

Modellierung ankommender Flugzeuge

Beschreibung mithilfe von Warteschlangen am Beispiel des Flughafens London
Heathrow

Colin Bretl
Niko Wilhelm

6. Februar 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Glossar	V
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Ziel der Arbeit	2
1.3. Aufbau der Arbeit	2
2. Aspekte der Flugsicherung	3
2.1. Staffelvorgangsverfahren	3
2.1.1. Radargestützte Staffelvorgangsverfahren	3
2.1.2. Generelle Staffelvorgangswerte	3
2.1.3. Staffelvorgangsverfahren beim Anflug	4
2.2. Anflugverfahren	4
2.2.1. Instrumentenanflug	4
2.2.2. Instrumentenanflugverfahren	5
2.2.3. Platzrundenverfahren	6
2.2.4. Warteverfahren	7
2.2.5. Fairnessgebot	7
2.2.6. Beispiel Flughafen London Heathrow	7
2.3. Anflugkapazität	8
2.4. Verkehrsmix	9
3. Mathematische Modellierung	10
3.1. Warteschlangensysteme	10
3.2. Notation	12
3.3. Gleichgewicht von Warteschlangensystemen	12
3.4. Poisson-Prozesse und Superposition	13
3.5. Modellierung	14
3.6. $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangen	19
4. Beispielhafte Umsetzung am Flughafen London Heathrow	21
4.1. Modellannahmen	21
4.2. Verkehrsmix	22
4.3. Beschreibung als Warteschlange	23
5. Schluss	24
5.1. Zusammenfassung	24
5.2. Fazit	25
5.3. Ausblick	25
6. Literatur	26
Appendices	28
A. λ_i für LHR am 01.08.2018	28
B. Ankünfte nach Klassen pro Stunde am 01.08.2018 am Flughafen LHR	29

Abbildungsverzeichnis

1.1. Verteilung von Flugbewegungen auf internationale Flughäfen im Jahr 2014 ([1, S. 17])	1
2.1. Aufbau von Localizer und Glideslope nach [2, S. 612]	5
2.2. Aufbau einer Platzrunde nach [3, S. 4-3-4]	6
2.3. Anflugverfahren beim Flughafen London Heathrow nach [4]	8
2.4. Exemplarische Anflugbewegungen auf den Flughafen LHR am 27.01.2019	8
3.1. Aufbau eines Warteschlangensystems nach [5, S. 111]	10
3.2. Superposition von Poisson-Prozessen (eigene Darstellung)	14
3.3. Ankünfte nach Stunden an LHR am 01.08.2018 (eigene Darstellung)	16
3.4. Beschreibung eines Flughafens durch mehrere Warteschlangensysteme mit jeweils einer Bedienstation	18
4.1. Betrachtete Flugstrecke	22
4.2. Länge des Systems in Abhängigkeit von den Ankünften pro Stunde	24

Tabellenverzeichnis

2.1. Wirbelschleppeninduzierte Staffellungsminima nach [6]	4
2.2. Anfluggeschwindigkeiten nach Flugzeugkategorien [7, S. 1-4-1-2]	9
3.1. Kendall-Notation für Warteschlangensysteme nach [8, S. 8] und [9, S. 10f.]	11
3.2. Effektivitätsmaße für $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangen (vgl [8])	19
4.1. Staffellungsabstände $d_{k,l}^{Staffel}$ am LHR	22
4.2. Effektive Staffellungsabstände $d_{k,l}$ am LHR	22
4.3. Werte für $\mathbb{P}(k,l)$ am LHR	23

Glossar

D Deterministisch.

DFS Deutsche Flugsicherung.

FCFS First-Come-First-Served.

ft Fuß.

G Allgemeine Verteilung.

GD Allgemeine Disziplin.

GI Unabhängige und identische Verteilung.

GS Glideslope.

IAF Initial Approach Fix.

ICAO Internationale Zivilluftfahrtorganisation.

IF Intermediate-Fix-Punkt.

ILS Instrumenten-Landesystem.

kt Knoten.

LHR Flughafen London Heathrow.

LOC Localizer.

M Exponentialverteilung.

MUC Flughafen München.

NM Nautische Meile.

PR Auswahl nach Priorität.

RSS Zufallsauswahl.

1. Einleitung

Nach Zahlen der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) soll das weltweite Passagieraufkommen zwischen 2012 und 2032 um 4.6 % auf ca. 16×10^{12} Passagierkilometer jährlich steigen (vgl. [10]). Nach [1, S. 16ff] stellt diese Entwicklung insbesondere internationale Verkehrsflughäfen vor eine Herausforderung: 2014 haben 3.6 % der internationalen Verkehrsflughäfen beinahe die Hälfte der weltweiten Flugbewegungen abgewickelt (vgl. Abb. 1.1).

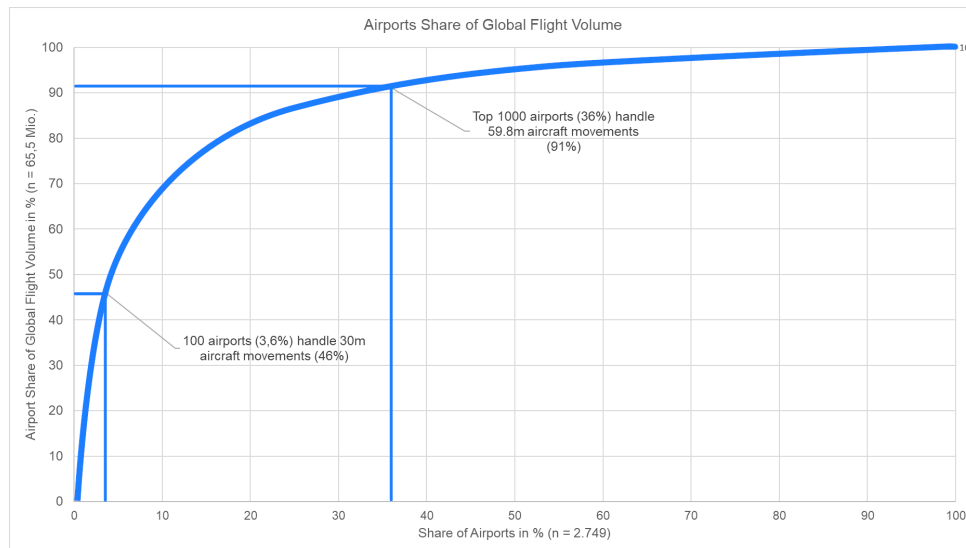


Abbildung 1.1: Verteilung von Flugbewegungen auf internationale Flughäfen im Jahr 2014 ([1, S. 17])

Flughäfen wie London Heathrow LHR und den Flughafen München (MUC) brachte bzw. bringt diese Entwicklung bereits an ihre Kapazitätsgrenzen (vgl. [11] für LHR und [12] für MUC). Zu den begrenzten Ressourcen, die dem Wachstum des Luftverkehrs entgegenstehen, gehört aber nicht nur die technische Infrastruktur. Fluglotsen überwachen die Flugbewegungen, um die Sicherheit der Passagiere zu gewährleisten. Mit steigendem Verkehrsaufkommen steigt der Aufwand für diese Überwachung.

1.1. Problemstellung

Die Überwachung einer Flugbewegung durch Fluglotsen findet auch beim Landeanflug auf einen Zielflughafen statt. Wollen mehrere Luftfahrzeuge in einem kurzen Zeitraum nacheinander landen, gehört es zu den Aufgaben des Lotsen, diese Reihenfolge festzulegen. Infolgedessen werden den einzelnen Luftfahrzeugführern Streckenanweisungen mitgeteilt (bspw. ob diese eine Warteschleife fliegen sollen). Im trivialen Fall, dass zwischen zwei ankommenden Luftfahrzeugen genug Zeit liegt, kann jedes Luftfahrzeug auf möglichst direktem Weg zur Landebahn geführt werden. Der Durchsatz, also wie viele Luftfahrzeuge in einem Zeitintervall landen können, ist in diesem Fall optimal.

Bei hohem Verkehrsaufkommen gestaltet sich die Überwachung durch Fluglotsen schwieriger. Es müssen nicht nur Sicherheitsabstände zwischen den Luftfahrzeugen eingehalten werden, sondern auch physikalische Besonderheiten des Luftverkehrs und technische Restriktionen berücksichtigt werden. Diese wirken sich negativ auf den Durchsatz aus. Außerdem erschweren die Rahmenbedingungen dessen mathematische Untersuchung.

In dieser Arbeit wird die Problemstellung nur für Flugzeuge, die durch Radar identifiziert werden können, betrachtet. Darunter fallen u.a. große Passagiermaschinen, wie sie an internationalen Verkehrsflughäfen vorzufinden ist. Der Grund hierfür ist, dass solche Flugzeuge den größten Anteil an kontrollierten Flugbewegungen ausmachen. Im Jahr 2017 waren beispielsweise ca. 95% der von der Deutschen Flugsicherung (DFS) innerhalb Deutschlands kontrollierten Starts und Landungen solche Flugzeuge (vgl. [13, S. 3]).

1.2. Ziel der Arbeit

Abschnitt 1.1 hat deutlich gemacht, dass die Modellierung eines Fluglotsen, der an einem Flughafen ankommende Flugzeuge zur Landebahn lotst, schwierig ist. Mithilfe eines mathematischen Modells könnten aber beispielsweise verschiedene Lotsen-Strategien daraufhin untersucht werden, wie sie sich auf den Durchsatz auswirken. Interessant ist dabei die Fragestellung, ob diese besser oder schlechter als das bislang eingesetzte Verfahren sind. Diese Arbeit verfolgt daher das Ziel, zu untersuchen, wie das bisherige Verfahren überhaupt modelliert werden kann. Die Arbeit soll so eine Grundlage dafür schaffen, daraus abgeleitete Fragestellungen anzugehen. Es soll mit Hilfe der Warteschlangentheorie die Problemstellung aus stochastischer Sicht untersucht werden. Dabei soll das bisher bei hohem Ankunftsverkehrsaufkommen verwendete Verfahren betrachtet werden. Anhand eines Beispiels soll die Methode auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst darauf eingegangen, welche Aspekte der Flugsicherung bei der betrachteten Problemstellung eine Rolle spielen. Einerseits wird hier das bei hohem Verkehrsaufkommen verwendete Anflugverfahren beschrieben. Andererseits werden Staffelungsregeln beschrieben, die ein beliebiges Anflugverfahren in seinem Durchsatz beschränken. In Kapitel 3 wird das mathematische Modell einer Warteschlange vorgestellt, mit der ein Flughafen beschrieben wird. In Kapitel 4 werden die erarbeiteten Methoden auf den Flughafen London Heathrow angewendet. Kapitel 5 bewertet die Anwendung der Warteschlangentheorie, fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und bietet einen Ausblick.

2. Aspekte der Flugsicherung

In diesem Kapitel wird die Problemstellung dieser Arbeit unter Aspekten der Flugsicherung konkretisiert. Hierfür wird in Abschnitt 2.1 das Prinzip der Staffelung vorgestellt. Staffelvorgahren sorgen dafür, dass Flugzeuge Sicherheitsabstände einhalten. In Abschnitt 2.2 wird beschrieben, wie die Landung von Flugzeugen abgewickelt wird. Dabei wird insbesondere auf das Verfahren eingegangen, das bei hohem Verkehrsaufkommen angewendet wird. In Abschnitt 2.3 wird beschrieben, wodurch die Anflugkapazität bei Flughäfen beschränkt ist. In 2.4 wird schließlich darauf eingegangen, welchen Einfluss die Zusammensetzung des Luftverkehrs bei Anflügen hat.

2.1. Staffelvorgahren

Staffelvorgahren sollen nach [14, S. 217] Mindestabstände zwischen Luftfahrzeugen sicherstellen, wie sie beispielweise der europäische Gesetzgeber in [15], Kapitel 2 (S. 14ff.) fordert, um Kollisionen zu verhindern. In Abschnitt 2.1.1 wird die Radarstaffelung vorgestellt. In Abschnitt 2.1.2 werden Staffelvorgahrenwerte aufgeführt, welche die ICAO aufgestellt hat. In Abschnitt 2.1.3 wird auf Besonderheiten bei der Staffelung von Flugzeugen, die sich im Anflug auf einen Flughafen befinden, eingegangen.

2.1.1. Radargestützte Staffelung

Grundsätzlich wird zwischen radargestützter und nicht-radargestützter Staffelung unterschieden. Mit radargestützter Staffelung kann die Staffelung von Flugzeugen vom Fluglotsen durchgeführt werden, wenn diese mittels Radar identifiziert werden können. Die Staffelvorgahrenwerte hängen dann sowohl von der Position der Flugzeuge, als auch von der Qualität der Radardaten ab (vgl. [14, S. 229f.]). Da für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Flugzeuge radargestützte Staffelung möglich ist, wird im Folgenden nur diese betrachtet.

2.1.2. Generelle Staffelvorgahrenwerte

Die ICAO ist als Sonderorganisation der Vereinten Nationen dafür zuständig, Normen und Empfehlungen für den privaten Luftverkehr festzulegen. Da ihr 192 Vertragsstaaten angehören, werden in dieser Arbeit Prinzipien und Normen der ICAO als Standard aufgefasst. Es sei aber darauf hingewiesen, dass nationale Gesetzgeber davon abweichen können (vgl. [16], [17]). In [6, S. 8-15ff.] hält die ICAO Vorschriften für die räumliche Trennung von Luftfahrzeugen bei Radarstaffelung fest. Diese schließen sowohl vertikale als auch horizontale Mindestabstände ein.

Als horizontalen Mindestabstand gibt Sie 3 bis 5 nautische Meilen (NM) vor. Die genauen Abstände richten sich nach der Qualität der Radardaten und der Flughöhe der Flugzeuge. Als vertikalen Mindestabstand gibt sie für in dieser Arbeit relevante Flughöhen min 1.000 Fuß (ft), also ca. 0,16 NM, vor.

2.1.3. Staffelvungsverfahren beim Anflug

In höheren Lufträumen ist anschaulich auch bei großem Verkehrsaufkommen genug Platz für die Staffelvung von Flugzeugen vorhanden. Beim Anflug mehrerer Flugzeuge auf denselben Flughafen ändert sich dies, da die Flugzeuge auf kleinem Raum zusammengeführt werden müssen. Zudem ist eine möglichst enge Taktung der ankommenden Flugzeuge im Interesse von Fluglinien, Flughäfen und Passagieren. Die ICAO erlaubt hier unter gewissen Voraussetzungen eine horizontale Staffelvung von 2.5 NM zwischen zwei Flugzeugen im Landeanflug (s. [6, S.8-17]). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, welche Flugzeugklassen aufeinanderfolgend landen. Je nach Gewichtsklasse verursachen Flugzeuge unterschiedlich starke Wirbelschleppen. Hierbei handelt es sich um Luftverwirbelungen, die nachfolgende Flugzeuge in eine instabile Fluglage bis hin zum Absturz bringen können (s. [18]). Die genauen Mindestabstände sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Vorausfliegendes Fflugzeug (Masseklasse)	Nachfolgendes Flugzeug (Masseklasse)	Staffelvungsminima (NM)
Heavy	Heavy	4
	Medium	5
	Light	6
Medium	Light	5

Tabelle 2.1: Wirbelschleppeninduzierte Staffelvungsminima nach [6]

Grundsätzlich gilt: je schwerer das vorausfliegende und je leichter das nachfolgende Flugzeug sind, desto größer muss der Mindestabstand sein. Im Allgemeinen darf eine Landebahn nur von einem Flugzeug auf einmal benutzt werden. [14] macht deutlich, dass das konkrete Staffelvungsverfahren bei Anflügen vom jeweiligen Flughafen abhängt. Abweichungen vom Standard treten z.B. dann auf, wenn eine Landebahn auch für Starts benutzt wird. Befinden sich mehrere Flugzeuge in einer Warteschleife (s. 2.2.4), sollen diese vorrangig durch vertikale Staffelvung voneinander getrennt werden (s. [6, S. 111]).

2.2. Anflugverfahren

Beim Anflug kann allgemein zwischen Sicht- und Instrumentenanflug unterschieden werden. In dieser Arbeit wird nur der Instrumentenanflug betrachtet, da dieser bei internationalen Verkehrsflughäfen und bei den in dieser Arbeit betrachteten Luftfahrzeugen üblich ist. In 2.2.1 wird beschrieben, was den Instrumentenanflug kennzeichnet. In 2.2.2 wird anschließend das Standardanflugverfahren vorgestellt. In den Abschnitten 2.2.3 und 2.2.4 werden das Platzrundenverfahren und das Warteverfahren, die im Standardanflugverfahren zum Einsatz kommen können, beschrieben. Abschnitt 2.2.5 stellt das Fairnessgebot im Kontext der Lotsung von Flugzeugen vor. In Abschnitt 2.2.6 werden die Begriffe am Beispiel des internationalen Verkehrsflughafens London Heathrow illustriert.

2.2.1. Instrumentenanflug

Die genauen technischen Voraussetzungen, um nach Instrumentenflugregeln fliegen zu können, regelt die Verordnung über die Flugsicherungsausrüstung der Luftfahrzeuge (s. [19, §3 (1)]). Sind diese erfüllt, kann die Navigation von Flugzeugen ausschließlich über Instrumente durchgeführt werden. Damit ist die Navigation unabhängig von den Sichtbedingungen. Um am In-

strumentenanflug teilzunehmen, muss ein Flugzeug im Wesentlichen mit einem Instrumenten-Landesystem (ILS) kommunizieren können (vgl. [19, §3 (2)]).

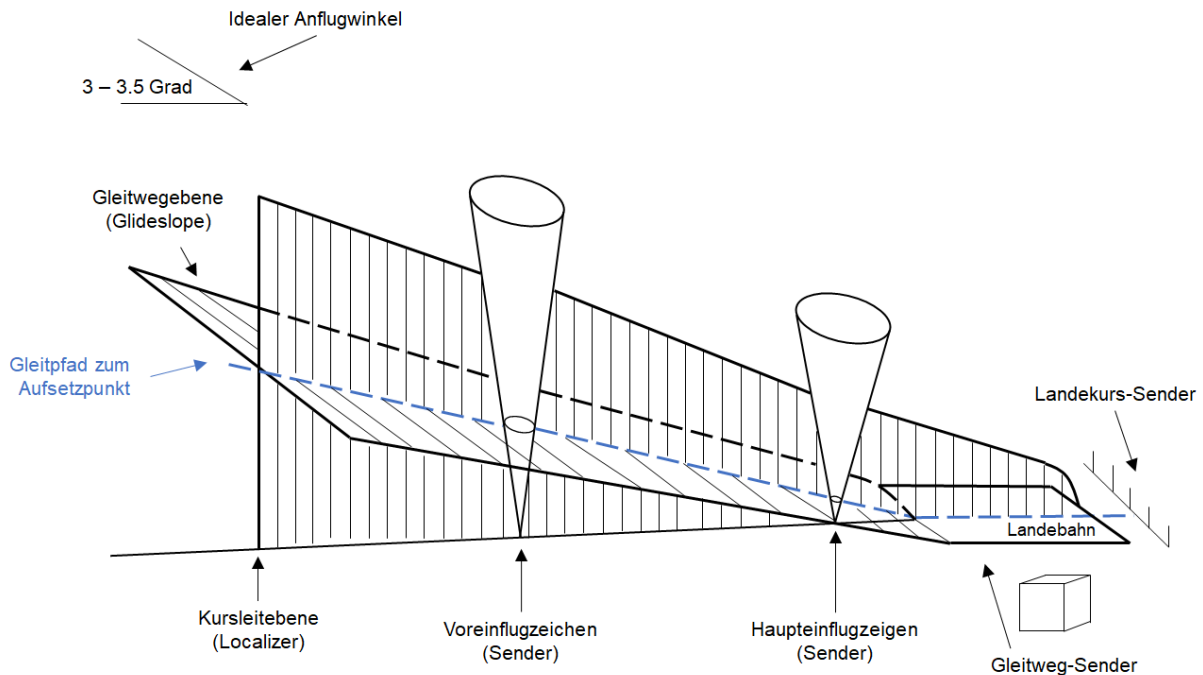


Abbildung 2.1: Aufbau von Localizer und Glideslope nach [2, S. 612]

Ein ILS besteht aus zwei Leitstrahlen, dem Localizer (LOC) und dem Glideslope (GS) (s. Abb. 2.1). Anhand des Localizers kann ein Pilot im Instrumentenanflug überprüfen, ob er sich in Verlängerung der Landebahn genau mittig zu dieser befindet. Anhand des Glideslopes kann er überprüfen, ob er sich der Bahn im richtigen Sinkgradienten nähert. Aus beiden Leitstrahlen ergibt sich eine Gerade, die unter einem 3-Grad-Winkel die Bahn mittig trifft (vgl. [2, S. 611ff.]).

2.2.2. Instrumentenanflugverfahren

[14] fasst auf Seite 231f. das Verfahren der ICAO zusammen (s. [7]). Demzufolge besteht das Verfahren aus fünf Streckenabschnitten und findet Anwendung bei Flugzeugen, die den vom Anfluglotsen kontrollierten Sektor betreten:

1. **Einflugstrecke** bzw. Arrival Route. In diesem Abschnitt wird das Luftfahrzeug zum Initial Approach Fix (IAF) geführt, von dem aus der Anflug beginnt. Dadurch wird der Reiseflug beendet.
2. **Anfangsanflug** bzw. Initial Approach. Im Anfangsanflug wird das Flugzeug auf die verlängerte Anfluggrundlinie, genauer gesagt zum Intermediate-Fix-Punkt (IF), geführt. Im Anfangsanflug kann es notwendig sein, das Flugzeug in einer Warteschleife zu halten (s. 2.2.4) oder ein Platzrundenverfahren durchzuführen (s. 2.2.3).
3. **Zwischenanflug** bzw. Intermediate Approach. Im Zwischenanflug soll das Flugzeug für den Endanflug stabilisiert werden.

4. **Endanflug** bzw. Final Approach. Der Endanflug “beginnt mit dem Erfliegen des ILS-Gleitwegs” ([14, S. 235]) und endet entweder mit der Landung oder dem Fehlanflug.
5. **Fehlanflug** bzw. Missed Approach. Falls der Endanflug nicht erfolgreich abgeschlossen werden kann, beschreibt der Fehlanflug, wie verfahren wird.

2.2.3. Platzrundenverfahren

Bei geringem Verkehrsaufkommen wird ein ankommendes Flugzeug nach Möglichkeit auf direktem Weg zur Landebahn geführt. Vom direkten Weg muss bspw. dann abgewichen werden, wenn aus Lärmschutzgründen ankommende Flugzeuge nicht über Wohngebiete geführt werden sollen. Bei hohem Verkehrsaufkommen kann es nötig sein im Anfangsanflug die Flugzeuge in einem bestimmten Muster zum Flughafen zu führen. Prinzipiell sind hier alle Verfahren denkbar, welche die Flugzeuge vom IAF zum IF führen. In der Praxis werden Platzrunden benutzt. Das Instrumentenanflugverfahren mit einem Platzrundenanflug ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

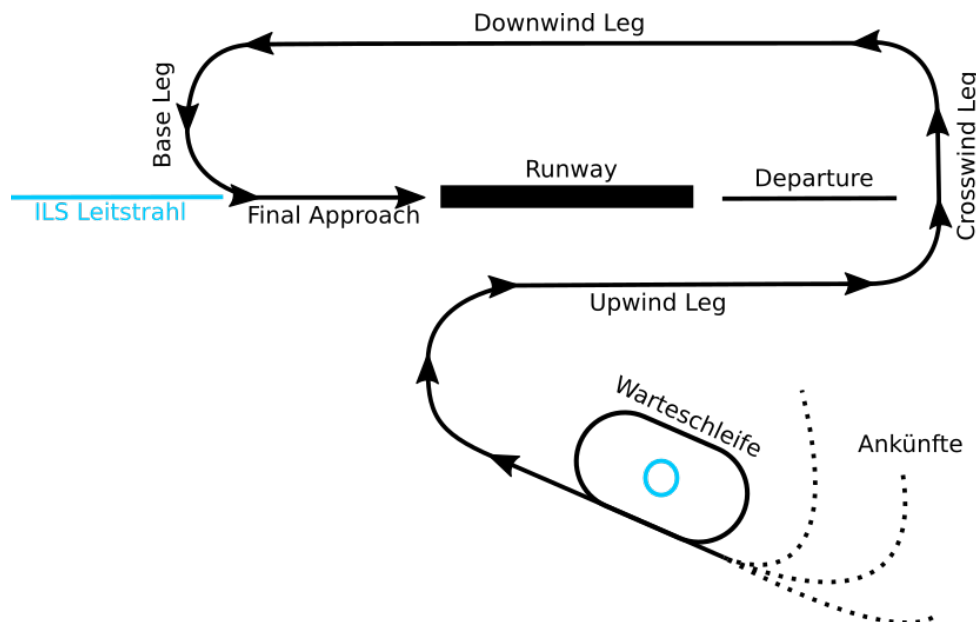


Abbildung 2.2: Aufbau einer Platzrunde nach [3, S. 4-3-4]

Im Gegenanflug wird das Flugzeug antiparallel zur Landerichtung an der Landebahn vorbeigeführt, bis es die Erlaubnis bekommt, in den Queranflug überzugehen. Im Queranflug wird das Flugzeug in den Endanflug überführt. Dabei soll es idealerweise in einem 30-Grad-Winkel das ILS erfiegen.

Falls Flugzeuge sich aus entgegengesetzten Richtungen dem Flughafen nähern, kann analog zu obiger Beschreibung eine weitere, gegenläufige Platzrunde geflogen werden.

Nach [3, S. 4-3-2f] sollen standardmäßig alle Kurven innerhalb eines Platzrundenverfahrens links geflogen werden. Außerdem sollen Flugzeuge, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, die Platzrunden in einer Höhe von 1500 ft über Grund erfiegen. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass sich alle Flugzeuge im Anfangsanflug in annähernd gleicher Höhe befinden. Je nach Flugzeugtyp kann ein Pilot die Platzrunden geringfügig anpassen, falls z.B. die Kurven enger geflogen werden können. Platzrunden werden für jeden Flughafen gesondert festgelegt. Dabei können beispielsweise Lärmschutzmaßnahmen ergriffen werden (vgl. bspw. für LHR [4]).

Das Prinzip der Platzrunden kann sinngemäß verlängert werden. Auf diese Weise ergibt sich eine

schlangenförmige Kurve, die auf den IF zuführt. Es ist zu beachten, dass dabei das Gebot der Linkskurven verletzt wird.

Verfügt ein Flughafen über mehrere Bahnen, müssen diese bei der Definition von Platzrunden berücksichtigt werden. Falls die Bahnen parallel unabhängig betrieben werden können, müssen bei der Definition der Platzrunden nur Staffelungswerte zwischen den Kurven berücksichtigt werden. Weitere zu berücksichtigende Aspekte sind, ob eine Bahn gleichzeitig für Starts und Landungen benutzt wird oder ob sich Bahnen kreuzen. Zur Vereinfachung werden in dieser Arbeit nur solche Flughäfen modelliert, die nur eine Bahn haben oder bei denen mehrere Bahnen parallel unabhängig benutzt werden können.

2.2.4. Warteverfahren

Unter einem Warteverfahren versteht man „das ein- oder mehrmalige Befliegen einer Standard-Warteschleife“ (vgl. [2, S. 169]). Dies ist nötig, wenn eine Landung nicht unmittelbar eingeleitet werden kann. Die Warteschleife ermöglicht es, die Mindestgeschwindigkeit zum Fliegen aufrecht zu erhalten.

Warteverfahren sind vor allem bei hohem Anflugsverkehrsaufkommen notwendig. Prinzipiell kreist ein Flugzeug in einer Warteschleife über einem festen Punkt. Mehrere Flugzeuge können in unterschiedlicher Höhe dieselbe Warteschleife nutzen. Hierbei müssen nach wie vor Staffelnregeln eingehalten werden.

2.2.5. Fairnessgebot

Befinden sich mehrere Flugzeuge zeitlich im Anflug auf einen Flughafen, muss der zuständige Fluglotse die Reihenfolge festlegen, in der sie landen dürfen. Dabei ist er angehalten, eine faire Reihenfolge vorzugeben. Das bedeutet, er darf z.B. nicht Flugzeuge bestimmter Fluggesellschaften diskriminieren, indem er diese später landen lässt und es dafür keinen stichhaltigen Grund gibt. Ein solcher Grund wäre gegeben, wenn durch ein Verzögern der Landung der Durchsatz erhöht werden kann oder eine Maschine wegen eines Notfalls schnell landen muss.

2.2.6. Beispiel Flughafen London Heathrow

Am Flughafen London können Landungen aus östlicher oder westlicher Richtung erfolgen. Abbildung 2.3 zeigt das Platzrundenverfahren für Landungen in westliche Richtung, also aus dem Osten kommend. Dies ist nach Angaben des Flughafens in 70% des Jahres der Fall ([20, S. 1]). Je nachdem, aus welcher Richtung ein Flugzeug kommt, wird es gegebenenfalls auf eine der Warteschleifen im Südosten (Biggin Stack), Südwesten (Ockham Stack), Nordwesten (Bovingdon Stack) oder Nordosten (Lambourne Stack) aufgeteilt und muss warten. Für jede Warteschleife gibt es eine vorgegebene Wegstrecke, der die Flugzeuge bis zur Landebahn folgen. Diese Wegstrecken variieren im tatsächlichen Flugverkehr leicht, s. Abbildung 2.4.

Von den beiden Bahnen wird jeweils eine Bahn für Landungen und eine Bahn für Starts verwendet. Dabei wird im Lauf eines Tages bei Anflügen aus östlicher Richtung einmal am Tag zwischen den Bahnen gewechselt (s. [20, S. 1])



Abbildung 2.3: Anflugverfahren beim Flughafen London Heathrow nach [4]

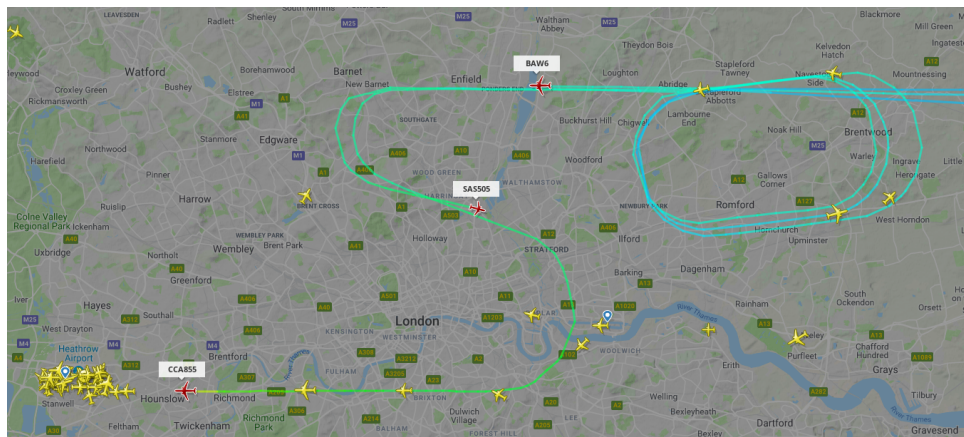


Abbildung 2.4: Exemplarische Anflugbewegungen auf den Flughafen LHR am 27.01.2019

2.3. Anflugkapazität

Unter der in Abschnitt 2.1.3 formulierten Bedingung, dass jeweils nur ein Flugzeug gleichzeitig eine Bahn benutzen darf, kann man die theoretisch maximale Anflugkapazität für eine Landebahn bestimmen. Hierfür benötigt man die Bahnbelegungszeiten der Luftfahrzeuge. Diese hängen vom landenden Flugzeug und der Bahnbeschaffenheit ab. Schließen an eine Bahn sogenannte Schnellabrollwege an, müssen Flugzeuge weniger stark abbremesen, bevor sie von der Bahn geführt werden. Auf diese Weise wird die Bahnbelegungszeit reduziert. Auch durch die Anzahl der Abrollwege lässt sich dieser Wert reduzieren ([21, S. 555]). Verfügt ein Flughafen über mehrere Landebahnen, kann die Berechnung der theoretischen Maximalkapazität sinngemäß für jede Bahn separat durchgeführt werden. Außerdem können dann einzelne Bahnen ausschließlich für Starts oder Landungen benutzt werden. Weitere Aspekte, welche die Bahnbelegungszeiten und damit die Anflugkapazitäten beeinflussen, sind:

- Wind- und Wetterverhältnisse
- Mischnutzung einer Bahn für Starts und Landungen
- Bahnlayout bei mehreren Bahnen, bspw. falls diese einander kreuzen

Kapazitäten werden üblicherweise in Anflügen pro Stunde bemessen, vgl. [21, S. 353].

2.4. Verkehrsmix

Der Verkehrsmix beschreibt, in welchem Verhältnis sich welche Typen von Flugzeugen im Anflug auf einen Flughafen befinden. Gewichts- und Geschwindigkeitsunterschiede nehmen Einfluss auf die Staffelung (vgl. 2.1.3) und damit auch auf die Kapazitäten. Die Richtungen, aus denen die einzelnen Flugzeuge kommen, können das Platzrundenverfahren beeinflussen. Neben der Kategorisierung nach Gewicht (vgl. 2.1 oben) verwendet die ICAO die in Tabelle 2.2 aufgeführte Unterscheidung nach Geschwindigkeiten im Anflugbereich.

Flugzeugkategorie	Geschwindigkeitsintervall (Knoten (kt))
A	[0, 91)
B	[91, 121)
C	[121, 141)
D	[141, 166)
E	[166, 211)

Tabelle 2.2: Anfluggeschwindigkeiten nach Flugzeugkategorien [7, S. 1-4-1-2]

Flugzeuge, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, fallen üblicherweise in Kategorie C oder D. Im Anflug können diesen also gleiche Geschwindigkeiten vorgegeben werden (vgl. [22], [23], [24]).

3. Mathematische Modellierung

In diesem Kapitel werden mathematische Werkzeuge untersucht, mit deren Hilfe die Ankünfte an einem Flughafen modelliert werden sollen. In Abschnitt 3.1 wird zunächst beschrieben, was ein Warteschlangensystem ist und wie man dieses mit Hilfe der Kendall-Notation mathematisch fassen kann. Abschnitt 3.2 fasst verwendete Symbole und Abkürzungen zusammen, um die folgenden Abschnitte übersichtlicher zu gestalten. Abschnitt 3.3 beschreibt, wann sich ein Warteschlangensystem im Gleichgewicht befindet. In Abschnitt 3.4 werden Poisson-Prozesse erläutert und das Superpositionsprinzip vorgestellt. In Abschnitt 3.5 werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um das in Kapitel 2 erläuterte Verfahren als $M/G/1/\infty/FCFS$ - Warteschlange zu charakterisieren. Eigenschaften solcher Systeme werden in 3.6 beschrieben.

3.1. Warteschlangensysteme

Nach [5, S. 111] besteht ein Warteschlangensystem aus „Kunden, die zu zufälligen Zeitpunkten an einer Bedienstationsstation eintreffen, um Bedienung nachsuchen und nach Abschluss der Bedienung die Station wieder verlassen.“ Demzufolge lassen sich folgende Bestandteile eines Warteschlangensystems isolieren (s. Abbildung 3.1).

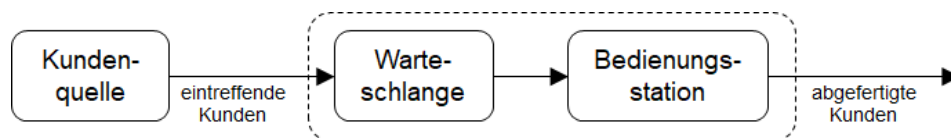


Abbildung 3.1: Aufbau eines Warteschlangensystems nach [5, S. 111]

- **Kunden** (customer), die im System eintreffen, dort ggf. warten müssen und bedient werden. [8, S. 2f] hebt hervor, dass Kunden nicht ausschließlich menschlicher Natur sein müssen. Er führt weitere Aspekte an, die bei Kunden berücksichtigt werden können. Dazu gehört z.B., ob diese das Warteschlangensystem meiden, wenn die Wartezeit zu lang wäre.
- Der **Ankunftsprozess** (arrival pattern), der beschreibt, wann und in welcher Reihenfolge Kunden im System eintreffen und ob Kunden gleichzeitig oder nacheinander eintreffen können. Dabei handelt es sich im Sinne obiger Definition um einen stochastischen Prozess. [8, S. 3] impliziert aber, dass auch deterministische Ankünfte denkbar sind.
- Die **Warteschlange** (queue), die den Warteraum des Systems beschreibt. Nach [8, S. 5] kann ein Warteschlangensystem aus mehreren Warteschlangen bestehen. Außerdem kann die Kapazität des Warteschlangensystems begrenzt sein. Bei begrenzter Kapazität können Kunden verloren gehen.
- Eine **Bedienstationsstation** (service station), an der die Kunden bedient werden. Eine Bedienstationsstation kann wiederum aus mehreren sog. Schaltern (service channel) bestehen. Damit können effektiv mehrere Kunden gleichzeitig bedient werden (vgl. [5], [8] und [9]). [8, S. 6] merkt an, dass ein Warteschlangensystem auch aus mehreren Bedienstationsstationen bestehen kann, die ein Kunde durchlaufen muss.
- Der **Abfertigungsprozess** (service pattern), der beschreibt wie Kunden bedient werden

und wie lange diese Bedienung dauert. Genau wie der Ankunftsprozess sind diese stochastisch, aber i.A. unabhängig von den Ankünften. Der Abfertigungsprozess steuert damit, wann Kunden das System verlassen (s. [8, S. 4]).

[8, S. 4ff.] führt des Weiteren die Warteschlangendisziplin (queue discipline) als Element eines Warteschlangensystems an. Die Warteschlangendisziplin beschreibt die Reihenfolge, in der die Kunden bedient werden. Üblich ist bspw. die Disziplin First-Come-First-Served (FCFS), bei der die Kunden in der Reihenfolge ihres Eintreffens bearbeitet werden.

Kendall-Notation

In der Literatur werden die einzelnen Elemente eines Warteschlangensystems üblicherweise in der Kendall-Notation angegeben (vgl. [5], [8], [9] und [25]). Eine Warteschlange ist dann nach [8, S. 7f] durch den Ausdruck

$$A/B/X/Y/Z$$

gegeben. A gibt den Ankunftsprozess in Form der Zwischenankunftszeit an. B beschreibt den Abfertigungsprozess. A und B sind dabei stochastische Prozesse. $X \in \mathbb{N} \cup \infty$ beschreibt die Anzahl der Schalter, $Y \in \mathbb{N} \cup \infty$ die Kapazität des Systems. Diese kann also abzählbar unendlich groß sein. Z beschreibt schließlich die Warteschlangendisziplin. Tabelle 3.1 führt gängige Werte für den Ankunftsprozess, den Abfertigungsprozess und die Warteschlangendisziplin auf.

Charakteristik	Symbol	Erklärung
Ankunftsprozess (A), Abfertigungsprozess (B)	M	Exponentialverteilung (Markovsch)
	D	Deterministisch
	G	Allgemeine Verteilung (ohne weitere Annahmen)
	GI	Unabhängig und identisch verteilt (i.i.d.)
Warteschlangendisziplin (Z)	$FCFS$	Auswahl nach First-Come-First-Served-Prinzip)
	RSS	Zufallsauswahl
	PR	Auswahl nach Priorität
	GD	Allgemeine Disziplin

Tabelle 3.1: Kendall-Notation für Warteschlangensysteme nach [8, S. 8] und [9, S. 10f.]

Mithilfe dieser Notation kann man eine Vielzahl an gängigen Warteschlangenmodellen beschreiben (vgl. [8, S. 49-128]). [9, S. 10] macht jedoch deutlich, dass die Notation nicht erschöpfend ist und einige wichtige Modelle damit nicht beschrieben werden können. Klassischerweise können mit Hilfe von Warteschlangen Fragestellungen, die die durchschnittliche Anzahl (wartender) Kunden im System, die durchschnittlichen Verweildauern oder die durchschnittlichen Wartezeiten betreffen, untersucht werden (s. [5, S. 113]).

3.2. Notation

In dieser Arbeit wird vorwiegend die Notation von [26] verwendet. Es seien im Folgenden (jeweils zu $n \in \mathbb{N}_0$):

- T_n Zeitpunkt der Ankunft des n -ten Kunden im System, wobei $T_0 = 0$ gelten soll
- Z_n n -te Zwischenankunftszeit, es gilt also $Z_n = T_{n+1} - T_n$
- S_n Zeit bis zur Ankunft des n -ten Kunden, also $S_n = \sum_{i=1}^n T_i$
- B_n Bedienzeit des n -ten Kunden
- B erwartete Bedienzeit
- N_t Anzahl der Kunden zum Zeitpunkt t . Es sei dabei $N_t = N_t^{(q)} + N_t^{(s)}$. $N_t^{(q)}$ beschreibt die Anzahl der Kunden in der Warteschlange zum Zeitpunkt t und $N_t^{(s)}$ die Anzahl der Kunden, die zum Zeitpunkt t bedient werden.
- c Anzahl der Schalter
- λ erwartete Ankunftsrate, also die Anzahl Ankünfte pro Zeiteinheit
- μ erwartete Bedienrate, dabei sei $\mu = \frac{1}{\mathbb{E}[B]}$
- ρ der Lastfaktor des Systems, also $\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$
- W erwartete Wartezeit im System
- $W^{(q)}$ erwartete Wartezeit in der Warteschlange des Systems
- L erwartete Anzahl an Kunden im System. Es sei $L = \mathbb{E}[N_t]$
- $L^{(q)}$ erwartete Anzahl der wartenden Kunden im System. Es sei $L^{(q)} = \mathbb{E}[N_t^{(q)}]$

3.3. Gleichgewicht von Warteschlangensystemen

Ein $G/G/c/\infty/GD$ -Warteschlangensystem befindet sich nach [8, S. 10] im Gleichgewicht, wenn (1) erfüllt ist.

$$\rho < 1 \Leftrightarrow \lambda < c\mu \quad (1)$$

Anschaulich bedeutet dies, dass ein System im Gleichgewicht ist, wenn sich im Lauf der Zeit nicht unendlich viele Kunden anstauen.

An dieser Stelle soll bemerkt werden, dass nach [26, S. 369] die schwache Ungleichung $\rho \leq 1$ genügt. [8, S. 10] führt aber an, dass die schwache Ungleichung nur im deterministischen Fall gerechtfertigt sei. Im stochastischen Fall können die Bedienstation nicht in endlicher Zeit alle Kunden bedienen, da die Schlange nicht leer wird. In dieser Arbeit wird die Definition von [8] verwendet.

3.4. Poisson-Prozesse und Superposition

Poisson-Prozesse spielen in der Warteschlangentheorie eine zentrale Rolle. Mit ihrer Hilfe können Ankunftsprozesse vergleichsweise einfach modelliert werden (vgl. [26], [27], [8], [9]). In [27] und [8] wird die Definition des Poisson-Prozesses aus Forderungen an den Zähl-Prozess $(N_t)_{t \geq 0}$ hergeleitet. Zweckmäßiger für diese Arbeit ist die Definition von [26, S. 217]:

Definition 3-1: Poisson-Prozess

Ein einfacher Zählprozess $P = \{N_t : t \geq 0\}$ mit stochastisch unabhängigen (s.u.) und inhomogen exponentiell verteilten Zwischenereigniszeiten heißt **eindimensionaler inhomogener Poisson-Prozess**. Sind die Zwischenereigniszeiten identisch exponentiell verteilt mit konstantem $\lambda_0 > 0$, bezeichnet man den Prozess als **homogenen eindimensionalen Poisson-Prozess**.

Eine Zufallsvariable X heißt inhomogen exponentiell verteilt, wenn es eine integrierbare Funktion $\lambda : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ gibt, sodass mit der sog. Parameterfunktion $\Lambda(t) := \int_0^t \lambda(x) dx$ für die Verteilungsfunktion $F_X = \mathbb{P}(X \leq t)$ von X

$$F_X = 1 - \exp^{-\Lambda(t)}$$

gilt. Ist λ konstant gleich $\lambda_0 \in \mathbb{R}_0^+$, so ist $\Lambda(t) = \lambda_0 t$ und X genügt gerade einer Exponentialverteilung mit Parameter λ_0 .

Aus der Definition von Poisson-Prozessen lässt sich folgende Charakterisierung von Poisson-Prozessen herleiten (vgl. [26, S. 223]):

Satz 3-1: Charakterisierung von Poisson-Prozessen mithilfe der Poisson-Verteilung

Ein Zählprozess $P = \{N_t : t \geq 0\}$ ist genau dann ein inhomogener Poisson-Prozess mit Parameter-Funktion $\Lambda(t)$, wenn die Zählvariablen N_t Poisson-verteilt sind und die Inkremente des Prozesses $\{N_{t+s} - N_t : t \geq 0, s \geq 0\}$ unabhängig sind.

Im Falle eindimensionaler homogener Poisson-Prozesse mit Parameterfunktion $\lambda_0 t$ sind $N_{t+s} - N_t \sim \text{Poisson}(\lambda_0)$ (s. [27, S. 39]).

Eine wichtige Eigenschaft von Poisson-Prozessen ist, dass aus mehreren, voneinander unabhängigen Poisson-Prozessen ein neuer Poisson-Prozess gewonnen werden kann:

Satz 3-2: Superposition

Es seien $P^{(i)} = \{N_t^{(i)} : t \geq 0\}$ unabhängige Poisson-Prozesse mit Parameterfunktionen $\Lambda^{(i)}(i = 1, \dots, n)$. Dann ist der Zählprozess $\{N_t = \sum_{i=1}^n N_t^{(i)} : t \geq 0\}$ wiederum ein Poisson-Prozess mit Parameterfunktion $\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \Lambda^{(i)}(t)$.

Falls die Prozesse $P^{(i)}$ homogene Poisson-Prozesse sind, ist auch der summierte Prozess ein homogener Poisson-Prozess mit $\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \Lambda^{(i)}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_0^{(i)} t = t \sum_{i=1}^n \lambda_0^{(i)} =: \lambda t$ (s. [26, S. 226]).

Abbildung 3.2 veranschaulicht diese Superposition von Poisson-Prozessen.

Poisson-Prozesse sind auch deshalb für die Warteschlangentheorie von Bedeutung, weil die Annahme einer Poisson-Verteilung für eine Vielzahl an Zählprozessen statistisch gesichert ist (vgl. [26, S. 216]). Kann man zudem die Unabhängigkeit der Inkremente nachweisen oder unterstellen, lassen sich Ankunftsprozesse als Poisson-Prozesse modellieren.

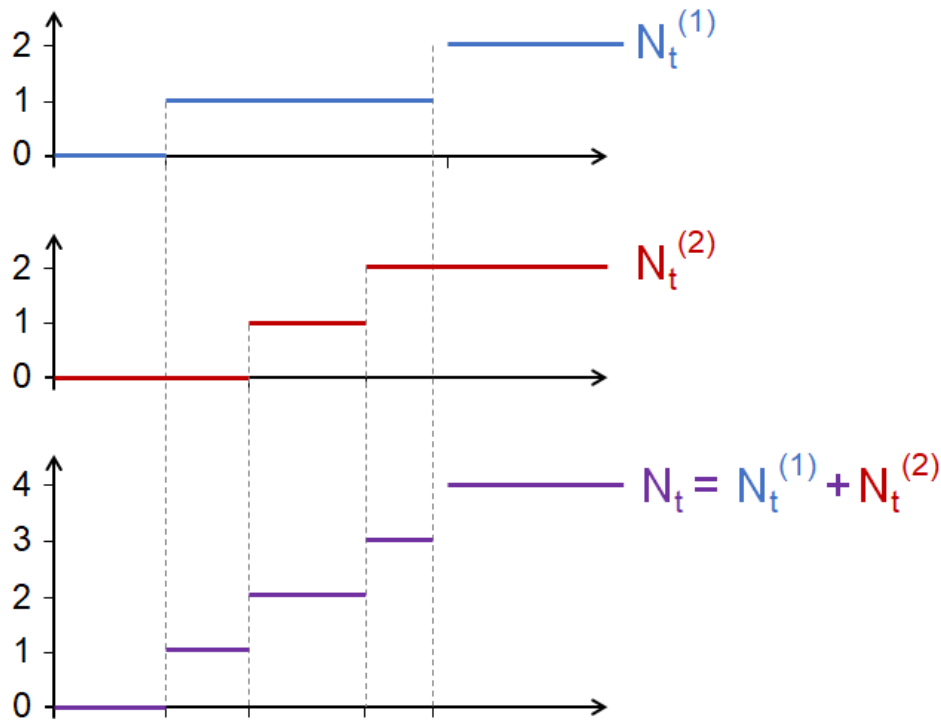


Abbildung 3.2: Superposition von Poisson-Prozessen (eigene Darstellung)

3.5. Modellierung

Die Modellierung des in Kapitel 2 beschriebenen Anflugverfahrens als Warteschlangensystem erfordert, dass die in 3.1 aufgeführten Komponenten modelliert werden. Diese können im Falle eines Flughafens als Flugzeuge (Kunden), Flughafen/Anflugluftraum mit Landebahnen (Bedienungsstation mit Schaltern), Platzrundenverfahren mit abschließender Landung (Abfertigungsprozess), Warteschlange (Warteschleifenverfahren), und ein geeigneter Ankunftsprozess aufgefasst werden. Darüber hinaus erfordern einige Besonderheiten des Abfertigungsverfahrens, sich über die Zuteilungsstrategie der Flugzeuge auf die Bahnen Gedanken zu machen. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Komponenten eingegangen.

Flugzeuge

Ankommende Flugzeuge entsprechen den Kunden des Warteschlangensystems. Das n -te Flugzeug ist dabei charakterisiert durch seinen Typ $k^{(n)} \in K$ und eine Richtung $r^{(n)} \in R$. Der Typ beschreibt die Geschwindigkeit und die Masseklasse des Flugzeugs. K ist eine endliche Indexmenge. Auch R kann als endlich angenommen werden, da bei den Anflugverfahren Einflogstrecken vorgegeben werden.

Flughafen/ Anflugluftraum

Der Flughafen, genauer gesagt der Luftraum, in dem das Platzrundenverfahren stattfindet, entspricht der Bedienungsstation des Warteschlangensystems. Während die Anzahl der Schalter in Form der Landebahnen begrenzt ist, gibt es prinzipiell bis zum Erfliegen des ILS mehrere Streckenführungen, auf denen das Flugzeug bedient werden kann. Platzrundenverfahren geben demgegenüber ab dem Anfangsanflug eine Strecke vor. Es sei daher hier die Annahme getroffen, dass für jede Landebahn genau eine Platzrunde festgelegt sei und die Platzrunden so verlaufen, dass sämtliche Staffelnregeln eingehalten werden. Bei Bahnen, die sich parallel und unabhängig nutzen lassen, ist diese Anforderung erfüllt. Sei C die endliche Indexmenge der möglichen

Platzrunden. Dann bezeichne $c^{(n)} \in C$ die Landebahn, auf der der n -te Flugzeug landet.

Kapazität

In Abhängigkeit der verfügbaren Lotsen und der gegebenen Infrastruktur ist die Anzahl an Flugzeugen, die auf einem Flughafen landen können, begrenzt. Warteschlangenmodelle mit beschränkten Kapazitäten sind im Allgemeinen schwieriger analytisch zu fassen. Ist der Ankunftsprozess z.B. ein Poisson-Prozess, ist die „Poisson-Natur eines Ankunftsstroms bei endlicher Speicherkapazität i.A. gestört“ ([26, S. 389]).

Im modellierten System wird darum angenommen, dass die Kapazitäten ignoriert bzw. gleich ∞ angenommen werden können. Anschaulich bedeutet dies, dass sich jedes ankommende Flugzeug in die Warteschlange einreihen kann. Dies lässt sich damit rechtfertigen, dass Flughäfen bereits im Voraus nur in Höhe ihrer Kapazität den Fluggesellschaften Landeslots verkaufen. Dies impliziert, dass sich zu keinem Zeitpunkt mehr Flugzeuge anstauen können, als es die Kapazität zulässt.

Warteschlangendisziplin

In der Realität ist es Aufgabe des zuständigen Lotsen, die Landereihenfolge der ankommenden Flugzeuge festzulegen. Im hier beschriebenen Modell wird angenommen, dass diese nach dem FCFS-Verfahren vorgehen. Auf diese Weise wird das Fairnessgebot (vgl. Abschnitt 2.2.5) beachtet, da kein Flugzeug warten muss, weil ein anderes Flugzeug vor ihm landen darf, welches sich später in die Warteschlange eingereiht hat.

Ankunftsprozess

Der Ankunftsprozess des betrachteten Modells kann mit Hilfe eines homogenen Poisson-Prozesses modelliert werden. Es sei N_t die Anzahl der Flugzeuge im System zum Zeitpunkt t , T_n die zufällige Ankunftszeit des n -ten Flugzeugs und $Z_n = T_{n+1} - T_n$ die Zwischenankunftszeit zwischen der n -ten und der $n + 1$ -ten Ankunft. $\mathcal{N} = (N_t)_{t \in \mathbb{N}}$ ist ein Zählprozess mit Werten in \mathbb{N}_0 .

Als Zählprozess ist die Annahme, dass N_t Poisson-verteilt ist, statistisch plausibel. Unterstellt man, dass \mathcal{N} unabhängige Inkremente besitzt, so ist nach Satz 3-1 \mathcal{N} ein (i.A. inhomogener) Poisson-Prozess. Diese Unterstellung wird an dieser Stelle vereinfachend getroffen, um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine echte Vereinfachung handelt. Es ist zum Beispiel üblich, dass Fluggesellschaften bei Anschlussflügen darauf achten, dass die beteiligten Flugzeuge nur kurz aufeinander warten müssen. Findet also ein Abflug statt, der Passagiere von zwei ankommenden Flugzeugen aufnehmen soll, ist zu erwarten, dass diese kurz nacheinander ankommen. Die Unabhängigkeit ist in diesem Fall verletzt.

Abbildung 3.3 zeigt exemplarisch die Ankünfte in LHR vom 01.08.2018.

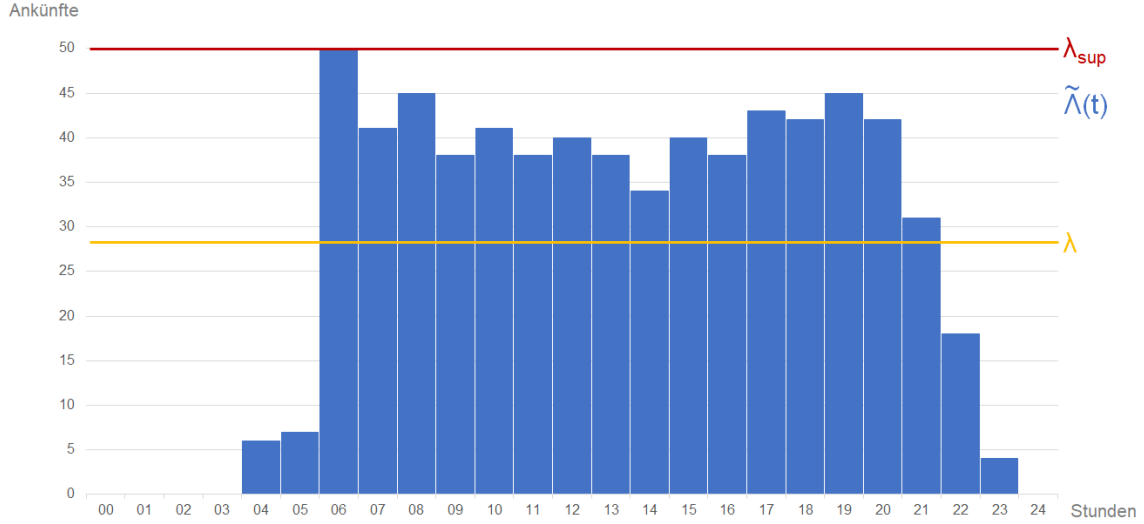


Abbildung 3.3: Ankünfte nach Stunden an LHR am 01.08.2018 (eigene Darstellung)

Man kann einerseits erkennen, dass zwischen 06:00 Uhr und 07:00 Uhr die Intensität am höchsten war und in den Nachstunden von 23:00 Uhr bis 04:00 Uhr ein Flugverbot herrscht. Die Verkehrsintensität schwankt also im Lauf eines Tages. Der Ankunftsprozess ist damit ein inhomogener Poisson-Prozess.

Wie in Kapitel 2 bemerkt worden ist, werden bei der Beschreibung der Intensität üblicherweise Durchschnittswerte pro Stunde angegeben. Die Parameterfunktion kann daher wie in Formel 2 für einen Tag beschrieben werden.

$$\tilde{\Lambda}(t) = \lambda_1 \mathbf{1}_{(t_0 \leq t \leq t_1)} + \lambda_2 \mathbf{1}_{(t_1 \leq t \leq t_2)} + \dots + \lambda_{24} \mathbf{1}_{(t_{23} \leq t \leq t_{24})} \quad (2)$$

Dabei sind $\lambda_1, \dots, \lambda_{24} \in \mathbb{R} \geq 0$ die durchschnittliche Anzahl ankommender Flüge von 00:00 – 01:00 Uhr, ..., 23:00–24:00 Uhr mit den Stundengrenzen t_1, \dots, t_{24} . Bei der Betrachtung der ganzen Zeitachse ist zu erwarten, dass sich das Muster periodisch fortsetzt. Dabei geht die Annahme ein, dass sich die stundenweisen Ankunftsrate über mehrere Tage nicht ändern. Ausnahmezeiträume mit erhöhtem oder verringertem Flugaufkommen in den Hauptreiseverkehrszeiten werden ignoriert. $\tilde{\Lambda}(t)$ ist in Abbildung 3.3 exemplarisch für LHR am 01.08.18 dargestellt.

Die analytische Untersuchung inhomogener Poisson-Prozesse gestaltet sich ungleich schwerer, als die von homogenen. [28] und [29] raten in solchen Fällen bereits zur numerischen Simulation des Warteschlangensystemverhaltens. Daher wird in dieser Arbeit ein homogener Poisson-Prozess unterstellt. Dies wirft die Frage auf, wie das zugehörige λ bestimmt wird. Wählt man λ als Durchschnitt der (inhomogenen) Intensität (s. (3))

$$\lambda = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T \Lambda(t) dt}{T} \quad (3)$$

und ist $\lambda < \infty$, dann gilt nach [28, S. 245] in einem Warteschlangensystem mit einer Bedienstation und unbegrenzter Kapazität, dass die durchschnittliche Wartezeit eines Kunden mindestens so groß wie die in einem $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangensystem mit Ankunftsrate λ ist.

Sei $\Lambda(t)$ die periodische Fortsetzung von $\tilde{\Lambda}(t)$ wie in (2). Dann kann $\Lambda(t)$ zu jedem Zeitpunkt nur genau einen der Werte $\lambda_1, \dots, \lambda_{24}$ annehmen. Es gilt dann, dass

$$\int_0^T \Lambda(t) dt = \int_0^T \lambda_{[t] \% 24} dt = \left\lfloor \frac{T}{24} \right\rfloor \cdot \left(\sum_{i=1}^{24} \lambda_i \right) + \sum_{i=1}^{[T] \% 24} \lambda_i + (T - [T]) \cdot \lambda_{[T] \% 24 + 1}$$

Es bezeichne $\lfloor x \rfloor$ diejenige natürliche Zahl n , für die gilt $n \leq x < n + 1$ (abrunden) und $\%$ bezeichne den Modulo-Operator.

Es folgt wegen $T - \lfloor T \rfloor \in [0, 1)$

$$\begin{aligned}
\lambda &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T \Lambda(t) dt}{T} \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\lfloor \frac{T}{24} \rfloor \cdot \left(\sum_{i=1}^{24} \lambda_i \right) + \sum_{i=1}^{\lfloor T \rfloor \% 24} \lambda_i + (T - \lfloor T \rfloor) \cdot \lambda_{\lfloor T \rfloor \% 24 + 1}}{T} \\
&\leq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{T}{24} \cdot \left(\sum_{i=1}^{24} \lambda_i \right)}{T} + \frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{T} + \frac{\sup_{i \in \{1, \dots, 24\}} \lambda_i}{T} \\
&= \frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{24}
\end{aligned}$$

Des Weiteren ist

$$\begin{aligned}
\lambda &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T \Lambda(t) dt}{T} \\
&= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\lfloor \frac{T}{24} \rfloor \cdot \left(\sum_{i=1}^{24} \lambda_i \right) + \sum_{i=1}^{\lfloor T \rfloor \% 24} \lambda_i + (T - \lfloor T \rfloor) \cdot \lambda_{\lfloor T \rfloor \% 24 + 1}}{T} \\
&\geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{T-1}{24} \cdot \left(\sum_{i=1}^{24} \lambda_i \right)}{T} \\
&= \frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{24}
\end{aligned}$$

Mit dem Einschließungssatz ist also $\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{24}$, was gerade der durchschnittlichen Intensität im Lauf eines Tages entspricht.

Eine Abschätzung nach oben erhält man, indem man $\lambda_{\text{sup}} = \sup_{t \geq 0} \Lambda(t) = \sup_{i \in \{1, \dots, 24\}} \lambda_i$ wählt. Die Werte für $\lambda_1, \dots, \lambda_{24}$ kann man durch Anwendung des Superpositionsprinzips aus den Zählprozessen $\mathcal{N}(k)$ gewinnen, welche die Ankünfte von Flugzeugen vom Typ $k \in K$ zählen. Es sei angenommen, dass die Zählprozesse voneinander unabhängig sind. Diese können mit den gleichen Überlegungen wie oben als inhomogene Poisson-Prozesse modelliert werden. Mit $\Lambda(t) = \sum_{(k)} \Lambda(t)^{(k)}$, $k \in K$ sind dann $\lambda_i = \sum_{(k)} \lambda_i^{(k)}$.

Bei einer derartigen Zusammenfassung kann aufgrund des stochastischen Charakters der Poisson-Prozesse nur eine stochastische Aussage über die Reihenfolge, in der die Flugzeuge eintreffen, gemacht werden.

Um die gefunden Abschätzungen verwenden zu können, muss außerdem noch geprüft werden, ob das Modell mit einer einzigen Bedienstation modelliert werden kann. Sei dazu δ die Strategie, die entscheidet, auf welcher Bahn ein ankommendes Flugzeug landen soll. Wenn es sich dabei um ein Bernoulli-Experiment handelt, das den ursprünglichen Poisson-Prozess aufteilt, sind die resultierenden Prozesse wiederum Poisson-Prozesse (s. z.B. [26, S. 228] und [9, S. 68f.]).

Solche Strategien sind aber nicht realistisch. Praxisnäher sind Strategien, die beispielsweise versuchen, die am wenigsten ausgelastete Landebahn als nächste zu benutzen. In solchen Fällen entstehen jedoch Abhängigkeiten, sodass eine Zerlegung in Poisson-Prozesse i.A. nicht gegeben ist (vgl. [30]). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Flugzeuge aus bestimmten Richtungen nur bestimmten Bahnen zuzuweisen. Beispielsweise werden am MUC i.A. Flugzeuge, die von Norden kommen, auf die Nordbahn und Flugzeuge, die von Süden kommen auf die Südbahn gelotst. Auf diese Weise kann der Flughafen als endliche Menge von Warteschlangen mit jeweils einer Bedienstation aufgefasst werden (s. Abbildung 3.4). Ein Warteschlangensystem dieser Art bezeichnen wir als stabil, wenn jede einzelne Warteschlange stabil ist.

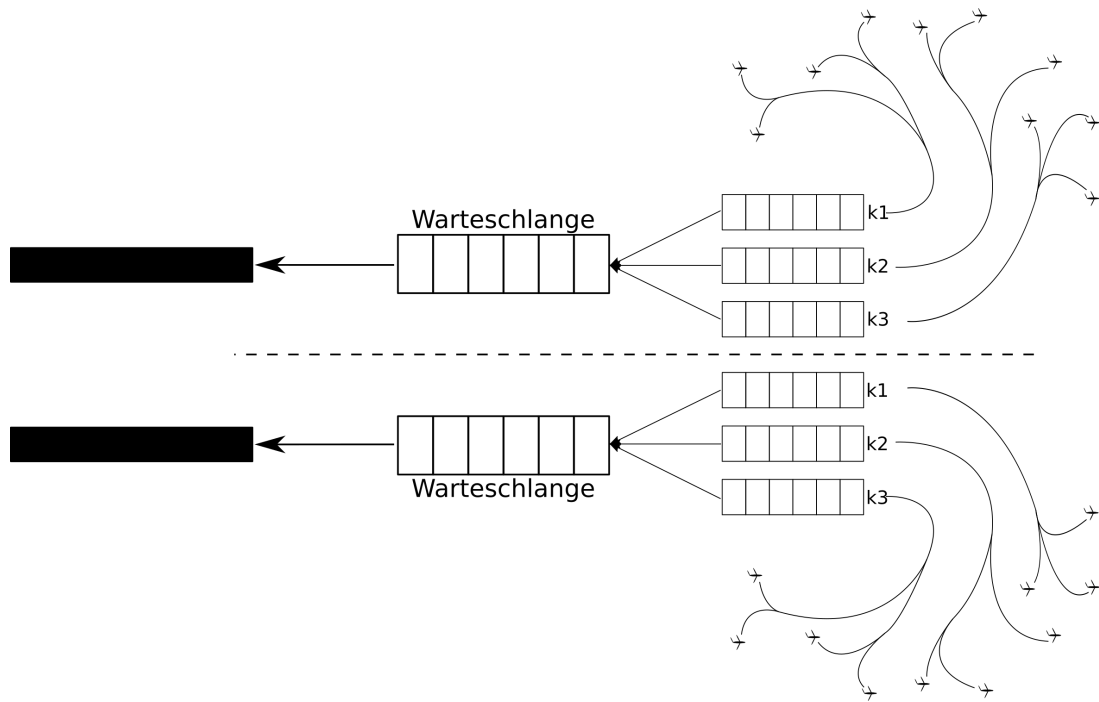


Abbildung 3.4: Beschreibung eines Flughafens durch mehrere Warteschlangensysteme mit jeweils einer Bedienstation

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Ankunftsprozess vereinfacht als homogener Poisson- Prozess dargestellt werden kann. Mit dessen Hilfe können Abschätzungen für den unterstellten inhomogenen Prozess gefunden werden. Mehrere Bahnen können unter bestimmten Voraussetzungen isoliert betrachtet werden. Dabei wird die Warteschlange einer Bahn an der Stelle modelliert, ab der sämtliche Flugzeuge, die auf dieser Bahn landen sollen, sich das Platzrundenverfahren teilen. Die modellierte Warteschlange fällt also nicht mit den Stellen zusammen, an denen die Flugzeuge die Warteschleifen in der Realität fliegen. Andernfalls hätte man bis zu diesem Punkt ein System, bei dem einzelne Flugzeuge aus verschiedenen Richtungen bis zu einem Punkt parallel fliegen und sich erst dann aufreihen müssen.

Abfertigungsprozess

Im Gegensatz zum Ankunftsprozess kann bei der Abfertigung nicht angenommen werden, dass die wartenden Flugzeuge mit einer gleichbleibenden Rate abgearbeitet werden. Vielmehr müssen Staffungsminima eingehalten werden, die von den Flugzeugtypen abhängen. Hinzu kommen typabhängige Platzrunden- und Bahnbelegungszeiten.

Es sei $d_{k,l}^{Staffel}$ der kleinste erlaubte Staffungsabstand den ein Flugzeug vom Typ $k \in K$ einhalten muss (in Minuten), wenn es einem Flugzeug vom Typ $l \in K$ folgt. Der Staffungsabstand hängt von der Masseklasse und der Geschwindigkeit ab, da z.B. ein schneller Flugzeug ein langsames einholen würde, wenn man nur die Masseklasse berücksichtigt. Es sei $d_k^{Bahn} > 0$ die Bahnbelegungszeit des Flugzeugs vom Typ $k \in K$. Setze $d_{k,l} := \max\{d_{k,l}^{Staffel}, d_l^{Bahn}\}$. Dann kann die Bedienzeit des n -ten Flugzeugs mit

$$B_n = d_{n,n+1}$$

Angegeben werden. Die Bedienzeit wird also als diejenige Zeitspanne aufgefasst, die vergehen muss, bis das $(n+1)$ -te Flugzeug frühestens landen könnte. Anstatt die Bedienzeit direkt anzugeben, wird bei Eintreffen des $(n+1)$ -ten Flugzeugs geschaut, wie lange das n -te bedient worden sein muss. Das ist entweder die Bahnbelegungszeit, also die tatsächliche Bedienzeit, oder die Staffungszeit, da diese die Bedienrate beschränkt. Startende Flugzeuge werden an dieser Stelle

ignoriert.

Das nachfolgende Flugzeug kann erst bedient werden, sobald genügend viel Zeit verstrichen ist, sodass es dem Vorausfliegenden in sicherem Abstand folgen kann. Falls diese Zeitspanne nicht verstrichen ist, ergibt sich eine Wartezeit. Es wird dabei unterstellt, dass ein ankommendes Flugzeug durch ein Holding-Verfahren beliebig lange warten kann und mit der Bedienung begonnen werden kann, sobald die Staffelnungszeit verstrichen ist. Es wird außerdem unterstellt, dass für alle Flugzeuge ab einem bestimmten Punkt die gleiche Platzrunde geflogen werden muss und dass die Dauer dafür nur von der Geschwindigkeit, in der sie durchflogen werden kann, abhängt. Die Bedienzeiten sind im Allgemeinen nicht unabhängig, da sie vom jeweils nachfolgenden Flugzeug abhängen. Sie sind aber identisch verteilt, da vorausgesetzt wurde, dass nur der Typ, nicht aber der Zeitpunkt der Ankunft eine Rolle spielen.

Der Abfertigungsprozess ist somit von allgemeiner Natur. Insgesamt folgt damit für das Anflugverfahren, dass es durch endlich viele $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangensysteme dargestellt werden kann. Diese können unabhängig voneinander betrachtet werden.

3.6. $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangen

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, kann das Standardanflugverfahren an einem Flughafen mit Hilfe einer oder mehrerer $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangen modelliert werden. Mit Hilfe der Pollaczek-Khintchine-Gleichung können hierfür Werte für die erwartete Länge der Warteschlange $L^{(q)}$, die erwartete Wartezeit in der Warteschlange $W^{(q)}$, die erwartete Systemgröße L und die erwartete Warteschlangengröße W bestimmt werden. Dafür muss das System im Gleichgewicht sein (s. [8, S. 219f]).

Es sei $\mu_n = \frac{1}{\mathbb{E}[B_n]}$. Wegen der identischen Verteilung gilt dann $\mu_i = \frac{1}{\mathbb{E}[B_i]} = \mu_1 =: \mu \forall i \in \mathbb{N}$ und λ ist wie in (3). Nach Abschnitt 3.3 ist das Warteschlangensystem im Gleichgewicht, wenn $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{\mathbb{E}[B_1]} < 1$ gilt. Die Werte, die sich für $L^{(q)}$, $W^{(q)}$, L und W ergeben, sind in Tabelle 3.2 aufgeführt (vgl. [8, S. 222]).

$L^{(q)}$	$\frac{\lambda^2 \mathbb{E}[B_1^2]}{2(1-\rho)}$
$W^{(q)}$	$\frac{\lambda \mathbb{E}[B_1^2]}{2(1-\rho)}$
L	$\frac{\lambda^2 \mathbb{E}[B_1^2]}{2(1-\rho)} + \rho$
W	$\frac{\lambda \mathbb{E}[B_1^2]}{2(1-\rho)} + \frac{1}{\mu}$

Tabelle 3.2: Effektivitätsmaße für $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlangen (vgl [8])

Da $d_{n,n+1} > 0 \forall n \in \mathbb{N}$ gilt und

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[B_n] &= \mathbb{E}[d_{n,n+1}] \\ \mathbb{E}[B_n^2] &= \mathbb{E}[d_{n,n+1}^2]\end{aligned}$$

Da die Matrix $B^{Staffel}$ endlich ist, gibt es nur endlich viele Möglichkeiten, in denen zwei Flugzeuge aus zwei Richtungen aufeinander folgen. Es sei $\mathbb{P}(k, l)$ die Wahrscheinlichkeit, dass einem Flugzeug vom Typ k eines vom Typ l folgt. Es ist also weiter

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[B_n] &= \sum_{(k,l)} d_{k,l} \cdot \mathbb{P}(k, l) \\ \mathbb{E}[B_n^2] &= \sum_{(k,l)} d_{k,l}^2 \cdot \mathbb{P}(k, l)\end{aligned}$$

Die Aussagen in Tabelle 3.2 sind genau dann anwendbar, wenn $\frac{\sum_{i=1}^{24} \lambda_i}{\sum_{(k,l)} d_{k,l} \cdot \mathbb{P}(k,l)} < 1$ bzw. wenn $\frac{\lambda_{\text{sup}}}{\sum_{(k,l)} d_{k,l} \cdot \mathbb{P}(k,l)} < 1$.

Für die Modellierung eines konkreten Flughafens müssen nur die möglichen, endlichen Werte für $\mathbb{P}(r, k)$, $d_{k,l}$ und λ_i bestimmt werden. Dies ist zum Beispiel mit statistischen Methoden möglich.

4. Beispielhafte Umsetzung am Flughafen London Heathrow

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 3 erarbeitete Modell auf den Flughafen LHR angewendet. Als Datengrundlage dienen dabei die Ankunftsdaten vom 01.08.2018 (vgl. Anhang). Diese Daten wurden aber nicht auf ihre statistische Tauglichkeit hin überprüft, sondern für den prinzipiellen Test des Modells gewählt.

In Abschnitt 4.1 werden die konkreten Parameter des Modells beschrieben. In Abschnitt 4.2 wird auf den Verkehrsmix eingegangen und die Werte für $\mathbb{P}(k, l)$ ermittelt. In Abschnitt 4.3 wird das Ergebnis der Modellierung vorgestellt.

4.1. Modellannahmen

LHR verfügt über zwei Bahnen, wovon eine für Starts und eine für Landungen benutzt wird. Dass die Bahnen einmal am Tag wechseln, soll dabei ignoriert werden. Der Flughafen kann also mithilfe einer $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlange modelliert werden.

Am 01.08.2018 sind insgesamt 42 verschiedene Flugzeugtypen angekommen. Dabei treten gemäß Tabelle 2.1 nur Flugzeuge vom Typ M und H auf. Gemäß Tabelle 2.2 kommen nur Flugzeuge der Kategorie C und D vor. Zur Vereinfachung werden die Flugzeuge daher einer der vier Klassen (M, C), (M, D), (H, C) und (H, D) zugeordnet.

Die Werte für die λ_i können Abbildung 3.3 entnommen werden und sind noch einmal in Anhang A aufgeführt.

Damit ergibt sich als Durchschnitt für die Ankünfte $\lambda = 27,24$ (stundenweise) bzw. $\lambda = 0,45$ (minutenweise).

Zur Berechnung der Abstände $d_{k,l}$ wird angenommen, dass sich Flugzeuge der gleichen Geschwindigkeits-Kategorie mit gleichbleibender Geschwindigkeit bis zur Landung bewegen. Als Geschwindigkeiten werden die Intervallmitten gewählt. Es ergeben sich $v_{(M,C)} = v_{(H,C)} = 126\text{kt}$ und $v_{(M,D)} = v_{(H,D)} = 146\text{kt}$.

Diese Annahme wird an dieser Stelle getroffen, um die Modellierung der Geschwindigkeitsprofile zu vereinfachen. Abbildung 4.1 zeigt die Distanz, ab der alle ankommenden Flugzeuge die gleiche Strecke fliegen müssen. Davor kann, entweder in Form von Warteschleifen oder durch Anpassen der Route, gewartet werden.

Auf dieser Strecke muss ein Mindestabstand eingehalten werden. Tabelle 4.1 gibt an, wie lange ein Flugzeug vom Typ k warten muss, bevor es losfliegen darf, sodass es zum spätest möglichen Zeitpunkt noch ausreichend weit vom vorausfliegenden Flugzeug entfernt ist. Die Stafflungswerte können Tabelle 2.1 entnommen werden. Falls diese dort nicht aufgeführt sind, gelten 2,5 NM (vgl. 2.1.3). Es sei das vorausfliegende Flugzeug vom Typ k und das nachfliegende Flugzeug vom Typ l . Es bezeichne weiter f_k die Dauer, die ein Flugzeug vom Typ $k \in K$ für die gemeinsame Strecke braucht. Unter der Annahme, dass die Geschwindigkeiten konstant sind, ist

$$\begin{aligned} f_{(M,C)} = f_{(H,C)} &= \frac{15\text{NM}}{126\text{kt}} = 7,14 \text{ min} \\ f_{(M,D)} = f_{(H,D)} &= \frac{15\text{NM}}{146\text{kt}} = 6,16 \text{ min} \end{aligned}$$

Tabelle 4.1 gibt an, wie lange die verschiedenen Typen aufeinander warten müssen, damit sie bei Landung des vorausfliegenden Flugzeuges noch den vorgeschriebenen Stafflungsabstand einhalten.

Dabei gilt $d_{k,l}^{\text{Staffel}} = f_k - s_{k,t} \cdot \frac{60}{v_l}$ in Minuten.

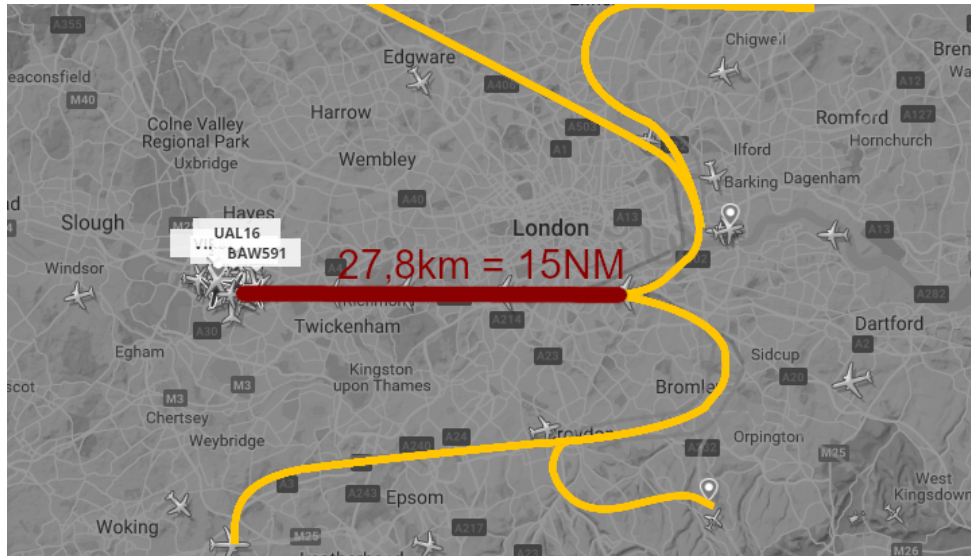


Abbildung 4.1: Betrachtete Flugstrecke

		Vor			
		M,C	M,D	H,C	H,D
Nach	M,C	1,19	0,21	2,38	1,40
	M,D	2,01	1,03	3,03	2,05
	H,C	1,19	0,21	1,90	0,93
	H,D	2,01	1,03	2,62	1,64

Tabelle 4.1: Staffelungsabstände $d_{k,l}^{Staffel}$ am LHR

Die Bahnbelegungszeiten können aus den Daten nicht rekonstruiert werden, da diese nur die Dauern beinhalten, die ein einzelnes Flugzeug von der Landung bis zur Endposition gebraucht hat. Die Zeit auf der Bahn stellt lediglich einen Teil davon dar. Da die Bahn aber nicht für Starts benutzt wird, wird diese auf 60 Sekunden gesetzt. Die Werte für $d_{k,l}$, die sich nach Abschnitt 3.5 ergeben, sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

		Vor			
		M,C	M,D	H,C	H,D
Nach	M,C	1,19	1,00	2,38	1,40
	M,D	2,01	1,03	3,03	2,05
	H,C	1,19	1,00	1,90	1,00
	H,D	2,01	1,03	2,62	1,64

Tabelle 4.2: Effektive Staffelungsabstände $d_{k,l}$ am LHR

4.2. Verkehrsmix

Die Ankünfte nach Klassen pro Stunde für den 01.08.2018 am Flughafen LHR, die sich aus Anhang C ergeben, sind in Anhang B aufgeführt.

Unterstellt man, dass der Typ des nachfolgenden Flugzeugs unabhängig vom vorausfliegenden

ist, ergeben sich im Mittel die in Tabelle 4.3 aufgeführten Wahrscheinlichkeiten dafür, dass zwei Flugzeuge vom Typ k und l aufeinanderfolgen.

	M,C	M,D	H,C	H,D
M,C	0,254	0,053	0,084	0,112
M,D	0,053	0,011	0,018	0,024
H,C	0,084	0,018	0,028	0,037
H,D	0,112	0,024	0,037	0,050

Tabelle 4.3: Werte für $\mathbb{P}(k, l)$ am LHR

4.3. Beschreibung als Warteschlange

Mit den in den beiden vorangegangenen Abschnitten bestimmten Werten können alle in Abschnitt 3.2 beschriebenen Werte berechnet werden. Es sind

- $\lambda = 0.45$
- $\mathbb{E}[B] = \sum_{(k,l) \in K} d_{(k,l)} \cdot \mathbb{P}(k, l) = 1,573$
- $\mathbb{E}[B^2] = \sum_{(k,l) \in K} d_{(k,l)}^2 \cdot \mathbb{P}(k, l) = 2,745$
- $\mu = \frac{1}{\mathbb{E}[B]} = 0.6359$
- $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 0,708$
- $L^{(q)} = 0,95$
- $W^{(q)} = 2,11$
- $L = 1,66$
- $W = 3,69$

Das bedeutet, dass ein eintreffendes Flugzeug im Mittel 1,66 Flugzeuge vor sich findet, wovon 0,95 Flugzeuge warten. Es muss 3,69 Minuten lang im System verbringen und davon 2,11 Minuten lang warten. Zu Spitzenzeiten kommen 50 Flugzeuge pro Stunde. In diesem Fall ist $\rho = \frac{0,83}{0,6359} > 1$ und das System wäre nicht stabil. Das bedeutet, die Lastspitze könnte im Modell nicht dauerhaft durchgehalten werden.

Damit $\rho < 1$ gilt, muss $\lambda < \mu \Leftrightarrow \lambda < 0,6359$ gelten. Dies ist bei 38 Flugzeugen pro Stunde gerade noch so der Fall. Im Modell könnte der Flughafen LHR also 38 Flugzeuge pro Stunde abarbeiten, was fast dem Mittelwert von 06:00 bis 23:00 entspricht (39,05). Lässt man nur die Nachstunden außer acht, kommen im Schnitt 34 Flugzeuge pro Stunde an. In diesem Fall hat ein Flugzeug ca. 5 Flugzeuge vor sich, wovon 4 warten. Es muss 8,7 Minuten im System verbringen und davon 7,1 Minuten lang warten. In dieser Konfiguration könnten 680 Flugzeuge am Tag landen.

Abbildung 4.2 zeigt die Länge des Systems bzw. der Warteschlange und die Wartedauer bzw. Dauer im System abhängig von den Ankünften pro Stunde.

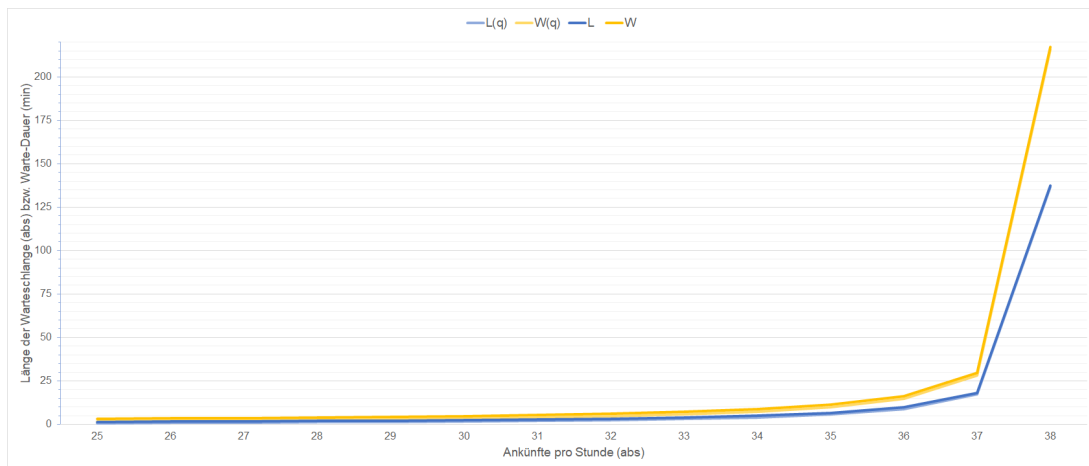


Abbildung 4.2: Länge des Systems in Abhängigkeit von den Ankünften pro Stunde

5. Schluss

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst (s. Abschnitt 5.1). Anschließend werden diese im Kontext der Problemstellung und des Ziels der Arbeit bewertet (s. Abschnitt 5.2). In Abschnitt 5.3 wird ein Ausblick gegeben, wie die Problemstellung durch weitere Arbeiten untersucht werden könnte.

5.1. Zusammenfassung

Beim Lotsen landender Flugzeuge werden Platzrundenverfahren verwendet, um dafür zu sorgen, den Durchsatz zu maximieren, ohne die Sicherheit der Passagiere zu gefährden. Diese Arbeit beschäftigte sich mit den Möglichkeiten, solche Verfahren mathematisch zu modellieren. Mit einem Modell können dann Fragen, welche bspw. die durchschnittliche Wartezeit oder die Kapazität eines Flughafens betreffen, untersucht werden.

In Kapitel 2 wurde das Standardanflugverfahren beschrieben, das bei hohem Verkehrsaufkommen u.a. am Flughafen London Heathrow verwendet wird. Zusammengefasst kann man es als Warteschlange betrachten, in die sich ankommende Flugzeuge einreihen. Dabei müssen Staffeilungswerte eingehalten werden.

In Kapitel 3 wurde auf Aspekte der Warteschlangentheorie eingegangen, womit sich das Standardanflugverfahren als Warteschlange mathematisch fassen lässt. Um jedoch analytische Aussagen über das Modell treffen zu können, sind eine Reihe von Einschränkungen nötig gewesen. Konzentriert man sich bei der Modellierung auf den Abfertigungsprozess, lässt sich ein Flughafen als $M/G/1/\infty/FCFS$ -Warteschlange auffassen. Um einen konkreten Flughafen zu modellieren, benötigt man nur die Werte für $\mathbb{P}(k, l)$, $d_{k,l}$ und λ_i .

In Kapitel 4 wurde mit Hilfe einer solchen Warteschlange der Flughafen London Heathrow modelliert. Die dafür verwendeten Daten sind statistisch nicht aussagekräftig. Sie zeigen aber exemplarisch, dass das Modell trotz seiner Einschränkungen und Vereinfachungen die Aussage, dass der Flughafen an seinen Kapazitätsgrenzen angelangt ist, bestätigt.

5.2. Fazit

Die Warteschlangentheorie und ihre Methoden sind in der Literatur gut untersucht. Auf manche Modelle können diese Methoden direkt angewendet werden. Es ist außerdem möglich, einzelne Aspekte eines Warteschlangensystems detailliert zu modellieren. Beispielsweise kann ein Ankunftsprozess modelliert werden, bei dem mehrere Ankünfte gleichzeitig möglich sind. Es kann aber auch ein Abfertigungsprozess modelliert werden, der Abhängigkeiten zwischen ankommenden Kunden berücksichtigt. Sind für das betrachtete System aber nicht nur einzelne Komponenten maßgeblich, geraten die Methoden der Warteschlangentheorie in analytischer Hinsicht an ihre Grenzen.

Liegen den Abfertigungsprozessen zum Beispiel inhomogene Poisson-Prozesse zugrunde, rät die Literatur bereits zur numerischen Simulation. Im Kontext von ankommenden Flugzeugen an einem Flughafen kann es mehrere solcher Komponenten geben. Wie in der Arbeit gezeigt wurde, erscheint ein inhomogener Poisson-Prozess bei der Abfertigung plausibel. Gleichzeitig ist die FCFS-Strategie in der Wirklichkeit nicht immer gegeben. Fluglotsen greifen steuernd in die Reihenfolge, in der Flugzeuge landen, ein. Unterstellte Unabhängigkeiten, z.B. bei den Inkrementen des Ankunftsprozesses, sind in der Wirklichkeit nicht o.B.d.A. gegeben.

Abschließend lässt sich festhalten, dass für die Untersuchung einzelner Flughäfen eine numerische

Simulation der Warteschlange oder des Systems in Erwägung gezogen werden sollte. Das Warteschlangenmodell stößt hier schnell an seine Grenzen. Mit modernen Rechnern könnten bspw. zu gegebenen Daten verschiedene Ankunftsreihenfolgen durchprobiert werden.

5.3. Ausblick

An diese Arbeit anschließend könnten einzelne Aspekte des Warteschlangensystems für das Standardanflugverfahren genauer modelliert werden. Dies könnten beispielsweise sein

- Gruppenankünfte
- Einbeziehung startender Flugzeuge auf der gleichen Bahn
- Situationen, in denen mehrere Bahnen nicht parallel unabhängig betrieben werden können (z.B. bei sich kreuzenden Bahnen wie auf dem San Francisco International Airport)

Vielversprechender erscheint hingegen, wenn man einzelne Flughäfen betrachten will, für ankommende Flugzeuge an einem Flughafen eine numerische Simulation zu entwickeln. Eine derartige Simulation könnte flexibel genug sein, um andere als das Standardanflugverfahren zu betrachten. Mit anderen Verfahren ließe sich womöglich ein größerer Durchsatz erzielen. Es könnten auch verschiedene Lotsen-Strategien implementiert werden, die sich stochastisch nicht einfach beschreiben lassen oder auf die Anflugkapazitäten (vgl. Abschnitt 2.3) eingehen. Die Beschreibung einzelner Komponenten des Modells, beispielsweise die Ankünfte, könnte dabei mit Elementen der Warteschlangentheorie erfolgen.

6. Literatur

- [1] J. Reichmuth and P. Berster, *Past and Future Developments of the Global Air Traffic*, M. Kaltschmitt and U. Neuling, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_2
- [2] H. Mensen, *Betrieb und Technik von Verkehrsflugzeugen*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] U.S. Department of Transportation, *Federal Aviation Administration - Aeronautical Information Manual*.
- [4] London Heathrow. Arrival Flight Patterns. [Online]. Available: <https://www.heathrow.com/noise/heathrow-operations/arrival-flight-paths>
- [5] K.-H. Waldmann and U. M. Stocker, *Stochastische Modelle - Eine anwendungsorientierte Einführung*, 2nd ed. Springer, 2013.
- [6] I. C. A. Organization, *Air Traffic Management: procedures for air navigation services (Doc 4444)*. International civil aviation organization, 2016.
- [7] ICAO, *Aircraft Operations - Volume I Flight Procedures*, 5th ed., 2006.
- [8] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 2008.
- [9] V. V. Kalashnikov, "Mathematical methods in queueing theory," 1994.
- [10] ICAO, "ICAO Long-Term Traffic Forecasts - Passenger and Cargo," ICAO, Tech. Rep., 2016.
- [11] BBC. (2018) Heathrow Airport: Cabinet approves new runway plan. [Online]. Available: <https://www.bbc.co.uk/news/uk-politics-44357580>
- [12] J. Koenen. (2018) Flughafen München kämpft weiter um die dritte Startbahn. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/airport-mit-rekordzahlen-flughafen-muenchen-kaempft-weiter-um-die-dritte-startbahn/21162894.html>
- [13] DFS, "LIZ Annual Summary 2017," 2017.
- [14] H. Mensen, *Moderne Flugsicherung: Organisation, Verfahren, Technik*. Springer-Verlag, 2014.
- [15] (2012) Durchführungsverordnung (EU) Nr. 923/2012. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0923>
- [16] ICAO. About ICAO. [Online]. Available: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>
- [17] ICAO. ICAO Member States. [Online]. Available: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>

- [18] NASA. Wake Vortex Research. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/about/Organizations/Technology/Facts/TF-2004-14-DFRC.html>
- [19] Bundesamt für Justiz, “Verordnung über die Flugsicherungsausrüstung der Luftfahrzeuge,” 2016.
- [20] London Heathrow. Runway alteration programme - 2018 landings. [Online]. Available: https://www.heathrow.com/file_source/HeathrowNoise/Static/Runway_Alteration_Programme_2018.pdf
- [21] N. Klussmann, *Lexikon der Luftfahrt*. SPRINGER, 2018.
- [22] Boeing (Airport Compatibility Engineering). FAA Reference Code and Approach Speeds for Boeing Aircraft. [Online]. Available: <https://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/arcandapproachsheets.pdf>
- [23] Airbus. Airbus Commercial Aircraft Categories. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/techdata/general-information/Airbus-Commercial-Aircraft-ICAO-ARC-FAA-ADG-App-Cat.pdf>
- [24] SKYbrary. Approach Speed Categorisation. [Online]. Available: https://www.skybrary.aero/index.php/Approach_Speed_Categorisation
- [25] F. Baccelli and P. Bremaud, *Elements of Queueing Theory*, 2nd ed. Springer, 2003.
- [26] D. Baum, *Grundlagen der Warteschlangentheorie*. Springer, 2013.
- [27] N. Bäuerle, “Markov-Ketten, karlsruhe: Vorlesungs-Skript,” 2012.
- [28] D. P. Heyman, “On Ross’s conjectures about queues with non-stationary Poisson arrivals,” *Journal of Applied Probability*, vol. 19, no. 1, pp. 245–249, 1982.
- [29] W.-P. Wang, D. Tipper, and S. Banerjee, “A simple approximation for modeling nonstationary queues,” in *INFOCOM’96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. Networking the Next Generation. Proceedings IEEE*, vol. 1. IEEE, 1996, pp. 255–262.
- [30] M. Rohrhofer and S. Achttert, “Untersuchung von Strategien zur Koordination von Flugzeugen an eine oder zwei Landebahnen,” 2010.

Appendices

A. λ_i für LHR am 01.08.2018

i	Ankünfte in der Stunde i (λ_i)	Ankünfte in %
1	0	0%
2	0	0%
3	0	0%
4	0	0%
5	6	1%
6	7	1%
7	50	7%
8	41	6%
9	45	7%
10	38	6%
11	41	6%
12	38	6%
13	40	6%
14	38	6%
15	34	5%
16	40	6%
17	38	6%
18	43	6%
19	42	6%
20	45	7%
21	42	6%
22	31	5%
23	18	3%
24	4	1%
SUMME	681	100%

B. Ankünfte nach Klassen pro Stunde am 01.08.2018 am Flughafen LHR

	M	M	H	H	
Stunde	C	D	C	D	Summe
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	1	5	6
5	0	0	5	2	7
6	1	0	21	28	50
7	19	4	9	9	41
8	26	5	5	9	45
9	18	3	6	11	38
10	19	3	11	8	41
11	14	5	9	10	38
12	23	2	6	9	40
13	18	6	7	7	38
14	18	3	2	11	34
15	19	5	6	10	40
16	27	2	4	5	38
17	24	5	4	10	43
18	26	4	10	2	42
19	28	4	3	10	45
20	26	10	2	4	42
21	22	6	2	1	31
22	12	5	0	1	18
23	3	0	1	0	4
24	0	0	0	0	0
Summe	343	72	114	152	681
W'keit	50%	11%	17%	22%	

C. Ankunftsdaten LHR (01.08.2018)

City	Equipment	Arrival Time	Direction	Type	APC
Hong Kong	Boeing 787-9	04:33:00	NO	H	D
Hong Kong	Airbus A380-800 Passenger	04:35:00	NO	H	C
Singapore	Boeing 777-300ER	04:39:00	NO	H	D
Perth	Boeing 787-9	04:43:00	SO	H	D
Hong Kong	Boeing 777-300ER	04:49:00	NO	H	D
Hong Kong	Boeing 777-300ER	04:56:00	NO	H	D
Johannesburg	Airbus A380-800 Passenger	05:02:00	SO	H	C
Lagos	Boeing 747-400 Passenger	05:08:00	SO	H	D
Singapore	Airbus A380-800 Passenger	05:23:00	NO	H	C
Kuala Lumpur	Boeing 787-9	05:26:00	NO	H	D
Kuala Lumpur	Airbus A380-800 Passenger	05:30:00	NO	H	C
Singapore	Airbus A380-800 Passenger	05:35:00	NO	H	C

Chicago	Boeing 767-300 Passenger	05:50:00	NW	H	C
Dubai	Boeing 777-200 / 200ER	06:02:00	SO	H	C
Hong Kong	Boeing 777-300ER	06:03:00	NO	H	D
Nairobi	Boeing 747-400 Passenger	06:03:00	SO	H	D
Shanghai	Boeing 777-200 / 200ER	06:06:00	NO	H	C
Mumbai	Boeing 777-300ER	06:07:00	NO	H	D
Abu Dhabi	Boeing 787-9	06:07:00	SO	H	D
Newark	Boeing 787-9	06:08:00	NW	H	D
New York	Boeing 777-300ER	06:09:00	NW	H	D
Johannesburg	Boeing 787-9	06:10:00	SO	H	D
Tokyo	Boeing 787-8	06:11:00	NO	H	D
Toronto	Boeing 787-9	06:12:00	NW	H	D
Bahrain	Boeing 777-200 / 200ER	06:14:00	SO	H	C
Riyadh	Boeing 777-200 / 200ER	06:15:00	SO	H	C
New York	Boeing 747-400 Passenger	06:15:00	NW	H	D
Muscat	Boeing 787-9	06:17:00	SO	H	D
Raleigh/Durham	Boeing 777-200 / 200ER	06:18:00	NW	H	C
Cape Town	Boeing 747-400 Passenger	06:19:00	SO	H	D
Newark	Boeing 767-300 Passenger	06:20:00	NW	H	C
Dulles	Airbus A330-300	06:20:00	NW	H	C
Boston	Boeing 747-400 Passenger	06:21:00	NW	H	D
Dallas	Boeing 777-300ER	06:23:00	NW	H	D
Johannesburg	Airbus A330-300	06:24:00	SO	H	C
Toronto	Boeing 777-300ER	06:25:00	NW	H	D
Accra	Boeing 747-400 Passenger	06:26:00	SO	H	D
Chicago	Boeing 747-400 Passenger	06:27:00	NW	H	D
Dulles	Boeing 747-400 Passenger	06:28:00	NW	H	D
Mumbai	Boeing 777-200 / 200ER	06:30:00	NO	H	C
Dubai	Boeing 787-8	06:31:00	SO	H	D
Chicago	Boeing 787-8	06:32:00	NW	H	D
Philadelphia	Boeing 747-400 Passenger	06:33:00	NW	H	D
Dulles	Boeing 777-200 / 200ER	06:34:00	NW	H	C
Detroit	Airbus A330-200	06:35:00	NW	H	C
Addis Ababa	Airbus A350-900	06:36:00	SO	H	C
Buenos Aires	Boeing 777-200 / 200ER	06:38:00	SW	H	C
Miami	Boeing 747-400 Passenger	06:39:00	NW	H	D
Bahrain	Boeing 787-9	06:40:00	SO	H	D
Singapore	Airbus A380-800 Passenger	06:41:00	NO	H	C
New York	Boeing 747-400 Passenger	06:42:00	NW	H	D
Montreal	Boeing 777-300ER	06:43:00	NW	H	D
Newark	Boeing 767-400 Passenger	06:45:00	NW	H	D
New York	Airbus A330-300	06:46:00	NW	H	C
Sao Paulo	Boeing 777-300ER	06:47:00	SW	H	D
Copenhagen	Airbus A320	06:48:00	NO	M	C
Abu Dhabi	Airbus A380-800 Passenger	06:49:00	SO	H	C
Houston	Boeing 777-200 / 200ER	06:50:00	NW	H	C
Delhi	Airbus A330-200	06:52:00	NO	H	C
New York	Airbus A330-300	06:52:00	NW	H	C

Boston	Boeing 767-332(ER) Passenger	06:54:00	NW	H	C
San Francisco	Boeing 777-300ER	06:56:00	NW	H	D
New York	Airbus A330-200	06:59:00	NW	H	C
Philadelphia	Airbus A330	07:00:00	NW	H	C
Johannesburg	Boeing 747-400 Passenger	07:02:00	SO	H	D
St. John s	Boeing 737MAX 8 Passenger	07:04:00	NW	M	C
St. Johns	Boeing 737MAX 8 Passenger	07:04:00	NW	M	C
Ho Chi Minh City	Boeing 787-9	07:05:00	NO	H	D
Newcastle	Airbus A319	07:07:00	NW	M	C
Basel, Switzerland/Mulhouse	Airbus A319	07:08:00	SO	M	C
Bangkok	Boeing 777-300ER	07:10:00	NO	H	D
New York	Boeing 747-400 Passenger	07:11:00	NW	H	D
Brussels	Airbus A319	07:13:00	SO	M	C
Lyon	Airbus A320	07:14:00	SO	M	C
Singapore	Airbus A380-800 Passenger	07:18:00	NO	H	C
Paris	Airbus A319	07:19:00	SO	M	C
Moscow	Airbus A321	07:20:00	NO	M	D
New York	Boeing 777-200 / 200ER	07:22:00	NW	H	C
Seattle	Boeing 787-9	07:23:00	NW	H	D
Dubai	Airbus A380-800 Passenger	07:25:00	SO	H	C
Delhi	Boeing 787-8	07:27:00	NO	H	D
Miami	Boeing 777-300ER	07:29:00	NW	H	D
Amsterdam	Boeing 737-800 (winglets) Passenger/BBJ2	07:30:00	NO	M	D
Dusseldorf	Airbus A320 (sharklets)	07:32:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A321	07:33:00	NO	M	D
Minneapolis	Boeing 767-332(ER) Passenger	07:34:00	NW	H	C
Houston	Boeing 777-200 / 200ER	07:36:00	NW	H	C
Miami	Airbus A330-300	07:37:00	NW	H	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	07:39:00	SO	M	C
Edinburgh	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	07:40:00	NW	M	C
Geneva	Airbus A320	07:41:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	07:43:00	NO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	07:44:00	NW	M	C
Zurich	Airbus A319	07:45:00	SO	M	C
Belfast	Airbus A320	07:46:00	NW	M	C
Berlin	Airbus A319 (sharklets)	07:48:00	NO	M	C
Dusseldorf	Airbus A319	07:49:00	SO	M	C
Zurich	Airbus A320	07:50:00	SO	M	C
Gothenburg	Airbus A321	07:51:00	NO	M	D

Amsterdam	Airbus A320	07:52:00	NO	M	C
New York	Boeing 747-400 Passenger	07:53:00	NW	H	D
New York	Boeing 787-9	07:55:00	NW	H	D
Charlotte	Airbus A330	07:56:00	NW	H	C
Atlanta	Airbus A330-200 Freighter	07:58:00	NW	H	C
Prague	Airbus A320	08:00:00	SO	M	C
Manchester	Airbus A320	08:01:00	NW	M	C
Glasgow	Airbus A319	08:02:00	NW	M	C
Munich	Airbus A321	08:03:00	SO	M	D
Frankfurt	Airbus A319	08:05:00	SO	M	C
Edinburgh	Boeing 767 Passenger	08:06:00	NW	H	C
Munich	Airbus A319	08:07:00	SO	M	C
Vienna	Airbus A321	08:08:00	SO	M	D
Atlanta	Airbus A340-600	08:10:00	NW	H	D
New York	Boeing 787-9	08:11:00	NW	H	D
Copenhagen	Airbus A321	08:13:00	NO	M	D
Stuttgart	Airbus A319	08:14:00	SO	M	C
Aberdeen	Airbus A319	08:15:00	NW	M	C
Milan	Airbus A320	08:17:00	SO	M	C
Madrid	Airbus A320 (sharklets)	08:18:00	SW	M	C
Nice	Airbus A320	08:19:00	SO	M	C
Chicago	Boeing 767-300 Passenger	08:20:00	NW	H	C
Philadelphia	Airbus A330	08:21:00	NW	H	C
Paris	Airbus A320 (sharklets)	08:24:00	SO	M	C
Barcelona	Airbus A320 (sharklets)	08:25:00	SO	M	C
Geneva	Bombardier CS300	08:26:00	SO	M	C
Cork	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	08:27:00	NW	M	C
Doha	Airbus A380-800 Passenger	08:29:00	SO	H	C
Cologne	Airbus A319	08:31:00	SO	M	C
Shannon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	08:32:00	NW	M	C
Chicago	Boeing 787-8	08:33:00	NW	H	D
New York	Boeing 747-400 Passenger	08:34:00	NW	H	D
Dallas	Boeing 747-400 Passenger	08:36:00	NW	H	D
Toronto	Boeing 777-300ER	08:38:00	NW	H	D
Boston	Boeing 747-400 Passenger	08:40:00	NW	H	D
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	08:41:00	NW	M	C
Newark	Boeing 767-400 Passenger	08:43:00	NW	H	D
Venice	Airbus A320	08:44:00	SO	M	C
Copenhagen	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	08:45:00	NO	M	C
Aberdeen	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	08:46:00	NW	M	C
Budapest	Airbus A320	08:47:00	SO	M	C
Amsterdam	Boeing 737-800 (winglets) Passenger/BBJ2	08:49:00	NO	M	D
Dublin	Airbus A319	08:50:00	NW	M	C

New York	Boeing 777-200 / 200ER	08:51:00	NW	H	C
Montreal	Boeing 787-8	08:53:00	NW	H	D
Vienna	Airbus A320 (sharklets)	08:54:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A321	08:55:00	NO	M	D
Helsinki	Airbus A320	08:57:00	NO	M	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	08:58:00	SO	M	C
Milan	Airbus A319	08:59:00	SO	M	C
Oslo	Airbus A320	09:00:00	NO	M	C
Glasgow	Airbus A320	09:01:00	NW	M	C
Newark	Boeing 777-200 / 200ER	09:03:00	NW	H	C
Helsinki	Airbus A350-900	09:04:00	NO	H	C
Oslo	Boeing 737-700 Passenger	09:05:00	NO	M	C
Stockholm	Airbus A319	09:07:00	NO	M	C
Baltimore	Boeing 787-8	09:08:00	NW	H	D
Boston	Airbus A330-300	09:10:00	NW	H	C
Bologna	Airbus A320	09:12:00	SO	M	C
Moscow	Airbus A321	09:13:00	NO	M	D
Warsaw	Boeing 737MAX 8 Passenger	09:14:00	NO	M	C
Toulouse	Airbus A320	09:15:00	SO	M	C
Denver	Boeing 787-8	09:17:00	NW	H	D
Halifax	Boeing 737MAX 8 Passenger	09:18:00	NW	M	C
Edinburgh	Airbus A320	09:20:00	NW	M	C
Rome	Airbus A321	09:21:00	SO	M	D
Ahmedabad	Boeing 787-8	09:22:00	SO	H	D
Istanbul	Boeing 777-300ER	09:24:00	SO	H	D
Austin	Boeing 747-400 Passenger	09:25:00	NW	H	D
Athens	Airbus A320	09:27:00	SO	M	C
Miami	Boeing 777-300ER	09:29:00	NW	H	D
Madrid	Airbus A320 (sharklets)	09:35:00	SW	M	C
Malta	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	09:36:00	SO	M	C
Salt Lake City	Boeing 767-332(ER) Passenger	09:37:00	NW	H	C
Munich	Airbus A321	09:38:00	SO	M	D
Bucharest	Airbus A320	09:40:00	SO	M	C
Los Angeles	Boeing 787-9	09:41:00	NW	H	D
Calgary	Boeing 787-9	09:43:00	NW	H	D
New York	Airbus A340-600	09:44:00	NW	H	D
Boston	Boeing 777-200 / 200ER	09:46:00	NW	H	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	09:47:00	SO	M	C
Brussels	Airbus A319	09:49:00	SO	M	C
Stockholm	Boeing (Douglas) MD-80	09:51:00	NO	M	C
New York	Boeing 777-300ER	09:52:00	NW	H	D
Newcastle	Airbus A320	09:54:00	NW	M	C
Lisbon	Airbus A320	09:55:00	SW	M	C
Toronto	Boeing 787-9	09:57:00	NW	H	D
Los Angeles	Airbus A380-800 Passenger	09:59:00	NW	H	C

Newark	Boeing 767-300 Passenger	10:01:00	NW	H	C
Belfast	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	10:02:00	NW	M	C
Dublin	Airbus A319	10:04:00	NW	M	C
Nashville	Boeing 787-8	10:05:00	NW	H	D
Brussels	Airbus A320	10:07:00	SO	M	C
Ottawa	Boeing 767-300 Passenger	10:08:00	NW	H	C
Newark	Airbus A330-300	10:09:00	NW	H	C
Tel Aviv-Yafo	Boeing 777-200 / 200ER	10:11:00	SO	H	C
Chicago	Airbus A380-800 Passenger	10:14:00	NW	H	C
Lisbon	Airbus A319	10:15:00	SW	M	C
Edinburgh	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	10:17:00	NW	M	C
Belfast	Airbus A319	10:18:00	NW	M	C
Edinburgh	Airbus A319	10:19:00	NW	M	C
Lyon	Airbus A320	10:20:00	SO	M	C
Madrid	Airbus A321 (sharklets)	10:22:00	SW	M	D
Stavanger	Boeing 737-700 Passenger	10:22:00	NO	M	C
Amsterdam	Boeing 737-800 (winglets) Passenger/BBJ2	10:24:00	NO	M	D
Paris	Airbus A319	10:25:00	SO	M	C
Dallas	Boeing 777-300ER	10:26:00	NW	H	D
Manchester	Airbus A319	10:28:00	NW	M	C
New York	Boeing 777-200 / 200ER	10:30:00	NW	H	C
Dulles	Boeing 787-8	10:31:00	NW	H	D
New York	Airbus A330-200	10:32:00	NW	H	C
Kuwait	Boeing 777-300ER	10:34:00	SO	H	D
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	10:36:00	NW	M	C
Geneva	Airbus A320	10:37:00	SO	M	C
San Francisco	Boeing 747-400 Passenger	10:38:00	NW	H	D
Dulles	Boeing 747-400 Passenger	10:39:00	NW	H	D
Amsterdam	Boeing 767-300 Passenger	10:41:00	NO	H	C
Paris	Airbus A319	10:43:00	SO	M	C
Glasgow	Airbus A319	10:44:00	NW	M	C
Newark	Boeing 767-300 Passenger	10:45:00	NW	H	C
Detroit	Boeing 767-332(ER) Passenger	10:47:00	NW	H	C
Beirut	Airbus A321	10:49:00	SO	M	D
Charlotte	Airbus A330	10:50:00	NW	H	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	10:52:00	SO	M	C
Phoenix	Boeing 747-400 Passenger	10:53:00	NW	H	D
Mumbai	Boeing 787-8	10:55:00	NO	H	D
Istanbul	Airbus A320	10:57:00	SO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	10:58:00	NW	M	C
Zurich	Airbus A319	10:59:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A319	11:00:00	NO	M	C
Amman	Airbus A321	11:01:00	SO	M	D

Miami	Boeing 747-400 Passenger	11:03:00	NW	H	D
Los Angeles	Boeing 777-300ER	11:06:00	NW	H	D
Vancouver	Boeing 787-9	11:08:00	NW	H	D
Houston	Boeing 777-200 / 200ER	11:10:00	NW	H	C
Chicago	Boeing 767-300 Passenger	11:12:00	NW	H	C
Barcelona	Airbus A320 (sharklets)	11:13:00	SO	M	C
Zurich	Bombardier CS300	11:14:00	SO	M	C
Chennai	Boeing 787-8	11:15:00	NO	H	D
Atlanta	Boeing 777-200 / 200ER	11:18:00	NW	H	C
Dusseldorf	Airbus A319	11:19:00	SO	M	C
Athens	Airbus A321	11:20:00	SO	M	D
Los Angeles	Boeing 787-9	11:21:00	NW	H	D
Houston	Boeing 777-200 / 200ER	11:24:00	NW	H	C
Algiers	Boeing 737-800 Passenger	11:26:00	SO	M	D
Doha	Boeing 777-300ER	11:28:00	SO	H	D
Vienna	Airbus A320	11:30:00	SO	M	C
Denver	Boeing 747-400 Passenger	11:31:00	NW	H	D
Hanover	Airbus A320	11:33:00	NO	M	C
San Francisco	Boeing 787-9	11:34:00	NW	H	D
Edinburgh	Boeing 767 Passenger	11:36:00	NW	H	C
Tehran	Boeing 777-200 / 200ER	11:38:00	SO	H	C
Toronto	Boeing 777-300ER	11:39:00	NW	H	D
Cairo	Boeing 787-9	11:40:00	SO	H	D
Brussels	Airbus A319	11:42:00	SO	M	C
Luxembourg	Airbus A320	11:43:00	SO	M	C
Atlanta	Airbus A330-200	11:45:00	NW	H	C
Copenhagen	Airbus A319	11:46:00	NO	M	C
Berlin	Airbus A321	11:47:00	NO	M	D
Marseille	Airbus A320	11:49:00	SO	M	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	11:50:00	SO	M	C
Amsterdam	Airbus A321	11:51:00	NO	M	D
Glasgow	Airbus A319	11:53:00	NW	M	C
Billund	Airbus A320	11:54:00	NO	M	C
Toulouse	Airbus A319	11:55:00	SO	M	C
Beirut	Airbus A330-200	11:56:00	SO	H	C
Los Angeles	Boeing 777-200 / 200ER	11:58:00	NW	H	C
Chicago	Boeing 787-8	12:00:00	NW	H	D
Los Angeles	Boeing 787-9	12:01:00	NW	H	D
Moscow	Airbus A330-300	12:03:00	NO	H	C
Rome	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	12:05:00	SO	M	C
Dublin	Airbus A320	12:06:00	NW	M	C
Stuttgart	Airbus A319	12:07:00	SO	M	C
Leeds	Airbus A319	12:09:00	NW	M	C
Gothenburg	Airbus A319	12:10:00	NO	M	C
Madrid	Boeing 767-300 Passenger	12:11:00	SW	H	C
Reykjavik	Boeing 757-300 Passenger	12:13:00	NW	M	D
Seattle	Boeing 747-400 Passenger	12:15:00	NW	H	D
Belgrade	Airbus A319	12:15:00	SO	M	C

Dubai	Airbus A380-800 Passenger	12:18:00	SO	H	C
Aberdeen	Airbus A319	12:20:00	NW	M	C
Basel, Switzerland/Mulhouse	Airbus A319	12:21:00	SO	M	C
Munich	Airbus A320 (sharklets)	12:22:00	SO	M	C
Geneva	Airbus A319	12:23:00	SO	M	C
Prague	Airbus A320	12:24:00	SO	M	C
Abu Dhabi	Airbus A380-800 Passenger	12:26:00	SO	H	C
Jeddah	Boeing 787-9	12:27:00	SO	H	D
Frankfurt	Airbus A319	12:29:00	SO	M	C
Nice	Airbus A321	12:32:00	SO	M	D
Hyderabad	Boeing 787-8	12:33:00	NO	H	D
Los Angeles	Boeing 787-9	12:35:00	NW	H	D
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	12:37:00	NW	M	C
Munich	Airbus A320 (sharklets)	12:38:00	SO	M	C
Kuwait	Boeing 777-200 / 200ER	12:39:00	SO	H	C
Bengaluru	Boeing 777-200 / 200ER	12:41:00	SO	H	C
Cork	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	12:43:00	NW	M	C
Milan	Airbus A320	12:44:00	SO	M	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	12:45:00	SO	M	C
Beijing	Boeing 777-300ER	12:47:00	NO	H	D
Bilbao	Airbus A320 (sharklets)	12:48:00	SW	M	C
Zurich	Airbus A319	12:49:00	SO	M	C
Stockholm	Airbus A319	12:50:00	NO	M	C
Barcelona	Airbus A320 (sharklets)	12:51:00	SO	M	C
Tokyo	Boeing 777-300ER	12:53:00	NO	H	D
Lisbon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	12:54:00	SW	M	C
Milan	Airbus A320	12:56:00	SO	M	C
Tel Aviv-Yafo	Boeing 787-9	12:57:00	SO	H	D
Dallas	Boeing 777-300ER	13:00:00	NW	H	D
Cairo	Boeing 777-300ER	13:01:00	SO	H	D
Oslo	Airbus A321	13:03:00	NO	M	D
Vienna	Airbus A320 (sharklets)	13:04:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A319	13:06:00	NO	M	C
Doha	Airbus A380-800 Passenger	13:07:00	SO	H	C
Manchester	Airbus A319	13:09:00	NW	M	C
Tel Aviv-Yafo	Boeing 777-200 / 200ER	13:10:00	SO	H	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	13:12:00	NW	M	C
Rio De Janeiro	Boeing 787-8	13:14:00	SW	H	D
Warsaw	Airbus A320 (sharklets)	13:16:00	NO	M	C
Madrid	Airbus A321	13:17:00	SW	M	D
Edinburgh	Airbus A321	13:18:00	NW	M	D
Glasgow	Airbus A321	13:21:00	NW	M	D
Shannon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	13:23:00	NW	M	C

Stockholm	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	13:25:00	NO	M	C
Bologna	Airbus A321	13:27:00	SO	M	D
Bucharest	Airbus A318	13:29:00	SO	M	C
Paris	Airbus A320	13:29:00	SO	M	C
Calgary	Boeing 787-9	13:32:00	NW	H	D
Dubai	Boeing 777-200 / 200ER	13:32:00	SO	H	C
Lisbon	Airbus A320 (sharklets)	13:34:00	SW	M	C
Salzburg	Airbus A320 (sharklets)	13:36:00	SO	M	C
Zagreb	Airbus A320	13:37:00	SO	M	C
San Francisco	Airbus A380-800 Passenger	13:39:00	NW	H	C
Geneva	Bombardier CS300	13:40:00	SO	M	C
Amsterdam	Embraer 175	13:41:00	NO	M	C
Munich	Airbus A321	13:42:00	SO	M	D
San Francisco	Boeing 777-200 / 200ER	13:44:00	NW	H	C
Santiago	Boeing 787-9	13:45:00	SW	H	D
San Francisco	Airbus A340-600	13:47:00	NW	H	D
Vancouver	Airbus A380-800 Passenger	13:49:00	NW	H	C
Stuttgart	Airbus A319	13:51:00	SO	M	C
Los Angeles	Boeing 777-300ER	13:52:00	NW	H	D
Zurich	Airbus A319	13:54:00	SO	M	C
Rome	Airbus A320	13:55:00	SO	M	C
Abuja	Boeing 777-200 / 200ER	13:57:00	SO	H	C
Aberdeen	Airbus A320	13:59:00	NW	M	C
Geneva	Airbus A319	14:01:00	SO	M	C
Pisa	Airbus A321	14:02:00	SO	M	D
Seoul	Boeing 787-8	14:06:00	NO	H	D
Inverness	Airbus A319	14:08:00	NW	M	C
Olbia	Airbus A321	14:09:00	SO	M	D
Dusseldorf	Airbus A319	14:10:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	14:14:00	NO	M	C
San Jose	Boeing 787-9	14:16:00	NW	H	D
Guangzhou	Boeing 787-8	14:20:00	NO	H	D
Copenhagen	Airbus A319	14:21:00	NO	M	C
Paris	Airbus A319	14:23:00	SO	M	C
Reykjavik	Airbus A320	14:24:00	NW	M	C
Belfast	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	14:25:00	NW	M	C
Copenhagen	Airbus A320	14:27:00	NO	M	C
Oslo	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	14:28:00	NO	M	C
Dubai	Airbus A380-800 Passenger	14:29:00	SO	H	C
Barcelona	Airbus A320 (sharklets)	14:32:00	SO	M	C
Hong Kong	Boeing 777-300ER	14:33:00	NO	H	D
Islamabad	Boeing 777-200 / 200ER	14:34:00	NO	H	C
Hamburg	Airbus A320	14:36:00	NO	M	C
Mumbai	Boeing 777-300ER	14:37:00	NO	H	D
Los Angeles	Boeing 787-9	14:39:00	NW	H	D

Madrid	Airbus A320 (sharklets)	14:41:00	SW	M	C
Stockholm	Airbus A319	14:42:00	NO	M	C
Manchester	Airbus A319	14:43:00	NW	M	C
Budapest	Airbus A320	14:45:00	SO	M	C
Prague	Airbus A320	14:47:00	SO	M	C
San Diego	Boeing 777-300ER	14:48:00	NW	H	D
Amsterdam	Boeing 737-700 (winglets) Passenger/BBJ1	14:50:00	NO	M	C
Vancouver	Boeing 787-9	14:51:00	NW	H	D
Venice	Airbus A321	14:53:00	SO	M	D
Kuwait	Boeing 777-300ER	14:54:00	SO	H	D
Istanbul	Boeing 777-300ER	14:56:00	SO	H	D
Mexico City	Boeing 787-9	14:58:00	NW	H	D
Cologne	Airbus A320 (sharklets)	15:00:00	SO	M	C
Delhi	Boeing 777-200 / 200ER	15:06:00	NO	H	C
Mexico City	Boeing 787-8	15:07:00	NW	H	D
Amman	Boeing 787-8	15:08:00	SO	H	D
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	15:10:00	SO	M	C
Singapore	Airbus A380-800 Passenger	15:12:00	NO	H	C
Athens	Airbus A321	15:14:00	SO	M	D
Milan	Airbus A319	15:15:00	SO	M	C
Amsterdam	Airbus A320	15:15:00	NO	M	C
Edinburgh	Airbus A319	15:16:00	NW	M	C
Bogota	Boeing 787-8	15:18:00	SW	H	D
Bahrain	Boeing 787-9	15:19:00	SO	H	D
Las Vegas	Boeing 747-400 Passenger	15:20:00	NW	H	D
Sao Paulo	Boeing 777-300ER	15:22:00	SW	H	D
Rome	Airbus A319	15:23:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A320	15:25:00	NO	M	C
Helsinki	Airbus A321	15:26:00	NO	M	D
Palma Mallorca	Airbus A320	15:27:00	SO	M	C
Milan	Airbus A319	15:29:00	SO	M	C
Beijing	Boeing 777-300ER	15:30:00	NO	H	D
Changsha	Boeing 787-8	15:31:00	NO	H	D
Cork	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	15:33:00	NW	M	C
Milan	Airbus A320	15:34:00	SO	M	C
Vienna	Airbus A320 (sharklets)	15:35:00	SO	M	C
Riyadh	Boeing 777-300ER	15:37:00	SO	H	D
Brussels	Airbus A319	15:39:00	SO	M	C
Rome	Airbus A321	15:40:00	SO	M	D
Kiev/Kyiv	Airbus A320	15:41:00	NO	M	C
Glasgow	Airbus A319	15:41:00	NW	M	C
Ibiza	Airbus A321	15:42:00	SO	M	D
Kuala Lumpur	Airbus A350-900	15:44:00	NO	H	C
Tokyo	Boeing 777-300	15:46:00	NO	H	D
Doha	Airbus A330-200	15:47:00	SO	H	C
Karachi	Boeing 777-200 / 200ER	15:49:00	SO	H	C

Sofia	Airbus A320	15:51:00	SO	M	C
Moscow	Airbus A321	15:52:00	NO	M	D
Dubai	Airbus A330-300	15:53:00	SO	H	C
Barcelona	Airbus A320	15:55:00	SO	M	C
Munich	Airbus A319	15:57:00	SO	M	C
Athens	Airbus A320	15:58:00	SO	M	C
Los Angeles	Airbus A380-800 Passenger	16:00:00	NW	H	C
Shanghai	Boeing 777-200 / 200ER	16:01:00	NO	H	C
Dhaka	Boeing 777-300ER	16:02:00	NO	H	D
Larnaca	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	16:05:00	SO	M	C
Geneva	Airbus A319	16:06:00	SO	M	C
Madrid	Airbus A320 (sharklets)	16:07:00	SW	M	C
Dubai	Airbus A380-800 Passenger	16:08:00	SO	H	C
Shanghai	Boeing 787-9	16:10:00	NO	H	D
Zurich	Airbus A319	16:12:00	SO	M	C
Astana	Boeing 757-200 Passenger	16:14:00	NO	M	C
Oslo	Boeing 737-600 Passenger	16:15:00	NO	M	C
Edinburgh	Airbus A320	16:18:00	NW	M	C
Nantes	Airbus A319	16:19:00	SW	M	C
Amsterdam	Boeing 737-700 (winglets) Passenger/BBJ1	16:20:00	NO	M	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	16:21:00	SO	M	C
Chania	Airbus A320	16:22:00	SO	M	C
Amsterdam	Airbus A320	16:24:00	NO	M	C
Copenhagen	Airbus A321	16:25:00	NO	M	D
Nice	Airbus A320	16:26:00	SO	M	C
Lagos	Airbus A340-600	16:27:00	SO	H	D
Tokyo	Boeing 777-300ER	16:29:00	NO	H	D
Paris	Airbus A319	16:31:00	SO	M	C
Paris	Airbus A319	16:32:00	SO	M	C
Sofia	Airbus A319	16:34:00	SO	M	C
Brussels	Airbus A319	16:35:00	SO	M	C
Dusseldorf	Airbus A319	16:39:00	SO	M	C
Manchester	Airbus A320	16:40:00	NW	M	C
Casablanca	Boeing 737-800 Passenger	16:42:00	SW	M	D
Dublin	Airbus A320	16:43:00	NW	M	C
Addis Ababa	Airbus A350-900	16:46:00	SO	H	C
Tokyo	Boeing 787-9	16:48:00	NO	H	D
Munich	Airbus A320 (sharklets)	16:50:00	SO	M	C
Innsbruck	Airbus A320	16:52:00	SO	M	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	16:54:00	SO	M	C
Geneva	Bombardier CS300	16:55:00	SO	M	C
Saint Petersburg	Airbus A320	16:57:00	NO	M	C
Zurich	Airbus A320 (sharklets)	16:58:00	SO	M	C
Edinburgh	Airbus A319	16:59:00	NW	M	C
Stockholm	Airbus A320 (sharklets)	17:00:00	NO	M	C
Zagreb	Airbus A319	17:01:00	SO	M	C

Helsinki	Airbus A321 (sharklets)	17:02:00	NO	M	D
Cork	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	17:03:00	NW	M	C
Vienna	Airbus A320 (sharklets)	17:04:00	SO	M	C
Madrid	Airbus A350-900	17:06:00	SW	H	C
Warsaw	Boeing 737MAX 8 Passenger	17:07:00	NO	M	C
Stockholm	Airbus A319	17:09:00	NO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	17:10:00	NW	M	C
Amsterdam	Embraer 190	17:11:00	NO	M	C
Edinburgh	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	17:13:00	NW	M	C
Copenhagen	Airbus A319	17:15:00	NO	M	C
Amsterdam	Embraer 175	17:16:00	NO	M	C
Mumbai	Boeing 777-300ER	17:18:00	NO	H	D
Istanbul	Boeing 777-300ER	17:20:00	SO	H	D
Larnaca	Airbus A320	17:22:00	SO	M	C
Dubai	Boeing 777-200 / 200ER	17:24:00	SO	H	C
Brussels	Airbus A319	17:25:00	SO	M	C
Milan	Airbus A319	17:27:00	SO	M	C
Rome	Airbus A321	17:28:00	SO	M	D
Delhi	Boeing 787-9	17:29:00	NO	H	D
Dubai	Boeing 777	17:30:00	SO	H	D
Phoenix	Boeing 747-400 Passenger	17:32:00	NW	H	D
Hamburg	Airbus A319	17:34:00	NO	M	C
Newcastle	Airbus A319	17:35:00	NW	M	C
Hong Kong	Boeing 777-300ER	17:36:00	NO	H	D
Moscow	Boeing 787-9	17:37:00	NO	H	D
Beijing	Boeing 777-300ER	17:39:00	NO	H	D
Jeddah	Boeing 777-300ER	17:40:00	SO	H	D
Berlin	Airbus A321	17:42:00	NO	M	D
Athens	Boeing 767-300 Passenger	17:44:00	SO	H	C
Lisbon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	17:45:00	SW	M	C
Frankfurt	Airbus A321	17:46:00	SO	M	D
Lyon	Airbus A320	17:47:00	SO	M	C
Milan	Airbus A319	17:48:00	SO	M	C
Doha	Airbus A350-900	17:49:00	SO	H	C
Delhi	Boeing 777-300ER	17:51:00	NO	H	D
Zurich	Airbus A319	17:53:00	SO	M	C
Marseille	Airbus A320	17:54:00	SO	M	C
Nice	Airbus A319	17:55:00	SO	M	C
Aberdeen	Airbus A319	17:56:00	NW	M	C
Amsterdam	Airbus A320	17:57:00	NO	M	C
Dublin	Airbus A321	17:58:00	NW	M	D
Seoul	Airbus A380-800 Passenger	18:00:00	NO	H	C
Frankfurt	Airbus A319	18:01:00	SO	M	C
Dusseldorf	Airbus A320	18:03:00	SO	M	C

Amsterdam	Embraer 190	18:04:00	NO	M	C
Mumbai	Boeing 777-200 / 200ER	18:05:00	NO	H	C
Prague	Airbus A320	18:07:00	SO	M	C
Geneva	Airbus A319	18:08:00	SO	M	C
Oslo	Boeing 737-800 Passenger	18:09:00	NO	M	D
Copenhagen	Airbus A321	18:11:00	NO	M	D
Abu Dhabi	Airbus A380-800 Passenger	18:12:00	SO	H	C
Bangkok	Boeing 777-200 / 200ER	18:13:00	NO	H	C
Madrid	Airbus A321 (sharklets)	18:15:00	SW	M	D
Belfast	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	18:16:00	NW	M	C
Stockholm	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	18:17:00	NO	M	C
Geneva	Bombardier CS300	18:19:00	SO	M	C
Helsinki	Airbus A320	18:20:00	NO	M	C
Delhi	Boeing 787-8	18:21:00	NO	H	D
Shannon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	18:23:00	NW	M	C
Toulouse	Airbus A320	18:24:00	SO	M	C
Dusseldorf	Airbus A319	18:26:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A320	18:27:00	NO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	18:28:00	NW	M	C
Helsinki	Airbus A321 (sharklets)	18:29:00	NO	M	D
Aberdeen	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	18:30:00	NW	M	C
Shanghai	Boeing 777-300ER	18:32:00	NO	H	D
Kerkyra	Airbus A320	18:34:00	SO	M	C
Seoul	Airbus A350-900	18:35:00	NO	H	C
Manchester	Airbus A319	18:37:00	NW	M	C
Cologne	Airbus A319	18:38:00	SO	M	C
Stavanger	Canadair (Bombardier) Regional Jet	18:39:00	NO	M	C
Rome	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	18:41:00	SO	M	C
Gibraltar	Airbus A320	18:42:00	SW	M	C
Dubai	Airbus A380-800 Passenger	18:43:00	SO	H	C
Oslo	Airbus A319	18:46:00	NO	M	C
Wuhan	Airbus A330-200	18:47:00	NO	H	C
Boston	Boeing 777-200 / 200ER	18:49:00	NW	H	C
Frankfurt	Airbus A320 (sharklets)	18:51:00	SO	M	C
Rome	Boeing 767-300 Passenger	18:52:00	SO	H	C
Stuttgart	Airbus A319	18:54:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A319	18:55:00	NO	M	C
Mauritius	Airbus A340-300	18:56:00	SO	H	C
Amsterdam	Boeing 737-700 (winglets) Passenger/BBJ1	18:58:00	NO	M	C
La Coruna	Airbus A320	19:00:00	SW	M	C
Edinburgh	Airbus A320	19:00:00	NW	M	C

Bangkok	Boeing 777-300ER	19:01:00	NO	H	D
Bangkok	Boeing 777-300ER	19:03:00	NO	H	D
Muscat	Boeing 787-9	19:04:00	SO	H	D
Paris	Airbus A318	19:07:00	SO	M	C
Budapest	Airbus A320	19:08:00	SO	M	C
Asturias	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	19:09:00	SW	M	C
Frankfurt	Airbus A319	19:10:00	SO	M	C
Nairobi	Boeing 787-8	19:11:00	SO	H	D
Singapore	Boeing 777-300ER	19:13:00	NO	H	D
Madrid	Boeing 777-200 / 200ER	19:15:00	SW	H	C
Copenhagen	Airbus A321	19:16:00	NO	M	D
Brussels	Airbus A319	19:17:00	SO	M	C
Geneva	Airbus A319	19:18:00	SO	M	C
Aberdeen	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	19:20:00	NW	M	C
Dublin	Airbus A320	19:20:00	NW	M	C
Copenhagen	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	19:21:00	NO	M	C
Mikonos	Airbus A320	19:22:00	SO	M	C
Hamburg	Airbus A319	19:23:00	NO	M	C
Amsterdam	Airbus A319	19:24:00	NO	M	C
New York	Boeing 747-400 Passenger	19:25:00	NW	H	D
Stockholm	Boeing 767-300 Passenger	19:27:00	NO	H	C
Thira	Airbus A320	19:29:00	SO	M	C
Munich	Airbus A320 (sharklets)	19:30:00	SO	M	C
Zurich	Airbus A320	19:31:00	SO	M	C
Barcelona	Airbus A320	19:32:00	SO	M	C
Malta	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	19:33:00	SO	M	C
Basel, Switzerland/Mulhouse	Airbus A319	19:35:00	SO	M	C
Colombo	Airbus A330-300	19:36:00	SO	H	C
Bucharest	Airbus A320	19:38:00	SO	M	C
Zurich	Airbus A320 (sharklets)	19:39:00	SO	M	C
Warsaw	Airbus A320 (sharklets)	19:40:00	NO	M	C
Istanbul	Airbus A320	19:43:00	SO	M	C
Split	Airbus A320	19:43:00	SO	M	C
Glasgow	Airbus A321	19:44:00	NW	M	D
Beijing	Boeing 777-300ER	19:46:00	NO	H	D
Hong Kong	Boeing 777-300ER	19:48:00	NO	H	D
Lisbon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	19:50:00	SW	M	C
Manila	Boeing 777-300ER	19:51:00	NO	H	D
New York	Airbus A340-600	19:53:00	NW	H	D
Moscow	Airbus A321	19:55:00	NO	M	D
Munich	Airbus A321	19:55:00	SO	M	D
Milan	Airbus A320	19:57:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A320	19:59:00	NO	M	C

Doha	Airbus A350-1000	20:00:00	SO	H	D
Aberdeen	Airbus A319	20:02:00	NW	M	C
Stuttgart	Airbus A319	20:04:00	SO	M	C
Rome	Airbus A321	20:05:00	SO	M	D
Reykjavik	Boeing 757-200 Passenger	20:06:00	NW	M	C
Bilbao	Airbus A320 (sharklets)	20:08:00	SW	M	C
Dubai	Airbus A380-800 Passenger	20:09:00	SO	H	C
Vienna	Airbus A321	20:11:00	SO	M	D
Bologna	Airbus A321	20:12:00	SO	M	D
Belfast	Airbus A319	20:14:00	NW	M	C
Milan	Airbus A319	20:15:00	SO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	20:16:00	NW	M	C
Paris	Airbus A319	20:17:00	SO	M	C
Frankfurt	Airbus A319	20:18:00	SO	M	C
Edinburgh	Airbus A320	20:19:00	NW	M	C
Edinburgh	De Havilland (Bombardier) DHC-8-400 Dash 8Q	20:23:00	NW	M	C
Dusseldorf	Airbus A320 (sharklets)	20:24:00	SO	M	C
Newark	Boeing 767-400 Passenger	20:25:00	NW	H	D
Edinburgh	Airbus A319	20:26:00	NW	M	C
Tel Aviv-Yafo	Boeing 777-200 / 200ER	20:27:00	SO	H	C
Stockholm	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	20:29:00	NO	M	C
Copenhagen	Airbus A319	20:30:00	NO	M	C
Munich	Airbus A320 (sharklets)	20:33:00	SO	M	C
Milan	Airbus A319	20:34:00	SO	M	C
Istanbul	Airbus A321	20:36:00	SO	M	D
Madrid	Airbus A321	20:37:00	SW	M	D
Manchester	Airbus A321	20:38:00	NW	M	D
Helsinki	Airbus A321	20:39:00	NO	M	D
Tel Aviv-Yafo	Boeing 777-300ER	20:41:00	SO	H	D
Toronto	Boeing 787-9	20:43:00	NW	H	D
Zurich	Airbus A320	20:45:00	SO	M	C
Amsterdam	Boeing 737-800 (winglets) Passenger/BBJ2	20:46:00	NO	M	D
Dulles	Boeing 757-200 Passenger	20:48:00	NW	M	C
Dublin	Airbus A319	20:49:00	NW	M	C
Dusseldorf	Airbus A320 (sharklets)	20:50:00	SO	M	C
Nice	Airbus A321	20:51:00	SO	M	D
Göteborg	Airbus A320	20:53:00	NO	M	C
Paris	Airbus A319	20:54:00	SO	M	C
Prague	Airbus A320	20:55:00	SO	M	C
Beirut	Airbus A320	20:56:00	SO	M	C
Paris	Airbus A320	20:58:00	SO	M	C
Frankfurt	Airbus A321	20:59:00	SO	M	D
Belfast	Airbus A320	21:00:00	NW	M	C
Newcastle	Airbus A319	21:03:00	NW	M	C
Frankfurt	Airbus A320	21:05:00	SO	M	C

Athens	Airbus A321	21:08:00	SO	M	D
Moscow	Airbus A321	21:10:00	NO	M	D
Munich	Airbus A319	21:11:00	SO	M	C
Vienna	Airbus A320 (sharklets)	21:13:00	SO	M	C
Lisbon	Airbus A320 (sharklets)	21:14:00	SW	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	21:17:00	NW	M	C
Cork	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	21:19:00	NW	M	C
Vienna	Airbus A321	21:21:00	SO	M	D
Athens	Boeing 767-300 Passenger	21:23:00	SO	H	C
Palma Mallorca	Airbus A320	21:24:00	SO	M	C
Edinburgh	Airbus A319	21:25:00	NW	M	C
Cairo	Boeing 737-800 Passenger	21:26:00	SO	M	D
Doha	Boeing 777-300ER	21:28:00	SO	H	D
Geneva	Bombardier CS300	21:30:00	SO	M	C
Berlin	Airbus A320	21:33:00	NO	M	C
Glasgow	Airbus A320	21:34:00	NW	M	C
Paris	Airbus A319	21:36:00	SO	M	C
Hanover	Airbus A319	21:38:00	NO	M	C
Lisbon	Airbus A319	21:39:00	SW	M	C
Luxembourg	Airbus A320	21:41:00	SO	M	C
Amsterdam	Airbus A321	21:43:00	NO	M	D
Barcelona	Airbus A320 (sharklets)	21:44:00	SO	M	C
Rome	Airbus A321	21:46:00	SO	M	D
Warsaw	Boeing 737MAX 8 Passenger	21:47:00	NO	M	C
Zakinthos	Airbus A320	21:51:00	SO	M	C
Brussels	Airbus A320	21:53:00	SO	M	C
New York	Boeing 777-200 / 200ER	21:54:00	NW	H	C
Geneva	Airbus A320	21:57:00	SO	M	C
Istanbul	Airbus A321	22:02:00	SO	M	D
Chicago	Boeing 787-8	22:05:00	NW	H	D
Madrid	Airbus A321	22:07:00	SW	M	D
Munich	Airbus A319	22:08:00	SO	M	C
Inverness	Airbus A319	22:09:00	NW	M	C
Zurich	Airbus A321 (sharklets)	22:11:00	SO	M	D
Marseille	Airbus A320	22:12:00	SO	M	C
Malaga	Airbus A321	22:13:00	SW	M	D
Frankfurt	Airbus A321	22:14:00	SO	M	D
Munich	Airbus A319	22:16:00	SO	M	C
Budapest	Airbus A320 (sharklets)	22:20:00	SO	M	C
Oslo	Airbus A319	22:23:00	NO	M	C
Dublin	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	22:28:00	NW	M	C
Basel, Switzerland/Mulhouse	Airbus A319	22:29:00	SO	M	C
Faro	Airbus A320	22:31:00	SW	M	C

Nice	Airbus A320	22:35:00	SO	M	C
Warsaw	Airbus A320	22:37:00	NO	M	C
Lisbon	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	22:56:00	SW	M	C
Nice	Airbus A319	23:06:00	SO	M	C
Rome	Airbus A318 / A319 / A320 / A321	23:10:00	SO	M	C
Larnaca	Boeing 767-300 Passenger	23:18:00	SO	H	C
Krakow	Airbus A320	23:23:00	NO	M	C