

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
1 Einleitung	4
1.1 Bedeutung Flugzeugabfertigung an Flughäfen	4
1.2 Flugzeugabfertigung als Bestandteil des Airport Operations Management	5
1.3 Die wichtigsten Flughäfen weltweit	5
2 Flugzeugfluss	7
2.1 Flugzeuglandung	8
2.1.1 Definition	8
2.1.2 Mathematische Programmierung	9
2.1.2.1 Dynamische Modellierung	10
2.1.2.2 Weitere Ansätze	11
2.1.3 Lösungsansätze	11
2.1.3.1 Heuristiken	11
2.1.3.2 Sonstige Lösungsverfahren	12
2.1.4 Beispiel: New York La Guardia Airport (Janic 2009)	12
2.2 Gate Zuweisung	14
2.2.1 Definition	14
2.2.2 Mathematische Programmierung	15
2.2.2.1 Single Kriterium	15
2.2.2.2 Multiple Kriterien	16
2.2.3 Lösungsansätze	17
2.2.3.1 Heuristiken	17
2.2.3.2 Exakte Methoden	18
2.2.4 Beispiel: Amsterdam Airport Schiphol (Diepen et al. 2009)	18
2.3 Flugzeugservices und Catering	20
2.3.1 Definition	20
2.3.2 Mathematische Modelle	21
2.3.2.1 Betrachtung komplette Abfertigungszeit am Flugsteig	21

2.3.2.2 Beispiel: Catering (Ho & Leung 2010)	23
2.4 Optional: Wartung und Winterbetrieb	24
2.4.1 Wartung	24
2.4.1.1 Definition	24
2.4.1.2 Mathematische Modelle	25
2.4.2 Winterbetrieb	26
2.4.2.1 Definition	26
2.4.2.2 Mathematische Modelle	27
2.4.2.3 Beispiel: Stockholm Arlanda International Airport (Norin 2009)	27
2.5 Pushback	29
2.5.1 Definition	29
2.5.2 Mathematische Modelle	29
2.5.3 Beispiel: London Heathrow Airport (Atkin et al. 2011)	30
2.6 Flugzeugstart	32
2.6.1 Definition	32
2.6.2 Zielfunktionen	32
2.6.3 Dynamische Programmierung	33
2.6.4 Lösungsansätze	34
2.6.4.1 Heuristiken	34
2.6.4.2 Andere Lösungsansätze	34
2.6.5 Beispiel: Logan International Airport Boston (Simaiakis & Balakrishnan 2009)	35
3 Fazit und Ausblick	36
Literaturverzeichnis	38

Abbildungsverzeichnis

Abb.1:	Vorhersage Flugzeugbewegungen 2030 _____	4
Abb. 2:	Das Flughafensystem _____	5
Abb. 3:	Die weltweit wichtigsten Flughäfen 2009 _____	6
Abb. 4:	Flugzeugfluss _____	7
Abb. 5:	Vorfeldkonzepte _____	14
Abb. 6:	Lineare und dynamische Modelle _____	16
Abb. 7:	Klassifizierung der mathematischen Modelle _____	17
Abb. 8:	Exakte Lösungsmethoden bzgl. Flugsteigproblem _____	18
Abb. 9:	Flugzeugservices an einer Boeing 777R _____	20
Abb. 10:	Umkehrzeiten einer Boeing 777-300ER _____	22
Abb. 11:	Vereisungsvorgang _____	26
Abb. 12:	Startprozess _____	32
Abb. 13:	Einteilung der mathematischen Programme _____	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zielfunktionen _____	9
Tabelle 2:	Klassifizierung der mathematischen Modelle _____	10
Tabelle 3:	Modellbeschreibungen _____	10
Tabelle 4:	Übersicht Metaheuristiken Flugzeuglandung _____	11
Tabelle 5:	Modelle mit multiplen Kriterien _____	16
Tabelle 6:	Metaheuristiken _____	17
Tabelle 7:	Klassifizierung Wartung _____	25
Tabelle 8:	Vergleich Lösungen _____	28
Tabelle 9:	Klassifizierung Pushback _____	30
Tabelle 10:	Zielfunktionen des Startproblems _____	33
Tabelle 11:	Auswertung Journals _____	36

1 Einleitung

1.1 Bedeutung Flugzeugabfertigung an Flughäfen

Die Flughafenlogistik steht vor neuen Herausforderungen. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, wird die Anzahl der Flugzeugbewegungen vor allem in Ost- und Südosteuropa stark ansteigen. Die Basis für die Vorhersage für das Jahr 2030 sind reale Daten aus dem Jahr 2009. Das Szenario C steht für das am ehesten eintretende.

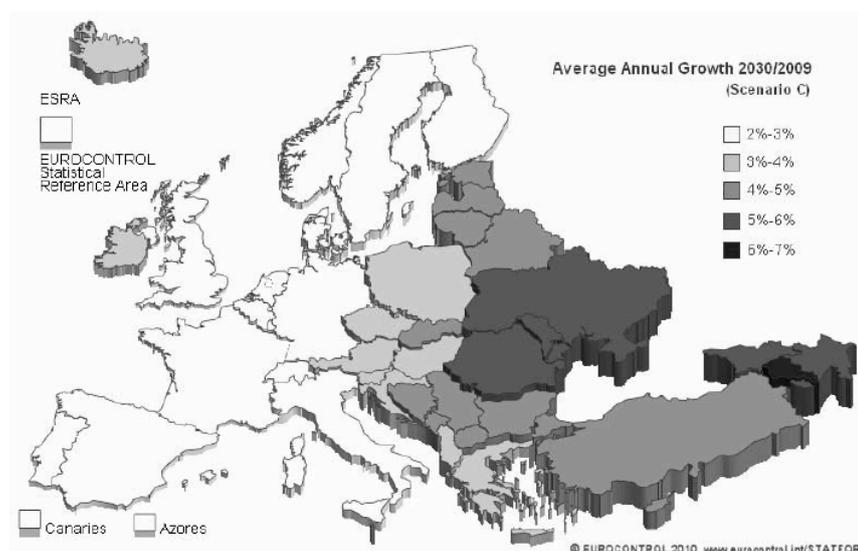


Abb. 1: Vorhersage Flugzeugbewegungen 2030 (Quelle: EUROCONTROL, 2010, S.1)

Neben den Flugzeugbewegungen ist auch die Anzahl der weltweiten kommerziell eingesetzten Flugzeuge gestiegen. Im Jahr 2000 gab es laut ICAO 20.456 Flugzeuge. In den folgenden neun Jahren ist die Anzahl der Flugzeuge um rund 18% angewachsen (ICAO, 2009). Aus den angeführten Informationen wird deutlich, dass sich die Kapazität der Flughäfen vergrößern muss, um sich den neuen Herausforderungen stellen zu können. Der Bau neuer Start- und Landebahnen ist sehr kostenintensiv. Eine Optimierung des Flugzeugflusses am Flughafen kann die Kapazität ohne Neubau von Start- bzw. Landebahnen verbessern. In meiner Arbeit werde ich quantitative Modelle zur Optimierung des Flugzeugflusses vorstellen und diskutieren.

1.2 Flugzeugabfertigung als Bestandteil des Airport Operations Managements

An einem Flughafen gibt es mehrere Hauptflüsse, die koordiniert werden müssen (Norin et al. 2007). Am wichtigsten sind der Passagier-, Fracht- und Flugzeugfluss. Der Passagierfluss betrachtet den Weg der Fluggäste von der Ankunft am Flughafen bis zu deren Abflug bzw. deren Landung an einem Flughafen bis zum Verlassen des Terminals. Der Frachtfluss fokussiert sich auf alle Bewegungen der Fracht an einem Flughafen.

Der Flugzeugfluss wird vom Fracht- und vom Passagierfluss beeinflusst. Ein Flugzeug kann erst von seinem Gate zurückgeschoben werden, wenn alle Passagiere an Bord sind. Dies setzt einen optimalen Passagierfluss voraus.

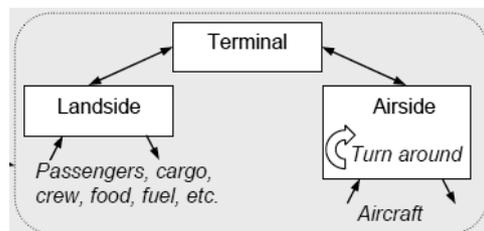


Abb. 2: Das Flughafensystem (Quelle: Norin et al., 2007, S.2)

Norin et al. (2007) haben das Flughafensystem in ein Schema integriert. Abb. 2 stellt die Wechselbeziehungen zwischen ‚Landside‘, Terminal und ‚Airside‘ dar.

1.3 Die wichtigsten Flughäfen weltweit

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (engl. ‚International Civil Aviation Organization‘) veröffentlicht jedes Jahr einen Bericht bezüglich der Passagierzahlen, der Luftfrachtmengen und der Flugzeugbewegungen aller Mitglieder. Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die 25 wichtigsten Flughäfen weltweit. An erster Stelle steht der Hartsfield-Jackson International Flughafen von Atlanta, GA, USA. Danach folgt London Heathrow mit 466.000 Flugzeugbewegungen. Das entspricht etwa der Hälfte aller Bewegungen in Atlanta.

Weltweit wurden im Jahr 2009 11,5 Millionen Flugzeugbewegungen und 1,2 Milliarden Flugpassagiere registriert. Der wichtigste Flughafen Deutschlands ist

Frankfurt/Main und belegt weltweit Platz neun mit rund 51 Millionen Passagieren (ICAO, 2009).

Rank No.	City	Airport	Passengers embarked and disembarked			Aircraft movements		
			2009 (thousands)	2008 (thousands)	2009/2008 (%)	2009 (thousands)	2008 (thousands)	2009/2008 (%)
1	Atlanta, GA	Hartsfield-Jackson International	88 032	90 039	-2.2	970	978	-0.8
2	London	Heathrow	66 037	67 055	-1.5	466	479	-2.6
3	Beijing	Capital International	65 375	55 938	16.9	488	430	13.6
4	Chicago, IL	O'Hare International	64 398	70 819	-9.1	828	882	-6.1
5	Tokyo	Haneda (Tokyo International)	61 904	66 736	-7.2	321	339	-5.1
6	Paris	Charles de Gaulle	57 907	60 875	-4.9	525	560	-6.2
7	Los Angeles, CA	Los Angeles International	56 521	59 816	-5.5	545	623	-12.5
8	Dallas/Fort Worth, TX	Dallas-Fort Worth International	56 030	57 093	-1.9	639	656	-2.7
9	Frankfurt	Frankfurt	50 933	53 467	-4.7	463	486	-4.7
10	Denver, CO	Denver International	50 167	51 245	-2.1	612	626	-2.3
11	Madrid	Barajas	48 221	50 809	-5.1	430	463	-7.1
12	New York, NY	John F. Kennedy International	45 915	47 807	-4.0	415	439	-5.4
13	Hong Kong	Hong Kong International	45 559	47 860	-4.8	288	301	-4.3
14	Amsterdam	Amsterdam-Schiphol	43 570	47 430	-8.1	402	442	-9.0
15	Dubai	Dubai International	40 902	37 441	9.2	281	270	4.0
16	Bangkok	Bangkok Suvarnabhumi International	40 500	38 603	4.9	258	249	3.4
17	Las Vegas, NV	Mccarran International	40 469	43 209	-6.3	511	579	-11.7
18	Houston, TX	Houston George Bush Intercontinental	40 007	41 709	-4.1	538	576	-6.6
19	Phoenix, AZ	Sky Harbor International	37 825	39 891	-5.2	457	502	-9.0
20	San Francisco, CA	San Francisco International	37 224	37 235	0.0	380	388	-2.1
21	Singapore	Changi	37 204	37 695	-1.3	245	235	4.3
22	Guangzhou	Guangzhou Baiyun International	37 048	33 435	10.8	309	280	10.2
23	Jakarta	Jakarta Soekarno Hatta International	36 466	32 233	13.1	269	250	7.4
24	Charlotte, NC	Charlotte-Douglas International	34 577	34 739	-0.5	509	536	-5.0
25	Miami, FL	Miami International	33 886	34 064	-0.5	351	372	-5.4
		Total	1 216 677	1 237 243	-1.7	11 502	11 941	-3.7

Abb. 3: Die weltweit wichtigsten Flughäfen 2009 (Quelle: ICAO, 2009, S. 113)

2 Flugzeugfluss

Jedes Flugzeug durchläuft an einem Flughafen ähnliche Prozesse. Sie können in einem Fluss dargestellt werden (Abb. 4). Das erste Teilproblem erzeugt der Landevorgang. Hier müssen die ankommenden Flugzeuge auf die vorhandenen Landebahnen verteilt werden. Nach der Landung werden dem Flugzeug die geeigneten Rollfelder zugewiesen, um an den geplanten Flugsteig zu gelangen. Hier parkt das Flugzeug solange bis alle Flugzeugservices durchgeführt worden sind und die neuen Passagiere an Bord sind.

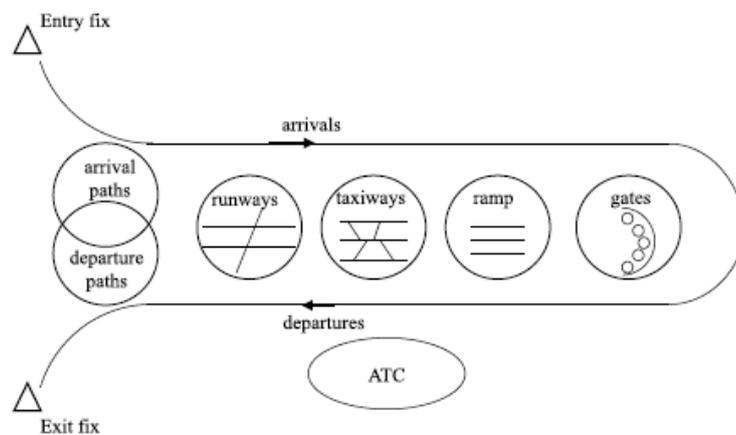


Abb. 4: Flugzeugfluss (Quelle: Simaiakis & Balakrishnan, 2009, S.2)

Das Flugzeug kann jetzt zurückgeschoben werden und wieder das Rollfeld betreten. Nachdem das Flugzeug einer Startbahn zugeordnet wurde, kann es den Startvorgang beginnen und abheben. Am Zielort läuft der gleiche Fluss erneut ab. Optional können kleine Wartungsvorgänge am Flugsteig erfolgen. In den Wintermonaten müssen Enteisungsvorgänge am Flugzeug erfolgen, um einen sicheren Start zu ermöglichen.

Alle angesprochenen Teilprobleme werden im Folgenden genauer untersucht und Optimierungsmodelle vorgestellt.

2.1 Flugzeuglandung

2.1.1 Definition

Das Landeproblem ist das erste Teilproblem des Flugzeugflusses an einem Flughafen.

Von großer Bedeutung ist die Kapazität eines Flughafens. Ashford et al. (2011, S. 235) definieren den Begriff Kapazität folgendermaßen: ‚The term „capacity“ [...] refers to the quantitative measure for supply of service of a processing facility to accommodate sustained demand – the maximum throughput or supply of service over a specified period of time under given service conditions.‘ Stollitz (2008) unterscheidet zusätzlich zwischen theoretischer und praktischer Kapazität. Die theoretische Kapazität ist die maximale Anzahl an abgefertigten Flugzeugen ohne Abweichungen vom Flugplan, d.h. der Vorgang wird deterministisch betrachtet. Im Vergleich dazu wird die praktische Kapazität unter stochastischen Bedingungen betrachtet. Hier entspricht die maximale Kapazität der Rate, bei der eine durchschnittliche vorgeschriebene Verspätung nicht überschritten wird. Die Kapazität entspricht nicht der Nachfrage. Je nach Flughafen werden die Bahnen ausschließlich für Lande- bzw. Startvorgänge genutzt oder im Wechsel, abhängig von der aktuellen Nachfrage (Ashford et al. 2011).

Laut der US-Bundesbehörde für Luftfahrt (FAA Federal Aviation Administration) gibt es Richtlinien, die einen Mindestabstand zwischen Flugzeugen im Landevorgang vorschreibt (Ashford et al. 2011). Diese Richtlinien fordern einen vertikalen, horizontalen und lateralen Mindestabstand, um die Flugsicherheit zu gewährleisten. In Flughafennähe muss der horizontale Abstand zwei bis fünf Seemeilen betragen, abhängig von Flugzeuggröße und Landebahnpkapazität. Bereits von Blumstein (1959) wurde der Mindestabstand von Flugzeugen in der Luft berücksichtigt.

Ein weiterer Punkt ist die Klassifizierung der Zeiten. Bäuerle et al. (2007) haben unterschieden zwischen Ankunftszeit, Wartezeit in der Warteschlange und die Servicezeit eines Flugzeugs. Die Ankunftszeit ist dabei der Zeitpunkt, in dem ein Flugzeug in den Radarbereich der Fluglotsen gelangt. Die Wartezeit in der

Warteschlange ist die Zeit, die vergeht von der Ankunftszeit bis zur eigentlichen Landung. Die Servicezeit ist der Abstand zum nächsten Flugzeug in der Luft.

2.1.2 Mathematische Programmierung

Das Flugzeuglandeproblem wurde im betrachteten Zeitraum ab 2004 ausschließlich mit nur einer Zielfunktion formuliert. Die unten stehende Tabelle gibt eine Übersicht über die individuellen Zielfunktionen der Minimierungsprobleme im Landeanflug. Hauptsächlich wurden Programme aufgestellt, die die Gesamtkosten oder die gesamte Verspätung minimieren.

	Beasley et al. (2004)	Pinol & Beasley (2006)	Balakrishnan & Chandran (2006)	Bäuerle et al. (2007)	Mukherjee & Hansen (2007)	Rasmussen et al. (2007)	Soomer & Franx (2008)	Stolletz (2008)	Bencheikh et al. (2009)	Hu & Di Paolo (2010)	Zhan et al. (2010)	Boysen & Fliedner (2010)	Σ
Min. durchschnittliche Wartezeit				x									1
Min. gesamte skalierte Kosten							x	x					2
Min. Produktionsspanne			x										1
Min. Gesamtkosten	x	x				x							3
Min. gesamte Verspätung					x					x	x		3
Min. maximale Streuung												x	1
Min. Gesamtstrafkosten									x				1
Σ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Tabelle 1: Zielfunktionen

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Anzahl der betrachteten Landebahnen. Jeder Flughafen besitzt eine bestimmte Anzahl an Start- bzw. Landebahnen. Balakrishnan & Chandran (2006) und Stolletz (2008) weisen darauf hin, dass ihre Modelle für Bahnen verwendet werden können, die sowohl Starts als auch Landungen auf einer Bahn erlauben. Des Weiteren können einige der untersuchten Modelle für das Lande- und das Startproblem angewendet werden. Vier der vorgestellten Modelle (Janic 2009, Stolletz 2008, Bäuerle et al. 2007 und Balakrishnan & Chandran 2006) können zum Lösen beider Probleme verwendet werden. Die Mehrheit aller Autoren hat Modelle mit einer Landebahn

formuliert. Beasley et al. (2004) und Bäuerle et al. (2007) haben beide Fälle betrachtet, d.h. eine bzw. mehrere Landebahnen.

2.1.2.1 Dynamische Modellierung

Zum Thema Flugzeuglandung wurden vornehmlich dynamische Modelle veröffentlicht. Nur etwa 21% aller untersuchten Programme aus den letzten sieben Jahren sind linear (Tabelle 2).

Linear	Dynamisch	Andere
Pinol & Beasley (2006) Rasmussen et al. (2007) Soomer & Franx (2008)	Beasley et al. (2004) Pinol & Beasley (2006) Balakrishnan & Chandran (2006) Mukherjee & Hansen (2007) Stolletz (2008) Hu & Di Paolo (2010) Zhan et al. (2010) Boysen & Fliedner (2010)	Bäuerle et al. (2007) Bencheikh et al. (2009) Janic (2009)
Σ 3	Σ 8	Σ 3

Tabelle 2: Klassifizierung der mathematischen Modelle

Die acht untersuchten dynamischen Modelle lassen sich noch weiter klassifizieren. 87,5% der Modelle beziehen sich auf nur eine Landebahn. Nur Pinol & Beasley (2006) haben ein gemischt-ganzzahliges 0-1 Modell mit mehreren Landebahnen aufgestellt. Beasley et al. (2004) haben ein Verschiebungsproblem (engl. ‚Displacement Problem‘) formuliert. Mukherjee & Hansen (2007) haben in ein dynamisch stochastisches ganzzahliges Programm modelliert. Boysen & Fliedner (2010) haben erstmalig den Arbeitsaufwand der Arbeiter am Flughafen mit in ihr Modell einfließen lassen. Das Landeproblem wurde von Zhan et al. (2010) in ein Permutationsproblem umformuliert.

Autor	Modellbeschreibung
Beasley et al. (2004)	Verschiebungsproblem
Pinol & Beasley (2006)	Gemischt-ganzzahliges 0-1 Modell
Mukherjee & Hansen (2007)	Dynamisches stochastisches ganzzahliges Programm
Stolletz (2008)	G(t)/G(t)/1 Warteschlangensystem
Hu & Di Paolo (2010)	Receding Horizon Control
Zhan et al. (2010)	Permutationsproblem
Boysen & Fliedner (2010)	3 Partition Problem mit Arbeitsaufwand
Balakrishnan & Chandran (2006)	Netzwerk mit FCFS Regel

Tabelle 3: Modellbeschreibungen

2.1.2.2 Weitere Ansätze

Neben den bereits vorgestellten Modellen, gibt es drei weitere Modelle, die einen anderen Ansatz verfolgen. Das von Janic (2009) formulierte Programm ist rein deterministisch. Bäuerle et al. (2007) haben eine Semi-Markov Kette verwendet, um das Landeproblem zu lösen. Bencheikh et al. (2009) haben eine Job Shop Formulierung als Ausgangspunkt für ihr statisches mathematisches Programm gewählt.

2.1.3 Lösungsansätze

2.1.3.1 Heuristiken

Zum Lösen des Landeproblems wurden verschiedene Algorithmen verwendet. Neben exakten Algorithmen, wurden hauptsächlich Heuristiken bzw. Metaheuristiken angewendet. Bäuerle et al. (2007) hat sein Programm mit Münzwerfen, Round Robin und Varianten des ‚Join the least load‘ gelöst. Die Mehrheit der Autoren hat verschiedene Metaheuristiken benutzt. Wie in Tabelle 4 erkennbar, wurden vermehrt genetische Algorithmen und Ameisenalgorithmen verwendet. Pinol & Beasley (2006) haben eine Kombination aus Scatter Suche und bionomischem Algorithmus für ihr Modell gewählt.

Metaheuristiken		Σ
Genetischer Algorithmus	Beasley et al. (2004) Hu & Hansen (2009) Bencheikh et al. (2009)	3
Ameisenalgorithmen	Bencheikh et al. (2009) Zhan et al. (2010)	2
Scatter Suche	Pinol & Beasley (2006)	1
Bionomischer Algorithmus	Pinol & Beasley (2006)	1
Greedy Algorithmus	Boysen & Fliedner (2010)	1
Lokale Suche	Soomer & Franx (2008)	1
Frustrationssuche	Rasmussen et al. (2007)	1

Tabelle 4: Übersicht Metaheuristiken Flugzeuglandung

2.1.3.2 Sonstige Lösungsverfahren

Außer den bereits besprochenen Heuristiken, wurden auch exakte Lösungsverfahren verwendet. Boysen & Fliedner (2010) haben neben dem Greedy Algorithmus einen weiteren Ansatz formuliert. Sie haben ihr Modell mit einem Branch and Bound Algorithmus optimal lösen können.

Stolletz (2008) hat sein Modell mit einem ‚Stationary Backlog Carryover‘ gelöst. Mukherjee & Hansen (2007) haben den ‚Ration by Schedule‘ (RBS) Algorithmus für die Auswertung ihres Programms verwendet. Balakrishnan & Chandran (2006) haben ihr Netzwerk im ersten Schritt mit einem First-Come-First Serve (FCFS) Algorithmus gelöst und dann mit der ‚Constraint Position Shifting‘ Methode ihre Lösung optimiert.

2.1.4 Beispiel: New York La Guardia Airport (Janic 2009)

Der La Guardia Flughafen in New York, NY, USA besitzt zwei Start- und Landebahnen. Etwa 24 Millionen Passagiere und 361.616 Start- und Landungen wurden im Jahr 2010 registriert.¹

Janic (2009) hat den Sonderfall von heftigem Schneefall am La Guardia Flughafen betrachtet. Für einen optimierten Ablauf des Landeprozesses hat Janic (2009) zwei in Wechselbeziehung stehende Modelle aufgestellt. Beide Modelle sind deterministisch.

Das erste Modell bezieht sich auf den Schneefall im gesamten Bereich des Rollfeldes. Die Intensität des Schneefalls, die Schneeschmelzrate und die kritische Schneedicke, die eine Räumung erfordert, sind Inputvariablen des ersten Modells nach Janic (2009). Sie beeinflussen die Servicerate des Flughafens.

Das zweite Modell beschreibt die Handhabung der Flugzeuge und Flüge nachdem die Kapazität des Flughafens durch den Schneefall beeinträchtigt wurde. Hier sind die Nachfrage nach ankommenden und startenden Flugzeugen mit den damit verbundenen Änderungen in der Kapazität die Ausgangsvariablen für das Modell.

¹ <http://www.panynj.gov/airports/lga-facts-info.html>

Beide Modelle können für Landungen und Starts gleichermaßen angewendet werden. Es werden Kosten für Flugverspätungen, -umleitungen und –streichungen berücksichtigt. Es wurden drei verschiedene Szenarien betrachtet: Schneefall am Morgen, am Mittag und am Abend. Das Ziel der Modelle ist es, die Kosten, die durch einen unerwarteten Wetterumschwung entstehen, bestmöglich zu schätzen.

2.2 Gate Zuweisung

2.2.1 Definition

Nach der Landung des Flugzeuges wird es einem ‘Gate’ zugewiesen. Gates sind Parkpositionen für Flugzeuge am Terminal (Dorndorf et al. 2010). Sie erfüllen zwei Hauptaufgaben. Zunächst ermöglichen sie das Ein- und Aussteigen der Passagiere. Außerdem sind sie eine Parkmöglichkeit für ein Flugzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt und -raum. Unsicherheit prägt das Gate-Zuweisungsproblem. Ereignisse, wie Flugausfall, Flugsteigschließung, Flugfrühzeitigkeit und -verspätung, Notfallflüge, schlechte Wetterbedingungen oder menschliches Versagen beeinflussen die Auslastung der Flugsteige und werden dementsprechend in den mathematischen Modellen in Nebenbedingungen berücksichtigt.

Die wichtigste Inputvariable der Flugsteigzuweisung ist der Flugplan. Er beinhaltet die geplanten Ankunfts- und Abflugzeiten und weitere Informationen, wie z.B. die Anzahl der Passagiere, Flugzeugtyp, Herkunft und Zielregion und Frachtvolumen (Jaehn 2010). Mangoubi & Mathaisel (1985) integrieren in ihr Modell Passagiere, die sich im Transit befinden. Der Flugplan bestimmt somit den Zeitraum, in dem ein Flugzeug abgefertigt werden kann. Dabei werden Flüge, Flugzeuge und Flugsteige zu Zeitfenstern zugewiesen.

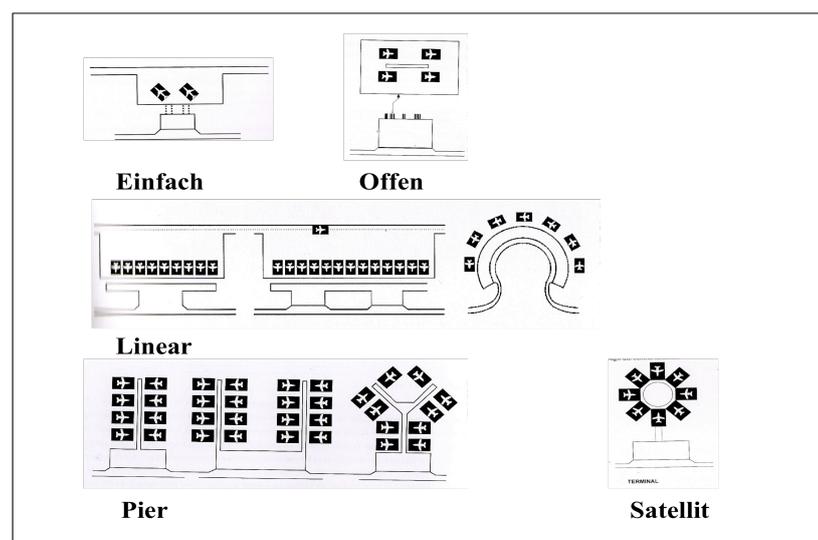


Abb. 5: Vorfeldkonzepte (Quelle: Kazda & Caves, 2008, S. 119ff)

Kazda und Caves (2008) definieren sechs verschiedene Vorfeldkonzepte. Das einfache Konzept ist typisch für kleine Flughäfen. Das lineare Konzept bietet kurze Wege vom Terminalgebäude zum Flugzeug. In London Heathrow wurde das Pierkonzept umgesetzt. Hier kann die Kapazität erheblich erhöht werden. Die Satelliten können über Tunnel oder Korridore mit dem Terminalgebäude verbunden werden. Das Hybridkonzept ist eine Verbindung aus mehreren Konzepten.

An Flughäfen gibt es zwei Arten von Standtypen. Vor allem für die großen Maschinen stehen ‚nose-in‘ Parkplätze zur Verfügung. Hier parkt das Flugzeug mit der Nase in Richtung Terminal. Nur ein speziell für diesen Vorgang vorgesehenes Fahrzeug kann das Flugzeug auf das Rollfeld zurückschieben. Dieser Vorgang des Zurückschiebens wird in der Fachliteratur ‚Pushback‘ bezeichnet. In Kapitel 2.5. werde ich genauer auf dieses Optimierungsproblem eingehen. Neben den ‚nose-in‘ Standplätzen werden auch Parkplätze außerhalb der Gates benutzt, an denen das Flugzeug ohne fremde Hilfe das Rollfeld in Richtung Startbahn betreten kann. In diesem speziellen Fall werden Busse eingesetzt, um die Flugpassagiere an ihr Flugzeug bzw. von ihrem Flugzeug in Richtung Terminal zu transportieren. Diepen et al. (2009) haben diese Problemstellung betrachtet.

2.2.2 Mathematische Programmierung

2.2.2.1 Single Kriterium

Zum Thema Gatezuweisung wurde in den letzten Jahren viel geforscht. Grundsätzlich kann zwischen Modellen mit einem Kriterium und mit multiplen Kriterien unterschieden werden. In den von mir untersuchten Artikeln betrachten etwa ein Drittel der Autoren ein mathematisches Modell mit einem Kriterium.

In den vier betrachteten Artikeln werden unterschiedliche Zielfunktionen festgelegt. In dem von Lim et al. (2005) entwickelten Modell wird die Laufristanz der Flugpassagiere minimiert. Diepen et al. (2009) maximieren die Robustheit und Jaehn (2010) maximiert den gesamten zugewiesenen Präferenzscore. Zheng

et al. (2010) verwenden einen anderen Ansatz. Sie minimieren die Gesamtvarianz der Schlupfzeit.

Die Modelle, die nur ein Ziel verfolgen, können zudem in lineare und dynamische Programme unterteilt werden. Die Verteilung ist ausgeglichen (siehe Abb. 6).

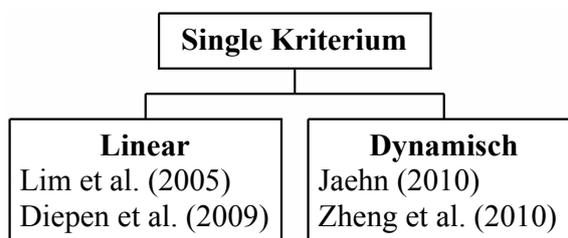


Abb. 6: Lineare und dynamische Modelle

2.2.2.2 Multiple Kriterien

Die Mehrheit der Autoren hat ein Modell mit mehreren Zielfunktionen erstellt.

	Ding et al. (2005)	Dorndorf et al. (2007)	Yan & Tang (2007)	Wei & Liu (2007)	Dorndorf et al. (2008)	Drexl & Nikulin (2008)	Dorndorf et al. (2010)	Nikulin & Drexl (2010)	Σ
Min. Lauflängstanz der Passagiere	x			x		x			3
Min. Anzahl der nicht einem Gate zugewiesenen Flüge	x				x	x	x		4
Min. Anzahl der Abschleppoperationen ('towing')		x			x		x	x	4
Max. Präferenzscore aller Zuweisungen		x			x	x	x	x	5
Min. Gesamtvarianz der Schlupfzeiten				x			x		2
Max. Maß der Robustheit					x		x		2
Min. erwarteter Strafwert			x						1
Min. Gesamtwartzeit der Passagiere			x						1
Min. Abweichung von einem gegebenen Gate Referenzplan		x						x	2
Σ	2	3	2	2	4	3	5	3	

Tabelle 5: Modelle mit multiplen Kriterien

Am häufigsten wurde die Maximierung des Präferenzscores aller Zuweisungen untersucht. Danach folgen die Minimierung der nicht einem Flugsteig

zugewiesenen Flüge und die Minimierung der Anzahl der Abschleppvorgänge. Dorndorf et al. (2008) und Dorndorf et al. (2010) haben alle diese drei Zielfunktionen in einem Modell vereint. Andere Autoren haben einen anderen Ansatz verwendet. Yan & Tang (2007) zum Beispiel haben sich in ihrem Modell die Minimierung der Gesamtwarezeit und die Minimierung des zu erwarteten Strafwertes als Ziel gesetzt.

In Abb. 7 sind die Artikel nach Linearität und Dynamik klassifiziert. Die Modelle mit mehreren Zielfunktionen wurden zu fast gleichen Teilen linear bzw. dynamisch programmiert. Yan & Tang (2007) und Dorndorf et al. (2008, 2010) lassen sich in diese Unterscheidung nicht eingliedern. Yan & Tang (2007) haben das Flugsteigzuweisungsproblem als ein Netzwerkflussproblem behandelt. Dorndorf et al. (2008, 2010) haben ein ‚Clique Partitioning Problem‘ formuliert.

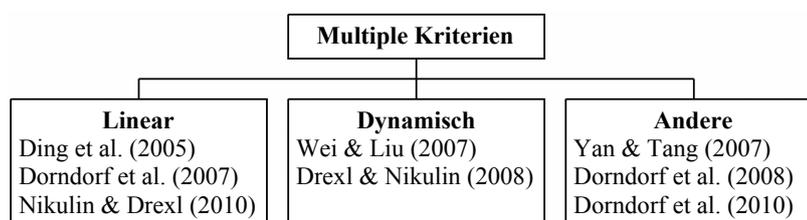


Abb. 7: Klassifizierung der mathematischen Modelle

2.2.3 Lösungsansätze

2.2.3.1 Heuristiken

Metaheuristiken		Σ
Tabu Suche	Ding et al. (2005) Lim et al. (2005) Wei & Liu (2007) Zheng et al. (2010)	4
Pareto Simulated Annealing	Ding et al. (2005) Drexl & Nikulin (2008) Nikulin & Drexl (2010)	3
Genetischer Algorithmus	Wei & Liu (2007)	1
Greedy Algorithmus	Ding et al. (2005)	1

Tabelle 6: Metaheuristiken

Heuristiken sind Lösungsmethoden, die eine Annäherung an die exakte Lösung geben. Das Flugsteigzuweisungsproblem wird hauptsächlich mit Heuristiken gelöst, unabhängig davon, ob eine oder mehrere Zielfunktionen betrachtet werden.

Die heuristischen Lösungsansätze können noch weiter klassifiziert werden. Man unterscheidet zwischen Metaheuristiken und anderen Heuristiken. Auffällig ist, dass nicht nur eine Lösungsmethode vorgeschlagen wird. Ding et al. (2005) schlagen drei metaheuristische Methoden zur Modelllösung vor. Neben der Tabu Suche zählt Pareto Simulated Annealing zu den am häufigsten verwendeten Lösungsmethoden.

Neben den oben genannten Metaheuristiken werden auch Heuristiken verwendet. Dorndorf et al. (2010) lösen ihr Modell mit einem heuristischen Arbitrary Algorithmus. In Dorndorf et al. (2008) wird ein Ejection Chain Algorithmus verwendet.

2.2.3.2 Exakte Methoden

Exakte Methoden werden vor allem verwendet, wenn es sich um ein Modell mit nur einer Zielfunktion handelt (Diepen et al. 2009, Jaehn 2010). In Diepen et al. (2009) wird ein Column Generation Algorithmus verwendet. Jaehn (2010) löst sein dynamisches Programm mit dem Bellman Algorithmus. Dennoch ist anzumerken, dass Dorndorf et al. (2007) ein Modell mit mehreren Zielfunktionen entwickelt haben, das mit einem exakten ‚truncated‘ Branch and Bound Algorithmus lösbar ist.

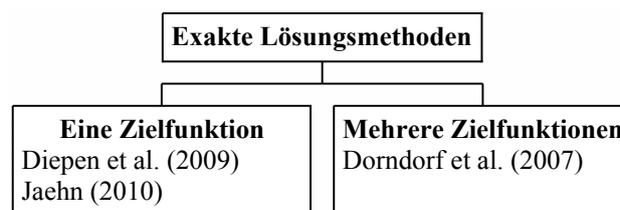


Abb. 8: Exakte Lösungsmethoden bzgl. Flugsteigproblem

2.2.4 Beispiel: Amsterdam Airport Schiphol (Diepen et al. 2009)

Am Amsterdam Schiphol Airport haben laut ICAO im Jahr 2009 ca. 43.570.000 Passagiere eingeecheckt und ca. 47.430.000 Passagiere sind gelandet. Damit gehört dieser Flughafen zu den 15 größten der Welt. Im gleichen Jahr wurden ca. 402.000 Start- und Landebewegungen registriert. Schiphol Airport hat fünf Start-

und Landebahnen.² Für die gelandeten Flugzeuge gibt es zwei Parkmöglichkeiten: Flugsteig oder ‚Remote Stand‘ (dt. abgelegener Standplatz) (Diepen et al. 2009). An einem abgelegenen Standplatz gibt es keine Fluggastbrücke. Busse übernehmen hier den Transport der Flugpassagiere. In Diepen et al. wird die Gesamtzeit eines Flugzeuges am Boden von Ankunft bis zum nächsten Abflug als ‚Stay‘ bezeichnet. Das Ziel der Flugsteigzuweisung ist es, diese individuell entstehenden Aufenthaltszeiten freien Gates zuzuordnen. Dabei beträgt die minimale Leerlaufzeit 20 Minuten.

Diepen et al. integriert das Buszuweisungsproblem in das Flugsteigzuweisungsproblem. Je nach Flugzeuggröße und Auslastung muss eine bestimmte Anzahl an Bussen bereitstehen, um die Passagiere zum Terminal transportieren zu können. Es stehen etwa 60 Busfahrer zur Verfügung, die nach 4,5h eine Pause einlegen müssen. Das Ziel des aufgestellten linearen Integer-Programms ist die Maximierung der Robustheit, d.h. die Fähigkeit, geringe Abweichungen kompensieren zu können ohne den Flugplan aktualisieren zu müssen. Das Modell basiert auf Flugsteigplänen, die alle Stays eines Gates beinhalten. Gates mit gleichen Eigenschaften werden einzelnen Gruppen („Gate type“) zugewiesen. Für die einzelnen Fahrten der Busse wird ein Busfahrplan erstellt.

Zunächst werden die Zugehörigkeitsbedingungen relaxiert. Das sich ergebende lineare Programm wird mit Hilfe von Column Generation optimal gelöst. Nach jedem Iterationsschritt wird untersucht, ob es noch bessere Werte für die Zielfunktion gibt. Dieses Problem wird ‚Pricing Problem‘ genannt und muss für beide Teilprobleme betrachtet werden. Dieses lineare Programm wurde mit Column Deletion und stabilisierte Column Generation gelöst. Ist das Ergebnis ganzzahlig, so ist das Problem gelöst. Ist das nicht der Fall, müssen weitere Schritte erfolgen. Für eine schnellere Lösungsfindung wurden von Diepen et al. weitere Bedingungen hinzugefügt. Die Evaluierung des Modells erfolgte mit Hilfe eines Prototyps in C++. Das kombinierte Problem konnte, angewendet auf reale Daten des Amsterdamer Flughafens Schiphol, in der Zeit gelöst werden, in der sonst nur das Gatezuweisungsproblem gelöst werden konnte.

²<http://www.schiphol.com/Travellers/ShopRelax/BeforePassportControl1/Relax/PlaneSpottingAtSchipholWhere.htm>

2.3 Flugzeugservices und Catering

2.3.1 Definition

Nach der Landung und der Gatezuweisung finden während des Parkvorgangs eines Flugzeuges am Flughafen verschiedene Vorgänge statt. Wu (2008) zählt folgende Aktivitäten auf:

„Aircraft turnaround operations refer to the activities conducted to prepare an inbound aircraft for a following outbound flight that is scheduled for the same aircraft. Accordingly, activities of aircraft turnaround operation include both inbound and outbound exchange of passengers, crew, catering services, cargo and baggage handling. Technical activities in turning around an aircraft include fuelling, routine engineering checks and cabin cleaning.“ (Wu 2008, S. 2)

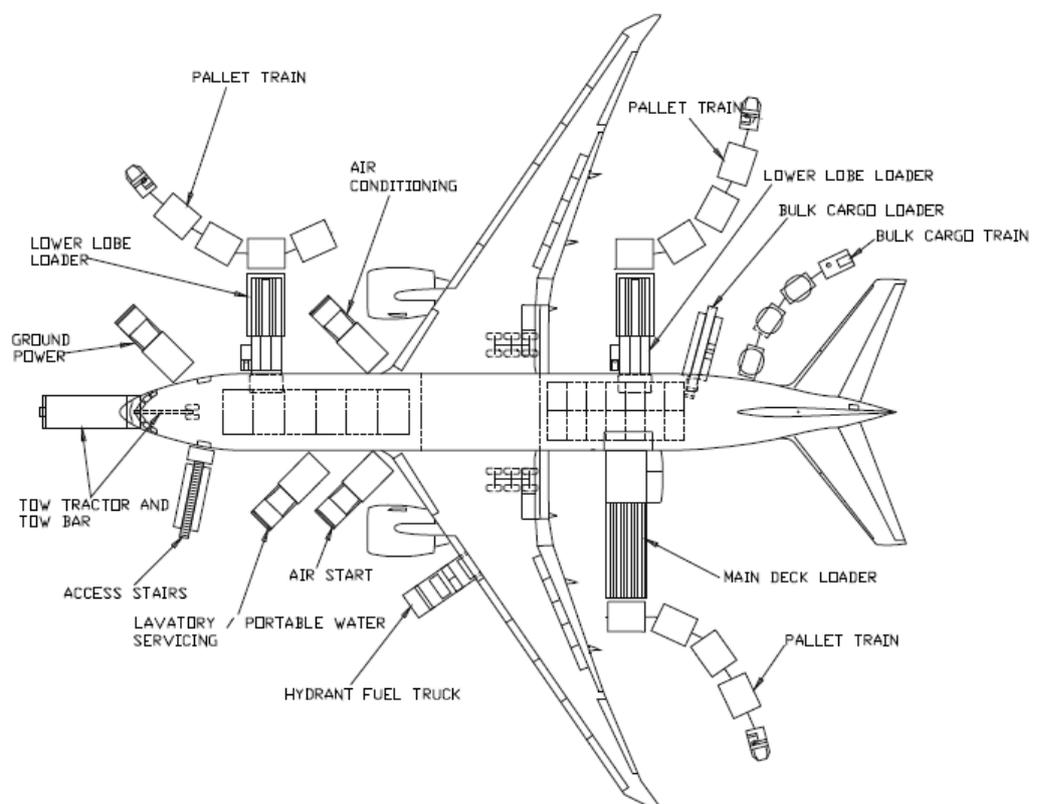


Abb. 9: Flugzeugservices an einer Boeing 777F (Quelle: Boeing, 2009, S. 5)

Laut Wu gehören der Passagier- und Crewwechsel, das Catering, Fracht- und Gepäckbeladung bzw. Gepäckentladung, die Betankung, die Wartung und das

Reinigen der Kabine zu den Operationen während des Parkens des Flugzeuges am Flugsteig. Norin et al. (2009) ergänzen die Wasserversorgung und die Säuberung der sanitären Anlagen. Aus beiden Artikeln wird die Komplexität der Vorgänge deutlich.

Abhängig vom Flugzeugmodell können die Operationen parallel durchgeführt werden (Norin et al. 2009). Das Betanken kann je nach Flughafen auch noch während des Boardings der Passagiere erfolgen. Es gibt zwei verschiedene Vorgehensweisen beim Tanken. Einmal, kann das Kerosin direkt am Flugsteig über Rohrleitungen im Boden in das Flugzeug getankt werden. Bei kleineren Flugzeugen und bei Parkpositionen außerhalb der Gates am Terminal kommen Tankwagen zum Einsatz, die mit Kerosin beladen sind. Das Catering gelangt über ‚High-loaders‘ in das Flugzeug. Je nach Fluglinie und Art des Fluges (Kurz- oder Langstrecke) variiert das Verpflegungsangebot.

2.3.2 Mathematische Modelle

2.3.2.1 Betrachtung komplette Abfertigungszeit am Flugsteig

Im Folgenden möchte ich zwischen der gesamten Umkehrzeit und dem Catering als Teilprozess unterscheiden.

Im Englischen als ‚Turnaround time‘ bezeichnet, entspricht die Abfertigungszeit genau der Zeit vom Andocken an den Flugsteig bis zum Zurückschieben auf das Rollfeld (Wu 2008). Einer der ersten Artikel zu diesem Thema wurde von Braaksma & Shortreed (1971) veröffentlicht. Sie haben ein Modell erstellt, welches auf der Methode des kritischen Pfades basiert. Die Ergebnisse resultieren auf realen Daten des Toronto International Airport. Das Ziel war es, die gesamte Abfertigungszeit am Gate zu minimieren abhängig vom Flugzeugtyp.

Dieses komplexe Problem wurde von Wu & Caves (2004) wiederum als stochastisches mathematisches Modell formuliert. Ziel war hier die Minimierung der Systemkosten. Die geplante Lande- und Startzeit haben einen großen Einfluss auf die benötigte Zeit zur Abfertigung am Flugsteig. Die geplante Abfertigungszeit wird definiert als die Summe aus der geplanten Pufferzeit und der durchschnittlichen Servicezeit am Boden. Dieser Wert addiert mit der

geplanten Ankunftszeit ergibt die geplante Startzeit eines Flugzeuges. Durch die Einführung der Pufferzeit kann das Modell Landeverzögerungen und –verspätungen absorbieren. Das Modell wurde mit der mathematischen Software MATLAB gelöst. In der Fluglinienindustrie spielt der Ausgleich zwischen Pünktlichkeit und Abfertigungszeit eine große Rolle.

Neben dem Ansatz von Wu & Caves (2004), haben auch Xue & Fan (2007) den gesamten Prozess der Abfertigung am Flugsteig betrachtet. Sie haben ein Multiressourcen Job-Shop Problem formuliert und haben es mit einem ‚Dynamic Scheduling Agents with Federation Organization‘ Algorithmus gelöst. Dieser neuartige Algorithmus verbindet die Strategien der lokalen Heuristiken und der globalen Koordination. Ihr Ziel war es, die Ressourcenausnutzung zu maximieren.

In folgender Abbildung (Abb. 10) sind die einzelnen Zeiten der Abfertigungsvorgänge exemplarisch an einer Boeing 777-300ER dargestellt. Boeing klassifiziert zwischen ‚Passenger Services‘, Cargo/Baggage Handling‘ und ‚Airplane Servicing‘. Es wird die Zeit berücksichtigt, die für die Vorbereitung der Vorgänge notwendig ist (‚Position/Remove Equipment‘). In 42 Minuten wird das Flugzeug mit 171.170 Litern Kerosin vollgetankt. Nach etwa 52 Minuten sind alle Vorgänge abgeschlossen.

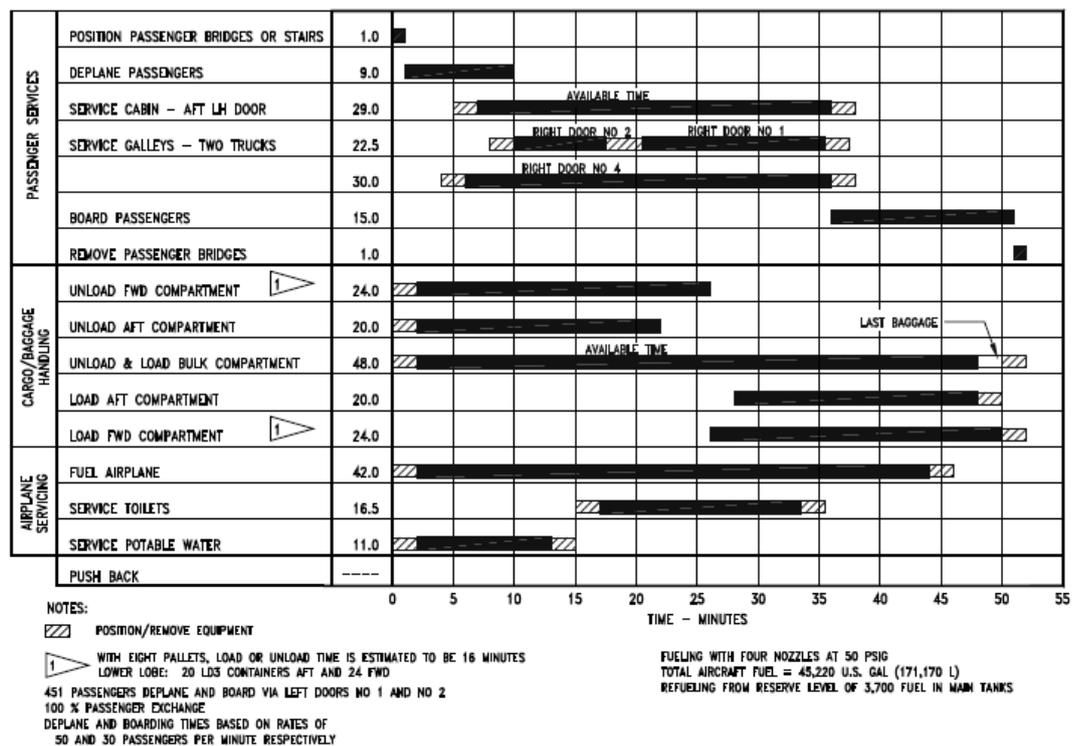


Abb. 10: Umkehrzeiten einer Boeing 777-300ER (Quelle: Boeing, 2009, S. 7)

2.3.2.2 Beispiel: Catering (Ho & Leung 2010)

Das Catering ist ein Teilprozess der Flugzeugabfertigung am Flugsteig. Ho & Leung (2010) haben sich ausschließlich mit diesem Problem in ihrem Artikel beschäftigt. Sie haben ein Arbeitskraftplanungsmodell mit zwei Abwandlungen aufgestellt. Die Flüge sind als ‚Jobs‘ definiert. Des Weiteren werden Teams gebildet, die aus Fahrer und einem Lader bestehen. Die Beladung der Flugzeuge erfolgt direkt auf dem Rollfeld in der Parkposition. Die Zuteilung der Verpflegung muss in einem sehr engen Zeitfenster geschehen. Die Zielfunktion von Ho & Leung (2010) minimiert die Anzahl nicht abgefertigter Flugzeuge und erstellt gleichzeitig einen ausgewogenen Arbeitsplan.

Das Programm wurde mit zwei verschiedenen Metaheuristiken gelöst. Die Tabu Suche und Simulated Annealing wurden für eine annähernd optimale Lösung verwendet. In einer anschließenden Evaluierung kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Tabu Suche deutlich bessere Werte liefert als Simulated Annealing.

2.4 Optional: Wartung und Winterbetrieb

Die beiden kommenden Stationen eines Flugzeuges sind optional. Die Wartungsvorgänge werden je nach Notwendigkeit durchgeführt. Jeder Flugzeugtyp hat seinen individuellen Plan.

Nur in den Wintermonaten müssen spezielle Enteisungs- und Vereisungsschutzmittel auf die Flugzeuge aufgetragen werden, damit die Sicherheit gewährleistet ist. Außerdem müssen die Start- und Landebahnen von Schnee geräumt werden.

2.4.1 Wartung

2.4.1.1 Definition

Die Wartung der Flugzeuge ist ein komplexer Vorgang. Camci (2009) beschreibt verschiedene Formen der Wartung. Es gibt die präventive und korrigierende Wartung. Laut Camci gleicht die zustandsbedingte Wartung die beiden vorher genannten Formen aus. Die ‚Turntime‘ (Cobb 1995, S. 25) wird im Bezug auf die Flugzeugwartung folgendermaßen definiert: „time needed to receive a component unit, determine needs, complete a repair, and return the unit to the customer.“ Dieser Prozess ist abhängig von der Art des Bauteils. Im Flugzeugbau wird zwischen residenten und nichtresidenten Bauteilen differenziert. Die residenten Bauteile sind das Flugzeug mit seinen vitalen Systemen. Regulär werden hier die Komponenten über sogenannte ‚Letter Checks‘ gewartet. Der A Check zum Beispiel wird nach etwa 65 Flugstunden durchgeführt und beinhaltet eine visuelle Inspektion des Flugzeuges. Im Gegensatz dazu, gibt es die nichtresidenten Komponenten, die ein individuelles Flugstundenlimit haben (Sarac et al. 2006).

Die beiden größten Anbieter von Flugzeugen, Airbus und Boeing, bieten ihren Kunden spezielle Wartungsprogramme an. Die Software von Boeing nennt sich ‚Maintenance Performance Toolbox‘ (Boeing 2010) und ermöglicht eine Verbesserung des Wartungsprozesses verbunden mit einer Minimierung der Bearbeitungszeit über die gesamte Flugzeuglebensdauer hinweg. Airbus hat ein

globales Netzwerk von Reparatur- und Instandsetzungszentren („AIRTAC“)³, die 24 Stunden erreichbar sind. Ihr Ziel ist es, die an einem Flughafen verbrachte Zeit aufgrund von Reparaturarbeiten so gering wie möglich zu halten und die anderen Abläufe nicht zu gefährden. Feo & Bard (1989) verfolgen in ihrem Modell einen ähnlichen Ansatz. Sie integrieren die Wartungspläne in die Flugpläne, um entstehende Kosten minimieren zu können.

2.4.1.2 Mathematische Modelle

	Lan et al. (2006)	Saranga & Kumar (2006)	Sarac et al. (2006)	Quan et al. (2007)	Camci (2009)	Σ
Einfache Zielfunktion	x	x	x		x	4
Multiple Zielfunktionen				x		1
Max. Umsatz	x					1
Min. Lebenszykluskosten		x				1
Min. Systemrisiko					x	1
Min. Vollendungszeit				x		1
Min. freie Arbeitszeit				x		1
Min. Anzahl legaler unbenutzter Flugstunden			x			1
Lineares Modell	x	x		x		3
Stochastisch	x					1
Dynamisches Modell			x		x	2
Ganzzahliges Programm			x			1
Exakte Lösungsmethode	x		x			2
Column Generation	x					1
Branch- and Price Algorithmus			x			1
Heuristische Lösungsmethode		x		x	x	3
Genetischer Algorithmus		x			x	2
Evolutionärer Algorithmus				x		1

Tabelle 7: Klassifizierung Wartung

Die Optimierungsmodelle zum Thema Flugzeugwartung lassen sich übersichtlich in einer Tabelle darstellen (Tabelle 7). Die Mehrzahl der mathematischen Programme verfolgt nur eine Zielsetzung. Die Ziele sind dabei sehr

³ <http://www.airbus.com/innovation/proven-concepts/in-fleet-support/airtac/>

unterschiedlich. Nur ein Modell der fünf betrachteten beschreibt ein Maximierungsproblem. 60% aller Modelle sind linear.

Die formulierten Modelle wurden vermehrt heuristisch gelöst, vor allem mit genetischen Algorithmen. Zwei Fünftel der betrachteten Programme wurden mit einem exakten Lösungsverfahren bearbeitet (Lan et al. 2006 & Sarac et al. 2006).

2.4.2 Winterbetrieb

2.4.2.1 Definition

Der Winterbetrieb ist ein optionales Teilproblem des Flugzeugflusses am Flughafen. Durch die Bildung eines Eisfilms auf dem Flugzeug wird die Sicherheit gefährdet, weil der Auftrieb abreißt (Abb. 11). Jeder Flughafen, an dem die Möglichkeit des Schneefalls besteht, muss einen Schneeplan aufstellen (Kazda & Caves 2008). Alle notwendigen Abläufe zur Beseitigung des Schnees bzw. Eis sind in diesem Plan festgehalten. Die Räumung erfolgt mit Hilfe von mechanischen, chemischen oder thermischen Mitteln. Des Weiteren unterscheidet man zwischen Enteisungsmitteln und Schutzflüssigkeiten.

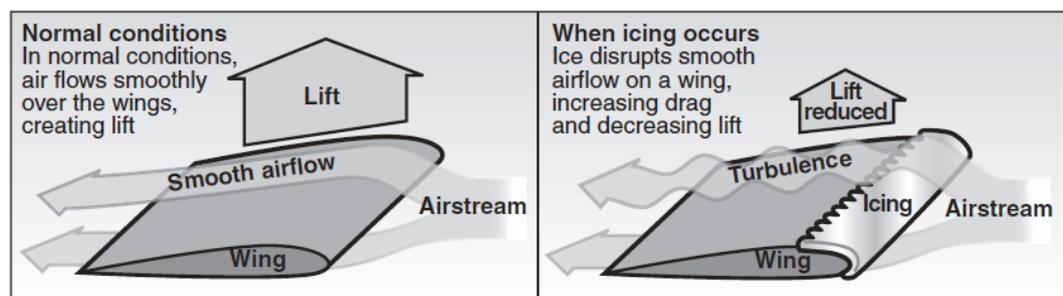


Abb. 11: Vereisungsvorgang (Quelle: Dillingham, 2010)

Die mechanische Ausrüstung ist vergleichsweise günstig und umweltfreundlich (Kazda & Caves 2008) und wird hauptsächlich zur Schneeräumung benutzt. An großen Flughäfen werden neben den Schneefräsen vor allem Pflüge, Streufahrzeuge, Tankfahrzeuge und Lader eingesetzt. Am Flughafen München Franz Josef Strauß muss ein Start- bzw. Landesystem 20 Minuten geschlossen werden, um eine komplette Räumung vorzunehmen.

Chemikalien werden zum Enteisen bzw. zur Verhinderung von Eisbildung verwendet. Sie dürfen die Fahrbahn bzw. die Flugzeuge nicht beschädigen. Chloride können aufgrund von Korrosion nicht als Enteisungsmittel eingesetzt werden, obwohl sie günstig und effektiv sind. Das Enteisungsmittel Glykol ist toxisch. Die am häufigsten benutzte Chemikalie ist Harnstoff („Urea“).

Neben den mechanischen und chemischen Prozessen, gibt es noch das weniger verbreitete thermische Enteisen. Aufgrund von steigenden Energiekosten ist dieses Verfahren von geringer Bedeutung.

2.4.2.2 Mathematische Modelle

Das Thema Enteisen wurde noch nicht sehr häufig in der Fachliteratur bearbeitet. Für meine Untersuchung habe ich vier unterschiedliche Modelle verwendet. Alle betrachteten Modelle untersuchen zwei Zielfunktionen. 75% der aufgestellten Programme minimieren die Verspätung verursacht durch die Enteisungsvorgänge (Ter Mors et al. 2007, Norin et al. 2007 & Norin et al. 2009). Mao et al. (2007) maximieren die Verwendung der Ressourcen und minimieren die Fahrtzeit der Enteisungsfahrzeuge.

Mao et al. (2007) und Norin et al. (2007 & 2009) verwenden heuristische Lösungsansätze. Mao et al. (2007) lösen ihr Multi-Agenten-Modell mit einem genetischen Algorithmus. Norin et al. (2007 & 2009) berechnen ihr Fahrzeitenoptimierungsproblem mit einem heuristischen „GRASP“ (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) Algorithmus.

2.4.2.3 Beispiel: Stockholm Arlanda Airport (Norin et al. 2009)

Im Jahr 2010 sind etwa 16,9 Millionen Passagiere von und nach Stockholm Arlanda Airport gereist. Es gibt drei Start- und Landebahnen. Insgesamt 84 Fluglinien operieren am größten Flughafen von Schweden.⁴

Das Modell von Norin et al. (2009) verfolgt das Ziel, ein Werkzeug zu entwickeln, welches den Zuweisungsprozess der Enteisungswagen unterstützt.

⁴ <http://www.arlanda.se/en/Information-about/About-the-airport/Facts/>

Das beinhaltet auch die Verteilung der Wagen auf die abzufertigenden Flugzeuge und das Nachfüllen der Wagen.

Lösung	Fahrtzeit [min]	Verspätung [min]
GWOAC	842	340.270
GRASP 1	1020	295
GRASP 2	1066	207

Tabelle 8: Vergleich Lösungen (Quelle: Norin et al., 2009)

Es werden drei verschiedene Lösungsmethoden angewendet (siehe Tabelle 8). Die GWOAC Methode („Greedy without availability check“) weist immer den am nächsten stehenden Wagen einem Flugzeug zu. Die Verfügbarkeit wird dabei nicht berücksichtigt. Die GRASP Methode sucht einen Kompromiss zwischen Fahrtzeit und Verspätung. GRASP 2 zeigt die beste Gesamtperformance.

2.5 Pushback

2.5.1 Definition

Nachdem alle Serviceprozesse am Flugsteig abgeschlossen sind, findet der Pushback-Vorgang statt. Dieser Prozess ist nur notwendig, wenn das Flugzeug an einem ‚nose-in‘ Parkplatz steht und daher nicht aus eigener Kraft das Rollfeld betreten kann. Flugzeugschlepper übernehmen diese Aufgabe (Kazda & Caves 2008). Je nach Flugzeuggröße muss ein anderer Schlepper eingesetzt werden. Abhängig von der Art des Schleppers wird das Flugzeug entweder am Vorderrad oder an den Reifen am Hauptfahrwerk mit ihm verbunden. Profilierte Reibungsrollen werden hydraulisch an die Flugzeugreifen befestigt. Während des Zurückschiebens können die Bremsen des Flugzeuges weiter benutzt werden.

2.5.2 Mathematische Modelle

Das Problem des Zurückschiebens wurde in der Fachliteratur häufig als Unterproblem des Rollfeldproblems betrachtet. In meiner Untersuchung habe ich fünf Modelle herausfiltern und klassifizieren können (siehe Tabelle 9).

Die Mehrheit der Programme verfolgt nur eine Zielfunktion. Marín (2006) minimiert die totale Rangierzeit der Flugzeuge. Keith et al. (2008) minimieren, genau wie Rathinam et al. (2008), die totale Rollzeit. Die Gesamtkosten werden von Atkin et al. (2011) minimiert. Neben der Minimierung der totalen Rollzeit minimieren Rathinam et al. (2008) zudem die totalen Verspätungskosten. Burgain et al. (2008) formulieren zwei Zielfunktionen für ihre gemeinschaftliche virtuelle Warteschlange: Minimierung der Wartezeit der Passagiere und Minimierung des Grades der Ungerechtigkeit zwischen Flugzeugen derselben Fluglinie. In den Jahren 2006 bis 2011 wurden nur Minimierungsprogramme aufgestellt.

Vier der betrachteten Modelle sind linear. Rathinam et al. (2008) und Keith et al. (2008) haben ein gemischt ganzzahliges Programm aufgestellt. Beide haben ihr Modell mit einer Simulation evaluiert. Marín (2006) hat sein Mehrgüterflussnetzwerk mit einem exakten Fix and Relax und einem exakten Branch and Bound Algorithmus lösen können. Atkin et al. (2011) haben zur

Lösung ihres Modells einen abgewandelten Branch and Bound Algorithmus benutzt, der nur in einem rollenden Zeitfenster agiert.

	Marin (2006)	Rathinam et al. (2008)	Burgain et al. (2008)*	Keith et al. (2008)	Atkin et al. (2011)	Σ
Eine Zielfunktion	x			x	x	3
Mehrere Zielfunktionen		x	x			2
Min. Gesamtkosten					x	1
Min. totale Verspätungskosten		x				1
Min. totale Rollzeit		x		x		2
Min. Rangierzeit für alle Flüge	x					1
Min. durchschnittliche Wartezeit der Passagiere			x			1
Min. Grad der Ungerechtigkeit zwischen Flugzeugen derselben Fluglinie			x			1
Linear	x	x		x	x	4
Mehrgüterflussnetzwerk	x					1
Gemischt ganzzahlig		x		x		2
Andere			x			1
Gemeinschaftliche virtuelle Warteschlange			x			1
Heuristiken	x				x	2
Branch and Bound in einen rollenden Zeitfenster					x	1
Fix and Relax	x					1
Exakte Methoden	x					1
Branch and Bound	x					1
Simulation		x		x		2

* mit FCFS gelöst

Tabelle 9: Klassifizierung Pushback

2.5.3 Beispiel: London Heathrow Airport (Atkin et al. 2011)

Im Jahr 2009 haben 66,037 Millionen Passagiere in London Heathrow eingeecheckt. Dies entspricht Platz zwei aller Flughäfen weltweit. Etwa 466.000 Flugzeuge sind gelandet bzw. gestartet (ICAO, 2009). Es gibt eine Start- und eine Landebahn.

Atkin et al. (2011) haben ein Programm entwickelt, welches das Problem der Zuordnung der Pushback-Zeiten löst. Das Ziel ist es, die Verspätung jenseits eines

vorher festgelegten Schwellenwerts zu dämpfen. Ein verfrühtes Zurückschieben wird gegenüber einem zu spätem Zurückschieben favorisiert.

2.6 Flugzeugstart

2.6.1 Definition

Der Flugzeugstart bildet das letzte Teilproblem des Flugzeugflusses an einem Flughafen. Nachdem das Zurückschieben erfolgt ist, findet eine Reihe von Prozessen statt (siehe Abb. 12). Bis zum eigentlichen Start muss ein Flugzeug von seinem Parkplatz zur Startbahn gelangen. Dort angekommen, muss es sich in die Warteschlange einfügen, bis die Starterlaubnis erteilt wird.

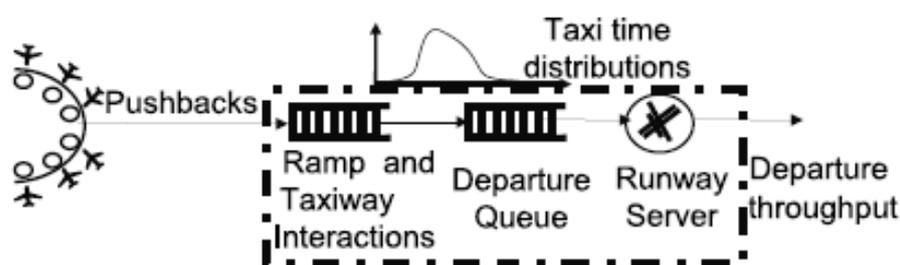


Abb. 12: Startprozess (Quelle: Simaiakis & Balakrishnan, 2009, S. 2)

Die Länge der Startbahn bestimmt die Flugzeugtypen, die starten können, deren maximales Startgewicht und daraus schlussfolgernd die Distanz, die sie zurücklegen können (Kazda & Caves 2008). Bei Regen müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden. Die benötigte Startbahnlänge vergrößert sich im Vergleich zu trockenen Wetterbedingungen.

2.6.2 Zielfunktionen

Die Verteilung von Modellen mit einer oder mehreren Zielfunktionen ist beinahe ausgeglichen (siehe Tabelle 10). Die am häufigsten verwendete Zielfunktion ist die Maximierung des Rollfelddurchsatzes (engl. ‚Runway throughput‘). Ein weiteres Maximierungsproblem wurde von Capri & Ignaccolo (2004) aufgestellt. Sie maximieren die Systemkapazität in ihrem statisch dynamischen Programm für eine Startbahn. Alle anderen Zielfunktionen sind als Minimierungsproblem formuliert. Sowohl Balakrishnan & Chandran (2007) als auch Brinton et al. (2010) minimieren die durchschnittliche Verspätung. Atkin et al. (2008) betrachten die Verspätung im Wartebereich und die Minimierung der Strafen verursacht durch die Verspätungen.

	Capri & Ignacolo (2004)	Bäuerle et al. (2007)	Rasmussen et al. (2007)	Balakrishnan & Chandran (2007)	Stolletz (2008)	Atkin et al. (2008)	Simaiakis & Balakrishnan (2009)	Gupta et al. (2009)	Brinton et al. (2010)	Σ
Eine Zielfunktion		x	x		x		x			4
Mehrere Zielfunktionen	x			x		x		x	x	5
Max. Systemkapazität	x									1
Max. Rollfelddurchsatz				x				x	x	3
Min. durchschnittliche Wartezeit		x								1
Min. Verspätung der Flugzeuge	x									1
Min. Kosten			x							1
Min. durchschnittliche Verspätung				x					x	2
Min. Strafen						x				1
Min. Maximum individueller Verspätung								x		1
Min. Rollzeiten							x			1
Min. Verspätung im Wartebereich						x				1
Min. gesamte skalierte Kosten					x					1
Σ	2	1	1	2	1	2	1	2	2	

Tabelle 10: Zielfunktionen des Startproblems

2.6.3 Dynamische Programmierung

Auffällig viele Modelle zum Thema Flugzeugstart wurden in den letzten Jahren dynamisch programmiert (Abb. 13).

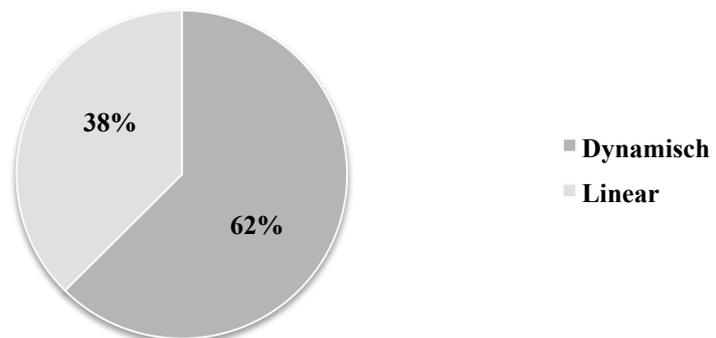


Abb. 13: Einteilung der mathematischen Programme

Folgende Autoren haben ein dynamisches Programm verfasst: Capri & Ignaccolo (2004), Balakrishnan & Chandran (2007), Stolletz (2008), Atkin et al. (2008) und Brinton et al. (2010). Der Anteil der linearen Programme beträgt 38%. Rasmussen et al. (2007) und Gupta et al. (2009) haben ein gemischt ganzzahliges Programm aufgestellt. Simaiakis & Balakrishnan (2009) formulierten ein Warteschlangennetzwerk.

2.6.4 Lösungsansätze

2.6.4.1 Heuristiken

Bäuerle et al. (2007) haben eine Semi-Markov Kette mit diversen Heuristiken gelöst (siehe Kapitel 2.1.3.2). Andere Autoren haben mit Metaheuristiken ihre Modelle gelöst. Capri & Ignaccolo (2004) verwendeten einen genetischen Algorithmus, um ihr dynamisches Programm für eine Startbahn lösen zu können. Rasmussen et al. (2007) und Atkin et al. (2008) haben jeweils einen Suchalgorithmus vorgeschlagen. Rasmussen et al. (2007) haben eine Frustrationssuche und Atkin et al. (2008) haben eine Tabu Suche für ihr Programm favorisiert.

2.6.4.2 Andere Lösungsansätze

Etwa ein Drittel der untersuchten Modelle wurden durch eine Simulation evaluiert (Bäuerle et al. 2007, Atkin et al. 2008 und Janic 2009). Drei Artikel beschreiben einen FCFS Algorithmus (Stolletz 2008, Simaiakis & Balakrishnan 2009 und Gupta et al. 2009). Brinton et al. (2010) haben ihr deterministisch dynamisches Programm für eine Startbahn mit einem ‚Generalized Ration by Schedule Algorithm‘ gelöst. Dieser Algorithmus stellt der begrenzten Kapazität des Flughafens und des Luftraums Ressourcen bereit, wenn die Nachfrage die Kapazität übersteigt.

2.6.5 Beispiel: Logan International Airport Boston (Simaiakis & Balakrishnan 2009)

Der Boston Logan International Airport verzeichnete im Jahr 2010 rund 353.000 Flugzeugbewegungen. Etwa 27,4 Millionen Passagiere wurden am Boston Logan Flughafen 2010 abgefertigt.⁵

Beide Autoren haben ein lineares Warteschlangennetzwerk aufgestellt, welches in erster Linie vor allem den Kerosinverbrauch und die Verschmutzung verringert. Die Zeit auf dem Rollfeld definieren beide als Summe aus der nominalen Rollzeit, der Zeit auf dem Rollfeld und der Zeit in der Warteschleife. Die nominale Rollzeit entspricht der Zeit, die ein Flugzeug theoretisch benötigen würde, wenn es allein auf der Rollbahn wäre.

Das Netzwerkmodell wurde mit einem einfachen First-Come-First-Serve Algorithmus gelöst. Zur abschließenden Evaluierung wurde eine Simulation angefügt.

⁵ <http://www.massport.com/logan-airport/about-logan/Pages/LoganStatistics.aspx>

3 Fazit und Ausblick

In meiner Untersuchung habe ich veröffentlichte Artikel zum Thema Flugzeugmanagement seit 2004 ausgewertet.

Journal	Landung	Gatezuweisung	Wartung	Enteisen	Flugzeug Services	Pushback	Start	Σ
Annals of Operational Research		1	1			1		3
Artificial Intelligence Review		1						1
Computers & Industrial Engineering	1							1
Computers & Operations Research		1						1
European Journal of Operational Research	3	1	2		1		1	7
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	2							2
IEEE Transactions on Reliability			1					1
IIE Transactions		1						1
International Journal of Computer Science and Network Security	1							1
Journal of Air Transport Management			1				1	2
Journal of Scheduling		1				1	1	3
Journal of Transportation Engineering	1							1
Journal of Transportation Planning & Technology					2			2
Lecture Notes in Artificial Intelligence					1			1
Lecture Notes in Computer Science	1	1					1	2
Management Science			1					1
Operational Research	1							1
Operational Research Society	1							1
OR Spectrum	1						1	1
Statistica Neerlandica		1						1
Transportation Engineering Journal					1			1
Transportation Science	1	2	1					4
Zeitschrift für Betriebswirtschaft		1						1
Σ	13	11	7	0	5	2	5	40
Proceedings								
26th International Congress of Aeronautical Sciences						1		1
3rd International ICCSIT Conference		1						1
4th International ISCRAM Conference				1				1
6th DNO Workshop				1				1
9th Aviation Technology and Operations Conference							1	1
Adaptive and Learning Agents and Multi-Agent Systems				1				1
AIAA Guidance, Navigation and Control Conference	1					1	1	3
IEEE International Conference on Automation and Logistics		1						1
Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference							1	1
USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar				1	1		1	3
Σ	1	2	0	4	1	2	4	14
Gesamtsumme	14	13	7	4	6	4	9	54

Tabelle 11: Auswertung Journals⁶

In Tabelle 11 sind alle verwendeten Artikel nach der Art der Publikation geordnet. Insgesamt habe ich 54 Artikel für meine Ausarbeitung ausgewertet. Die meisten Artikel habe ich dem European Journal of Operations Research entnommen. Danach folgen Transportation Science, Annals of Operational Research und Journal of Scheduling. Die meisten Artikel habe ich zum Thema Flugzeuglandung und Flugsteigzuweisung finden können. Nur wenige Artikel sind zu den Themen

⁶ Drei Artikel, die Start- und Landeproblem gleichzeitig behandeln, wurden in der Summe nur einmal gewertet.

Enteisen und Pushback in den letzten Jahren veröffentlicht worden. Pushback wird oft nur in Zusammenhang mit dem Startvorgang betrachtet. Bisher wurde noch kein Artikel veröffentlicht, welcher den gesamten Flugzeugfluss zu optimieren versucht.

Forschungsbedarf besteht vor allem im Bereich des Enteisens, der Wartung und des Pushbacks. Ein weiterer interessanter Punkt wäre die genauere Betrachtung der Flugzeugservices. Hier konnte ich nur einen Artikel zum Thema Catering auswerten.

Literaturverzeichnis

Ashford et al. (2011). *Airport Engineering: Planning, Design, and Development of 21st-century Airports*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Atkin et al. (2008). On-line Decision Support for Take-off Runway Scheduling with uncertain Taxi Times at London Heathrow Airport, *Journal of Scheduling*, 11, 323-346.

Atkin et al. (2011). A Comparison of two Methods for reducing Take-off Delay at London Heathrow Airport, *Journal of Scheduling*, DOI 10.1007/s10951-011-0228-y.

Balakrishnan & Chandran (2006). Scheduling Aircraft Landings under Constrained Position Shifting, *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Keystone, CO.

Balakrishnan & Chandran (2007). Efficient and equitable departure scheduling in real-time: new approaches to old problems, *USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Barcelona, Spain.

Bäuerle et al. (2006). On the waiting time of arriving aircrafts and the capacity of airports with one or two runways, *European Journal of Operational Research*, 177, 1180-1196.

Beasley et al. (2004). Displacement problem and dynamically scheduling aircraft landings, *Operational Research Society*, 55, 54-64.

Bencheikh et al. (2009). Hybrid method for aircraft landing scheduling based on a job shop formulation, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 9(8), 78-88.

Blumstein (1959). The landing capacity of a runway, *Operational Research*, 7(6), 752-763.

Boeing (2009). Terminal Servicing, D6-58329-2, 83-111.

Boeing (2010). Maintenance Performance Toolbox, 180368, 2.

- Boysen & Fliedner (2010). Scheduling aircraft landings to balance workload of ground staff, *Computers & Industrial Engineering*, 60(2), 206-217.
- Braaksma & Shortreed (1971). Improving Airport Gate Usage with Critical Path, *Transportation Engineering Journal*, 97(2), 187-203.
- Brinton et al. (2010). Ration schedule for airport arrival and departure planning and scheduling, *Proceedings of Integrated Communications Navigation and Surveillance*.
- Burgain et al. (2008). Collaborative virtual Queue: Fair Management of Congested Departure Operations and Benefit Analysis, *arXiv:0807.0661v1 [cs.OH] 3 Jul 2008*.
- Camci (2009). System Maintenance Scheduling with Prognostics Information using Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Reliability*, 58(3), 539-552.
- Capri & Ignaccolo (2004). Genetic Algorithms for solving the Aircraft-sequencing Problem: the Introduction of Departures into the Dynamic Model, *Journal of Air Transport Management*, 10, 345-351.
- Cobb (1995). Modeling aircraft repair turntime – simulation supports maintenance marketing efforts, *Journal of Air Transport Management*, 2(1), 25-32.
- Dillingham (2010). Preliminary Information on Aircraft Icing and Winter Operations, *United States Government Accountability Office*, GAO-10-441T.
- Diepen et al. (2009). Integrated Gate and Bus Assignment at Amsterdam Airport Schiphol, In Ahuja et al., Herausgeber, Robust and Online Large-Scale Optimization, *Lecture Notes in Computer Science*, 5868, 338-353.
- Ding et al. (2005). The over-constrained Airport Gate Assignment Problem, *Computers & Operations Research*, 35, 1867-1880.
- Dorndorf et al. (2007). Disruption Management in Flight Gate Scheduling, *Statistica Neerlandica*, 61(1), 92-114.
- Dorndorf et al. (2008). Modelling robust Flight-gate Scheduling as a Clique Partitioning Problem, *Transportation Science*, 42(3), 292-301.
- Dorndorf et al. (2010). Flight Gate Scheduling with Respect to a Reference Schedule, *Annals of Operational Research*, DOI 10.1007/s10479-010-0809-8.

- Drexl & Nikulin (2008). Multicriteria Airport Gate Assignment and Pareto Simulated Annealing, *IIE Transactions*, 40, 385-397.
- EUROCONTROL (2010). Eurocontrol Long Term Forecast IFR Flight Movements 2010-2030, 1st Edition, Chicago, IL, USA.
- Feo & Bard (1989). Flight Scheduling and Maintenance Base Planning, *Management Science*, 35(12), 1415-1432.
- Gupta et al. (2009). A Mixed Linear Program for Airport Departure Scheduling, *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)*.
- Ho & Leung (2010). Solving a Manpower Scheduling Problem for Airline Catering Heuristics, *European Journal of Operational Research*, 202, 903-921.
- Hu & Di Paolo (2010). Binary-representation-based Genetic Algorithm for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(2), 301-310.
- ICAO (2009). Annual Report of the Council, DOC 9921.
- Jaehn (2010). Solving the Flight Gate Assignment Problem using Dynamic Programming, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 80, 1027-1039.
- Janic (2009). Modeling Airport Operations affected by Large-scale Disruption, *Journal of Transportation Engineering*, 135(4), 206-216.
- Kazda & Caves (2008). Airport Design and Operation, 2nd Edition, Emerald Group Publishing Limited, Bingley, UK.
- Keith et al. (2008). Optimization of Taxiway Routing and Runway Scheduling, *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Honolulu, Hawaii, USA.
- Lan et al. (2006). Planning for robust Airline Operations: Optimizing Aircraft Routings and Flight Departure Times to Minimize Passenger Disruptions, *Transportation Science*, 40(1), 15-28.
- Lim et al. (2005). Airport Gate Scheduling with Time Windows, *Artificial Intelligence Review*, 24(5), 5-31.

- Mangoubi & Mathaisel (1985). Optimizing gate assignment at airport terminals, *Transportation Science*, 19(2), 173-188.
- Mao et al. (2007). Using Neuro-evolution in Aircraft Deicing Scheduling. In Tuyls et al. (Herausgeber), *Proceedings of Adaptive and Learning Agents and Multi-Agent Systems*, 138-145.
- Marín (2006). Airport Management: TaxiPlanning, *Annals of Operational Research*, 143, 191-202.
- Mukherjee & Hansen (2007). A Dynamic Stochastic Model for the single Airport Ground Holding Problem, *Transportation Science*, 41(4), 444-456.
- Nikulin & Drexl (2010). Theoretical Aspects of Multicriteria Flight Gate Scheduling: Deterministic and Fuzzy Models, *Journal of Scheduling*, 13, 261-280.
- Norin et al. (2007). A Grasp Heuristic for Scheduling De-icing Trucks at Stockholm Arlanda Airport, *Proceedings of the 6th INO Workshop*, France.
- Norin et al. (2009). Integrating Optimization and Simulation to gain more Efficient Airport Logistics, *8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*.
- Pinol & Beasley (2006). Scatter Search and Bionomic Algorithms for the Aircraft Landing Problems, *European Journal of Operational Research*, 171, 439-462.
- Quan et al. (2007). Searching for Multiobjective Preventive Maintenance Schedules: Combining Preferences with Evolutionary Algorithms, *European Journal of Operational Research*, 177, 1969-1984.
- Rasmussen et al. (2007). Complexity in Simplicity: Flexible Agent-based State Space Exploration. In Grumberg & Huth (Herausgeber), TACAS, *Lecture Notes in Computer Science*, 4424, 231-248.
- Rathinam et al. (2008). An Optimization Model for Reducing Aircraft Taxi Times at the Dallas Fort Worth International Airport, *Proceedings of the 26th International Congress of Aeronautical Sciences*.
- Sarac et al. (2006). A Branch-and-price Approach for Operational Aircraft Maintenance Routing, *European Journal of Operational Research*, 175, 1850-1869.

- Saranga & Kumar (2006). Optimization of Aircraft Maintenance/Support Infrastructure using Genetic Algorithms – Level of Repair Analysis, *Annals of Operations Research*, 143, 91-106.
- Simaiakis & Balakrishnan (2009). Queuing Models of Airport Departure Processes for Emissions Reduction, *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.
- Soomer & Franx (2007). Scheduling Aircraft Landings Using Airlines' Preferences, *European Journal of Operational Research*, 190, 277-291.
- Stolletz (2008). Non-stationary Delay Analysis of Runway Systems, *OR Spectrum*, 30, 191-213.
- Ter Mors et al. (2007). Multi-agent Support System for Airport De-icing Scheduling, *Proceedings of the 4th International ISCRAM Conference*.
- Wei & Liu (2007). Optimizing Gate Assignment at Airport Based on Genetic-tabu Search Algorithm, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 1135-1140.
- Wu (2008). Monitoring Aircraft Turnaround Operations – Framework Development, Application and Implications for Airline Operations, *Transportation Planning and Technology*, 31(2), 215-228.
- Wu & Caves (2004). Modelling and Optimization of Aircraft Turnaround Time at an Airport, *Transportation Planning and Technology*, 27(1), 47-66.
- Xue & Fan (2007). Multi-agent Optimization Design for Multi-resource Job Shop Scheduling Problems. In *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications with Aspects of Artificial Intelligence*, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 4682, 1193-1204.
- Yan & Tang (2007). A Heuristic Approach for Airport Gate Assignments for Stochastic Flight Delays, *European Journal of Operational Research*, 180, 547-567.
- Zhan et al. (2010). An efficient Ant Colony system Based on Receding Horizon Control for the Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling Problem, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(2), 399-412.

Zheng et al. (2010). Airport Gate Assignments Model and Algorithm,
Proceedings of the 3rd International ICCSIT Conference.