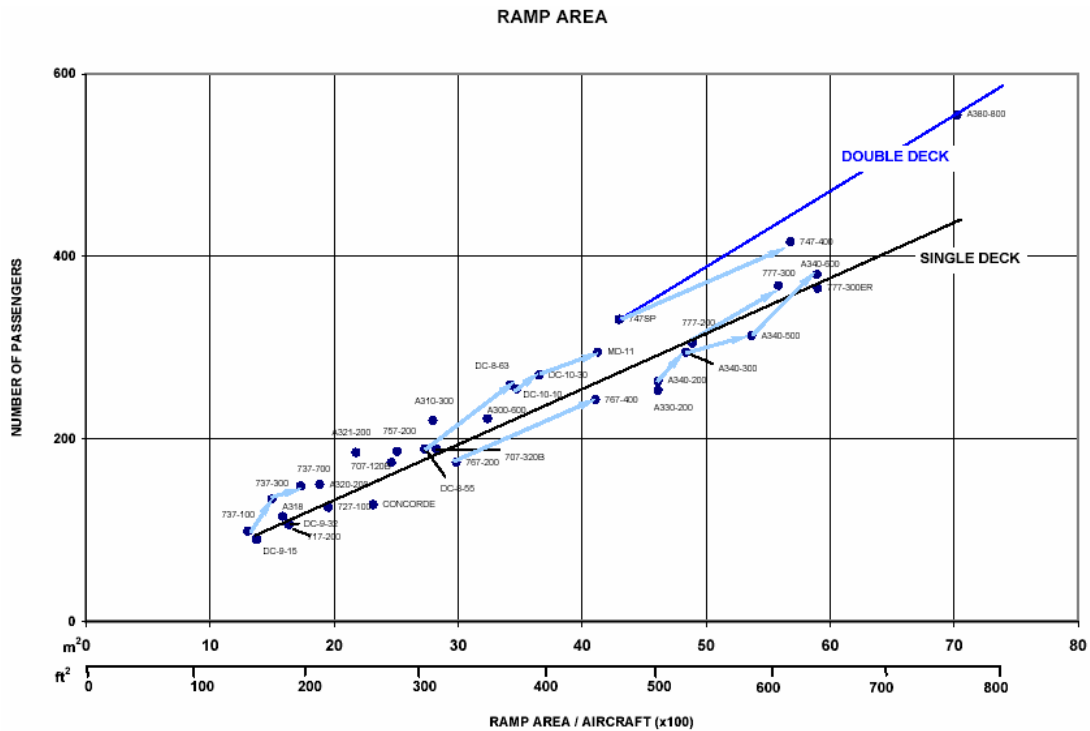


Abb. 2-15: erforderliche Rollfeldfläche vs. Passagierkapazität /IIWG03/

2.4.5 Ansatz dieser Arbeit

Von den in diesem Kapitel vorgestellten Themenfeldern, die Potenziale zur Steigerung der Flughafen-Kapazität erwarten lassen, soll in dieser Arbeit derjenige des Boden-Rollverkehrs näher betrachtet werden. Es wurde gezeigt, dass durch eine verbesserte Planung in diesem Bereich noch deutliche Kapazitätsreserven zu erwarten sind.

Im folgenden Kapitel (3) soll daher der Rollverkehr mit dem Ziel der Planung modelliert werden.

3 MODELLIERUNG DES ROLLVERKEHRS

3.1 Vorgehen

Zur Modellierung des Rollverkehrs sollen der Begriff „Graph“ sowie einige weitere Grundbegriffe der Graphentheorie, und damit die in dieser Arbeit verwendete Terminologie, eingeführt werden. Dann werden grundlegende Graphenalgorithmien vorgestellt. Um deren Nutzen für den vorliegenden Anwendungsfall zu belegen, wird anschließend ihre Eignung für eine Implementierung des vorliegenden Problems „Flughafen-Vorfeld“ diskutiert.

Diese Grundlagen schaffen die Voraussetzung, anschließend ein Modell des Flughafen-Boden-Rollverkehrs zu entwickeln. In einer Zielfunktion wird das Optimierungsziel formuliert. Die für die Modellierung als Graph wichtigen Eigenschaften des Flughafen-Vorfeldes und des Verkehrs werden benannt. Schließlich werden die vorgestellten Algorithmen und die beschriebenen Charakteristika des Rollverkehrs zu einem neuen Algorithmus zusammengeführt.

3.2 Grundbegriffe der Graphentheorie

3.2.1 Entwicklung der Graphentheorie

Die Grundlagen der Graphentheorie wurden von dem Schweizer Mathematiker Leonhard Euler gelegt, der nach einer Lösung bzw. dem Beweis der Nicht-Lösbarkeit des Königsberger Brückenproblems suchte. Das Königsberger Brückenproblem besteht in der Frage, ob es einen Spaziergang gibt, bei dem man jede der sieben Brücken über den Pregel genau einmal überquert, und der am Ausgangspunkt endet. /Fou92/

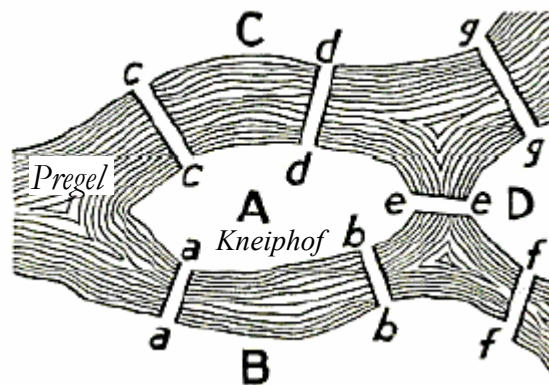


Abb. 3-1: Geographische Karte: Königsberg im 18. Jahrhundert /Wag04/

Die Einwohner der Stadt und ihre Gäste hatten schon lange vergeblich nach einem solchen Spazierweg gesucht, so dass es niemanden wirklich überraschte, als Leonhard Euler in seinem Aufsatz „Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis“ (1736) den Nachweis führte, dass es keinen solchen Spaziergang geben konnte.

In diesem Aufsatz führte er die formale Definition von Graphen ein. Beim Graphen des Königsberger Brückenproblems ist jede Uferseite bzw. Insel ein Knoten und jede Brücke eine Kante:

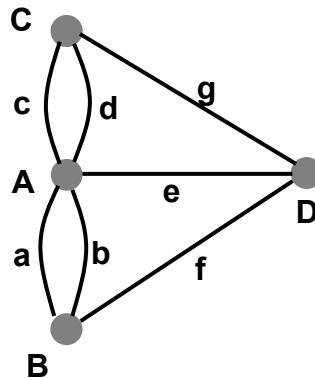


Abb. 3-2: Graph des Königsberger Brückenproblems
(eigene Darstellung)

Eulers Beweis liegt die Feststellung zu Grunde, dass es einen *Pfad* (s. Kapitel 3.2.4) mit den genannten Eigenschaften (jede Kante genau einmal enthalten und Rückkehr zum Ausgangspunkt) genau dann gibt, wenn alle Knoten des Graphen einen geraden Grad haben, d.h. eine gerade Anzahl von Kanten an einem Knoten beginnt.

Graphentheorie wurde lange Zeit als Denksport angesehen; erst das verstärkte Interesse an Netzwerken einerseits sowie die rapide steigende verfügbare Leistung von Elektronenrechnern andererseits führte Graphen in den letzten Jahrzehnten einer breiteren Anwendung zu. Graphen sind ideal zur Analyse verschiedener Arten von Netzwerken, z.B. für Gleisnetze, Strassenkarten, Telefonnetze, Computer-Netzwerke und viele mehr. Sie eignen sich aufgrund ihrer Beschreibbarkeit in Form diskreter Matrizen auch zur Lösung komplexerer linearer Programme. /Bou03/

Im Fall der vorliegenden Arbeit soll das Flughafen-Vorfeld mit seinem Netz aus Rollwegen als Graph dargestellt werden.

3.2.2 Ungerichtete Graphen

Ein *ungerichteter Graph* G ist ein Paar $G = (V, E)$ disjunkter Mengen mit $E \subseteq V \times V$, d.h., die Elemente von $E = \{\{u_1, v_1\}, \{u_2, v_2\}, \{u_3, v_3\}, \dots\}$ sind 2-elementige Teilmengen von $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$. Die Elemente von V sind die Knoten (engl. *vertices*),

die Elemente von E die Kanten (engl. *edges*) des Graphen G . /Die96/ Hieraus folgt, dass die Kanten jeweils durch zwei Knoten definiert werden, die sie verbinden. In einem ungerichteten Graphen haben die Kanten keine Orientierung, d.h. die Reihenfolge der beiden Knoten, die eine Kante definieren, ist hierbei zunächst einmal gleichgültig. Kanten, die am selben Knoten beginnen und enden, werden *Schlinge* genannt.

Der Graph G auf $V = \{1, \dots, 5\}$ mit der Kantenmenge $E = \{\{1,2\}, \{1,4\}, \{1,4\}, \{2,4\}, \{2,5\}, \{4,4\}\}$ lässt sich z.B. wie folgt darstellen:

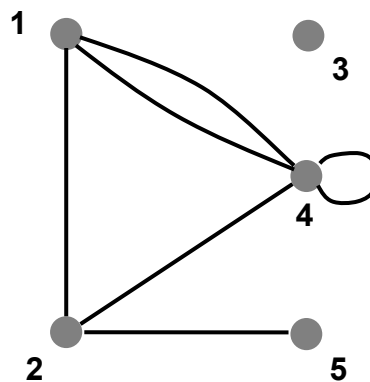


Abb. 3-3: ungerichteter, ebener Graph
(eigene Darstellung)

Der *Grad* eines Knotens n entspricht der Anzahl der Kanten, die in diesen Knoten hinein- oder aus ihm herausführen. Entsprechend dieser Definition hat beim Graphen in Abbildung 3-3 der Knoten 2 den Grad 3, der Knoten 3 den Grad 0 und der Knoten 4 den Grad 5. Graphen, die sich so zeichnen lassen, dass sich ihre Kanten (außer in Knoten) nicht schneiden, werden *planare* Graphen genannt. Graphen, die auch tatsächlich so gezeichnet sind, dass sich ihre Kanten nicht schneiden, werden *ebene* Graphen genannt. /Fou92/ Die bildliche Darstellung des Graphen ist eine Frage der Zweckmäßigkeit wie der Ästhetik; seine formale Definition ist von der bildlichen Darstellung unabhängig. /Die96/

Der Graph aus Abbildung 3-3 ist offensichtlich ungerichtet, planar und eben.

Zwei Graphen $G = (V, E)$ und $H = (W, F)$ heißen *isomorph*, wenn sie – bis auf die Benennung der Knoten und Kanten – identisch sind. /Grö00/ Ein Graph heißt *zusammenhängend*, falls es von jedem Knoten s in G zu jedem anderen Knoten $t \neq s$ in G mindestens einen $\{s, t\}$ -Weg in G gibt. Der Graph in Abbildung 3-3 ist dieser Definition zufolge offensichtlich nicht zusammenhängend, weil Knoten 3 isoliert ist und über keine Kante erreicht werden kann.

3.2.3 Digraphen

In einem *gerichteten* Graphen $D = (V, A)$ (auch als *Digraph* bezeichnet, von engl. *directed graph*) ist A die Menge der gerichteten Kanten oder auch *Bögen* (engl. *arcs*). Ein Bogen $a = (u, v)$ ist ein geordnetes Paar von Knoten; u ist der Anfangs- oder Startknoten, v der End- oder Zielknoten von a ; u heißt Vorgänger von v , v heißt Nachfolger von u . Die Bögen (u, v) und (v, u) heißen *antiparallel*. /Grö00/

Ein Digraph D auf $V = \{1, \dots, 5\}$ mit der Bogenmenge $A = \{(1, 2), (1, 4), (2, 4), (2, 5), (4, 1), (4, 4)\}$ lässt sich z.B. wie folgt darstellen:

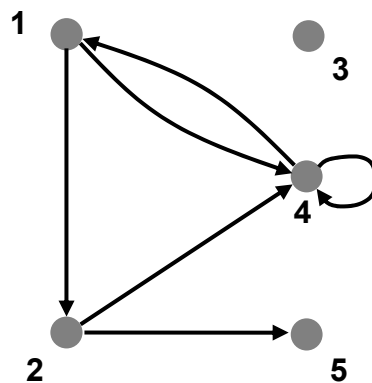


Abb. 3-4: gerichteter Graph
(eigene Darstellung)

Darüber hinaus können Kanten $\{u, v\}$ und Bögen (u, v) Werte λ_{uv} zugeordnet sein, die Kanten- bzw. Bogengewichte genannt werden. In der Literatur werden Kantengewichte bisweilen auch einfach als „Länge“ einer Kante bezeichnet. /Gond84/ Dies gibt bereits einen Hinweis auf einen wichtigen Anwendungsbereich der Graphentheorie: Graphen mit gewichteten Kanten und Bögen spielen eine große Rolle in der Modellierung von Netzwerken, da die Kantengewichte beispielsweise Entfernungen oder Fahrzeiten symbolisieren können. Wenn man im Falle des Digraphen aus Abb. 3-4 dem Bogen $(1, 2)$ das Gewicht $\lambda_{12} = 4$, dem Bogen $(1, 4)$ das Gewicht $\lambda_{14} = 7$, dem Bogen $(2, 4)$ das Gewicht $\lambda_{24} = 2$, dem Bogen $(2, 5)$ das Gewicht $\lambda_{25} = 3$, dem Bogen $(4, 1)$ das Gewicht $\lambda_{41} = 3$ sowie der Schlinge $(4, 4)$ das Gewicht $\lambda_{44} = 1$ zuweist, so ergibt sich folgender Graph:

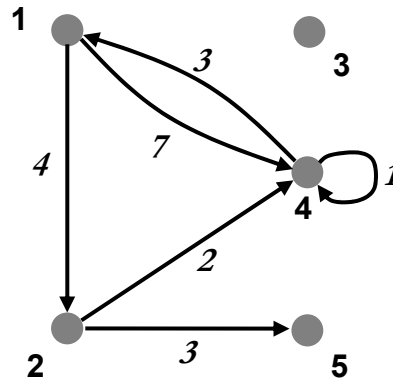


Abb. 3-5: Digraph mit gewichteten Bögen
(eigene Darstellung)

Außer mit der Länge kann das Kantengewicht auch mit einer anderen Bedeutung belegt sein, z.B. mit einer Fahrzeit (die natürlich im Regelfall v.a. von der Länge abhängen wird) oder Kosten, die z.B. besonders stark nachgefragte Kanten oder Bögen im Verhältnis zu Länge oder Fahrzeit überproportional teuer machen. Algorithmen, die in einem gewichteten Graphen Wege mit bestimmten Eigenschaften finden, können je nach Bedeutung der Kantengewichte den kürzesten, den schnellsten oder den kostenminimalen Weg finden. Einige dieser Algorithmen werden in Kapitel 3.4 vorgestellt.

Ein Digraph heißt *zusammenhängend*, wenn es von jedem Knoten in D einen Weg zu jedem anderen Knoten in D gibt; auch solche Wege, die Bögen entgegen ihrer Richtung mit einschließen, machen einen Digraphen zusammenhängend. Ein Digraph heißt *stark zusammenhängend*, falls es zu je zwei Knoten s und t von D sowohl einen gerichteten (s, t) -Weg als auch einen gerichteten (t, s) -Weg in D gibt. /Grö00/

3.2.4 Kette, Pfad und Weg²⁰

Wenn für einen Graphen oder Digraphen eine endliche Folge

$$W = (v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, e_k, v_k)$$

definiert ist mit $k \geq 0$, einem Knoten als Anfangs- und einem Knoten als Endpunkt, und in der Knoten und Kanten bzw. Bögen im Wechsel auftreten, so dass jede Kante bzw. jeder Bogen von ihrer bzw. seinem Start- und Zielknoten eingefasst ist, so heißt W eine *Kette* oder eine $\{v_0, v_k\}$ -Kette. Die Zahl k heißt die Länge der Kette W (= Anzahl der Kanten bzw. Bögen in W).

²⁰ /Grö00/ nennt alleine für den Begriff „Kette“ vier verschiedene in der Literatur gebräuchliche Begriffe, nämlich „Kette“, „Kantenzug“, „Kantenfolge“ und „ungerichtete Pfade“. Die Terminologie in dieser Arbeit folgt der von /Grö00/ verwendeten.

Von einer *gerichteten Kette* oder einer (v_0, v_k) - Kette spricht man dann, wenn in einem Digraphen alle Bögen einer Kette W die Form (v_{i-1}, v_i) haben, also gleichgerichtet sind.

Eine Kette, in der alle Kanten oder Bögen voneinander verschieden sind, wird als *Pfad* bezeichnet; eine Kette, in der alle Knoten voneinander verschieden sind, als *Weg*. Somit ist jeder Weg ein Pfad, aber nicht jeder Pfad ein Weg, weil der Pfad offenkundig seinen eigenen Verlauf in einem Knoten kreuzen kann, falls dieser Knoten mindestens den Grad 4 hat; beim Weg ist dies nicht zulässig. In einem Digraphen sind Pfad oder Weg dann ein *gerichteter Pfad* oder ein *gerichteter Weg*, falls diese eine gerichtete Kette sind. Analog zur Bezeichnung bei Ketten spricht man von $\{u,v\}$ -Wegen und (u,v) -Wegen bzw. -Pfad.

Eine Kette heißt *geschlossen*, falls ihre Länge > 0 ist und falls ihr Anfangsknoten zugleich ihr Endknoten ist. Eine geschlossene Kette, in der jeder Knoten nur einmal vorkommt, heißt *Kreis*; eine geschlossene gerichtete Kette heißt *gerichteter Kreis*.

3.2.5 Datenstrukturen zur Speicherung von Graphen

Graphen können mit Hilfe verschiedener Datenstrukturen gespeichert werden, die jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben – insbesondere im Hinblick auf ihre elektronische Speicherung im Zuge der Implementierung eines als Graph formulierten Flughafenmodells in einer Entwicklungsumgebung, wie z.B. im Falle der vorliegenden Arbeit in MATLAB. Gängige Datenstrukturen zur Speicherung von Graphen sind Kanten-/Bogenlisten, Adjazenzmatrizen und Adjazenzlisten.

Zur Auswahl der geeigneten Datenstruktur müssen die Vor- und Nachteile der betrachteten drei Speicherformen abgeschätzt werden. Hierbei müssen zwei Parameter beachtet werden: Der Aufwand beim Durchsuchen des Graphen sowie der Aufwand an Speicherplatz. /Grö00/

Während Kanten- bzw. Bogenlisten am wenigsten Speicherplatz benötigen, sind sie auch die unstrukturierteste Speicherform, so dass im schlechtesten Fall die gesamte Liste durchsucht werden muss, bevor eine bestimmte Kante gefunden wird ($2m$ Abfragen). Im Vergleich dazu benötigt man bei einer Adjazenzmatrix nur eine einzige Abfrage, um beantworten zu können, ob eine bestimmte Kante oder ein bestimmter Bogen im Graphen enthalten ist. Der Arbeitsaufwand für das Durchsuchen einer Adjazenzliste liegt zwischen diesen beiden Extremen, da nur die Nachbar- bzw. Nachfolgerliste des betreffenden Knoten zu durchsuchen ist (maximal Grad von v Abfragen).

Bei dünn besetzten Graphen kommt die Speicherung in einer Adjazenzmatrix normalerweise nicht in Frage, da zu viel Platz vergeudet wird. Die Speicherung in

einer Adjazenzliste stellt hingegen einen guten Kompromiss zwischen Speicherplatzbedarf und Abfrageaufwand dar.

Der Graph eines Flughafens ist, wie bei Verkehrsnetzwerken normalerweise der Fall, ein ausgesprochen dünn besetzter Graph ($m \approx n$). Daher fällt für die Implementierung im Rahmen dieser Dissertation die Entscheidung zugunsten der *Bogenliste*, die im Folgenden vorgestellt wird. Diese Entscheidung fällt auch im Hinblick darauf, dass die Entwicklungsumgebung MATLAB mit dem strukturierten Feld (*structure array*) ein sehr vielseitiges Datenformat bereitstellt, in dem außer den hier genannten Informationen der Bogenliste auch noch andere Daten gespeichert werden können; im Fall des hier implementierten Optimierungsalgorithmus z.B. die geographischen Koordinaten jedes einzelnen Knotens (s. Kapitel 3.7.1).

Kanten- bzw. Bogenlisten sind die einfachste Art, Graphen bzw. Digraphen zu speichern. Ist $G = (V, E)$ ein Graph mit $n = |V|$ Knoten und $m = |E|$ Kanten, so lautet die Kantenliste in allgemeiner Form:

$$n, m, u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, \dots, u_m, v_m$$

wobei u_i, v_i die beiden Endknoten der Kante i sind. Die Reihenfolge sowohl des Aufführens der Endknoten von i als auch der Kanten selbst ist beliebig. Bei Schlingen wird der Endknoten, wie auch in der Kantenmenge unter 3.2.2, zweimal aufgelistet. Eine mögliche Kantenliste für den Graphen aus Abbildung 3-3 ist die folgende:

$$5,6,1,2,1,4,1,4,2,4,2,5,4,4$$

Eine Bogenliste sieht ähnlich aus; allerdings ist jetzt darauf zu achten, dass für jeden Bogen zuerst der Start- und dann der Endknoten aufgeführt wird. Die Reihenfolge der Knoten trägt in diesem Fall zusätzlich die Information über die Richtung des Bogens. Die Bogenliste für den Graphen aus Abbildung 3-4 sieht daher ein wenig anders aus als die Kantenliste für den Graphen aus Abbildung 3-3:

$$5,6,1,2,1,4,4,1,2,4,2,5,4,4$$

Haben die Kanten oder Bögen Gewichte, so definiert man eine Kante bzw. einen Bogen entweder durch die Auflistung von Anfangsknoten, Endknoten und Gewicht für diese Kante; oder aber man erstellt eine Kanten- bzw. Bogenliste wie oben und hängt eine Liste mit den m Gewichten der Kanten $1, 2, \dots, m$ an.

Der gewichtete Digraph aus Abbildung 3-5 ist dementsprechend in den beiden folgenden Bogenlisten mit Gewichten gespeichert:

$$5,6,1,2,4,1,4,7,4,1,3,2,4,2,2,5,3,4,4,1 \quad (\text{jede Kante mit ihrem Gewicht})$$

$$5,6,1,2,1,4,4,1,2,4,2,5,4,4,4,7,3,2,3,1 \quad (\text{erst alle Kanten, dann alle Gewichte})$$

Bereits dieses einfache Beispiel macht deutlich, dass außer der Bogenliste auch die Angabe über die gewählte Form nötig ist, um den Graphen aus der Liste korrekt entnehmen zu können.

Der Speicheraufwand einer Kanten- bzw. Bogenliste für einen Graphen mit m Kanten beträgt $2(m+1)$ Speicherplätze; eine Liste mit Gewichten erfordert $3m + 2$ Speicherplätze.

3.3 Verkehrsmodellierung durch Netzwerke

3.3.1 Eigenschaften von Netzwerken

Digraphen, die zusammenhängend sind und keine Schlingen haben, werden *Netzwerke* genannt. /Busa65/ In einem Netzwerk $N = (V, A)$ ist der *Fluss* in N als ganzzahlige Funktion φ auf A definiert. Der ganzzahlige Wert $\varphi(a)$ ist der *Fluss im Bogen a* . Wenn a der Bogen (u, v) ist, so sagt man, der Fluss sei von u nach v gerichtet, falls $\varphi(a) \geq 0$, und von v nach u , falls $\varphi(a) \leq 0$ ist.

Wenn $a \rightarrow A$ die Menge aller aus v herausführenden Bögen und $A \rightarrow a$ die Menge aller in v hineinführenden Bögen ist, dann definiert die ganzzahlige Gleichung

$$Q(v, \varphi) = \sum_{a \rightarrow A} \varphi(a) - \sum_{A \rightarrow a} \varphi(a)$$

den Netto-Flusswert (*net output*) von v in Bezug auf φ .

Die Knoten von N können aufgrund des Vorzeichens von $Q(v)$ in Gruppen eingeteilt werden. Hierbei ist

$$V^+ = \{v \in V \mid Q(v) > 0\}$$

$$V^- = \{v \in V \mid Q(v) < 0\}$$

$$V^0 = \{v \in V \mid Q(v) = 0\}$$

Die Knoten von V^+ werden *Quellen*, die von V^- *Senken* und die von V^0 *neutrale Knoten* (*intermediate vertices*) genannt.

Abbildung 3-6 zeigt ein Netzwerk mit Flüssen.

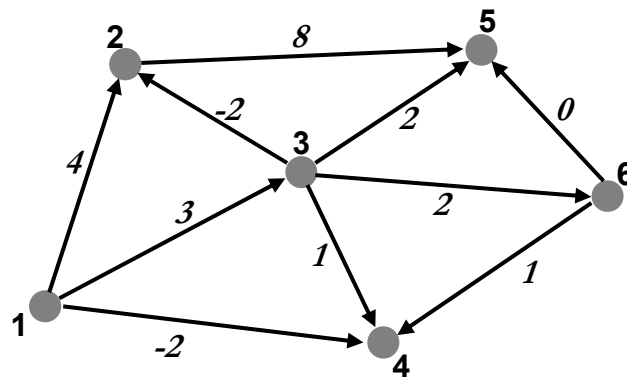


Abb. 3-6: Netzwerk und Flüsse /Busa65/

Dies ergibt die folgenden Flussdifferenzen:

i	Q (v _i)	Knotentyp
1	5	Quelle
2	6	Quelle
3	0	neutraler Knoten
4	0	neutraler Knoten
5	-10	Senke
6	-1	Senke

Netzwerke dieser Art werden auch als *statische* Netzwerke bezeichnet, weil Bögen und Flüsse zeitlich unveränderlich sind. Diese Art von Netzwerken hat sich für die Modellierung des Transports von fließenden Gütern wie Flüssigkeiten, Elektrizität oder Daten bewährt. Die Bögen entsprechen in diesem Fall Rohrleitungen oder Kabeln. Auch Verkehr ist prinzipiell so modellierbar, sofern die Stärke der Verkehrsströme für eine Aggregation als kontinuierlicher Fluss ausreichend groß ist.

Sobald jedoch ein höherer Grad an Detailtreue von der Modellierung verlangt wird, v.a. sobald die Bewegung einzelner Fahrzeuge im Netzwerk betrachtet werden soll, reicht ein statisches Netzwerk nicht mehr aus. So kann z.B. mit Hilfe eines statischen Netzwerks eine Kreuzung modelliert werden, die je 50% Verkehr in Ost-West sowie in Nord-Süd-Richtung fließen lässt. Es ist jedoch nicht möglich zu modellieren, wann genau die Kreuzung für welchen Verkehr freigegeben ist, da in einem statischen Netzwerk die Zeit nicht modelliert wird.

Die Betrachtung einzelner Rollvorgänge, die z.B. beim Flughafen-Rollverkehr erfolgen soll, ist so nicht möglich.

Dynamische Netzwerke erlauben auch die Modellierung zeitlich veränderlicher Bögen und Bogengewichte. Im dynamischen Netzwerk $N^T = (V^T, A^T, \Lambda^T)$ ist das Bogengewicht $\lambda_{uv}(t)$ eine Funktion der Zeit und $\Lambda^T = \{\lambda_{uv}(t) \mid (u,v) \in A^T\}$ ein Satz zeitabhängiger Bogengewichte. /Dero95/

Im Fall eines Verkehrsnetzwerkes (wie dem vorliegenden) sind die Bogengewichte mit der Bedeutung „Fahrzeit“ oder „Wegekosten“ o.ä. belegt; daher ist die Funktion $\lambda_{uv}(t)$ ausschließlich positiv.

Die Zeit in einem dynamischen Netzwerk kann *kontinuierlich* oder *diskret* modelliert sein. Im Falle eines diskreten dynamischen Netzwerkes ist die Funktion $\lambda_{uv}(t)$ diskret, hat also einen positiv ganzzahligen Definitions- und Wertebereich.

3.3.2 FIFO-Netzwerke

Transportnetzwerke müssen der Bedingung genügen, dass Fahrzeuge oder andere bewegliche Güter einen Bogen in derselben Reihenfolge wieder verlassen, wie sie in ihn eintreten. Diese Bedingung wird deshalb auch als *FIFO*-Bedingung (*First In - First Out*) bezeichnet und ist ein gängiger Begriff in der Informatik, z.B. auch für die Abarbeitung von Speichern oder Listen.

Für ein Transportnetzwerk ist die FIFO-Bedingung dann erfüllt, wenn gilt:

$$t + \lambda_{uv}(t) \geq 0$$

$$\text{bzw. } t_1 + \lambda_{uv}(t_1) \leq t_2 + \lambda_{uv}(t_2) \quad \text{für den Fall, dass } t_1 \leq t_2 \text{ ist.}$$

Wenn alle Bögen des Netzwerkes die FIFO-Bedingung erfüllen, spricht man von einem FIFO-Netzwerk. Diese Eigenschaft ist für ein Transportnetzwerk von zentraler Bedeutung, weil sie auch mit einschließt, dass Überholen auf ein- und derselben Kante unmöglich ist, sowie dass Wartezeiten vor Knoten in der Berechnung einer Tourenlänge (Kantenzuglängen) mit berücksichtigt werden.

3.3.3 Kostenfunktion

Für die makroskopische Modellierung von Verkehr in Netzwerken und die anschließende Berechnung z.B. einer Reisezeit ist ein übliches Vorgehen, die Reisezeit auf einem bestimmten Bogen von der Anzahl der dort befindlichen Fahrzeuge abhängig zu machen. /Dero95/ Dieser Ansatz beruht allerdings lediglich auf der empirischen Beobachtung, dass die Reisezeit für jedes einzelne Fahrzeug mit der Anzahl der übrigen Fahrzeuge sinkt. Wie genau dieser Zusammenhang aber aussieht, ist nur durch eine äußerst aufwändige Kalibrierung am realen System zu ermitteln. Die Abhängigkeit der Reisezeit jedes Fahrzeugs auf einem Bogen vom Ge-

samtverkehrsaufkommen entspricht qualitativ in etwa der in Abbildung 3-7 gezeigten. Der genaue Verlauf der entsprechenden Kurve ist allerdings von Bogen zu Bogen verschieden und kann von einer Vielzahl von Faktoren abhängen, z.B. den tatsächlichen baulichen Gegebenheiten auf einem bestimmten Streckenabschnitt.

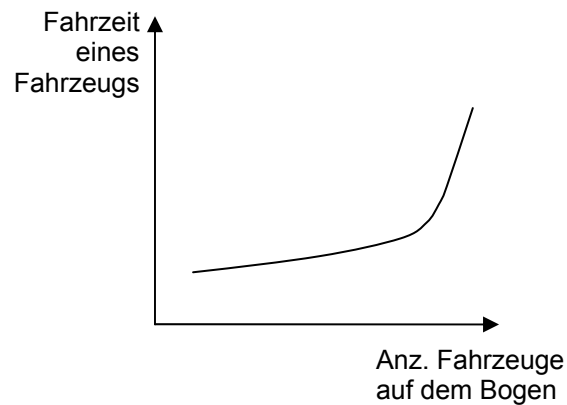


Abb. 3-7: Abhängigkeit der Fahrzeit vom Verkehrsaufkommen bei makroskopischer Verkehrsmodellierung
(eigene Darstellung)

Normalerweise repräsentiert das Gewicht eines Bogens die Fahrzeit auf diesem Bogen, die linear oder nicht-linear von der Länge des Bogens abhängen kann. Es sind aber auch komplexere Funktionen realisierbar, bei denen das Gewicht eines Bogens von mehreren Parametern abhängig ist. In solchen Netzwerken können schnellste Wege und Wege minimaler Kosten zwischen demselben Start und demselben Ziel disjunkt sein. /Ahuj01/

3.3.4 Zeitfenster

Die makroskopische Modellierung des Verkehrs ist für den in dieser Arbeit untersuchten Boden-Rollverkehr nicht geeignet, weil das einzelne Fahrzeug nicht im Modell abgebildet wird; stattdessen wird sein Verhalten durch einen Mittelwert aller Fahrzeuge auf dem betreffenden Bogen beschrieben (siehe Kapitel 3.3.3). Da für die Untersuchung der am Boden rollenden Flugzeuge jedoch einzelne Rollvorgänge zu betrachten sind, werden diese mikroskopisch modelliert. Dazu müssen Nebenbedingungen (*hard constraints*) modellierbar sein, so z.B. die Unmöglichkeit für ein Flugzeug, ein anderes, auf demselben Link vor ihm rollendes Flugzeug zu überholen, die Sperrung eines Rollweges (*taxiway*) für entgegenkommende Flugzeuge oder die Sperrung einer Rollweg-Kreuzung (*intersection*) durch ein darauf befindliches Flugzeug oder Fahrzeug.

In der Literatur sind zur Modellierung dieser Einschränkungen Zeitfenster ein gängiges Verfahren, die es erlauben, Bögen zeitweise freizugeben oder zu sperren und dadurch diese Randbedingungen umzusetzen.

Wenn $N^T = (V^T, A^T, \Lambda^T)$ ein dynamisches Netzwerk über die diskrete Zeit T ist, wird jedem Bogen $a \in A$ ein Satz von Zeitfenstern F_a zugeordnet. Eine Fahrt auf dem Bogen a ist nur innerhalb eines Zeitfensters gestattet. Sei $(\ell_a, u_a) \in F_a$ ein Zeitfenster des Bogens a mit der unteren und oberen Schranke ℓ_a bzw. u_a . Ein Befahren des Bogens a zur Zeit t ist genau dann möglich, wenn gilt :

$$\ell_a \leq t \text{ sowie } t + \lambda_a(t) \leq u_a$$

Da die Funktion $\lambda_a(t)$ nur für solche Werte t definiert ist, die innerhalb des Zeitfensters liegen, ist es eine *partielle* Funktion.

In der Literatur werden zwei verschiedene Möglichkeiten beschrieben, um Zeitfenster zu modellieren und somit bei der Suche beispielsweise nach einem kürzesten Weg zu berücksichtigen: die Zeitexpansion eines Graphen (Kapitel 3.3.5) sowie die Einführung von Labeln, die die Sperrzeiten bestimmter Knoten oder Kanten verwalten (Kapitel 3.3.6).

3.3.5 Zeitexpansion

Zeitexpandierte Graphen wurden zusammen mit dem Begriff des „dynamischen Netzwerks“ von Ford und Fulkerson eingeführt. /Ford79/ Zur zeitdiskreten Modellierung eines dynamischen Netzwerks wird $N^T = (V^T, A^T)$ in ein zeitexpandiertes Netzwerk überführt, welches aus T isomorphen Kopien von N besteht, und zwar genau eine Kopie für jedes Zeitintervall. Das zeitexpandierte Netzwerk besteht aus Bogen-Zeit-Paaren sowie Knoten-Zeit-Paaren der Form (a, t) bzw. (v, t) .

In einem dynamischen Netzwerk besteht der zeitexpandierte Graph aus der Knotenmenge $V^T = \{(v, t): v \in V^T, t \in \{0,1,2,\dots\}\}$ und der Bogenmenge A^T , welche aus Bögen von jedem Knoten-Zeit-Paar (v, t) zu jedem Knoten-Zeit-Paar $(w, \min\{T, t + \lambda_{vw}(t)\})$ besteht, wobei $w \in A^T(v)$ sein und die Erreichbarkeit des Knoten-Zeit-Paares $(w, t + \lambda_{vw}(t))$ gewährleistet sein muss.

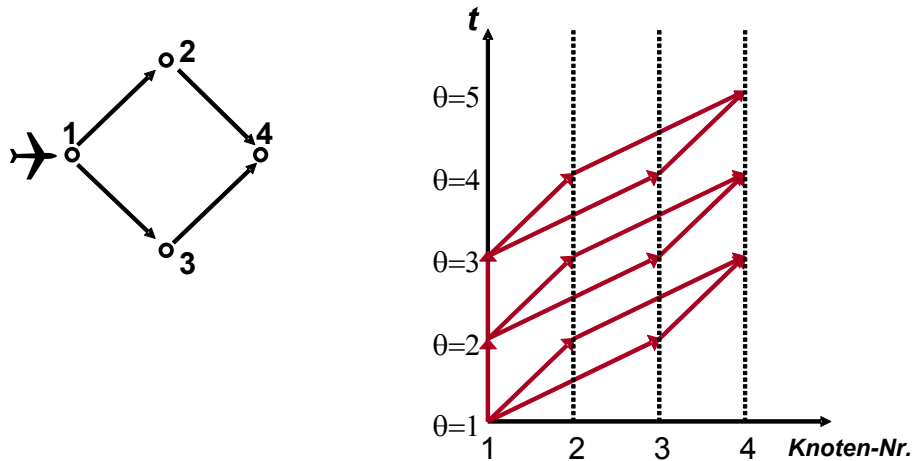


Abb. 3-8: Ein zeitexpandiertes Netzwerk mit Knoten Nr. 1 als Quelle über eine Zeitspanne von $T=5$ mit 3 verschiedenen Startzeiten /Bou03/

Jedes zeitdiskrete, dynamische kürzeste-Wege-Problem kann durch die Anwendung eines statischen kürzeste-Wege-Algorithmus gelöst werden, wenn das dynamische Netzwerk zunächst in einen zeitexpandierten Graphen G^T überführt wird. /Chab00/

Ein Zeitfenster ist im zeitexpandierten Netzwerk so definiert: Ein Bogen zum Knoten-Zeit-Paar $(w, t + \lambda_{vw}(t))$ liegt dann außerhalb des Zeitfensters und ist somit nicht mehr befahrbar, falls gilt:

$$(t + \lambda_{vw}(t)) > u_w,$$

wobei u_w die obere Begrenzung des Zeitfensters für den Knoten w ist.

Der Vorteil eines zeitexpandierten Netzwerkes ist, dass die grundlegenden Algorithmen z.B. zur Suche eines kürzesten Weges unverändert auf dem zeitexpandierten Graphen angewendet werden können. Die Sperrung einer bestimmten Kante in einem bestimmten Zeitabschnitt wird durch Entfernen der entsprechenden Kante aus dem zeitexpandierten Graphen, und zwar zum betreffenden Zeitpunkt θ , modelliert. Kanten- oder Knotensperrungen können damit allerdings nur in diskreten Zeitabständen dargestellt werden.

3.3.6 Zeitfenster als Label

Außer durch Zeitexpansion, wobei der gesamte Graph für jeden möglichen Zeitpunkt θ dupliziert wird, können Zeitfenster auch in Form von Labels modelliert werden.

Die Sperrung jeder Kante geschieht hierbei durch ein Label, also eine Datenstruktur, die der Kante zugeordnet wird und die die Zeitabschnitte verwaltet, zu denen

die Kante belegt ist. Die Planung einer konfliktfreien Route erfolgt so, dass der Algorithmus zwischen existierenden Zeitfenstern „hindurchplant“ und einen realisierbaren Weg sucht.

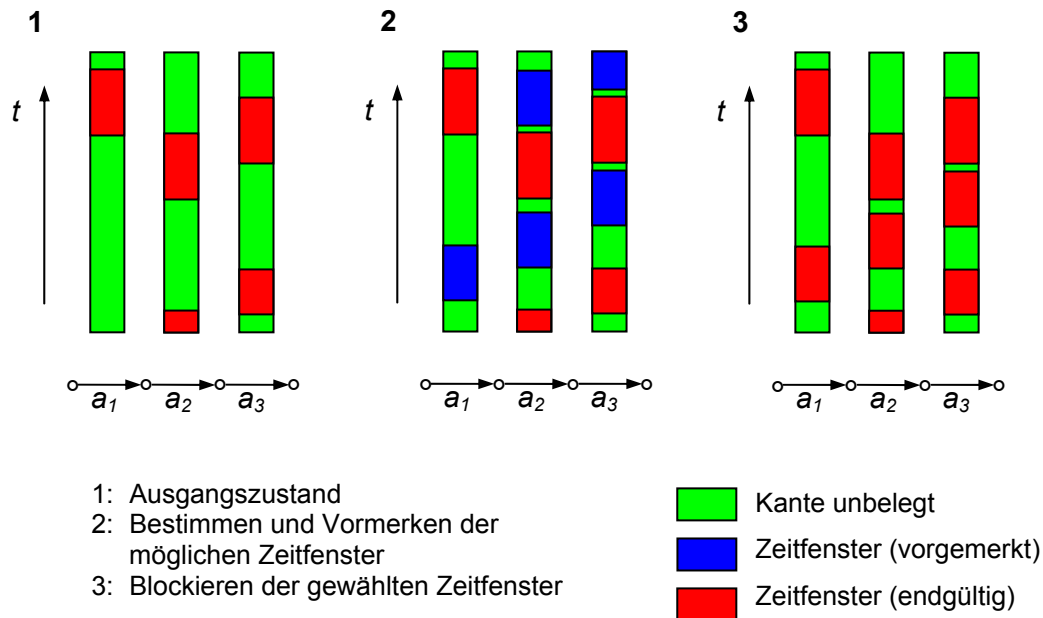


Abb. 3-9: Prinzip der Planung eines Fluges bei mehreren bereits gesetzten Sperrungen /Möhr04/

In der Literatur wird dieses Problem als *kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern* (*shortest path problem with time windows, SPPTW*) behandelt. Ein Algorithmus zur Lösung dieses Problems wurde von Desrochers und Soumis beschrieben und wird in dieser Arbeit in Kapitel 3.4.4 vorgestellt. /Dero95/

Der Vorteil einer Abbildung von Zeitfenstern in Labeln ist, dass die Größe der zu verwaltenden Datenmenge weitaus geringer ist, weil für jeden Knoten bzw. jede Kante nur die Zeiten zu verwalten sind, zu denen tatsächlich eine Sperrung vorliegt, anstatt prophylaktisch jedes Element für jeden Zeitschritt zu duplizieren wie bei der Zeitexpansion. Außerdem sind die Sperrungen nicht an diskrete Zeiteinheiten gebunden. Daher werden die Zeitfenster in dieser Arbeit mit Hilfe von Labeln modelliert anstatt durch einen zeitexpandierten Graphen.

3.4 Algorithmen für Verkehrsnetzwerke

3.4.1 Graphenalgorithmen und Suchverfahren

Um die in Graphen formulierten Praxisprobleme lösen zu können, werden Algorithmen verwendet.

Eng verbunden mit der Organisation der Information über einen Graphen in Listen sind einfache Verfahren zum systematischen Durchsuchen dieses Graphen.

An dieser Stelle soll der *Breitensuche-Algorithmus* (*Breadth First Search, BFS*) vorgestellt werden, der als einer der einfachsten Graphensuchalgorithmen ein häufig verwendeter Algorithmus ist. Zugleich wurde er zum Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Reihe anderer wichtiger Graphenalgorithmen. /Corm01/ Die Breitensuche geht von einem ungewichteten Graphen aus (d.h. alle Kantengewichte seien 1) und funktioniert sowohl in ungerichteten Graphen als auch in Digraphen.

Gegeben sei ein Graph $G = (V, E)$. Ausgehend von einem Startknoten v_0 durchsucht die Breitensuche systematisch G , bis jeder Knoten entdeckt ist, der von v_0 aus erreichbar ist. Gleichzeitig liefert der Algorithmus den kürzesten Weg von v_0 zu jedem erreichbaren Knoten, wobei „kürzester Weg“ im Falle dieses ungewichteten Graphen gleichbedeutend ist mit „Weg mit der minimalen Anzahl von Kanten“ (In Kapitel 3.4.3 und 3.4.4 werden Algorithmen für kürzeste Wege in Graphen mit gewichteten Kanten vorgestellt, bei denen naturgemäß nicht mehr allein die Anzahl der Kanten die Länge eines Weges bestimmt). Bei der Breitensuche konstruiert der Algorithmus einen Baum, dessen Wurzel v_0 ist und der alle erreichbaren Knoten v enthält. Der Weg von v_0 nach v in diesem Baum ist zugleich der kantenminimale Weg von v_0 nach v in G .

Die Breitensuche heißt so, weil der Algorithmus „in die Breite“ sucht, d.h. es werden zunächst alle Knoten gesucht, die in der Hierarchieebene mit dem Abstand k von v_0 liegen, bevor dann die nächste Ebene der Knoten in Angriff genommen wird, die alle den Abstand $k + 1$ von v_0 haben.

Um den eigenen Suchfortschritt festzuhalten, markiert die Breitensuche alle Knoten mit den Farben weiß, grau oder schwarz. Zunächst sind alle Knoten bis auf den Startknoten weiß eingefärbt. Im Verlauf der Suche wird jeder Knoten, der entdeckt wird, zunächst samt der ihn mit seinem Vorgängerknoten²¹ verbindenden Kante bzw. des ihn mit seinem Vorgängerknoten verbindenden Bogens grau eingefärbt. Von diesem Knoten wird die Suche dann fortgesetzt, sobald alle anderen Knoten mit demselben Abstand zu v_0 grau markiert wurden. Sobald alle anderen Knoten, die von einem grauen Knoten ausgehen, besucht wurden, wird dieser schwarz eingefärbt. Falls $(u, v) \in E$ und u schwarz sind, muss v demnach entweder

²¹ Im Fall der Breitensuche der Knoten, von dem die Entdeckung des nächsten Knotens ausgeht.

schwarz oder grau sein. /Corm01/ Die Unterscheidung zwischen grauen und schwarzen Knoten dient der Markierung der Grenze zwischen bereits entdeckten und noch nicht entdeckten Knoten, die bei der Breitensuche gleichmäßig über den ganzen Graphen vorgeschoben wird.

Der auf der folgenden Seite dargestellte Breitensuche-Algorithmus BFS ist /Corm01/ entnommen. Er geht von einem Graphen $G = (V, E)$ aus, der in einer Adjazenzliste gespeichert ist. Zusätzlich zu der Information über den Graphen sind mit jedem Knoten noch folgende Informationen abgelegt:

- die Farbe jedes Knotens $u \in V$ in der Variable $color[u]$;
- der Vorgänger von u in der Variable $\pi[u]$. Falls u keinen Vorgänger hat (weil es sich z.B. um den Startknoten v_0 handelt oder weil u noch nicht entdeckt wurde), ist $\pi[u] = \text{NIL}$ ²² ;
- die Entfernung vom Startknoten v_0 zum Knoten u , die vom Algorithmus berechnet wird, in $d[u]$;
- die grauen Knoten in der FIFO-Liste Q .

²² In Pseudo-Code üblich als Begriff für „nicht definiert“. Der Ausdruck, der in MATLAB für diesen Term steht, lautet NAN (not a number).

Algorithmus 1: BREITENSUCHE

Gegeben: $G = (V, E), v_0$ **Variablen:** $color[u], \pi[u], d[u], Q$ **Ausgabe:** Alle von v_0 aus erreichbaren Knoten mit kürzestem Weg zu und Entfernung von v_0

```

1  for each vertex  $u \in V[G] - \{v_0\}$ 
2      do  $color[u] \leftarrow \text{WHITE}$ 
3           $d[u] \leftarrow \infty$ 
4           $\pi[u] \leftarrow \text{NIL}$ 
5   $color[v_0] \leftarrow \text{GRAY}$ 
6   $d[v_0] \leftarrow 0$ 
7   $\pi[v_0] \leftarrow \text{NIL}$ 
8   $Q \leftarrow \emptyset$ 
9  ENQUEUE( $Q, v_0$ )
10 while  $Q \neq \emptyset$ 
11     do  $u \leftarrow \text{DEQUEUE}(Q)$ 
12         for each  $v \in \text{Adj}[u]$ 
13             do if  $color[v] = \text{WHITE}$ 
14                 then  $color[v] \leftarrow \text{GRAY}$ 
15                      $d[v] \leftarrow d[u] + 1$ 
16                      $\pi[v] \leftarrow u$ 
17                     ENQUEUE( $Q, v$ )
18             end
19          $color[u] \leftarrow \text{BLACK}$ 
20 end

```

Die folgende Abbildung zeigt die Schritte einer Breitensuche in einem ungerichteten Beispielgraphen. Besuchte Kanten werden grau eingefärbt, und bilden zugleich den Baum mit der Wurzel v_0 . Innerhalb jedes Knotens steht der Wert $d[u]$. Die Liste Q erscheint jeweils am Beginn jedes Durchlaufs der **while**-Schleife (Zeilen 10-20).

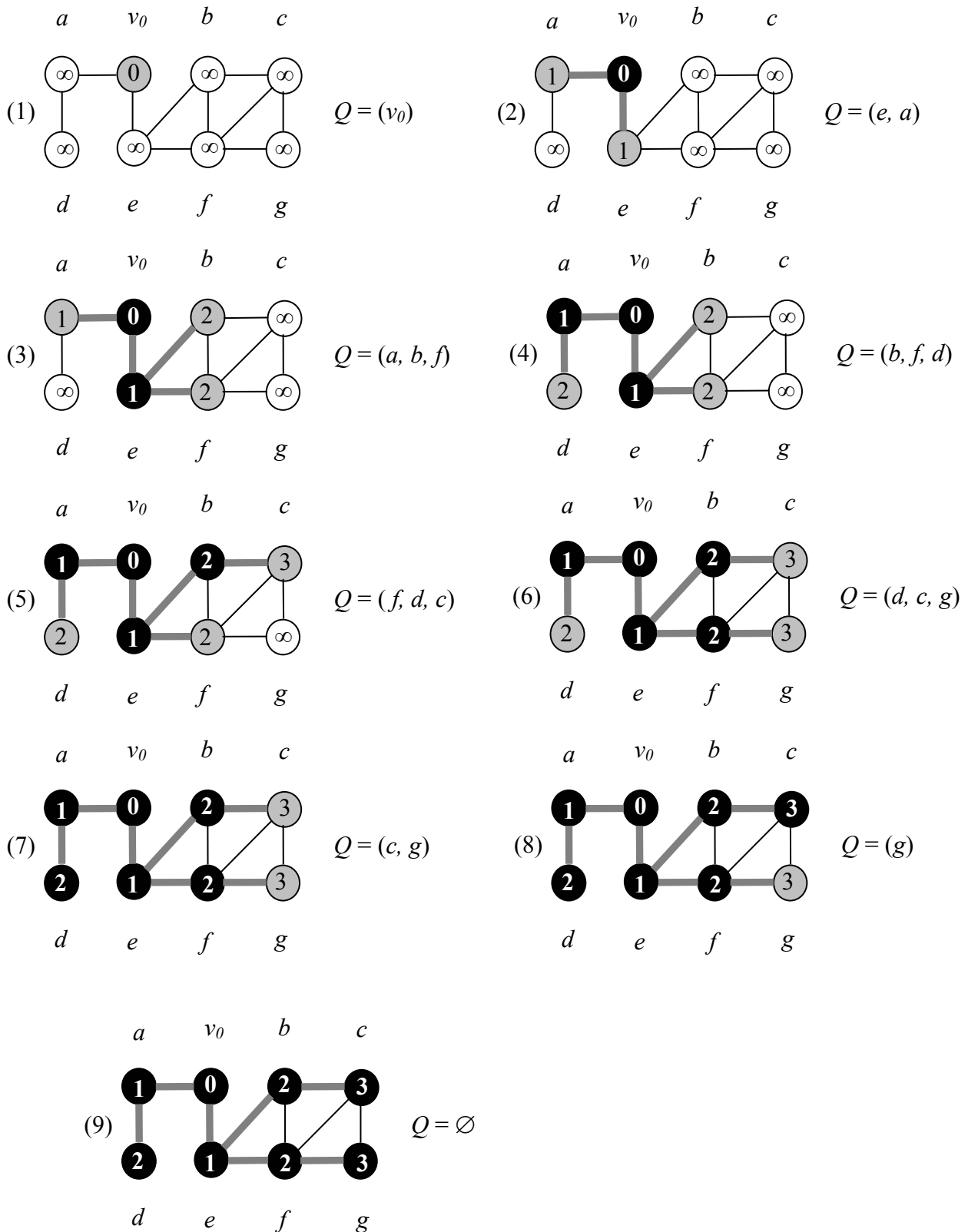


Abb. 3-10: Der Breitensuche-Algorithmus durchsucht einen ungerichteten Beispielgraphen /Corm01/

3.4.2 Klassen von Optimierungsproblemen

Für Optimierungsprobleme in Graphen und Netzwerken, die reale Systeme abbilden, wurde eine ganze Reihe von Algorithmen entwickelt, die für verschiedene Anwendungen zum Einsatz kommen.

Ein häufig auftauchendes Problem ist hierbei die Suche nach dem kürzesten bzw. dem günstigsten (d.h. ein unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen wie z.B. Wegekosten optimaler) Weg. Je nach Fragestellung unterscheidet man folgende Probleme:

- Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem (single-pair shortest-path problem): Finde einen kürzesten Weg von $v_0 \in V$ nach $v_x \in V$.
- Eine-Quelle-kürzeste-Wege-Problem (single-source shortest-path problem): Finde den kürzesten Weg von $v_0 \in V$ zu allen $v \in V - \{v_0\}$.
- Ein-Ziel-kürzeste-Wege-Problem (single-destination shortest-path problem): Finde den kürzesten Weg von allen $v \in V - \{v_x\}$ zu $v_x \in V$.
- Alle-Paare-kürzeste-Wege-Problem (all-pairs shortest-path problem): Finde den kürzesten Weg von u nach v für alle Knotenpaare u und v , $\{u,v\} \in V$

/Fli02/

Der Breitensuche-Algorithmus in Kapitel 3.4.1 löst das Eine-Quelle-kürzeste-Wege-Problem.

Damit in einem Graphen der kostenminimale (z.B. der schnellste oder kürzeste) Weg bestimmt werden kann, müssen die Kanten gewichtet sein. Daher gehen die folgenden Algorithmen, falls nichts anderes erwähnt ist, von einem Graphen $G = (V, E, \Lambda)$ mit der Knotenmenge $V = \{1, \dots, n\}$, der Kantenmenge $E = \{(u,v) \mid (u,v) \in V\}$ und der Menge aller Kantengewichte $\Lambda = \{\lambda_{uv} \mid (u,v) \in E\}$ aus.

Die Kantengewichte können hierbei verschiedene Bedeutungen haben. Sie können die Länge der Kante oder die für das Befahren dieser Kante benötigte Zeit ausdrücken (als Funktion von Länge der Kante und Geschwindigkeit); in intelligenten Transportnetzwerken können hier auch zusätzliche Faktoren eingebaut werden, die das Befahren bestimmter Kanten künstlich verteuern, weil darauf eine besonders große Nachfrage herrscht o.ä.. In diesen Fällen spricht man auch von schnellste-Wege-Problemen, was eine Verallgemeinerung des Begriffs „kürzeste-Wege-Probleme“ darstellt.

Die zeitweise Sperrung von Kanten in einem Graphen bedeutet, dass ein kürzeste-Wege-Problem in einem Graphen mit zeitweise beschränkten Ressourcen oder sonstigen Beschränkungen zu lösen ist (Constrained Shortest Path Problem). Be-

schränkungen können außer der Sperrung von Ressourcen beispielsweise auch ein maximal möglicher Abbiegewinkel, die Ankunft am Zielknoten innerhalb eines bestimmten Zeitfensters oder die Forderung nach einem kollisions- bzw. konfliktfreien Weg sein. Die Beschränkungen oder Restriktionen haben also v.a. die Funktion, ein reales Problem mathematisch formulieren und lösen zu können.

Die Einführung von Restriktionen kann dabei die Komplexität des zu lösenden Problems sowohl erhöhen, als auch die Komplexität verringern, da z.B. der Suchraum eingeschränkt wird.

Insgesamt sind Constrained Shortest Path Problems wegen der möglichen Vielgestaltigkeit der Beschränkungen mehr eine Familie von Problemen, die individuelle Lösungen erfordern, als ein konkretes mathematisches Problem, wie dies die zu Beginn dieses Kapitels genannten Probleme sind.

In Kapitel 3.9 wird daher ein Algorithmus für die Lösung des Problems Flughafen-Boden-Rollverkehr angepasst, und zwar auf der Basis eines kantenorientierten Dijkstra-Algorithmus.

3.4.3 Der Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus löst das Eine-Quelle-kürzeste-Wege-Problem in einem Graphen $G = (V, E)$ mit nicht-negativen Kantengewichten λ_{uv} , $(u, v) \in E$. Diese Einschränkung ist für den Fall eines Verkehrsnetzwerks unproblematisch, weil die Kantengewichte Entfernungen oder Fahrzeiten darstellen und daher ohnehin nicht negativ werden können. Der Dijkstra-Algorithmus ist ein von der Breitensuche abgeleitetes Verfahren. /Fli02/ Der Dijkstra-Algorithmus findet garantiert einen kürzesten Weg, sofern es einen Weg gibt. /Corm01/ Die hier vorgestellte Variante ist /Corm01/ entnommen und arbeitet knotenorientiert.

In der Menge S speichert der Dijkstra-Algorithmus diejenigen Knoten, deren kürzeste Entfernungen vom Startknoten s bereits bestimmt wurden. Die Menge Q enthält alle übrigen Knoten aus V , die noch nicht S zugeordnet sind, also $Q = V \setminus S$. Für alle Knoten in Q wird eine Abschätzung der Restentfernung vorgenommen. Beim Start des Algorithmus werden alle Entfernungen zunächst initialisiert, indem sie auf ∞ gesetzt werden (**for**-Schleife, Zeilen 1-4).

Der Algorithmus sucht dann immer wieder aus der Menge Q denjenigen Knoten u mit der kürzesten Restentfernung (Zeile 9), fügt u zu S hinzu und berechnet schließlich für alle von u aus erreichbaren neuen Knoten den kürzesten Weg zum Startknoten s . Hierbei wird auch die Vorgängerliste π aktualisiert (**for**-Schleife, Zeilen 12-17). In Abänderung gegenüber dem ursprünglich von Dijkstra vorgestellten Algorithmus wird in der hier vorgestellten Variante ein Zielknoten t definiert. Sobald dieser erreicht wird, wird die **while**-Schleife (Zeilen 8-18) und damit der Al-

gorithmus abgebrochen. Damit wird de facto lediglich das Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem gelöst, da für den vorliegenden Fall der Routenplanung nur dieses interessant ist.

Algorithmus 2: DIJKSTRA	
Gegeben:	$G = (V, E, \Lambda)$, Startknoten s , Zielknoten t
Variablen:	Vorgängerliste $\pi[v]$, kürzeste Weglängen $d[v]$, Liste der abschließend betrachteten Knoten S , Liste der noch nicht abschließend betrachteten Knoten Q
Ausgabe:	Kürzester Weg von s nach t (oder Meldung der Nichtexistenz eines Weges von s nach t)
1	for each vertex $v \in V[G]$ do
2	$d[v] \leftarrow \infty$
3	$\pi[v] \leftarrow \text{NIL}$
4	end
5	$d[s] \leftarrow 0$
6	$S \leftarrow \emptyset$
7	$Q \leftarrow V[G]$
8	while $Q \neq \emptyset$ do
9	$u \leftarrow \text{EXTRACT_MIN}(Q)$
10	if $u = t$ then end
11	$S \leftarrow S \cup \{u\}$
12	for each v adjacent to $[u]$ do
13	if $d[v] > d[u] + \lambda(u,v)$ then
14	$d[v] \leftarrow d[u] + \lambda(u,v)$
15	$\pi[v] \leftarrow u$
16	end
17	end
18	end

Abbildung 3-11 zeigt die Ausführung des Dijkstra-Algorithmus an einem Beispielgraphen mit fünf Knoten. Der Startknoten s ist ganz links, der Zielknoten t oben rechts zu finden. In den Knoten finden sich die im jeweiligen Prozessschritt aktuellen kürzesten Wege d ; die grau unterlegten Kanten zeigen den Vorgänger-Pfad π .

Die schwarz gefüllten Knoten sind bereits in der Menge S , die weißen noch in der Menge $Q = V \setminus S$.

Der grau unterlegte Knoten ist derjenige, der beim jeweils nächsten Durchlauf der **while**-Schleife (Zeilen 8-18) als Knoten u ausgewählt wird.

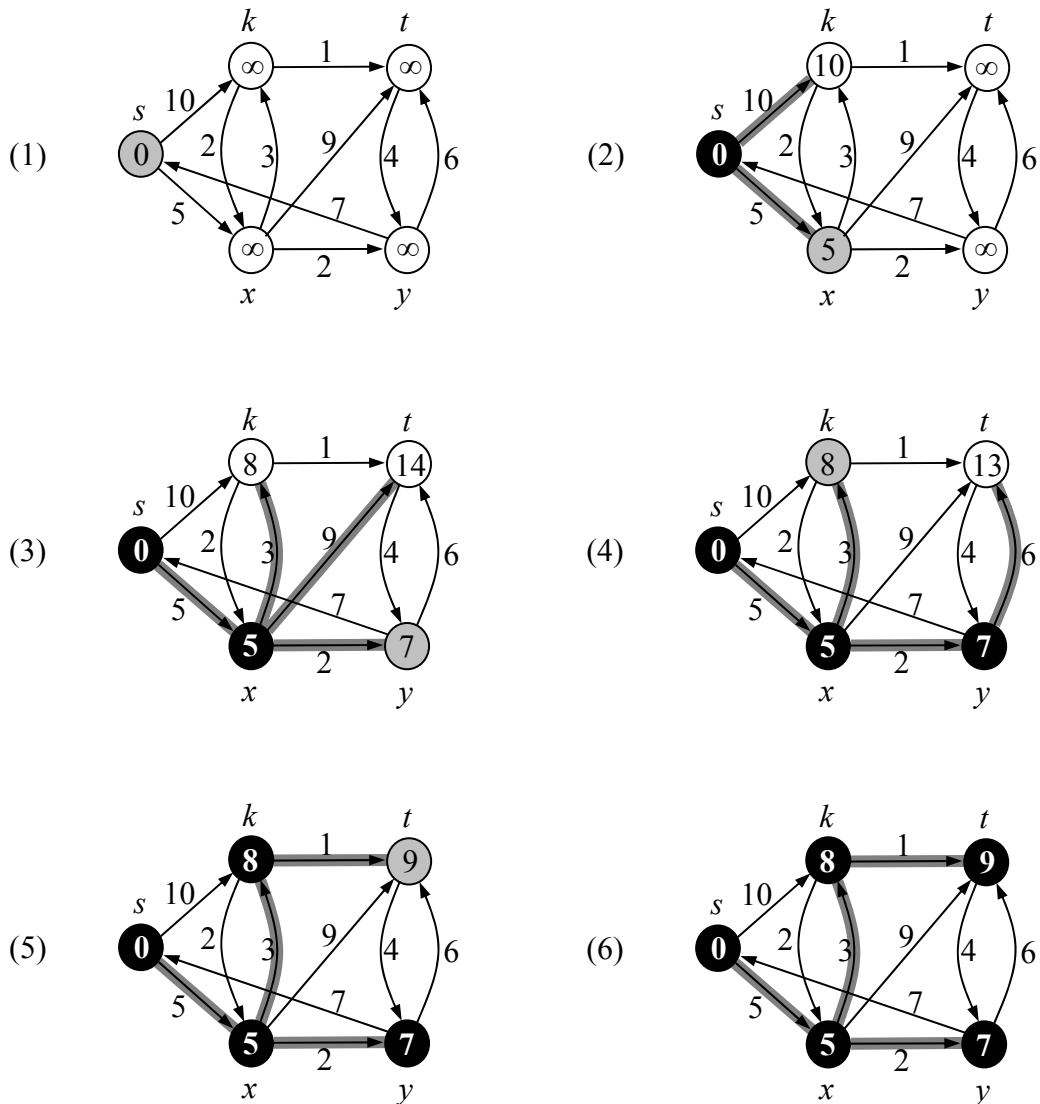


Abb. 3-11: Der Dijkstra-Algorithmus durchsucht einen Beispielgraphen /Corm01/

3.4.4 Algorithmus mit Zeitfenster

In Kapitel 3.3.4 wurde der Begriff des Zeitfensters eingeführt. Zeitfenster erlauben es, Kanten für einen bestimmten Zeitraum zu sperren. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für die realitätsnahe Modellierung von Verkehrsnetzwerken geschaffen, da Kanten belegt sein können und dann für einen bestimmten Zeitraum nicht für andere Rollvorgänge (im vorliegenden Fall) zur Verfügung stehen.

Dieses Problem wird in der Literatur als *Shortest Path Problem with Time Windows* (SPPTW) bezeichnet. Dieses kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern kann mit Hilfe dynamischer Programmierung gelöst werden; die Lösung des Problems durch die Verwendung von Labeln oder durch die Zeitexpansion des Graphen ist dabei äquivalent. /Dero95/

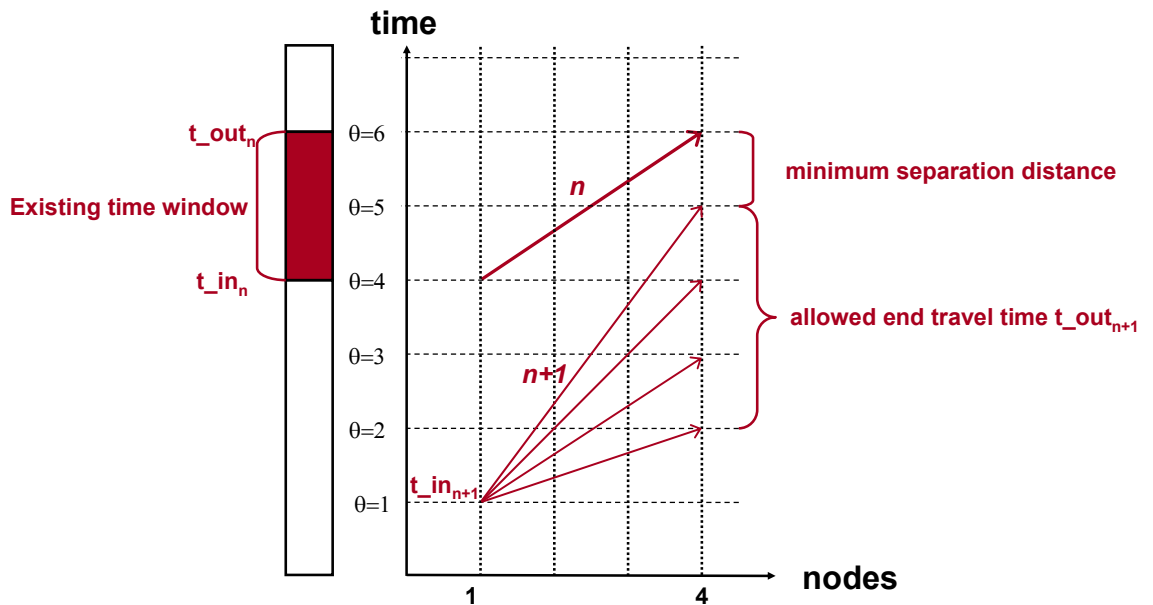


Abb. 3-12: Prinzip des Setzens eines Zeitfensters durch einen bereits geplanten Flug n /Bou03/

In dieser Arbeit sollen die Zeitfenster durch Label implementiert werden. Vorteile hierbei sind zum einen, dass die Zeitdiskretisierung entfallen kann, die bei der Zeitexpansion eines Graphen erforderlich wird, und außerdem ist dieses Verfahren weit weniger speicheraufwändig, weil nur diejenigen Label verwaltet zu werden brauchen, für die tatsächlich Sperrungen vorliegen.

Im folgenden soll ein Algorithmus vorgestellt werden, der auf der Basis des Dijkstra-Algorithmus entwickelt wurde und der mehrere Routen unter Verwendung von Zeitfenstern plant, die in Labeln organisiert werden. /Dero95/

In einem Graphen $G = (V, A)$ werden zur Einführung der Labels Pfade \mathcal{P}_i betrachtet, die von Quellknoten o zu von diesem Quellknoten verschiedenen Knoten i führen. Dem Knoten i wird ein Label zugeordnet, in dem T_i^k den Beginn der Belegung kennzeichnet sowie Λ_i^k die aufsummierten Kosten des Pfades bis zu diesem Knoten verzeichnet:

$$(T_i^k, \Lambda_i^k) \quad \text{mit } i \in V, k \geq 1$$

für den k -ten Pfad, der von o nach i führt. Die Label werden im Laufe der Optimierung angepasst. Bei der Suche nach dem optimalen Pfad $\mathcal{P}_i = (i_0, i_1, i_2, \dots, i_H)$ ist

$$(T_{i_0}, \Lambda_{i_0}) = (a_0, 0) \text{ sowie}$$

$$(T_{ih}, \Lambda_{ih}) = (\max\{a_{ih}, T_{i_{h-1}} + \lambda_{i_{h-1}, ih}\}, \Lambda_{i_{h-1}} + \Lambda_{i_{h-1}, ih}), \quad h = 1, \dots, H$$

mit $i_0 = o$ und $i_H = i$.

Ein Label (T_i, Λ_i) wird als *wirksam* (*efficient*) bezeichnet, wenn es das nachfolgende Label *überlagert* (*dominates*), wenn also gilt:

$$(T_i^2, \Lambda_i^2) - (T_i^1, \Lambda_i^1) \geq (0, 0).$$

Diese Beziehung erlaubt die Aussage, dass der Pfad \mathcal{P}_i der kürzeste Pfad vom Knoten o zum Knoten i ist, bei dem die Belegung des Knotens i spätestens zum Zeitpunkt T_i beginnt. /Dero95/ Dies impliziert die Aussage, dass es mehrere wirksame Pfade zu jedem Knoten geben kann.

Es sei nun $Q_i, i \in V$, die Menge der Label des Knoten i , und es sei $\text{EFF}(Q_i)$ die Teilmenge der wirksamen Label in der Menge Q_i der Label des Knoten i . Dann ist der kürzeste Weg von o nach d , der die Randbedingung der Zeitfenster erfüllt, derjenige, der im Label mit den geringsten Gesamtkosten Λ_d aus der Menge $\text{EFF}(Q_d)$ endet.

Es seien $\Gamma(i) = \{j \mid (i, j) \in A\}$ die Menge der Nachfolger des Knotens i , und $Q_i = \cup_k \{(T_i^k, \Lambda_i^k)\}$ die Menge der Label des Knotens $i \in V$. Ein wichtiger Schritt ist die Behandlung eines Labels (T_i^k, Λ_i^k) . Diese besteht darin, neue Label an Knoten $j \in \Gamma(i)$ zu setzen, indem Bögen (i, j) zum Pfad von o nach i hinzugefügt werden, der mit dem Label (T_i^k, Λ_i^k) verbunden ist. Das neue Label für ein bestimmtes $j \in \Gamma(i)$ ist bestimmt durch

$$f_{ij}(T_i^k, \Lambda_i^k) = \begin{cases} (\max\{a_j, T_i^k + t_{ij}\}, \Lambda_i^k + \lambda_{ij}), & \text{falls } T_i^k + t_{ij} \leq b_j, \\ \emptyset & \text{in allen anderen Fällen.} \end{cases}$$

Das Setzen eines neuen Labels am Knoten i bedeutet eine Modifikation aller in Q_i enthaltenen Label. Die Menge aller neuen Labels an jedem Knoten $j \in \Gamma(i)$ ist $\cup_k f_{ij}(T_i^k, \Lambda_i^k)$. Die Definition von f_{ij} erlaubt, dass am Knoten j gewartet wird. Daher werden nicht alle neuen Label wirksam werden, da die Zeiten T_j^k sich vor der Schwelle a_j regelrecht „stauen“ können. Für alle k , für welche die Bedingung $T_i^k + t_{ij} \leq a_j$ erfüllt ist, gilt $T_j^k = a_j$. Außerdem können neue Label durch Label überlagert werden, die bereits in Q_j sind²³. Daher bezeichnet $\text{EFF}(\cup_k f_{ij}(T_i^k, \Lambda_i^k) \cup Q_j)$ die neue Menge aller wirksamen Label am Knoten j .

²³ In dem von Desrochers und Soumis 1988 vorgestellten Algorithmus „Label-setting“ können auch später geplante Label bereits geplante überlagern. Diese Möglichkeit wurde jedoch nicht in den Algorithmus zur

Der im Folgenden präsentierte Algorithmus ist /Dero95/ entnommen und stellt eine Verallgemeinerung des Dijkstra-Algorithmus für ein kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern dar. Er ist NP-schwierig für nicht-negative Bogengewichte. Der Algorithmus bearbeitet die Label sequenziell in der Reihenfolge der Zeit. Jede Menge P_i enthält die zuvor behandelten und nicht weiter veränderlichen Label am Knoten i .

Algorithmus 3: Kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern (SPPTW)

Gegeben: $G = (V, A, \Lambda)$, Quellknoten o

Variablen: Menge der Label des Knoten $i \in V$: $Q_i = \cup_k \{(T_i^k, \Lambda_i^k)\}$, Menge der Nachfolger des Knoten i : $\Gamma(i) = \{j \mid (i, j) \in A\}$, Menge der bereits behandelten Label am Knoten i , P_i

Ausgabe: alle vor T_i^k von o aus erreichbaren Knoten mit Wegekosten Λ_i^k

```

1   $Q_o \leftarrow \{(T_o^1 = a_o, C_o^1 = 0)\}$ 
2  for each node  $i \in V$  do
3       $P_i \leftarrow \emptyset$ 
4       $Q_i \leftarrow \emptyset$ 
5  end
6  while true
7       $(T_i^k, \Lambda_i^k) = \text{EXTRACT\_MIN } T_i^k (\cup_{i \in V} (Q_i \setminus P_i))$ 
8      if  $(Q_i \setminus P_i) = \emptyset$ 
9          STOP
10     end
11     for all  $j \in \Gamma(i)$ 
12          $Q_j \leftarrow \text{EFF}(f_{ij}(T_i^k, \Lambda_i^k) \cup Q_j)$ 
13          $P_i \leftarrow P_i \cup \{(T_i^k, \Lambda_i^k)\}$ 
14     end
15 end

```

3.5 Komplexitätstheorie

Gegenstand der Komplexitätstheorie ist es, ein Maß für die Komplexität der Ausführung von Algorithmen und Funktionen und damit die benötigte Rechenzeit (Zeitkomplexität) und den benötigten Speicherplatz (Raumkomplexität) zur Verfügung zu stellen. /Fli02/

3.5.1 Bit-Komplexität

Die Komplexität einer Funktion wird mit Hilfe einer oberen sowie einer unteren Schranke angegeben, da die Komplexität der zu untersuchenden Funktion nicht ohne weiteres exakt zu bestimmen ist.

Die Komplexität einer algorithmischen Problemstellung hängt unter anderem von der Länge der zu verarbeitenden Terme ab, wobei für die Rechenkomplexität vor allem die Bit-Länge von Bedeutung ist. Die Bit-Länge einer Zahl ist die Anzahl der Bits, die diese Zahl zur Darstellung im Rechner benötigt. Bei einer natürlichen Zahl wäre dies die Länge der Binärdarstellung. Diese Bit-Länge ist das entscheidende Maß für die Komplexität einer bestimmten Rechenoperation für den Computer.

Die obere Schranke O für die Addition von Zahlen der Bit-Länge n beispielsweise entspricht $O(n)$, für die Multiplikation von Zahlen der Bit-Länge n beträgt der Rechenaufwand $O(n^2)$ /Schö97/

3.5.2 NP-Vollständigkeit

Grundlage des Begriffes der *NP-Vollständigkeit* sind die beiden Klassen P und NP . Eine algorithmische Problemstellung fällt in die Klasse P , wenn es für ihre Lösung einen Algorithmus gibt, für dessen Bit-Komplexität als Obergrenze ein Polynom $p(n)$ bestimmt ist. Hierbei ist p ein Polynom in der Bit-Länge n , also zum Beispiel

$$p(n) = 7n^3 + 2n^2 + 10$$

Der Algorithmus, dessen Komplexität sich auf diese Weise abschätzen lässt, wird in diesem Fall als polynomialer Algorithmus bezeichnet. Das zugehörige Problem, für das es einen polynomialen Algorithmus gibt, liegt dann in der Klasse P .

Im Gegensatz zu P steht die Klasse NP , die Problemstellungen enthält, für die bisher keine Algorithmen mit polynomialer Komplexität bekannt sind. Alle Probleme in NP lassen sich mit höchstens exponentieller Komplexität lösen.

Diese Algorithmen, die sich nicht polynomial beschränken lassen, können nur für Eingaben kleiner Bit-Länge verwendet werden, dieweil dass bei längeren Eingaben

die Rechenzeit buchstäblich astronomische Ausmaße annehmen kann, so dass auch künftige Rechnergenerationen keine Abhilfe schaffen²⁴.

Es lässt sich zeigen, dass für jedes Entscheidungsproblem A gilt:

$$A \in P \Rightarrow A \in NP \quad \text{/Schö97/}$$

Würde auch die Umkehrung gelten, dann hieße dies, dass es für alle NP -Probleme einen in polynomialer Zeit lösbaren Algorithmus gibt. Ob diese Umkehrung grundsätzlich gelten kann, wurde bisher nicht bewiesen und ist daher offen. Es gibt auf jeden Fall viele Probleme, für die bisher kein polynomialer Algorithmus bekannt ist.

Eine besondere Untergruppe der Klasse NP sind diejenigen Probleme, für die es genau dann einen polynomialen Algorithmus gibt, wenn es einen polynomialen Algorithmus für ein Problem in P gibt, wenn also $P = NP$ gilt. Diese Probleme heißen *NP-vollständig*. Solche algorithmischen Probleme in NP können eindeutig identifiziert werden.

Ein Entscheidungsproblem A ist auf ein Entscheidungsproblem B *polynomial reduzierbar*, wenn es eine mit polynomialer Komplexität berechenbare Funktion f gibt, so dass für alle Eingaben x gilt:

$$x \in A \Leftrightarrow f(x) \in B \quad \text{/Fli02/}$$

A wird sozusagen als Spezialfall von B formuliert, so dass folgt: Falls B einen effizienten (i.e. polynomialen) Algorithmus besitzt, so besitzt auch A einen. Die Lösung des Problems A ist damit höchstens so komplex wie die Lösung des Problems B .

Sind alle Probleme A in NP auf ein Problem B polynomial reduzierbar, so heißt B *NP-schwierig (NP-hart)*. Ein solches Problem B ist also in gewisser Weise mindestens so schwer zu lösen wie jedes Problem in NP . Liegt B zusätzlich auch selbst in NP , so heißt B *NP-vollständig* /Schö97/ Die NP -vollständigen Probleme sind die schwierigsten Probleme in NP .

²⁴ Ein nicht-effizienter Algorithmus der (exponentiellen) Komplexität 2^n benötigt für eine Eingabe der Bit-Länge $n = 100$ auf einem Höchstleistungsrechner wie der IBM p690 des ZIB (Gesamtleistung: ca. 2 Teraflops) immer noch eine Rechenzeit von 2 mal 10^{10} Jahren – das Alter des Universums wird auf lediglich 10^{10} Jahre geschätzt.

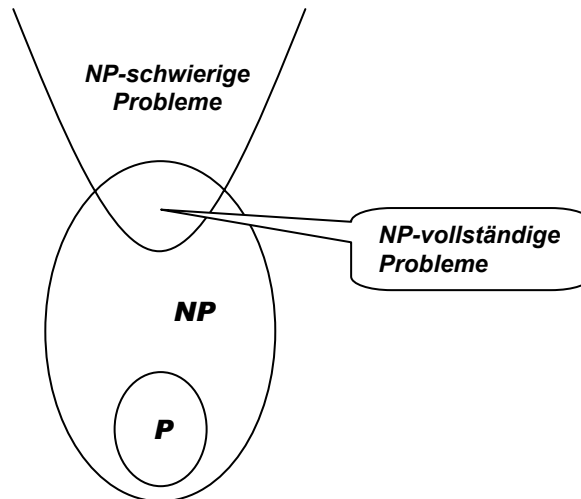


Abb. 3-13: Die Klassen P und NP
[in Anlehnung an /Schö01/ und /Schö97/]

Der für die Rollroutenoptimierung in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus für das kantenorientierte Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis ist in polynomialer Zeit lösbar, da die Fahrtkosten der verstrichenen Zeit (Fahrzeit + Wartezeit) entsprechen. Trotz hoher Komplexität der Aufgabe ist die Bit-Länge der Eingabe hinreichend niedrig, um in sinnvoller Rechenzeit brauchbare Ergebnisse zu liefern.

Auf die Laufzeit des für die Implementierung eines Optimierungsverfahrens für den Flughafen-Boden-Rollverkehr gewählten Algorithmus wird im Zusammenhang mit der Vorstellung von dessen Pseudo-Code (Kapitel 3.9) eingegangen.

3.6 Bestimmung des Optimierungsziels

3.6.1 Festlegung einer Zielgröße

Um den Rollverkehr optimieren zu können, ist eine Zielfunktion erforderlich, welche die zu minimierende oder zu maximierende Größe beschreibt. Für den Rollverkehr kommen dabei folgende Größen in Frage:

- Eine Minimierung der erforderlichen Topologie (d.h. der Anzahl von Rollwegen und Vorfeldflächen) für ein bestimmtes Verkehrsaufkommen. Das Verkehrsaufkommen wird dabei in der Regel ein prognostiziertes, zukünftiges Verkehrsaufkommen sein.
- Der Durchsatz für ein gegebenes Layout des Vorfeldes kann maximiert werden, d.h. die Freigaben für angefragte Rollvorgänge werden so erteilt,

dass insgesamt ein Maximum an Rollvorgängen in der vorhandenen Topologie abgewickelt werden kann.

Da jedoch Flugpläne sich eher an den Erfordernissen der noch dringlicheren Kapazitäts-Engpässe Luftraum sowie Start- und Landebahnssystem ausrichten werden, sowie die Neuplanung einer optimalen Topologie den heutigen Kapazitäts-Engpässen im Rollverkehr auf großen bestehenden Drehkreuz-Flughäfen nicht wird abhelfen können, soll in dieser Arbeit ein anderes Optimierungsziel betrachtet werden:

- Es können die Rollzeiten für eine gegebene Topologie und einen gegebenen Flugplan minimiert werden. Dies bedeutet, dass sowohl das Layout des Flughafens als auch der Flugplan als gegeben angenommen werden und die Rollfreigaben für die angefragten Fahrten durch den Optimierungsalgorithmus so geplant werden, dass die Rollzeiten minimiert werden.

Das Zielerreichungskriterium soll die Minimierung der tatsächlichen, durchschnittlichen Rollzeit sein.

Eine Minimierung der durchschnittlichen Verspätung wird nicht vorgenommen, obwohl eine Befragung von Nutzern des Luftverkehrs ergab, dass dies das bei weitem wichtigste wahrgenommene Pünktlichkeitskriterium ist. In der vom Fluggast wahrgenommenen „Verspätung“ sind aber zu viele Faktoren enthalten, als dass sie als Zielerreichungskriterium für eine Rollverkehrsoptimierung nützlich sein könnte.

Um die Pünktlichkeit und damit die Leistungsfähigkeit des Luftverkehrs international einheitlich messen zu können, wurde zur Aufnahme und Aufzeichnung von Pünktlichkeitsdaten der *OOOI-Standard* definiert. /Dey02/ Die DFS geht bei der Erfassung der Pünktlichkeit von denselben Werten aus, verwendet jedoch eine abweichende Terminologie. Im folgenden werden diese beiden Systeme einander gegenüber gestellt:

- „Time Off Blocks“ (O), so benannt nach dem Wegnehmen der Sicherheitsblöcke unmittelbar vor dem Losrollen vom Gate, ist die tatsächliche Abflugzeit (Actual Time of Departure). Die DFS nennt diese Zeit die „Actual Off-Block Time“ (AOBT).
- „Time Off Wheels“ (O) ist die tatsächliche Abhebezeit (Actual Take-Off Time ATOT; auch DFS).
- „Time On Wheels“ (O) ist die Landezeit am Zielflughafen (Actual Landing Time); DFS: „Actual Time of Arrival“ (ATA).
- „Time In“ (I) ist die tatsächliche Ankunftszeit des Flugzeugs am Gate, gemessen im Moment, da die Sicherheitsblöcke wieder vorgelegt werden (Time On Blocks); DFS: „Actual Parking Time“ (APT). /Dey02/

Jeder der dazwischen liegenden Prozessschritte kann sich verzögern und länger dauern als geplant. Die folgende Abbildung zeigt, welche Faktoren bei der Verspätung einer Ankunft eine Rolle spielen können:

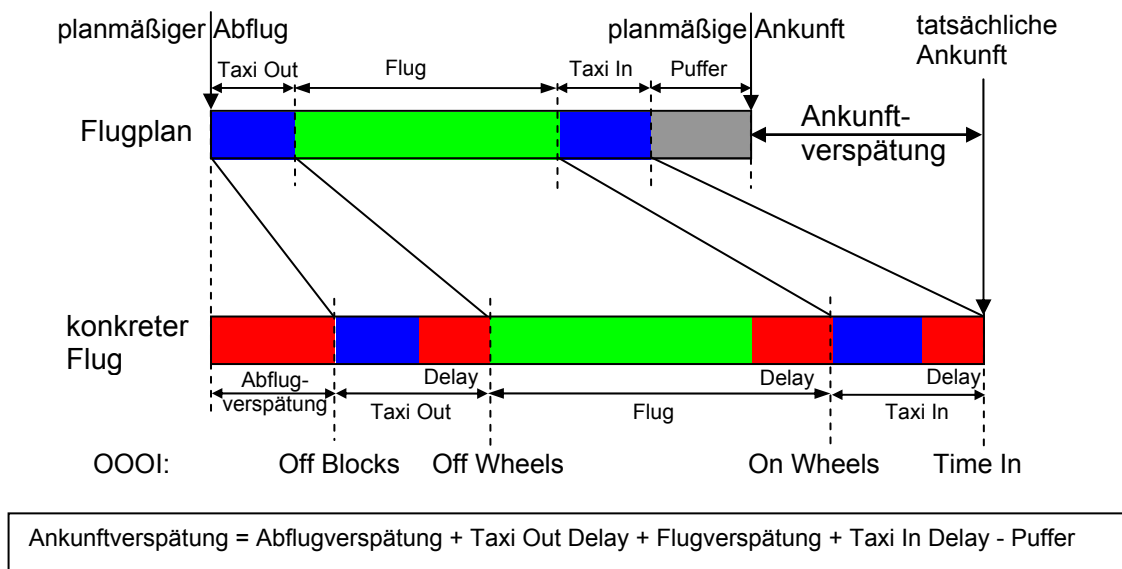


Abb. 3-14: Die verschiedenen Verspätungsarten /Dey02/

Abbildung 2-10 vermittelt eine Vorstellung davon, wie häufig bestimmte Verspätungsursachen Grund von Verspätungen sind.

Es ist folglich offensichtlich nicht sinnvoll, eine minimale Ankunftsverspätung zum Optimierungsziel für den Rollverkehr alleine zu machen, ohne dass zugleich andere Teile der Prozesskette betrachtet werden. Gegenstand dieser Arbeit ist eine Optimierung des Rollverkehrs. Das Optimierungsziel ist daher eine minimale mittlere Rollzeit. Die entsprechende Zielfunktion wird im nächsten Kapitel formuliert.

Für die Flugplanung der Luftverkehrsgesellschaften werden die Verspätungsursachen nicht nach einzelnen Phasen der Blockzeit getrennt erfasst. Bei der Deutschen Lufthansa errechnet sich die für die Umlaufplanung und die veröffentlichten Flugpläne verwendete Blockzeit vielmehr aus dem 68%-Perzentil der tatsächlichen Flugzeiten des Vorjahreszeitraumes, d.h. 68% aller Flüge des Vorjahreszeitraumes waren spätestens nach dieser Zeit am Zielflughafen gelandet. Damit werden alle möglichen Verspätungsursachen zugleich erfasst. Der „Puffer“ für unvorhergesehene Verspätungen, den die OOOI-Definition vorsieht (s. Abbildung 3-14), ist auch bei dieser Betrachtungsweise vorhanden, er wird jedoch nicht separat ausgewiesen.

3.6.2 Formulierung der Zielfunktion

Das Modell, das im Folgenden entworfen wird, soll den gesamten Bereich des Rollens am Boden umfassen, der auf Vorfeld und Rollfeldern stattfindet. In funktionaler Hinsicht ist dies der Bereich, der normalerweise von den Rollverkehrslotsen auf der Frequenz „Ground“ gesteuert wird. Auf größeren Flughäfen (und solche sind natürlich die hauptsächliche Zielgruppe für eine Rollverkehrsoptimierung) ist die Kontrolle des Bodenverkehrs oft noch zusätzlich unterteilt, z.B. nach geographischen Kriterien (Ground Nord/Ground Süd) oder nach funktionalen Kriterien (z.B. getrennte Frequenzen für „Taxi“ und „Apron“)²⁵. Modellierungsbereich im Sinne der Aufgabenstellung sind (analog Abbildung 2-3) die Prozessschritte *Taxi-in*, *Apron manoeuvring*, *Terminal manoeuvring* und *Taxi-out*. Start- und Landebahnen sind nur insofern Teil des Modells, als sie bei Taxi-Vorgängen überquert werden können, falls sie nicht für Starts oder Landungen gesperrt sind.

Quellen für Rollverkehrsvorgänge sind in diesem Modell für *Taxi-in* - Rollvorgänge die Abrollwege der Landebahnen (Runway Exits) sowie für *Taxi-out* - Rollvorgänge die Flugzeugpositionen am Terminal oder an anderen Stellen auf dem Vorfeld. Senken sind beim *Taxi-in* dementsprechend die Flugzeugpositionen am Terminal oder andere Abstellpositionen auf dem Vorfeld, beim *Taxi-out* sind die Senken die Zurollwege zu den Startbahnen.

Ziel der Optimierung ist es, jedes einzelne Flugzeug so von seinem Start zu seinem Ziel auf dem Rollfeld und dem Vorfeld zu führen, dass die Summe aller Rollzeiten minimal wird. Die Ermittlung eines kürzesten Weges für einen bestimmten Rollauftrag mit Hilfe eines Kürzeste-Wege-Algorithmus kann dabei allerdings nur der erste Teil der zu lösenden Aufgabe sein. Das eigentlich zu lösende Problem ist die optimale Führung eines jeden Flugzeugs bei dichtem Rollverkehr auf dem Vorfeld. Hierbei muss davon ausgegangen werden, dass Flugzeuge einander behindern oder gar blockieren können; folglich müssen Ausweichmanöver von Flugzeugen untereinander möglich werden. Damit gilt es, nicht nur den absolut kürzesten Weg, sondern den kürzesten freien (und damit realisierbaren) Weg zu finden. Ziel dieses Optimierungsansatzes ist es daher, die Summe der real erreichbaren Rollzeiten aller gegebenen Fahrtaufträge zusammen zu minimieren:

$$\min\left(\sum_{m=1}^n \text{real} \sum_{(i,j) \in E} \lambda_{ij_m} \varphi(a)_{ij_m}^{m,t}\right)$$

²⁵ Auf dem Flughafen Frankfurt/Main ist die Verantwortung für den Rollverkehr nicht nur funktional, sondern auch organisatorisch getrennt, da das Rollfeld von der Deutschen Flugsicherung (DFS), die Vorfelder jedoch vom Flughafenbetreiber Fraport überwacht werden. An anderen Flughäfen gibt es ähnliche Regelungen (z.B. München), an manchen wird aber auch der gesamte Rollverkehr von der DFS kontrolliert.
/Tisc02/

mit

- $N: \{1, \dots, n\}$ - Fahraufträge Nr. 1 bis n
- $i_{1,m} = s_m$ - Quellknoten Auftrag m
- $j_{dest,m} = d_m$ - Zielknoten Auftrag m
- t - Zeitpunkt (Laufvariable)
- $\varphi(a)$ - Fluss auf Kante a
- λ - Kantengewicht, i.e. Fahrzeit auf einer Kante

Folgende Nebenbedingungen sind einzuhalten:

Die gefundenen Wege müssen zusammenhängend sein (Flusserhaltungsgleichung):

$$\sum_{i \in \delta^{in}(k)} \varphi(a)_{ik}^{m,t-\lambda_{ik}} = \sum_{j \in \delta^{out}(k)} \varphi(a)_{kj}^{m,t}$$

Jeder Weg beginnt im definierten Start- und endet im definierten Endknoten:

$$\sum_{i \in \delta^{in}(d_m)} \sum_{t=t_{dest}-z}^{t_{dest}} \varphi(a)_{d_m i}^{m,t} = 1$$

$$\sum_{j \in \delta^{out}(s_m)} \sum_{t=0}^z \varphi(a)_{s_m j}^{m,t} = 1$$

Kollisionsfreiheit:

$$\sum_{m=1}^n k^{m,t} \leq 1 \quad \forall t$$

Mindestabstand:

$$\sum_{m=1}^n \varphi(a)_{ij}^{m,t} \leq 1 \quad \forall (i, j), t$$

3.6.3 Nebenbedingung der festen Reihenfolge

Für jeden Flughafen legen die *Flughafenbenutzungsordnung* sowie – für alle Flughäfen gültig – die *Betriebsanweisung für den Flugverkehrskontrolldienst (BA-FVK)* fest, nach welchen Regeln der Rollverkehr der Flugzeuge am Boden abzulaufen hat. Grundlage für diese Überlegungen sind sowohl das Ziel einer größtmöglichen Sicherheit als auch das Streben nach minimalem Treibstoffverbrauch und die größtmögliche Flüssigkeit des Verkehrs.

Die Regeln des realen Systems müssen im Modell abgebildet werden. Insbesondere die Sicherheitsregeln sind für den Entwurf eines Algorithmus zu beachten, der die Lotsen bei der Lenkung des Bodenverkehrs unterstützen soll. Die wichtigste Forderung ist daher die Kollisionsfreiheit, die durch die zeitweise Sperrung von Kanten und von Knoten (und damit der Übergänge zwischen zwei Kanten) erreicht wird. Diese Sperrungen führen zu Zeitfenstern, in denen die Kanten für weitere, noch zu planende Rollvorgänge zur Verfügung stehen. Das zu lösende Problem ist für jeden Rollvorgang ein *kürzeste-Wege-Problem mit Zeitfenstern* (*shortest path problem with time windows, SPPTW*). Ein Algorithmus für dieses Problem wurde in Kapitel 3.4.4 vorgestellt.

Dieser Algorithmus wird im Folgenden weiterentwickelt, wobei die Rollvorgänge weiterhin mit fester Reihenfolge geplant werden. Dies bedeutet, dass innerhalb einer Klasse von Flügen mit gleicher Priorität für jeden Rollvorgang die optimale Route gesucht wird, ohne die Reihenfolge, in der die Rollvorgänge beginnen, zu verändern. Abbildung 3-15 zeigt den vom Algorithmus einzuhaltenden Ablauf für die Verwaltung der Label mit den Sperrungen.

Die drei Prioritätsklassen sind folgende:

- Landende Flugzeuge genießen am Flughafen grundsätzlich die höchste Priorität;
- an zweiter Stelle folgen Flugzeuge, die zum Start rollen;
- und schließlich gelandete Flugzeuge auf dem Weg zum Terminal.

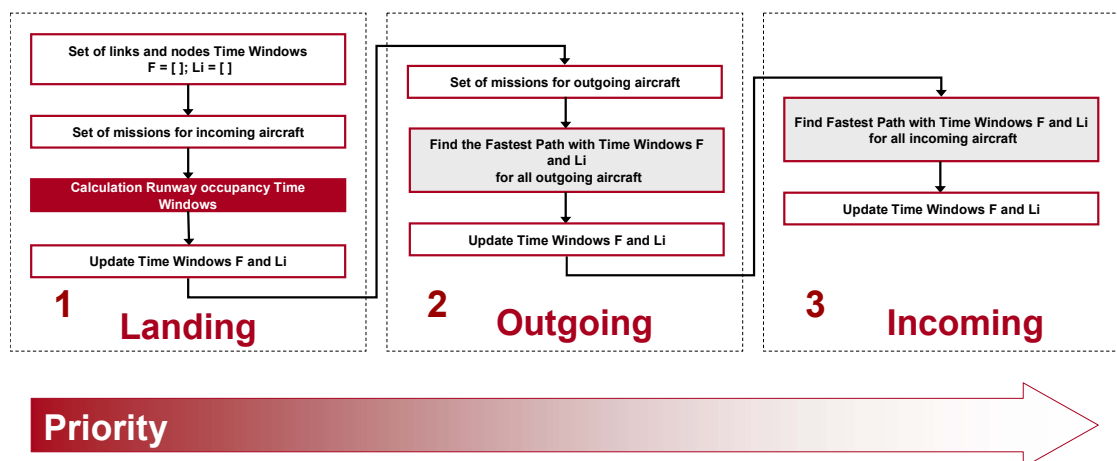


Abb. 3-15: Prioritätsklassen von Flugzeugen bei der Verwaltung der Sperrzeiten /Bou03/

An dieser Stelle ist noch darauf hinzuweisen, dass alle anderen Fahrzeuge, die sich auf dem Vorfeld bewegen, den Flugzeugen gegenüber grundsätzlich wartepflichtig sind (Ausnahmen: Feuerwehr im Einsatz und Vorfeldkontrolle). Daher kann darauf

verzichtet werden, diese Rollvorgänge (z.B. durch Tankwagen, Gepäckwagen, Schlepper auf Leerfahrt, fahrbare Laderampen oder Treppen) zu modellieren, da diese dem Rollverkehr der Flugzeuge immer Vorfahrt gewähren und ihn daher nicht beeinflussen können.

Durch die klare Prioritätsregelung und die festen Reihenfolgen (d.h. innerhalb einer der drei oben vorgestellten Prioritätsklassen haben die zuerst geplanten Flugzeuge Priorität über die danach geplanten) kann auch auf die Bestimmung oder Modellierung von Vorfahrtsregeln für die Flugzeuge untereinander (wie z.B. „rechts vor links“) verzichtet werden. Kreuzungen, Abzweigungen oder einspurig befahrbare Rollwege (welche die Regel sind) werden stattdessen durch das zuerst geplante Flugzeug für alle weiteren gesperrt.

Über die drei Prioritätsklassen hinaus soll im Algorithmus berücksichtigt werden, dass außer landenden auch startende Flugzeuge die Startbahn für jeden weiteren Verkehr blockieren. Die Priorität wird hierbei in der zweiten Klasse (Outgoing) angesiedelt, weil es sich anbietet, die Startbahn einfach nur als letzte Kante des berechneten Pfades zu sperren.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird zu untersuchen sein, ob die vereinfachende Annahme einer festen Reihenfolge der Rollvorgänge gerechtfertigt ist; bzw. ob bei einer zusätzlichen Einbeziehung der Start-Reihenfolge der Rollvorgänge ein noch größeres Optimierungspotenzial erreichbar ist, d.h. ob die Taxi-Vorgänge dann noch kürzer werden.

3.7 Modellierung der Flughafen-Topologie

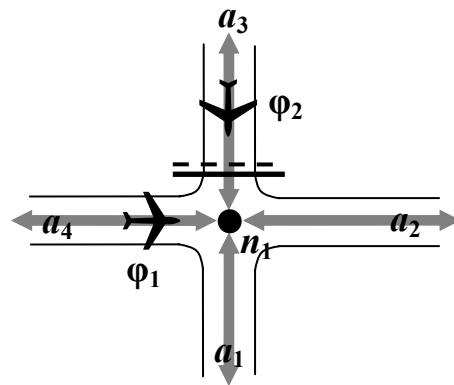
3.7.1 Konstruktion des Basisgraphen

Um den Rollverkehr auf einem Flughafen mit Hilfe eines Graphenalgorithmus optimieren zu können, muss ein Flughafen als Graph modelliert werden. Dazu werden Rollwege, Vorfeldflächen, Flugzeugpositionen und sonstige Orte, an denen sich Flugzeuge aufhalten können, als Kanten modelliert. Diese Kanten sind gewichtet, wobei das Kantengewicht der Länge der Kante entspricht. Unter der Annahme, dass die Flugzeuge auf allen Kanten mit der annähernd gleichen Grundgeschwindigkeit von 15 Knoten (knapp 28 km/h) rollen, entspricht das Kantengewicht damit der Rollzeit, die ein Flugzeug benötigt, um die Kante zu durchfahren.

Da die Kantengewichte den Kantenlängen entsprechen, wird die Zielfunktion mit Hilfe eines kürzeste-Wege-Algorithmus implementiert.

Die Kanten stoßen in den Knoten aneinander. Knoten selbst haben zwar in dem gewählten Modellierungsansatz keine physische Ausdehnung, dennoch passieren

Flugzeuge sie auf dem Weg von einer Kante zur anderen. Knoten können also auch gesperrt werden und dadurch z.B. verhindern, dass dieselbe Kreuzung, in der 4 Rollwege zusammentreffen, zugleich für zwei verschiedene Taxi-Vorgänge benutzt wird (Abbildung 3-16).



Rollvorgang $\varphi_1 = (a_4, n_1, a_2)$ blockiert n_1 , solange a_4 oder a_2 belegt sind (s. hierzu auch die Ausführungen zur Kantenzellularisierung in Kapitel 3.7.3)

Abb. 3-16: Modellierung einer Rollwegkreuzung (Knoten n_1 , vier adjacente Kanten a_1 bis a_4 und zwei Rollvorgänge φ_1, φ_2)
(eigene Darstellung)

Sollte ein Knoten durch einen Rollvorgang gesperrt sein, während ein zweiter, konkurrierender Rollvorgang denselben Knoten nachfragt, so wartet der zweite Rollvorgang auf der benachbarten Kante, bis der Knoten wieder frei wird.

Um gemäß diesem Ansatz einen Flughafen abbilden zu können, sind die Koordinaten aller Knoten eines Flughafens sowie die Liste aller vorkommenden Kanten erforderlich.

An dieser Stelle soll das Basis-Graphenmodell des Flughafens Frankfurt/Main vorgestellt werden. Für diesen Flughafen liegen die genannten Daten in der erforderlichen Qualität vor. Auf die Einzelheiten, die für die Auswahl dieses Flughafens für eine Rollverkehrsoptimierung ausschlaggebend sind, wird in Kapitel 4.2.1 eingegangen. In den folgenden Kapiteln wird der hier eingeführte „Grundgraph“ um weitere Aspekte erweitert, die eine realistischere Modellierung des Verkehrs und damit eine bessere Kalibrierung des Modells erlauben.

In der Grundform, d.h. Knoten nur in Kreuzungen und Verzweigungen oder an Endpunkten (v.a. bei Abstellpositionen und Flugsteigen), besteht der Graph aus **849 Knoten** sowie **982 Kanten**.

Die Knoten liegen in sehr genauen geographischen Koordinaten vor; die Kanten liegen in Form einer Kantenliste vor. Da die Datenstrukturen in MATLAB diese Form der Speicherung gut unterstützen (strukturiertes Feld / structure array), braucht die Kantenliste auch nicht weiter transformiert zu werden.

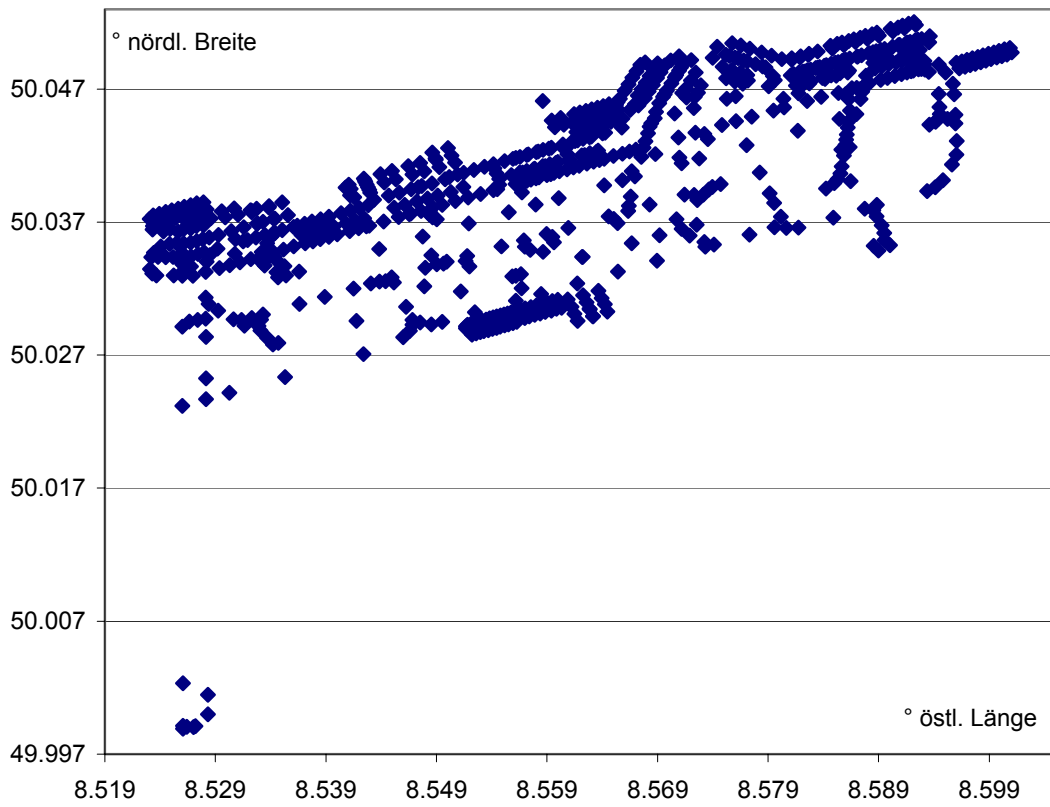
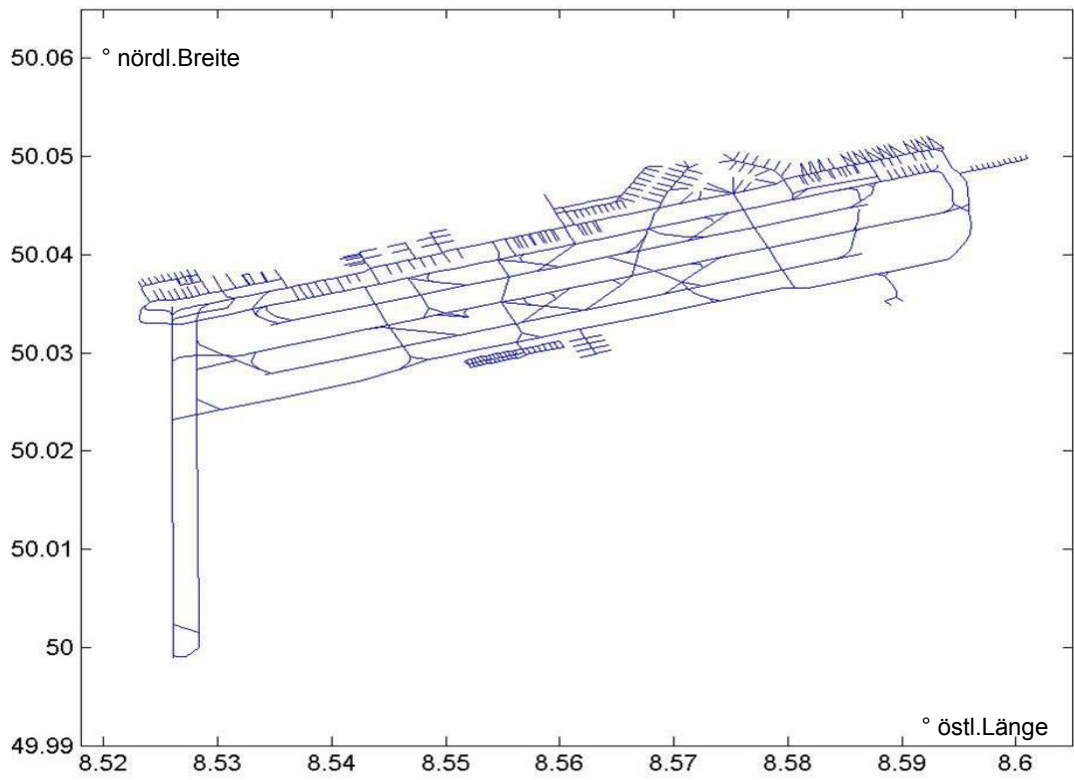


Abb. 3-17: Graphenmodell des Frankfurter Flughafens: Kanten (oben) und Knoten (unten)
(eigene Darstellung)

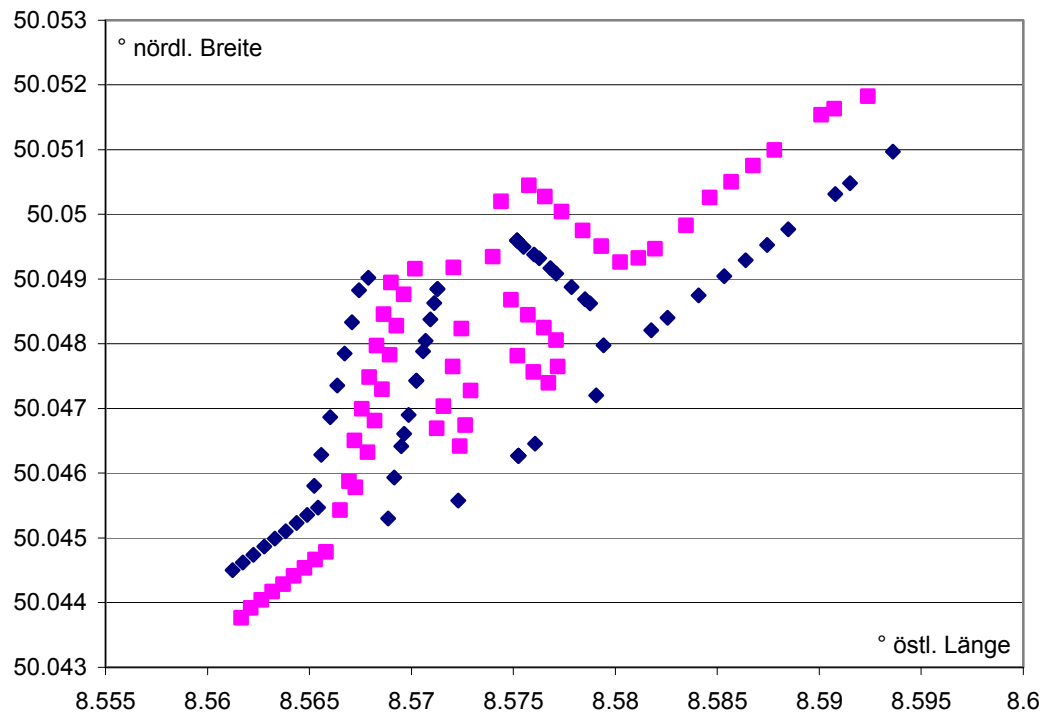


Abb. 3-18: Graphenmodell des Frankfurter Flughafens: Knoten aller Gates A bis E
(eigene Darstellung)

3.7.2 Abbildung einspuriger Rollwege

Rollwege sind in der Regel so schmal, dass darauf rollende Flugzeuge weder einander begegnen noch einander überholen können.



Foto: DLR

Abb. 3-19: Flughafen Frankfurt/Main, Rollweg „November“

Daher wird jeder Rollweg durch eine Kante modelliert, auf der kein Überholen möglich ist (FIFO). Rollwege können entweder in beiden Richtungen befahren

werden, oder sie sind grundsätzlich nur für das Befahren in einer Richtung vorgesehen. Um diese beiden Fälle modellieren zu können, wird im in dieser Arbeit entwickelten Modell das Rollwegenetz des Flughafens durch einen Digraphen abgebildet, wobei ein Bogen pro Richtung vorgesehen ist. Ein Rollweg, der in beiden Richtungen befahrbar ist, wird also durch zwei antiparallele Bögen dargestellt. Wenn ein Bogen temporär gesperrt wird, muss hierbei auch der antiparallele Bogen gesperrt werden, da es sich physisch um denselben Rollweg handelt:

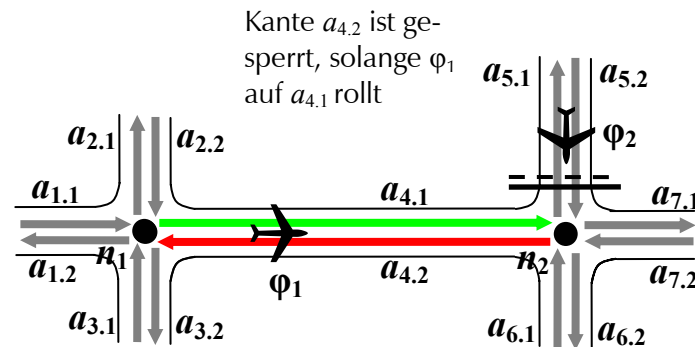


Abb. 3-20: Sperrung eines Rollweges für Gegenverkehr durch Sperrung der antiparallelen Kante (eigene Darstellung)

3.7.3 Zellularisierung langer Kanten

Wie die realen Flughafenansichten in den Abbildungen 2-3 und 4-1 zeigen, sind Rollwege im Sinne dieses Modells unterschiedlich lang. Dies bedeutet, dass ein Rollwegabschnitt, der so lang ist, dass mehrere Flugzeuge darauf Platz haben, in geeigneter Weise modelliert werden muss: Mehrere Flugzeuge, die in derselben Richtung fahren, sind zulässig; für Flugzeuge in Gegenrichtung hingegen muss der gesamte Rollweg in voller Länge gesperrt werden, bis das in der ersten Richtung rollende Flugzeug (bei mehreren Flugzeugen: das letzte in erster Richtung rollende Flugzeug) den Rollweg wieder verlassen hat. Bei einer Modellierung des Rollwegenetzes als Graph kommen hierbei grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze in Frage:

- Alternative 1: Die langen Rollwege werden durch lange Kanten abgebildet, d.h. Knoten befinden sich nur an tatsächlichen, physischen Wegkreuzungen. Diese Variante hält zwar den Aufwand zur Speicherung von Knoten und Kanten gering, allerdings muss eine zusätzliche Datenstruktur vorgesehen werden, die die Kanten für Verkehr in entgegengesetzter Richtung sperrt, Verkehr in derselben Richtung zulassen und die Anzahl der in der-

selben Richtung auf der Kante rollenden Flugzeuge mit ihren genauen Positionen verwalten muss.

- Alternative 2: Die langen Rollwege können auch in Teilabschnitte zerlegt werden, die so kurz sind, dass sie höchstens ein Flugzeug aufnehmen können. Die langen Rollwegabschnitte werden quasi „zellularisiert“. Diese Variante hat den deutlichen Vorteil, dass keine speziellen Datenstrukturen geschaffen werden müssen, die die Anzahl der (in gleicher Richtung rollender) Flugzeuge auf einer langen Kante verwalten. Die Sperrung der (in Fahrtrichtung) zwischen dem Flugzeug und der nächsten Kreuzung oder Abzweigung liegenden Kanten kann mit Hilfe der Labels geschehen, die für die Verwaltung der Sperrzeiten ohnehin schon vorgesehen sind. Eine besondere Behandlung der hinter dem Flugzeug liegenden Rollwegstrecke ist nicht erforderlich. Die Position des Flugzeugs ist durch den Rollwegabschnitt, auf dem es sich aufhält, bereits festgelegt.

Ein weiterer deutlicher Vorteil ist die vereinfachte Modellierung von Kreuzungen: Mit Hilfe der kurzen Kanten, die zugleich in etwa dem Sicherheitsabstand entsprechen, den ein Flugzeug beim Stoppen vor einer Kreuzung ohnehin einhalten wird, lässt sich eine Kreuzung, die in einer Richtung befahren wird, leicht für die Querrichtung sperren, ohne dass ein realistischer Sicherheitsabstand verletzt wird.

Diese deutlichen Vorteile werden allerdings durch den Nachteil erkaufte, dass die Länge dieser Rollweg-„Zellen“ gemittelt werden muss, weil gerade auf den großen Verkehrsflughäfen, für die ein Rollverkehrsmodell ein Optimierungspotenzial besitzt, ein Mix aus Flugzeugen verschiedener Größe charakteristisch ist. Dieser Nachteil erscheint jedoch verhältnismäßig gering zu sein, zumal ebendieser Flugzeug-Größenmix auch den möglichen Mittelungsfehler reduziert, und zwar dadurch, dass bei einer Mischung aus kleineren und größeren Flugzeugen (kürzeren und längeren) die durchschnittliche Länge pro Flugzeug in etwa einer Kantenzellenlänge entspricht und damit die gesamte Kapazität eines Rollwegs insgesamt realistisch modelliert ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher dieser Ansatz der Zellularisierung langer Rollwege durch kurze Kanten gewählt.

Im Folgenden soll eine sinnvolle Länge für diese Zellen bzw. kurzen Kanten bestimmt werden. Abbildung 3-21 zeigt eine Flugzeug-Warteschlange und verdeutlicht die inhärente Fehlerkorrektur durch den in der Realität anzutreffenden Flugzeug-Mix. Interessanter als die tatsächliche Länge des Flugzeugs ist hierbei die Länge des Flugzeugs zuzüglich eines betrieblich üblichen Sicherheitsabstands. Die Flughafen-Benutzungsordnungen oder das Luftfahrthandbuch Deutschland (AIP)

treffen in der Frage des Sicherheitsabstandes am Boden rollender Luftfahrzeuge keinerlei Festlegung. /STR97//AIP04.2//AIP04.1/ Dieser wird daher im Einzelfall der Verkehrssituation angemessen durch den Piloten bestimmt.

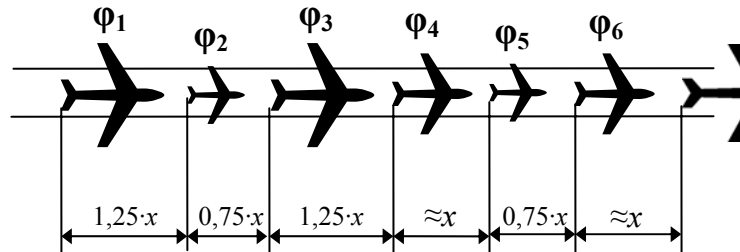


Abb. 3-21: Bestimmung der geeigneten Kantenlänge x
(eigene Darstellung)

In der folgenden Tabelle sind die Längen gängiger Verkehrsflugzeuge aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die genannten Flugzeugtypen stellvertretend für alle Flugzeuge ungefähr gleicher Länge genannt werden:

Flugzeugtyp	Länge	Anteil aller Fz- Bewg.
<i>Großraumflugzeuge</i>		
A310-300	46,7 m	2%
A330-200	59,0 m	5%
A340-600	75,3 m	6%
B 747-400	70,6 m	8%
B 777-200	63,7 m	6%
MD-11	61,2 m	2%
<i>Standardrumpfflugzeuge</i>		
A318	31,4 m	4%
A320-200	37,6 m	20%
A321-100	44,5 m	11%
B 717-200	37,8 m	5%
B 737-700	33,6 m	9%
B 737-900	42,1 m	6%
<i>Regionalflugzeuge</i>		
BAE RJX-85	28,6 m	4%
B/C CRJ200ER	26,8 m	4%
Embraer ERJ145ER	29,9 m	4%
F/D 328JET	21,2 m	4%

Tabelle 3: Längen gängiger Verkehrsflugzeuge
(/Neuf03/, /Airb02.1/, /lcte03/)

Die Länge der Zellen bzw. kurzen Kanten sollte dem in dichtem Verkehr im Mittel üblichen Maß entsprechen. Wird die Zellenlänge zu groß gewählt, wird das Modell gegenüber der Realität eine zu geringe Kapazität aufweisen; ist sie zu klein, werden möglicherweise nicht alle Blockierungen erkannt, die ein großes Flugzeug, welches in der Realität über die Kantenlänge des Modells hinausragt, möglicherweise auslöst. Da der Flugzeugtypen-Mix in jedem betrachteten Zeitabschnitt variieren kann, kommt eine arithmetische Mittelung nicht in Frage. Zudem ist eine solche Berechnung mit großer Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Typen-Mixes behaftet. Die folgende grafische Übersicht zeigt die Flugzeuglängen und deren Häufigkeit. Der gewichtete Mittelwert ist 44,80m.

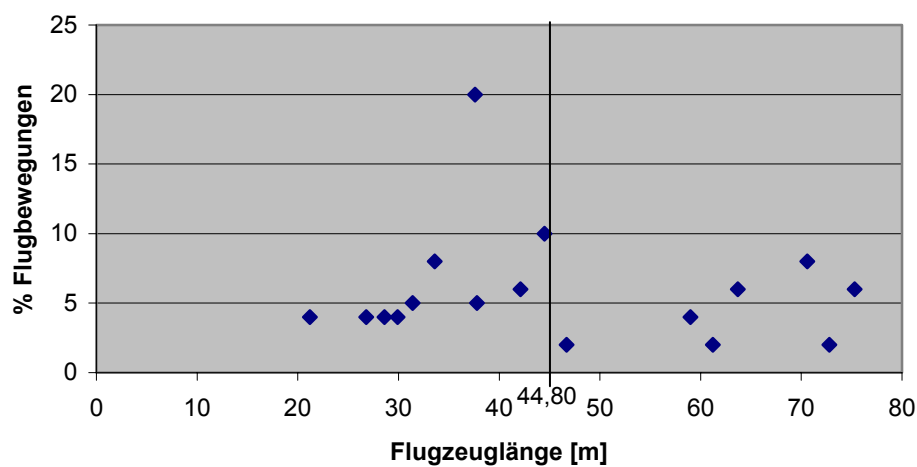


Abb. 3-22: Flugzeuglängen und –häufigkeiten
(eigene Darstellung)

Tabelle 3 zeigt, dass Standardrumpf- und Regionalflugzeuge, die zusammen mindestens 75% des Aufkommens an Flugbewegungen selbst an großen Drehkreuzflughäfen wie Frankfurt ausmachen, bis auf den Airbus A321 eine Rumpflänge von höchstens 40m aufweisen. Ein Sicherheitsabstand von 20 m ist zwar recht gering, kann in der Realität in einer Warteschlange stehender Flugzeuge (Fall maximaler Auslastung der Infrastruktur) aber vorkommen. Daher fällt die Entscheidung für eine Kantenlänge der kurzen Kanten von **60 Metern**. Abbildung 3-23 zeigt beispielhaft die Modellierung einer langen Kante zwischen zwei Kreuzungen.

Die Zellularisierung der langen Kante erhöht natürlich die Zahl der Kanten und Knoten über die in Kapitel 3.7.1 vorgestellte hinaus. Anstatt der im Ursprungsgraph enthaltenen 849 Knoten und 982 Kanten enthält der endgültige Graph, der dem im Folgenden vorgestellten Optimierungsalgorithmus zugrunde liegt, **1831 Knoten** und **1964 Kanten**.

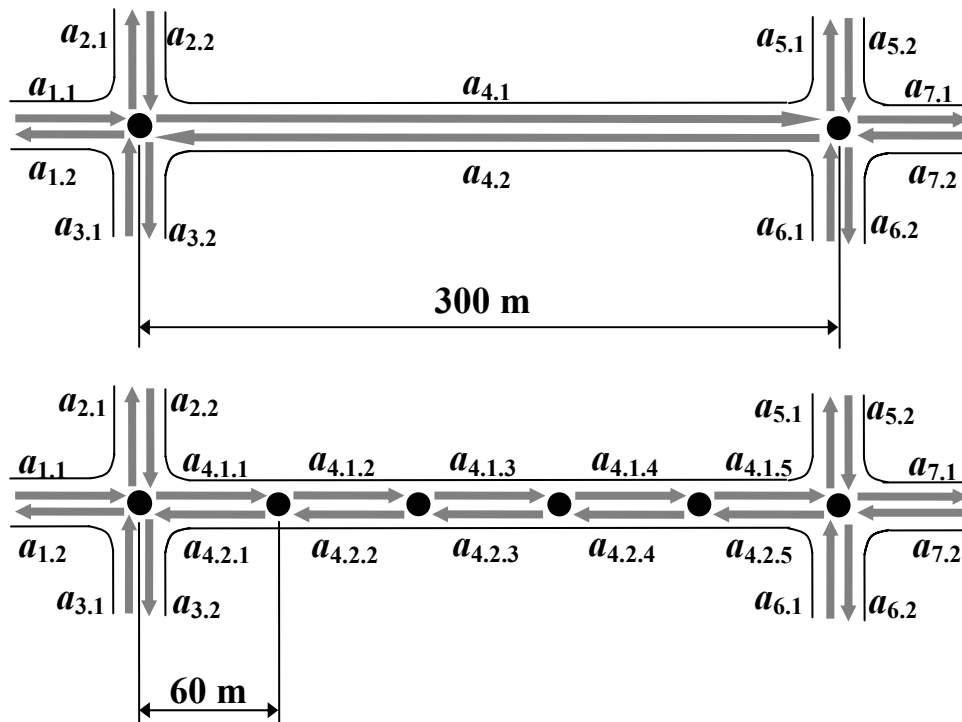


Abb. 3-23: Zellularisierung langer Kanten
(eigene Darstellung)

3.7.4 Modellierung der Flugzeuge

Aus den im vorigen Abschnitt getroffenen Festlegungen und der Beschreibung der modellierten Systemeigenschaften folgt, dass jede der kurzen Kanten genau ein Flugzeug aufnehmen kann und insofern entweder frei oder belegt sein kann. Damit erübrigt sich auch die Festlegung einer spezifischen Länge für ein Flugzeug; ein Flugzeug im Sinne des Modells entspricht einer belegten Kante. Eine Berücksichtigung verschiedener Größen (Längen) von Flugzeugen findet also über die Schätzung der geeignetsten Kantenlänge (einschließlich der Überlegung zur inhärenten Längennivellierung) hinaus nicht statt.

3.8 Kurvenkompensation

Bei einer Darstellung des Graphen, die seine Topologie augenscheinlich wiedergibt, ist für den Betrachter offenkundig, bei welchen Kantenübergängen Abbiegen und damit Abbremsen erforderlich ist und bei welchen nicht. Da jedoch die formale Definition des Graphen von seiner graphischen Darstellung unabhängig ist, muss für die Ermittlung des kürzesten Weges diese Information über Zeitzuschläge für Abbiegevorgänge noch zusätzlich berechnet oder erhoben, gespeichert und vom Algorithmus berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen wird auch als *Kurvenkompensation (turn penalty)* bezeichnet. Dazu wird der gewichtete Graph $G = (V, E, \Lambda)$ erweitert um die Menge aller Abbiegekosten σ zwischen zwei Kanten auf den Graphen $G = (V, E, \Lambda, \sigma)$, wobei

$$\sigma = \{\sigma_{ab} \mid (a, b) \in E\}$$

ist.

Es werden in der Literatur verschiedene Verfahren genannt, um diese Abbiegekosten bei der Berechnung des kostenminimalen bzw. kürzesten Weges zu berücksichtigen. Drei dieser Verfahren sollen hier kurz vorgestellt werden.²⁶

3.8.1 Dual Graph

Beim Ansatz *Dual Graph* wird dem Graphen, der das Transportnetzwerk darstellt, ein weiterer Graph, der sog. Dual Graph („Zweitgraph“), überlagert. Die Knoten des Dual Graph repräsentieren dabei die Kanten des Originalgraphen und übernehmen auch deren Eigenschaften. Die Kanten des Dual Graph stellen Kurven des Originalgraphen dar. Knoten des Originalgraphen, an denen Pfade beginnen oder enden, sind auch Knoten des Dual Graph.

Falls $G = (V, E, \Lambda, \sigma, T)$ ein gerichteter zusammenhängender Graph ist mit der Knotenmenge $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, der Kantenmenge $E \subseteq [V]^2$, der Menge aller Kantengewichte $\Lambda = \{\lambda_{uv} \mid (u, v) \in E\}$, der Menge aller Abbiegekosten $\sigma = \{\sigma_{uv} \mid (u, v) \in E\}$ sowie der Menge aller möglichen Abbiegevorgänge $T = \{(u, v, w) \mid u, v, w \in V \wedge (u, v, \lambda_{uv}, \sigma_{uv}) \in E \wedge (v, w, \lambda_{vw}, \sigma_{vw}) \in E\}$, so gilt für den Dual Graph $D(G)$ des Originalgraphen G :

$$D(G) = (V', E')$$

mit

$$V' = E \text{ sowie } E' = \{(f, g) \mid f, g \in V' \wedge f = (u, v, \lambda_{uv}, \sigma_{uv}) \wedge g = (v, w, \lambda_{vw}, \sigma_{vw})\}.$$

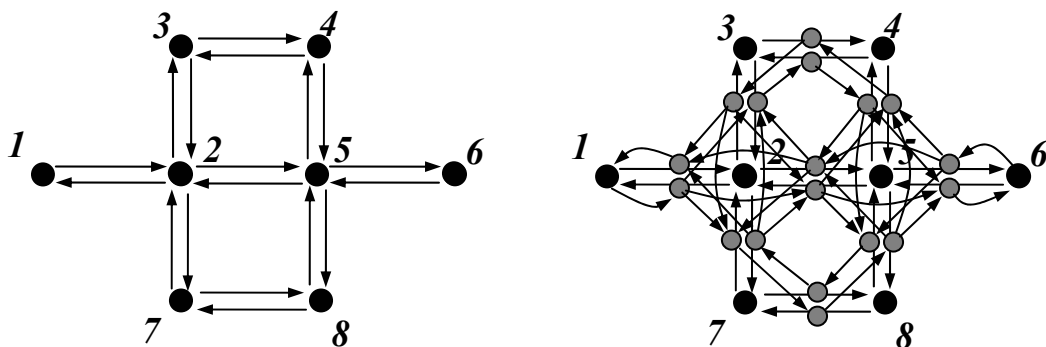


Abb. 3-24: Ursprungsgraph (li.) und der korrespondierende Dual Graph (re.) /Fli02/

Abbildung 3-24 zeigt links einen Originalgraphen mit acht Knoten und achtzehn Kanten. Der korrespondierende Dual Graph, auf der rechten Seite dem Original-

²⁶ Die Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3 lehnen sich an /Fli02/ an.

graphen überlagert dargestellt, hat entsprechend zwanzig Knoten (achtzehn Kanten des Originalgraphen, zusätzl. die beiden Pfad- Anfangs- bzw. Endpunkte Nr. 1 und Nr. 6) sowie 36 Kanten.

Der Vorteil des Dual Graph-Ansatzes ist, dass Graphenalgorithmien z.B. zur Suche des kürzesten Weges ohne Modifikation verwendet werden können. Die Abbiegekosten des Originalgraphen sind in den Wegekosten des Dual Graph enthalten. Allerdings muss der Originalgraph zu diesem Zweck zunächst um den Dual Graph erweitert werden. Nach der Berechnung muss das Ergebnis, z.B. der kürzeste Weg, wieder auf den Originalgraphen zurückgeführt werden.

3.8.2 Expanded Network

Auch beim Expanded Network-Ansatz wird der Graph um zusätzliche Knoten und Kanten erweitert. Hierbei wird der Graph nicht um einen zweiten Graphen ergänzt, sondern diejenigen Knoten, an denen Abbiegen möglich ist, werden expandiert, i.e. dupliziert. Ein Knoten wird dabei durch zwei Knoten und Abbiegekanten repräsentiert, deren Kantengewichte wiederum die Abbiegekosten des Ursprungsgraphen enthalten.

Abbildung 3-25 zeigt links einen Knoten mit vier eingehenden und drei ausgehenden Kanten sowie den Abbiegemöglichkeiten. Das entsprechende Expanded Network auf der rechten Seite enthält stattdessen sieben Knoten und fünfzehn Kanten.

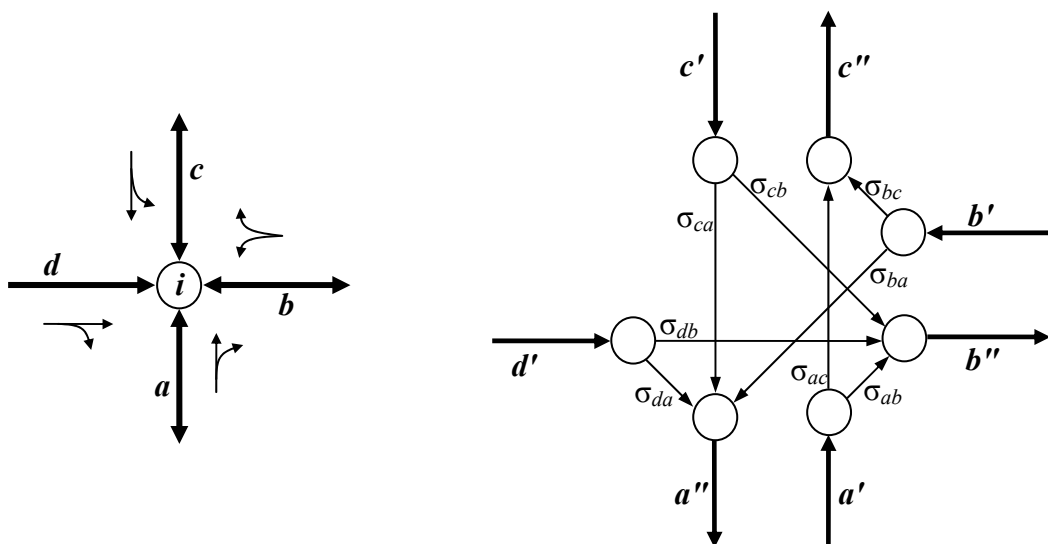


Abb. 3-25: Expanded Network am Beispiel eines Knotens /Pall97/

Vorteil dieses Ansatzes ist, ähnlich wie beim Dual Graph-Verfahren, dass Optimierungsprobleme im Expanded Network mit Hilfe von Standard-Algorithmien zu lösen sind. Allerdings verursacht das Expandieren der Knoten eine deutliche Zunahme der Knoten und Kanten. Die Rückführung einer gefundenen Lösung im Ex-

panded Network auf den Originalgraphen ist allerdings weniger aufwändig als beim Dual Graph /Pall97/.

3.8.3 Arc-Label Shortest Path

Dieser Ansatz modifiziert anstelle des Graphen den Algorithmus. Der Algorithmus wird hierzu nicht mehr knotenorientiert (ein Pfad = eine Folge von Knoten, verbunden durch Kanten), sondern kantenorientiert (ein Pfad = eine Folge von Kanten) formuliert. Der Algorithmus betrachtet dann bei der Suche nach einem Weg nicht mehr die Knoten, sondern die Kanten und damit auch die Kantengewichte. Zusätzlich zu den Kantengewichten werden in einer weiteren Datenstruktur die Abbiegekosten aller möglichen und zulässigen Abbiegevorgänge hinterlegt, so dass der Algorithmus diese bei der Bestimmung einer Weglänge berücksichtigen kann.

Hier wird beispielhaft ein Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Weges vorgestellt, da ein solcher auch zur Bestimmung des kürzesten Rollweges zum Einsatz kommen wird. Der Algorithmus wurde in /Fli02/ vorgestellt. Er basiert auf dem Algorithmus zur Breitensuche und ähnelt dem Algorithmus von Dijkstra. In der Liste c werden die kürzesten Wege zu einer Kante gespeichert; in der Vorgängerliste π die jeweilige Vorgängerkante.

Nach dem Start des Algorithmus werden zunächst die beiden Listen c und π initialisiert. Danach wird eine Kante, die zum Startknoten $s \in V$ führt, dem Graphen und der Warteschlange Q hinzugefügt. Solange die Warteschlange nicht leer ist, werden Kanten aus der Warteschlange geholt und für die benachbarten Kanten geprüft, um herauszufinden, ob es einen kürzeren Weg als den bisher bekannten zu dieser Kante gibt. Die Bellmansche Optimalitätsbedingung lautet unter Berücksichtigung der Kurvenkompensation:

$$C_a + \sigma_{ab} + \lambda_a \geq C_b$$

Sobald diese Bedingung nicht mehr erfüllt ist, wird der Wert in den Listen c und π aktualisiert:

$$C_b \leftarrow C_a + \sigma_{ab} + \lambda_a; \pi_b \leftarrow a$$

Ist die Kante noch nicht in der Warteschlange, so wird sie dieser hinzugefügt. Nach Ablauf des Algorithmus lässt sich in der Vorgängerliste π ablesen, ob es einen Weg vom Startknoten $s \in V$ zu einem beliebigen Zielknoten $t \in V$ gibt. Gibt es diesen Weg, so lässt sich in der Liste c die dazugehörige kürzeste Weglänge ablesen. Dieser Ansatz betrachtet einen Pfad als eine Folge von Kanten; der Algorithmus speichert in der Vorgängerliste deshalb auch nur Kanten. Um den kürzesten Weg zu finden, ist es erforderlich, die benachbarten Kanten des Zielknotens in der

Algorithmus 4: Arc-Label Shortest Path

Gegeben: gewichteter Graph $G = (V, E, \Lambda, \sigma)$, Startknoten s ,
 alle Kantengewichte $\Lambda = \{\lambda_{uv} \mid (u,v) \in V\}$,
 alle Abbiegekosten $\sigma = \{\sigma_{ab} \mid (a,b) \in E\}$

Variablen: Vorgängerliste $\pi [a]$, Liste der kürzesten Wege $c [a]$, Warteschlange Q , Kanten a, b , Knoten i, j, k

Ausgabe: Kürzester Weg von s nach d mit Hilfe eines kantenorientierten Ansatzes und unter Berücksichtigung der Abbiegekosten σ

```

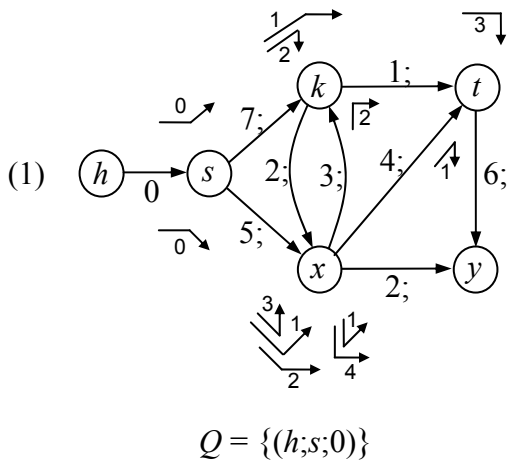
1  for each edge  $a \in E$  do
2       $c [a] \leftarrow \infty$ 
3       $\pi [a] \leftarrow \text{NIL}$ 
4  end
5   $\text{dummyEdge} \leftarrow$  edge points to source node  $s$ 
6  ENQUEUE ( $Q, \text{dummyEdge}$ )
7  while  $Q \neq \emptyset$  do
8       $a (i, j) \leftarrow$  DEQUEUE ( $Q$ )
9      for each  $b(j, k) \in E$  adjacent to  $a(i, j) \in E$  do
10         if  $c [a] + \sigma (a, b) + \lambda [b] < c [b]$ 
11              $c [b] \leftarrow c [a] + \sigma (a, b) + \lambda [b]$ 
12              $\pi [b] \leftarrow a$ 
13             if  $Q$  not contains  $b$ 
14                 INSERT ( $Q, b$ )
15             end
16         end
17     end
18 end

```

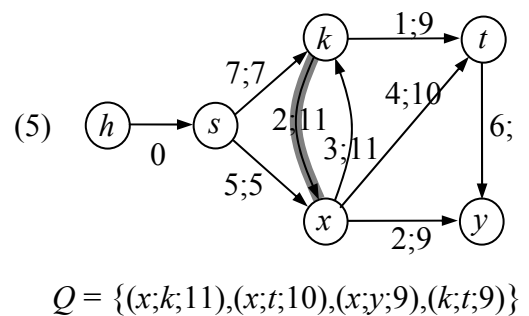
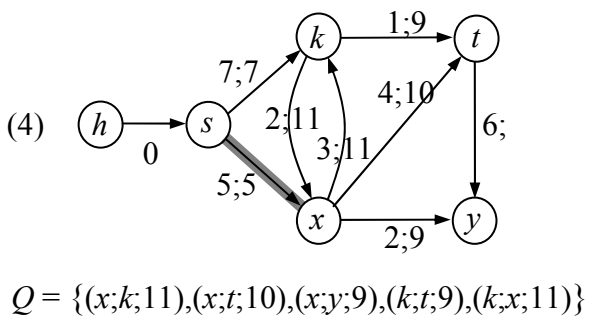
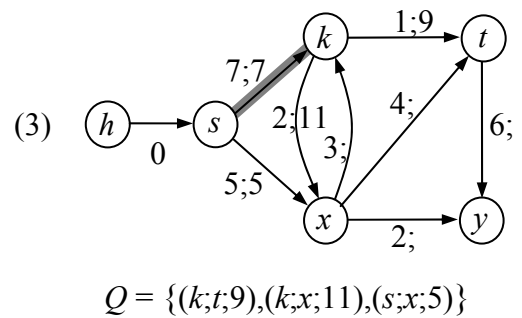
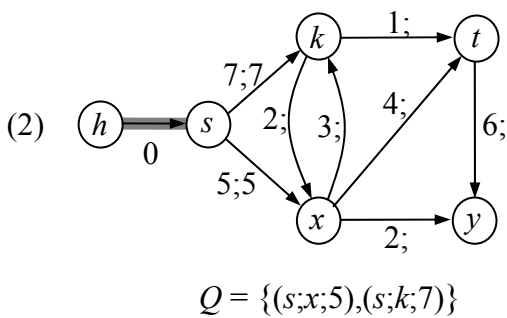
Liste c zu suchen und von der Kante mit den geringsten Kosten den kürzesten Weg über die Vorgängerliste π , die diesen als einfach verkettete Liste speichert, zu bestimmen. Für den Startknoten ist dies nicht erforderlich, da hier eine zusätzliche Kante hinzugefügt wurde. /Pall97/

Abbildung 3-26 zeigt die Funktionsweise des kantenorientierten Arc-Label Shortest Path-Algorithmus. Der Startknoten ist der Knoten s , die anderen Knoten sind ent-

sprechend benannt. Der Knoten h ist ein Behelfsknoten, der benötigt wird, um auf den Startknoten zu kommen. An den Kanten sind die Gewichte angegeben, die nach und nach durch die Werte der Liste c ergänzt werden. In der Warteschlange Q wird jeweils ein Tripel aus Start- und Zielknoten der Kante und ihr Wert in der Liste c gespeichert.



$\sigma(h;s;k) = 0$
$\sigma(h;s;x) = 0$
$\sigma(s;k;x) = 2$
$\sigma(s;k;t) = 1$
$\sigma(s;x;k) = 3$
$\sigma(s;x;t) = 1$
$\sigma(s;x;y) = 2$
$\sigma(k;x;y) = 4$
$\sigma(k;x;t) = 1$
$\sigma(k;t;y) = 3$
$\sigma(x;k;t) = 2$
$\sigma(x;t;y) = 1$



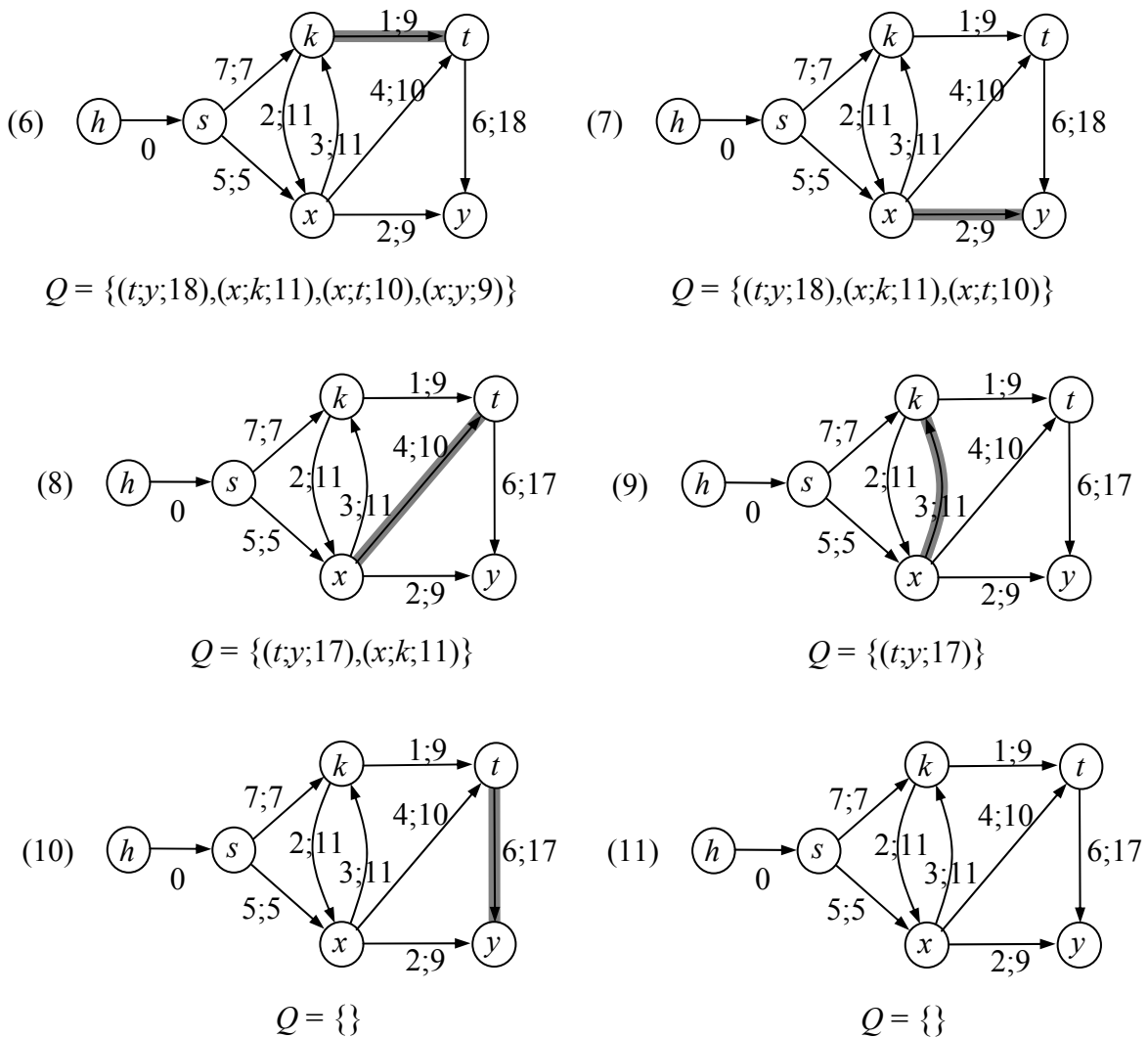


Abb. 3-26: Der Arc-Label Shortest Path – Algorithmus durchsucht einen Beispielgraphen
(eigene Darstellung)

Dieser Ansatz hat gegenüber Dual Graph und Extended Network den Vorteil, dass weder der Graph modifiziert, noch ein gefundener kürzester Weg vom modifizierten auf den Originalgraphen rückübertragen werden muss.

Eine Abschätzung der Laufzeit dieses Ansatzes zeigt, dass der modifizierte Algorithmus einen deutlichen Laufzeitvorteil gegenüber den komplexen Transformationen der beiden erstgenannten Ansätze besitzt. Daher wird bei der nun folgenden Entwicklung eines Algorithmus für die Rollverkehrsoptimierung dieser Ansatz gewählt, und die Berücksichtigung von Abbiegekosten im Algorithmus selbst vorgenommen. Der Graph des Flughafens muss also aufgrund der Abbiegekosten nicht weiter modifiziert werden.

3.9 Neuer Rollverkehrs-Algorithmus: Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis

Im Folgenden soll nun ein Algorithmus vorgestellt werden, der die Rollrouten auf dem Flughafen-Vorfeld optimiert planen kann. Dieser muss die getroffenen Festlegungen sowie die besonderen Eigenschaften, Erfordernisse und Randbedingungen des Rollverkehrs berücksichtigen:

- Ziel ist eine minimale kumulierte Rollzeit, beziehungsweise eine minimale mittlere Rollzeit.
- Die Rollrouten müssen konfliktfrei sein, und die Flugzeuge sollen einen realistischen Mindestabstand einhalten.
- Die Prioritätsregeln der *Betriebsanweisung für den Flugverkehrskontrolldienst* (BA-FVK) sind einzuhalten.
- Die gefundene Zuordnung von Elementen der Flughafen-Topologie zu Graphenelementen ist zu beachten, einschließlich der vorgenommenen Zellularisierung langer Kanten.
- Der ausgewählte Modus zur Berücksichtigung von Abbiegekosten (Kurvenkompensation) muss ebenfalls in den Algorithmus einfließen.

Um diese Forderungen umzusetzen, werden folgende der vorgestellten Konzepte und Werkzeuge zusammengeführt:

- Der Dijkstra-Algorithmus (s. Kapitel 3.4.3) bildet als kürzeste-Wege-Suchverfahren die Grundlage; allerdings wird – im Unterschied zum Dijkstra-Algorithmus – die Suche nach dem kürzesten Weg nach Erreichen des Zielknotens abgebrochen²⁷.
- Die zeitweise Sperrung von Kanten wird durch das Setzen von Zeitfenstern modelliert, wie sie als Konzept in den Kapiteln 3.3.4 bis 3.3.6 eingeführt und in Algorithmus 3 (Kapitel 3.4.4) verwendet wurden.
- Die Reihenfolge, in der die Rollrouten optimiert werden, wird durch den Algorithmus nicht verändert. Die Prioritätsregeln (Kapitel 3.6.3) werden dadurch umgesetzt, dass die Rollvorgänge in den Prioritätsklassen gruppenweise nacheinander geplant werden.

²⁷ Der Dijkstra-Algorithmus löst normalerweise das Eine-Quelle-kürzeste-Wege-Problem, findet also kürzeste Wege von einem Startknoten zu allen übrigen Knoten eines Graphen. Das vorliegende Problem soll jedoch lediglich durch Suche des kürzesten Weges von einem Start- zu einem Zielknoten gelöst werden.

- Die Topologie und bestimmte Eigenschaften des Rollverkehrs des Flughafens, auf dem die Rollvorgänge geplant werden (z.B. die Rollgeschwindigkeit), werden durch den Graphen berücksichtigt, in dem der Algorithmus kürzeste Wege sucht, mit Ausnahme der
- Abbiegekosten, die gemäß der ausgewählten Methode Arc-Label Shortest Path (Kapitel 3.8.3) im Algorithmus selbst Berücksichtigung finden²⁸.

Der folgende Algorithmus 5 „Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis“ führt unter Berücksichtigung dieser Bedingungen eine zielgerichtete Suche durch Unterschätzung der Restentfernung durch. Die Restentfernung wird durch Berechnung der Großkreisentfernung abgeschätzt, also die kürzeste Entfernung zweier Punkte auf der Erdoberfläche. Dies ist möglich, weil die genauen geographischen Koordinaten aller Knoten vorliegen. Zusätzlich werden die Abbiegekosten im Algorithmus selbst berücksichtigt.

Der Algorithmus sucht für den ersten Rollvorgang (i.A. ein landendes Flugzeug) den kürzesten Weg von der Quelle zum Ziel des Rollvorgangs. Den dabei benutzten Kanten und Knoten werden in ihren Labels Sperrvermerke eingetragen, so dass der nächste Rollvorgang die betreffenden Ressourcen nicht mehr verwenden kann, und so fort. Für den zweiten Rollvorgang wird also die beste noch realisierbare Route gesucht. Diese kann auch die optimale Route sein, falls keine Ressourcen-Konflikte auftreten. Wird kein Weg gefunden, weil z.B. bereits zu viele Rollvorgänge geplant wurden und das System gesättigt ist, so wird dies mitgeteilt (Zeile 35).

Ein sehr ähnlicher Algorithmus (kürzeste-Wege-Suche mit Zeitfenstern) wurde im Fachgebiet Kombinatorische Optimierung und Graphenalgorithmen am Institut für Mathematik der TU Berlin im Rahmen des Projektes „Routenführung für Automatic Guided Vehicles (AGV)“ implementiert. Hierbei ging es darum, die Routenführung automatisch gesteuerter, selbstfahrender Portalkräne im Container-Terminal Altenwerder des Hamburger Hafens zu optimieren. /Möhr04/, /Gaw03/ Dies ist für die Abschätzung der rechnerischen Komplexität von Bedeutung: Da die Laufzeit des Algorithmus in der Implementation für das AGV-Projekt pro Wegeberechnung bei nur ca. 0,1 Sekunden liegt, kann davon ausgegangen werden, dass auch der Algorithmus 5 (Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis) mit anwendungstauglicher Laufzeit implementiert werden kann. Im Rahmen der vorliegen-

²⁸ Freilich sind die Abbiegekosten den Knoten zugeordnet, welche Rollwegkreuzungen oder Abzweigungen verkörpern, und so gesehen durchaus Bestandteil des Graphen. Die obige Aussage soll lediglich daran erinnern, dass von den drei vorgestellten Möglichkeiten der Kurvenkompensation zwei eine Modifikation des Graphen verlangen, sich hingegen nicht im Algorithmus widerspiegeln.

den Arbeit wurde durch die Implementierung des entwickelten Algorithmus in MATLAB ein weiterer Beweis einer Anwendbarkeit der Ergebnisse erbracht. Pro Routenberechnung benötigte MATLAB auf einem PC mit PentiumIII-Prozessor, Taktrate 1 GHz, im Mittel ca. 3 Sekunden. Dies ist allerdings in keiner Weise repräsentativ für die Laufzeit, die bei der Implementierung in einer Programmiersprache wie z.B. C++ zu erwarten wäre. Hier könnten noch wesentlich schnellere Ergebnisse erwartet werden.

Algorithmus 5: Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis

Gegeben: gewichteter Graph $G = (V, E, \Lambda, \sigma)$, Startknoten s , Zielknoten d , alle Kantengewichte $\Lambda = \{\lambda_{uv} \mid (u,v) \in V\}$, alle Abbiegekosten $\sigma = \{\sigma_{ab} \mid (a,b) \in E\}$, maximale Wartezeit m_{max}

Variablen: Vorgängerliste $\pi(a)$, Großkreisentfernung zw. Knoten k und d $DIST(k,d)$, Liste der zu untersuchenden Kanten OQ , Liste der abgearbeiteten Kanten CQ , Kosten des bereits berechneten Teilstückes g , geschätzte Kosten des noch nicht ermittelten Teilstückes h , Gesamtkosten $f = g + h$, Menge der Kantenzeitfenster F_e , Menge der Knotenzeitfenster F_n , Wartezeit m , Kanten a, b , Knoten i, j, k

Ausgabe: kürzester Weg von s nach d , unter Berücksichtigung bereits zuvor geplanter Fahrten

```

1  for each edge  $a \in E$  do
2       $g[a] \leftarrow \infty$ 
3       $f[a] \leftarrow \infty$ 
4       $m[a] \leftarrow 0$ 
5       $\pi[a] \leftarrow \text{NIL}$ 
6  end
7   $dummyEdge \leftarrow$  edge points to source node  $s$ 
8  INSERT ( $OQ, (0, dummyEdge)$ )
9  while  $OQ \neq \emptyset$  do
10      $a(i,j) = \text{EXTRACT\_MIN}(OQ)$ 
11     if  $j = d$                                      (i.e. Ziel erreicht)
12         RETURN  $\pi$                                (i.e. shortest path)
13     end

```

```

14   if  $F_n [j]$  not free
15        $m [a] = \text{WAIT} (m_{max})$ 
16   end
17   for each  $b(j, k) \in E$  adjacent to  $a(i, j) \in E$  do
18       if  $F_e [b]$  not free or  $b \in CQ$ 
19           next element
20       end
21        $g [b] \leftarrow g [a] + \sigma [a, b] + \lambda [b]$ 
22        $f [b] \leftarrow g [b] + \text{DIST} (k, d)$ 
23        $F_e [b], F_n [j] \leftarrow$  not free
24        $\pi [b] \leftarrow a$ 
25        $m \leftarrow m + m [a]$ 
26       if  $b \in CQ$ 
27           REMOVE ( $CQ, b$ )
28       end
29       if  $b \notin OQ$ 
30           INSERT ( $OQ, (f [b], b)$ )
31       end
32   end
33   INSERT ( $CQ, a$ )
34 end
35 RETURN path does not exist

```

Nach dem Start des Algorithmus werden zunächst die Vorgängerliste π sowie die Variablen der Kosten des bereits berechneten Teilstückes g und der Gesamtkosten f und ebenso der Wartezeit m initialisiert (Zeilen 1-6). Danach wird eine Kante, die zum Startknoten $s \in V$ führt, dem Graphen und der Liste der zu untersuchenden Kanten OQ hinzugefügt (Zeilen 7 und 8).

Der Algorithmus sucht dann aus dieser Liste OQ immer wieder diejenige Kante a mit der kürzesten Restentfernung heraus (Zeile 10). Es wird überprüft, ob der a begrenzende Knoten j eventuell bereits der Zielknoten d ist (Zeilen 11-13); in diesem Fall wird der Algorithmus abgebrochen und die Vorgängerliste π als gefundener kürzester Weg übergeben.

Als nächstes überprüft der Algorithmus, ob der Knoten j , der die Kante a begrenzt, frei ist, oder ob in der Menge der Knotenzeitenfenster F_n eine Sperrung eingetragen

ist. Ist dies der Fall, so wird höchstens bis zur Maximal-Wartezeit m_{max} gewartet. Die tatsächlich verstrichene Wartezeit wird als m erfasst (Zeilen 14-16).

Anschließend sucht der Algorithmus nach einer zu a benachbarten Kante b , die nicht belegt ist (Zeilen 17-20). Findet er diese, so berechnet er die Kosten der neu gefundenen Kante $\lambda [b]$ sowie ggf. die Abbiegekosten σ und rechnet sie zu den Kosten des bereits berechneten Teilstücks g hinzu (Zeile 21). Ferner wird eine neue Restentfernung abgeschätzt (Zeile 22), der bis hierher gefundene Weg in den zugehörigen Labeln als belegt gekennzeichnet (Zeile 23), die zuletzt gefundene Kante a wird dem bisher gefundenen Teilstück (gespeichert in der Vorgängerliste π) hinzugefügt (Zeile 24), und die Wartezeit auf a , $m[a]$, wird der Gesamtwartezeit m hinzugefügt (Zeile 25).

Abschließend wird geprüft, ob die neu zum kürzesten Weg hinzugekommene Kante b in der Liste der nicht mehr zu untersuchenden Kanten CQ enthalten ist; ggf. wird sie daraus wieder entfernt (Zeilen 26-28). Stattdessen wird sie zusammen mit der Information über die neuen Gesamtkosten der Liste der noch weiter zu untersuchenden Kanten OQ hinzugefügt (Zeilen 29- 31). Die Kante a hingegen wird der Liste der abschließend betrachteten Kanten CQ hinzugefügt (Zeile 33).

3.10 Implementierung in MATLAB

Die Entwicklungsumgebung MATLAB[®] entstand seit 1984 und ist ein Produkt von The MathWorks, Inc., in Natick/Massachusetts, USA.

MATLAB ist eine leistungsfähige Entwicklungsumgebung und Programmiersprache, die für die Lösung mathematischer Fragestellungen in den Natur- und Ingenieurwissenschaften geeignet ist. Programmierung, Berechnung und Visualisierung sind dabei in dieselbe Benutzerschnittstelle integriert.

Der Name MATLAB leitet sich von „Matrix Laboratory“ ab, was einen Hinweis auf eine Stärke von MATLAB gibt: Matrizenoperationen können sehr einfach programmiert werden, da MATLAB hierfür besonders geeignete Datenstrukturen sowie eine Reihe von Matrizenoperationen bereithält.

Anwendungsbereiche von MATLAB sind die Entwicklung von Algorithmen; Modellierung, Simulation und Prototyping; außerdem Datenanalyse und Visualisierung. Im akademischen Bereich ist MATLAB relativ weit verbreitet, findet aber auch im industriellen Bereich Anwendung, so z.B. in der Regelungstechnik oder in der Flugphysik. Selbst für die Entwicklung von Luftverkehrssimulationen als diskrete ereignisgesteuerte Simulationen wird MATLAB mittlerweile angewendet.

Die Programmierung von Routinen und Funktionen, die in so genannten „M-Files“ organisiert sind, erfolgt in einer Pascal-ähnlichen Notation. Für bestimmte Aufgabenfelder sind vorprogrammierte M-Files mit typischen benötigten Funktionen in so genannten „Toolboxen“ (Werkzeugkasten) erhältlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde z.B. auf die Toolbox „Mapping“ zurückgegriffen, die häufig benötigte Befehle aus dem Bereich Geographie/Kartographie enthält.

Im Rahmen der Arbeit wird die MATLAB-Version 6.1.0.450 in der Release 12.1 (Mai 2001) verwendet.

Die Auswahl von MATLAB erfolgte, weil diese Umgebung im Vergleich zu Programmiersprachen wie C, C++ oder Java eine komfortablere Benutzung bietet und viele benötigte Funktionen bereits vorgesehen sind, was die Implementierung des entwickelten Algorithmus stark erleichterte. Alle Funktionen sind sehr gut dokumentiert. Der Export und Import von Daten z.B. nach und von Microsoft Excel® zur weiteren Verarbeitung und Auswertung bereitet keine Schwierigkeiten.

Der Nachteil einer im Vergleich zu den o.g. Alternativen höheren Laufzeit ist deswegen nicht gravierend, weil das Ziel dieser Arbeit eher der grundsätzliche Nachweis des Potenzials des Optimierungsansatzes ist, als die Bereitstellung einer anwendungsfertigen Implementierung. Die gute grafische Unterstützung der Modellierung erleichterte diese Entscheidung (siehe beispielsweise den Flughafen-Graphen, Abbildung 3-17).

4 VALIDIERUNG DES OPTIMIERUNGSMODELLS

4.1 Methode

Um den entwickelten Algorithmus zu testen, soll der Verkehr auf einem Flughafen betrachtet und optimiert werden, der so groß und so verkehrsreich ist, dass die Anwendung eines Optimierungsalgorithmus für den Rollverkehr nennenswerte Vorteile verspricht. Außer der Größe des Flughafens ist auch die Verfügbarkeit von Daten über den Rollverkehr von großer Bedeutung, um das Modell kalibrieren und den Realitätsbezug der Ergebnisse abschätzen zu können.

Es werden zu diesem Zweck Szenarien entwickelt, die das Verhalten des Algorithmus unter Bedingungen testen sollen, die den realen Bedingungen auf dem Vorfeld eines Flughafens möglichst nahe kommen. Dies betrifft vor allem die räumliche Verteilung des Verkehrs und die Orientierung der Verkehrsströme, die vor allem von der Betriebsrichtung und den vorherrschenden Quelle-Ziel-Verbindungen abhängen.

Ein Szenario besteht aus einer Liste von Rollverkehrsaufträgen, die nacheinander vom Algorithmus abgearbeitet und auf dem Rollfeld geroutet werden. Die Reihenfolge dieser Touren ist dabei zunächst nicht veränderlich. Anschließend wird untersucht, ob eine Variation der Reihenfolge einen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis haben könnte.

Die Szenarien, mit denen der Algorithmus getestet wird, sind so angelegt, dass nicht nur auf den untersuchten Relationen Verkehr stattfindet, sondern die Rollaufträge sich in dichtem Verkehr konkurrierender Relationen behaupten müssen.

Um zu untersuchen, ob der Algorithmus einen realistischen Beitrag zur Planung des Rollverkehrs leisten kann, werden anschließend die Werte von ausgewählten Quelle-Ziel-Relationen aus dem Verkehrsgeschehen herausgefiltert und mit realen Daten verglichen, die im normalen Betrieb auf derselben Quelle-Ziel-Relation gewonnen wurden.

4.2 Datengrundlage

4.2.1 Erforderliche Datenqualität

Um den Rollverkehr von den anderen möglichen Verspätungsursachen trennen und damit in der Abwicklung des Rollverkehrs begründete Verspätungsursachen isoliert betrachten zu können, ist eine Erhebung von Daten in einer dem OOOI-Format vergleichbaren Genauigkeit erforderlich. Während die OOOI-Daten jedoch auf einen bestimmten Flug bezogen sind, werden für eine Untersuchung, die

den Flughafen als Bezugspunkt hat, von jedem ankommenden Flug die Daten „OI“, von jedem abgehenden Flug hingegen die Daten „OO“ benötigt.

Die Erhebung solcher Daten ist außerordentlich aufwändig.

Im Rahmen der Studie *FRA-Ist* hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) jedoch im Jahr 2001 am Flughafen Frankfurt sehr detaillierte Rollverkehrsdaten aufgenommen, die für die vorliegende Arbeit ebenfalls zugänglich waren. Diese realen Daten sind wichtig, um das Optimierungspotenzial eines optimal gesteuerten Verkehrsflusses im Vergleich zum realen Betrieb abschätzen zu können.

Dies gilt gleichermaßen für die Feststellung der geographischen Koordinaten für jeden einzelnen Knoten. Im Rahmen dieser Arbeit konnte hierbei auf die Koordinaten des Frankfurter Flughafens zurückgegriffen werden, die durch das DLR in Braunschweig für das dort entwickelte Simulationsmodell des Frankfurter Flughafens in der Simulationsumgebung SIMMOD erhoben wurden.

4.2.2 Flughafen Frankfurt/Main

Daher fällt die Entscheidung, den entwickelten Algorithmus „Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis“ (Algorithmus 5) für den Flughafen Frankfurt/Main zu testen.

Der Flughafen Frankfurt/Main ist mit 48,4 Mio. Passagieren und knapp 459.000 Flugbewegungen im Jahr 2003 Deutschlands größter Flughafen. Dem steht mit einer Fläche von insgesamt 19 km² (/Neuf03/) eine – im Verhältnis zum Verkehrsaufkommen – kleine Grundfläche gegenüber.

Der Flughafen Frankfurt verfügt über 3 Start- bzw. Start-/ Landebahnen. Die beiden parallelen Bahnen (nördlich die Bahn 07L/25R²⁹, südlich die Bahn 07R/25L) werden für Starts und Landungen, die Bahn 18 (in Bild 4-1 oben links) wird ausschließlich für Starts genutzt. Die beiden Passagier-Terminalgebäude und alle für diese Untersuchung relevanten Abstellpositionen schließen nördlich an die Bahn 07L/25R und das Vorfeld an (in Bild 4-1 rechts unten). Die Erweiterung des Flughafens durch eine vierte Bahn, die ausschließlich als Landebahn genutzt werden soll, ist in Vorbereitung.

Aufgrund seines komplexen Layouts, insbesondere im Bereich des Terminals 1, des beschränkten Platzangebots für Rollverkehr, der hohen Bewegungszahlen nahe der Kapazitäts-Sättigungsgrenze zu fast jeder Tageszeit und aufgrund eines sehr he-

²⁹ Diese Nomenklatur für Start- und Landebahnen ist international üblich. Die Zahl, stets zweistellig, bezeichnet die Richtung der Bahn, auf die nächste Zehnerstelle gerundet, in mißweisender (magnetischer) Richtung. Für eine Bahn, die aus beiden Richtungen anfliegbar ist, ergeben sich also zwei um 180° verschiedene Zahlen. Die tatsächliche Richtung der beiden Parallelbahnen 07/25 in Frankfurt ist 69°/249°.

terogenen Flugzeugtypen-Mixes lässt der Flughafen Frankfurt ein hohes Potenzial für eine Rollverkehrsoptimierung erwarten. Die Abbildungen 4-1, 4-2 und 4-3 zeigen den Flughafen Frankfurt, insbesondere die komplexen Rollwegstrukturen im Rollfeldbereich. In Abbildung 4-3 sind diejenigen Parkpositionen, deren Rollzeiten im Folgenden näher betrachtet werden, besonders hervorgehoben.



Foto: Denis Roschlau

Abb. 4-1: Flughafen Frankfurt/Main, Luftbild von Osten

4.2.3 Modellierung des Ein-Spur-Betriebs

Eine wichtige und interessante Erkenntnis aus dem Studium der Originaldaten ist, dass es in Frankfurt keine Rollwege gibt, die grundsätzlich nur in einer Richtung befahren werden dürfen. Zwar gibt es – je nach Betriebsrichtung – bevorzugte Verkehrsflüsse, auf die die Lotsen die Rollvorgänge lenken. Im Rahmen der durchzuführenden Optimierung sollen aber gerade solche Prozeduren, die üblicherweise von den Lotsen eingehalten werden, auch um den Verkehr übersichtlicher zu lenken, freigegeben werden. Es könnte sein, dass die Übersichtlichkeit oder eine Verringerung des Überwachungsaufwandes für den Lotsen durchaus sinnvolle Strategien sind (z.B. einen Weg mit möglichst wenigen Abbiegevorgängen anzuweisen), diese jedoch für die Kapazität nicht optimale Strategien sind.

Damit wird jeder Rollwegabschnitt durch zwei antiparallele Bögen modelliert. Die Anzahl der Bögen ist dadurch doppelt so hoch wie die der (ungerichteten) Kanten; es gibt insgesamt **3928 Bögen**, deren Label zu verwalten sind.

4.2.4 Rohdaten des realen Rollverkehrs

Aussagefähige Daten über Rollverkehr sind deswegen schwer erhältlich, weil sie nicht von einer Stelle zentral erfasst und verwaltet werden. Vielmehr betreiben die Flugsicherung, der Flughafenbetreiber und die Fluggesellschaften jeweils ihre eigenen Datensysteme, in denen die vom jeweiligen Betreiber benötigten Daten bereitgehalten werden. Zwar sind diese Systeme zum Teil vernetzt, zum Teil erfolgt die Kommunikation der Beteiligten z.B. über Flugplanänderungen aber auch per Fax oder mündlich telefonisch.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Rollverkehrsdaten, die vom DLR für die Studie FRA-Ist im Jahre 2001 erhoben wurden, entstanden ebenfalls durch die Fusion von Daten aus verschiedenen Quellen. Abbildung 4-4 macht diesen Zusammenhang deutlich.

Für die vorliegende Untersuchung am wichtigsten sind die Daten der FRAPORT-Datenbank DAYTRI (Daily Traffic Information System). Abbildung 4-5 zeigt beispielhaft einen Auszug aus der DAYTRI-Datenbank für Anflüge in einem zufällig ausgewählten Zeitraum.

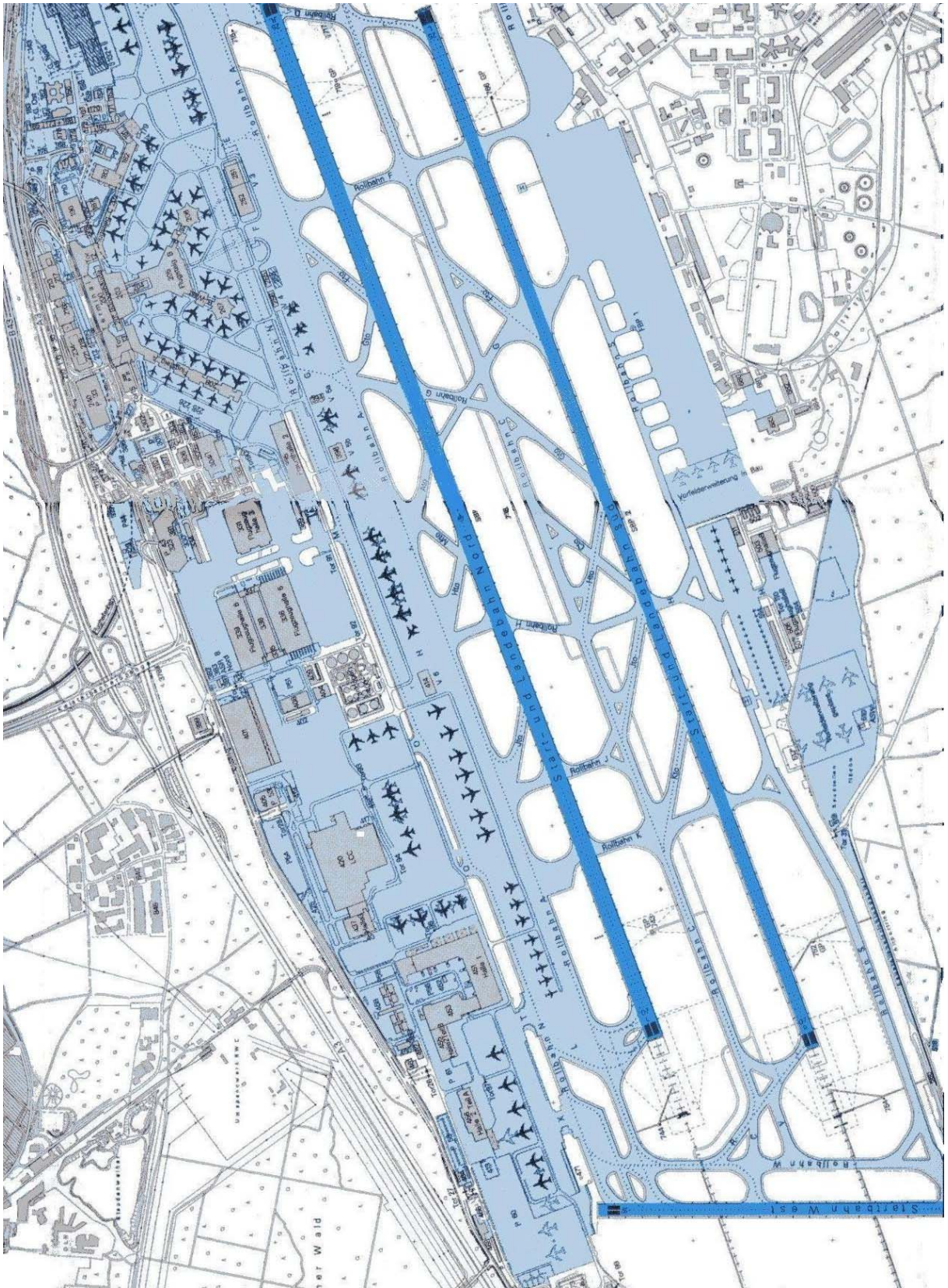


Abb. 4-2: Übersichtskarte Flughafen Frankfurt/Main
(Quelle: FRAPORT AG)

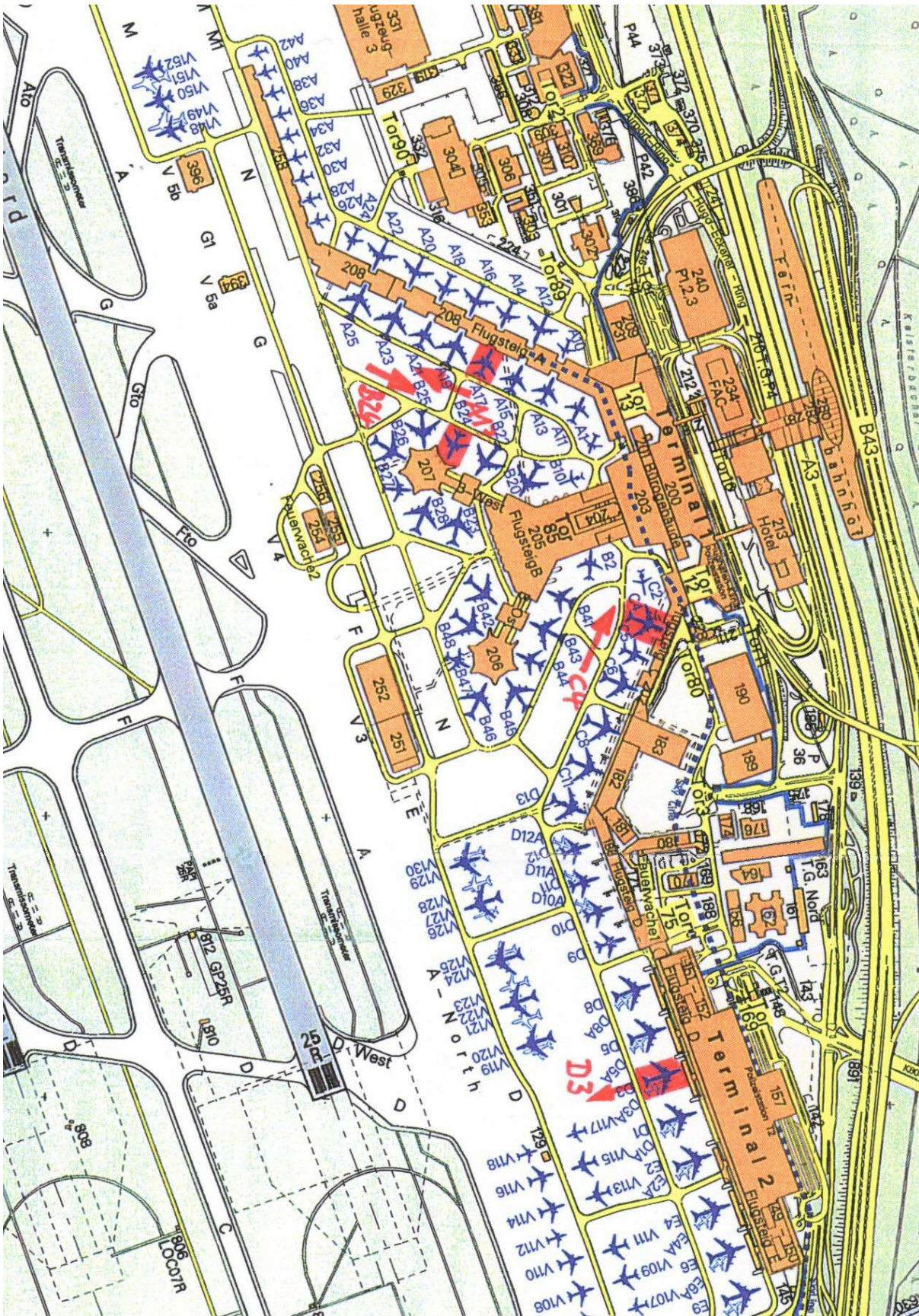


Abb. 4-3: Flughafen Frankfurt/Main, Terminals 1+2
(Quelle: FRAPORT AG)

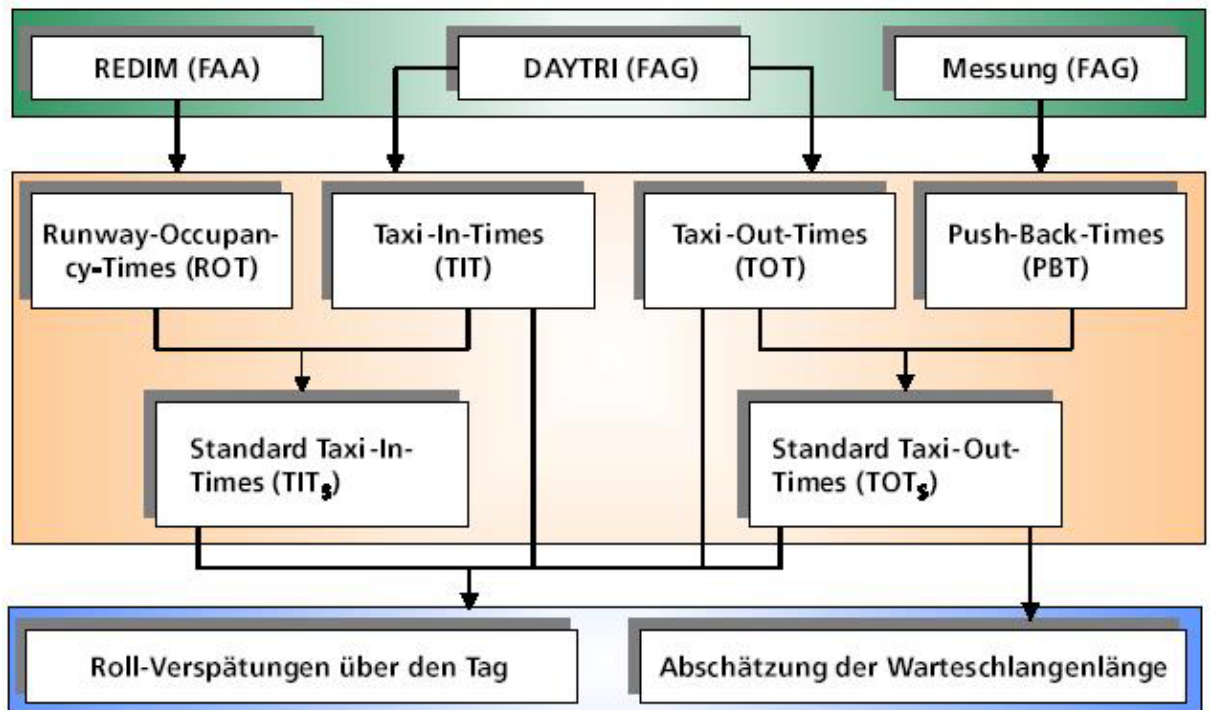


Abb. 4-4: Datenmodell der Gewinnung der realen Rollverkehrsdaten /Gerd01/

Flugnummer	STA	ONB	ATA	Typ	Position	Landebahn	Vorflughafen	PAX	UPAX
LH 03031	8:45:00	8:59:00	8:51:54	B73V	V162	25L	EFHK	80	59
LH 04071	8:55:00	9:02:00	8:53:39	B73V	V119	25R	LFMN	48	42
AC 00872	8:30:00	8:54:00	8:54:00	B747	V166	25L	YYMZ	267	224
LH 04443	8:15:00	9:02:00	8:55:33	A320	V135	25L	EHAM	121	100
SK 01637	8:45:00	9:06:00	8:56:39	DC9	V112	25R	EKBI	79	73
LH 00013	8:35:00	9:04:00	8:57:53	A300	A15	25L	EDDH	274	201
EN 09070	8:45:00	9:08:00	9:00:17	AT72	V99	25R	LIPN	26	24
LH 00119	8:55:00	9:09:00	9:01:41	A320	A10	25L	EDDM	144	112

Tabelle 4: Auszug aus der DAYTRI-Datenbank, 1998 (Anflugdaten) /Gerd01/

Die einzelnen Spalten enthalten folgende Informationen:

- Die Flugnummer;
- die planmäßige Ankunftszeit STA (scheduled time of arrival);
- die On-Block-Zeit ONB (entspricht „Time-In“ in OOOI-Schema), das heißt die Zeit, zu der das Flugzeug seine endgültige Parkposition erreicht hat;

- die tatsächliche Ankunftszeit ATA (actual time of arrival; entspricht dem dritten „O“ – on wheels – im OOOI-Schema);
- sowie Informationen zu Flugzeugtyp, Ziel-Parkposition, Landebahn, Herkunftsflughafen und die Zahl der Passagiere an Bord (einschließlich der Information, wie viele davon Umsteigepassagiere sind).

Für die eingehende Untersuchung des Rollverkehrs interessant ist hierbei vor allem die Zeit zwischen tatsächlicher Ankunftszeit und On-Block-Zeit, denn diese repräsentiert die für die vorliegende Arbeit interessante Rollzeit:

$$\text{ONB} - \text{ATA} = \text{Taxi-In-Dauer}$$

Entsprechend gilt für Abflüge:

$$\text{ATD} - \text{OFB} = \text{Taxi-Out-Dauer}$$

wobei ATD der tatsächliche Startzeitpunkt (actual time of departure) und OFB die Off-Block-Zeit sind (entsprechend den beiden ersten „O“s im OOOI-Schema: off blocks und off wheels).

Gemäß obiger Terminologie wäre die geplante Startzeit die STD (scheduled time of departure). Für die vorliegende Untersuchung spielen jedoch die geplanten Zeiten nur eine untergeordnete Rolle; entscheidend ist allein die Dauer des Rollvorgangs, und diese wird allein durch die tatsächlichen Zeiten bestimmt.

4.2.5 Gewinnung relevanter Daten des realen Rollverkehrs

Die unter 4.2.4 genannten Daten stehen für alle Flugbewegungen der Jahre 1998 und 1999 zur Verfügung. Die Rollzeit hängt von der genauen Lage von Quelle und Ziel eines Rollvorgangs auf dem Flughafen ab. Aussagekräftig können Daten also nur dann sein, wenn sie für jede Quelle-Ziel-Beziehung einzeln ermittelt werden. Für Abflüge kommen als Quellen jede der 232 Parkpositionen (davon 72 Terminal-Positionen) in Betracht, als Ziele die Startbahnköpfe aller drei Startbahnen (davon zwei in zwei Betriebsrichtungen; es ergeben sich also 5 mögliche Senken für Rollverkehr für Abflüge). Für ankommende Flüge sind die Quellen der Rollvorgänge die Abrollwege der beiden Landebahnen mit je zwei Betriebsrichtungen; die Senken sind alle 232 Parkpositionen. Es gibt also bei 5 möglichen Senken, 4 möglichen Quellen und 232 Parkpositionen 2088 Quelle-Ziel-Beziehungen auf dem Flughafen, die es zu untersuchen gilt.

Im Rahmen der Untersuchung FRA-Ist wurden die DAYTRI-Daten nach diesen 2088 Quelle-Ziel-Beziehungen aufgeschlüsselt. Um das Rollzeit-Verhalten einer Quelle-Ziel-Verbindung zu ermitteln, werden für je ein Minuten-Intervall im Beobachtungszeitraum alle Rollvorgänge gezählt, die in diesem Intervall abgeschlossen werden.

Tabelle 5 zeigt einige Beispiele:

Abstellposition B46												
Zeit(min)	0.0 - 0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5	8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5
RWY												
Inbound 07L	0	2	12	69	122	99	70	30	16	11	6	5
Inbound 07R	1	0	0	7	19	33	61	73	56	33	31	15
Inbound 25L	0	0	1	3	12	66	142	207	229	176	104	62
Inbound 25R	0	1	9	63	175	349	371	312	197	123	60	48
Outbound 07L	0	0	0	0	0	0	0	1	1	15	19	28
Outbound 07R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Outbound 25L	0	0	0	2	0	0	1	0	4	5	6	2
Outbound 25R	0	0	0	0	5	16	58	95	113	186	198	179
Outbound 18W	0	0	0	0	0	0	0	7	20	68	104	175

11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5	17.5 - 18.5	18.5 - 19.5	19.5 - 20.5	20.5 - 21.5	21.5 - 22.5	22.5 - 23.5	23.5 - 24.5	Anzahl
12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5	24.5	Gesamtzahl
6	7	4	3	3	3	1	2	0	0	1	1	9	482
12	4	9	2	4	1	1	3	2	0	1	1	8	377
44	35	10	13	11	7	7	5	6	5	6	4	31	1186
31	21	20	19	14	14	11	10	4	6	4	5	37	1904
39	49	48	57	59	57	43	40	22	25	19	3	41	566
1	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
7	7	7	4	6	3	0	2	0	0	0	1	3	60
176	126	103	97	62	41	28	25	16	8	8	8	29	1577
175	225	194	179	196	154	95	61	59	48	30	12	59	1861

Tabelle 5: Alle Rollvorgänge für die Parkposition B46, Jahre 1998 und 1999, aufgeschlüsselt nach Dauern /Gerd01/

4.2.6 Charakteristika des realen Rollverkehrs

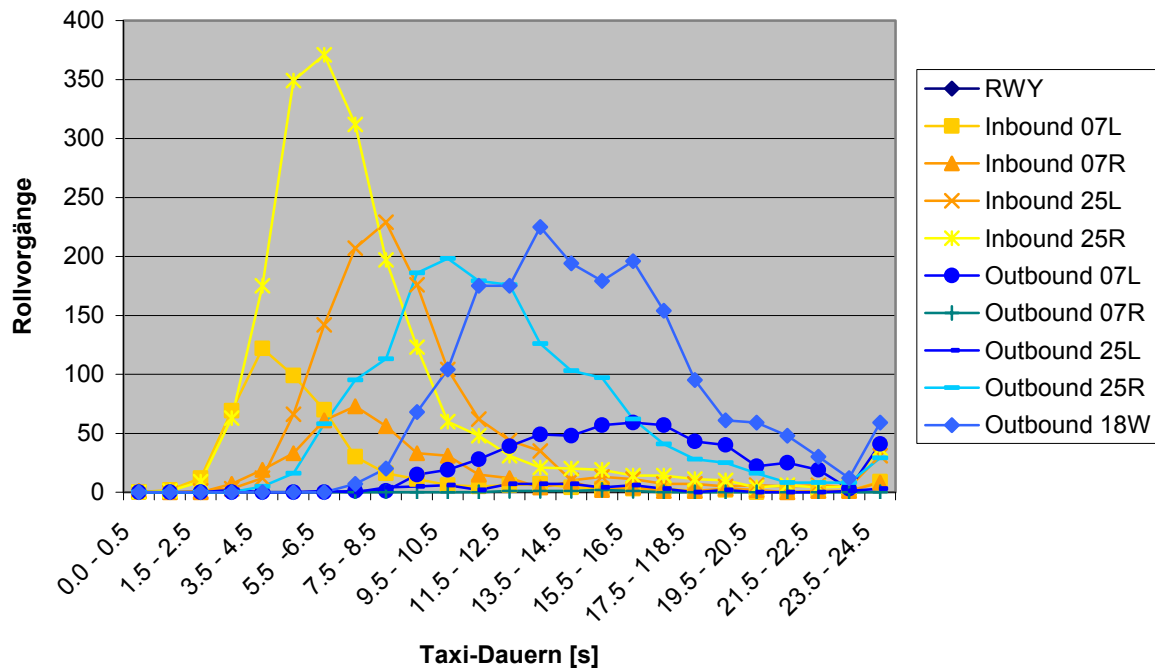


Abb. 4-5: Verteilungen der Taxi-Zeiten für die Abstellposition B46 für alle möglichen Quellen und Senken (eigene Darstellung nach DAYTRI-Daten)

Abbildung 4-5 zeigt deutlich, wie sich die Taxi-In und die Taxi-Out-Vorgänge auf die verschiedenen Start- und Landebahnen verteilen. Es wird deutlich, dass die Betriebsrichtung 25 (Starts in Richtung Westen, Anflüge von Osten) deutlich häufiger vorkommt als die Betriebsrichtung 07 (Starts in Richtung Osten, Anflüge von Westen). Ferner ist zu erkennen, dass der Erwartungswert für die Rolldauer bei Taxi-Out-Vorgängen deutlich höher ist als der für Taxi-In-Vorgänge, bei sehr ähnlichen Entfernungen. Dies ist dadurch zu erklären, dass Abflüge häufig in einer Warteschlange am Startbahnkopf aufgereiht werden, um dann zwischen den Landungen „eingefädelt“ zu werden. Daher ergeben sich üblicherweise Wartezeiten für die Abflüge. Gelandete Flugzeuge hingegen rollen direkt zu ihrer Abstellposition / ihrem Gate. Nur in Ausnahmefällen wird dieses belegt sein, daher resultieren Verzögerungen hier ausschließlich aus dem Rollverkehr.

Diese Verzögerungen, die in der Regel aus Interferenzen / gegenseitigen Blockierungen der Flugzeuge untereinander während des Rollvorganges entstehen (z.B. weil eine Kreuzung belegt ist), sind auch Ursache für ein anderes in Abbildung 4-5 zu erkennendes Charakteristikum, das bereits in Kapitel 2.4.4 kurz angesprochen wurde: die Taxi-Dauern folgen keiner Normalverteilung, sondern sind vom Maximum nach rechts hin zu den längeren Dauern verzerrt. Diese Asymmetrie ist keineswegs untypisch für Bedienprozesse: eine bestimmte Mindestdauer wird aufgrund der physischen Gegebenheiten (zurückzulegende Entfernung bei vorge-

schriebener Maximalgeschwindigkeit) kein Rollvorgang unterschreiten können. Hin zu längeren Rollzeiten sind möglichen Störungen und damit Verzögerungen aber praktisch kaum Grenzen gesetzt. Die Form der Verteilung lässt sich z.B. durch eine Gamma- oder Erlang-Verteilung beschreiben. /Law91/

4.2.7 Entwurf geeigneter Optimierungsszenarien

Der in Kapitel 3.9 vorgestellte Algorithmus „Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis“ soll mit Hilfe eines realistischen Szenarios getestet und auf seine Praxistauglichkeit hin untersucht werden. Hierbei ist insbesondere die Frage von Bedeutung, ob der Algorithmus zumindest theoretisch das Potenzial besitzt, den Rollverkehr mit einer geringeren mittleren Rolldauer zu steuern als dies die Rollverkehrslotsen derzeit von Hand vermögen, und damit zum Abbau von durch den Rollverkehr verursachten Verspätungen beizutragen.

Der Algorithmus soll sich unter möglichst realitätsnahen Bedingungen bewähren, d.h. er soll Taxi-Prozesse in einem Umfeld optimieren, das der tatsächlichen Verkehrssituation möglichst nahe kommt. Interessant sind hierbei v.a. Verkehrsdichten nahe der Sättigungsgrenze des Rollverkehrs, da zu erwarten ist, dass der Algorithmus dann am wirksamsten sein kann, wenn viele gegenseitige Behinderungen von Flugzeugen die einzelnen Rollvorgänge verlangsamen.

In den verkehrsreichen Zeiten des Tages verkehren zur selben Zeit auf dem Rollfeld und den Vorfeldern des Frankfurter Flughafens im Mittel 27,8 nicht parkende Flugzeuge; der Spitzenwert liegt bei 33,8 Flugzeugen /Gerd01/.

Ein geeignetes Optimierungsszenario sollte so konstruiert sein, dass der Verkehr ankommender und abfliegender Flugzeuge sich zeitlich mischt, damit die gegenseitige Beeinflussung der Rollvorgänge am größten ist. Die Verkehrsdichte wird von Optimierungslauf zu Optimierungslauf variiert, um das Verhalten des Algorithmus bei verschiedenen Verkehrsdichten beurteilen zu können. Die dem Algorithmus vorgegebenen Routen verteilen sich nach der Gesamtzahl der Flugsteige im Graphenmodell. Dies gilt sowohl für Ankünfte als auch für Abflüge. Diese Zahlen sind:

Gate-Bereich (Variablenname)	Anzahl Positionen	% gesamt
Gates_Terminal_A	26	43%
Gates_Terminal_B	17	28%
Gates_Terminal_C	6	10%
Gates_Terminal_D	8	14%
Gates_Terminal_E	3	5%
	60 ³⁰	100%

Tabelle 6: Verteilung des Verkehrs auf die Flugsteige
(eigene Darstellung)

Da die Betriebsrichtung 25 in Frankfurt die bei weitem überwiegende Betriebsrichtung ist (ca. 80% der Zeit), werden nur Szenarien mit dieser Betriebsrichtung untersucht. Das Ziel dieser Arbeit ist die Demonstration der Funktionsfähigkeit und des Potenzials des entwickelten Algorithmus; daher schien es sinnvoll, für eine Analyse eine möglichst große Basis miteinander vergleichbarer Daten zu schaffen. Dies wird am ehesten erreicht, wenn alle Szenarien dieselbe Betriebsrichtung abbilden.

Eine zu planende Route im Rollplan-Szenario ist durch die folgenden Parameter charakterisiert. In Klammern hinter dem Parameter der Name der Variablen, die in MATLAB dafür vergeben wurde³¹:

- eine Quelle (AC.departure_position),
- ein Ziel (AC.destination),
- die Prioritätsklasse (ergibt sich aus (1) und (2)) sowie
- eine Startzeit (AC.planned_departure_time).

Die Variablennamen wurden auch zur Beschriftung der Spalten 1 bis 3 in der folgenden Tabelle verwendet.

Die Prioritätsklasse 1 gilt bei Landungen nur für die Sperrung der Landebahn, danach wechselt das Flugzeug in die Prioritätsklasse 3.

³⁰ Die Abweichung zu der unter 4.2.5 genannten Zahl von 72 Terminal-Positionen ergibt sich daraus, dass die Positionen im Bereich des Terminals 2 als Doppel-Positionen ausgelegt sind, die z.B. zwei kleinere oder ein Großraumflugzeug aufnehmen können. Hier werden diese Positionen einfach modelliert.

³¹ Die Form „AC.variablenname“ deutet darauf hin, dass es sich um ein strukturiertes Feld handelt, d.h. MATLAB verwaltet die entsprechenden Angaben als Eigenschaft von „AC“ (aircraft).

Die folgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt eines typischen, im Rahmen der Optimierung-Testläufe verwendeten Rollplan-Szenarios. Zeile 2 bedeutet, dass zum Zeitpunkt 00:07:30 (also 7 Minuten und 30 Sekunden nach dem Start des Szenarios) ein Rollvorgang initiiert wird, der vom ersten Abrollweg der Bahn 25L (Runway_exitsL(1)) zur Terminal-Parkposition A 23 führt (Gates_Terminal_A(23)). Die Prioritätsklassen ergeben sich aus dem Typ des Rollvorgangs, gemäß Abbildung 3-15:

AC.departure_position	AC.destination	AC.planned_departure_time	Prioritätsklasse
...
Runway_exitsL(1)	Gates_Terminal_A(23)	00:07:30	1 / 3
Gates_Terminal_A(21)	TakeOff_Positions_Runway_R	00:08:00	2
Runway_exitsL(2)	Gates_Terminal_B(6)	00:09:00	1 / 3
Gates_Terminal_A(14)	TakeOff_Positions_Runway_S	00:09:00	2
Gates_Terminal_B(12)	TakeOff_Positions_Runway_R	00:10:00	2
Runway_exitsL(1)	Gates_Terminal_D(2)	00:10:30	1 / 3
Gates_Terminal_D(6)	TakeOff_Positions_Runway_S	00:11:00	2
...

Tabelle 7: Ausschnitt aus Rollplan-Szenario Nr. 123
(eigene Darstellung)

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Ausgabe des Planungsalgorithmus

Im Zuge der Optimierung berechnet der Rollverkehrs-Algorithmus (Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis, Algorithmus Nr. 5) zu jeder Route mit den Eingaben des Rollplan-Szenarios aus Tabelle 7 folgende Daten:

- die tatsächliche Startzeit des Rollvorganges (AC.departure_time),
- die Ankunftszeit am Roll-Ziel (AC.endtaxitime),
- die Dauer des Rollvorgangs (AC.taxitime) sowie
- die Wartezeit im Laufe des Rollvorgangs (AC.waitingdelay).

Abbildung 4-6 zeigt beispielhaft die Ausgabe des Algorithmus für den Rollvorgang aus Tabelle 7 mit Startzeit '00:08:00':

```
ans =  
  
          id: 24  
    departure_position: 1523  
      deppos_klartext: 541  
        destination: 773  
    planned_departure_time: '00:08:00'  
      departure_time: '00:08:00'  
        endtaxitime: '00:13:20'  
          taxitime: '00:05:20'  
      waitingdelay: '00:01:57'
```

Abb. 4-6: Ausgabe des Algorithmus
(eigene Darstellung)

Die ID vergibt der Algorithmus fortlaufend an die Routen, die geplant werden. Die Werte `departure_position`, `deppos_klartext` und `destination` sind die Kantennummern der Quelle, deren antiparalleler Kante und des Ziels in interner Darstellung.

4.3.2 Auswertung der Szenarien

Die Ergebnisse für alle berechneten Routen wurden in einer Datenbank erfasst, um sie anschließend auswerten zu können.

Wie Abbildung 4-5 gezeigt hat, ist die Charakteristik von Taxi-In-Vorgängen und Taxi-Out-Vorgängen verschieden. Daher werden die Ergebnisse des Algorithmus auch für diese beiden Arten von Vorgängen getrennt ausgewertet.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse für zwei ausgewählte charakteristische Taxi-In-Szenarien sowie zwei Taxi-Out-Szenarien vorgestellt werden.

4.3.3 Inbound 25R – B24

Bei der untersuchten Betriebsrichtung 25 gibt es zwei mögliche Quellen für Taxi-Prozesse (die beiden Landebahnen 25R und 25L) sowie 232 mögliche Ziele (alle Flugzeugpositionen). Aus diesen 464 möglichen Inbound-Quelle-Ziel-Beziehungen wurden einige ausgewählt. Von diesen werden zwei an dieser Stelle vorgestellt. Für diese beiden wurden alle vom Optimierungsalgorithmus im Rahmen der Szenario-Optimierungen berechneten Instanzen erfasst. Zum Vergleich mit dem realen System wurden die DAYTRI-Daten derselben Quelle-Ziel-Beziehungen ausgewertet.

Die erste betrachtete Route ist diejenige von der Landebahn 25R zur Terminal-Position B24.

Für diese Verbindung liegen 1733 DAYTRI-Messungen vor:

Zeit(min)	0.0 - 0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5
RWY 25R	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
Inbound B24	0	16	96	281	405	356	197	133	57
Anteil [%]	0.0	0.9	5.5	16.2	23.4	20.5	11.4	7.7	3.3

8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5	17.5 - 18.5	18.5 - 19.5
40	28	23	12	20	14	3	8	7	6	3
2.3	1.6	1.3	0.7	1.2	0.8	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2

19.5 - 20.5	20.5 - 21.5	21.5 - 22.5	22.5 - 23.5	23.5 - 24.5	Anzahl Gesamtzahl
4	3	8	1	12	1733
0.2	0.2	0.5	0.1	0.7	100.0

Tabelle 8: DAYTRI-Werte der Rollroute 25R – B24
(eigene Darstellung unter Verwendung von Daten aus /Gerd01/)

Die Zahl der erhaltenen optimierten Fahrzeiten liegt mit 445 Werten deutlich darunter (Tabelle 9). Um eine aussagekräftige grafische Darstellung zu erhalten, wurden die optimierten Taxi-Zeiten und die realen Rollzeiten in Prozent aller Instanzen umgerechnet.

Dies ist zulässig, da aufgrund der Struktur der Ergebnisse der Optimierung davon ausgegangen werden kann, dass auch eine deutlich höhere Zahl von Optimierungsläufen keine wesentlich andere Verteilung der optimierten Rollzeiten erbracht hätte. Die Ergebnisse der Optimierung für die Route 25R – B24 sehen wie folgt aus:

Zeit – Kat. [min]	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	
Zeit [min]	3:11	4:11	4:42	5:56	Gesamt:
Anzahl	90	197	84	74	445
Anteil [%]	20.2	44.3	18.9	16.6	100.0

Tabelle 9: Optimierte Rollzeiten der Rollroute 25R – B24
(eigene Darstellung)

Die Streuung der Werte ist also weit weniger ausgeprägt als bei den realen Daten in Tabelle 8. Dies war auch zu erwarten, da das unter 4.2.6 zur Verteilung der realen Rollzeiten Gesagte auch hier gilt: die Streuung der realen Werte beruht auf ei-

ner Vielzahl von Einzelfaktoren, die in ihrer Vielgestaltigkeit im Rahmen einer Arbeit wie der vorliegenden kaum zu modellieren sind. Der persönliche „Fahrstil“ des Piloten, z.B. durch mehr oder weniger Vertrautheit mit dem Flughafen Frankfurt oder seine Reaktion auf besonders dichten Verkehr, gehören ebenso dazu wie z.B. die Situation am Gate, an dem die Fahrt endet. So kann z.B. ein bereits gelandetes Flugzeug absichtlich langsam rollen, weil das Zielgate noch nicht frei ist. Dies wird zu einer längeren Rollzeit führen, ohne dass die Ursache im Rollverkehr selbst begründet liegt, womit sie auch in einem Modell des Rollverkehrs kaum unterzubringen ist.

Der grafische Vergleich zeigt deutlich, dass auch innerhalb des größten Anteils der Rollvorgänge, der nicht durch außergewöhnliche Einflüsse wie oben beschrieben verzögert wird, die optimierten Rollrouten im Mittel deutlich schneller sind als die heute üblichen. Die Tatsache, dass auch die Verteilung der optimierten Rollzeiten asymmetrisch ist und zu den längeren Zeiten hin ausläuft, zeigt, dass der Teil der Verzögerungen, die zu einer Abweichung von der Normalverteilung führen, im Rollverkehr und der Interaktion der Flugzeuge untereinander begründet liegt und durchaus von dem in dieser Arbeit entwickelten Modell erfasst wird.

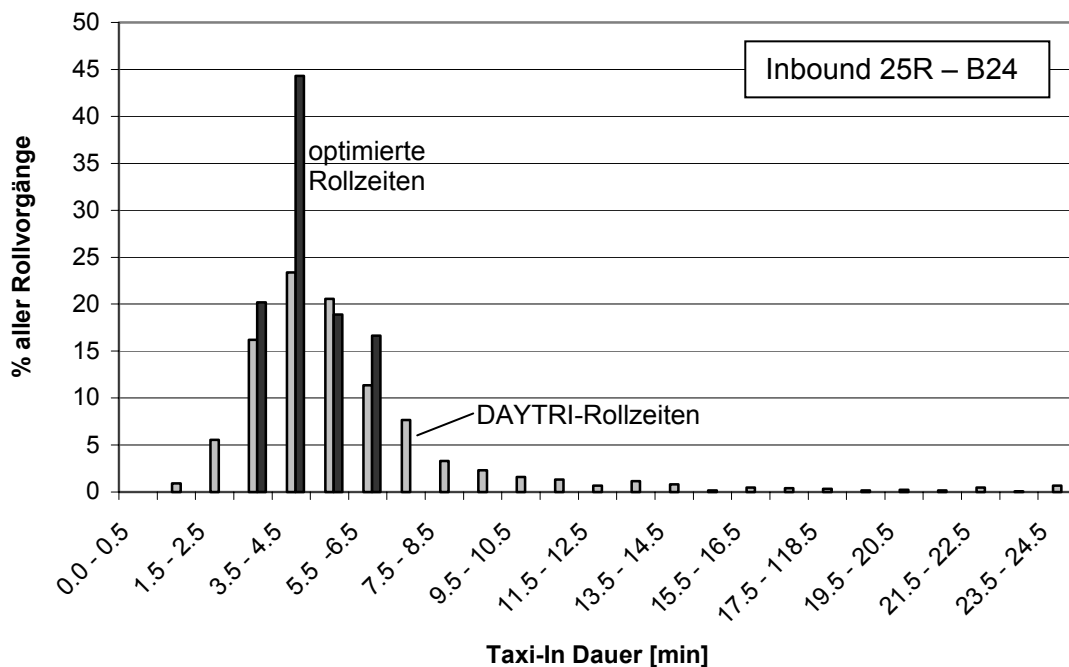


Abb. 4-7: Rollzeiten 25R – B24: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI (eigene Darstellung)

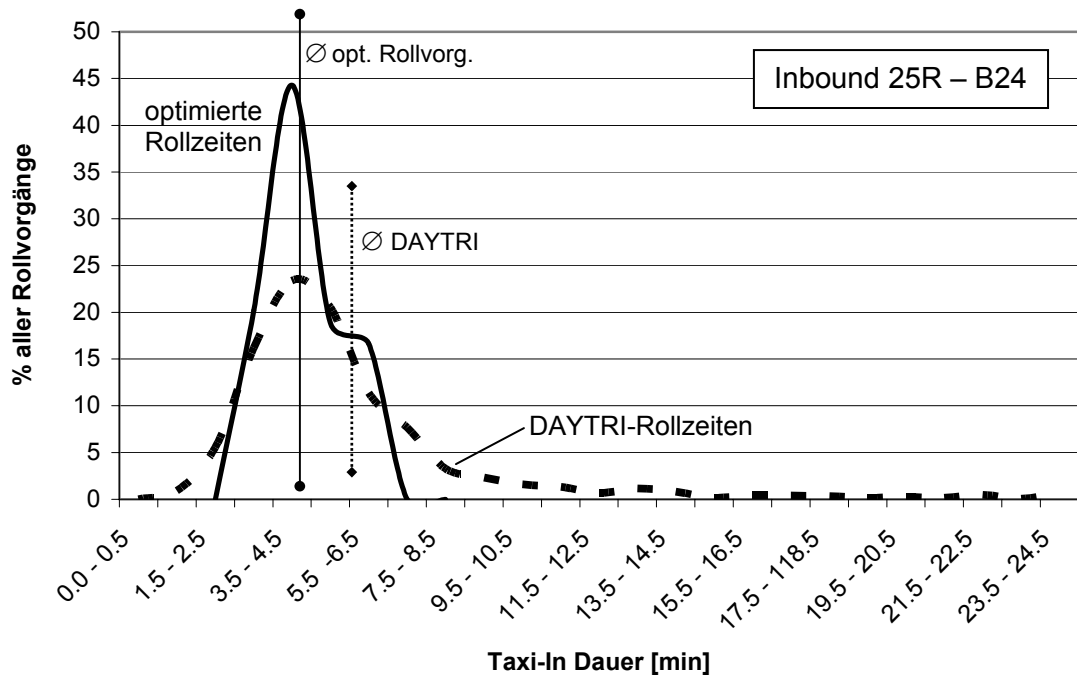


Abb. 4-8: Rollzeiten 25R – B24: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI
(eigene Darstellung)

Dieser Eindruck lässt sich rechnerisch untermauern. Das **arithmetische Mittel** der Rollzeiten der optimierten Rollrouten beträgt **04:22 Minuten**, das **geometrische Mittel (Zentralwert)** der optimierten Rollzeiten sogar nur **04:11 Minuten**. Dies ist deutlich weniger als das arithmetische Mittel der realen Rollrouten mit **05:32 Minuten** oder das geometrische Mittel, das für die realen Rollrouten im Intervall von **04:30 bis 05:30 Minuten** liegt³². Selbst dann, wenn man annimmt, dass die langsamsten 10% der 1733 Rollvorgänge im realen System durch außerordentliche Störungen verzögert wurden, die im Optimierungsmodell nicht berücksichtigt werden, so ergibt sich für die restlichen 90% (dies entspricht ziemlich genau den realen Rollvorgängen mit einer Rollzeit von weniger als 8 Minuten³³) immer noch eine durchschnittliche Rollzeit von **04:36 Minuten** (arithmetisches Mittel). Das geometrische Mittel für die schnellsten 90% aller Rollvorgänge liegt im Intervall von **03:30 bis 04:30 Minuten**. Eine homogene Verteilung der Zeiten über dieses Intervall vorausgesetzt, liegt das geometrische Mittel aber nur wenig von der oberen Grenze dieses Intervalls entfernt, bei nicht weniger als **04:20 Minuten**.

Es ergibt sich also, dass das Optimierungsmodell deutlich kürzere Rollzeiten realisieren kann, als sie heute im realen Betrieb möglich sind. Für 100% der DAYTRI-Rollzeiten liegt die Ersparnis des Optimierungsmodells zwischen **3%** und **24%** der

³² Lässt sich nicht genauer ermitteln, da die Verteilung der Werte in diesem Intervall nicht bekannt ist.

³³ Unter der Annahme, dass die realen Rollzeiten zwischen 7.5 und 8.5 Minuten homogen über dieses Intervall verteilt sind.

Rollzeit. Für die schnelleren 90% der Rollvorgänge ergibt sich immer noch eine Zeitersparnis von bis zu **9%**. Allerdings ist offensichtlich, dass das Optimierungsmodell mit einer Rollzeit von im Mittel 04:22 Minuten (arithmetisch) nicht in jedem Fall kürzere Rollzeiten realisieren kann, als heute schon im realen Betrieb üblich sind, wo ein Mittel von 04:20 Minuten erreicht wird. Immerhin ist das Optimierungsmodell hier ebenso gut wie die heutige Rollverkehrsführung „von Hand“; es bedeutet im Mittel keinen Nachteil durch längere Rollzeiten.

4.3.4 Inbound 25L – C4

Die zweite eingehend untersuchte Rollroute führt von der Landebahn 25L zum Flugsteig C4. Für diese Verbindung sind folgende DAYTRI-Daten bekannt:

Zeit(min)	0.0 - 0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5
RWY 25L									
Inbound C4	0	0	0	0	2	10	35	117	193
Anteil [%]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.8	2.7	9.1	15.0

8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5	17.5 - 18.5	18.5 - 19.5
204	187	128	103	65	43	36	31	28	15	8
15.9	14.6	10.0	8.0	5.1	3.3	2.8	2.4	2.2	1.5	0.6

19.5 - 20.5	20.5 - 21.5	21.5 - 22.5	22.5 - 23.5	23.5 - 24.5	Anzahl Gesamtzahl
9	3	12	10	46	1285
0.7	0.2	0.9	0.8	3.6	100.0

Tabelle 10: DAYTRI-Daten der Rollroute 25L – C4
(eigene Darstellung unter Verwendung von Daten aus /Gerd01/)

Es sind 282 Fahrzeiten optimierter Rollrouten ermittelt worden. Die tatsächlichen ermittelten Fahrzeiten sind etwas stärker gestreut als bei der Verbindung 25R – B24. Dennoch ist auch bei dieser Verbindung ein Skalieren der optimiert ermittelten Werte zulässig, da die Streuung innerhalb der Zeitbänder liegt (Tabelle 11).

Zeit – Kat. [min]	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5			9.5-10.5	
Zeit [min]	07:19	07:39	08:39	08:49	09:09	09:42	Gesamt:
Anzahl	60	69	14	4	79	56	282
Anteil [%]	21.3	24.5	5.0	1.4	28.0	19.9	100.0

Tabelle 11: Optimierte Rollzeiten der Rollroute 25L – C4
(eigene Darstellung)

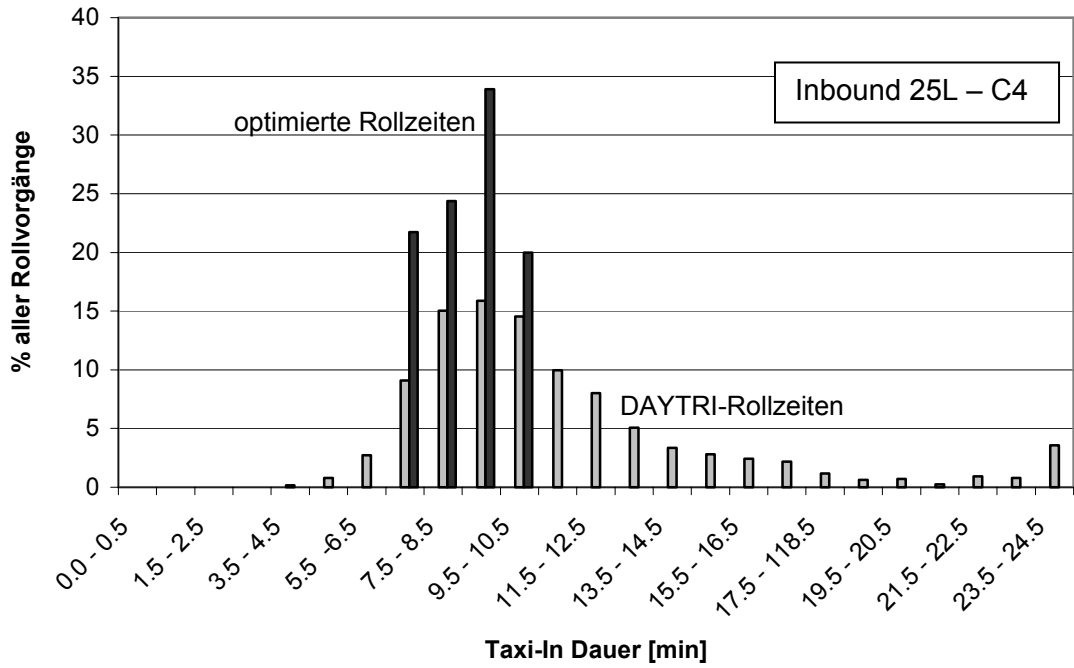


Abb. 4-9: Rollzeiten 25L – C4: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI (eigene Darstellung)

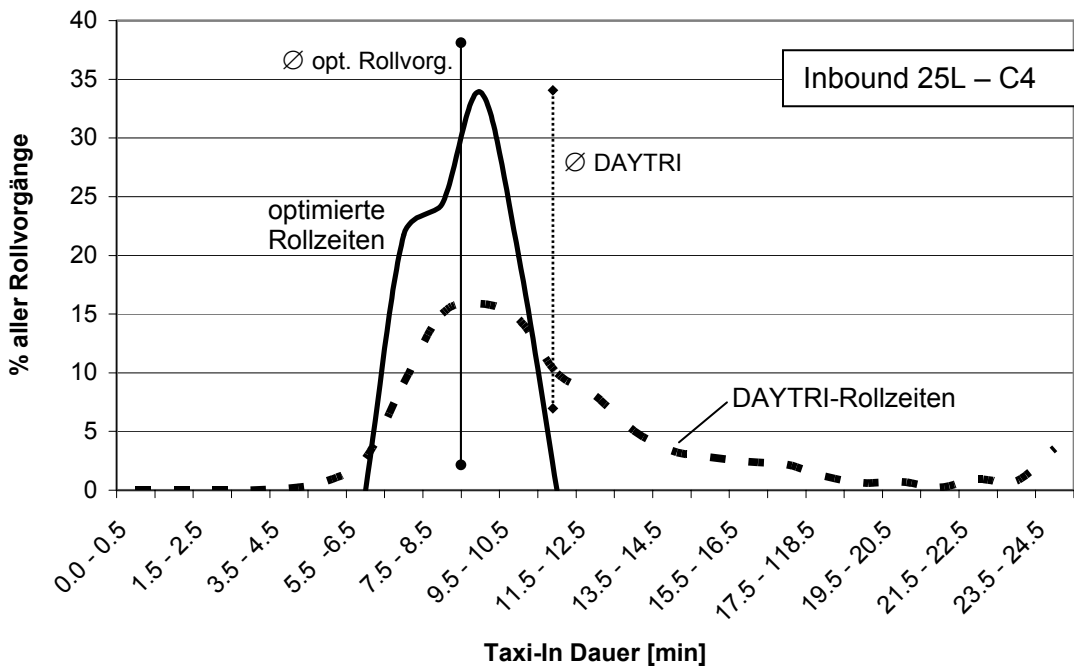


Abb. 4-10: Rollzeiten 25L – C4: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI (eigene Darstellung)

Die vom Optimierungsalgorithmus ermittelten Fahrzeiten sind im Mittel deutlich kürzer als die im tatsächlichen Betrieb gemessenen DAYTRI-Daten, und die Streuung der Daten ist mit einem Band von nur 4 Zeitfenstern auch deutlich geringer als bei den im realen Betrieb gemessenen Daten. Die etwas stärkere Streuung innerhalb dieses Bandes ist in der gegenüber der Rollroute 25R – B24 längeren Fahrzeit begründet, die natürlich auch mehr Interferenzen mit anderen Rollverkehrsteilnehmern mit sich bringt. Die Streuung über das gesamte Spektrum ist aber keineswegs stärker ausgeprägt, und ist ebenfalls deutlich geringer als im Falle der realen Prozesse (Abbildungen 4-9 und 4-10).

Das arithmetische Mittel für die Rollzeit für die vom Optimierungsalgorithmus gefundenen Routen liegt bei **08:28 Minuten**, das geometrische Mittel bei **09:09 Minuten**. Für die DAYTRI-Rollvorgänge liegt das arithmetische Mittel bei **11:03 Minuten** und das geometrische Mittel im Intervall zwischen **09:30** und **10:30 Minuten** für alle Rollvorgänge oder bei durchschnittlich **9:56 Minuten** (arithmetisch) beziehungsweise ebenfalls im Intervall zwischen **09:30** und **10:30 Minuten** (geometrisch) für die schnellsten 90% aller real gemessenen Rollvorgänge. Analog zum Rollvorgang 25R – B24 wird hier auch wieder angenommen, dass bei den langsamsten 10% der Rollvorgänge Störungen vorliegen, die vom hier überprüften Optimierungsmodell nicht erfasst werden. Der Vergleich mit den schnelleren 90% der DAYTRI-Rolldauern erlaubt somit eine realistischere Einschätzung des Optimierungspotenzials gegenüber dem jetzigen Betrieb.

Das Optimierungspotenzial gegenüber den schnelleren 90% aller realen Rollzeiten liegt bei mindestens knapp **4%**, kann maximal aber bis zu **19,4%** betragen. Die mit dem Optimierungsalgorithmus mögliche Zeitersparnis pro Rollvorgang liegt sogar zwischen knapp **4%** und **23,4%** im Vergleich zu allen DAYTRI-Touren. Es ist damit größer als bei den im Mittel nur halb so langen Touren 25R – B24, insbesondere gegenüber den schnelleren 90% aller realen Touren. Der wichtigste Unterschied ist, dass der Optimierungsalgorithmus auch gegenüber den schnellsten realen Rollvorgängen immer im Vorteil ist.

Dieser deutliche Unterschied kann nicht alleine in der größeren Länge der Touren 25L – C4 begründet liegen, denn eine größere Tourenlänge begründet an sich kein überproportionales Ansteigen der Konflikte zwischen Flugzeugen. Allerdings profitieren längere Touren in der Tat stärker von der Planung optimaler Routen. Dies erklärt das ungleich größere Optimierungspotenzial allerdings noch nicht allein.

Die Begründung liegt vermutlich vielmehr in der besonderen Topologie des Vorfeldes im Bereich der Parkposition C4. Diese Position liegt in einer der beiden Buchten, in die sich das Vorfeld am Terminal 1 in Frankfurt gliedert, und die in Kapitel 2.4.4 als besonders problematisch vorgestellt wurden. Störungen oder Blo-

ckierungen zwischen verschiedenen Rollvorgängen kommen hier wegen der räumlichen Enge noch häufiger vor als an anderen Stellen auf dem Vorfeld. Eine bessere Planung in diesem problematischen Bereich war ein erklärtes Ziel des hier vorgestellten Ansatzes. Allem Anschein nach kann der Algorithmus diese Erwartung erfüllen.

4.3.5 Outbound A17 – 18W

Die Fahrzeiten auf Outbound-Rollrouten weisen meist eine noch deutlich stärkere Streuung der Werte hin zu längeren Fahrzeiten auf, als dies auf Inbound-Routen der Fall ist, wie unter anderem Abbildung 4-5 gezeigt hat.

Die erste der beiden hier vorgestellten Outbound-Rollrouten verbindet die Parkposition A17 mit der Startbahn 18 West. Wie bereits bei den beiden Rollvorgängen 25R – B24 und 25L – C4 werden die absoluten Zahlen in Prozentwerte aller Instanzen umgerechnet, um sie mit den Daten der Optimierung besser vergleichbar zu machen.

A17 - 18W	0.0 - 0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5
Zeit(min)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
Anzahl	0	0	3	1	0	14	18	78	199
Anteil [%]	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.5	2.3	6.0

8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5	17.5 - 18.5	18.5 - 19.5
410	504	504	400	322	236	161	130	72	67	49
12.3	15.2	15.2	12.0	9.7	7.1	4.8	3.9	2.2	2.0	1.5

19.5 - 20.5	20.5 - 21.5	21.5 - 22.5	22.5 - 23.5	23.5 - 24.5	Anzahl Gesamtzahl
44	18	24	14	57	3325
1.3	0.5	0.7	0.4	1.7	100.0

Tabelle 12: DAYTRI-Daten der Rollroute A17 – 18W
(eigene Darstellung unter Verwendung von Daten aus /Gerd01/)

Mit 3325 gemessenen Rollvorgängen liegt eine hohe Zahl von Instanzen und damit eine sehr breite Datenbasis vor. Die Anzahl der Optimierungsläufe liegt mit 180 zwar wieder deutlich darunter, aber erneut zeigt sich eine im Vergleich zu den realen Daten stärkere Konzentration auf einige immer wieder vorkommende Rollzeiten. Daher ist auch in diesem Fall die Normalisierung der Daten zulässig.

Die stärkere Streuung der Rollverkehrszeiten hin zu längeren Touren bei Outbound-Verkehr hat ihre Ursache zum größten Teil darin, dass Flugzeuge an der Startbahn warten müssen, die früher als vorgesehen ihr Gate verlassen haben. Die-

se Verzögerungen finden sich in den DAYTRI-Daten wieder, obwohl die Ursache dafür eher ein Engpass im Start- und Landebahnsystem ist als ein Engpass im Bereich des Rollverkehrs. So wurde zwar die Sperrung der Startbahn für den nächsten Startvorgang modelliert, und damit lassen sich auch die typischen Queues vor der Startbahn erzeugen. Allerdings wird man nicht modellieren können, dass Flugzeuge ihr Gate vorzeitig verlassen, weil es für den nächsten ankommenden Flug benötigt wird, die aber noch keinen Start-Slot haben und daher durch einen längeren Rollvorgang (absichtliches Bummeln) die Zeit bis zum Abflug überbrücken. Diese Verzögerung resultiert aus Einflüssen des Start- und Landebahnsystems, das nicht Teil des hier vorgestellten Modells ist.

Ein Algorithmus zur Rollverkehrsoptimierung wäre im Praxiseinsatz denselben Einflüssen und Sachzwängen des realen Systems unterworfen wie die im heutigen Betrieb realisierte Rollverkehrsführung durch Lotsen. Um daher die Rollzeiten der optimierten Rollrouten vergleichbar zu machen, wurde für verschiedene Gates aus dem Unterschied von Taxi-In – und Taxi-Out – Rolldauern für dieselbe geographische Kombination (z.B. Runway 07L – Gate A11 und Gate A11 – Runway 25R) ein Korrekturfaktor ermittelt, der den Werten für die optimierten Rollrouten zugeschlagen wird. Um zusätzlich den Effekt zu berücksichtigen, dass die Engpässe am Start nicht bei jedem Flug auftreten, wurde ein gestaffelter Korrekturfaktor ermittelt, der zwischen 0:30 und 1:30 Minuten für jeden Rollvorgang variiert.

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus für die Rollroute A17 – 18W in Form der normalisierten und korrigierten Werte:

Zeit – Kat. [min]	7.5-8.5	8.5-9.5			9.5-10.5	
Zeit [min]	08:25	09:05	09:19	09:25	09:39	Gesamt:
Anzahl	57	18	43	32	30	180
Anteil [%]	31.4	51.8			16.8	100.0

Tabelle 13: Optimierte Rollzeiten der Rollroute A17 – 18W
(eigene Darstellung)

Der grafische Vergleich zeigt deutlich die Überlegenheit der optimierten Rollrouten, die sich rechnerisch bestätigen lässt: das **arithmetische Mittel** der optimierten Rollrouten liegt bei **09:04 Minuten**, das **geometrische Mittel** bei **09:19 Minuten**. Bei den realen Rollverkehrsdaten liegt für den gesamten Datenbestand (100%) das arithmetische Mittel bei **12:06 Minuten**, das geometrische Mittel bei **10:30 bis 11:30 Minuten**. Für die schnelleren 90% der realen Rollverkehrsvorgänge liegt das arithmetische Mittel bei **11:12 Minuten**, das geometrische Mittel bei ebenfalls **10:30 bis 11:30 Minuten**. Nach allen herangezogenen Kriterien ist demnach die Zeitersparnis der optimierten Rollverkehrsrouten erheblich, und zwar beträgt sie

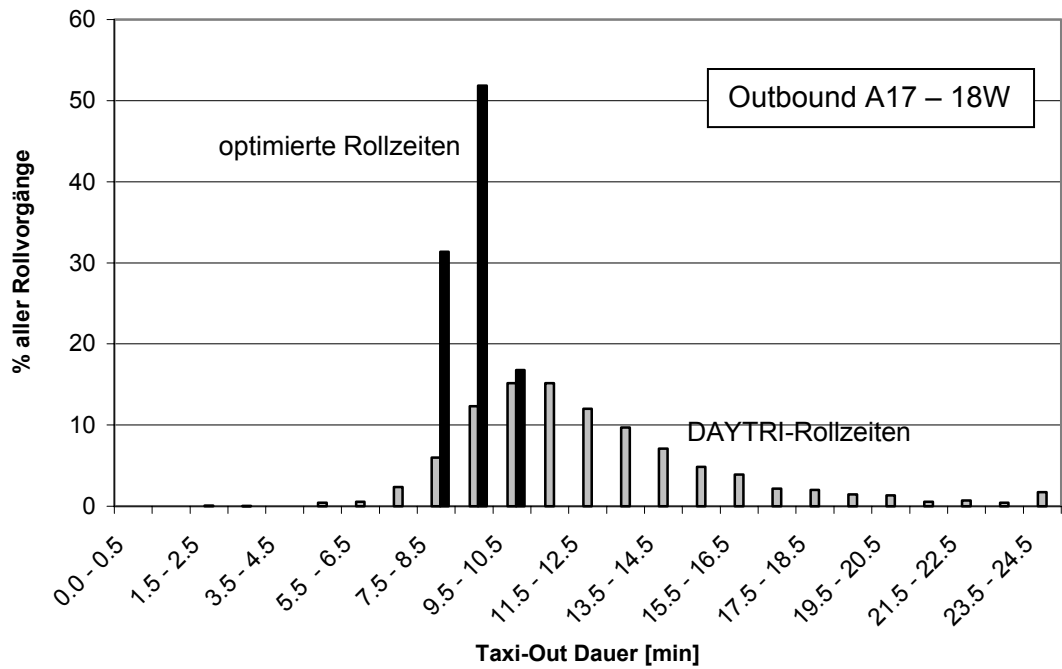


Abb. 4-11: Rollzeiten A17 – 18W: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI (eigene Darstellung)

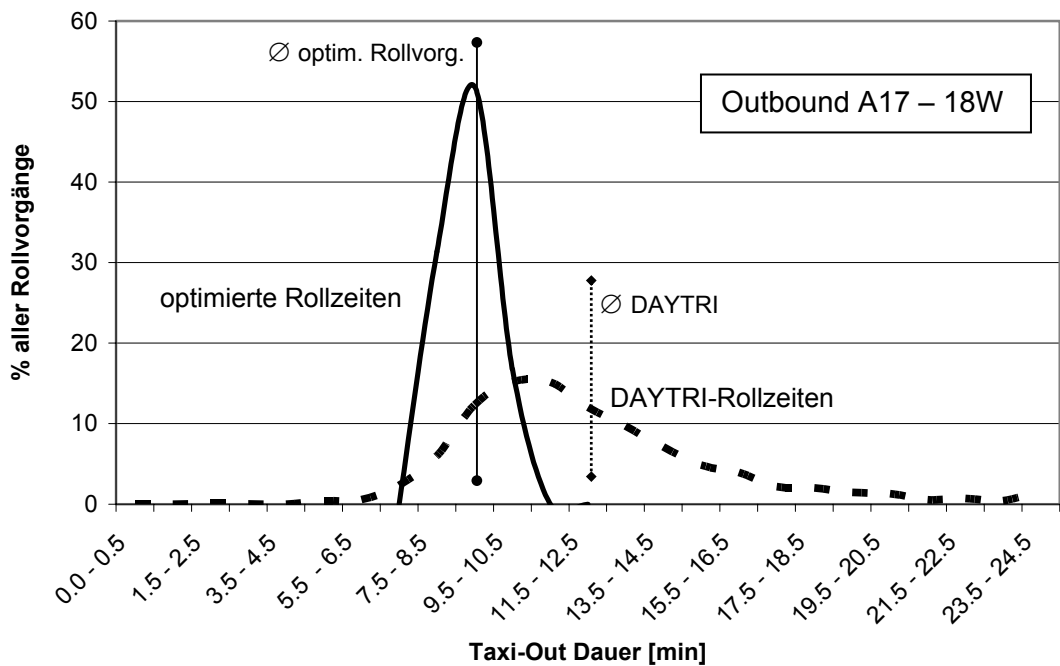


Abb. 4-12: Rollzeiten A17 – 18W: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI (eigene Darstellung)

mindestens **11.3%** bis maximal **25.1%** gegenüber 100% der DAYTRI-Routen und mindestens **11.3%** bis maximal **21.1%** für die schnelleren 90% der DAYTRI-Routen.

Der Einsatz eines Optimierungsalgorithmus für Outbound-Verkehr hat also ein noch größeres Verbesserungspotenzial als für den Inbound-Verkehr. Da eventuelle Warteschlangen vor der Startbahn bereits durch die oben erläuterte Korrektur berücksichtigt wurden, ist das Verbesserungspotenzial auch als durchaus realistisch anzusehen.

4.3.6 Outbound D3 – 25R

Die zweite Outbound-Rollroute, die untersucht wurde und hier vorgestellt werden soll, verbindet die Flugzeug-Parkposition D3 mit dem Startbahnkopf der Bahn 25R (Nordbahn). Folgende 1080 Daten wurden im realen Betrieb gemessen:

D3 - 25R	0.0 - 0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5
Zeit [min]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
Anzahl	0	2	0	2	8	21	54	127	146
Anteil [%]	0.0	0.2	0.0	0.2	0.7	1.9	5.0	11.8	13.5

8.5 - 9.5	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5	17.5 - 18.5	18.5 - 19.5
144	158	116	86	53	40	34	26	17	13	3
13.3	14.6	10.7	8.0	4.9	3.7	3.1	2.4	1.6	1.2	0.3

19.5 - 20.5	20.5 - 21.5	21.5 - 22.5	22.5 - 23.5	23.5 - 24.5	Anzahl Gesamtzahl
8	4	2	2	14	1080
0.7	0.4	0.2	0.2	1.3	100.0

Tabelle 14: DAYTRI-Daten der Rollroute D3 – 25R
(eigene Darstellung unter Verwendung von Daten aus /Gerd01/)

Die Läufe des Optimierungsalgorithmus ergaben 371 verwendbare Rollzeiten für optimierte Rollrouten auf dieser Quelle-Ziel-Verbindung. Der Korrekturfaktor für den routenunabhängigen Outbound-Einfluß wurde anhand von DAYTRI-Daten für die Quelle-Ziel-Verbindungen D3 – 25R und 07L – D3 ermittelt. Er ist bedeutend größer als bei der Verbindung A17 – 18W und liegt bei 5 Minuten. Der relativ große Unterschied zwischen den Korrekturfaktoren für die Bahnen 18W und 25R dürfte darin begründet liegen, dass die Bahn 25R nicht ausschließlich für Starts zur Verfügung steht wie die Bahn 18W, sondern auch eine von zwei Landebahnen ist. Landungen haben aber grundsätzlich Vorrang vor Starts, weil Flugzeuge im Anflug nicht mehr umgeleitet oder aufgehalten werden können. Im Normalfall werden die Starts zwischen den Landungen eingefädelt bzw. „zwischengeschoben“. Damit kommt zu den für den Korrekturfaktor bei der Bahn 18W genannten Faktoren noch die Priorität der Landungen hinzu.

Folgende korrigierte und normalisierte Daten ergeben sich:

Zeit – Kat. [min]	6.5-7.5	7.5-8.5			8.5-9.5	9.5-10.5	
Zeit [min]	07:28	07:48	08:08	08:28	08:42	09:42	Gesamt:
Anzahl	165	85	22	37	41	21	371
Anteil [%]	44.4	38.9			11.1	5.6	100.0

Tabelle 15: Optimierte Rollzeiten der Rollroute D3 – 25R
(eigene Darstellung)

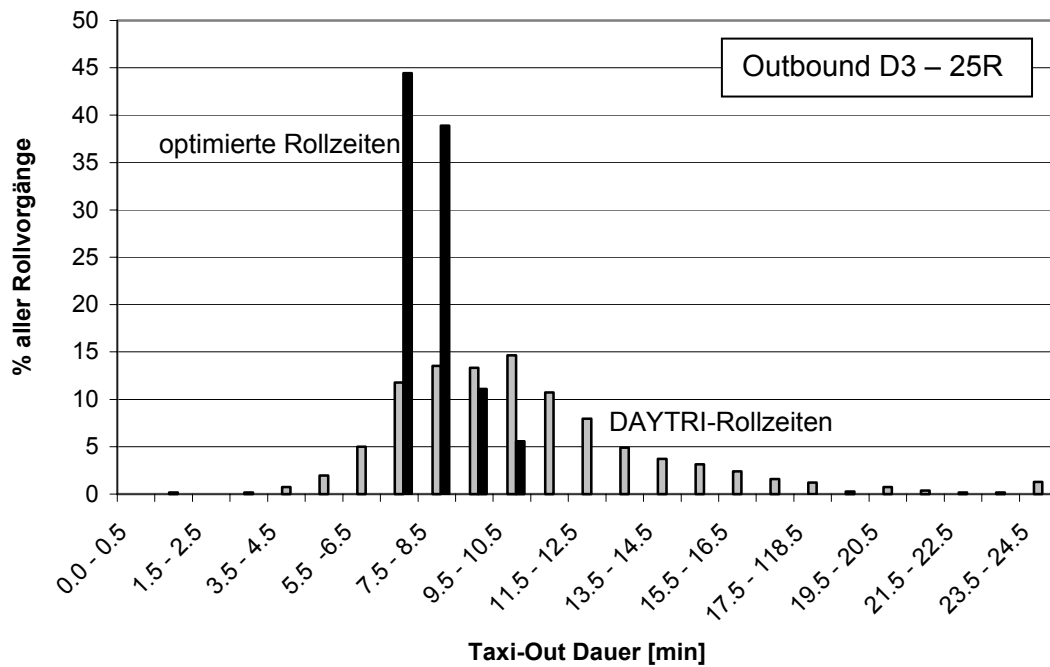


Abb. 4-13: Rollzeiten D3 – 25R: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI
(eigene Darstellung)

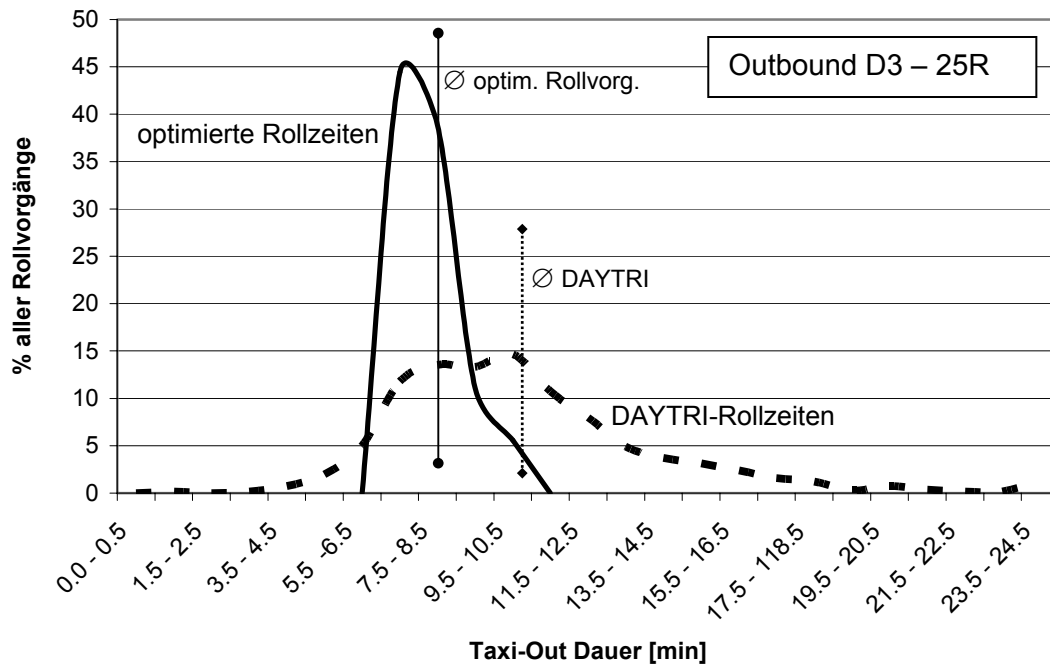


Abb. 4-14: Rollzeiten D3 – 25R: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI
(eigene Darstellung)

Das **arithmetische Mittel** der optimierten Rollrouten liegt bei **07:56 Minuten**, das **geometrische Mittel** bei **07:48 Minuten**. Das arithmetische Mittel der gesamten real gemessenen Rollvorgänge liegt bei **10:19 Minuten**, während das geometrische Mittel aller realen Rollvorgänge bei **09:30-10:30 Minuten** liegt. Für die schnelleren 90% der Rollvorgänge liegt das arithmetische Mittel bei **09:27 Minuten**, das geometrische Mittel bei **08:30-09:30 Minuten**. Damit ergibt sich ein Verbesserungspotenzial der optimierten Rollrouten gegenüber allen DAYTRI-Routen von mindestens **16.5%** bis zu **25.7%**; gegenüber den 90% schnelleren DAYTRI-Routen, also denen ohne außergewöhnliche und relativ seltene Störungen, ergibt sich immerhin noch ein Verbesserungspotenzial von mindestens **6.7%**, günstigstenfalls sogar von **17.9%**.

Der Rollweg D3 – 25R ist eine sehr kurze Route, wie ein Blick auf Abbildung 4-3 zeigt. Daher verwundern auf den ersten Blick die langen Rolldauern, die kaum kürzer sind als die der geographisch wesentlich längeren Route A17 – 18W. Diese sind jedoch durch den relativ hoch anzusetzenden Korrekturfaktor begründet, der am Anfang dieses Kapitels ausführlich diskutiert wurde. Trotz der geographischen Kürze der Route D3 – 25R hat der Optimierungsalgorithmus aber ein beachtliches Potenzial, was die Vermutung bestätigt, dass das Verbesserungspotenzial beim Einsatz eines Optimierungsalgorithmus für den Rollverkehr nicht von der Länge der Route abhängt.

4.3.7 Einfluss der Reihenfolge

Der implementierte und nunmehr getestete Algorithmus zur Optimierung des Rollverkehrs, „Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis“ (Algorithmus 5) optimiert die Rollrouten eines gegebenen Rollverkehrs-Szenarios, wobei eine der Eingangsgrößen die Abroll-Zeit an der Quelle der betreffenden Strecke ist (AC.planned_departure_time, siehe Tabelle 7). Die Reihenfolgen der Routen werden nicht mehr verändert. Es gibt unterschiedliche Prioritäten von Routen (landende Flugzeuge → Taxi-Out → Taxi-In; siehe Abbildung 3-15), wobei ein einmal geplanter Rollvorgang Priorität vor allen anderen hat. Die Zeitfenster, die ein Rollvorgang einmal belegt hat, werden also für keinen nachfolgenden Fahrtauftrag mehr freigegeben, so lange der zuvor geplante Fahrtauftrag die zugehörige Kante belegt.

Diese Einschränkung war Bedingung, um einen Dijkstra-basierten Algorithmus einsetzen zu können.

Allerdings nimmt man dabei natürlich in Kauf, dass das erhaltene Ergebnis eventuell nicht das Gesamtoptimum bezüglich der minimalen durchschnittlichen Rollzeit, der Maximierung des Durchsatzes oder anderer Kriterien darstellt.

Ein Optimierungsverfahren, das die Berücksichtigung solcher Kriterien ermöglicht, müsste von vorneherein anders aufgebaut werden als der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus. Ein mögliches Verfahren wäre beispielsweise ganzzahlige lineare Optimierung mit Lagrange-Relaxation.

Nachdem der mögliche Nutzen eines Rollverkehrsalgorithmus in dieser Arbeit nachgewiesen wurde, gilt es nun noch festzustellen, ob ein Algorithmus, der außer den Routen selbst auch noch die Reihenfolge optimieren kann, zusätzliches Verbesserungspotenzial bietet. Falls dies zutrifft, sollten künftige Arbeiten auf dem Gebiet der Rollverkehrsführung an dieser Stelle ansetzen.

Um den möglichen Nutzen einer Rollverkehrsplanung mit variabler Reihenfolge der Touren festzustellen, soll ein durch den in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus gerechnetes Szenario mit völlig veränderter Reihenfolge der Touren erneut gerechnet werden. Dann können die berechnete Gesamt- sowie die Durchschnittsrollzeit verglichen werden. Zugleich kann mit Hilfe einer graphischen Analyse der Einfluss der getauschten Reihenfolge auf die einzelnen Touren ermittelt werden.

Abbildung 4-15 zeigt die Rollzeiten für jede einzelne Tour, zunächst geplant in einem ersten Szenario, und dann erneut geplant mit veränderter Reihenfolge. Um einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die Touren anschließend

wieder einander zugeordnet, d.h. die Ergebnisse wurden wieder zurückgetauscht. Unter derselben Rollauftrags-ID ist also bei beiden Kurven die ermittelte Rollzeit für ein- und dieselbe Quelle-Ziel-Beziehung abzulesen. Dort, wo Datenpunkte auseinanderfallen bzw. die gestrichelte Linie des zweiten Szenarios sichtbar wird, ergaben sich verschiedene Rollzeiten für dieselbe Tour. Wie man sieht, unterschieden sich die Ergebnisse für ca. jede Dritte der insgesamt 39 Touren in diesem Szenario. Die durchschnittlichen Rollzeiten pro Tour unterschieden sich jedoch kaum: sie betragen **07:31 Minuten** für das eine, **07:32 Minuten** für das zweite Szenario. Die Veränderungen der Rollzeiten für etliche der Touren ist also insgesamt ein Nullsummenspiel.

Dieser Versuch wurde noch mit einigen anderen Szenarien wiederholt, wobei stets zwei Permutationen von Rollvorgängen betrachtet wurden. Es wurden Szenarien mit verschiedenen Auslastungen des Rollfeldes getestet. Die Ergebnisse waren jedoch konsistent: der Einfluss einer veränderten Reihenfolge war stets ein Nullsummenspiel. Die durchschnittliche Rollzeit pro Tour änderte sich durch die veränderte Reihenfolge nicht merklich.

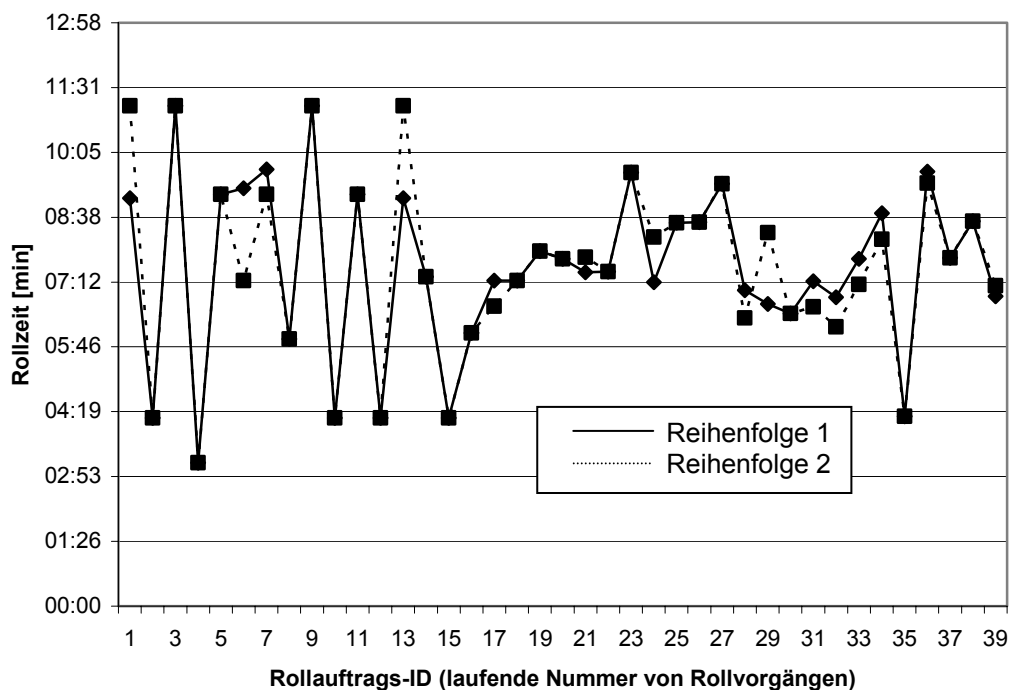


Abb. 4-15: Vergleich der Rollzeiten für dieselben Touren, in unterschiedlicher Reihenfolge geplant
(eigene Darstellung)

Es lässt sich also schlussfolgern, dass die viel versprechenden Zeitgewinne durch Rollverkehrsoptimierung, die in diesem Kapitel nachgewiesen werden, sich durch

einen noch aufwändigeren Algorithmus, der zusätzlich die Reihenfolge der Touren verändern kann, nicht nennenswert weiter steigern lassen.

4.4 Ergebnisbewertung

Die in Kapitel 4.3 vorgestellten 4 Quelle-Ziel-Verbindungen wurden so ausgewählt, dass sie repräsentativ eine möglichst große Bandbreite verschiedener Fälle abdecken: Alle drei Start- und Landebahnen sowie vier der fünf Gate-Bereiche sind vertreten, und damit auch beide Terminals. Die Routen haben auch völlig verschiedene Längen, wie ein Blick auf die vorkommenden Rollzeiten zeigt.

Tabelle 16 fasst die Ergebnisse zusammen.

[min]		Inbound		Outbound	
		25R – B24	25L – C4	A17 – 18W	D3 – 25R
reale Rollzeiten	arithm. Mittel	05:32	11:03	12:06	10:19
	geom. Mittel	04:30-05:30	09:30-10:30	10:30-11:30	09:30-10:30
reale Rollzeiten (schnellere 90%)	arithmet. Mittel	04:36	09:56	11:12	09:27
	geom. Mittel	03:30-04:30	09:30-10:30	10:30-11:30	08:30-09:30
optimierte Rollzeiten	arithm. Mittel	04:22	08:28	09:04	07:56
	geom. Mittel	04:11	09:09	09:19	07:48
Zeitersparnis	min.	keine	4.0%	11.3%	6.7%
	max.	24.0%	23.4%	25.1%	25.7%

Tabelle 16: Optimierungsergebnisse, reale Daten und Optimierungspotenziale für vier Rollrouten (eigene Darstellung)

Der Optimierungsalgorithmus zeigt einige sehr interessante Charakteristika.

Besonders hervorzuheben ist, dass in keinem der untersuchten Fälle der Algorithmus der heutigen Rollverkehrsführung „von Hand“ im Mittel unterlegen ist. Es lässt sich also sagen, dass der Algorithmus in den untersuchten Fällen immer mindestens ebenso gut plant wie die Rollverkehrslotsen. Im Mittel liegt die mindestens erreichte Zeitersparnis bei 4 bis 5% der heute benötigten Rollzeit, für die besonders lange Strecke A17 – 18W sogar bei mindestens 11,3%. Die maximal erreichbare Zeitersparnis liegt sogar konsistent bei deutlich über 20%.

Eine zweite wichtige Beobachtung ist, dass die Streuung der Ergebnisse deutlich weniger stark ausgeprägt ist als in der Realität. Dies bedeutet, dass der Algorithmus

die Rollvorgänge mit größerer Zuverlässigkeit planen kann, als dies die Rollverkehrsflotten mit den heutigen technischen Mitteln können. Die Planbarkeit von Rollverkehr wird also durch die Anwendung des hier vorgestellten Planungsalgorithmus verbessert. Damit rückt das Ziel, Flüge „Gate to Gate“, also vom Losrollen bis zum Erreichen der Parkposition am Zielflughafen, planen zu können, ein wenig näher. Das heißt, dass eine wichtige, als Motivation für die vorliegende Arbeit angeführte Forderung erfüllt ist.

Zusätzlich soll an dieser Stelle noch kurz auf die monetäre Bewertung der erreichbaren Zeitersparnis eingegangen werden.

Wenn man davon ausgeht, dass der durchschnittliche Taxi-Vorgang in Frankfurt ca. 8 Minuten dauert (was eine konservative Annahme ist) und dass die durch den Einsatz des in dieser Arbeit entwickelten Rollverkehrsalgorithmus erreichbare Zeitersparnis im Mittel bei 5% liegt (was ebenfalls eine konservative Annahme ist), so ergibt sich im Mittel für jeden Rollvorgang eine Zeitersparnis von 24 Sekunden. Bei 459.000 Flugbewegungen im Jahr 2003 summiert sich die Ersparnis auf insgesamt 3060 Flugzeug-Blockstunden pro Jahr. Unter Annahme von direkten Betriebskosten von 2400 US-\$ pro Blockstunde³⁴ folgt eine jährliche Ersparnis von 7,3 Millionen US-\$ allein an direkten Betriebskosten der Fluggesellschaften³⁵. Unter Annahme einer 20 Jahre währenden Amortisationszeit eines Rollführungssystems (eine realistische Annahme) sowie einer jährlichen Preis-Abzinsung um 7%³⁶ lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass ein Rollführungssystem, welches jeden Rollvorgang im Mittel um 24 Sekunden verkürzt, eine Investition von 80 Millionen US-\$ lohnt.

Wie bei jeder Investition in Flughafen-Infrastruktur besteht natürlich das Problem, dass die Investition vom Flughafen zu tragen ist, während die Kostenersparnis den Fluggesellschaften, also seinen Kunden, zugute kommt. Einen Teil der Kostenersparnis kann der Flughafen durch höhere Landegebühren wieder abschöpfen, während der bei den Fluggesellschaften verbleibende Teil der Betriebskostenersparnis die Attraktivität dieses Flughafens für die Fluggesellschaften steigert. Den

³⁴ Analog zur Vorgehensweise zur Quantifizierung der Taxikostenersparnis in /Neuf03/ wird hierbei von durchschnittlich 90 Passagieren pro Flugbewegung ausgegangen. Auch dies ist eine konservative Annahme, denn in Frankfurt werden durchschnittlich 105 Passagiere pro Flugbewegung befördert. Dafür sind allerdings die direkten Betriebskosten im Durchschnitt geringer als beim Flottenmix am typischen amerikanischen Flughafen, von dem /Neuf03/ ausgeht, da die europäischen Fluggesellschaften und insbesondere die Deutsche Lufthansa, die 60% der Flugbewegungen in Frankfurt verursacht, wesentlich modernere Flotten besitzen als die meisten US-Fluggesellschaften.

³⁵ Wie in der Luftfahrt üblich, erfolgt eine Berechnung der Ersparnisse hier nur in US-\$. Dies ist gerechtfertigt, dieweil dass große Teile der direkten Betriebskosten ebenfalls in dieser Währung anfallen (vor allem Treibstoffkosten), so dass eine Umrechnung in Euro nicht erkenntnisfördernd wirkt.

³⁶ Diese Abzinsung liegt deutlich höher als die durchschnittliche Inflationsrate, weil der technologische Fortschritt für ein derartiges technisches System den Wertverfall noch beschleunigt.

Gewinn an Kapazität kann der Flughafen dadurch monetär verwerten, dass er zusätzliche Flüge aufnehmen kann³⁷, die zusätzliche Gebühreneinnahmen bedeuten.

Zusätzlich zur Ersparnis der direkten Betriebskosten kann noch die für die Passagiere gewonnene Zeit mit ins Kalkül gezogen werden. Setzt man den volkswirtschaftlichen Nutzen einer Passagier-Stunde mit 30 US-\$ an, was bei derartigen Untersuchungen in den Vereinigten Staaten eine übliche Größe ist, so steigt der Wert eines Rollführungssystems sogar auf über das doppelte, nämlich auf 185 Millionen US-\$ heutiger Investitionssumme. Die Amortisation dieser Kosten ist allerdings für den Flughafen selbst nicht mehr möglich.

Der tatsächliche Wert eines Rollführungssystems liegt allerdings nochmals deutlich darüber, da bisher nur die direkte Kostenersparnis durch verkürzte Rollzeiten betrachtet wurde. Ein weiterer Nutzen des Algorithmus ist aber wie gesagt auch die bessere Planbarkeit von Rollverkehr und damit die erhöhte Zuverlässigkeit von Flugplänen. Dieser Nutzen ist jedoch sehr schwer zu quantifizieren; daher soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden.

Es erscheint jedoch angesichts dieser möglichen indirekten Nutzeffekte, die vor allem einen volkswirtschaftlichen Nutzen bedeuten, gerechtfertigt, dass Systeme zur Rollverkehrsführung in der staatlichen und supranationalen Forschungsförderung (Luftfahrtforschungsprogramme der Bundesregierung, Rahmenprogramme der EU) seit vielen Jahren einen hohen Stellenwert einnehmen.

³⁷ Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass der die Kapazität limitierende Engpass tatsächlich der Rollverkehr ist, dass also noch genügend Start- und Landebahnkapazität und genügend Gate-Kapazität zur Verfügung stehen, um die zusätzlichen Flüge aufzunehmen.

5 DISKUSSION UND AUSBLICK

5.1 Diskussion

5.1.1 Ansatz

Die Nachfrage nach Luftverkehr wird allen seriösen Quellen zufolge auch in Zukunft weiter wachsen. Luftverkehr ist selbst eine bedeutende wirtschaftliche Aktivität, ist aber zugleich auch unabdingbare Voraussetzung für die weitere Teilhabe an einer immer stärker global vernetzten Wirtschaft. Es ist daher im Interesse aller, die notwendigen Voraussetzungen für weiteres Verkehrswachstum zu schaffen.

Auf die Flughäfen als Schnittstellen zwischen Land- und Luftverkehr kommen hierbei unbestritten die größten Herausforderungen zu. Viele wichtige Drehkreuzflughäfen stoßen bereits heute an die Grenzen ihrer Kapazität. Häufige Verspätungen sind die Folge, die kostspielig sind, aber auch die Umwelt belasten. Bauliche Erweiterungen sind als Abhilfe oftmals nur schwer durchsetzbar, zumal die verkehrsreichsten Flughäfen zumeist auch in dicht besiedelten Gegenden liegen.

Obwohl ein Teil des vorhergesagten Wachstums an Sekundärflughäfen stattfinden wird, von denen einige in den letzten Jahren eine Renaissance erlebt haben, können diese den weiteren Ausbau wichtiger Drehkreuzflughäfen keinesfalls ersetzen. Wo bauliche Erweiterungen nicht – oder nur in Ausnahmefällen – möglich sind, richten sich die Anstrengungen vermehrt auf kapazitätssteigernde Maßnahmen innerhalb der bestehenden baulichen Infrastruktur.

Neben dem Start- und Landebahnsystem, das an den meisten Flughäfen (neben fehlender Terminalkapazität) der wichtigste Engpass ist, tritt hierbei der Rollverkehr der Flugzeuge am Boden zunehmend in den Blickpunkt verschiedener Entwicklungsprojekte. Bisher wird an den meisten Flughäfen der Rollverkehr durch die Lotsen auf Sicht gesteuert, unterstützt durch ein Bodenradar. Die ICAO hat mit ihrem Konzept A-SMGCS jedoch eine Entwicklungsrichtung vorgegeben hin auf eine zunehmend automatisierte Erfassung, Lenkung und Überwachung von Rollverkehr. Das nächstliegende Ziel der Entwicklungsarbeiten im Bereich Rollverkehr ist dabei das Schließen der Technologielücke zwischen dem fliegenden Flugzeug, das – entsprechende technische Ausrüstung sowohl des Flugzeugs als auch des Flughafens vorausgesetzt – mit den heute im täglichen Betrieb verfügbaren Hilfsmitteln zwar vollautomatisch landen kann, aber auf dem Rollfeld auf Sichtkontakt zu anderen Flugzeugen und zum Tower angewiesen ist. Unter ungünstigen meteorologischen Bedingungen sinkt deshalb die mögliche Kapazität eines Flughafens ab, sobald dieser Sichtkontakt z.B. bei Nebel nicht mehr gewährleistet ist.

Eine Reihe von Forschungsprojekten und Entwicklungsarbeiten hat sich dieses Themas angenommen. Im Rahmen des Projektes TARMAC des DLR oder des EU-Projektes BETA, das ebenfalls unter Federführung des DLR durchgeführt wurde, gelang es erstmals, die vollautomatische Führung eines Flugzeugs am Boden, von der Landung bis zum nächsten Start, zu realisieren. Ebenso stehen Systeme, die ein automatisches Labelling und damit eine Zielerkennungsfunktion mit dem Bodenradar verbinden, kurz vor der Einsatzreife (z.B. am Flughafen München).

Bei keinem dieser Systeme ist jedoch bisher eine automatische Planungskomponente mit realisiert worden, d.h. die Systeme helfen dem Lotsen dabei, sich einen Überblick über die Verkehrslage auf dem Vorfeld zu verschaffen; sie unterstützen ihn jedoch nicht bei der Führung des Verkehrs. Der Grund dafür ist, dass bisher die erreichbare Ortungsgenauigkeit noch nicht als ausreichend angesehen wurde, um Rollverkehr automatisch zu planen.

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit besserer Systeme für die Ortung und Erkennung von Flugzeugen auf dem Vorfeld und damit genauerer Information über die Position bestimmter Flugzeuge am Boden ist die Nutzung dieser Informationen für ein Entscheidungsunterstützungswerkzeug für die Rollverkehrslotsen der logische nächste Schritt.

Diese Arbeit setzt an dieser Stelle an und stellt einen Algorithmus vor, der unter gegebenen Voraussetzungen optimale Routen für ein Rollplan-Szenario entwirft und dabei insbesondere die Interaktionen zwischen mehreren Flugzeugen, die auf dem Vorfeld unterwegs sind, berücksichtigt. Die Idee, eine solche Planungsfunktion zu implementieren, ist nicht ganz neu, allerdings wurde sie im Rahmen bisheriger Projekte noch nicht realisiert. Dies lag weniger an der grundsätzlichen Schwierigkeit, einen solchen Ansatz zu verfolgen. Entweder wurde die im Rahmen dieser Projekte realisierte Ortungsgenauigkeit für zu gering erachtet, um bereits automatisch planen zu können; oder aber es wurde der Bedarf an automatischer Planung des Rollverkehrs angezweifelt. In der Tat wird auf den meisten Flughäfen eher das Start- und Landebahnsystem als Kapazitätsengpass wahrgenommen als das Rollfeld oder das Vorfeld.

In dieser Arbeit konnte jedoch durch die genaue Analyse statistischer Daten sowie durch Recherchen auf mehreren deutschen Flughäfen nachgewiesen werden, dass das Vorfeld durchaus ein Kapazitätsengpass, zumindest aber eine häufige Verspätungsursache sein kann.

Dies legt nahe, dass das Potenzial einer verbesserten Planung des Rollverkehrs eingehend betrachtet werden sollte.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz einer graphentheoretischen Modellierung des Flughafens hat sich als flexibel und gut handhabbar herausgestellt; insbesondere

erlaubt er eine Portierung des generischen Ansatzes auf andere Flughäfen, sofern für diese Flughäfen Daten in der erforderlichen Qualität zur Entwicklung des Graphenmodells und zur Kalibrierung zur Verfügung stehen.

5.1.2 Ergebnisse

Nach einer genauen Analyse der Systemeigenschaften des Flughafen-Vorfeldes wurde eine Zielfunktion für optimalen Rollverkehr formuliert, die der Tatsache Rechnung trägt, dass Verspätungen im Luftverkehr eine Vielzahl von Ursachen haben können und daher der Begriff einer Rollverkehrs-„Verspätung“ allein wenig zielführend ist. Zur Lösung des mit dieser Zielfunktion formulierten Problems wurde anschließend ein Algorithmus entwickelt, der das Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit Hilfe von Zeitfenstern und unter Anwendung von zielgerichteter Suche mit Unterschätzung der Restentfernung löst. Während die zielgerichtete Suche hilft, die Laufzeit-Anforderungen des Algorithmus gering zu halten, ermöglicht die Verwendung von Zeitfenstern, dass der Algorithmus eine Vielzahl von Flügen hintereinander planen kann, ohne dass dabei neue Konflikte entstehen.

Eine Einschränkung bezüglich der möglichen Lösungen ist, dass die Reihenfolge der optimierten Touren fest ist, d.h. die Touren werden in derselben Reihenfolge geplant, in der sie im Szenario vorgegeben sind. Eine Variation dieser Reihenfolge wäre zwar prinzipiell auch möglich gewesen. Allerdings hätte dann ein vollständig anderer Algorithmus implementiert werden müssen.

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Variation der Reihenfolge von Touren keinen nennenswerten Gesamteinfluss auf die Leistung des Systems bzw. die durchschnittliche Rolldauer der Flugzeuge hat. Die Beschränkung der Optimierung auf optimale Wegführung auf dem Rollfeld ohne Optimierung der Reihenfolge war also gerechtfertigt.

Die Implementierung des Algorithmus wurde in einer Vielzahl unterschiedlicher Szenarien getestet und auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht. Die Szenarien waren so ausgelegt, dass sie die Verkehrssituation auf dem Vorfeld möglichst realistisch wiedergeben sollten. Einflüsse stochastisch auftretender Flugereignisse (und damit: Fahrweg-Anforderungen an den Algorithmus) wurden ebenso studiert wie das Systemverhalten bei steigender Last.

Die Ergebnisse dieser Testläufe waren überaus viel versprechend. Es zeigte sich, dass die getroffenen Festlegungen bezüglich der Auslegung des Modells die Systemeigenschaften des realen Rollverkehrs gut wiedergeben, und dass das Systemverhalten vom Optimierungsalgorithmus gut abgebildet wird.

Die Werte der optimierten Rollverkehrs-Routings aus den analysierten Szenarien wurden schließlich mit den Leistungsdaten des realen Rollverkehrs am Flughafen

Frankfurt verglichen, die in hoher Qualität vorliegen. Der Optimierungsalgorithmus zeigte dabei gegenüber dem regelbasierten System, in dem der Verkehr derzeit abgewickelt wird, ein viel versprechendes Potenzial. Dieselben Quelle-Ziel-Verbindungen konnten vom Algorithmus in aller Regel im Durchschnitt mit kürzerer Fahrzeit realisiert werden, als dies im heutigen Betrieb „von Hand“ möglich ist. Global konnte im Mittel eine Taxi-Zeit-Verkürzung um ca. 5% pro Rollvorgang erreicht werden. Es besteht also erhebliches wirtschaftliches Einsparpotenzial. Es kann von 80 Mio. US-\$³⁸ an Flugzeug-Betriebskostensparnis pro Flughafen der Größe Frankfurt/Mains über die Lebensdauer des Systems ausgegangen werden.

Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die optimierten Rollrouten genauer eingehalten werden können und die Streuung verschiedener Rollzeiten daher weit weniger stark ausgeprägt ist. Außerordentliche Einflüsse wurden dabei auch für die Optimierungsszenarien mit berücksichtigt, um die Ergebnisse mit dem heutigen, konventionellen Rollverkehrsbetrieb vergleichbar zu machen.

5.2 Ausblick

Der besondere Entwicklungsbedarf für die technische Unterstützung des Rollverkehrs am Boden ist erkannt, und es wird an verschiedenen Stellen daran gearbeitet, diese Technologielücke zu schließen. In den nächsten Jahren werden Flughafen-Rollverkehrsradaranlagen mit automatischem Labelling (Zielerkennung und Informationszuordnung) verfügbar werden und auf den großen Drehkreuzflughäfen dann zum Stand der Technik werden. Mit ihrer Hilfe wird der Rollverkehr deutlich unabhängiger von meteorologischen-, und insbesondere von Sichtbedingungen werden.

Zusätzlich eröffnet die Automatisierung der Rollverkehrsüberwachung auch die Chance, Entscheidungsunterstützungswerkzeuge für Rollverkehrslotsen zu konzipieren, damit die Boden-Infrastruktur eines Flughafens effizienter genutzt werden kann. Dies würde bedeuten, für den Bodenverkehr eine Entwicklung nachzuvollziehen, die für den Strecken- und Anflugbereich seit vielen Jahren gang und gäbe ist. Entscheidungsunterstützung z.B. zur Sequenzierung von Anflügen oder von Abflügen gehören hier längst zum Standard.

Hierbei wird sicherlich noch Überzeugungsarbeit bei den Rollverkehrslotsen zu leisten sein, die davon überzeugt werden müssen, seit vielen Jahren bewährte Prozesse zu Gunsten der vielleicht zunächst als ungewiss empfundenen Vorzüge eines neuen Systems aufzugeben. Allerdings waren ähnliche Bedenken auch schon bei der Einführung der Anflugplanungs-Systeme oder – unter Piloten – bei der Auto-

³⁸ Nutzwert in heutiger Währung

matisierung des Cockpits zu überwinden, ohne dass heute noch jemand den vielfältigen Nutzen der dort längst zum Standard gewordenen automatischen Systeme anzweifeln würde.

Bei einem solchen praktischen Einsatz wird sich auch die Beschränkung der Optimierung auf feste Reihenfolgen als Vorteil erweisen. Dies liegt daran, dass ein Optimierungssystem bestimmten Bedingungen entsprechen muss, um in der Praxis nützlich zu sein. Wenn im laufenden Betrieb Rollverkehrsprozesse optimiert werden sollen, so muss dies „online“ geschehen, d.h. der Optimierungsalgorithmus muss berücksichtigen, dass die Situation sich jederzeit wieder ändern kann, weil z.B. ein Flug früher oder später losrollt als geplant. Diese Änderungen können sich von einer Minute zur nächsten ergeben, und es muss sofort wieder eine optimale Lösung für die dann aktuelle Situation bereitgestellt werden. Daher hat die in dieser Arbeit implementierte Lösung mit festen Reihenfolgen und Zeitfenstern Vorteile gegenüber einer Lösung, die auch die Reihenfolge optimiert. Bei letzterem Verfahren ist die Menge der geplanten Rollvorgänge endlich, denn nur dann, wenn alle Touren-Anforderungen bekannt sind, können diese auch in die optimale Reihenfolge gebracht werden. Wenn sich nun durch die Abarbeitung der erstellten Touren-Liste und das kontinuierliche Hinzukommen neuer Touren die Situation verändert, muss jedes Mal eine komplett neue optimale Lösung erstellt werden.

Dieses Problem kennt der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus nicht: Da er die Fahrten in der Reihenfolge plant, in der sie ohnehin vorgesehen sind, und Zeitfenster die blockierten Ressourcen für alle weiteren Anfragen sperren, können jederzeit neue Touren hinzugeplant werden, ohne dass sich deshalb an den bis dahin geplanten etwas ändern müsste. Die geringe Elastizität der Optimierungsergebnisse bezüglich einer sich verändernden Reihenfolge deutet auch darauf hin, dass später neu hinzukommende Fahraufträge ebenso gut geplant werden können wie solche, die in der ursprünglichen Fahrtenliste enthalten waren. Der Algorithmus ist also für einen kontinuierlichen Betrieb grundsätzlich geeignet.

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte und erfolgreich getestete Algorithmus „Kantenorientiertes Ein-Paar-kürzeste-Wege-Problem mit kontinuierlichen Zeitfenstern und zielgerichteter Suche auf Dijkstra-Basis“ deutet also eine mögliche Entwicklungsrichtung einer künftigen Unterstützung von Lotsen bei der Rollverkehrsplanung in einem stärker automatisierten System zur Rollverkehrsführung an.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Systemelemente des Flughafens Frankfurt/Main	7
Abb. 2-2: Verknüpfung der Systemelemente eines Verkehrsflughafens.....	8
Abb. 2-3: Prozesskette Boden-Rollverkehr	11
Abb. 2-4: Funktionen der Rollverkehrsführung	13
Abb. 2-5: Lotsenarbeitsplätze im Tower, Flughafen München.....	14
Abb. 2-6: Struktur der Rollverkehrsfunktionen und –prozesse	15
Abb. 2-7: Rollverkehrskarte (Taxi Chart) Flughafen Toronto (YYZ) (Ausschnitt).....	16
Abb. 2-8: Prozessschritte am Flughafen / mögliche Kapazitätsengpässe	26
Abb. 2-9: An- und Abflugspuren zu den 4 New Yorker Flughäfen JFK, Newark, LaGuardia und Teterboro	27
Abb. 2-10: Ursachen für verspätete Flüge am Flughafen Frankfurt/Main, Juli 2002	30
Abb. 2-11: Verteilung der Zeiten für Taxi-in und Taxi-out, Flüge Frankfurt-Madrid vv., Flughafen Madrid	31
Abb. 2-12: Verteilung der Zeiten für das Taxi-in in Abhängigkeit der Zahl auf dem Vorfeld verkehrender Flugzeuge (N_A), Flughafen Atlanta	31
Abb. 2-13: Verteilung der Zeiten für das Taxi-out in Abhängigkeit der Zahl auf dem Vorfeld verkehrender Flugzeuge (NA), Flughafen Atlanta	32
Abb. 2-14: Flughafen Frankfurt/Main, Terminal 1: Teile der Flugsteige A und B	33
Abb. 2-15: erforderliche Rollfeldfläche vs. Passagierkapazität.....	34
Abb. 3-1: Geographische Karte: Königsberg im 18. Jahrhundert.....	35
Abb. 3-2: Graph des Königsberger Brückenproblems	36
Abb. 3-3: ungerichteter, ebener Graph.....	37
Abb. 3-4: gerichteter Graph	38
Abb. 3-5: Digraph mit gewichteten Bögen.....	39
Abb. 3-6: Netzwerk und Flüsse	43
Abb. 3-7: Abhängigkeit der Fahrzeit vom Verkehrsaufkommen bei makroskopischer Verkehrsmodellierung.....	45
Abb. 3-8: Ein zeitexpandiertes Netzwerk mit Knoten Nr. 1 als Quelle über eine Zeitspanne von $T=5$ mit 3 verschiedenen Startzeiten	47
Abb. 3-9: Prinzip der Planung eines Fluges bei mehreren bereits gesetzten Sperrungen	48
Abb. 3-10: Der Breitensuche-Algorithmus durchsucht einen ungerichteten Beispielgraphen	52
Abb. 3-11: Der Dijkstra-Algorithmus durchsucht einen Beispielgraphen.....	56
Abb. 3-12: Prinzip des Setzens eines Zeitfensters durch einen bereits geplanten Flug n ..	57
Abb. 3-13: Die Klassen P und NP	62
Abb. 3-14: Die verschiedenen Verspätungsarten	64
Abb. 3-15: Prioritätsklassen von Flugzeugen bei der Verwaltung der Sperrzeiten.....	67
Abb. 3-16: Modellierung einer Rollwegkreuzung (Knoten n_1 , vier adjazente Kanten a_1 bis a_4 und zwei Rollvorgänge φ_1, φ_2).....	69
Abb. 3-17: Graphenmodell des Frankfurter Flughafens: Kanten und Knoten	70
Abb. 3-18: Graphenmodell des Frankfurter Flughafens: Knoten aller Gates A bis E.....	71
Abb. 3-19: Flughafen Frankfurt/Main, Rollweg „November“	71
Abb. 3-20: Sperrung eines Rollweges für Gegenverkehr durch Sperrung der antiparallelen Kante.....	72

Abb. 3-21: Bestimmung der geeigneten Kantenlänge x	74
Abb. 3-22: Flugzeuglängen und –häufigkeiten.....	75
Abb. 3-23: Zellularisierung langer Kanten	76
Abb. 3-24: Ursprungsgraph und der korrespondierende Dual Graph.....	77
Abb. 3-25: Expanded Network am Beispiel eines Knotens.....	78
Abb. 3-26: Der Arc-Label Shortest Path – Algorithmus durchsucht einen Beispielgraphen	82
Abb. 4-1: Flughafen Frankfurt/Main, Luftbild von Osten	91
Abb. 4-2: Übersichtskarte Flughafen Frankfurt/Main.....	93
Abb. 4-3: Flughafen Frankfurt/Main, Terminals 1+2	94
Abb. 4-4: Datenmodell der Gewinnung der realen Rollverkehrsdaten	95
Abb. 4-5: Verteilungen der Taxi-Zeiten für die Abstellposition B46 für alle möglichen Quellen und Senken	98
Abb. 4-6: Ausgabe des Algorithmus.....	102
Abb. 4-7: Rollzeiten 25R – B24: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI.....	104
Abb. 4-8: Rollzeiten 25R – B24: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI.....	105
Abb. 4-9: Rollzeiten 25L – C4: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI.....	107
Abb. 4-10: Rollzeiten 25L – C4: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI.....	107
Abb. 4-11: Rollzeiten A17 – 18W: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI	111
Abb. 4-12: Rollzeiten A17 – 18W: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI	111
Abb. 4-13: Rollzeiten D3 – 25R: Vergleich 1 Optimierung – DAYTRI	113
Abb. 4-14: Rollzeiten D3 – 25R: Vergleich 2 Optimierung – DAYTRI	114
Abb. 4-15: Vergleich der Rollzeiten für dieselben Touren, in unterschiedlicher Reihenfolge geplant.....	116

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: ICAO Flughafen-Bezugscodes	9
Tabelle 2: Kenngrößen der Rollweg-Dimensionierung	12
Tabelle 3: Längen gängiger Verkehrsflugzeuge	74
Tabelle 4: Auszug aus der DAYTRI-Datenbank, 1998 (Anflugdaten)	95
Tabelle 5: Alle Rollvorgänge für die Parkposition B46, Jahre 1998 und 1999, aufgeschlüsselt nach Dauern	97
Tabelle 6: Verteilung des Verkehrs auf die Flugsteige	100
Tabelle 7: Ausschnitt aus Rollplan-Szenario Nr. 123	101
Tabelle 8: DAYTRI-Werte der Rollroute 25R – B24	103
Tabelle 9: Optimierte Rollzeiten der Rollroute 25R – B24	103
Tabelle 10: DAYTRI-Daten der Rollroute 25L – C4	106
Tabelle 11: Optimierte Rollzeiten der Rollroute 25L – C4.....	106
Tabelle 12: DAYTRI-Daten der Rollroute A17 – 18W	109
Tabelle 13: Optimierte Rollzeiten der Rollroute A17 – 18W	110
Tabelle 14: DAYTRI-Daten der Rollroute D3 – 25R	112
Tabelle 15: Optimierte Rollzeiten der Rollroute D3 – 25R.....	113
Tabelle 16: Optimierungsergebnisse, reale Daten und Optimierungspotenziale für vier Rollrouten.....	117

LITERATURVERZEICHNIS

- /Ahu01/ Ahuja, Ravindra K.; Orlin, James B.; Pallottino, Stefano; Scutellà, Maria G.: *Dynamic Shortest Paths Minimizing Travel Times and Costs*; University of Florida, Gainesville; MIT, Cambridge; Università di Pisa, October 2001
- /AIP04.1/ Deutsche Flugsicherung GmbH: *Luftfahrthandbuch Deutschland / AIP Germany*, AD 2 EDDF 1-14/17, Abschnitte 3 (Führung von Luftfahrzeugen auf dem Vorfeld) und 4 (Führung von Luftfahrzeugen auf dem Rollfeld). Letzte Aktualisierung: 22. Jan. 2004
- /AIP04.2/ Deutsche Flugsicherung GmbH: *Luftfahrthandbuch Deutschland / AIP Germany*, AD 2 EDDS 1-11, Abschnitte 4 (Regeln für die Luftverkehrsabwicklung auf den Vorfeldern) und 6 (Führung von Luftfahrzeugen bei Allwetterflugbetrieb). Letzte Aktualisierung: 22. Jan. 2004
- /Airb02.1/ Airbus S.A.S.: *A380 Airplane Characteristics for Airport Planning AC*. Preliminary Issue. Blagnac, France; Jan. 2002
- /Airb02.2/ Airbus S.A.S.: *Global Market Forecast 2002*. Blagnac, France; Sept. 2002
- /Bau99/ Baum, Herbert; Esser, Klaus; Kurte, Judith; Probst, Karl Michael: *Bedeutung des Flughafens Frankfurt/Main als Standortfaktor für die regionale Wirtschaft*. Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Köln 1999
- /Beas00/ Beasley, JE; Sonander, J; Havelock, P: *Scheduling aircraft landings at London Heathrow using a population heuristic*. Journal of the Operational Research Society Vol. 52, No. 5, 2000
- /BETA02/ BETA Demonstration Day, Flughafen Hamburg, 29. Oktober 2002
- /Boei03/ Boeing Commercial Airplanes, Marketing: *Current Market Outlook 2003*. Seattle, WA, USA; June 2003
- /Bou03/ Bouchot, Edmond: *Development of an optimization method for airport ground traffic using a graph model and time windows*; Studienarbeit, ILR der TU Berlin, Dezember 2003
- /BMV00/ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: *Flughafenkonzept der Bundesregierung*; Bonn, 30. August 2000
- /Busa65/ Busacker, Robert G.; Saaty, Thomas L.: *Finite Graphs and Networks: An Introduction with Applications*; McGraw-Hill Inc., New York et al. 1965
- /Busa02/ Busacker, Torsten; Fricke, Manfred: *A Contribution to Proactively Planning and Managing Airport Ground Traffic Using a Stochastic Modelling Approach*, in: Proceedings of the 23rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, pp. 771.1-771.7; Toronto, Canada; September 2002
- /Carr01/ Carr, Francis R.: *Stochastic Modeling and Control of Airport Surface Traffic*. MSc Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology (MIT). Cambridge, 2001
- /Chab00/ Chabini, Ismail: *Algorithms and High Performance Computing for Dynamic Shortest Paths and Analytical Dynamic Traffic Assignment Models*. University

- Transportation Center Year 11 Project Technical Report. MIT, Cambridge, Juni 2000
- /Chen96/ Cheng, Yu: *A rule-based reactive model for the simulation of aircraft on airport gates*, in: Knowledge-Based Systems 10 (1998), published by Elsevier B.V.
- /Chen98/ Cheng, Yu: *Network-Based Simulation of Aircraft at Gates in Airport Terminals*, in: Journal of Transportation Engineering, March/April 1998, Volume 124, Issue 2, published by the ASCE
- /Clar03/ Clarke, John-Paul: *Modeling and Simulating the Air Transportation System – Challenges and Solution Methodologies*. Seminar an der TU Berlin auf Einladung des Graduiertenkollegs “Stochastische Modellierung und quantitative Analyse großer Systeme in den Ingenieurwissenschaften”, 19. Mai 2003
- /Corm01/ Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford: *Introduction to Algorithms*. Second Edition. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts 2001
- /Delv01/ Delve, Ken: *Top 100 Airports*, in: Airports International, Volume 34 No. 7, published by Key Publishing Ltd., Stamford, UK, Sept. 2001
- /Dero95/ Desrosiers, Jacques; Dumas, Yvan; Solomon, Marius M.; Soumis, François: *Time Constrained Routing and Scheduling*, in: Ball, Michael O. et al., Eds.: *Network Routing*. Handbooks in Operations Research and Management Science, Volume 8. Elsevier Science B.V., Amsterdam 1995
- /Desa00/ Desaulniers, Guy; Villeneuve, Daniel: *The Shortest Path Problem with Time Windows and Linear Waiting Costs*; GERAD and École Polytechnique, Montréal, July 2000
- /Dey02/ Dey, Dieter; Schnieder, Hans; Schaefer, Dirk: *A Cost/Benefit Analysis of AFAS Functionalities for a Future ATM System*, in: Proceedings of the 23rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, pp.773.1-773.9; Toronto, Canada; September 2002
- /DFS02/ Deutsche Flugsicherung (DFS): *Air Traffic Flow Management Delay Report – ATFM measures in Europe*. DFS Situation and Information Centre (LIZ), July 2002
- /DLR99/ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *TARMAC – The DLR Contribution to an A-SMGCS*. Institut für Flugführung, Braunschweig, 20.01.1999
- /Die96/ Diestel, Reinhard: *Graphentheorie*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996
- /Doe04/ Dörries, René: *Die Entwicklung von Verfahrenskriterien für Präzisionsanflüge der Betriebsstufe I unter Verwendung bodengestützt augmentierter Satellitensysteme*. Dissertation, ILR der TU Berlin, 2004
- /Dux00/ Dux, Felix; Bangert, David: *OPTAS A – Contract No. 2063, Final Report for Publication*. Airsys ATM, Flughafen Frankfurt-Main. 28 January 2000
- /Eck03/ Eckardt, Timo: *Advanced Aircraft Technology Impact on Airport Capacity*, Präsentation beim Infracap Kick-off, Berlin, Oktober 2003
- /EU93/ Verordnung (Europäische Wirtschaftsgemeinschaft) Nr. 95/93 des Rates der Europäischen Union vom 18. Januar 1993 über gemeinsame Regeln für die

- Zuweisung von Zeitnischen auf Flughäfen in der Gemeinschaft; Amtsblatt Nr. L 014 vom 22.01.1993, S. 1; Brüssel 1993
- /EU04/ Gemeinsamer Standpunkt des Rates vom 19. Februar 2004 im Hinblick auf den Erlass der Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 95/93 des Rates über gemeinsame Regeln für die Zuweisung von Zeitnischen auf Flughäfen in der Gemeinschaft; Interinstitutionelles Dossier 2001/0140 (COD), Brüssel 2004
- /Fli02/ Flicker, Rainer: *Entwicklung eines Konzeptes und dessen Implementierung zur Vorhersage der Rollzeit von Flugzeugen auf Flughäfen*; Diplomarbeit, ILR der TU Berlin, Dezember 2002
- /Flt04/ Flight International: *Collision Course*. Number 4921, Volume 165, p.5. Published by Reed Business Information, Sutton, UK, 17-23 February 2004
- /Ford79/ Ford, Lester R.; Fulkerson, Delbert R.: *Flows in networks*. Princeton University Press, Princeton, NJ 1962
- /Fou92/ Foulds, L.R.: *Graph Theory Applications*; Springer-Verlag New York, Inc., New York 1992
- /FRA99/ Flughafen Frankfurt/Main AG : *Geschäftsbericht 1999*
- /Fri95/ Fricke, Hartmut : *Entwicklung und experimentelle Realisierung einer kooperativen Schnittstelle zwischen Verkehrsflußsteuerung (ATFM) und Flugverkehrskontrolle (ATC)*, Diss., TU Berlin 1995, Verlag Dr. Köster, Berlin 1995
- /Fri96/ Fricke, Manfred; Daser, Gunther : *Flugsicherung*. Vorlesungsskript, TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr, Sommersemester 1996
- /Fri00/ Fricke, Manfred : *Flughafenplanung*. Vorlesungsmanuskript, TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr, Sommersemester 2000
- /Gaw03/ Gawrilow, Ewgenij; Köhler, Ekkehard; Möhring, Rolf; Staufenbiel, Robert; Stenzel, Björn : *Routenführung für Automatic Guided Vehicles – Eine Studie*, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, Januar 2003
- /Gerd01/ Gerdes, Ingrid : *IST-Analyse des Flughafens Frankfurt (FRA-IST), Teil 1: Bodenverkehr*. Institut für Flugführung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Dok.-Nr. IB 112-2001/10. Braunschweig, Mai 2001
- /Glas93/ Glaser, O., et al.: *Surface Movement Guidance and Control System*. Deutsche Flugsicherung GmbH, Auftrag 92/419. DFS-Programmplanung, Dokumente 1-3, Offenbach, 1993
- /Glen01/ Glenn, Andrew M. : *Algorithms for the Shortest Path Problem with Time Windows and Shortest Path Reoptimization in Time-Dependent Networks*. MSc Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Juni 2001
- /Gond84/ Gondran, Michel ; Minoux, Michel : *Graphs and Algorithms*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Chichester et al. 1984
- /Got00/ Gotteland, Jean-Baptiste (Ecole Nationale de l'Aviation Civile ENAC, Toulouse) ; Durand, Nicolas (Centre d'Etudes de la Naviation Aérienne CENA, Toulouse) ; Alliot, Jean-Marc (Direction Générale de l'Aviation Civile

- DGAC) ; Page, Erwan (CENA): *Aircraft Ground Traffic Optimization*, France 2000
- /Grö00/ Grötschel, Martin : *Graphen- und Netzwerkalgorithmen – Algorithmische Diskrete Mathematik I*. Vorlesungsmanuskript TU Berlin, Fachbereich Mathematik, Juni 2000
- /Horo94/ Horonjeff, Robert; McKelvey, Francis X.: *Planning and Design of Airports*, Third Edition, McGraw-Hill, Inc. New York et al. 1994
- /Huck93/ Huck, Volker: *Petrinetz-basierte Beobachtung von Systemzuständen – Einsatzmöglichkeiten und Leistungsgrenzen bei der Lenkung von Flughafenverkehr*. Dissertation TU Braunschweig 1993. DLR-Forschungsbericht DLR-FB 93-27
- /Hurr92/ Hurraß, Karlheinz (Hrsg.): *Wege zur Steigerung der Flughafenkapazität*. Wissenschaftliches Kolloquium in Braunschweig 10.-11. Nov 1992. DLR-Mitt. 93-13
- /ICAO91/ International Civil Aviation Organization: *Aerodrome Design Manual – Part 2: Taxiways, Aprons and Holding Bays*. Third Edition, Doc 9157-AN / 901. Montréal, Canada 1991
- /ICAO99/ International Civil Aviation Organization: *International Standards and Recommended Practices: Aerodromes*. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Volume I: Aerodrome Design and Operations. Third Edition, Montréal, Canada, July 1999
- /Icte03/ Ictenal, Cüneyt: *Erstellung eines Positionierungstools zur Vorplanung der Flugzeugpositionierung*, Diplomarbeit, ILR der TU Berlin, April 2003
- /Idris99/ Idris, Husni R.; Anagnostakis, Ioannis; Delcaire, Bertrand; Hansman, John R.; Clarke, John-Paul; Feron, Eric; Odoni, Amedeo R.: *Observations of Departure Processes At Logan Airport to Support the Development of Departure Planning Tools*. Air Traffic Control Quarterly, Vol. 7(4) 229-257 (1999). Air Traffic Control Association Institute, Inc. 1999
- /Idris01/ Idris, Husni Rifat: *Observation and Analysis of Departure Operations at Boston Logan International Airport*. PhD Thesis, Department for Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, February 2001
- /Idris02/ Idris, Husni; Clarke, John-Paul; Bhuva, Rani; Kang, Laura: *Queuing Model for Taxi-Out Time Estimation*. Air Traffic Control Quarterly, Vol. 10(1) 1-22 (2002). Air Traffic Control Association Institute, Inc. 2002
- /IIWG03/ *Commercial Aircraft Design Characteristics – Trends and Growth Projections*; published by the International Industry Working Group (IIWG), December 2003
- /Jung99/ Jungnickel, Dieter: *Graphs, Networks and Algorithms*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1999
- /Kam04/ Kaminski-Morrow, David; Learmount, David: *Spate of errors led to Linate crash*. Flight International, Number 4922, Volume 165, p.8. Published by Reed Business Information, Sutton, UK, 24 February – 1 March 2004

- /Klei97/ Klein, Kurt: *Wozu dient ein Rollverkehrsmanagement?* DLR Projekt TARMAC, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig 1997
- /Kli02/ Klingenberg, Dr. Christoph, Lufthansa German Airlines, Vice President Infrastructure, Vortrag an der TU Berlin, Feb. 2002
- /Kotny02/ Kotnyek, Balázs: *Dynamic flows*; Institut national de recherche en informatique et en automatique, Sophia Antipolis, December 17, 2002
- /Kron02/ Kronemeyer, Rainer, Kapitän A340 Deutsche Lufthansa; Gespräch am 03.09.2002
- /Kuch99/ Kuchenbecker, Karsten : *Strategische Prognose und Bewertung von Verkehrsentwicklungen mit System Dynamics*. Dissertation Universität Karlsruhe 1999. Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden, 2000
- /Kum00/ Kummer, Ben : *Ein Algorithmus für das kürzeste Wegeproblem mit Zeitfenstern und Längenbeschränkungen*, Diplomarbeit am Fachbereich Mathematik der TU Berlin, Prof.Dr. Rolf H. Möhring (Gutachter), September 2000
- /Lauf99/ Lauf, Wolfgang; Philipps, Heiko; Kaufhold, Rainer; Poppe, Matthias: *JANE Joint Air Navigation Experiments, Simulation of Air Traffic Management Processes*, Final Report. Deutsche Flugsicherung GmbH, 4. August 1999
- /Law91/ Law, Averill M.; Kelton, W. David: *Simulation Modeling and Analysis*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York et al. 1991
- /Lear04/ Learmount, David: *Pilot mistakes blamed for most runway incursions*; in: Flight International, Number 4921, Volume 165, p.10. Published by Reed Business Information, Sutton, UK, 17-23 February 2004
- /Mang85/ Mangoubi, R.S.; Mathaisel, Dennis F.X.: *Optimizing gate assignments at airport terminals*. Transportation Science 19 (2), 1985, published by the Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS)
- /Math00/ The MathWorks, Inc.: *Using MATLAB*. Fifth Printing, Revised for MATLAB 6 (Release 12), November 2000
- /Mei98/ Meier, Christoph: *Datenfusionsverfahren für die automatische Erfassung des Rollverkehrs auf Flughäfen*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, TU Braunschweig 1998
- /Möhr04/ Möhring, Rolf H.; Köhler, Ekkehard; Gawrilow, Ewgenij; Stenzel, Björn: *Conflict-free Real-time AGV Routing*. Technical Report 26-2004, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin 2004. Internet-Publikation unter <ftp://ftp.math.tu-berlin.de/pub/Preprints/combi/Report-026-2004.pdf>
- /Monz99/ Monzel, Franz-Georg: *Demonstration Facilities for Airport Movement Management (DEFAMM)*, Final Report Volume I. Alcatel Air Navigation Systems 1999
- /Neuf03/ Neufville, Richard de; Odoni, Amedeo R.: *Airport Systems – Planning, Design and Management*. McGraw-Hill, Inc. New York et al. 2003
- /Nico03/ Nicolai, Nils: *Untersuchung von Kosten und Nutzen kapazitätserhöhender Maßnahmen an Flughäfen*. Studienarbeit, ILR der TU Berlin, Dezember 2003

- /Ott90/ Ottmann, Thomas; Widmayer, Peter: *Algorithmen und Datenstrukturen*. BI-Wissenschaftsverlag, Reihe Informatik, Band 70. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim 1990
- /Pall97/ Pallotino, Stefano; Scutella, Maria Grazia: *Shortest Path Algorithms in Transportation Models: classical and innovative aspects*. Università di Pisa, Dipartimento di Informatica. Technical Report: TR-97-06, Pisa, April 1997
- /PANY02/ Port Authority of New York and New Jersey, The: *2002 Airport Traffic Report Kennedy – Newark Liberty – LaGuardia*, New York 2002
- /Puje00/ Pujet, Nicolas; Delcaire, Bertrand; Feron, Eric: *Input-Output Modeling and Control of the Departure Process of Busy Airports*. Air Traffic Control Quarterly, Vol. 8(1) 1-32 (2000). Air Traffic Control Association Institute, Inc., 2000
- /Rez00/ Rezvani, Amanollah: *Sensoren für ein integriertes Flugplatz-Rollverkehrs-Managementsystem*. DLR Forschungsbericht 1999-45, zugl. Dissertation TU Berlin 2000
- /Rich93/ Richetta, Octavio; Odoni, Amedeo R.: *Solving Optimally the Static Ground-Holding Policy Problem in Air Traffic Control*. Transportation Science, Vol. 27, No. 3. The Operations Research Society of America, Baltimore, MD, USA 1993
- /Rich94/ Richetta, Octavio; Odoni, Amedeo R.: *Dynamic Solution to the Ground-Holding Problem in Air Traffic Control*. Transportation Research A, Vol. 28A, No. 3, pp. 167-185; Elsevier Science Ltd., 1994
- /Roed00/ Roeder, Michael: *BETA – Operational Benefit Evaluation by Testing an A-SMGCS*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flugführung, Braunschweig, 13.03.2000
- /Rüru01/ Rürup, C.; Hujer, R.; Mehlinger, C.; Kokot, S.: *Einkommens- und Beschäftigungseffekte des Flughafens Frankfurt am Main*. Frankfurt/Main, 2001
- /Schn02/ Schnieder, Hans: *Statistical Analysis Madrid*. Airbus Deutschland GmbH, Technology Evaluation & Viability (ETV), 2002
- /Schö97/ Schöning, Uwe: *Algorithmen – kurz gefasst*; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg, Berlin 1997
- /Schö01/ Schöning, Uwe: *Theoretische Informatik – kurzgefasst*; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg, Berlin 2001
- /Schu04/ Schulz, Holger: *Entwicklung von Verfahrensschutzraum für satellitengestützte Präzisionsanflüge mit bodenseitiger Augmentierung*. Dissertation, ILR der TU Berlin, 2004
- /Shum96/ Shumsky, Robert A.: *Real-Time Forecasts of Airport Departure Queues*. Air Traffic Control Quarterly, Vol. 5(4) 281-308 (1997). Air Traffic Control Association Institute, Inc. 1996
- /Simp97/ Simpson, Robert W.: *Creating New Operational Concepts For Global Automated ATM Systems*, in: Bianco, Lucio et al.: *Modelling and Simulation in Air Traffic Management*, Springer 1997

- /Smi96/ Smith, Jeffrey S.; Peters, Brett A.: *Short Term Scheduling Using Discrete Event Simulation*, Texas A&M University, College Station, TX, October 1, 1996
- /STR97/ Flughafen Stuttgart GmbH: *Flughafenbenutzungsordnung, Teil II: Benutzungsvorschriften*. Abschnitt 3.3.2 (Rollfeld) und 3.3.3 (Vorfelder). Stuttgart, 12.12.1997
- /Tisc02/ Tischendorf, Falko: Gespräch am Flughafen Köln/Bonn am 15.11.2002
- /Wag04/ Wagner, Mirko: *Development of a Simulation Model for Airport Ground Traffic using a graph model in MATLAB*. Studienarbeit, ILR der TU Berlin, 2004
- /Weim01/ Weimer, K.-H.; Jansen, P.: *Zukunft der deutschen Verkehrsflughäfen: im Spannungsfeld von Verkehrswachstum, Kapazitätsengpässen und Umweltbelastungen*. Wirtschafts- und sozialpolitisches Forschungs- und Beratungszentrum der Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn, 2001
- /Wells86/ Wells, Alexander T., Ed.D.: *Airport Planning and Management*, First Edition, TAB Books, Inc. 1986
- /Wolf81/ Wolf, Peter: *Entscheidungshilfen für die Flughafenplanung*, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. W. Schwanhäußer, Heft 34, 1981

LEBENS LAUF

Torsten Busacker

geboren 11. Januar 1974 in Berlin-Lichterfelde

Familienstand ledig

Nationalität deutsch

AUSBILDUNG

1980 – 1984	<i>Gemeinschaftsgrundschule Merl</i> in Meckenheim / Rheinland
1984 – 1993	<i>Konrad-Adenauer-Gymnasium</i> , <i>ibid.</i>
1993 – 2000	Studium an der <i>Technischen Universität Berlin</i> Studiengang: Verkehrswesen Studienrichtung: Luft- und Raumfahrttechnik
1997 – 1998	Studienjahr an der <i>Ecole Nationale de l'Aviation Civile</i> (ENAC), Toulouse, Frankreich
1999 – 2000	Diplomarbeit am <i>Massachusetts Institute of Technology</i> (MIT), Cambridge, MA, USA
August 2000	Erwerb akad. Grad Diplom-Ingenieur
2001 – 2003	Stipendiat der <i>Deutschen Forschungsgemeinschaft</i> (DFG) im Graduiertenkolleg „Stochastische Modellierung und quantitative Analyse großer Systeme in den Ingenieurwissenschaften“ an der TU Berlin

PRAKTIKA UND BERUFSTÄTIGKEIT

1998	Studienarbeit bei <i>Airbus Industrie</i> , Toulouse
1999	Projektmitarbeit bei der <i>Gesellschaft für Luftverkehrsforschung</i> , Berlin; Projekt „Optimierungspotentiale der Wiener Flugsicherungs-Infrastruktur aus Sicht der Luftraumnutzer“
2000	International Trainee bei <i>Boeing Commercial Airplanes</i> , Seattle, WA, USA
Juni 2004	Eintritt als Berater bei <i>Roland Berger Strategy Consultants</i> , Competence Center Transportation, Düsseldorf