



# ROFL DLR Schlussbericht

Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur  
Erstellung eines robusten Flugplans



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 20V1511B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



# Dokumenteigenschaften

Titel	<u>ROFL DLR Schlussbericht</u>
Betreff	<u>Förderkennzeichen: 20V1511B</u>
Institut	<u>Lufttransportsysteme</u>
Erstellt von	<u>Katrin Kölker</u>
Mitautoren	<u>Steffen Wenzel, Marius Radde</u>
Beteiligte	<u>Klaus Lütjens, Volker Gollnick, Markus Winkelmann, Judith Semar, Eva Lang, Chris Carstensen, Natascha Mägdefessel, Kai Richter, Elena Thomsen, Christopher Schwanen, Jascha Koepsel</u>
Geprüft von	<u>Klaus Lütjens, Volker Gollnick</u>
Freigabe von	<u>Volker Gollnick</u>
Datum	<u>30.6.2019</u>
Version	<u>1.0</u>
Dateipfad	<u>G:\Projekte\ROFL\03_Protokolle &amp; Berichte\032_Berichte\Abschlussbericht\ROFL_DLR_Schlussbericht.docx</u>

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Projektbeschreibung	6
2.1. Aufgabenbeschreibung	6
2.2. Mehrwert	7
2.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
2.3.1. Lufttransportbetrieb	8
2.3.2. Bestehende Modelle zur betrieblichen Airline-Planung	8
2.3.3. Literatur	8
2.4. Planung und Ablauf des Projektes	9
2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
3. Begriffserklärung	12
4. Darstellung der Ergebnisse: HAP1 Analyse der Flugplanungsprozesse	13
4.1. Prozessanalyse	13
4.1.1. Hospitationen	13
4.1.2. Key Performance Indicators	13
4.1.3. Prozessmodellierung	15
4.1.4. Auslöser von Änderungen im Flugplanungsprozess	16
4.1.5. Zusammenfassung Prozessanalyse	17
4.2. Datenanalyse Flugplanungsprozess	18
4.2.1. Flugplanänderungsereignisse	18
4.2.2. Häufigkeit von Änderungen	20
4.2.3. Analyse der Auslöser von Flugplanänderungsereignisse	22
4.2.4. Zusammenfassung Datenanalyse Flugplanungsprozess	25
4.3. Verwertung und Kenntnisse aus HAP1	26

5. Darstellung der Ergebnisse: HAP2 Analyse durchgeführter Flugpläne & Verspätungen	27
5.1. Statistische Analyse der Verspätungsdaten	27
5.1.1. Datenanalyse zu primären Abflugverspätungen	28
5.1.2. Datenanalyse zu Sekundärverspätungen	31
5.1.3. Zusammenfassung Verspätungsanalyse	36
5.2. Evaluierung weiterer Datenquellen	36
5.2.1. Zielsetzung Einflussanalyse externer Störgrößen	36
5.2.2. Ergebnisse der Analyse externer Störgrößen	37
5.3. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP2	38
6. Darstellung der Ergebnisse: HAP3 Effizienter Flugplanungsprozess	39
6.1. Beschreibung eines effizienten Flugplanungsprozesses	39
6.1.1. Prozessverbesserung: Network planning - Level 2 - Propose new scenarios	39
6.2. Potentialanalyse von Maßnahmen zur Verbesserung des Flugplanungsprozesses	41
6.2.1. Workflowtool	41
6.2.2. Integration von Informationen aus verschiedenen Tools	42
6.2.3. Verbesserte Kommunikation durch ein Chat-Tool	42
6.2.4. Weitere Maßnahmen	43
6.3. Ausgewählte Unterstützungswerkzeuge (WFMS)	43
6.3.1. UseCases	43
6.3.2. Prototypen	45
6.4. Effizienzsteigerungspotential der Unterstützungswerkzeuge	46
6.4.1. Nutzerumfrage	46
6.4.2. Zeitersparnis durch WFMS	48
6.4.3. Spezifische Vorteile durch WFMS	49
6.4.4. Gesamtnutzen	51
6.4.5. Zusammenfassung der Umfrageauswertung	52
6.5. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP3	53
7. Darstellung der Ergebnisse: HAP4 Robuster Flugplan	54

7.1. Stand der Wissenschaft	54
7.1.1. Metriken zur Messung eines robusten Flugplans	54
7.1.2. Verfahren zur Erstellung eines robusten Flugplans	56
7.2. Simulationsumgebung	59
7.3. Methoden zur Robustheit	60
7.3.1. Binary Particle Swarm Optimierung (BPSO)	60
7.3.2. Entscheidungsbaum	64
7.3.3. Lineare Optimierung	65
7.4. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP4	66
8. Verwertung und Veröffentlichungen des Ergebnisses	68

## 1. Einleitung

Das Projekt ROFL (Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Erstellung eines robusten Flugplans) ist ein im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo V-2 gefördertes Projekt, das gemeinsam vom DLR Lufttransportsysteme und Lufthansa Systems durchgeführt wurde. Im Rahmen des Projektes wurde die Robustheit im Flugplanungsprozess und im Flugplan analysiert und verbessert, um einerseits einen stabilen Flugplanungsprozess mit wenig Änderungen und andererseits einen robusten Flugplan mit wenig Verspätungen zu erreichen. Neben dem Aufzeichnen der wichtigsten Prozesse und Methoden, wurden Verfahren entwickelt und implementiert, die die Robustheit nachweislich verbessern.

Robustheit zur Vermeidung von Verspätungen ist ein aktuelles Thema, das derzeit viele Fluggesellschaften und Forscher aufgreifen. Dies liegt daran, dass Verspätungen im Luftverkehr in den vergangenen Jahren drastisch zugenommen [1] und zu hohen Kosten und Problemen bei den Flughäfen, den Fluggesellschaften und auch den Passagieren führen. Daher sind alle genannten Akteure an einer Reduzierung der Verspätungen interessiert. Auf Initiative des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) fand am 05. Oktober 2018 hierzu ein Spitzengespräch Luftfahrt in Hamburg statt, bei dem u.a. folgende Maßnahme beschlossen wurde:

„Verspätungsanfällige Flüge werden durch kurz- und langfristigen Abgleich des Flugplans mit den Ist-Werten ermittelt, um dann ggf. einen Teil der geplanten Flugzeugrotation herauszulösen und die Übernahme des Fluges durch ein anderes Flugzeug zu ermöglichen. [...]“[2]. In dem ROFL-Projekt wurden neue Optimierungsmethoden erstellt, die das vorgeschlagene Verfahren implementieren.

Im Folgenden werden das Projekt sowie die erarbeiteten Ergebnisse dargestellt.

## 2. Projektbeschreibung

Im folgenden Kapitel wird das Projekt ROFL vorgestellt. Es werden die Aufgaben und Ziele sowie der Ablauf des Projektes beschrieben.

### 2.1. Aufgabenbeschreibung

In dem Projekt ROFL ist das Ziel die Entwicklung eines stabileren Flugplanungsprozesses sowie eines gegenüber Verspätungen robusteren Flugplans. Die folgende konkrete Zielbeschreibung wurde definiert [3]:

*Das Gesamtziel des DLR [Lufttransportsysteme] im Projekt ROFL ist die Entwicklung eines effizienteren Flugplanungsprozesses, der 30% weniger Abstimmungsprozesse bei den Fluggesellschaften erfordert, und die Verringerung von Folgeverspätungen um 20% durch die Erhöhung der Robustheit von Flugplänen.*

*Dieses Gesamtziel trägt zum förderpolitischen Ziel 3 der leistungsfähigen und effizienten Luftfahrt bei, da die Geschäftsprozesse der Fluggesellschaften effizienter gestaltet werden und ein robuster Flugplan weniger Verspätungen im Flugbetrieb nach sich zieht. Ein gegenüber Verspätungen robuster Flugverkehr aufgrund von z. B. Wetter oder operativen Störungen ist in den Zielen des „Flightpath 2050“ gefordert. Zusätzlich wird aus Sicht des Passagiers der Betrieb dadurch sowohl planbarer als auch effizienter, wodurch das Lufttransportsystem die Bedürfnisse des Passagiers besser erfüllen kann.*

Das DLR [Lufttransportsysteme] verfolgt im Rahmen seines Vorhabens im ROFL-Verbund die folgenden Arbeitsziele:

1. Verfügbarkeit eines Prozessmodells zur Flugplanung bei Fluggesellschaften
2. Entwicklung eines neuen, effizienten Flugplanungsprozesses einschließlich geeigneter Unterstützungsverfahren
3. Bewertung verschiedener Datenquellen zur Flugplananalyse und-planung
4. Entwicklung von Verfahren zum Aufbau eines robusten Flugplans und Metriken zu dessen Bewertung

## 2.2. Mehrwert

Für einen stabileren Flugplanungsprozess und einen robusteren Flugplan wurden in dem Projekt mehrere neue Methoden entwickelt, die sowohl von wissenschaftlichem Interesse sind als auch in der Praxis Anwendbarkeit finden. Zunächst wurde in dem Projekt zum ersten Mal der Prozess der Flugplanung systematisch betrachtet und aufgezeichnet. Hierbei wurden Prozesse und Schnittstellen ausführlich dokumentiert. Anhand der Dokumentationen konnten Verbesserungsvorschläge für eine bessere Kommunikation und Zusammenarbeit innerhalb der Stakeholder des Flugplanungsprozesses erarbeitet werden. Diese Verbesserungen ermöglichen einen stabileren Flugplanungsprozess. In dem ROFL Projekt wurde insbesondere Wert auf die potentielle Anwendung der Methoden gelegt.

Ein zusätzlicher Mehrwert und Praxisbezug konnte hierbei durch mehrere Interviews mit den relevanten Stellen bei diversen Fluggesellschaften erarbeitet werden. Das garantierte eine genaue Dokumentation der Prozesse sowie die variable Einsatzmöglichkeit für Fluggesellschaften mit unterschiedlichen Geschäftsmodellen. Im Rahmen des Projektes ROFL erfolgte erstmals eine Zusammenführung von Organisation, Prozessen, IT-Systemen, Daten und Dienstleistungen im Rahmen einer integrierten Modellierung.

Die systematische Verbesserung des Flugplanungsprozesses erforderte eine Studie, die auf einer hinreichend großen und statistisch signifikanten Datenmenge aufbaut. Die Daten müssen detailliert die wiederholten Änderungen des Flugplans im Laufe des Flugplanerstellungsprozesses umfassen. Diese Studie war im ROFL Projekt erstmalig möglich, da die Verfügbarkeit unternehmensinterner Daten für Forschungseinrichtungen durch den Verbundpartner LSY gegeben war. Erst die Analysen ermöglichten eine umfassende und realitätsnahe Bewertung möglicher Unterstützungsverfahren zur Verbesserung des Prozesses.

Als weiterer wichtiger Bestandteil des ROFL Projektes wurden Methoden zur Entwicklung eines robusten Flugplans entwickelt. Der Mehrwert des Projektes besteht hierbei wiederum auf der operationalen Datengrundlage, die eine hinreichend genaue Analyse der Verspätungen gegebener Flugpläne ermöglicht. Durch die Daten war es dem Projekt-Team möglich, Verspätungen und die Verschleppung von Verspätungen zu verstehen. Auf Basis dieses Verständnisses wurden Optimierungsmethoden entwickelt, um die Verspätungen effektiv zu verringern. Zur Bewertung der Flugpläne konnte eine Simulationsumgebung entwickelt werden. Neuartig ist hierbei wiederum die Datengrundlage zur Simulation von Verspätungen die sicherstellt, dass die Verfahren zur Erstellung eines robusten Flugplans nicht nur effizient und wissenschaftlich nachweisbar optimal sind sondern auch von Fluggesellschaften praktizierbar sind. Diese Verbindung von Theorie und Praxis wurde in dem Projekt erstmals im vorgenannten Themenfeld durch die Kooperation der wissenschaftlichen Einrichtung DLR Lufttransportsysteme mit dem Industriepartner Lufthansa Systems ermöglicht.

## 2.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über den Stand der betrieblichen Luftfahrtforschung gegeben.

### 2.3.1. Lufttransportbetrieb

Einen generellen Überblick zur Forschung des Lufttransportbetriebs gibt [4]. Zum Stand der Forschung in der Netzplanung, gibt [5] einen zusammenfassenden Überblick. Die vielfältige Anwendung der quantitativen Methoden wird zusammenfassend in [6] dargestellt. Ein detaillierter Überblick über die Methoden findet sich in [7].

Die Abteilung Lufttransportbetrieb und -infrastrukturen der DLR Einrichtung Lufttransportsysteme untersucht die betriebliche Seite des Lufttransportsystems d.h. Fluggesellschaften, Flugsicherungsorganisationen und Flughäfen. Dabei werden aus betrieblicher Sicht nicht nur Anforderungen an das Lufttransportsystem abgeleitet, sondern auch Rückschlüsse für die Fluggesellschaft und deren Planungsprozesse gezogen. Die grundfinanzierte Forschung hierzu erfolgt im DLR-Vorhaben „Effizienter Flugbetrieb“, in dem insbesondere die grundlegenden Erscheinungsformen von Fluggesellschaften, deren Planungs- und Betriebsprozesse sowie deren Wechselwirkungen mit anderen Elementen im Lufttransportsystem erforscht werden. Dafür werden auch eigene softwarebasierte Planungswerkzeuge für Forschungszwecke entwickelt. Spezifische Fragestellungen werden in DLR-internen Projekten, öffentlich geförderten Drittmittelprojekten und industriellen Direktaufträgen bearbeitet.

### 2.3.2. Bestehende Modelle zur betrieblichen Airline-Planung

Für einen profitmaximierenden Flugplan ist eine gute Nachfragevorhersage am Anfang des Prozesses der Flugplanerstellung unabdingbar. Das DLR Lufttransportsysteme entwickelt eigene Nachfragemodelle [8] und erstellt Studien zur Erweiterung des Verständnisses der Einflussfaktoren der Nachfrage [9]. Der Prozess Flottenplanung wird vom DLR Lufttransportsysteme durch das Optimierungswerkzeug FLOP (Fleet Optimization Model) modelliert [10]. Die Netzplanung, Flottenzuordnung und zeitliche Flugplanung werden im DLR Lufttransportsysteme durch das Modell NEMO (Network Design Model) abgebildet [11]. Die anschließenden Umlaufplanung für Flugzeuge wird durch das Modell ART (Aircraft Rotation Planning) abgebildet [12]. Das DLR Lufttransportsysteme bietet sowohl durch ein umfassendes Portfolio an Modellen für die einzelnen Teilschritte aber auch durch Studien der komplexeren Zusammenhänge des Systems (z.B.: [13], [14]) ein weitgehendes Verständnis über die Strukturen des Planungsprozesses der Fluggesellschaft.

Im DLR Lufttransportsysteme bestehen Optimierungsmodelle für verschiedene Teilschritte des Flugplanungsprozesses. Es bestand jedoch kein Modell, welches explizit den gesamten Flugplanungsprozess modelliert. Dieses Modell wurde im ROFL Projekt entwickelt. Weiterhin bestand kein Tool zur datengetriebenen robusten Umlaufplanung bzw. generell ein Tool, in dem Verspätungen betrachtet wurden. Durch die Optimierungsmethoden zur robusten Flugplanung in ROFL konnten statistische Komponenten in dem Flugplanungsprozess mit eingebracht werden.

### 2.3.3. Literatur

Die wissenschaftliche Arbeit des Projektes baut auf bestehender Literatur aus den Bereichen der Geschäftsprozess-Modellierung in der Flugplanung [15], Data Mining in der Flugplanung [16] [17] [18], Flugplanungsprozess [10] [11] [12] [13] [14], Unterstützungsverfahren und robusten Flugplanung [19] auf.

## 2.4. Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt startete am 1. Juli 2016 und endete nach zweieinhalb Jahren am 31. Dezember 2018. Das Projekt ist in vier Hauptarbeitspakete gegliedert (siehe Abbildung 1). Das erste und das dritte HAP umfassen den Flugplanungsprozess, wobei HAP1 die Analyse des aktuellen Prozesses und der Datenbeschaffung und HAP3 die Verbesserung des Prozesses behandelt. HAP2 und HAP4 behandeln den Flugplan an sich. Hierbei adressiert HAP2 die Beschaffung und Aufbereitung der Daten und HAP4 Optimierungsverfahren für einen robusteren Flugplan.

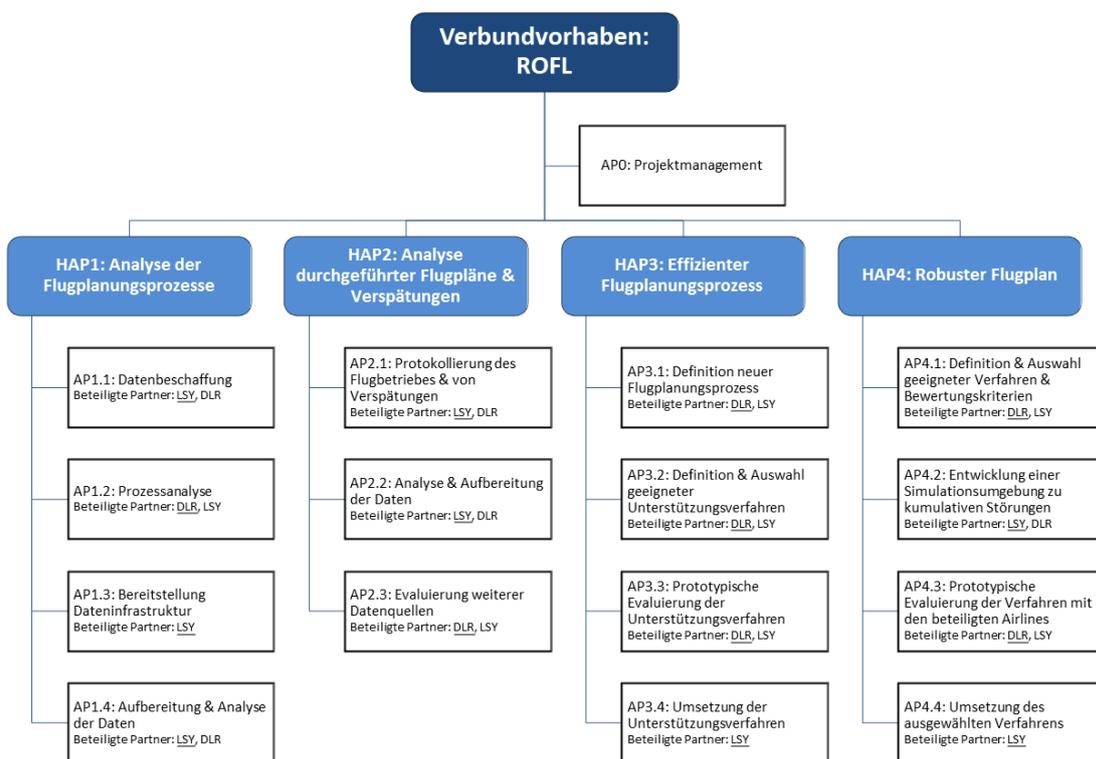


Abbildung 1: Projektstrukturplan

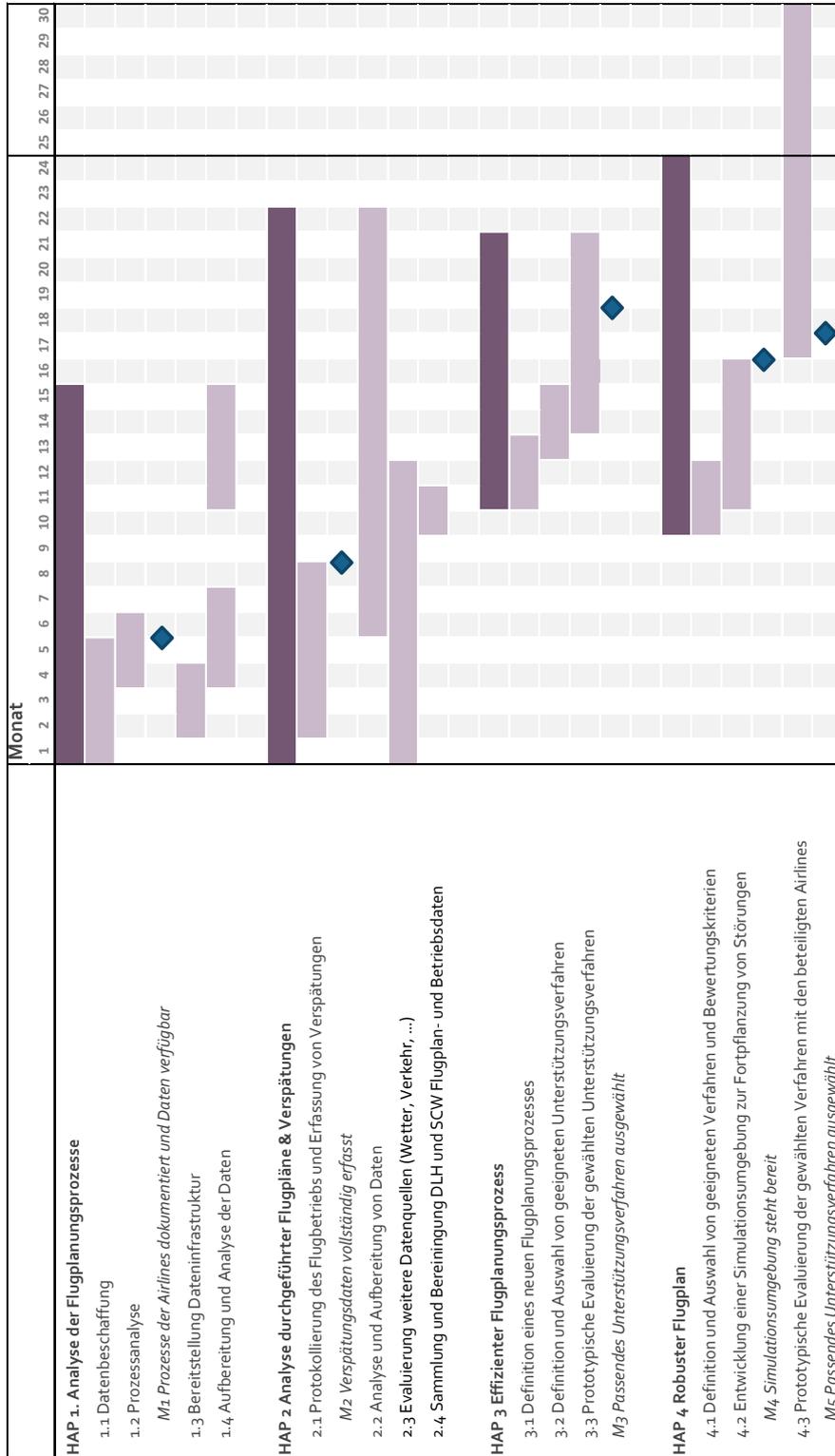


Abbildung 2: Balkenplan

## 2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes ROFL erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem Verbundführer Lufthansa Systems sowie dessen Tochter zeroG. Abbildung 4 zeigt, aufbauend auf dem Netzplan der Projektbeschreibung, die Zusammenarbeit zwischen dem DLR Lufttransportsysteme (grau) und Lufthansa Systems (LSY, gelb) im Projekt ROFL auf.

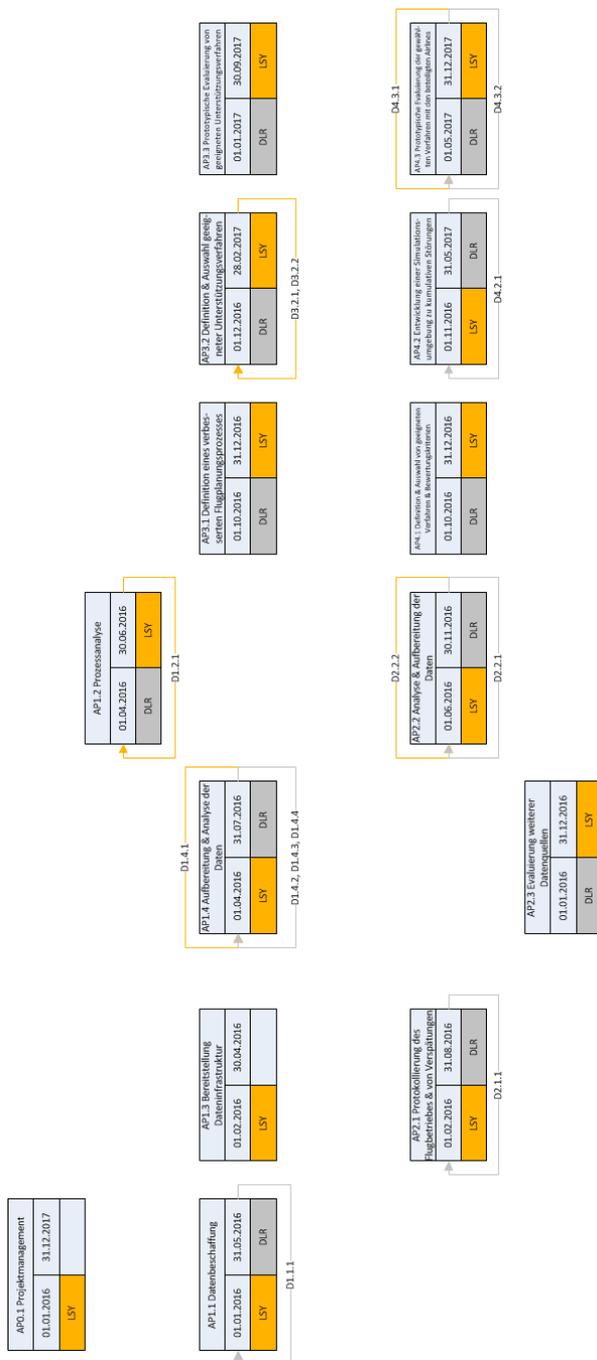


Abbildung 3: Zusammenarbeit DLR Lufttransportsysteme, Lufthansa Systems

### 3. Begriffserklärung

Zum besseren Verständnis der folgenden Beschreibung der Ergebnisse sollen an dieser Stelle einige Begriffe der Planungs- und Betriebsphase einer Fluggesellschaft definiert werden. Eine Übersicht des Planungsprozesses findet sich in Abbildung 4: Planungsprozess einer Fluggesellschaft.

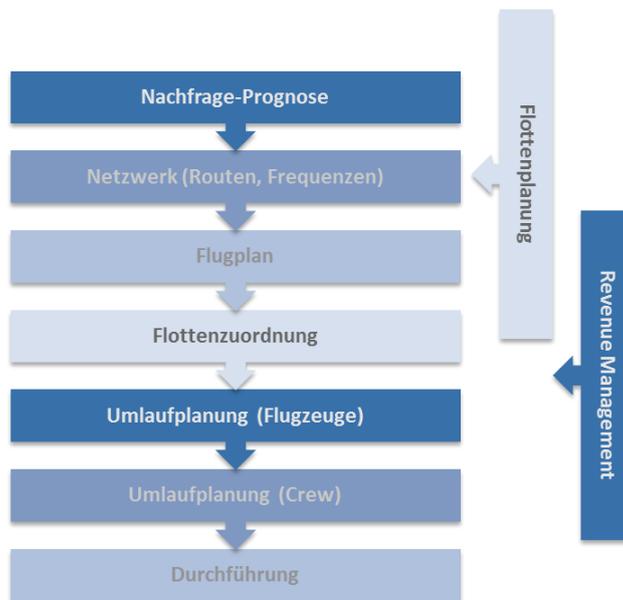


Abbildung 4: Planungsprozess einer Fluggesellschaft

Zunächst wird bis zu mehrere Jahre vor dem Betrieb eines Fluges eine Nachfrage Prognose erstellt, in der die zu erwarteten Passagierzahlen geschätzt werden. Auf Basis der Schätzung werden Routen und Frequenzen definiert, die das Netzwerk einer Fluggesellschaft definieren. Ein bis zwei Jahre vor der Durchführung wird auf Basis dieses Netzwerkes ein zeitlicher Flugplan erstellt, der die Abflug- und Ankunftszeiten der Flüge angibt. Im Anschluss wird für jeden so geplanten Flug definiert, welche Flotte diesen Flug bedient. Dieser Planungsschritt nennt sich Flottenzuordnung. Für jede Teilmenge der Flotte ist hiermit eine Menge von Flügen definiert, die durch die gegebene Flotte abgeflogen werden müssen. Aus dieser Teilmenge der Flüge erfolgt dann für jeden Flottentyp eine Umlaufplanung der Flugzeuge. Für jedes Flugzeug der Flotte wird definiert, welche Flüge es betreibt, woraus sich der Umlauf des Flugzeugs ergibt. Im Anschluss erfolgt die Umlaufplanung für die Crew der Flugzeuge. Der so erzeugte Flugplan wird meist einige Tage vor Betrieb an den operationellen Bereich der Fluggesellschaft übergeben. Hier werden oft auch noch Änderungen vorgenommen, in erster Linie werden die Flugzeuge und die Crew im Betrieb überwacht und gesteuert. Unter dem Begriff Scheduler fassen sich alle Mitarbeiter der Netz- und zeitlichen Flugplanung zusammen. Crew Planner planen den Umlauf der Crew. Ops Controller und Crew Tracker überwachen bei der tatsächlichen Durchführung des Fluges die Flugzeuge und die Crew.

In der Praxis geht dieser Prozess für die Planung des Flugplans nicht nur sequentiell vonstatten. Die langfristige Planung wird meist einige Monate bis Jahre vor der tatsächlichen Durchführung festgelegt, während die letzten Schritte der Kette auch erst einige Wochen vorher ausgeführt werden. Kurzfristige Änderungen in den Einzelschritten bewirken demzufolge Änderungen an dem aktuell bestehenden Flugplan.

## 4. Darstellung der Ergebnisse: HAP1 Analyse der Flugplanungsprozesse

Der Flugplanungsprozess von Fluggesellschaften beginnt bereits mehrere Jahre vor dem eigentlichen Flug. Aufgrund dieser langen Prozessdauer, der Beteiligung vieler unterschiedlicher Stellen und Organisationseinheiten sowie der zeitversetzten Verfügbarkeit und der Volatilität wesentlicher für die Planung relevanter Informationen findet eine ständige Anpassung der Flugplanung statt.

Das Projekt hatte zum Ziel, diese Anpassungen zu vermindern um eine Stabilisierung des Prozesses zu erreichen. Im ersten Schritt wurden dazu im HAP1 die bestehenden Prozesse aufgenommen und analysiert. Dazu wurden zunächst Hospitationen bei zwei Fluggesellschaften durchgeführt, um die bestehenden Prozesse und Leistungsindikatoren zu erfassen. Darauf aufbauend wurden die wesentlichen Auslöser von Änderungen im Flugplanungsprozess identifiziert. Parallel wurden anhand von operationellen Daten die tatsächlich durchgeführten Flugplanänderungsereignisse untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Ansätze vorgestellt.

### 4.1. Prozessanalyse

#### 4.1.1. Hospitationen

Im Rahmen des Projektes wurden Hospitationen bei zwei Fluggesellschaften und insgesamt 12 Mitarbeitern durchgeführt. Die einzelnen Hospitationen wurden von jeweils zwei bis drei Projektmitarbeitern vom DLR Lufttransportsysteme und LSY durchgeführt.

Ziel der Hospitationen war es, begleitend zur Datenerfassung der Kunden von Lufthansa Systems Informationen über die untersuchten Fluggesellschaften, deren Prozesse und Treiber zu erlangen.

Zur Begleitung der Hospitationen wurden zwei Interviewleitfäden entwickelt. Die Fragen wurden spezifisch zur Erreichung der oben genannten Ziele der Hospitationen erstellt. Die Leitfäden wurden unterschieden zwischen Management und Experten, wobei das Management jeweils Teamleiter o.ä. und Experten diejenigen Mitarbeiter darstellten, die mit den relevanten Tools arbeiten. Dadurch wurde erreicht, dass ausschließlich die für den Interviewten relevanten Fragen innerhalb der begrenzten Zeit der Hospitationen gestellt wurden. Im Anschluss an die Hospitationen wurden die Ergebnisse durch die Projektbeteiligten konsolidiert und den Hospitierten zum Review zur Verfügung gestellt. Deren Anmerkungen wurden anschließend in die finalen Fragebögen eingearbeitet. Durch die Möglichkeit zu gezielten Rückfragen im Anschluss an die Hospitationen wurden noch gezielt Informationen abgefragt, welche im Rahmen der Hospitationen nicht erfasst wurden oder welche noch unklar waren.

#### 4.1.2. Key Performance Indicators

Key Performance Indicators (KPI) sind Kenngrößen, die den gegenwärtigen und zukünftigen Erfolg eines Unternehmens quantifizieren können. Daher werden sie regelmäßig gemessen und bestimmen das Handeln des Managements. Maßnahmen für das Handeln der Mitarbeiter müssen aus den KPI eindeutig abgeleitet werden können. Dabei müssen die Maßnahmen und Verantwortlichkeiten eindeutig auf Organisationseinheiten heruntergebrochen werden können. Es werden nur Kenngrößen mit einem signifikanten Einfluss auf den Unternehmenserfolg als KPI definiert werden. Außerdem müssen sie insofern zielführend sein, als dass alle Maßnahmen, die aus dem Status der KPI abgeleitet werden, einen positiven Einfluss auf die Unternehmensleistung ausüben. [20] [21]

Im Rahmen des Projektes ROFL wurden die Leistungsindikatoren primär aus den Hospitationen abgeleitet. Dazu wurden im Interviewleitfaden entsprechende Abschnitte eingebunden, in welchen Leistungskenngrößen und deren Erfassung in den Fluggesellschaften abgefragt wurden. In Tabelle 1 sind die in den Hospitationen genannten Kenngrößen und die Häufigkeit der Nennungen aufgeführt. Insgesamt wurden acht Indikatoren genannt, wovon die Indikatoren „Regularität“, „Produktivität“ und „Pünktlichkeit“ jeweils zweimal genannt wurden.

#	Key Performance Indicator	Anzahl Nennungen
1	Regularität	2
2	Produktivität/ Utilization	2
3	Pünktlichkeit/ On-time performance (OTP) departure	2
4	Profitabilität	1
5	Kostenminimierung	1
6	Größe der Ops-Reserve	1
7	variable Kosten Crews (Hotel, Bus, Taxi, Dead Heads etc.)	1
8	Crew-Produktivität	1

Tabelle 1: Nennungen von Kenngrößen in den Hospitationen

Für die Leistungsindikatoren wurde eine Vorlage entwickelt, in dem die einzelnen Indikatoren näher definiert werden. Dazu wird jeder Indikator zunächst inhaltlich definiert. Anschließend werden die Input-Metriken sowie die formelle Definition angegeben. Abschließend erfolgen die Festlegung der Verantwortlichkeit zu den Organisationseinheiten einer Fluggesellschaft sowie die Ergänzung eventueller Kommentare[21]. Die ausgefüllten Templates für jeden KPI finden sich im Deliverable D1.2.2 Analyse des Flugplanungsprozesses [22].

Alle genannten Indikatoren werden regelmäßig innerhalb der Airlines überprüft und bestimmen laut den Aussagen der Hospitationen das Handeln des Managements. Weiterhin lassen sich für die einzelnen Organisationseinheiten und deren Mitarbeiter Handlungsempfehlungen aus den Indikatoren ableiten, die einen direkten Einfluss auf die Unternehmensleistung ausüben. Damit sind für alle Indikatoren wesentliche Anforderungen an Key Performance Indicators gemäß o.g. Definition gegeben und die Indikatoren können als KPI angesehen werden.

Zum Teil werden die KPI von mehreren Organisationseinheiten genutzt. Dies ist dem sequentiellen Planungsprozess einer Fluggesellschaft teilweise inhärent. So wird beispielsweise die Regularität durch die Netzplanung und das Operation Control Center (OCC) als KPI genutzt. Allerdings kann im OCC bei einer schlechten Vorplanung durch die Netzplanung keine hohe Regularität erreicht werden. Da allerdings auch die Netzplanung eine hohe Regularität anstrebt, entsteht hier kein Zielkonflikt. Durch regelmäßige Feedback-Loops kann sogar ein deutlich besserer Wert erzielt werden, als bei einer alleinigen Verantwortung bei einer Organisationseinheit. Eine alleinige Verantwortung des OCC am Ende der Prozesskette, z. B. bei dem Indikator Profitabilität, ist daher kritischer zu betrachten, da die vorhergehenden Verantwortlichen zunächst nicht bestrebt sind diesen KPI zu maximieren. Auch hier kann nur durch regelmäßiges Feedback und durch das Bewusstsein der Auswirkungen der eigenen Planung auf diesen nachgelagerten Indikator eine hohe Zielerreichung gewährleistet werden.

### 4.1.3. Prozessmodellierung

Nachfolgend wird die Prozessmodellierung innerhalb des Projektes beschrieben. Zunächst wird dazu auf die verwendete Methodik eingegangen. Dazu werden das Konzept der Business Process Model and Notation (BPMN) vorgestellt, auf die Anwendung in ROFL eingegangen sowie die Elemente des BPMN vorgestellt. Anschließend erfolgen die Darstellung der entwickelten Prozessmodelle und ein Ausblick auf die darauf aufbauenden Arbeiten im Projekt.

#### 4.1.3.1. Business Process Modeling

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Prozessmodellierung (Business Process Modeling - BPM), die insbesondere regional sehr heterogen verteilt eingesetzt werden. Ziel der Prozessmodellierung ist es, Geschäftsprozesse und Arbeitsabläufe standardisiert darzustellen. Weiterhin können, je nach Modellierungskalkül, auch die Aufbauorganisation eines Unternehmens sowie die verwendeten IT-Systeme einbezogen werden. Neben z. B. ereignisgesteuerten Prozessketten und UML (Unified Modeling Language) hat sich weltweit insbesondere die graphische Spezifikationsprache „Business Process Model and Notation“ (BPMN) als Standard etabliert. BPMN ist durch seine Standardisierung also ISO-Norm [23] [24] auch für projektexterne Experten verständlich und wurde aufgrund des hohen Standardisierungsgrades und der weiten Verbreitung für das Projekt als Spezifikationsprache gewählt.

Die ersten Arbeiten zu BPMN begannen 2004 unter Stephen A. White, der als Mitarbeiter bei IBM bereits in den 90er Jahren mit Modellen zur graphischen Darstellung von Prozessen gearbeitet hatte. Ziel war eine leicht verständliche Notation, die von allen prozessbeteiligten Stakeholdern genutzt werden kann. Im Jahre 2006 wurde BPMN schließlich von der Object Management Group (OMG) als Standard veröffentlicht. Die aktuelle Version ist Version 2.0.2. [25] [26] Durch die XML-basierte Repräsentation der Modelle in BPMN ist eine Verbindung zu verschiedenen Ausführungssprachen möglich.

#### 4.1.3.2. Prozessmodellierung in ROFL

Zunächst wurden erste Modelle basierend auf einem internen Vorgängerprojekt bei LSY erstellt. Diese wurden nach vier zeitlichen Phasen des Flugplanungsprozesses gegliedert. Anschließend erfolgten Diskussionsrunden zwischen den Projektmitarbeitern von DLR Lufttransportsysteme und LSY und Experten von Lufthansa Systems für die einzelnen Planungsphasen. Ziel dieser Diskussionsrunden war es, Spezifika der im Vorgängerprojekt entwickelten Prozessmodelle zu identifizieren und anschließend allgemeingültigere Prozesse zu entwickeln. Diese Prozesse wurden anschließend als Diskussionsgrundlage und inhaltliche Vorbereitung für die Hospitationen genutzt. Da im Vorgängerprojekt aufgrund des Geschäftsmodells der untersuchten Fluggesellschaft wichtige Prozesse, wie z. B. das Hub-Management, nicht untersucht wurden, mussten hierfür mit Unterstützung der Experten von Lufthansa Systems generische Modelle entwickelt werden. Abschließend wurden die Ergebnisse der Hospitationen und die von den beteiligten Airlines zur Verfügung gestellten Materialien verwendet, um die IST-Prozesse nochmals zu überarbeiten.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Modellierung bestand darin, dass einerseits ein bestimmter Detaillierungsgrad nicht unterschritten werden durfte, um eine hinreichende Aussagekraft und die Analysemöglichkeiten der Modelle zu gewährleisten. Andererseits war eine Vorgabe des Projektes, dass die Prozesse allgemeingültig und nicht airline-spezifisch sind. Daher wurde eine entsprechende Triangulation der Quellen (bestehende Prozessmodelle, Experten, Hospitationen bei zwei Fluggesellschaften) durchgeführt.

### 4.1.3.3. Prozessmodelle

Im Arbeitspaket AP1.2 wurde zunächst der IST-Zustand der Prozesse der Fluggesellschaften modelliert. Es wurden insgesamt 30 Prozesse modelliert. Dabei wurden diese nach den unterschiedlichen Phasen des Flugplanungsprozesses wie folgt untergliedert:

- long term (strategic phase)
- medium term (planning phase)
- short term (tactical phase)
- daily operations (operational phase)

Die Prozesse sind detailliert im Deliverable D1.2.2 Analyse des Flugplanungsprozesses [22] beschrieben.

Unter den vier Phasen sind die entsprechenden Subprozesse eingegliedert:

- long term
  - network development
  - manpower planning
- medium term
  - network planning
  - flight schedule development
  - flight schedule maintenance
  - maintenance planning
  - crew training planning
- short term
  - flight schedule realisation
  - aircraft assignment
  - crew rostering
  - crew roster maintenance
  - crew training realisation
- daily operations
  - manage operations

Aufbauend auf den hier erarbeiteten Prozessmodellen erfolgte in ROFL im HAP3 eine Optimierung des Flugplanungsprozesses. Dazu wurde untersucht, wie der Prozess insgesamt effizienter gestaltet werden kann und welche Prozessschritte das größte Potential zur Verbesserung durch die Nutzung von Automatisierung und Assistenzsystemen versprechen.

### 4.1.4. Auslöser von Änderungen im Flugplanungsprozess

Im Rahmen der Hospitationen wurden unter anderem die Auslöser für Änderungen im Laufe des Flugplanungsprozesses erfasst. Ziel war es zu identifizieren, warum Änderungen auftreten, wann sie auftreten und wodurch sie ausgelöst werden. Basierend darauf soll im Verlaufe des Projektes untersucht werden, wo Ressourcen durch einen verbesserten Prozess, durch Automatisierung oder durch den Einsatz von Unterstützungstools eingespart werden können. Dabei sind insbesondere die Änderungen interessant, die sehr häufig auftreten, deren Bearbeitung sehr lange dauert oder die im Laufe des Prozesses wieder überschrieben werden.

Die Analyse der Protokolle der Hospitationen erfolgte in Anlehnung an den „Grounded Theory“ Ansatz unter Nutzung der Software „MAXQDA“, welche eine qualitative Datenanalyse unterstützt. Durch eine induktive Codierung der Interviews wurden unterschiedliche Kategorien für Änderungsgründe im Flugplanungsprozess aufgezeigt. Im iterativen Prozess wurden anschließend die Kategorien nochmals konsolidiert, um die wesentlichen Kategorien zu identifizieren. Der Vorteil des induktiven Vorgehens liegt darin, dass das Ergebnis weniger stark durch die subjektive Wahrnehmung und Erwartungen des Auswertenden beeinflusst wird.

Die Gründe für Änderungen im Flugplanungsprozess können im Wesentlichen in folgende Problemfelder eingeteilt werden:

- Tools
- Prozesse
- Kommunikation

In Tabelle 2 finden sich untergeordnete Kategorien der genannten Problemfelder. Eine genaue Beschreibung der Kategorien mit den Auswertungen der Interviewantworten findet sich in [22].

Tools	Prozesse	Kommunikation
fehlende Funktionen	unzureichende Prozesse	neue Informationen
fehlende Logik	unklare Verantwortlichkeiten	fehlerhafte Kommunikation
fehlende Automatisierung	fehlende Standardisierung	fehlende Informationen von anderen Organisationseinheiten
fehlende Daten		manuelle Abstimmung mit anderen Organisationseinheiten
zu viele Informationen		
fehlende Tool-Integration		
fehlerhafte Tool-Funktionen		
fehlende Transparenz		

Tabelle 2: Problemfelder und Auslöser für Änderungen im Flugplan

#### 4.1.5. Zusammenfassung Prozessanalyse

Im Rahmen des HAP1 in ROFL wurde der Flugplanungsprozess bei zwei Fluggesellschaften analysiert. Dazu wurde zunächst eine ausführliche Literaturrecherche zum Airline-Planungsprozess durchgeführt. Anschließend wurden die durchgeführten Hospitationen als Grundlage zur Erfassung des IST-Zustandes erörtert. Es wurden Key Performance Indikatoren vorgestellt, die in den hospitierten Fluggesellschaften genutzt werden. Im Anschluss wurde auf die Geschäftsprozessmodellierung sowie abschließend auf die Auslöser von Änderungen im Flugplanungsprozess eingegangen.

Das Forschungsthema des robusten Flugplanungsprozesses ist sowohl in der akademischen als auch in der Airline-Community nach unserem Wissen noch nicht bearbeitet worden. Lediglich einzelne Aspekte des Prozesses wurden betrachtet. Insbesondere die Ressourcenbindung durch einen ineffizienten Prozess und fehlende Entscheidungsunterstützung bzw. Automatisierung wurde bisher nicht diskutiert.

Durch die Prozessmodellierung wurden die IST-Prozesse einer Fluggesellschaft formal dargestellt. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für die Definition eines verbesserten Flugplanungsprozesses im weiteren Projektverlauf. Dabei ist die größte Herausforderung eine Balance zwischen der Detaillierung der Prozesse und einer ausreichenden Abstrahierung einzuhalten, um eine für unterschiedliche Luftverkehrsgesellschaften gültige Darstellung zu erhalten, die gleichzeitig eine ausreichende Analysetiefe ermöglicht.

Als Ergebnis der Analyse der in den Hospitationen erhobenen Fragebögen wurden Kategorien wesentlicher Auslöser für Änderungen im Flugplanungsprozess identifiziert. Häufige Änderungen entstehen aufgrund unterschiedlichster Probleme der eingesetzten Software-Werkzeuge, aufgrund der notwendigen Kommunikation zwischen einzelnen Stellen, Organisationseinheiten und Stakeholder sowie aufgrund von Schwächen der vorgegebenen Prozesse hinsichtlich der Stabilität der Planung.

## 4.2. Datenanalyse Flugplanungsprozess

Im weiteren Schritt der Flugplanungsanalyse wurden bestehende operationelle Daten hinsichtlich der Änderungen im Flugplanungsprozess analysiert. Dazu wurden Daten verschiedener Airlines aus einer Scheduling Software von Lufthansa Systems (LSY), genutzt. Dieses Werkzeug umfasst Anwendungen zur Erstellung, Bearbeitung, Verwaltung, Dokumentation und Optimierung von Schedules. Es kommt während der mittelfristigen bis kurzfristigen Planung, d.h. ab zwei Jahre vor dem Day of Operation (DoO) bis zu einem Zeitpunkt kurz vor DoO zum Einsatz (der tatsächliche Einsatzzeitraum variiert allerdings von Airline zu Airline).

Die Aufbereitung und Filterung der Daten erfolgte durch LSY. Die vorgestellten Analysen und Ergebnisse wurden durch Mitarbeiter des DLRs erstellt.

Die während der Nutzung der Scheduling Software erfassten Daten werden im Rahmen des AP1.4 zur statistischen Analyse des Flugplanungsprozesses verwendet. Zwei europäische Fluggesellschaften stellen ihre entsprechenden Datenbanken zur Auswertung bereit. AP 1.4 ergänzt das HAP1 um eine quantitative Analyse, nachdem im AP 1.2 bereits eine qualitative Analyse der Scheduling-Prozesse erfolgt ist. Auf der Grundlage der durchgeführten Analysen sollen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden.

- Welche Änderungen werden vorgenommen?
- Wie oft und wann werden bestimmte Änderungen vorgenommen?
- Wie viel vom Flugplan wird dabei geändert bzw. für welchen Zeitraum gelten Änderungen?
- Wie viele weitere Anpassungen ziehen Änderungen – auch abhängig vom Zeitpunkt der Änderung – nach sich?
- Welche auslösenden Ereignisse stehen hinter Flugplanänderungen?
- Was sind die häufigsten Auslöser für Änderungen?

### 4.2.1. Flugplanänderungsereignisse

Änderungen im Flugplan entsprechen Änderungen der Merkmale eines Legs. Merkmale, deren Änderung sich im operativen Flugplan tatsächlich bemerkbar macht, sind die folgenden:

- Flight Number
- Flight Carrier
- Aircraft Owner
- Subfleet Type

- Configuration Code
- Departure and Arrival Airport
- Departure and Arrival Time

Dabei handelt es sich also um Merkmale des eingesetzten Fluggeräts, der Verbindung, der Flugzeiten und um die Flugnummer. In der Scheduling Software wird ein Action Code gespeichert, um abzuspeichern, welche Merkmale in der Zeile verändert werden. Einen Überblick über Action Codes, die von den betrachteten Airlines tatsächlich verwendet werden, wird in Tabelle 3 gegeben. Anschließend wird beschrieben, welche konkreten Änderungen die einzelnen Codes repräsentieren.

Action Code	Bedeutung
CNL	Cancellation
CON	Configuration Change
DOO	Day of Operation Change
EQT	Equipment Change
FLT	Flight Number Change
NEW	Creation of a new leg
RPL	Replacement
RRT	Routing Change
TIM	Timing Change

Tabelle 3: Verwendete Action Codes

Anschließend wird beschrieben, welche konkreten Änderungen die einzelnen Codes repräsentieren. Die Codes werden nachfolgend mit den oben verwendeten Abkürzungen referenziert.

- CNL: Eine Cancellation bedeutet, dass das betroffene Leg aus dem Flugplan gestrichen wird.
- CON: Ein Configuration Change bedeutet, dass die Sitzplatzkonfiguration des Flugzeugs geändert wird.
- DOO: Ein Day of Operation Change bedeutet, dass sich der Tag, an dem das Leg durchgeführt wird, ändert.
- EQT: Ein Equipment Change bedeutet, dass eine Veränderung des Fluggeräts vorgenommen wurde. Veränderungen des Fluggeräts können sich auf einen Wechsel des Flugzeugtypen (subfleet type) oder des Eigentümers (aircraft owner) beziehen.
- FLT: Ein Flight Number Change bedeutet, dass die Flugnummer des durchgeführten Legs verändert wird.
- NEW: Der Action Code „NEW“ bedeutet, dass das betroffene Leg neu angelegt wird.
- RPL: Der Action Code „RPL“ wird verwendet, wenn Änderungen verschiedener Art gleichzeitig durchgeführt werden. Wird auf einem Leg bspw. sowohl das eingesetzte Fluggerät (EQT) als auch die Abflugzeit geändert (TIM), wird der Action Code „RPL“ verwendet.
- RRT: Wird ein Routing Change vorgenommen, so ändert sich der Ab- oder Zielflughafen und damit das Merkmal departure airport oder arrival airport.
- TIM: Ein Timing Change bedeutet, dass eine Veränderung an departure time oder arrival time oder beidem vorgenommen wurde.

### 4.2.2. Häufigkeit von Änderungen

Abbildung 5 zeigt die prozentuale Häufigkeit der Action Codes für beide Airlines. Demnach sind bei Airline 1 ca. 80 % und damit die große Mehrheit der Änderungen EQTs. Weitere 6 % entfallen auf CNLs, rund 6 % auf NEWs. 4 % sind TIMs. Bei Airline 2 ist die Verteilung ausgeglichener: Etwa 38 % sind EQTs, 18 % sind NEWs, 13 % bzw. 15 % sind CNLs bzw. RPLs und 12 % sind TIMs. Der Unterschied zwischen den Verteilungen kann u.a. durch zusätzliche Optimierungstools verursacht werden, die bei Airline 1 eine Vielzahl an EQTs durchführen, während solche Tools bei Airline 2 nicht verwendet werden. Die Action Codes RRT, DOO und FLT wurden bei dieser Abbildung aufgrund ihrer geringen Häufigkeit nicht abgebildet (sie stellen zusammen genommen jeweils weniger als 0,5 % der Änderungen dar).

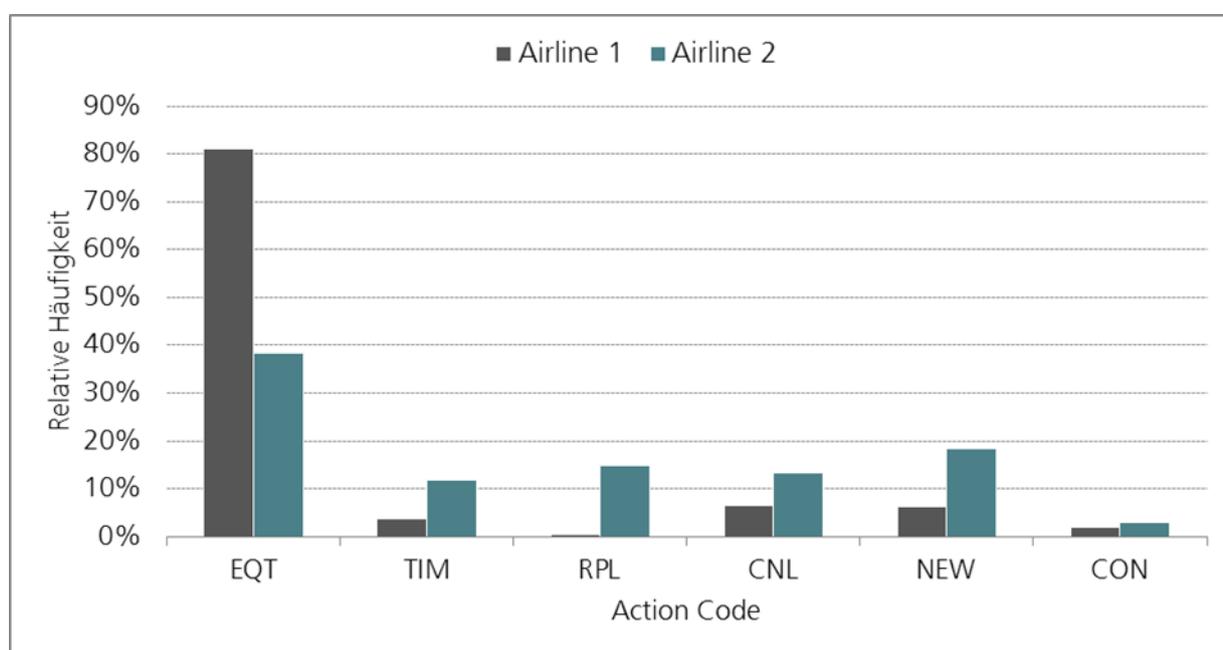


Abbildung 5: Relative Häufigkeit von Action Codes

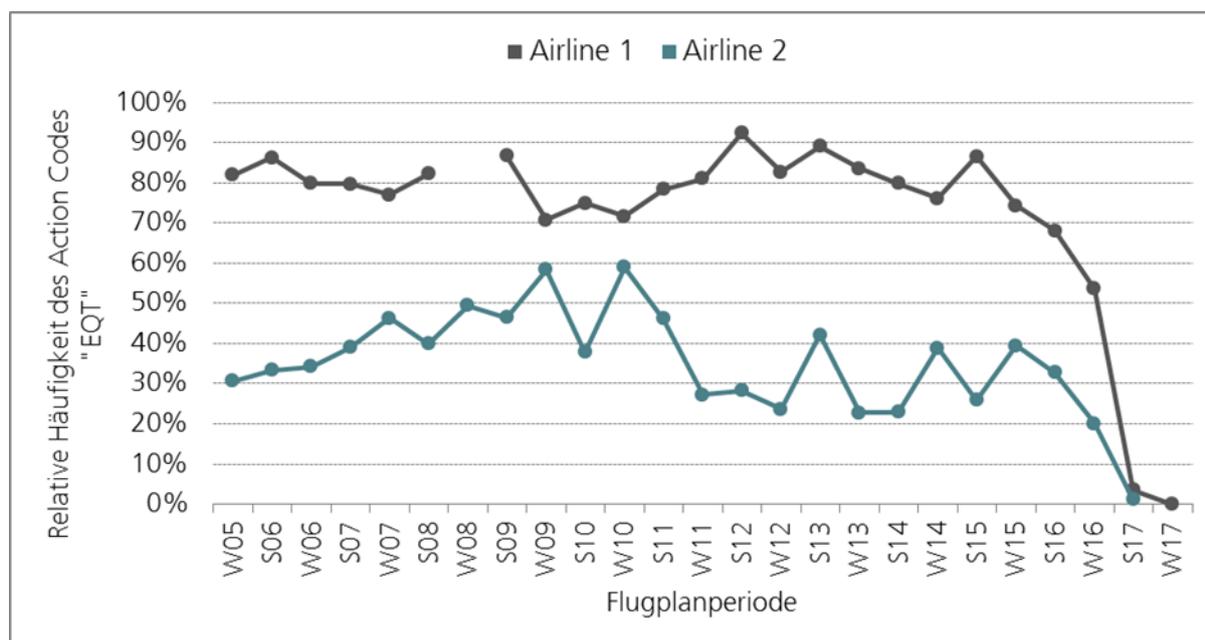


Abbildung 6: Relative Häufigkeit des Action Codes "EQT" im Zeitverlauf

Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Anteil des Action Codes „EQT“ im Zeitverlauf. Bis zur Flugplanperiode S16 liegt der Wert bei Airline 1 stets zwischen rund 70 % und 90 %. Bei Airline 2 schwankt er in diesem Zeitraum deutlich stärker mit einer Spannweite von ca. 20 % bis 60 %.

Zu Veranschaulichungszwecken wurden die Flugplanperioden Winter 2016/2017, Sommer 2017 und Winter 2017/2018 ebenfalls dargestellt. In diesen Perioden fällt die Kurve in beiden Fällen stark ab. Dies ist damit zu erklären, dass die betroffenen Perioden zum Zeitpunkt des Datenbankauszugs noch in der Zukunft lagen und die entsprechenden Flugpläne bis dato lediglich in die Datenbank eingepflegt, nicht aber bearbeitet wurden. Der Action Code „NEW“ hat in diesem Zeitraum einen entsprechend hohen Anteil von bis zu 100 %. Aus diesem Grunde können die Flugpläne auch nicht als repräsentativ gelten.

Häufig weist eine Änderung einen Wirksamkeitszeitraum von mehr als einem Tag auf, in dem dann eine Vielzahl von einzelnen Flügen des Legs durch die Änderung betroffen ist. Es stellt sich demnach die Frage, wie viele Einzelflüge letztendlich durch eine Änderung betroffen sind.

Abbildung 7 zeigt die mittlere Anzahl der von einer Änderung bzw. Zeile betroffenen Flüge in Abhängigkeit des Action Codes. Demnach sind die meisten Flüge betroffen, wenn der Action Code „NEW“ lautet. Das gilt für beide Airlines. Bei Airline 1 sind dann im Mittel 40, bei Airline 2 28 Flüge betroffen. Diese hohe Anzahl erklärt sich dadurch, dass Legs bei der ersten Eintragung in einem Schedule i.d.R. für eine lange Zeitdauer angelegt werden. Bspw. wird zu Beginn der Bearbeitung eines Flugplans das Leg X, das dreimal wöchentlich geflogen wird, zunächst für die gesamte Flugplanperiode angelegt. Erst danach werden Änderungen vorgenommen, die für kleine Zeiträume innerhalb der Flugplanperiode gelten (Splitting). EQTs sind demgegenüber die Änderungen, von denen im Mittel die wenigsten Flüge auf einmal betroffen sind. Ein Equipment Change gilt i.d.R. nur für einen bis zwei Flüge. Änderungen der Sitzplatzkonfiguration (CON) betreffen bei beiden Fluggesellschaften zwischen zehn und 15 Flügen. TIMs betreffen im Mittel 13 (Airline 1) bzw. 7 Flüge (Airline 2). Ein deutlicher Unterschied zwischen den Fluggesellschaften besteht beim Änderungstyp „CNL“. Bei Airline 1 sind hiervon im Mittel 20 Flüge auf einmal betroffen, bei Airline 2 sind es nur vier.

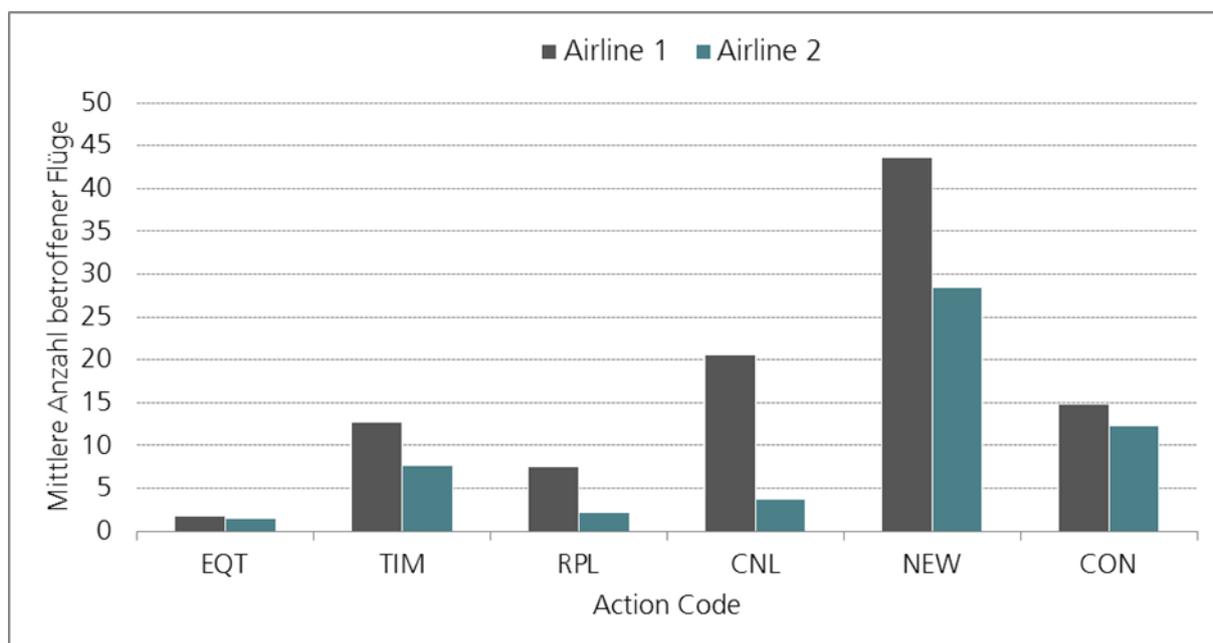


Abbildung 7: Mittlere Anzahl der von einer Änderung betroffener Flüge je Action Code

Abbildung 7 ist das Ergebnis einer einzelflugbasierten Auswertung und stellt dar, wie viele Flüge von den verschiedenen Action Codes insgesamt betroffen sind. EQTs, die bei Airline 1 rund 80 % aller Änderungen ausmachen, beziehen sich demnach auf rund 1,2 Millionen einzelne Flüge. Bei Airline 2 sind ca. 40.000 Flüge durch EQTs betroffen. NEWs, die bei beiden Fluggesellschaften mit Abstand die meisten Flüge beeinflussen, sind durch das Hochladen der Daten in das System (nachfolgend wird dieser Vorgang „Upload“ genannt) am Beginn der Flugplanbearbeitungsphase besonders stark vertreten. Das einfache Anlegen eines Schedules stellt allerdings nur unter datenbanktechnischer Sichtweise eine Änderung dar. In der Realität hat dieser Vorgang keinerlei Auswirkungen auf den operativen Schedule, weswegen die Anzahl der operativ wirksamen NEWs hier weit überschätzt wird.

Eine detaillierte Analyse der Flugplanänderungsereignisse und der Zeitpunkte dieser Ereignisse findet sich in [27].

### 4.2.3. Analyse der Auslöser von Flugplanänderungsereignisse

Die Fluggesellschaften haben eine Reihe verschiedener Change Reason Codes zur Auswahl, die sie im Falle von Änderungsvorgängen verwenden können, um das auslösende Ereignis zu spezifizieren. Nicht alle Fluggesellschaften machen Gebrauch von diesen Möglichkeiten. So verwendet Airline 2 beispielsweise nur drei verschiedene Codes, wovon einer in mehr als 99,9 % der Fälle verwendet wird. Es stellt sich in solchen Fällen die Frage, ob die Change Reason Codes präzise verwendet werden oder ob bestimmte Codes unabhängig vom tatsächlichen Änderungsgrund als Standardwert verwendet werden. Im Falle von Airline 2 muss hiervon zumindest ausgegangen werden.

Bei Airline 1 werden hingegen mehr Change Reason Codes verwendet. Auch der Anteil der einzelnen Codes ist zumindest etwas gleichmäßiger verteilt. Auf Nachfrage erklärte die Fluggesellschaft, dass die Codes gewissenhaft und präzise verwendet werden, um im Nachhinein eine zuverlässige und aussagekräftige Berichterstattung über Flugplanänderungen zu ermöglichen. Aus diesem Grunde stützt sich die Analyse der Auslöser von Flugplanänderungsereignissen ausschließlich auf die Daten der Airline 1.

In Tabelle 4 sind die von Airline 1 verwendeten Change Reason Codes aufgeführt.

<b>Change Reason Code</b>	<b>Bedeutung</b>
AIRS	Airspace Restriction
ARPT	Airfield Restriction
COMM	Commercial Reasons
CREW	Crew Shortage
DAMA	Aircraft Damage
EQUI	Equipment Shortage
HOLI	Holiday Schedule
POLI	Political Situation
TECH	Technical Reasons, Maintenance etc.

Tabelle 4: Verwendete Change Reason Codes

Abbildung 8 zeigt die relative Häufigkeit der Change Reason Codes, wobei nur diejenigen Codes berücksichtigt werden, die jeweils mehr als 0,5 % aller Änderungen darstellen. Zunächst fällt auf, dass nur vier von neun Codes diesen Schwellwert unterschreiten. Darüber hinaus wird deutlich, dass in mehr als neun von zehn Fällen Flugplanänderungen mit COMM, also kommerziell begründet werden. Nach Aussage der Airline 1 wird dieser Code immer dann verwendet, wenn die Änderung kommerziell begründet werden kann, ohne dass ein Zusammenhang zur Technik oder Crew besteht. Kommerziell begründbar sind Änderungen dann, wenn sie durch Änderungen der Buchungszahlen notwendig werden.

Der zweithäufigste Code ist TECH und wird verwendet, wenn Änderungsanfragen der Technik (technical department) berücksichtigt werden müssen. Darunter ist die Notwendigkeit zu verstehen, ein Flugzeug – teilweise außerplanmäßig – für eine längere Zeitspanne aus dem Dienst zu nehmen, um technische Arbeiten wie bspw. Triebwerkwechsel durchzuführen. TECH wird in rund 4 % der Fälle als Änderungsgrund angegeben.

Der dritthäufigste Code ist CREW und wird verwendet, wenn Änderungsanfragen des Crew-Departments zu berücksichtigen sind. Solche Änderungsanfragen dienen dem Zweck, eine ausreichende Versorgung der einzelnen Subfleets mit fliegendem Personal sicherzustellen, was unter anderem durch Krankmeldungen, Urlaubsplanungen, Crew-Mitgliederpräferenzen, die Regelung für Bereitschaftsdienste und andere Einflussfaktoren erschwert wird. CREW wird in rund 3 % der Änderungen als Begründung angegeben.

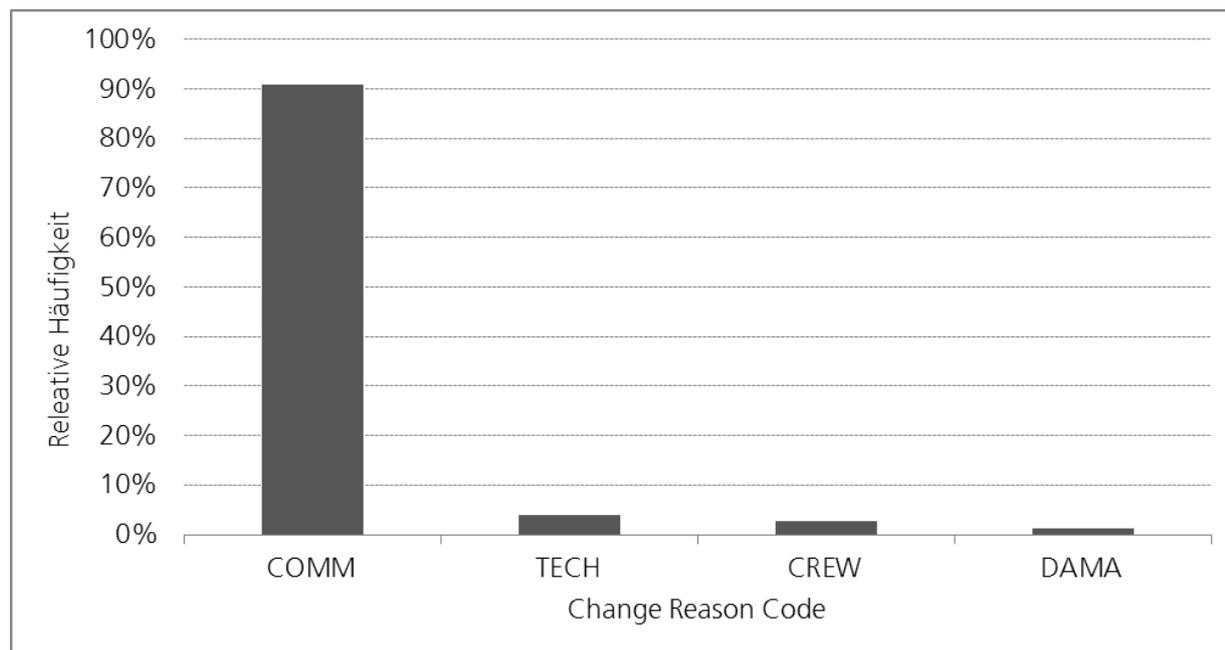


Abbildung 8: Relative Häufigkeit verwendeter Change Reason Codes bei Airline 1

Abbildung 9 zeigt die relativen Häufigkeiten der Change Reason Codes, wenn sie mittels einzelflugbasierter Auswertung berechnet werden. Dabei wird deutlich, dass der Anteil des Change Reason Codes COMM von 90 % auf rund 94 % steigt. Die Anteile der Codes TECH und CREW fallen auf unter 1 % und der Anteil von DAMA steigt deutlich von 1,5 % auf rund 5 %.

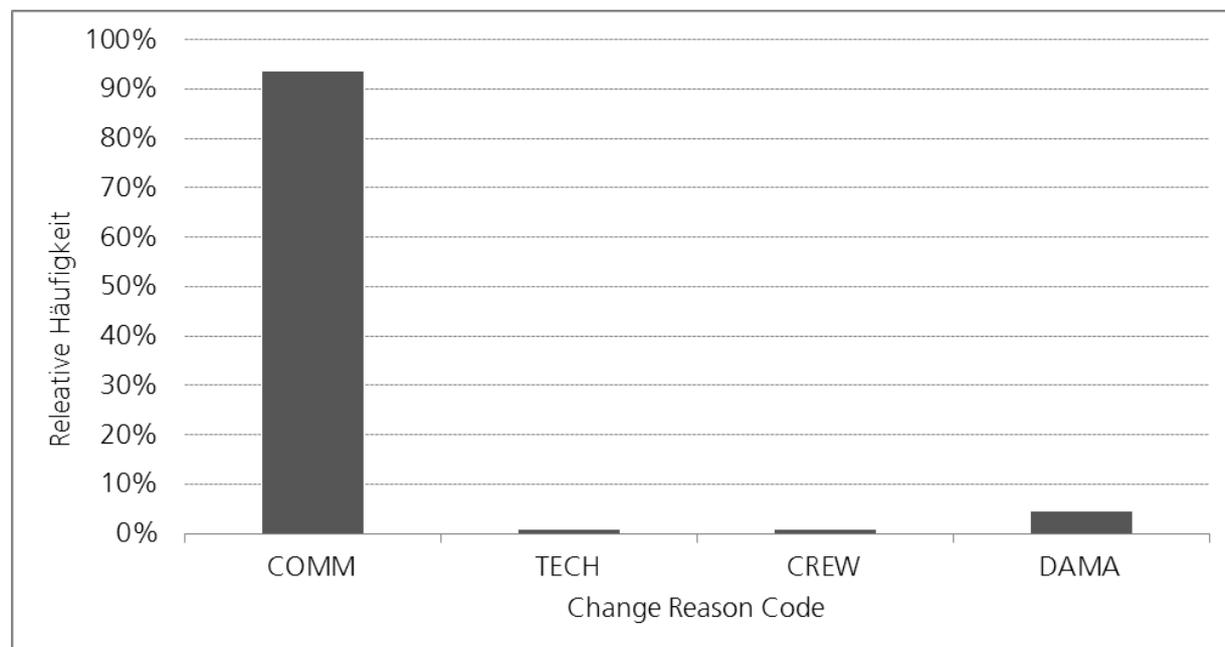


Abbildung 9: Relative Häufigkeit verwendeter Change Reason Codes bei Airline 1 (einzelflugbasiert)

#### 4.2.4. Zusammenfassung Datenanalyse Flugplanungsprozess

Im Arbeitspaket 1.4 wurde auf Datenbanken der Scheduling Software zweier Fluggesellschaften zurückgegriffen, um Erkenntnisse über Änderungen im Rahmen ihres Flugplanungsprozesses zu gewinnen. Die relevanten Datenbanken werden im Rahmen der Nutzung der Scheduling-Software mit Prozessdaten gefüllt, aus denen die Entwicklung der Flugplanung im Zeitverlauf nachgebildet werden kann.

Insgesamt konnte die Analyse der gesammelten Daten einen guten Einblick in den Flugplanungsprozess der betrachteten Fluggesellschaften geben. Ein wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspakets ist es auch, dass die Daten sich überhaupt zur Analyse des Flugplanungsprozesses eignen. Die Art und Häufigkeit sowie die zeitliche Verteilung und die Auswirkung von Flugplanänderungen wurden unter verschiedenen Aspekten erfolgreich untersucht und konnten durch entsprechende statistische Parameter dargestellt werden. Ebenso ist es gelungen, eine Schätzung für die Häufigkeit verschiedener Gründe von Flugplanänderungen zu erarbeiten.

Die Datenanalyse hat gezeigt, dass Equipment Changes, d.h. Wechsel des Fluggeräts oder Wechsel des Fluggerätbesitzers, besonders häufig vorkommen. Bei Airline 1 machen sie rund 80 % aller verzeichneten Flugplanänderungen aus, bei Airline 2 immerhin rund 40 %. Seltener, aber dennoch kontinuierlich werden Timing und Configuration Changes, Cancellations und die Anlage neuer Legs im Flugplan durchgeführt. Dasselbe gilt für sog. Replacements, die verwendet werden, wenn mehrere Änderungen gleichzeitig stattfinden.

Flugplanänderungen betreffen – abhängig von der Art der Änderung – unterschiedlich viele Einzelflüge. Die häufigsten Änderungen, nämlich EQTs, betreffen i.d.R. nur einen bis zwei Flüge, während Timing Changes, die vergleichsweise selten durchgeführt werden, bei Airline 1 rund 13 und bei Airline 2 rund acht Flüge betreffen.

Die erfassten Flugplanänderungen werden im Mittel 100 bis 250 Tage vor Flugdurchführung vorgenommen. Equipment Changes erfolgen dabei vergleichsweise spät, nämlich 100 (Airline 2) bzw. 150 Tage (Airline 1) vor Flugdurchführung. Die Anlage neuer Legs erfolgt im Mittel am frühesten, was vor allem durch die Anlage eines gesamten Flugplans zu Beginn der Bearbeitungsphase bedingt ist.

Zudem konnte festgestellt werden, dass die Wirksamkeitsdauer von Änderungen mit voranschreitender Zeit abnimmt – der Flugplan wird „gesplittet“. Werden zu Beginn noch Änderungen vorgenommen, die sich auf die gesamte Flugplanperiode auswirken, beziehen sich im Verlauf der Zeit immer mehr Änderungen auf kleinere Zeiträume. Hat die Flugplanperiode einmal begonnen, liegt die durchschnittliche Wirksamkeitsdauer von Änderungen bei rund einem Tag. Eine besondere Rolle für das Splitting bei Airline 1 spielt die IATA-Slot-Conference, da die mittlere Wirksamkeitsdauer von Änderungen gleich nach der Konferenz nahezu kontinuierlich abnimmt.

Nicht nur für das Splitting, sondern auch für die Menge an Änderungen bei Airline 1 ist die IATA-Slot-Conference wichtig. Die tägliche Anzahl an Änderungen verfünffacht sich in den ersten drei Wochen nach der Konferenz. Eine Verdreifachung der Änderungsmenge ist daneben auch im Nachgang der IATA-Slot-Return-Deadline zu verzeichnen.

Bei der Analyse der Ereignisse, die Flugplanänderungen auslösen, konnten aus Gründen der Datenqualität ausschließlich Daten der Airline 1 verwendet werden. Die Datenanalyse hat gezeigt, dass der mit Abstand häufigste Grund für Flugplanänderungen kommerzieller Natur ist. Das bedeutet, dass eine Veränderung der Buchungszahlen vorliegt und eine Reaktion der Scheduler erforderlich macht. Rund 90 % aller Änderungen werden dadurch hervorgerufen. Die restlichen zehn Prozent entfallen auf Crew Shortages, technisch-bedingte Änderungen (Maintenance etc.) oder Beschädigungen des Flugzeugs.

Sowohl Arbeitspaket 1.4 als auch Arbeitspaket 1.2 sind als vorbereitende Arbeiten für das Hauptarbeitspaket 3 zu verstehen, in dem u.a. Verfahren zur Effizienzsteigerung im Flugplanungsprozess entwickelt werden sollen. In den Arbeitspaketen 1.2 und 1.4 werden die dafür notwendigen Beschreibungen des Ist-Zustands geleistet. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 1.4 ergänzen dabei die in Arbeitspaket 1.2 erarbeiteten qualitativen Analysen um eine quantitative Komponente und dienen im Rahmen des Hauptarbeitspaketes 3 als Wissensgrundlage sowie als Ausgangs- und Ansatzpunkt für Überlegungen zur Effizienzsteigerung.

### **4.3. Verwertung und Kenntnisse aus HAP1**

Das Ziel des ersten Hauptarbeitspaketes des Projektes war in erster Linie die Aufzeichnung, Modellierung und die Erarbeitung des Verständnisses des Flugplanungsprozesses. Erst auf dieser Basis kann das DLR Lufttransportsysteme zur Verbesserung der Prozesse und Stabilisierung desselben beitragen. Insbesondere die Modellierung trägt dazu bei, Zusammenhänge zu verstehen. Das Verständnis der Zusammenhänge und Schnittstellen ermöglicht es, im Zuge des ROFL Projektes Vorschläge für z. B. Kommunikationsverbesserungen innerhalb des Prozesses zu erarbeiten. Die Verwertung der Erkenntnisse erfolgt von daher in erster Linie im Rahmen des Projektes. Nichtsdestotrotz kann das DLR Lufttransportsysteme die Erkenntnisse der Prozessmodellierung für weitere Forschungsarbeiten über das Projekt hinaus zur Verbesserung und Systematisierung des Prozesses nutzen. Hierbei werden zum Beispiel in weiteren Projekten Prozesse wie Crewplanung detailliert analysiert und auch verbessert werden können.

## 5. Darstellung der Ergebnisse: HAP2 Analyse durchgeführter Flugpläne & Verspätungen

### 5.1. Statistische Analyse der Verspätungsdaten

Im Rahmen des HAP2 soll eine statistische Analyse von Verspätungsdaten durchgeführt werden, mit deren Ergebnissen sich einerseits Rückschlüsse auf die Ursachen von Verspätungen ziehen lassen und andererseits ein Modell zur Prognose von Primärverspätungen entwickeln lässt. Dieses Modell wird im weiteren Projektverlauf dazu dienen, das „Abfliegen“ eines Schedules zu simulieren und dabei die Entstehung und Fortpflanzung von Verspätungen nachzustellen.

Die Datenanalysen zielen darauf ab, den Einfluss bestimmter Faktoren auf Primärverspätungen nachzuweisen und dann ggf. zu quantifizieren, um das Prognosemodell entwickeln zu können. Dem Modell wird als Input ein Schedule übergeben. Die vom Schedule vorgegebenen Rahmenbedingungen eines jeden Fluges (bspw. Ab- und Zielflughafen, Abflugs- und Ankunftszeit, ...) stellen somit gleichzeitig auch diejenigen Faktoren dar, deren Einfluss auf Primärverspätungen untersucht werden soll. Die Entwicklung und softwaretechnische Implementierung des Prognosemodells für Primärverspätungen wird im Rahmen des HAP 4 erfolgen. Das konkrete Vorgehen, in dem sich auf die Datenanalyse beschränkt wird, wird im nachfolgenden Kapitel behandelt.

Nachfolgend sind jene Fragen aufgelistet, die im Rahmen des AP2.2 beantwortet werden. Die Fragen zielen darauf ab, den Einfluss bestimmter Faktoren auf Primärverspätungen zu untersuchen. Neben Primärverspätungen sollen auch Sekundärverspätungen untersucht werden. Hierbei liegt der Fokus allerdings mehr auf der Beschreibung von Verteilungen als auf der Identifikation von Einflussfaktoren. Zu begründen ist dies damit, dass sich Sekundärverspätungen im später zu entwickelnden Modell aus der Kombination von Primärverspätung, Minimum Groundtime und Bodenzeit konkret berechnen lassen und daher nicht prognostiziert werden müssen.

- Analyse der Verspätungsdaten mit zeitlicher Abhängigkeit
  - Sind Verspätungen abhängig von der Tageszeit?
  - Sind Verspätungen abhängig von dem Wochentag?
  - Sind Verspätungen abhängig von der Jahreszeit?
  - Jeweils aufgeteilt nach Ankunfts- und Abflugzeiten
- Analyse der Verspätungsdaten in Abhängigkeit von dem Servicetype, Load Factor, Maintenance, Distanz, Subflotte
  - Diskretisierung der fünf Parameter in Klassen. Welcher Parameter und welche Klasse erzeugt wieviel Verspätung? Z.B.: Wieviel Verspätung ist für Flüge von 1000-2000km zu erwarten?
  - Grafische Aufbereitung in einer Grafik pro Parameter mit Konfidenzintervall
  - Modell zur Vorhersage mit Signifikanztests
- Sekundäre Verspätungen
  - Aufbau von Flugzeugrotationen
  - Ableitung der Sekundärverspätungen, Verteilung der Sekundärverspätungen
  - Sind Sekundärverspätungen abhängig von einem Faktor (Subflotte, Distanz, Flughafen)? Wenn ja, in welchem Ausmaß?
  - Werden mehr Verspätungen auf bestimmten Rotationen erzeugt?

## 5.1.1. Datenanalyse zu primären Abflugverspätungen

### 5.1.1.1. Datenumfang

Der Datenanalyse liegen Betriebsdaten von zwei Fluggesellschaften zugrunde. Die Daten von Airline 1 umfassen rund 930.000 Flüge aus den Jahren 2009 – 2016. Die Daten von Airline 2 umfassen ca. 390.000 Flüge aus den Jahren 2003 – 2016. Die Flüge der Airline 1 verteilen sich auf insgesamt 98 einzelne Flugzeuge, die Flüge bei Airline 2 verteilen sich auf 35 Flugzeuge. Tabelle 5 fasst die Zahlen und Merkmale zusammen.

Merkmal	Airline 1	Airline 2
Anzahl an Flügen	928.564	389.387
Zeitspanne	2009-2016	2000-2016
Anzahl an Flugzeugen	98	35

Tabelle 5: Umfang der analysierten Daten

### 5.1.1.2. Datenaufbereitung

#### Verwendete Minimum Groundtime-Werte

Es werden nur solche Flugzeugkennungen („tail signs“) und deren Flüge für die Analyse berücksichtigt, zu denen sich eine Minimum Groundtime für den Abflughafen zuordnen lässt. Für Airline 2 werden lediglich Flüge für die Datenanalyse verwendet, die durch einzelne Flottentypen durchgeführt wurden. Damit werden ca. 99 % aller Airline 2-Flüge berücksichtigt.

#### Trennung von Primär- und Sekundärverspätungen

Um Primär- und Sekundärverspätungen zu trennen, werden die je Flug berechneten Sekundärverspätungen von den Primärverspätungen (dep delay) subtrahiert. Analog hierzu werden Abflugverspätungen (dep delay) von den Ankunftsverspätungen (arr delay) subtrahiert, um Abweichungen von der geplanten Blockzeit zu ermitteln. Dadurch entstehen für jeden Flug die zusätzlichen Werte „actual dep delay“ und „actual arr delay“, auf denen die Analyse von Flugverspätungen basiert. Untenstehend wird die Berechnung der Attribute formal zusammengefasst. Dabei ist zu erwähnen, dass im vorliegenden Deliverable lediglich die Analysen zum Attribut actual dep delay vorgestellt werden.

$$\begin{aligned} \text{actual dep delay} &= \text{dep delay} - \text{Sekundärverspätung} \\ \text{actual arr delay} &= \text{arr delay} - \text{dep delay} \end{aligned}$$

### 5.1.1.3. Allgemeine Verspätungsanalyse

Abbildung 10 zeigt, welche Abflugverspätungsausprägungen bei Airline 1 in welcher Häufigkeit vorkommen. Dabei fällt folgendes auf: Eine Ausprägung von 0 Minuten – d.h., dass der Abflug pünktlich erfolgt ist – kommt rund 120.000 Mal vor und ist damit bei weitem der am häufigsten auftretende Wert. Zudem gibt es eine große Anzahl an Flügen, die eine negative Abflugverspätung aufweisen und somit verfrüht starten. Das betrifft insgesamt rund 41% aller Flüge. Außerdem deutet sich bei der Darstellungsweise in Abbildung 10 bereits an, dass die Verteilung der Abflugverspätungen ein „langes rechtes Ende“ aufweist und daher stark rechtsschief ist. Der Mittelwert der Verteilung liegt daher über dem

Median, was der Tabelle 6 zu entnehmen ist. Der Grund für die Rechtsschiefe liegt darin, dass wenige Flüge eine sehr hohe Verspätung aufweisen und das rechte Ende der Verteilung damit stark verlängern. Die hinsichtlich ihrer Häufigkeit abnehmenden, aber dennoch vorgefallenen Verspätungen im höheren Zeitbereich lassen sich in Abbildung 10 gut erkennen. Im Mittel über alle verzeichneten Flüge beträgt die Abflugverspätung rund 2,5 Minuten, der Median liegt bei 0 Minuten.

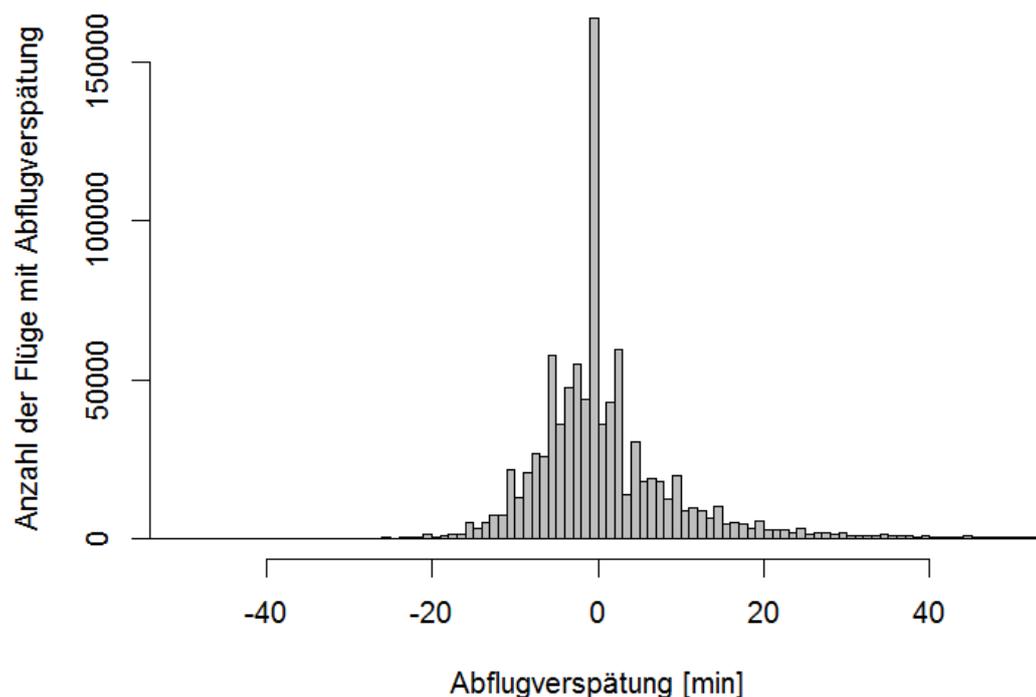


Abbildung 10: Verteilung der Abflugverspätungen bei Airline 1

Abbildung 11 zeigt die Verteilung von Abflugverspätungen bei Airline 2 analog zu Abbildung 10. Ergänzende Verteilungskennziffern sind ebenfalls der Tabelle 6 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass die über alle Flüge gemittelte Abflugverspätung bei Airline 2 deutlich höher liegt als bei Airline 1, nämlich bei 4,23 Minuten. Rechtsschiefe und die damit verbundene rechte Lage des Mittelwerts im Vergleich zum Median sind hier ebenfalls zu beobachten. Die Standardabweichung liegt bei ca. 18 Minuten und weicht damit nur gering von der Standardabweichung bei Airline 1 (ca. 20 Minuten) ab.

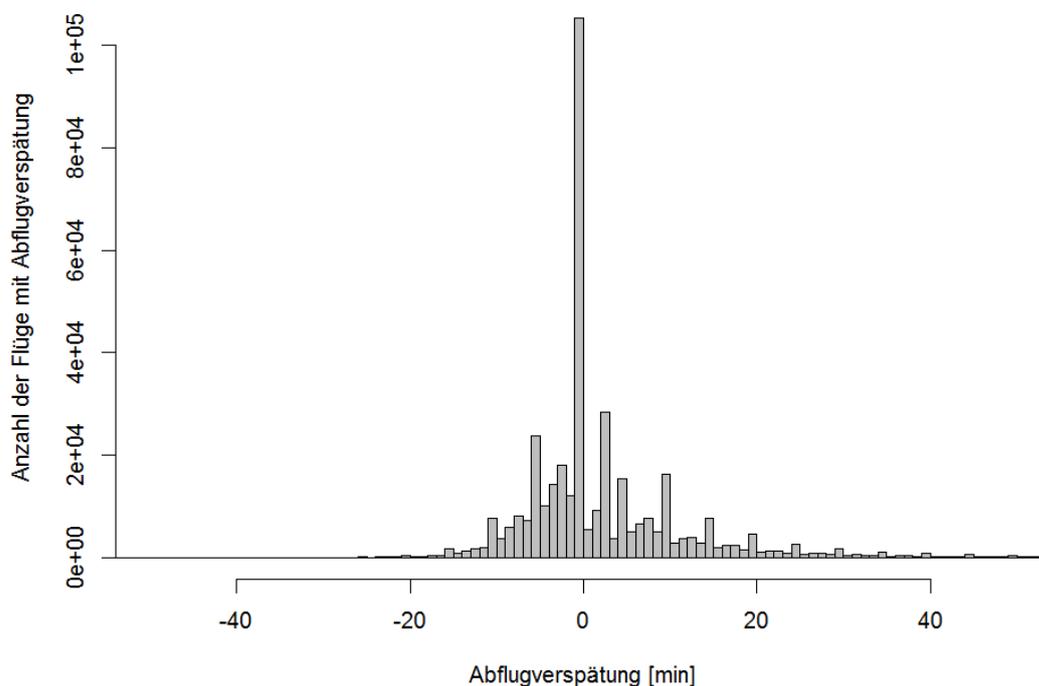


Abbildung 11: Verteilung der Abflugverspätungen bei Airline 2

Tabelle 6: Verteilungskennziffern von Abflugverspätungen

Fluggesellschaft	Median	Mittelwert	Standardabweichung	n
Airline 1	0	2,52	19,94	928.583
Airline 2	0	4,23	18,06	389.387

#### 5.1.1.4. Weitere (Primär-)Verspätungsanalysen

Im Rahmen der Verspätungsanalysen wurden weitere, detaillierte Analysen der Primärverspätungsdaten in Abhängigkeit verschiedener Parameter durchgeführt. Diese Parameter sind Flughafen, zeitliche Parameter (Jahreszeit gemäß Flugplanperioden, meteorologischer Jahreszeit, Monat, Wochentag, Tagesstunde, Tageszeit), Service Type, Sitzladefaktor und Flugzeugtyp. Die detaillierten Ergebnisse finden sich in [28]. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse stichpunktartig zusammengetragen:

- Bei Airline 1 liegen primäre Abflugverspätungen im Winter und im Sommer im Mittel bei rund 3 Minuten und sind in etwa gleich hoch. Im Frühling sind sie dagegen gering (im Mittel ca. eine Minute), der Wert im Herbst liegt bei ca. 2 Minuten. Airline 2 weist sowohl im Winter als auch im Herbst mittlere Abflugverspätungen von rund 4 Minuten auf. Im Sommer liegen sie bei rund 6 Minuten und im Frühling bei 2.
- Der Monat mit den höchsten Abflugverspätungen bei Airline 1 ist der Dezember (im Mittel ca. 5 Minuten). Der zweithöchste Wert wurde mit rund 4 Minuten für Juli berechnet. Bei Airline 2 ist es genau umgekehrt. Der höchste Wert wurde mit mehr als 6 Minuten für Juli berechnet, der zweithöchste mit etwas weniger als 6 Minuten für Dezember. Die niedrigsten Abflugverspätungen

weisen beide Fluggesellschaften während der Frühlingsmonate März und April auf (ca. eine bis eineinhalb Minuten).

- Bei beiden Fluggesellschaften ist Dienstag der Tag mit den im Mittel niedrigsten primären Abflugverspätungen. Bei Airline 1 sind es eineinhalb, bei Airline 2 3,5 Minuten. Von Dienstag an steigen die Abflugverspätungen kontinuierlich, bis sie Freitags mit rund 3 (Airline 1) bzw. 5 Minuten (Airline 2) ihren Wochenhöchstwert erreichen.
- Im Tagesverlauf sind Abflugverspätungen bei beiden Fluggesellschaften während des Vormittags (Zeitraum von 09:00 Uhr bis 12:00 Uhr) mit durchschnittlich rund 5,5 Minuten am höchsten. Bis zum Nachmittag (Zeitraum von 15:00 Uhr bis 18:00 Uhr) sinken die Werte auf ca. 3 Minuten (Airline 1) bzw. auf rund 2,5 Minuten (Airline 2). Am niedrigsten liegen sie während der Nacht (Zeitraum von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr).
- Charterflüge weisen bei beiden Fluggesellschaften deutlich höhere mittlere Abflugverspätungen auf als Linienflüge.  
Bei Airline 1 weist die Langstreckenflotte erkennbar höhere Abflugverspätungen auf als die Mittelstrecken- und Kurzstreckenflotte. Letztere weist die geringsten Abflugverspätungen auf.

## 5.1.2. Datenanalyse zu Sekundärverspätungen

### 5.1.2.1. Definition von Sekundärverspätungen

Als sekundäre Verspätungen werden Verspätungen verstanden, die originär durch eine Ankunftsverspätung des Vorgängerfluges entstehen und aufgrund der dadurch verkürzten Bodenzeit nicht abgebaut werden können. Abbildung 12 verdeutlicht das Prinzip. Flug  $i-1$  kann nicht wie geplant zum Zeitpunkt  $ARR_{s_{i-1}}$  (ARR = arrival) landen, sondern landet verspätet zum Zeitpunkt  $ARR_{a_{i-1}}$ . Aufgrund der Minimum Turnaround Time (MTT) des Flugzeugs ist es nun nicht mehr möglich, wie geplant zum Zeitpunkt  $DEP_{s_i}$  (DEP = departure) den Folgeflug  $i$  zu beginnen. Der Start verzögert sich bis zum Zeitpunkt  $DEP_{a_i}$ .

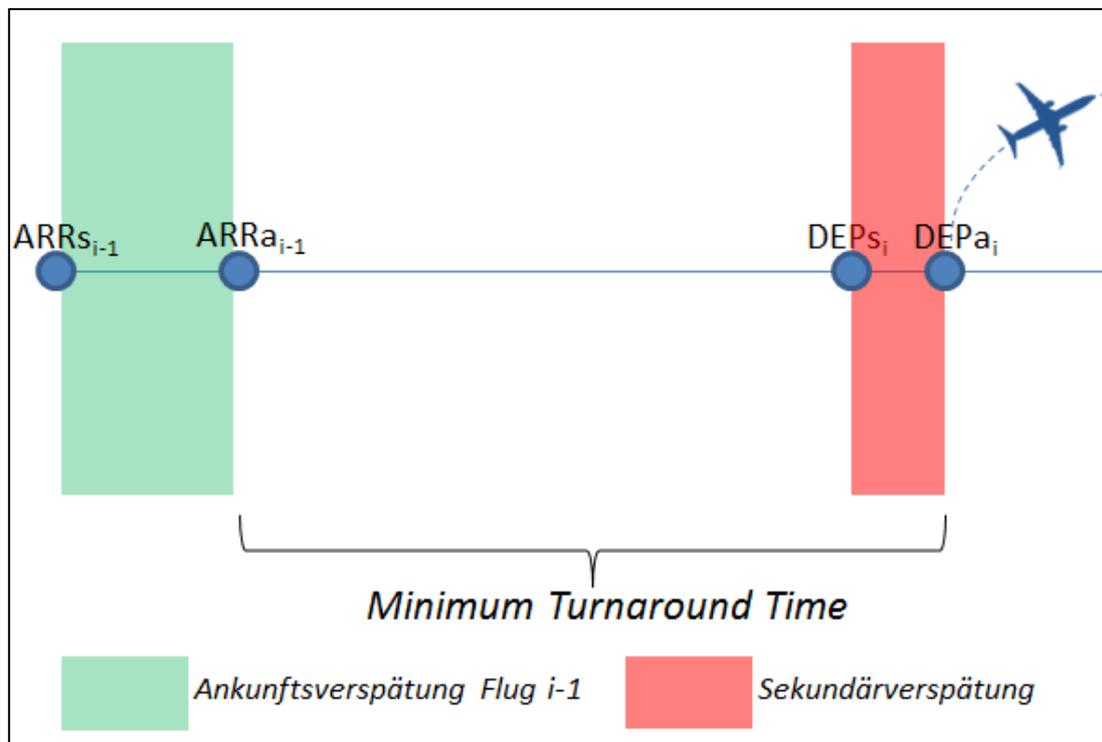


Abbildung 12: Prinzipskizze zur Erläuterung von Sekundärverspätungen

Sekundärverspätungen (Secondary Delay = SD) berechnen sich gemäß Abbildung 12 folgendermaßen:

$$SD = ARRa_{i-1} + MTT - DEPs_i$$

### 5.1.2.2. Aufbau von Flugzeugrotationen

Voraussetzung für die Analyse von Sekundärverspätungen ist der Aufbau von Flugzeugrotationen, damit für jeden Flug überhaupt ein Folgeflug bzw. Vorgängerflug bestimmt werden kann. Ebendieser Aufbau wird im folgenden Kapitel beschrieben. Anschließend werden Verteilungsmerkmale von Sekundärverspätungen für beide Airlines bestimmt. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen Sekundärverspätungen und verschiedenen Einflussfaktoren wie Flugzeugtyp oder Abflughafen untersucht.

Für jeden durchgeführten Passagierflug werden in den Ops-Daten u.a. die folgenden Informationen angegeben:

- Geplante Abflug- und Ankunftszeiten
- Tatsächliche Abflugs- und Ankunftszeiten
- Ab- und Zielflughafen
- Flugzeugtyp
- Flugzeug-Registrierung

Mit diesen Informationen lassen sich für jedes einzelne Flugzeug die durchgeführten Rotationen nachbilden. Dazu werden die durchgeführten Flüge für jedes Flugzeug (erkennbar an der Registrierung (tail number))

anhand der tatsächlichen Abflugszeit chronologisch sortiert. Bereits dann ist erkennbar, welche Flüge im Zeitverlauf und in welcher Reihenfolge durchgeführt wurden.

Die Rotationen werden anschließend zu sog. Rotationsketten verbunden. Rotationsketten sind direkt vergleichbar mit dem Konzept des aircraft operational day. Liegt eine gewisse Bodenzeit zwischen zwei Flügen, können die beiden Flüge als voneinander unabhängig betrachtet werden, sodass sich Verspätungen nicht fortpflanzen können. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Bodenzeit mit 360 Minuten beziffert. Liegen also mindestens 360 Minuten zwischen der Landung eines Fluges und dem Start des Folgefluges, so liegen beide Flüge in unterschiedlichen Rotationsketten. Am Beginn einer jeden Rotationskette kann keine Sekundärverspätung auftreten. Rotationsketten werden ebenfalls unterbrochen, wenn der Zielflughafen eines Fluges und der Abflughafen des Folgeflugs nicht übereinstimmen. Das kann u.a. dann passieren, wenn ein Positionierungsflug ohne Passagiere an Bord vorgenommen wird und das entsprechende Leg daher nicht in den verwendeten Daten enthalten ist.

### 5.1.2.3. Ableitung von Sekundärverspätungen

Sekundärverspätungen entstehen, wie oben bereits beschrieben, wenn die durch eine Ankunftsverspätung reduzierte Bodenzeit nicht mehr ausreicht, um die MTT abzudecken und somit der Abflug des Folgeflugs verspätet stattfinden muss. Formale Voraussetzungen für das Vorliegen einer Sekundärverspätung auf Flug i sind:

- Flug i-1 kommt verspätet an,
- Flug i hat Verspätung beim Abflug und
- Flug i-1 und Flug i sind in derselben Rotationskette

### 5.1.2.4. Analyseergebnisse zu Sekundärverspätungen

#### Verteilung von Sekundärverspätungen

Tabelle 7 zeigt Verteilungskennziffern für Sekundärverspätungen bei Airline 1 bzw. Airline 2 über alle Flüge. Tabelle 8 zeigt dieselben Verteilungskennziffern, diesmal nur über Flüge mit Sekundärverspätung ausgewertet. Bei Airline 1 werden rund 121.000 Sekundärverspätungen gezählt. Damit treten Sekundärverspätungen bei ca. 13 % aller Flüge auf. Bei Airline 2 werden ca. 77.000 Sekundärverspätungen gezählt. Ca. 20 % aller Flüge sind demnach betroffen.

	Min	Median	Mittelwert	Max	Standardabweichung	n
Airline 1	0	0	2,27	1836	12,23	928.583
Airline 2	0	0	5,38	797	20,84	389.387

Tabelle 7: Verteilungskennziffern für Sekundärverspätungen über alle Flüge

	Min	Median	Mittelwert	Max	Standardabweichung	n
Airline 1	1	9	17,41	1836	29,73	121.127
Airline 2	1	14	27,31	797	40,06	76.767

Tabelle 8: Verteilungskennziffern für Sekundärverspätungen über Flüge mit Sekundärverspätung

Die Mehrzahl der Flüge weist keine Sekundärverspätung auf. Das gilt sowohl für Airline 1 als auch für Airline 2. Der Median beider Verteilungen in Tabelle 7 liegt bei 0. Im Mittel über alle Flüge beträgt die Sekundärverspätung bei Airline 1 ca. 2,3 Minuten. Bei Airline 2 ist sie mit 5,4 Minuten deutlich höher. Werden nur Flüge berücksichtigt, die auch eine Sekundärverspätung aufweisen, liegt der Mittelwert bei Airline 1 bei 17,4 Minuten, bei Airline 2 bei 27,3 Minuten. Insgesamt treten Sekundärverspätungen bei Airline 2 häufiger und stärker auf als bei Airline 1.

Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Sekundärverspätung für beide Fluggesellschaften als Histogramm. Es wird nochmals deutlich, dass die Verteilungen besonders viel Gewicht im Bereich geringer Sekundärverspätungen haben. Für Airline 1 gilt das noch mehr als für Airline 2. Bei Airline 1 sind 75 % aller Werte niedriger als 21 Minuten, für Airline 2 gilt dasselbe bei 32 Minuten. Die Verteilungen sind stark rechtsschief, sodass der Median und Mittelwert (siehe Tabelle 7) deutlich voneinander entfernt liegen.

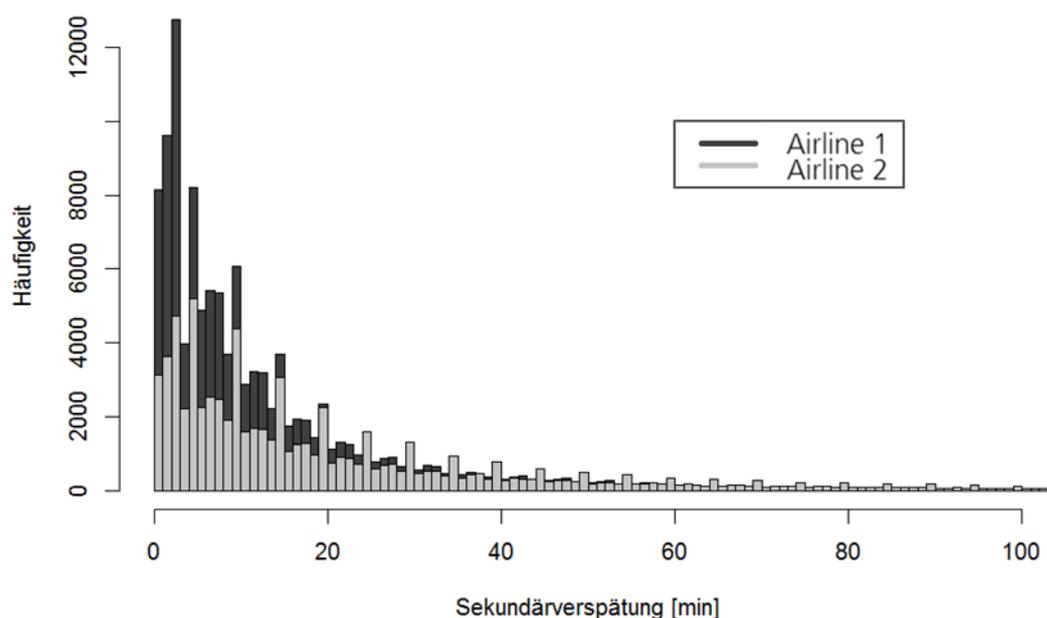


Abbildung 13: Verteilung der Sekundärverspätungen

### Tiefe von Sekundärverspätungen

Als Tiefe von Sekundärverspätungen wird nachfolgend die Anzahl an Flügen verstanden, über die sich eine Primärverspätung fortpflanzt. Wird in Flug *a* eine primäre Verspätung aufgebaut, die sich auch noch in den Flügen *b* und *c* bemerkbar macht und erst bei Flug *d* vollkommen abgebaut ist, so würde sich die Primärverspätung von Flug *a* zweimal fortpflanzen. Die Tiefe der Sekundärverspätung würde in diesem Falle 2 betragen.

Abbildung 14 zeigt die mittlere Tiefe von Sekundärverspätungen bei beiden Airlines. Demnach pflanzen sich Primärverspätungen bei Airline 1 im Durchschnitt auf rund 1,4 weiteren Flügen fort. Bei Airline 2 liegt die durchschnittliche Tiefe der Sekundärverspätungen bei rund 1,9 und damit deutlich höher.

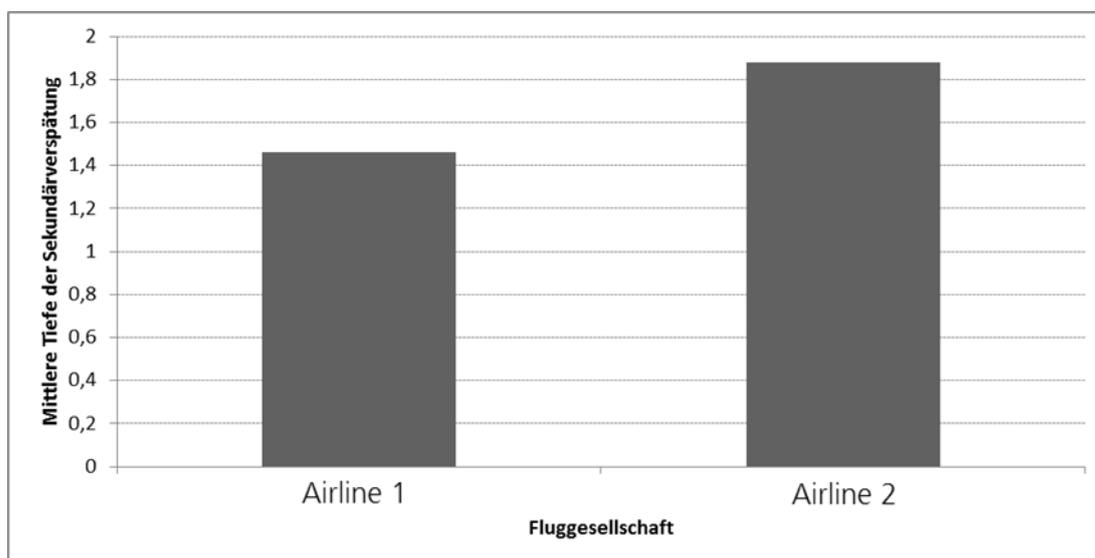


Abbildung 14: Mittlere Tiefe der Sekundärverspätung

Tabelle 9 zeigt ergänzend entsprechende Verteilungskennziffern. Die Stichprobengröße  $n$  gibt in diesem Fall an, wie viele Ketten von Flügen bzw. Rotationen gebildet werden konnten. Eine Kette endet immer dann, wenn die Sekundärverspätung vollständig abgebaut ist. Daher liegt die Stichprobengröße immer unter der Anzahl an Sekundärverspätungen aus Tabelle 7. Der Median liegt bei beiden Fluggesellschaften bei 1, d.h. 50 % aller Ketten haben eine Länge von 1 (hier liegt gleichzeitig auch das Minimum). Die Standardabweichung liegt für Airline 1 bei 0,88 und für Airline 2 bei 1,4. Die längste Kette liegt im Falle der Airline 1 bei 13 Fortpflanzungen der Primärverspätungen und im Falle von Airline 2 bei 16. Ketten dieser oder ähnlicher Längen kommen in den Daten nur sehr selten vor, was sich am im Vergleich dazu sehr geringen Mittelwert erkennen lässt.

Fluggesellschaft	Median	Mittelwert	Standardabweichung	n
Airline 1	1	1,46	0,88	82.734
Airline 2	1	1,88	1,38	40.836

Tabelle 9: Verteilungskennziffern von Sekundärverspätungstiefen

### 5.1.2.5. Weitere (Sekundär-)Verspätungsanalysen

Im Verlauf des Projektes wurden weitere Analysen hinsichtlich der Sekundärverspätungen durchgeführt. Diese umfassen eine genaue Analyse auffälliger Rotationen, der zeitlichen Abhängigkeit (Jahreszeit gemäß der Flugplanperiode, meteorologischer Jahreszeit, Monat, Wochentag, Tagestunden), Service Type und Flugzeugtyp. Detaillierte Ergebnisse finden sich in [28]. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse dieser Analysen zusammengefasst:

- Wie Primärverspätungen sind auch Sekundärverspätungen bei Airline 2 deutlich höher als bei Airline 1. Für Airline 2 wurden im Mittel über alle durchgeführten Flüge Sekundärverspätungen von mehr als 5 Minuten berechnet. Für Airline 1 liegt der Wert bei wenig mehr als 2 Minuten.
- Sekundärverspätungen sind bei Airline 2 im Sommer mit mehr als 7 Minuten am höchsten. Im Herbst liegen sie noch immer bei knapp sechs Minuten und sinken dann bis zum Frühling auf rund 3

Minuten. Bei Airline 1 ist der Winter jene Jahreszeit mit den durchschnittlich höchsten Sekundärverspätungen (rund 3 Minuten).

- Im Wochenverlauf treten bei Airline 1 freitags mit durchschnittlich 2,5 Minuten die höchsten Sekundärverspätungen auf. Bei Airline 2 wurde für Samstag mit durchschnittlich 7 Minuten der bei weitem höchste Wert berechnet.
- Bei Airline 1 beginnen sich Sekundärverspätungen ab ca. 6 Uhr morgens an aufzubauen. Sie erreichen den Tageshöchstwert in der Stunde zwischen 11:00 Uhr und 12:00 Uhr. Im Verlauf des Tages werden sie immer wieder reduziert, können sich aber erst während der Nacht komplett abbauen. In der Zeit zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr zeigt die Entwicklung von Sekundärverspätungen bei Airline 2 einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Allerdings werden vergleichsweise hohe Sekundärverspätungen auch am späten Abend und während der Nacht festgestellt. Zur Erklärung dieser Ergebnisse sind weitere Datenanalysen notwendig.
- Wie es bereits bei Primärverspätungen der Fall war, so sind auch Sekundärverspätungen bei Charterflügen deutlich höher als bei Linienflügen.

Die deutlichen Unterschiede im Hinblick auf den Flugzeugtypen, die bei Primärverspätungen aufgefallen waren, verschwimmen bei Betrachtung von Sekundärverspätungen. Weder die Langstrecken- noch die Kurzstreckenflotte der Airline 1 fällt dabei mit besonders hohen oder niedrigen Werten auf.

### 5.1.3. Zusammenfassung Verspätungsanalyse

In den vorgestellten Datenanalysen wurden Primär- und Sekundärverspätungen vor allem hinsichtlich ihrer zeitlichen Abhängigkeit untersucht. Zudem wurde analysiert, inwiefern Unterschiede zwischen verschiedenen Service- und Flugzeugtypen bestehen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im HAP4 zur Modellierung der Block- und Bodenzeitmodelle genutzt.

## 5.2. Evaluierung weiterer Datenquellen

Im Arbeitsprojekt 2.3 des Projektes wurden externe Datenquellen hinsichtlich ihrer Nützlichkeit zur Modellierung von Verspätungen untersucht. Ziel des Arbeitspaketes war es, zu evaluieren, ob eventuell andere Daten außer den betrieblichen Daten hinreichend detailliert und aussagekräftig sind, um sie im Modellierungsprozess zu nutzen. Es konnte zwar gezeigt werden, dass statistische Korrelationen zwischen den externen Daten und den Verspätungsdaten bestehen, jedoch ist die Verfügbarkeit der Daten so eingeschränkt, dass sie im weiteren Verlauf der Modellierung nicht genutzt wurden.

Die Untersuchungen fanden im Rahmen einer studentischen Masterarbeit statt [29]. Im Folgenden sind die Arbeiten zusammenfassend dargelegt.

### 5.2.1. Zielsetzung Einflussanalyse externer Störgrößen

In der Arbeit wurde mit Hilfe aktueller Verspätungsdaten von drei europäischen Fluggesellschaften Analysen durchgeführt. Es wurden mögliche Zusammenhänge zu Wetterdaten, Krankheitsverläufen und Zugverbindungen untersucht. Ein Ergebnis der Arbeit ist unter anderem, dass insbesondere Wetterparameter wie Schnee und Gewitter den Flugbetrieb beeinflussen.

Das primäre Ziel der Studie war die Identifizierung, Analyse und Bewertung von externen Störgrößen, die den Flugbetrieb beeinflussen und Flugverspätungen verursachen. Externe Störgrößen werden dabei als die

Größen bezeichnet, die nicht aus den projektbezogenen Daten der Fluggesellschaften hervorgehen. Es handelt sich hierbei um Störgrößen, auf die Fluggesellschaften keinen Einfluss haben und die von außerhalb auf den Flugbetrieb einwirken. Beispiele wären unter anderem meteorologische Daten, Krankheitsverläufe, Staumeldungen, Zugverspätungen oder Urlaubszeiten. Durch die Aktualität der Daten können zeitgemäße Probleme erfasst und analysiert werden. Die externen Störgrößen wurden mit den vorhandenen Daten in Verbindung gebracht. Von außen betrachtet haben dabei viele Faktoren keinen Einfluss auf die Luftfahrt, werden diese jedoch detaillierter aufgearbeitet, sind Verkettungen und Zusammenhänge erkennbar. Diese beantworteten Fragestellungen umfassen unter anderem:

- Welche externen Störgrößen könnten einen Einfluss auf den Flugbetrieb haben?
- Mit Hilfe welcher Datenquellen können gezielte Analysen durchgeführt werden, bzw. welcher Aufwand ist dafür nötig?
- Bestehen nachweisbare/statistische Zusammenhänge zwischen externen Störgrößen und Flugverspätungen?

## 5.2.2. Ergebnisse der Analyse externer Störgrößen

Im Zuge der Arbeit wurden die drei Hauptbereiche Wetter, Krankheiten und Anreisemöglichkeiten als Störgrößen identifiziert. Das Wetter wurde bezüglich der vier Parameter Temperatur, Niederschlag, Wind und Sicht untersucht. Zu den analysierten Krankheiten zählen hauptsächlich Grippe-Erkrankungen, Durchfall-Erkrankungen und Salmonellen. Die Anreisemöglichkeiten beinhalten die Verkehrsmittel PKW, Bus oder Zug.

Bevor mit der Datenanalyse begonnen wurde, mussten geeignete Datenquellen identifiziert werden. In Bezug auf das Wetter waren die aussagekräftigsten Quellen der Deutsche Wetterdienst und METAR Daten. Die Krankheitsdaten über meldepflichtige Krankheiten konnten über die Webseite des Robert Koch-Institut (RKI) heruntergeladen oder über das European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) beantragt werden. Die Anreisemöglichkeiten beschränkten sich auf eine Zugverbindung und eine interne Quelle. Der Hauptteil der Arbeit hat sich mit der Analyse der Störgrößen beschäftigt. Zu Beginn der Analyse wurden die externen Störgrößen aufbereitet. Die internen Daten der europäischen Fluggesellschaften, die anschließend in Zusammenhang mit den externen Größen gebracht werden sollten, mussten ebenfalls bearbeitet und aufbereitet werden. Die Ergebnisse der visuellen Untersuchungen waren Auffälligkeiten in den Wettererscheinungen der Temperatur, des Niederschlages, besonders Schnee und Gewitter, und der Sicht. Die Krankheiten haben keine besonderen visuellen Ausreißer hervorgebracht und die Zugverbindung wurde bereits bei der Aufbereitung als nicht beeinflussend klassifiziert. Die anschließenden statistischen Analysen haben gezeigt, dass die Parameter des Schnees und des Gewitters eindeutig erhöhte Verspätungszeiten bewirken. Darüber hinaus konnten signifikante Zusammenhänge und geringe Korrelationen zu der Verspätungsdauer nachgewiesen werden. Die statistischen Untersuchungen bezüglich der Krankheitstypen haben keine eindeutigen Ergebnisse ergeben. Die Erkenntnisse aus der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Einzelne Wetterparameter, wie Schnee und Gewitter, haben einen Einfluss auf den Flugbetrieb.
- Die hauptsächlich verwendeten Datenquellen sind der DWD, METAR Daten, das RKI und ECDC. Der Aufwand der Analysen, inklusive der Datenaufbereitung war sehr groß, weswegen sich nur auf gezielte Daten konzentriert werden konnte.
- Statistische Zusammenhänge konnten nachgewiesen werden. Ebenso haben Hypothesentests signifikante Steigerungen der Flugverspätungen feststellen können.

### 5.3. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP2

HAP2 beschäftigte sich mit der Datenanalyse der Verspätungsdaten. Im Laufe der Analysen hat sich gezeigt, dass insbesondere die Definition und Differenzierung der Primär- und Sekundärverspätungen von Bedeutung ist. Aus diesem Grund wurde in HAP2 eine differenzierte Analyse vorgenommen. Es wird deutlich, dass ein robuster Flugplan vornehmlich Sekundärverspätungen vermeiden kann, weswegen sich im weiteren Verlauf des Projektes hierauf konzentriert wurde.

Erkenntnisse aus der Datenanalyse wurden ebenfalls in der Methodik zur Erhöhung der Robustheit im Flugplan in HAP4 verwertet. Insbesondere die Auswahl der wichtigen Parameter, die für die Modellierung der Block- und Bodenzeit und damit der Verspätungen notwendig ist, beruht auf den Erkenntnissen der Datenanalyse. Hier konnten die statistisch relevanten Parameter ausgewählt werden, um die Modelle hinreichend genau zu erstellen, ohne jedoch eine Scheingenauigkeit durch zu viele Parameter zu vorzutäuschen.

Weiterhin wurden die Ergebnisse der Datenanalyse im Rahmen einer Veröffentlichung allgemein zugänglich gemacht und auf einer Fachkonferenz mit dem Publikum diskutiert [30].

## 6. Darstellung der Ergebnisse: HAP3 Effizienter Flugplanungsprozess

Aufbauend auf dem Ergebnis aus HAP1 wurde in HAP3 ein verbesserter Flugplanungsprozess erarbeitet. Im Folgenden werden zunächst anhand der in HAP1 erarbeiteten Modelle die Verbesserungen dargestellt. Die einzelnen Ideen zur Verbesserung werden im Anschluss vorgestellt und diskutiert. Im Laufe des Projektes wurden zwei Unterstützungswerkzeuge ausgewählt. Diese wurden prototypisch entwickelt und werden hier kurz vorgestellt. Eine Evaluierung dieser Werkzeuge erfolgte im Rahmen einer Umfrage, dessen Auswertung das Kapitel abschließt.

### 6.1. Beschreibung eines effizienten Flugplanungsprozesses

Im ersten Schritt wurden in dem HAP aufbauend auf den in [22] erfassten Prozessen, die optimierten Prozesse bzw. deren Business Process Diagrams (BPD) dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Schritte findet sich im Deliverable 3.1.1 [31].

Dabei ist allgemein festzustellen, dass eine verstärkte Unterstützung durch Software-Tools bei der Planung, bei sich wiederholenden Prozessschritten sowie bei der Dokumentation von (Zwischen-) Ergebnissen und von für die Zulassungsbehörde notwendigen Dokumenten Potential zur Erhöhung der Effizienz der Prozesse innehat, wenn diese nicht bereits durch Reports erzeugt werden können.

Beispielhaft sei hier der Prozess des Network-Planning und speziell der Vorgang des Vorschlags und der Evaluierung neuer Szenarien dargestellt.

#### 6.1.1. Prozessverbesserung: Network planning - Level 2 - Propose new scenarios

Die Überwachung der Flüge der Mitbewerber erfolgt mithilfe von kommerziellen Datenquellen, wie z. B. von OAG bzw. Innovata. Parallel werden die eigenen Flüge mit niedrigem Buchungsstand mithilfe von vorhergesagten und aktuellen Buchungszahlen aus dem Revenue Management-Tool überprüft. Diese Informationen gehen dann in das Netzplanungswerkzeug ein.

Diese Informationen könnten durch eine stärkere Integration von dem Netzplanungs- und Schedulingtool auch dem Netzwerkplaner zur Verfügung gestellt werden, da die Buchungszahlen und Vorhersagen bereits in dem Planungsschritt tagesaktuell zur Verfügung stehen.

Die benötigten Daten werden zur Analyse potentieller Szenarien mithilfe des Netzplanungstools bzw. der Flugplanungs-Software (für operationelle Daten), ermittelt. Die operationellen Daten fließen in das Scheduling-Tool ein, wo die operationellen Restriktionen geprüft werden. Durch eine Integration der Netzplanungs- und Scheduling-Software würde eine umfassende Prüfung ermöglicht werden.

(Änderungen gegenüber den bestehenden Prozessen sind dabei rot markiert. Die Monatsangaben sowie einzelne Prozessschritte können bei unterschiedlichen Fluggesellschaften, je nach Rahmenbedingungen, schwanken. Daher sind insbesondere die Zeitangaben nur als Richtwert anzusehen.)

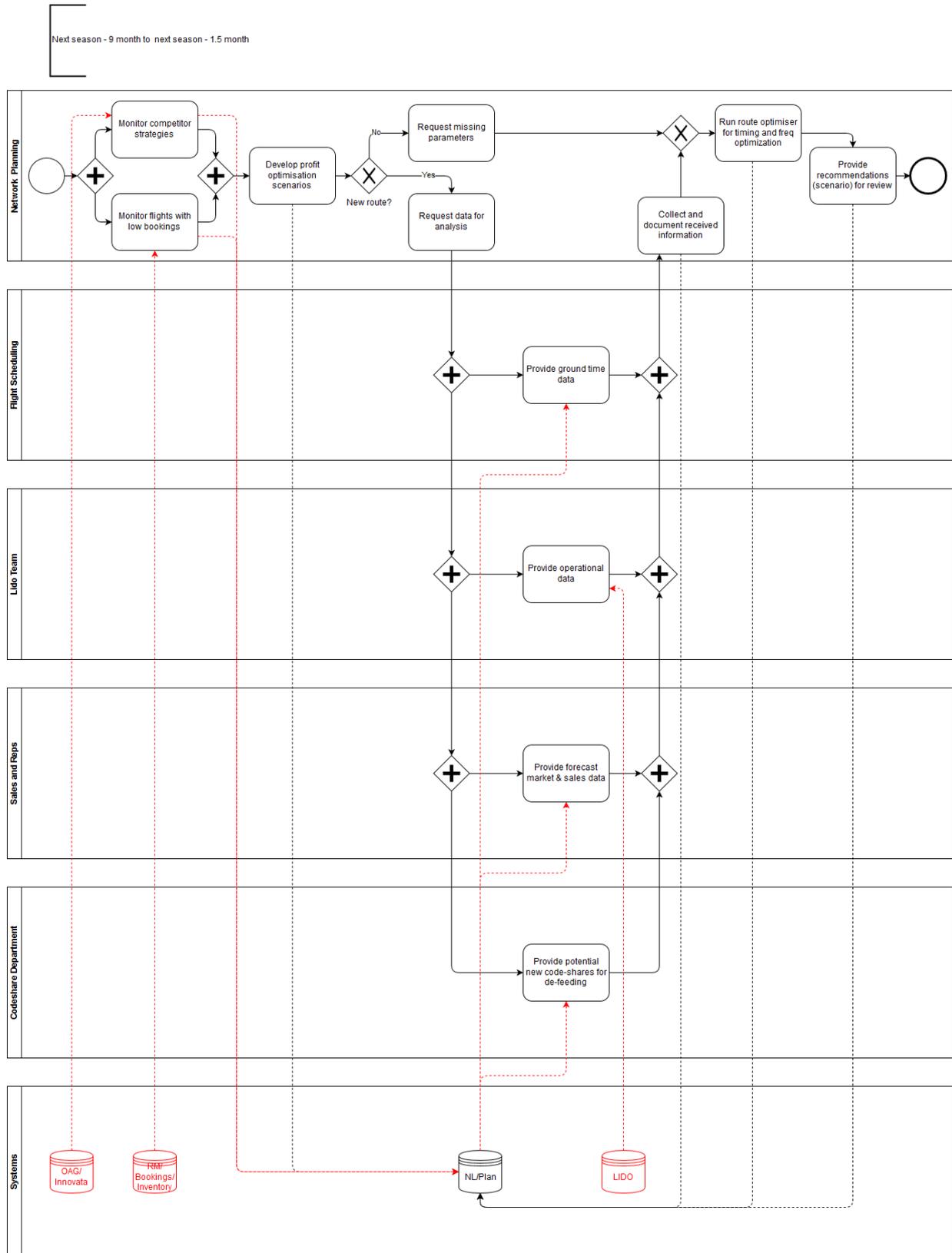


Abbildung 15: Prozessverbesserung Network Planning

## 6.2. Potentialanalyse von Maßnahmen zur Verbesserung des Flugplanungsprozesses

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden die Ideen und Konzepte zur Prozessverbesserung ausgearbeitet. Die Problemlösungen beziehen sich auf die in HAP 1 identifizierten Problembereiche. Im ersten Schritt wurde vom DLR Lufttransportsysteme und LSY eine Sammlung an Ideen zur Lösung der identifizierten Probleme im Prozessablauf erarbeitet.

Die Evaluierung und Kommentierung der Ideen und die Potentialanalyse erfolgte durch die entsprechenden Fachexperten von LSY. Im Rahmen von mehreren gemeinsamen Workshops wurden anschließend die Bewertungen detaillierter diskutiert und im Ergebnis hier zusammengefasst. Im Folgenden werden jeweils nur die adressierten Problemfelder sowie die spezifischen Maßnahmen vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung der erwarteten Verbesserung, Kommentare zur Umsetzung in der Praxis und die Beschreibung der eventuellen Herausforderungen bei der Umsetzung finden sich in [31].

### 6.2.1. Workflowtool

Adressiertes Problemfeld:

Die Abstimmung der Anforderungen an den neuen Flugplan durch die verschiedenen Bereiche benötigt einen hohen Zeitaufwand. Fehlende Standardisierung der Abstimmungsprozesse und viele manuelle Schritte behindern die Effizienz der Abstimmungen und damit der Planerstellung.

Beschreibung der Maßnahme:

Eine mögliche Maßnahme ist eine informationstechnische Unterstützung und teilweise Automatisierung von Geschäftsprozessen. Der im hohen Maße komplexe Abstimmungsprozess zwischen den Abteilungen wird hierbei als Workflow modelliert und IT-technisch unterstützt:

- Die im Planungsverlauf nötigen Abstimmungsprozesse werden granularer als Workflow definiert. Die modellierten Abläufe ändern sich dabei im Planungsverlauf aufgrund zunehmender Restriktionen und sind abhängig von den Regeln der jeweiligen Airline. Das Workflow Tool muss daher einfach und weitreichend konfigurierbar sein.
- Erforderliche Genehmigungen sollen durch ein Workflow Tool im Idealfall automatisch getriggert und die Antworten dokumentiert werden. Dadurch wird die Effizienz im Ablauf aber auch die Qualität des Workflows erhöht (Vermeidung von Fehlern zum Beispiel durch nicht durchgeführte Prüfung von Restriktionen).
- Durch entsprechende Zuweisungen und Genehmigungsschritte im Workflow kann gewährleistet werden, dass Planungsänderungen immer nach einem definierten Vorgehen durchgeführt werden, ohne wichtige Schritte auszulassen.
- Das Workflowsystem soll in der finalen Ausbaustufe die auszutauschende Information zielgruppengerecht aufbereiten.
- Eine Generierung von rollenspezifischen Task-Listen mit automatischen Erinnerungen per Mail kann die Abläufe vereinfachen und beschleunigen.
- Die Ergebnisse des Abstimmungsprozesses sowie die Entscheidungsschritte sollen in dem Workflowmodell dokumentiert werden, um Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.
- Eine datengetriebene Analyse der Entscheidungsabläufe und Entscheidungsergebnisse kann darüber hinaus in Zukunft weitere Verbesserungen ermöglichen.

## 6.2.2. Integration von Informationen aus verschiedenen Tools

Adressiertes Problemfeld:

Viele der von den Anwendern benötigten Kenngrößen und KPIs sind zur Analyse und Auswertung nur eingeschränkt verfügbar und somit nicht effizient nutzbar. Daten werden teilweise nicht dauerhaft gespeichert oder Daten müssen erst auf Basis komplizierter Abfragealgorithmen ermittelt werden. Insbesondere besteht keine Möglichkeit einer abteilungsübergreifenden Auswertung. Dies geschieht derzeit häufig manuell. Dieses Vorgehen ist aufwändig und fehleranfällig.

Beschreibung der Maßnahme:

Ausbau und Erweiterung der produktübergreifenden Reportings, um BI (Business Intelligence) -Funktionen, Kenngrößen und KPIs in der benötigten Form zur Verfügung zu stellen. Weiterhin sollten die BI-Funktionen auch historische Auswertungen erlauben.

KPI Beispiele aus der Crew Planung wären:

- Crew Produktivitätskennzahlen, wie durchschnittliche Blockzeiten pro Woche und Monat, durchschnittliche Anzahl von Einsatztagen pro Woche und Monat, durchschnittliche Blockzeit pro Einsatztage
- geplante Standby Crew Kapazität im Vergleich zu tatsächlichem Abruf und Bedarf von Standby Crews
- durchschnittliche Anzahl und Dauer von Trainingsevents und Urlaubstagen pro Crew Member; insbesondere die Berechnung der Urlaubstage ist komplex, da neben den Tarifverträgen auch die individuellen Verträge (Teilzeit) berücksichtigt werden müssen

Darüber hinaus erlaubt die Archivierung der historischen Daten und die Auswertung mit modernen Business Intelligence Tools und Data Mining Methoden ein datenbasiertes Lernen und damit schnelle und zuverlässige Information über wichtige Fragestellungen wie:

- Übersicht über die Crew Umsteiger, die im Flugbetrieb nicht funktioniert haben, um darauf aufbauend schon in der Planung solche Situationen zu vermeiden (Flugplan robuster machen)
- Erkenntnisse über Parameter, die regelmäßig zu Verspätungen führen (z. B.: Delays mit bestimmten AC Typ, Delays zu bestimmten Ankunftszeiten und Delays an einem bestimmten Flughafen)

## 6.2.3. Verbesserte Kommunikation durch ein Chat-Tool

Adressiertes Problemfeld:

- Adhoc Klärungen zwischen den Flugbetriebsabteilungen Ops Control, Maintenance und Crew Tracking am Tag der Operations sind derzeit häufig nur mittels Telefon und Email möglich und daher oftmals zeitaufwendig.
- Die Information über die Problembeschreibung muss in der Regel manuell zusammengestellt werden, was wiederum zeitaufwendig ist. Dies wird noch erschwert, wenn bei der Fluggesellschaft Anwendungen von verschiedenen Providern genutzt werden.

- Diskussionen und Ergebnisse aus Klärungen und Absprachen sind nicht zentral abgelegt und oft gar nicht dokumentiert. Rückfragen und nachgelagerte Klärungen sind dann wiederum zeitaufwendig.
- Häufig zu klärende Fragen müssen immer wieder aufs Neue geklärt werden.

Beschreibung der Maßnahme:

- Eine Chatfunktionalität kann eine effiziente AdHoc Kommunikation zwischen den beteiligten operierenden Bereichen Ops, Crew und Maintenance ermöglichen.
- Eventuell sind auch Verbesserungen bei der Abstimmung zwischen den Planungs- und Flugbetriebsabteilungen damit möglich.
- Fragen zu betroffenen Flügen können automatisch mit ergänzenden Informationen gesendet werden, was die Effizienz des Klärungsprozesses weiter erhöht.
- Durch die Zuordnung der Chat-Kommunikation zu den betroffenen Flügen, ist der Entscheidungsprozess für alle Beteiligten auch zu späteren Zeitpunkten direkt nachvollziehbar.
- Häufig auftretende Fragen können standardisiert als Formular bearbeitet werden.
- Abhängig von der Dringlichkeit könnten Nachrichten auch priorisiert angezeigt werden.
- Für spätere Nachvollziehbarkeit sollten Nachrichten noch historisch verwaltet werden

#### **6.2.4. Weitere Maßnahmen**

Die Maßnahmen der situationspezifischen Informationsdarstellung, der integrierte Optimierung zwischen verschiedenen Planungstools und die Maßnahme eines Szenario-Modus zwischen Crew- und Scheduling-Planungstools wurden ebenfalls diskutiert und für die prototypische Evaluierung zurückgestellt.

### **6.3. Ausgewählte Unterstützungswerkzeuge (WFMS)**

Aus der Recherche und den Ausarbeitungen der Maßnahmen hat sich ergeben, dass eine Prozessverbesserung des Flugplanungsprozesses in erster Linie durch ein Workflow Management Support Tool (WFMS) erreicht werden kann. Im Rahmen des WFMS wurden aus den vorgestellten Maßnahmen zwei als besonders zielführend herausgestellt und im Rahmen einer prototypischen Implementierung bewertet. Die Prototypen wurden von LSY mit dem UX Wireframe Tool Invision entwickelt. Das erste Tool ist ein Chat-Tool zur verbesserten Abstimmung der OPS Controller und Crew Tracker bei Störungen im täglichen Betrieb. Das zweite Tool ist eine Schnittstelle zwischen Schedulern und Crew Planern zum Austausch und zur anschließenden Evaluierung von Flugplanszenarien.

#### **6.3.1. UseCases**

Zur Bewertung der WFMS wurden zwei Use Cases entwickelt, die zur Darstellung der Vorgehensweise der WFMS dient. Es werden Störszenarien angenommen, die eine Änderung im Flugplan erforderlich machen. Beide genannten Tools dienen in den jeweiligen Use Cases zur Unterstützung des Kontaktes der Planer. Die Use Cases werden im Folgenden stichpunktartig dargestellt.

### 6.3.1.1. Use Case für Chat Tool

Auslöser: aufgrund des schlechten Wetters erfolgt eine Flugumleitung von den Flughäfen LAX nach SFO

1. Pilot informiert Ops Controller via ACARS über Diversion nach SFO.
2. Ops Controller entwickelt Lösungsszenario.
3. OPS Controller stimmt das Szenario mit betroffenen Bereichen ab bzw. informiert.
  1. Ops Controller informiert über Chat zuständigen Crew Tracker und Station Manager.
  2. Crew Tracker und Station Manager werden automatisch die benötigten Informationen zum Flug angezeigt.
4. Via Chat werden neben Information auch Aufgaben verteilt.
5. Nach Prüfung des Szenarios durch alle Beteiligten setzt der Ops Controller das Szenario um.
6. Der Ops Controller schließt den Chat nach Umsetzung des Szenarios.

### 6.3.1.2. Use Case für Szenario Tool

Auslöser: nicht erteilter Slot, der eine Anpassung des Flugplanes erfordert

1. Scheduler entwickelt zwei alternative Szenarien und erstellt einen Task im WFMS zur Bewertung der Szenarien.
2. Scheduler exportiert die Szenarien und fügt die Szenarien dem Task zu. Anschließend weist er den Task dem zuständigen Crew Planner zu.
3. Crew Planner wird auf einen neuen Task hingewiesen, kann die Szenarien importieren und bewerten.
4. Scheduler erkennt am neuen Taskstatus, das die Bewertung in Arbeit ist.
5. Crew Planner prüft die Auswirkungen auf die Crew, berechnet den Crewbedarf und die Kosten und fügt diese Information den Szenarien hinzu.
6. Scheduler wird über die abgeschlossene Bewertung informiert und ihm stehen nun alle nötigen Bewertungsinformationen zur Verfügung.
7. Scheduler implementiert die günstigste Alternative, dokumentiert dies im WFMS und schließt den Task ab.

### 6.3.2. Prototypen

Die entwickelten Prototypen zeigen einem möglichen Nutzer das Vorgehen des WFMS anhand der oben beschriebenen Use Cases. Im Folgenden sind beispielhaft Screenshots der Prototypen abgebildet.

#### 6.3.2.1. Prototyp 1: Chat Tool

Der erste Prototyp stellt beispielhaft einen Planungsschritt in dem kurzfristigen Planungszeitraum dar. Als Beispiel wird hier angenommen, dass ein Flug umgeleitet werden muss. Der Ops Controller kann dann im WFMS einen Chat eröffnen, um den Crew Controller in die Planung einzubinden.

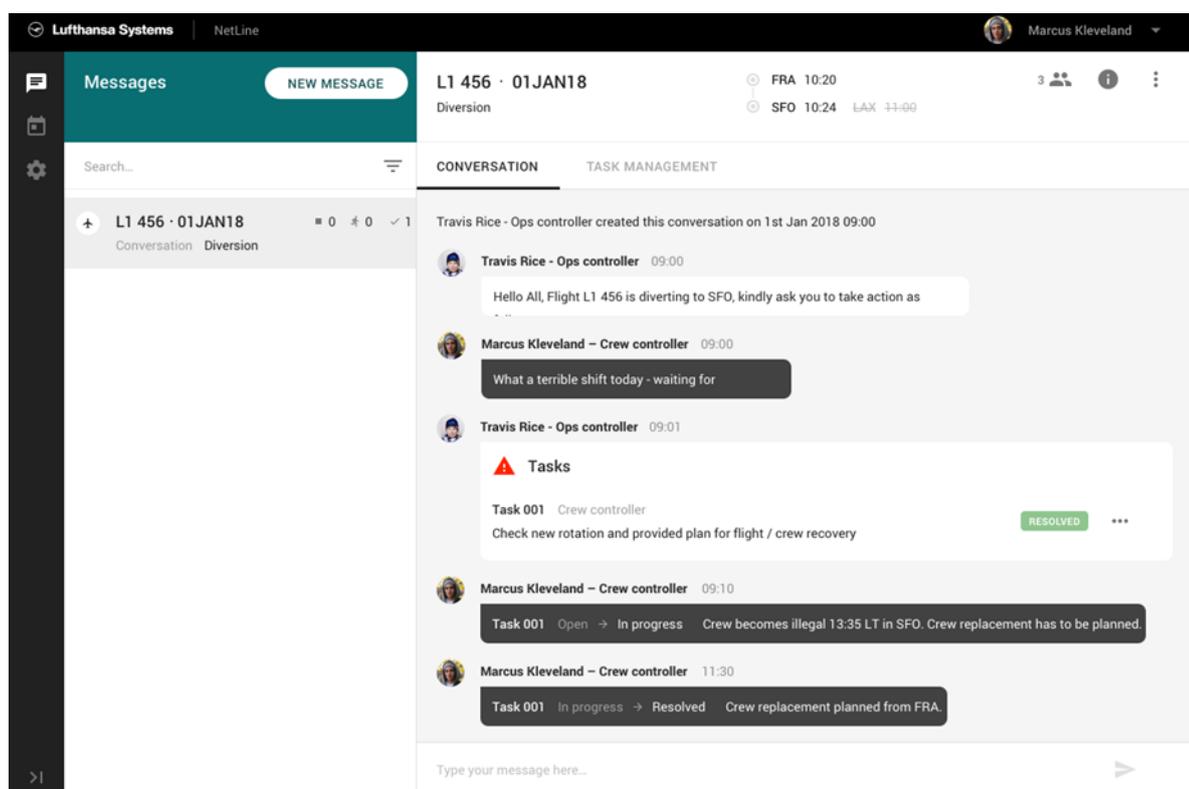


Abbildung 16: Prototyp: Chat-Tool

#### 6.3.2.2. Prototyp 2: Workflow zwischen Schedule- und Crew-Abteilung

Die zweite prototypische Implementierung bezieht sich auf die langfristige Planung. Hierbei wird angenommen, dass ein Slot nicht akzeptiert wird und der Scheduler im WFMS alternative Slots anbietet. Die Bewertung der alternativen Szenarien erfolgt direkt durch das Crew Management oder das Revenue Management.

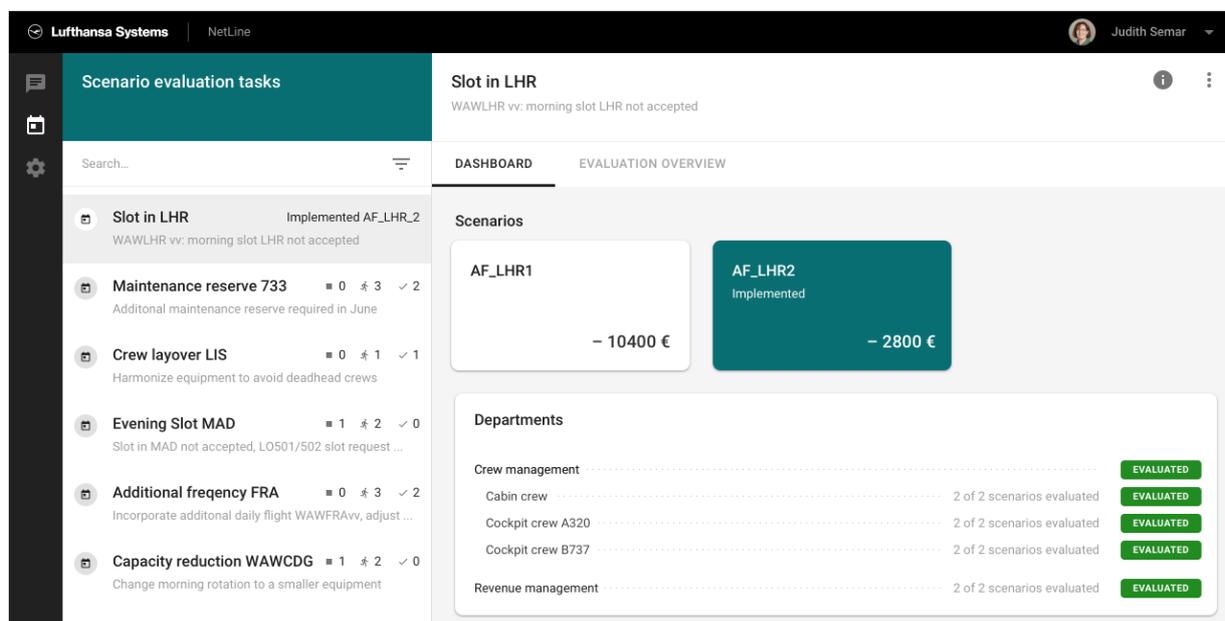


Abbildung 17: Prototyp Szenarien zwischen Scheduling- und Crewabteilung

## 6.4. Effizienzsteigerungspotential der Unterstützungswerkzeuge

Um den Nutzen eines WFMS aus Nutzersicht zu ermitteln, wurde vom DLR Lufttransportsysteme und LSY eine Umfrage erstellt, welche den Kunden von Lufthansa Systems auf dem „Airline Forum“ im Mai 2018 vorgelegt wurde. Das Airline Forum ist die wichtigste Kundenveranstaltung von Lufthansa Systems, bei der zahlreiche Vertreter von Kundenairlines anwesend sind und über die neuesten Produktentwicklungen informiert werden. Dabei sind dies einerseits Vertreter des Managements, andererseits aber auch Nutzer der Tools.

Aufgrund des erfahrungsgemäß geringen Rücklaufs bei Online-Umfragen, wurde sich dafür entschieden, die Umfrage als Papier-Version zur Verfügung zu stellen. Um die Rücklaufquote der Umfragen zu maximieren, wurden diese so kurz wie möglich gefasst, wobei gleichzeitig darauf geachtet wurde, dass alle für die Forschungsfrage relevanten Informationen erfasst werden.

Während des Airline Forums wurde zunächst in zwei Sessions das Forschungsthema vorgestellt. Durch diese Dopplung konnte eine größere Zielgruppe adressiert werden. Anschließend wurden die Fragebögen verteilt, welche dann durch die Teilnehmer direkt abgegeben werden konnten.

Im Folgenden werden die Auswertungen der Antworten der Umfrage ausgewertet und projektrelevante Schlussfolgerungen gezogen. Detaillierte Ergebnisse finden sich in [32].

### 6.4.1. Nutzerumfrage

Insgesamt wurden 59 Fragebögen ausgefüllt und bis auf einen sind alle hinreichend ausgefüllt und können zur Evaluierung des WFMS herangezogen werden.

Insgesamt haben 16 Crew Planner, 12 Crew Tracker und 10 Scheduler an der Umfrage teilgenommen. Diese Personengruppen sind also groß genug, um Rückschlüsse auf die Bewertung des Tools zu zulassen. Mehrfachnennungen kommen vor und wurden in die Analyse aufgenommen. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der verschiedenen Nennungen:

Jobbezeichnung	Anzahl Nennungen
Crew Planner	16
Crew Tracker	12
Scheduler	10
Manager	6
Ops Controller	4
IT	3
System Analyst	2
Other	10

Tabelle 10: Verteilung der Jobzugehörigkeiten in der Umfrage

Gut ein Drittel der Umfrageteilnehmer gibt an, einen mittleren Anteil ihrer Zeit (25-50 %) mit Koordinierungsaufgaben mit anderen Abteilungen zu verbringen. Ein weiteres Drittel gibt an, sogar viel Zeit (50-75 %) damit zu verbringen (Abbildung 18). Hier ist dementsprechend ein hohes Potential für Zeitersparnis durch ein WFMS.

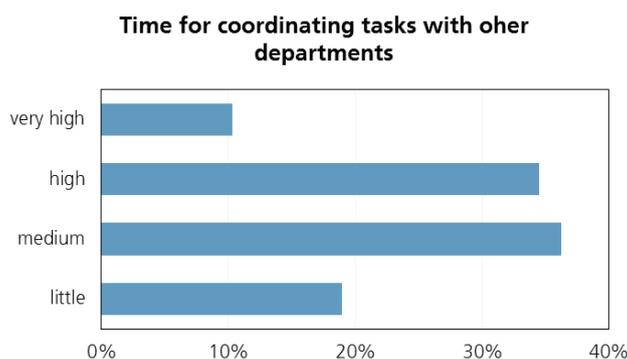


Abbildung 18: Anteil der Zeit zur Koordinierung mit anderen Abteilungen

Die Verteilung der Antworten zur Bedeutung von Teilaufgaben innerhalb der Koordinierungszeit ist in Abbildung 19 dargestellt. Weiterhin wird durchschnittlich 39 % der Koordinierungszeit mit der Klarstellung von fehlender oder falscher Information verbracht. Einen ähnlich hohen aber etwas geringeren Anteil mit 36 % benötigt der Prozess der Auswahl und Kontaktierung von Personen sowie das Zusammenstellen, Dokumentieren und zur Verfügung stellen der Informationen (37 %). Ein signifikanter Unterschied zwischen den Teilprozessen ist nicht zu erkennen. Betrachtet man jedoch die Verteilung nach Berufsgruppen bzw. Jobbezeichnung, so sind deutlichere Unterschiede zu erkennen (Abbildung 20). Scheduler verbringen weniger Zeit mit dem Sammeln und Dokumentieren von Informationen als mit den anderen Aufgaben. Crew Tracker benötigen einen Großteil der Zeit für das Kontaktieren der relevanten Personen, während Crew Planner mit diesem Prozess am wenigsten Zeit verbringen.

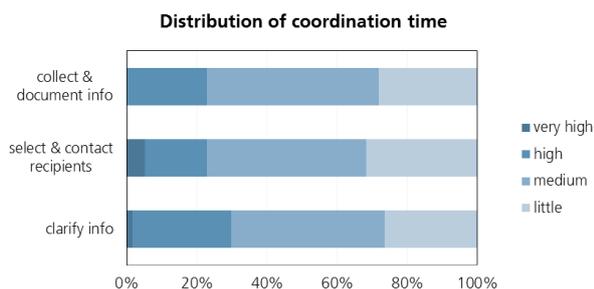


Abbildung 19: Verteilung der Antworten zur Verteilung der Koordinierungszeit auf Teilaufgaben

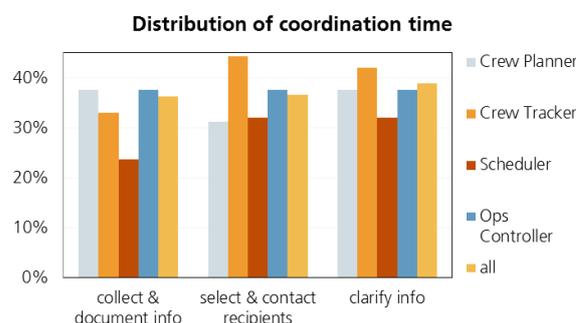


Abbildung 20: Verteilung der Koordinationszeit auf Teilaufgaben differenziert nach Jobbezeichnung

### 6.4.2. Zeitersparnis durch WFMS

In der Umfrage wurde nach der erwarteten Zeitersparnis durch ein WFMS gefragt. Die Antworten zeigen, dass ein hoher Anteil an Koordinierungszeit gespart werden kann (Abbildung 21, Abbildung 22). Etwa 80 % aller Umfrageteilnehmer erwarten eine mindestens mittelgroße Zeitersparnis von 10-30 %. Die größte Zeitersparnis erwarten die Teilnehmer durchschnittlich bei dem Prozess des Auswählens und Kontaktieren relevanter Personen. Die Unterschiede sind hierbei jedoch im Mittel zu vernachlässigen. Deutlich größere Differenzen ergeben sich bei der Frage in den verschiedenen Jobgruppen (Abbildung 23 und Abbildung 24). Scheduler erwarten mit 21 % über alle Aufgabenbereiche am niedrigsten Zeitersparnis, wobei der Bereich des Sammeln und Dokumentieren von Informationen von den Schedulern als der Bereich mit dem größten Potential gesehen wird. Etwas mehr Ersparnis erhoffen sich Crew Tracker mit durchschnittlich 26 % und dem größten Potential im Klarstellen der Informationen (28 %). Die meiste Ersparnis erhoffen sich Crew Planner (durchschnittlich 28 %) und davon am meisten im Bereich des Auswählens und Kontaktierens von relevanten Personen (31 %). Diese Tendenz ist gegenläufig zu der Zeit, die die jeweilige Berufsgruppe mit der Koordinierungsaufgabe verbringt. Je mehr Zeit eine Berufsgruppe mit der Aufgabe verbringt, desto geringer ist das vermutete Potential zur Zeitersparnis.

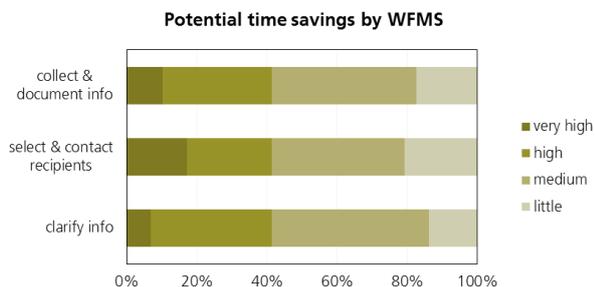


Abbildung 21: Verteilung der Antworten zur erwarteten Zeitersparnis durch WFMS

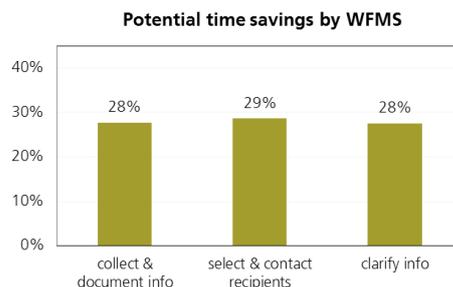


Abbildung 22: Durchschnittliche, erwartete Zeitersparnis durch WFMS

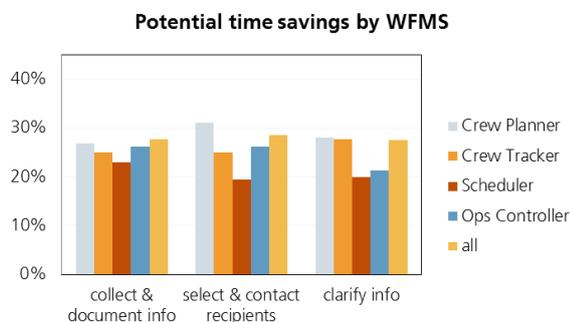


Abbildung 23: Erwartetes Zeitersparnis durch WFMS nach Jobbezeichnung

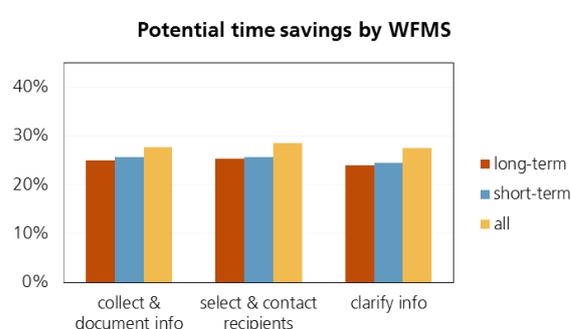


Abbildung 24: Erwartetes Zeitersparnis durch WFMS nach Planungszeitraum (long-term = Crew Planner und Scheduler; short-term = Crew Tracker und Ops Controller)

### 6.4.3. Spezifische Vorteile durch WFMS

In einer Freitextfrage wurde gefragt, welchen Nutzen sich die Teilnehmer hauptsächlich von dem Tool versprechen. Die Auszählung der Antworten findet sich in Tabelle 11. Naturgemäß wurde am häufigsten Zeitersparnis als Vorteil des Tools genannt (17 Nennungen). Weitere häufig genannte Vorteile sind die Verbesserung der Kommunikation und das Zusammenführen von Daten und Dokumentation (je 7 Nennungen). Die Umfrageteilnehmer sehen auch Vorteile in der Tatsache, dass alle relevanten Personen involviert werden (5 Nennungen) und Fehler vermieden werden (5 Nennungen). Transparenz, ein einfacheres Vorgehen und die korrekte Verteilung der Verantwortung wurden auch genannt. Abbildung 25 zeigt die Wortwolke aus den Antworten bei der Freitextfrage nach dem größten Nutzen, der durch das Tool entsteht. Hierbei wird wiederum der Fokus auf die Zeit und Zeitersparnis sowie die Kommunikation und deren Verbesserung deutlich.

Potential major benefits using communication support tool	Number of answers
time savings	17
communication improvement	7
consolidation (data, documentation etc.)	7
all are involved	5
elimination of (human) errors	5
transparency	4
easy and comprehensible procedure	3
correct responsibility	2
analysis	1
coordination improvement	1
simplifying work	1
easy documentation	1
accurate information	1

Tabelle 11: Anzahl der Nennungen von Vorteilen durch WFMS



Abbildung 25: Wortwolke aus Antworten bei Freitextfrage nach größtem Nutzen von WFMS

### 6.4.4. Gesamtnutzen

Die meisten Umfrageteilnehmer gaben an, in dem Tool einen hohen Gesamtnutzen zu sehen. Insgesamt 37 % der Befragten gaben an, den Nutzen des Tools mit hoch zu bewerten und 26 % bewerteten diesen sogar mit sehr hoch. In Summe versprechen sich dementsprechend 63 % der Umfrageteilnehmer einen großen Effekt durch ein WFMS. Nur 7 % der Umfrageteilnehmer empfinden den Nutzen eines WFMS als gering (Tabelle 12). Legt man der Bewertung eine Skala von 1 (geringer Nutzen) bis 4 (sehr hoher Nutzen) zu Grunde, so ergibt sich eine durchschnittliche Bewertung von 2,9 (Abbildung 26).

Overall Value	Number of answers	
little	4	7 %
medium	17	30 %
high	21	37 %
very high	15	26 %

Tabelle 12: Nutzen durch WFMS Tool

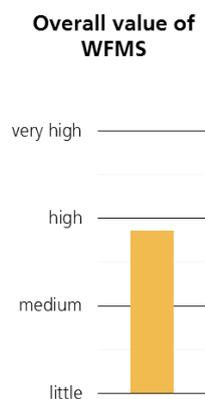


Abbildung 26: Durchschnittlicher erwarteter Nutzen

Crew Planner, Crew Tracker und Scheduler bewerten dabei das Tool etwas geringer als der Durchschnitt aller Teilnehmer (2,9). Der Unterschied zwischen den Bewertungen ist aber mit 0,1 verhältnismäßig klein. Die beste Bewertung geben hierbei die Ops Controller (3,0) ab. (Abbildung 27)

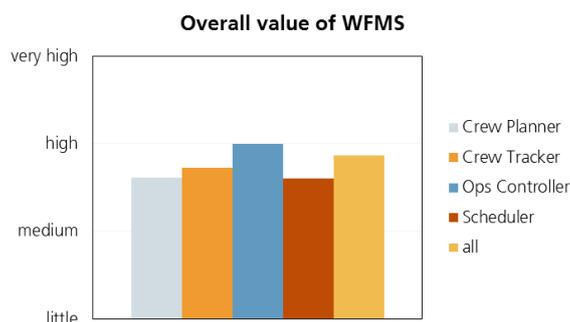


Abbildung 27: Gesamtbewertung des Tools nach Berufsgruppen

Fasst man die Berufsgruppen nach ihrem Planungszeitraum zusammen, werden die Personen mit einem langfristigen Planungszeitraum - Scheduler und Crew Planner - und die Berufsgruppen mit einem kurzfristigen Planungshorizont - Crew Tracker und Ops Controller - zusammenbetrachtet. Hierbei bewerten die kurzfristigen Planer das Tool um 0,3 besser als die langfristigen Planer und der Durchschnitt aller Teilnehmer (Abbildung 28).

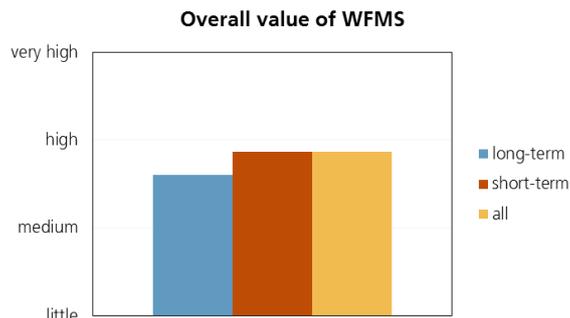


Abbildung 28: Gesamtbewertung des Tools nach Planungszeitraum (long-term = Crew Planner und Scheduler; short-term = Crew Tracker und Ops Controller)

Wie erwartet bewerten Personen, die einen geringen Koordinierungsaufwand haben, das Tool entsprechend schlechter. Der Unterschied beträgt 1,0 auf der genannten Skala von 1 bis 4. Hierbei bewerten Personen mit einem geringen Koordinierungsaufwand mit 2,3 und Personen mit einem hohen Aufwand mit 3,3 (Abbildung 29).

Die Umfrage wurde nach Vorstellung der zwei Prototypen in verschiedenen Sessions durchgeführt. Die durchschnittliche Bewertung des Tools ist auch von der Session abhängig, in der diese durchgeführt wurde. Insgesamt wurde der Nutzen des Tools höher eingeschätzt, wenn den Umfrageteilnehmern vorher der Prototyp aufbauend auf dem Chat-Tool vorgestellt wurde (Abbildung 30). Der Unterschied beträgt 0,4 auf der genannten Skala (entspricht circa 13 %) und ist daher deutlich, jedoch nicht zwingend signifikant. Er kann jedoch auf einen höher gewerteten Nutzen einer Chatfunktion im WFMS hindeuten.

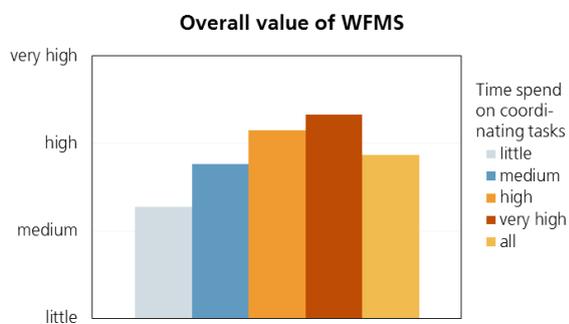


Abbildung 29: Gesamtbewertung abhängig von Zeitaufwand für Koordinierungsaufgaben

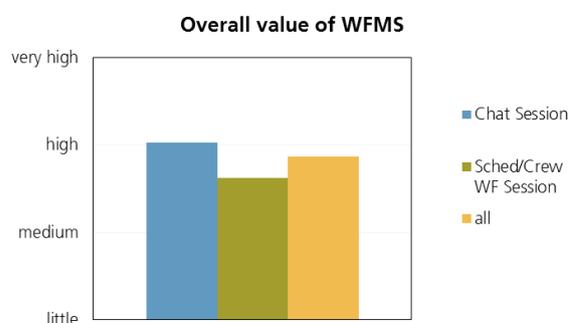


Abbildung 30: Gesamtbewertung abhängig von der Session, in der die Umfrage stattfand

### 6.4.5. Zusammenfassung der Umfrageauswertung

Zur Abschätzung des Potentials des WFMS, können folgende Aussagen zusammenfassend getroffen werden:

- Der größte Nutzen eines WFMS aus Sicht der Umfrageteilnehmer ist die Zeitersparnis. Es dient aber auch zur allgemeinen Verbesserung der Kommunikation und Zusammenführung relevanter Daten, Informationen und Dokumentationen.

- Die von den Umfrageteilnehmern erwartete Zeitersparnis durch Nutzung des WFMS liegt bei 28-29 %. Etwas höher wird hierbei die Zeitersparnis bei der Auswahl und Kontaktierung der relevanten Personen gesehen.
- Crew Planner erwarten von dem Tool eine höhere Zeitersparnis als Crew Tracker und Scheduler. Andererseits bewerten Crew Tracker und Ops Controller den allgemeinen Nutzen des Tools höher.
- Der allgemeine Nutzen wird umso höher eingeschätzt, je mehr Zeit der Nutzer für Koordinierungsaufgaben aufwendet.
- Der Nutzen des Tools wird für das Chat-Tool circa 13 % höher eingeschätzt.
- Ein Großteil der Umfrageteilnehmer (insgesamt 63 %) bewerten den Nutzen eines WFMS Tools mit hoch oder sehr hoch.
- Die durchschnittliche Bewertung des allgemeinen Nutzen des Tools liegt auf einer Skala von 1 (niedrig) bis 4 (sehr hoch) bei hoch (2,9)

## 6.5. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP3

In HAP3 wurden Vorschläge zur Stabilisierung des Flugplanungsprozesses erstellt. Dazu wurden aufbauend auf den in HAP1 aufgenommenen Prozessen, Vorschläge ausgearbeitet, um den Prozess mittels z.B. verbesserter Kommunikation zu verbessern.

Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes ein WFMS Tool für den Scheduling-Prozess vorgestellt. Der Bedarf eines solchen Tools ergab sich aus HAP1 und den Experteninterviews sowie der Datenanalysen. Eine Literaturrecherche hat gezeigt, dass die Vorteile des Tools unter wissenschaftlichen Aspekten untersucht wurden und hier in erster Linie die verbesserte Koordination, die Verfügbarkeit sowie der Austausch von Dokumenten und Daten, die Prozessverbesserung sowie Prozesskontrolle hervorgehoben wurden.

Zur Evaluierung eines WFMS wurden zwei Use Cases erstellt. Weiterhin wurden zwei Prototypen entwickelt, die veranschaulichen, wie ein solches Tool die Koordination zwischen Betriebsabteilungen mithilfe einer Chat-Session sowie dem Szenario-Austausch zwischen Schemulern und Crew Plannern ermöglicht.

Die Vorstellung der Prototypen vor Fachpublikum ergab eine positive Resonanz. Die Bewertung eines solchen Tools ist hoch, wobei die Vorteile in erster Linie bei der Zeitersparnis gesehen werden. Die erwartete geschätzte Zeitersparnis beträgt durchschnittliche 28 %.

## 7. Darstellung der Ergebnisse: HAP4 Robuster Flugplan

HAP 4 im ROFL Projekt beschäftigt sich mit der Erstellung eines robusten Flugplans. Hierfür wurden zunächst Kriterien zur Messbarkeit der Robustheit abgeleitet. Bereits in HAP2 wurde deutlich, dass eine Unterscheidung in Primär- und Sekundärverspätung notwendig ist. Primärverspätungen sind nur indirekt durch die Airline beeinflussbar und sollen im Modell nur als Input d.h. als nicht veränderlich behandelt werden. Ziel eines robusten Flugplans ist die Vermeidung von Sekundärverspätungen. Ziel ist also die intelligente Aufstellung eines Flugplans, der ein Verschleppen der Verspätungen verringert. Dies wird erreicht, indem Pufferzeiten dort geplant werden, wo die meiste Verspätung erwartet wird. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten, werden jeweils die aggregierten Verspätungsminuten eines Flugplans betrachtet.

Zur Evaluierung der Robustheit wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche aufbauend auf den Datenanalysen ein Boden- und Blockzeitmodell umfasst. Diese Modelle stellen die Primärverspätungen für einzelne Flüge in Abhängigkeit von einzelnen Flugparametern dar. Mithilfe dieser Modelle werden der betriebliche Ablauf und damit der Verlauf der Sekundärverspätungen simuliert. Die aggregierten Sekundärverspätungen dienen als Metrik zur Bewertung der Robustheit des Flugplans.

Im Anschluss wurden verschiedene Optimierungsmethoden ausgewählt und implementiert. Hierbei wird die Simulationsumgebung als Bewertung genutzt. Die Robustheit bzw. die Anzahl der aggregierten Sekundärverspätungen sind demnach die Zielfunktion der Optimierung, welche es zu minimieren gilt.

### 7.1. Stand der Wissenschaft

Zur Erreichung der genannten Ziele wurden im ersten Schritt Aufzählungen mit Metriken zur Bewertung eines robusten Flugplans sowie Methoden zur Verbesserung der Robustheit erstellt. Die Listen wurden ergänzt um Vorschläge zu Metriken und Methoden aus dem Projektteam. Die Vorschläge beruhen sowohl auf dem Wissen aus den anderen Arbeitspaketen als auch auf dem allgemeinen Verständnis der Projektteilnehmer. Weitere Vorschläge wurden in Diskussion mit weiteren Experten entwickelt oder ausgearbeitet.

#### 7.1.1. Metriken zur Messung eines robusten Flugplans

Zur Definition eines robusten Flugplans können verschiedene Metriken herangezogen werden, die in der unten aufgeführten Tabelle konkretisiert werden. Die Definitionen sind gemeinsam im AP 4.1 erarbeitet worden bzw. entstammen der Literaturrecherche.

##### 7.1.1.1. Kategorisierung der Metriken

Grundsätzlich kann zwischen verschiedenen Kategorien unterschieden werden, wobei die Metriken gemäß ihrer zu messenden Parameter eingeordnet werden:

1. Planung
2. Verspätung allgemein
3. Sekundärverspätung der Flugzeuge
4. Recovery
5. Passagiere
6. Crew

Als direktes Messverfahren einer Metrik bietet sich die Auswertung einer operationellen Simulation an, wobei die Werte der Metrik anhand des in der Simulation durchgeführten Flugplans gemessen werden können. Hierbei muss neben der simulierten Durchführung des Flugplans unter Umständen auch eine Recovery-Simulation in Betracht gezogen werden.

Für alle Metriken, die nicht in der Planungskategorie sind, kann auch der Erwartungswert einer Ausprägung bestimmt werden, z. B. die erwartete Sekundärverspätung oder die erwartete Anzahl aller Passagiere, die ihren Anschlussflug verpassen. Da aber eine Simulation zur Verfügung steht, kann im ROFL-Projekt auf diese stochastische Berechnung verzichtet werden.

Die Metriken in der Kategorie Planung beziehen sich auf die Phase vor Durchführung des Fluges und werten die Robustheit des Flugplans ohne Kenntnisse der tatsächlichen Durchführung aus. Sie können somit im Vorhinein bestimmt werden und bedürfen keiner Simulation.

### 7.1.1.2. Messmethode der Metriken

In der unten aufgeführten Tabelle werden die wichtigsten Charakteristika der Metriken vorgestellt. Dazu gehören in erster Linie das Objekt, das gemessen wird, sowie die dazugehörige Einheit und Messmethode. Die Einheit gibt den Größenwert der Metrik an (Minuten, Anzahl etc.), während die Messmethode definiert, für welche Elemente (Flüge, Flughäfen) der Wert bestimmt wird und wie jeweils ein kumulierter Wert für den ganzen Flugplan berechnet wird (Summe Durchschnitt etc.). Statt dem Durchschnitt über alle Elemente kann auch jeweils das Minimum oder das Maximum gebildet werden.

### 7.1.1.3. Übersicht Robustheits-Metriken

Kategorie	Name	Was wird gemessen?	Einheit (Messmethode)
Planung (Scheduling)	Puffer	Zeitlicher Puffer nach einem Flug	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Planung (Fleet Assignment)	Station-Purity	Anzahl aller anfliegenden Flottentypen pro Flughafen (Bsp.: HAM wird von A320 und B777 angefliegen → Station-Purity = 2)	Anzahl Flottentypen (Durchschnitt über alle Flughäfen)
Planung (Umlaufplanung)	Rotations-Kreuzungen	Anzahl Stellen, an denen sich zwei Rotationen zeitlich und örtlich überlappen	Anzahl (im gesamten Flugplan)
Planung (Crew)	Crew-Purity	Summe aller anfliegenden Crews über alle Flughäfen	Anzahl Crews (Durchschnitt über alle Flughäfen)
Planung (Crew)	Crew-Puffer	Zusätzliche Bodenzeit der Crew (über Minimum) bei allen restriktiven Flugzeugwechsellern (Bodenzeit ist kleiner als gewähltes Maximum)	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Planung (Passagiere)	Passagierkonnektivität	Umsteigezeit eines Passagiers	Minuten (Durchschnitt über alle Passagiere)
Allgemein	On-time performance (OTP)	Sekundäreffekt + Primärverspätungen	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Allgemein	OTP - Threshold	Flüge, die mehr als x Minuten zu spät ankommen oder gestrichen werden (Flight service level entspricht Erwartungswert dieser Metrik)	Anzahl Flüge (Anteil an allen Flügen)
Allgemein	Leg-Verspätung	Verspätung pro Leg statt Flug	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Sekundärverspätung	Sekundäreffekt	Propagierte Verspätung	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Sekundärverspätung	Verspätungsmultiplikator	Verhältnis von Sekundärverspätung zu einer Primärverspätung	(Durchschnitt über alle Flüge)
Sekundärverspätung	Schwere der Sekundärverspätung	Flüge mit Sekundärverspätungen bei Folgeflügen durch eine Primärverspätung (Wird von dem Flug eine Sekundärverspätung ausgelöst?)	Anzahl Flüge (Anteil an allen Flügen)
Sekundärverspätung	Tiefe der Sekundärverspätung	Länge der Folge von Sekundärverspätungen bei einer Primärverspätung (Wie viele Folgeflüge sind durch Sekundärverspätungen betroffen bei Verspätung des Fluges?) (Überlebenswahrscheinlichkeit entspricht Erwartungswert dieser Metrik)	Anzahl Folgeflüge (Durchschnitt über alle Flüge)
Recovery	Wiederherstellungspotential	Anzahl Aufrufe Recovery-Prozedur (eventuell auch Kosten des Recovery-Prozesses möglich)	Anzahl Aufrufe (pro Simulationslauf und für

			den gesamten Flugplan)
Recovery	Abweichungen	Abweichungen vom geplanten Flugplan	Anzahl Flüge (pro Simulationslauf und für den gesamten Flugplan)
Recovery	Gestrichene Flüge	Anzahl der Flüge, die gestrichen werden müssen	Anzahl Flüge (pro Simulationslauf und für den gesamten Flugplan)
Recovery	Operationelle Effizienz	Verhältnis der geplanten zu den realisierten "Kosten"	- Zahl - Verhältnis Plan/Ist eines anderen KPI (pro Simulationslauf und für den gesamten Flugplan)
Passagiere	Passagierzeitverlust	Verspätungen der Passagiere	Minuten (Durchschnitt über alle Passagiere)
Passagiere	Passagierstabilität	Passagiere, die einen Flug verpassen	Anzahl Passagiere (Anteil an allen Passagieren)
Crew	Sekundärverspätung Crew	Summe der Sekundärverspätungen durch die Crew	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Crew	Eindimensionale Sekundärverspätung	Summe der Sekundärverspätungen nur bei Flügen mit Wechsel des Flugzeugs durch die Crew	Minuten (Durchschnitt über alle Flüge)
Crew	Flight-Time-Credit	Größe, die das Verhältnis von bezahlter Zeit der Crew zur Flugzeit ausdrückt	Verhältnis (Durchschnitt über alle Pairings)

Tabelle 13: Robustheits Metriken für Flugpläne

### 7.1.2. Verfahren zur Erstellung eines robusten Flugplans

In diesem Kapitel werden mögliche Verfahren zur Erhöhung der Robustheit vorgestellt und hinsichtlich deren Umsetzbarkeit analysiert.

Allgemeine Vorgehensweisen zur Erhöhung der Robustheit können in jedem Planungsschritt angewandt werden. Dazu zählen die Stochastische Optimierung bzw. die Integration von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in der Optimierung, die metrikbasierte Optimierung und die simulationsbasierte Auswahl der Flugpläne.

Zur Optimierung können mathematische Modelle, Heuristiken, Metaheuristiken oder regelbasierte Methoden genutzt werden.

Die konkretisierten Verfahren können hinsichtlich der Anwendung in den verschiedenen Planungsschritten gegliedert werden:

- Im Bereich des Scheduling wird Robustheit schon während des Setzens der Abflugzeiten bzw. beim nachträglichen Ändern der Abflugzeiten beachtet. Dies geschieht mittels der Pufferplanung oder Blockzeitanpassung.
- In der Umlaufplanung kann die Robustheit erhöht werden durch Erhöhung der Kreuzungen von Rotationen, diverse Heuristiken oder eine regelbasierte Planung.
- In der Crewplanung bestehen die Möglichkeiten der integrierten Crew- und Flugzeugumlaufplanung, die Minimierung der Crewwechsel in Flugzeugrotationen („crew follows aircraft“), die Maximierung der Kreuzungen von Pairings der Crew und die Planung der Crew-Rosterings vor dem Flugzeugumlauf („aircraft follows the crew“).

Weitere Möglichkeiten die Robustheit zu erhöhen wäre eine Möglichkeit der Anzeige von kritischen Flügen im Planungstool, die Beachtung von Wartungsereignissen oder die Minimierung der Recoverykosten.

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Umsetzbarkeit in Simulationsumgebung	Umsetzbarkeit in Realität
Stochastische Optimierung	Erwartete sekundäre Verspätungen werden minimiert, durch Kenntnisse der Verteilung der Primärverspätung	Einbeziehung von unbekanntem Verspätungen in die Planung	nicht anwendbar für neue Routen, Qualität abhängig von Datenverfügbarkeit		In Realität schwierig umsetzbar, da viel Rechenzeit notwendig und Lösung aus Optimierer „schwer erklärbar“
Integration von W'keitsverteilungen	Integration bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilungen (außer Primärverspätung) bei Optimierung  - Flugzeit - Umsteigezeit - Flugverspätung überschreitet gegebenen Wert nicht  Zielfunktion: Minimierung der Metriken				
Metrikbasierte Optimierung	Mathematische Optimierung für Scheduling, Fleet Assignment, Umlaufplanung mit Minimierung einer oder mehrerer der oben genannten Metriken aus der Kategorie Planung  Mögliche Verfahren: Lineare Optimierung, Genetischer Algorithmus, Memetischer Algorithmus		Keine Simulation notwendig (aber nutzbar zum Auswerten der anderen Metriken)		
Simulationsbasierte Auswahl der Flugpläne	Bewertung von Flugplänen anhand Robustheit in der Simulation (z.B. Genetische Algorithmen); Generierung der Flugpläne durch Abwandlung bestehender Flugpläne; Robustheit entspricht einer der o.g. Metriken				
Pufferplanung	Verbesserung der Bodenpufferverteilung auf Basis von historischen Verspätungsdaten		Wissen über derzeitige Puffer im Flugplan notwendig  Puffer können berechnet werden durch Ableitung aus geplanter Bodenzeit und minimaler Bodenzeit	Simulation des optimierten Schedules	
Blockzeitanpassung	Anpassung der Blockzeit aufgrund bekannter Verteilungen (siehe Puffer), Blockzeit entspricht bspw. dem Perzentil P80	in der Praxis mit vorhandenen Daten leicht zu implementieren, nicht anwendbar für neue Routen, unabhängig	Auswahl eines Perzentils notwendig, für alle Flüge, deren Blockzeit darüber liegt, ist keine Robustheit bzgl. der nachfolgenden	kann durch die Nutzung der Ergebnisse vorhergehender Simulationsläufe implementiert werden	wird als Planungsinstrument bereits häufig bei Fluggesellschaften genutzt

		von sekundären und Ground-Delays	Rotation gegeben, unabhängig von sekundären und Ground-Delays		
Kreuzungen Rotation	Vergrößerung der Flexibilität im Aircraft Schedule durch Maximierung der Anzahl von Kreuzungen /Swap-Möglichkeiten in der Flugzeugumlaufplanung				
Heuristiken	Heuristiken zur Erstellung von Flugplänen und von Umläufen, beispielsweise FIFO oder basierend auf der Distanz der Flüge	geringe Lösungszeit einfach implementierbar wenig Vorwissen nötig kann als Startlösung in Kombination mit einem anderen Ansatz genutzt werden	i.d.R. keine Optimierung, d.h. Ineffizienzen möglich, Vernachlässigen häufig historische Informationen über Verspätungen → Puffer können an den falschen Stellen eingefügt werden		sehr gut umsetzbar, wenn z. B. FIFO genutzt wird
Regelbasierte Planung	regelbasierte Planung (z. B. nicht 2 x LHR in einem Umlauf hintereinander)				regelbasiert wäre durch eine Abfrage bei Airlines oder Nutzung des vorhandenen Regelwerkes möglich, wenn die Regeln vorhanden sind; dann verhältnismäßig einfach umsetzbar
Integrierte Optimierung von Flugzeugumlaufplanung und Crewplanung	Minimierung der Folgedelays für Aircraft und Crew als integrierte mathematische Optimierung.		rechenintensiv, Ergebnisse der Optimierung für den Scheduler intransparent	Simulation des optimierten Schedules Daten zu Crew notwendig	Crew und Aircraft Planung sind in unterschiedlichen Domänen organisiert, was eine integrierte Optimierung organisatorisch schwierig macht.
Kreuzungen Crew	Maximierung der möglichen Tausche von Crew			Daten zu Crew notwendig	weniger effizient als für Flugzeuge, da die Crews für einen Flugzeugwechsel zusätzliche Zeit benötigen (wohingegen bei einem Tausch zweier Flugzeug-Rotationen die Crews auf dem ursprünglichen Flugzeug bleiben)
Crewwechsel	Minimierung von Flugzeugwechseln der Crew			Daten zu Crew notwendig	
Anzeige von kritischen Flüge	Alternativ zu Hinweisen durch Prüfungsregeln, könnte auch eine grafische Anzeige der Rotation Hinweise auf kritische Schedules geben.				
Wartung	Anpassung der Wartungsplanung		Anpassungen können nur begrenzt im Rahmen der	Daten zu MRO notwendig	Daten zu MRO notwendig hoher Abstimmungsaufwand mit

			regulativen Rahmenbedingungen erfolgen  nur begrenzter Effekt auf die Robustheit, eher auf die Flexibilität zur Reaktion auf Störungen		Wartungsunternehmen, welches häufig nicht zur Fluggesellschaft gehört, entsprechend müssen dessen organisatorische Einschränkungen bzw. Rahmenverträge mit dem Unternehmen und entsprechende Kosten der Anpassung bekannt sein
Recovery-Kosten	Minimierung von Recovery-Kosten oder Anzahl der durchgeführten Recovery-Maßnahmen in der Simulation		Nur in Kombination mit Simulation durchführbar		

Tabelle 14: Verfahren zur Erhöhung der Robustheit in Flugplänen

## 7.2. Simulationsumgebung

Um die entstehenden Verspätungen bei Abflug und Ankunft zu quantifizieren, muss der Betrieb eines gegebenen Schedules simuliert werden. Hierfür wurden Modelle zur Schätzung von Boden- und Blockzeiten entwickelt, mit denen sich die erwarteten Abflugs- bzw. Ankunftszeiten und somit auch die Verspätungen eines Fluges in Abhängigkeit seiner verschiedenen Charakteristika wie z.B. Abflughafen, Abflugzeit und Flugzeugtyp berechnen lassen. Das Bodenzeitmodell dient dabei zur Schätzung der Zeitdauer, die das Flugzeug zwischen zwei aufeinander folgenden Flügen am Gate steht und umfasst dementsprechend die Zeiten für Bodenprozesse (Turnaround) sowie Warte- und Pufferzeiten. Das Blockzeitmodell schätzt die Blockzeit eines Fluges, d.h. sowohl die eigentliche Flugzeit als auch die Rollzeiten am Start- und Zielflughafen. Die Modelle sind dynamisch und reagieren dadurch auf den bisherigen Verlauf der Rotationen, wobei keine Interdependenzen zwischen mehreren, zeitgleich durchgeführten Umläufen berücksichtigt werden.

Die Modellkalibrierung muss mit historischen Daten aus dem Flugbetrieb derjenigen Airline durchgeführt werden, deren geplante Schedules simuliert werden. Abbildung 31 zeigt den Vergleich zwischen der tatsächlichen und der simulierten On-Time-Performance einer europäischen Fluggesellschaft aus der Sommerflugplanperiode 2016. Die Modelle wurden vorab mit Daten aus den Jahren 2014 und 2015 trainiert. Der Schedule wurde 10.000 Mal unter Berücksichtigung stochastischer Schwankungen, die sich in den historischen Daten finden, simuliert. „P0“ bezieht sich auf den Anteil der Flüge, die pünktlich oder sogar verfrüht abfliegen bzw. ankommen. „P3“ ist der Anteil der Flüge, die eine Verspätung zwischen null und einschließlich drei Minuten aufweisen. „P15“ ist analog zu interpretieren und „D15“ enthält alle Flüge, die eine Verspätung von mehr als 15 Minuten aufweisen.

Der Vergleich zeigt, dass die Simulation ein sehr gutes Abbild der Realität erzeugt. Die Anteile der einzelnen Verspätungskategorien unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Dies gilt im Übrigen nicht nur auf so stark aggregierter Ebene wie hier dargestellt, sondern bspw. auch auf der Ebene einzelner Teil-Flotten eines bestimmten Flugzeugtyps der gewählten Fluggesellschaft.

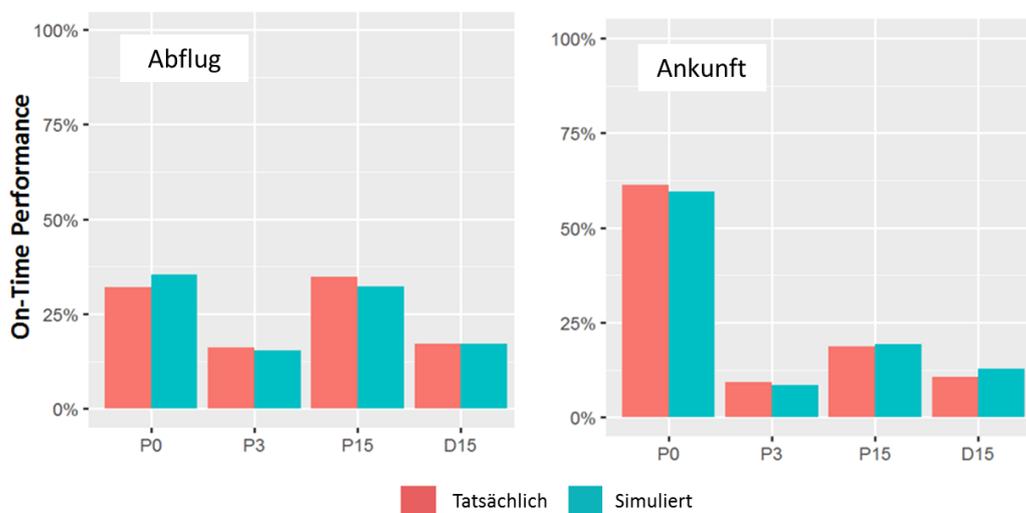


Abbildung 31: Test der Simulationsqualität durch Vergleich mit historischer On-Time-Performance

## 7.3. Methoden zur Robustheit

### 7.3.1. Binary Particle Swarm Optimierung (BPSO)

Die Binary Particle Swarm Optimierung nutzt eine heuristische Methode angelehnt an das Schwarmverhalten in der Natur. Ziel der Methodik ist es die Sekundärverspätungen eines Umlaufplans zu minimieren. Details der Methodik finden sich in [33].

#### 7.3.1.1. Übersicht über die Methode

Partikelschwarmoptimierung ist ein heuristisches Optimierungsverfahren, das es erlaubt, große Lösungsräume effizient nach guten Lösungen abzusuchen. Hierbei wird eine Anfangsmenge von Lösungskandidaten über mehrere Iterationen in Richtung besserer Lösungen weiterentwickelt. Die Qualität der Lösung wird über eine Fitnessfunktion bestimmt. Im Gegensatz zu klassischen Optimierungsverfahren müssen hier keine Anforderungen an die Form der Fitnessfunktion - zum Beispiel hinsichtlich Differenzierbarkeit - gestellt werden. Ziel ist es, nach mehreren Iterationen eine hinreichend gute, wenn auch nicht unbedingt optimale Lösung zu finden.

Aufbau und Verlauf der Partikelschwarmoptimierung sind – zumindest oberflächlich – natürlichen Mechanismen nachempfunden. Genauer gesagt dient das Schwarmverhalten einiger schwarmbildender Tierarten wie Fische oder Vögel als Vorbild. Jede mögliche Lösung wird interpretiert als ein Individuum des Schwarms mit einer bestimmten Position und der dazugehörigen Fitness. Begonnen wird der Algorithmus stets mit einer Anfangspopulation von Individuen bzw. Partikeln, das heißt einer Anfangsmenge von Lösungskandidaten. Diese Population entwickelt sich dann über mehrere Iterationen weiter. Die Güte einer Lösung wird interpretiert als die Fitness des Individuums, wobei Individuen mit höherer Fitness eine stärkere Anziehung auf die restlichen Schwarmpartikel ausüben, sodass sich der Schwarm in Richtung guter Lösungen bewegt. Durch die Bewegung des Schwarms in Richtung guter Lösungen (exploration) und der anschließenden Suche nach noch besseren Lösungen in „guten“ Regionen des Suchraums (exploitation) wird die Fitness des Schwarms und des jeweils besten Partikels immer weiter erhöht. Ein klarer Unterschied zu genetischen Algorithmen liegt darin, dass sich bei der Partikelschwarmoptimierung ein Schwarm mit all

seinen Partikeln durch alle Iterationen weiterentwickelt. Individuen werden also nicht aufgegeben, da sie schlechte Fitnesswerte aufweisen und somit bei der Selektion durchfallen. Vielmehr werden auch zu Beginn schlechte Individuen bzw. Partikel in die Schwarmbewegung integriert und verbessern somit ständig ihre eigene Fitness.

Hauptkomponenten bei der Modellierung sind die Codierung der möglichen Lösungen als Individuen, in diesem speziellen Falle in Form von Binärvektoren, und die Definition einer reellwertigen Fitnessfunktion zur Evaluation der Güte von Lösungen.

## Die Partikelschwarmoptimierung

Ein Iterationsschritt sieht schematisch folgendermaßen aus:

Generation n-1 → Fitnessbewertung → Update der Partikelpositionen → Generation n

Im Folgenden gehen wir näher auf die einzelnen Schritte ein. Als Parameter wählen wir eine Populationsgröße N.

## Initialisierung

Am Anfang wird eine zufällige Population von vorgegebener Größe erzeugt. Jedes Individuum wird hierbei mit gleicher Wahrscheinlichkeit als Teil der Startpopulation ausgewählt. Gegebenenfalls können bestimmte Individuen als fester Bestandteil der Startpopulation festgelegt werden. Die so zusammengestellte Population bildet den Partikelschwarm in seinem Anfangsstatus.

## Update der Partikelpositionen

Im nächsten Schritt wird zunächst die Fitness der Individuen evaluiert. Dies kann durch Berechnung einer Funktion oder, wie in unserem Fall, durch Simulation erfolgen. Sind alle Partikel im Hinblick auf ihre Fitness evaluiert worden, kann der beste Schwarmpartikel bestimmt werden. In allen Iterationen  $> 1$  wird demnach überprüft, ob sich der beste Schwarmpartikel im Vergleich zur vorigen Iteration verbessert hat. Bei der ersten Iteration selbst muss kein Vergleich gezogen werden, sondern der beste Partikel im Schwarm kann ohne Vergleich direkt als solcher festgelegt werden. Beim Update der Partikelpositionen richten sich die einzelnen Partikel sowohl nach ihrer eigenen bisherigen Bestleistung, d.h. ihrer historisch besten Position (gilt wiederum nur für Iterationen  $> 1$ ), als auch nach dem besten Schwarmpartikel. Dies entspricht demnach einer Bewegung in Richtung der eigenen Bestposition und der besten Schwarmposition.

Eine Gewichtung zwischen den beiden möglichen Bewegungsrichtungen der Partikel kann über soziale und kognitive Lernparameter vorgenommen werden. Hier wird abgewogen zwischen dem Ausnutzen bereits bekannter vorteilhafter Muster über eine Mehrgewichtung des sozialen Lernparameters (exploitation) und der Erkundung des Lösungsraums nach Bereichen höherer Fitness durch eine Mehrgewichtung des kognitiven Lernparameters (exploration). In den von uns durchgeführten Optimierungsläufen wurden beide Parameter gleich stark gewichtet.

Die iterative Weiterentwicklung des Partikelschwarms wird solange durchgeführt, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Üblicherweise wird hier eine maximale Anzahl an Iterationen festgelegt. Alternativ kann auch abgebrochen werden, wenn sich die maximale Fitness über eine bestimmte Anzahl an Iterationen hinweg gar nicht oder zumindest nicht nennenswert verbessert hat.

Durch die Festlegung der Iterationen kann die Laufzeit des Algorithmus begrenzt werden. Die unabhängige Bewertung der Schwarmpartikel in jeder Iteration führt außerdem zu einer hohen Parallelisierbarkeit, sodass die durchzuführenden Rechnungen auf mehrere Prozessorkerne verteilt und die Rechenzeiten insgesamt stark verkürzt werden können. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums wird der Schwarmpartikel mit der höchsten Fitness der aktuellen Iteration als Problemlösung ausgewählt. Dieser Partikel muss nicht notwendigerweise die optimale Lösung repräsentieren. In vielen Anwendungsfällen ist es jedoch

ausreichend, eine gute bzw. bessere Lösung zu finden, insbesondere wenn man dadurch die Laufzeit reduzieren kann.

### 7.3.1.2. Codierung

Ein Vektor wird zur Kodierung innerhalb des Algorithmus genutzt. Dabei wird nicht der Flugplan direkt kodiert sondern die Tausche, die zwischen den Umläufen durchgeführt werden. Wenn sich zum Beispiel zwei Umläufe an einem Flughafen zur selben Zeit treffen bzw. überlappen, ist dies eine potentielle Tauschmöglichkeit.

Zur Kodierung wird zunächst der originale Flugplan aus den Daten erhoben. Der Ansatz basiert auf einer Liste möglicher Tausche, die durchgeführt werden können. Nach Festlegen einer fixen Reihenfolge der Tauschmöglichkeiten kann eine Zuordnung zwischen der Liste mit Tauschmöglichkeiten und einem ganzzahligen Vektor mit fixer Länge erstellt werden.

Dabei repräsentiert jede Position in dem Vektor eine Tauschmöglichkeit und der Wert des Vektors an der Position repräsentiert den Tausch bzw. die Umläufe die getauscht werden. Damit repräsentiert der ganze Vektor selber eine Menge von Tauschen. Aus dem ganzzahligen Vektor kann durch Ersetzen der Zahlen ein Binärvektor erstellt werden.

Zusätzlicher Vorteil dieser Formulierung ist, dass kein Reparaturmechanismus gebraucht wird, nachdem der Algorithmus den Vektor verändert hat. Jeder neue Vektor, der in den Iterationen erzeugt wird, repräsentiert damit einen gültigen Umlaufplan. Dies ermöglicht einen effizienten Optimierungsprozess ohne Zwischenschritte.

### 7.3.1.3. Anwendung der Methode mit Simulationsläufen

Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Partikelschwarmoptimierung für einen Wochenschedule der Airbus A320-Flotte einer europäischen Airline. Die Woche (aus dem Sommerflugplan 2016) wurde seitens der Airline aufgrund des hohen Flugaufkommens als Testwoche empfohlen. Die Flotte umfasst 15 Flugzeuge, die in dieser Woche mehr als 600 Flüge absolviert haben. Die tatsächlich geflogenen Rotationen, die aus historischen Daten bezogen werden, werden als Original-Lösung des vorliegenden Routing-Problems bezeichnet. Der Algorithmus wird mit einer initialen Menge von 30 alternativen Routings begonnen. Diese Routings werden nun bei konstanter Schwarmgröße gemäß den Vorschriften der binären Partikelschwarmoptimierung über 50 Iterationen hinweg miteinander kombiniert. Für jede Iteration ist die geringste, mittlere und höchste Fitness des Schwarms dargestellt. Dabei entspricht der Fitness-Faktor der Summe der Ankunftsverspätungen in allen Rotationen. Ein Abfallen der dargestellten Kurven entspricht daher einer Steigerung der Fitness.

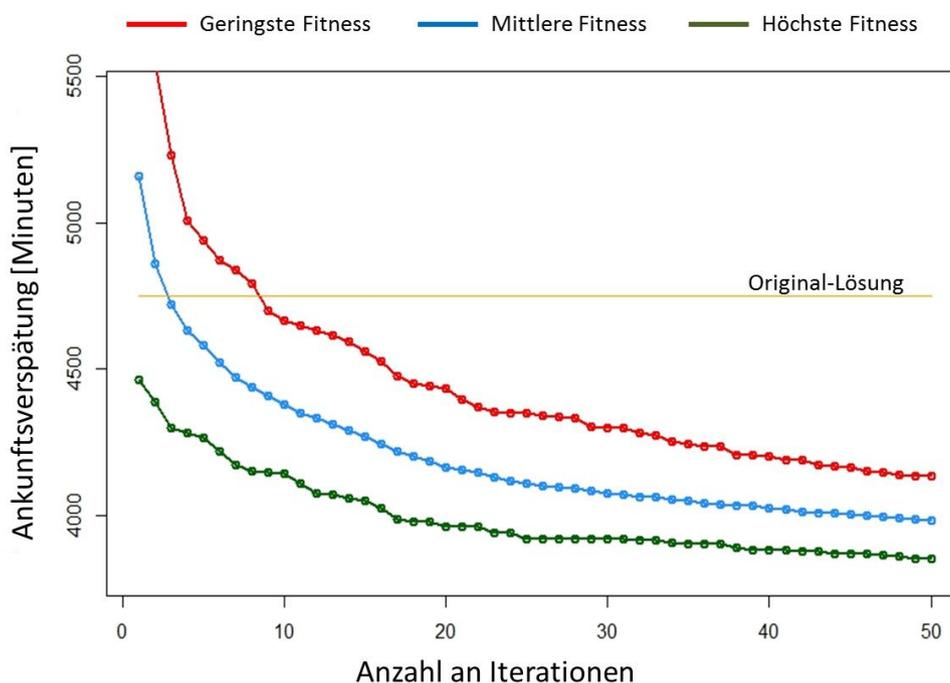


Abbildung 32: Verlauf der binären Partikelschwarmoptimierung

Der initiale Schwarm, der willkürlich erzeugt wird, enthält bereits Lösungen, deren Fitness die ebenfalls simulierte Fitness der Original-Lösung übertrifft. Letztere liegt bei rund 4.700 Minuten. Im Verlauf des Algorithmus kann die Fitness kontinuierlich gesteigert werden (dies entspricht einer Reduktion der Summe der Ankunftsverspätungen). Die beste Lösung nach 50 Iterationen weist eine Fitness von rund 3.800 Minuten Ankunftsverspätung auf, was einer Reduktion um 19 % im Vergleich zur Original-Lösung entspricht. Ebenso ist deutlich zu erkennen, dass die Spannweite der Fitnesswerte im Schwarm mit jeder Iteration abnimmt, da sich die Lösungen bei der Partikelschwarmoptimierung abhängig von der jeweils besten Lösung annähern. Dadurch steigt auch die mittlere Fitness des Schwarms stark an. In [33] wird im Detail auf die Implementierung und Auswertung des Algorithmus eingegangen

Darüber hinaus wurde die Möglichkeit implementiert, nicht nur die Flugzeugumläufe, sondern auch die Abflug- und Ankunftszeiten der Flüge eines Schedules zu verändern, um Verspätungen abzubauen. Hierzu werden zunächst alle Flughäfen im Schedule identifiziert, die laut IATA slot-kritisch sind. Derart charakterisierte Flughäfen werden dauerhaft an ihren Kapazitätsgrenzen betrieben und verfügen über keine Reserven, um etwaige Verspätungen durch Umplanungen zu reduzieren. An diesen Flughäfen dürfen daher weder Abflüge noch Ankünfte verschoben werden. An allen anderen Flughäfen (und dem Hub) wird die Annahme getroffen, dass Veränderungen der Abflug- oder Ankunftszeit um  $\pm$  fünf Minuten möglich sind. Um Blockzeiten konstant und somit Zeitänderungen kostenneutral zu gestalten, werden in jedem Fall sowohl die Abflug- als auch die Ankunftszeit kongruent zueinander verschoben. Gemäß dieser Erweiterung ist das Ziel der Partikelschwarmoptimierung nun, Kombinationen aus Routing- und Timing-Entscheidungen zu finden, die eine besonders hohe Fitness aufweisen. Abbildung 33 stellt das Verbesserungspotenzial dieses kombinierten Ansatzes im Vergleich zu dem in Abbildung 32 dargestellten Ansatz dar, bei dem sich nur auf Routing-Entscheidungen konzentriert wird. Dabei zeigt sich, dass der kombinierte Ansatz letztlich eine Gesamtverbesserung von rund 24 % erzielt (ggü. 19 % beim nicht-kombiniertem Ansatz). Eine sichtbare

Überlegenheit entwickelt der kombinierte Ansatz nach etwa 15 Iterationen. Vor dieser Iteration sind keine deutlichen Unterschiede erkennbar.

Die Rechenzeit des Ansatzes auf einem handelsüblichen Notebook (Prozessor: i7, RAM: 32GB) liegt je Tag (ca. 90 Flüge und 15 Rotationen im Mittel) bei ca. 20 Minuten.

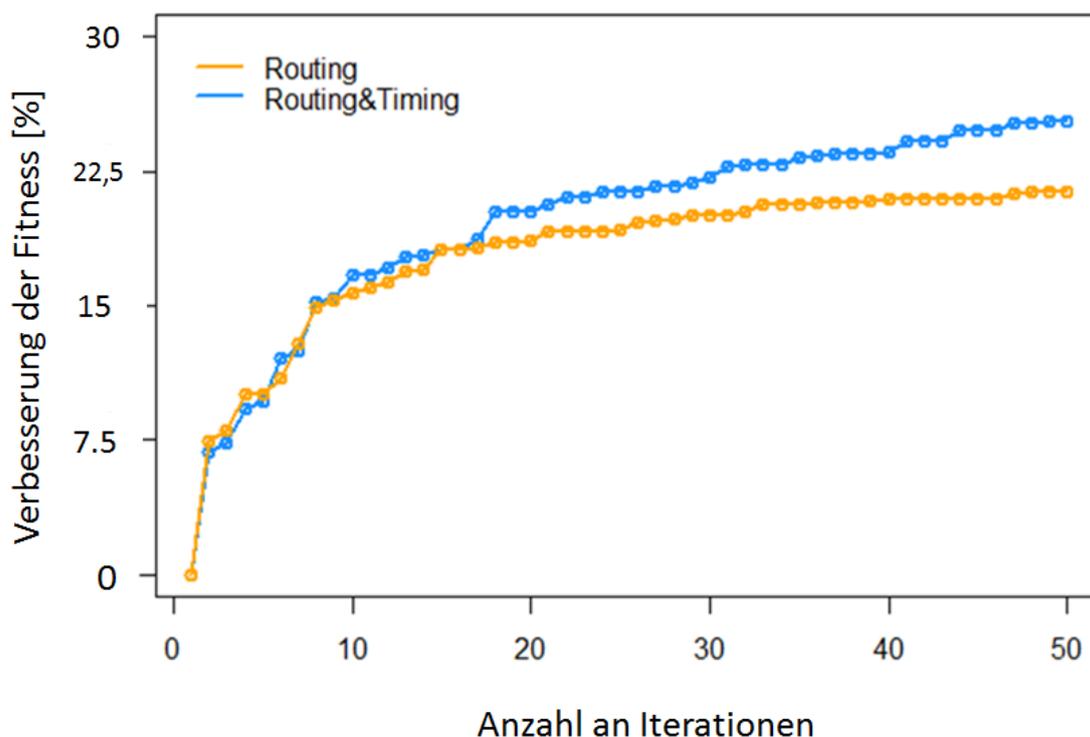


Abbildung 33: Verlauf der binären Partikelschwarmoptimierung mit kombinierten Routing- und Timing-Entscheidungen

### 7.3.2. Entscheidungsbaum

Das zweite Verfahren zur Verbesserung der Robustheit im Flugplan erstellt einen Entscheidungsbaum, der aufgrund folgender Überlegungen gewählt wurde [34]: Die Funktionsweise von Optimierungsmodellen für die Flugplanung einer Luftverkehrsgesellschaft ist für den Flugplaner als Anwender in der Regel nicht bekannt, dieser kennt häufig bloß die Eingangsdaten und -parameter sowie das Resultat der Optimierung. Zur Steigerung der Akzeptanz von Optimierungsmodellen soll ein Entscheidungsbaummodell beitragen, welches einen Flugplan auf Grundlage von Entscheidungsregeln erstellt.

Die Entscheidungsregeln selbst gründen dabei auf einer Analyse historischer Daten der Luftverkehrsgesellschaft, in der Ursachen und Risiken von Verspätungen und deren Fortpflanzung im Netzwerk ermittelt werden sollen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden im Anschluss Regeln für die Flugplanung abgeleitet und in einen Entscheidungsbaum implementiert.

Das Entscheidungsbaummodell wurde schließlich mittels der im Projekt verwendeten Simulationsumgebung gegen den Ist-Zustand verglichen und bewertet.

Ziel des Entscheidungsbaummodells ist es, auf Basis historischer Daten mögliche Verspätungen besser vorausszusagen und so in der Planung zu berücksichtigen, um die Robustheit des erzeugten Flugplans zu steigern.

### 7.3.3. Lineare Optimierung

Die lineare Optimierungsmethode ermittelt im Unterschied zu den heuristischen Methoden die optimale Lösung in Bezug auf das angesetzte Modell. Hierfür ist eine Zielfunktion zu definieren. Die Nutzung der Monte-Carlo Simulation, wie es für die heuristischen Methoden angewendet wurde, ist hier nicht möglich. Im Rahmen des Projektes wurde eine Masterarbeit durch einen DLR Studenten erstellt, um mit einer linearen Optimierung die Folgeverspätungen zu reduzieren. Die detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in [35] und ist hier nur mit den Ergebnissen kurz beschrieben.

Im Rahmen der Optimierung wird ein gemischt ganzzahliges robustes Optimierungsproblem formuliert. Die Zielfunktion des Modells ist die Minimierung der gesamten Folgeverspätung unter der Annahme unsicherer Primärverspätungen:

$$\min_x \max_{d \in U} \sum_{r \in R} \sum_{i \in F(r)} p_i^r(d) x_r$$

$d$  = Primärverspätungsvektor (aus Unsicherheitsmenge  $U$ )

$p_i^r(d)$  = Sekundärverspätung des Flug Legs  $i$  in Rotation  $r$  unter Primärverspätung  $d$

$r$  = eine spezifische Rotation  $r$

$x_r$  = Entscheidungsvariable der Rotationen  $r$ , ob Rotationen in Lösung ist oder nicht

$R$  = Menge aller möglichen Rotationen für gegebenen Flugplan

$F(r)$  = Legs der Rotation  $r$

Um Informationen über auftretende Primärverspätungen zu erhalten, wurde eine fundierte Analyse der historischen Verzögerungsdaten durchgeführt. Zu jedem Flug wurde ein Sample aus historischen Flügen generiert. Dabei wurden die Flüge so selektiert, dass Flüge mit genau derselben Flugroute, derselben Abflugzeit, am selben Wochentag, im selben Flugplan (Sommer/Winter) und die mit demselben Flottentyp durchgeführt wurden, in das zugehörige Sample einfließen. Lieferte diese Filtrierung nicht genug Referenzflüge, wurde der Flottentyp aufgehoben. Aus dem jeweiligen Sample wurden die Wahrscheinlichkeitsmaße, Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$ , der Primärverspätung abgeleitet. Diese Maße bestimmen die Unsicherheitsmenge  $U$ . Es wird angenommen, dass die Primärverspätungen Werte aus dieser Menge annehmen, d.h. das Modell nimmt an, dass verschiedene Primärverspätungen auftreten, dessen Wertemenge durch die Wahrscheinlichkeitsmaße begrenzt sind. Das Modell sichert somit nicht nur gegen eine Ausprägung von Primärverspätungen ab, sondern gegen alle Werte aus der Menge, insbesondere dem Worst Case, was durch das Maximum in der Zielfunktion ersichtlich ist.

In der linearen Optimierung generell, wird unter allen möglichen Lösungen in Bezug auf das gegebene Problem die optimale Lösung zur zugehörigen Zielfunktion generiert. D.h. im vorliegenden Fall werden unter allen möglichen Rotationen, diejenigen ausgewählt, welche die totale Sekundärverspätung minimieren unter den Nebenbedingungen, dass die optimalen Rotationen alle Flüge überdecken und deren Anzahl nicht die Anzahl verfügbarer Flugzeuge überschreitet.

Die Anzahl aller möglichen Rotationen für einen Flugplan von 93 Flügen beträgt bereits mehr als 17.000 Rotationen. Um das Problem zu vereinfachen und die Rechenzeit zu minimieren, wurde das Problem mit Column Generation gelöst. Dieses Lösungsverfahren ermöglicht es, nicht alle Rotationen in Betracht zu ziehen, sondern lediglich verspätungsminimierende Rotationen in den Problemraum aufzunehmen.

Im Rahmen der Masterarbeit wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, welches ebenfalls die totale Sekundärverspätung des Flugplans minimiert. Ein Greedy Algorithmus verteilt die zu operierenden Legs auf

verfügbare Flugzeuge in chronologischer Reihenfolge der Abflugzeiten. Der Algorithmus erhält deterministische Primärverspätungen eines jeden Legs als Input. Demnach entscheidet der Algorithmus bei der Auswahl des einzusetzenden Flugzeuges nach dessen minimaler aktueller Verspätung, die sich aus den konstanten Primärverspätungen der bereits operierten Legs berechnet. Die neu generierten Rotationen sind somit durch die Legesequenz eines jeden Flugzeuges gegeben.

Wir bewerteten die unterschiedlichen Ansätze für den Flugplan der Airline 1. Die beiden Ansätze haben sich in Bezug auf die Effizienz und die Reduzierung der gesamten propagierten Verzögerungsminuten gut bewährt. Die unterschiedlichen Annahmen der Primärverspätungen erlauben jedoch keinen allgemeinen Vergleich der beiden Methoden. Der lineare Optimierungs-Ansatz führt zu einer Minimierung der totalen Folgeverspätung in allen Testinstanzen. Gegenüber der derzeit verwendeten Optimierungsroutine konnten Einsparungen von bis zu 50% erreicht werden.

Der Greedy-Algorithmus übertrifft die anderen Ansätze in Bezug auf die Laufzeit, welche sich im Sekunden Bereich befindet. Für einige Testinstanzen führt die Methode jedoch zu einer Verschlechterung gegenüber der aktuell verwendeten Routine.

Tabelle 15 zeigt den Vergleich der Methoden. Dabei wurden die ausgegebenen Rotationen an 30 Szenarien der Simulationsumgebung getestet. Ausgangsdaten war der Airline 1 Flugplan für einen Tag im Juni 2016 mit 93 Flügen und 17 Flugzeugen. Die deterministischen Primärverspätungen des Greedy-Algorithmus' wurden variiert. Dabei ist erneut anzumerken, dass die Verbesserung der einzelnen Methoden unter verschiedenen Annahmen an Primärverspätungen zu verstehen ist und daher die Werte nicht einfach miteinander verglichen werden können.

Ansatz	Original-Fitness [min]	Fitness optimiert [min]	Verbesserung	Laufzeit [sec]
Schwarmoptimierer	615	519	15,6 %	-
Lineare Optimierung	615	505	17,8 %	3.258
Greedy-Algorithmus ( $\mu$ )	615	472	23,3 %	1
Greedy-Algorithmus ( $\mu + \sigma$ )	615	515	16,3 %	1
Greedy-Algorithmus ( $d_{max}$ )	615	505	17,8 %	1

Tabelle 15: Die Fitnesswerte der jeweiligen Optimierungsmethoden getestet an 30 simulierten Szenarien

## 7.4. Verwertung und Erkenntnisse aus HAP4

In HAP4 wurden konkrete Implementierungen zur Robustheit durchgeführt und evaluiert. Im Laufe des Projektes wurde die hohe Verwertbarkeit der Ergebnisse insbesondere der Simulationsumgebung und der Methoden zur Robustheitserhöhung deutlich. Hierbei spielt einerseits die Aktualität des Robustheitsthemas für Airlines eine wichtige Rolle. Jedoch ist auch die Neuartigkeit der tiefgreifenden Datenanalyse dafür verantwortlich. Die Datenanalyse ermöglicht ein breites Verständnis der Abläufe und Ursachen von Verspätungen. Dadurch ist eine genaue Simulation möglich, die wiederum bei der robusten Planung hilft. Die spezifische Vorhersage der Verspätungen muss dabei nicht direkt in eine Optimierungsmethode einfließen. In der Praxis reicht oftmals die Bewertung der Verspätungen aus, um den Schedulern einer Airline eine robustere Planung zu ermöglichen.

Neben der anwendungsorientierten Verwertung ist aber auch eine wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse sichergestellt. Mithilfe der Optimierungsmethoden konnte gezeigt werden, dass sich Schedules mit den entwickelten Modellen für Boden- und Blockzeiten zuverlässig simulieren lassen und deren

Robustheit in vertretbarem zeitlichem Aufwand mit den angewandten Heuristiken signifikant um bis zu 24 % erhöht werden kann.

Die wesentlichen Ergebnisse des HAPs zur Entwicklung der Robustheitsmethoden wurden in [36] veröffentlicht.

## 8. Verwertung und Veröffentlichungen des Ergebnisses

Übergeordnetes Ziel des Projektes waren sowohl das Aufzeigen des Flugplanungsprozesses und das Entwickeln von Methoden zu dessen Stabilisierung als auch die Entwicklung von Methoden zur Erhöhung der Robustheit des Flugplans. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse im Detail und die Kapitel in denen die Umsetzung in diesem Schlussbericht dargestellt wurde.

Integriertes Prozessmodell zur Flugplanung bei Fluggesellschaften	4.1.3 Prozessmodellierung
Neuer, effizienterer Flugplanungsprozess einschließlich geeigneter prototypischer Unterstützungsverfahren	6.1 Beschreibung eines effizienten Flugplanungsprozesses 6.3 Ausgewählte Unterstützungswerkzeuge (WFMS)
Bewertete Übersicht von Datenquellen zur Flugplananalyse und -Planung	4.2 Datenanalyse Flugplanungsprozess 5.1 Statistische Analyse der Verspätungsdaten
Prototypische Unterstützungs- und Optimierungswerkzeuge zum Aufbau eines robusten Flugplans und Metriken zu dessen Bewertung	7.3 Methoden zur Robustheit 7.1.1 Metriken zur Messung eines robusten Flugplans

Tabelle 16: Übersicht Ergebnisse

Die Verwertung dieser Ergebnisse durch das DLR Lufttransportsysteme erfolgte im Rahmen von Veröffentlichungen und Masterarbeiten. Folgende Veröffentlichungen wurden erarbeitet:

### Veröffentlichungen

- Radde, Marius; Lütjens, Klaus (2017): Analyzing Airline Scheduling Processes based on real Data. Air Transport Research Society World Conference 2017, 5.-8. Jul. 2017, Antwerpen, Belgien. [30]
- Radde, M.; Lang, E.; Lütjens, K. (2018): Binary Particle Swarm Optimization for Solving the Aircraft Routing Problem. 22nd ATRS World Conference, Seoul, Südkorea. [33]
- Radde, Marius; Semar, Judith (2018) Resilient Scheduling & Operations - Optimize On-time Performance based on delay risk prediction. AGIFORS Scheduling and Strategic Planning Conference 2018, 21.-24. Mai 2018, Honolulu, USA.
- Kölker, Katrin; Radde, Marius; Lang, Eva; Lütjens, Klaus; Semar, Judith; Gollnick, Volker (2019): Methodik zur Erstellung robuster Airline-Schedules. Internationales Verkehrswesen. Heft 2, Mai 2019, 71. Jahrgang. [36]

### Geplante Veröffentlichungen

- Radde, Marius; Lütjens, Klaus (2019): Analyzing Airline Scheduling Processes based on real Data. Journal of Air Transport Management. (eingereicht)
- Radde, Marius; Kölker, Katrin (2019): Delay Reduction in Airline Schedules through Slot Swapping. Transportation Research Part E. (geplant)

### Masterarbeiten

- Koepsel, Jascha (2017): Datenbasierte Untersuchung des Einflusses externer Faktoren auf Verspätungen im Flugbetrieb. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Institut für Luft und Raumfahrt. Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr. Berlin. [24]

- Schwanen, Christopher (2019): Ableitung eines entscheidungsbaumbasierten Modells zur Optimierung der Robustheit eines Flugplans. Masterarbeit. RWTH Aachen. Verkehrswissenschaftliches Institut. Aachen. [30]
- Thomsen, Elena (2019): Minimizing the Total Propagated Delay in Flight Networks. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften. Berlin. [31]

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan.....	9
Abbildung 2: Balkenplan.....	10
Abbildung 3: Zusammenarbeit DLR, Lufthansa Systems.....	11
Abbildung 4: Planungsprozess einer Fluggesellschaft .....	12
Abbildung 5: Relative Häufigkeit von Action Codes.....	20
Abbildung 6: Relative Häufigkeit des Action Codes "EQT" im Zeitverlauf.....	21
Abbildung 7: Mittlere Anzahl der von einer Änderung betroffener Flüge je Action Code .....	22
Abbildung 8: Relative Häufigkeit verwendeter Change Reason Codes bei Airline 1.....	24
Abbildung 9: Relative Häufigkeit verwendeter Change Reason Codes bei Airline 1 (einzelflugbasiert) .....	24
Abbildung 10: Verteilung der Abflugverspätungen bei Airline 1 .....	29
Abbildung 11: Verteilung der Abflugverspätungen bei Airline 2 .....	30
Abbildung 12: Prinzipskizze zur Erläuterung von Sekundärverspätungen.....	32
Abbildung 13: Verteilung der Sekundärverspätungen.....	34
Abbildung 14: Mittlere Tiefe der Sekundärverspätung.....	35
Abbildung 15: Prozessverbesserung Network Planning.....	40
Abbildung 16: Prototyp: Chat-Tool.....	45
Abbildung 17: Prototyp Szenarien zwischen Scheduling- und Crewabteilung.....	46
Abbildung 18: Anteil der Zeit zur Koordinierung mit anderen Abteilungen .....	47
Abbildung 19: Zeitliche Verteilung koordinativer Aufgaben .....	48
Abbildung 20: Zeitliche Verteilung koordinativer Aufgaben nach Jobbezeichnung .....	48
Abbildung 21: Verteilung der Antworten zur erwarteten Zeitersparnis durch WFMS .....	49
Abbildung 22: Durchschnittliche, erwartete Zeitersparnis durch WFMS.....	49
Abbildung 23: Erwartetes Zeitersparnis durch WFMS nach Jobbezeichnung.....	49
Abbildung 24: Erwartetes Zeitersparnis durch WFMS nach Planungszeitraum (long-term = Crew Planner und Scheduler; short-term = Crew Tracker und Ops Controller).....	49
Abbildung 25: Wortwolke aus Antworten bei Freitextfrage nach größtem Nutzen von WFMS.....	50
Abbildung 26: Durchschnittlicher erwarteter Nutzen .....	51
Abbildung 27: Gesamtbewertung des Tools nach Berufsgruppen .....	51
Abbildung 28: Gesamtbewertung des Tools nach Planungszeitraum (long-term = Crew Planner und Scheduler; short-term = Crew Tracker und Ops Controller).....	52
Abbildung 29: Gesamtbewertung abhängig von Zeitaufwand für Koordinierungsaufgaben .....	52
Abbildung 30: Gesamtbewertung abhängig von der Session, in der die Umfrage stattfand .....	52
Abbildung 31: Test der Simulationsqualität durch Vergleich mit historischer On-Time-Performance .....	60
Abbildung 32: Verlauf der binären Partikelschwarmoptimierung .....	63
Abbildung 33: Verlauf der binären Partikelschwarmoptimierung mit kombinierten Routing- und Timing-Entscheidungen.....	64

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nennungen von Kenngrößen in den Hospitationen .....	14
Tabelle 2: Problemfelder und Auslöser für Änderungen im Flugplan .....	17
Tabelle 3: Verwendete Action Codes .....	19
Tabelle 4: Verwendete Change Reason Codes .....	23
Tabelle 5: Umfang der analysierten Daten.....	28
Tabelle 6: Verteilungskennziffern von Abflugverspätungen.....	30
Tabelle 7: Verteilungskennziffern für Sekundärverspätungen über alle Flüge .....	33
Tabelle 8: Verteilungskennziffern für Sekundärverspätungen über Flüge mit Sekundärverspätung .....	33
Tabelle 9: Verteilungskennziffern von Sekundärverspätungstiefen .....	35
Tabelle 10: Verteilung der Jobzugehörigkeiten in der Umfrage .....	47
Tabelle 11: Anzahl der Nennungen von Vorteilen durch WFMS .....	50
Tabelle 12: Nutzen durch WFMS Tool.....	51
Tabelle 13: Robustheits Metriken für Flugpläne.....	56
Tabelle 14: Verfahren zur Erhöhung der Robustheit in Flugplänen .....	59
Tabelle 15: Die Fitnesswerte der jeweiligen Optimierungsmethoden getestet an 30 simulierten Szenarien...	66
Tabelle 16: Übersicht Ergebnisse .....	68

## Literaturverzeichnis

- [1] Süddeutsche Zeitung (2018): Flugausfälle und Verspätungen nehmen drastisch zu, 28. Juni 2018.
- [2] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/gemeinsame-erklaerung.html>, Abruf am 21.01.2019.
- [3] Wenzel, Steffen; Kölker, Katrin; Lütjens Klaus (2015); ROFL DLR-Vorhabensbeschreibung.
- [4] Belobaba, Peter; Odoni, Amedeo R.; Barnhart, Cynthia (2009): The global airline industry. Chichester, U.K: Wiley (Aerospace series).
- [5] Barnhart, Cynthia; Cohn, Amy (2004): Airline Schedule Planning: Accomplishments and Opportunities. In: M&SOM 6 (1), S. 3–22. DOI: 10.1287/msom.1030.0018.
- [6] Barnhart, Cynthia; Belobaba, Peter; Odoni, Amedeo R. (2003): Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. Transportation Science 37 (4), S. 368–391. DOI: 10.1287/trsc.37.4.368.23276.
- [7] Barnhart, Cynthia; Smith, Barry (2012): Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry. International Series in Operations Research & Management Science. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4614-1608-1.
- [8] Terekhov, Ivan; Ghosh, Robin; Gollnick, Volker (2015): A concept of forecasting origin-destination air passenger demand between global city pairs using future socio-economic development scenarios. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 5.–9. Januar 2015, Kissimmee, USA.
- [9] Kölker, Katrin; Ghosh, Robin; Lütjens, Klaus (2015): Assessing Quality of Air Travel Using the Impact of Frequency, Travel Time and Number of Transfers on Passenger Demand. 19th World Conference of the Air-Transport-Research-Society, 02. - 05. Juli 2015, Singapur.
- [10] Roskopf, Michael; Lehner, Stephan; Gollnick, Volker (2014): Economic-environmental trade-offs in long-term airline fleet planning. Journal of Air Transport Management, Seiten 109-115, Elsevier, 2014, Amsterdam.
- [11] Kölker, Katrin; Lütjens, Klaus (2015) Using Genetic Algorithms to Solve Large Scale Airline Network Planning Problems. 18th Euro Working Group on Transportation, 14.-16. Juli 2015, Delft, Niederlande.
- [12] Kölker, Katrin; Wenzel, Steffen; Zeile, Clemens; et. al. (2015): Robust Aircraft Rotation Planning using Stochastic Optimization. 5th CEAS Air & Space Conference, 07. - 11. Sept. 2015, Delft, Niederlande (akzeptierter Beitrag).
- [13] Braun, Matthias; Wicke, Kai; Koch, Alexander et al. (2011): Analysis of Natural Laminar Flow Aircraft based on Airline Network Design and Fleet Assignment. 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 20.-22. September 2011, Virginia Beach, USA.
- [14] Roskopf, Michael; Lehner, Stephan; Lütjens, Klaus (2013): Impact of single-aisle aircraft with reduced design range on airline operations and dynamics of fleet composition. Journal of Aerospace Operations, Seiten 99-113. IOS Press, 2013, Amsterdam.
- [15] Wenzel, Steffen; Günther, Yves (2015): Modeling of Pre-Tactical Airline Decision Processes to enable Performance Based Airport Management. AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting, 04. – 07. Mai 2015, Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate.
- [16] Kölker, Katrin und Bießlich, Peter und Lütjens, Klaus (2014): FoAM – From Passenger Growth to Aircraft Movements. 18th World Conference of the Air-Transport-Research-Society (ATRS). Air Transport Research Society (ATRS) 2014 World Conference, 17.-20. Jul 2014, Bordeaux, Frankreich.
- [17] Wenzel, Steffen; Kölker, Katrin; Bießlich, Peter; Lütjens, Klaus (2015): Approach to Forecast Air Traffic Movements at Capacity-Constrained Airports. Journal of Aircraft, DOI: 10.2514/1.C033125. ISSN 0021-8669.
- [18] Apffelstaedt, Arno; Langhans, Stephan; Gollnick, Volker (2008): Identifying carbon dioxide reducing aircraft technologies and estimating their impact on global CO2 emissions. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), Aachen.

- [19] Zeile, Clemens (2014): Stochastische Optimierung der Airline-Umlaufplanung. DLR-interner Bericht, IB-328-2014-20.
- [20] Parmenter, David (2010): Key performance indicators. Developing, implementing, and using winning KPIs. 2nd ed. Wiley; John Wiley: Hoboken, N.J., Chichester.
- [21] Wenzel, Steffen; Reuter, Larissa; Lütjens, Klaus (2015): Systematic Development of Pre-Tactical Airline Key Performance Indicators. 19th ATRS World Conference: Singapur.
- [22] Wenzel, Steffen; Kölker Katrin (2017): D1.2.2 D1.4.2 Analyse des Flugplanungsprozesses; ROFL Deliverable.
- [23] Object Management Group (Dezember 2013): Business Process Model and Notation (BPMN). Version 2.0.2.
- [24] International Organization for Standardization (November 2013): Information technology - Object Management Group Business Process Model and Notation. Nr. ISO/IEC 19510:2013(E)/.
- [25] Becker, Jörg; Mathas, Christoph; Winkelmann, Axel; Günther, O. (2009): Geschäftsprozessmanagement. Springer: Berlin, Heidelberg.
- [26] Kocian, Claudia (Juli 2011): Geschäftsprozessmodellierung mit BPMN 2.0. Business Process Model and Notation im Methodenvergleich. Hochschule Neu-Ulm: Neu-Ulm.
- [27] Radde, Marius; Carstensen, Chris (2018): Deliverable 1.4.3 Analyse der Flugplanänderungsereignisse; ROFL Deliverable.
- [28] Kölker, Katrin; Radde, Marius (2017): D2.2.2 Statistische Analyse der Verspätungsdaten; ROFL Deliverable.
- [29] Koepsel, Jascha (2017): Datenbasierte Untersuchung des Einflusses externer Faktoren auf Verspätungen im Flugbetrieb. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Institut für Luft und Raumfahrt. Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr. Berlin.
- [30] Radde, Marius; Lütjens, Klaus (2017): Analyzing Airline Scheduling Processes based on real Data. Air Transport Research Society World Conference 2017, 5.-8. Jul. 2017, Antwerpen, Belgien.
- [31] Wenzel, Steffen (2018): D3.1.1 Ideen und Konzepte zur Prozessverbesserung; ROFL Deliverable.
- [32] Wenzel, Steffen, Kölker, Katrin (2018): D3.3.1 Analyse des Effizienzsteigerungspotentials der prototypisch entwickelten Unterstützungssysteme; ROFL Deliverable.
- [33] Radde, M.; Lang, E.; Lütjens, K. (2018): Binary Particle Swarm Optimization for Solving the Aircraft Routing Problem. 22nd ATRS World Conference, Seoul, Südkorea.
- [34] Schwanen, Christopher (2019): Ableitung eines entscheidungsbaumbasierten Modells zur Optimierung der Robustheit eines Flugplans. Masterarbeit. RWTH Aachen. Verkehrswissenschaftliches Institut. Aachen.
- [35] Thomsen, Elena (2019): Minimizing the Total Propagated Delay in Flight Networks. Masterarbeit. Technische Universität Berlin. Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften. Berlin.
- [36] Kölker, Katrin; Radde, Marius; Lang, Eva; Lütjens, Klaus; Semar, Judith; Gollnick, Volker (2019): Methodik zur Erstellung robuster Airline-Schedules. Internationales Verkehrswesen. Heft 2, Mai 2019, 71. Jahrgang.