



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Masterarbeit**

Karim Drews

# **Identifikation und Modellierung ziviler Formationsflüge auf Basis von globalen Flugplandaten**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Karim Drews**

**Identifikation und Modellierung ziviler  
Formationsflüge auf Basis von globalen  
Flugplandaten**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
DLR-Lufttransportsysteme  
Luftverkehrsinfrastrukturen und -prozesse  
Blohmstraße 20  
21079 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Gordon Konieczny  
Zweitprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick  
Betreuer: Dipl.-Ing. MDes Tobias Marks

Abgabedatum: 17.01.2017



## Masterarbeit:

### Identifikation und Modellierung ziviler Formationsflüge auf Basis von globalen Flugplandaten.

#### Aufgabenbeschreibung

Am *Institut für Lufttransportsysteme* des *DLR* in Hamburg werden in der Abteilung *Luftverkehrsinfrastrukturen und -prozesse* unter anderem Konzepte für neue Betriebsverfahren und Flugführungstechnologien entwickelt. Eines dieser Konzepte stellt der Formationsflug mehrerer ziviler Verkehrsflugzeuge dar. Dabei fliegt ein Flugzeug im durch die Wirbelschlepe erzeugten Aufwindfeld eines vorausfliegenden Flugzeuges wodurch eine Treibstoffeinsparung erreicht wird. Im Rahmen dieser Arbeit sollen auf Basis globaler Flugplandaten mögliche Formationsflugkandidaten identifiziert und bewertet werden, um das globale Kraftstoffeinsparpotenzial des Formationsfluges abzuschätzen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen u.a. die folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

- Einarbeitung in die Thematik und Hintergrundrecherche zu dem ausgeschriebenen Thema
- Festlegung der relevanten Randbedingungen
- Erarbeitung eines Modellierungsansatzes
  - Filterung und Auswahl möglicher Formationskandidaten
  - Detailmodellierung der Formationskandidaten
  - Bewertungsmethodik für die identifizierten Formationen
- Umsetzung des Ansatzes in Matlab
  - Datenimport und -aufbereitung
  - Umsetzung des Modellierungsansatzes
  - Auswertungsmethodik (Visualisierung)
- Anwendung der Methodik auf reale Flugplandaten
  - Global oder ggf. Nordatlantik
- Analyse und Interpretation der Ergebnisse
- Dokumentation und Präsentation

#### Voraussetzungen

- Masterstudium „Flugzeugbau“
- Programmiererfahrung in Matlab
- Motivation und Fähigkeit zum eigenständigen Arbeiten
- Spaß an der Verbindung von Theorie und Praxis
- Gute Englischkenntnisse

#### Beginn und Dauer der Arbeit

Beginn: Sofort

Dauer: 4-6 Monate

#### Kontakt

Dipl.-Ing. MDes **Tobias Marks**

✉ [tobias.marks@dlr.de](mailto:tobias.marks@dlr.de)

☎ 0531-295-3845

📍 Raum 2.02

Institut für Lufttransportsysteme

Technische Universität Hamburg

Blohmstraße 20

21079 Hamburg

# Abstract

This study estimates the potential fuel saving of formation flight on a global level. The constraints are set to maintain departure times of the input flight schedule and prohibit any adjustment to the cruise speed to join the *Rendezvous* point of the formation. The input consists of a one-week dataset of over 34000 long-haul flights with seven aircraft types of the *HEAVY* wake vortex category. In a first step the promising potential formations are identified by a heuristic filtering method. The flight paths of the 2.5 million identified formations are modeled in a succeeding step. All flight paths are generated as great circle segments by an enhanced fermat point approach for spherical triangles to determine the best possible flight path for the formation. This path ensures that all aircraft stay within their performance envelope. Surrogate models are then applied to estimate the relative fuel saving of each formation; allowing each flight to be assigned to its most fuel saving formation. The developed method is able to assign 57% of the considered flights to a formation. The remaining 14784 flights fly their original solo mission. Each of the selected Formations saves on average 5.44% of fuel against the reference missions of the two participating flights. In order to join the formation each flight makes an average detour of 3.19% of its reference flight distance leading to mean additional flight time of 20 minutes. Formation flight can help to globally save more than 50,000 tons of fuel per week.



# Kurzfassung

Diese Studie schätzt die global erzielbare Treibstoffeinsparung durch zivilen Formationsflug ab. Die Randbedingungen erlauben dabei weder Anpassungen der Abflugzeiten des Flugplans, noch Änderungen der Fluggeschwindigkeit auf dem Weg zum *Rendezvous* Punkt der Formation. Der Ausgangsdatensatz beschreibt eine Woche und enthält 34.000 Langstreckenflüge, die mit 7 verschiedenen Flugzeugtypen der Wirbelschleppenkategorie *HEAVY* durchgeführt werden. Eine heuristische Vorfilterung zur Identifikation der aussichtsreichen Flugpaare ergab 2,5 Millionen Formationen. Für diese Formationen wurden anhand eines erweiterten Fermatpunkt-Ansatzes für sphärische Dreiecke die Flugrouten als Großkreissegmente modelliert. Die so gefundene bestmögliche Route erlaubt jedem beteiligten Flug innerhalb seiner Flugleistungsgrenzen zu fliegen. Im Anschluss wurden die modellierten Routen durch Ersatzmodelle bewertet, so dass jeder Flug der besten seiner möglichen Formationen zugeordnet werden kann. Auf diese Weise konnten 57% der betrachteten Flüge einer Formation zugeordnet werden. Die verbleibenden 14784 Flüge fliegen dabei ihre Ausgangsmiession. Jede der ausgewählten Formationen spart dabei durchschnittlich 5,54% gegenüber den beiden beteiligten Einzelflügen ein. Um an der Formation teilzunehmen muss jeder beteiligte Flug im Mittel einen Umweg von 3,19% seines Referenzfluges in Kauf nehmen, der zu einer um durchschnittlich 20 Minuten verspäteten Ankunft führt. Global lassen sich durch die betrachteten Flüge im Formationsflug mehr als 50.000 Tonnen Kraftstoff pro Woche einsparen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1 Motivation . . . . .	15
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	17
1.3 Vorgehen . . . . .	17
<b>2 Grundlagen</b>	<b>19</b>
2.1 Aerodynamik und Flugmechanik . . . . .	19
2.2 Flug- und Routenführung . . . . .	22
2.3 Bewertungsmethoden . . . . .	25
2.4 Studien . . . . .	28
<b>3 Methodik</b>	<b>31</b>
3.1 Definition der Rahmenbedingungen . . . . .	31
3.2 Grundidee und Aufbau der Methodik . . . . .	32
3.3 Datenauswahl und -aufbereitung . . . . .	33
3.4 Vorauswahl . . . . .	39
3.4.1 Filterarchitektur . . . . .	39

---

3.4.2	Heuristische Filter . . . . .	41
3.4.3	Gekoppelter Filter . . . . .	42
3.4.4	Filterergebnisse . . . . .	46
3.5	Routenbestimmung . . . . .	47
3.5.1	Optimale Route . . . . .	47
3.5.2	Bestmögliche Route . . . . .	52
3.6	Routenbewertung . . . . .	59
3.7	Formationsauswahl . . . . .	64
3.8	Umsetzung . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>69</b>
4.1	Allgemeine statistische Auswertungen . . . . .	69
4.2	Analyse der Formationsparameter . . . . .	72
4.3	Auswertung der Formationsmetriken . . . . .	76
4.4	Geographische Auswertung der Formationsrouten . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>87</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>
<b>A</b>	<b>Anhang Modulübersicht</b>	<b>95</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Zugvögel im Formationsflug © Tarek Effat . . . . .	15
2.1	Wirbelentstehung und Ausbreitung im Nachlauf eines Tragflügels . . .	19
2.2	Qualitativer Vergleich der Widerstandseinsparung im <i>EFF</i> und <i>CFF</i> nach [21] . . . . .	20
2.3	Formationsgeometrien . . . . .	22
2.4	Tatsächlich geflogene Routen und Großkreisrouten . . . . .	23
2.5	Formations- und Referenzrouten mit <i>Rendezvous</i> und <i>Break up</i> Punkten	24
3.1	Vorgehensweise zur Generierung eines Formationsflugplans . . . . .	33
3.2	Beispielhafte Rohdaten . . . . .	34
3.3	Verteilung der Fluganzahl pro Woche im Oktober 2014 . . . . .	35
3.4	Verteilung der Flugdistanzen . . . . .	37
3.5	Anteilige Verteilung der Flugzeugtypen . . . . .	37
3.6	Flugverbindungen nach Flugzeugtypen im Zeitraum vom 06.Oktober bis zum 12.Oktober 2014 . . . . .	38
3.7	Initiale Filtermatrix mit allen theoretisch möglichen Formationen . . .	39
3.8	Filterarchitektur . . . . .	40
3.9	Filtermatrix nach Durchlaufen der Filter . . . . .	40
3.10	Reichweitenkreise zu Beginn der Reiseflugphase für die Flüge von <i>AMS</i> nach <i>ATL</i> und <i>CDG</i> nach <i>EWR</i> . . . . .	43
3.11	Reichweitenkreise zu Beginn der Reiseflugphase für die Flüge von <i>AMS</i> nach <i>ATL</i> und <i>BCN</i> nach <i>MIA</i> . . . . .	44
3.12	Geometrische Voraussetzung zur Schnittfähigkeit zweier Kreise . . . . .	45
3.13	Anzahl der potentiellen Formationen während der Vorfilterung . . . . .	46
3.14	Geometrische Konstruktion des Fermat-Torecelli Punktes <i>P</i> nach [24]	47
3.15	Geometrische Konstruktion der kürzesten Formationsroute nach [24]	48

3.16	Fermatpunkte $P$ für Dreiecke mit allen Innenwinkeln kleiner als $120^\circ$ und einem Innenwinkel größer als $120^\circ$ . . . . .	49
3.17	Formationsrouten für Dreiecke mit allen Innenwinkeln kleiner als $120^\circ$ und einem Innenwinkel größer als $120^\circ$ . . . . .	49
3.18	Optimale Formationsroute . . . . .	50
3.19	Nicht modellierbare Formationsrouten . . . . .	51
3.20	Alternatives Filterkriterium . . . . .	52
3.21	Initialer <i>Rendezvous</i> Punkt bei vorhandenem Schnittpunkt der Reichweitenkreise zum Zeitpunkt $t_{cruise}$ . . . . .	54
3.22	Initialer <i>Rendezvous</i> Punkt bei fehlendem Schnittpunkt der Reichweitenkreise zum Zeitpunkt $t_{cruise}$ . . . . .	55
3.23	Iterative Ermittlung des bestmöglichen <i>Rendezvous</i> Punktes anhand des optimalen <i>Rendezvous</i> Punktes . . . . .	56
3.24	Verlauf des Abstandes zwischen $RSP_{opt}$ und den iterativ ermittelten möglichen <i>Rendezvous</i> Punkten . . . . .	57
3.25	Verschobener <i>Break up</i> Punkt ( <i>SEP</i> ) aufgrund Konflikt mit Sinkflugphase . . . . .	58
3.26	Optimale und bestmögliche Route im Vergleich . . . . .	59
3.27	Streuung der $\lambda$ Bewertungen aller 225.459 identifizierten Formationen	61
3.28	Häufigkeitsverteilung der $\lambda$ Bewertungen der Identifizierten Formationen . . . . .	62
3.29	Auswirkung eines verschobenen <i>Rendezvous</i> Punktes auf die Bewertung der Formation . . . . .	63
3.30	$\lambda$ über Entfernung der Abflughäfen . . . . .	63
3.31	$\lambda$ über Entfernung der Zielflughäfen . . . . .	63
3.32	$\lambda$ über Abweichung der Azimutwinkel . . . . .	63
3.33	$\lambda$ über Differenz der Abflugzeiten . . . . .	63
3.34	Modularer Aufbau des Programmcodes mit Zugriffen zwischen den Modulen . . . . .	66
4.1	Anzahl der Formationsteilnahmen und Position nach Flugzeugtyp . .	71
4.2	Häufigkeitsverteilung und Durchschnitt der relativen Umwege $\sigma$ beider Formationsteilnehmer . . . . .	72
4.3	Häufigkeitsverteilung und Durchschnitt der relativen Länge der Formationsphase $\xi_{ben}$ . . . . .	73
4.4	Ausschnitt der relativen Länge der Formationsphase $\xi_{ben}$ beider Formationsteilnehmer . . . . .	74

---

4.5	Formationsroute mit ähnlichem $\xi_{ben}$ für beide Teilnehmer . . . . .	74
4.6	Formationsroute mit deutlich verschiedenen $\xi_{ben}$ für beide Teilnehmer	75
4.7	Relative Längen der Formationsphasen . . . . .	76
4.8	Verteilung und Mittelwerte der $\lambda$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan . . . . .	77
4.9	Verteilung und Mittelwerte der $\tau_{fw}$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan . . . . .	77
4.10	Verteilung und Mittelwerte der $\tau_{td}$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan . . . . .	78
4.11	Verteilung der eingesparten Kraftstoffmenge im ausgewählten Formationsflugplan . . . . .	79
4.12	Formationen mit relativer Treibstoffeinsparung und verbleibende Einzelflüge im Zeitraum vom 06.Oktober bis zum 12.Oktober 2014 . . . .	80
4.13	Anzahl der Abflüge und Formationsteilnahmen der Flughäfen mit dem größten Verkehrsaufkommen . . . . .	81
4.14	Flugverbindungen nach Flugzeugtypen im Zeitraum vom 06.Oktober bis zum 12.Oktober 2014 . . . . .	82
4.15	Abflughäfen der Formationspartner mit London ( <i>LHR</i> ) . . . . .	83
4.16	Zielflughäfen der Formationspartner mit London ( <i>LHR</i> ) . . . . .	83
4.17	<i>Rendez vous</i> Punkte mit ( <i>LHR</i> als beteiligter Startflughafen . . . . .	84
4.18	Breakup Punkte mit <i>LHR</i> als beteiligtem Zielflughafen . . . . .	85



# Tabellenverzeichnis

2.1	Punkte und Streckenabschnitte von Formationsrouten . . . . .	24
2.2	Parameter zur Abschätzung von $\lambda$ nach [31] . . . . .	27
2.3	Einsparungen im Formationsflug für minimalen Treibstoffverbrauch nach [14] . . . . .	29
2.4	Einsparungen im Formationsflug für minimale direkte Betriebskosten nach [14] . . . . .	29
3.1	Verteilung der Flugzeugtypen und Missionsdaten . . . . .	36
3.2	Zulässige Wertebereiche der Parameter zur Abschätzung von $\lambda$ nach [31] . . . . .	60
3.3	Verlauf der Formationsanzahl im Zuge der Vorfilterung, Routenmo- dellierung und Bewertung . . . . .	65
3.4	Rechenzeiten der einzelnen Module . . . . .	67
4.1	Überblick Formationsflugplan . . . . .	70
4.2	Formationsarten nach Ab- und Zielflughäfen sowie durchschnittliche Treibstoffeinsparung . . . . .	70
4.3	Formationsarten und durchschnittliche Treibstoffeinsparung . . . . .	84



# Nomenklatur

## Verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a$	[ <i>nm</i> ]	Strecke vom Abflughafen zum RV
$a_{Schall}$	[ <i>kt</i> ]	Schallgeschwindigkeit
$b$	[ <i>nm</i> ]	Strecke vom BU zum Zielflughafen
$counter$	[]	Iterationszähler
$\Delta_{fuel}$	[ <i>kg</i> ]	Treibstoffeinsparung
$Early_{dist}$	[ <i>nm</i> ]	Flugdistanz des früher startenden Flugzeugs
$F_{form}$	[ <i>kg</i> ]	Treibstoffbedarf als Formationsteilnehmer
$F_{ref}$	[ <i>kg</i> ]	Treibstoffbedarf der Einzelflüge
$Late_{dist}$	[ <i>nm</i> ]	Flugdistanz des später startenden Flugzeugs
$lf$	[]	Passagierladefaktor
$opt_{dist}$	[ <i>nm</i> ]	Distanz zwischen gefundenem RV und optimalem RV
$Origin_{dist}$	[ <i>nm</i> ]	Entfernung zwischen den Abflughäfen
$n$	[]	Anzahl der Flüge
$route$	[ <i>nm</i> ]	Formationsroute aus $a$ , $ben$ , $b$
$S_a$	[ <i>nm</i> ]	Strecke vom Abflughafen zum RV
$S_{ben}$	[ <i>nm</i> ]	Formationstrecke mit Widerstandsreduktion
$S_{cruise}$	[ <i>nm</i> ]	Zurückgelegte Flugdistanz bei Reiseflugbeginn
$S_{ref}$	[ <i>nm</i> ]	Referenzroutendistanz
$S_{route}$	[ <i>nm</i> ]	Formationsroutendistanz
$t_{cruise}$	[hh:hh]	Zeitpunkt des Reiseflugbeginns der Formation
$T_{form}$	[hh:mm]	Flugzeit der Formationsroute
$t_{initial}$	[hh:mm]	Zeitpunkt für den initialen RV
$t_{int}$	[mm]	Zeitintervall
$Ma$	[]	Machzahl
$T_{ref}$	[hh:mm]	Flugzeit der Referenzroute
$t_{RV}$	[hh:mm]	Rendez vous Zeitpunkt
$v_{cruise}$	[ <i>kt</i> ]	Reisefluggeschwindigkeit
$\lambda$	[]	Treibstoff-basierte Metrik
$\sigma$	[]	Relativer Umweg
$\tau$	[]	Zeit-basierte Metrik
$\xi_a$	[]	Relativer Streckenanteil vom Abflughafen zum RV
$\xi_{ben}$	[]	Anteil der Formationsphase mit Widerstandsreduktion

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
AC	IATA-Code Air Canada
ADI	Airport Data Intelligence
ArvTime	Ankunftszeit laut Flugplan
BU	Break up Punkt
CFF	Close Formation Flight
DepTime	Abflugzeit laut Flugplan
Dest	Zielflughafen (IATA-Code)
DiscDate	Einstellungsdatum einer Flugverbindung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
E	Einzelflug
EFF	Extended Formation Flight
EFFDate	Anfangsdatum einer Flugverbindung
ETOPS	Extended-range Twin-engine Operational Performance Standard
FAR	Federal Aviation Regulation
FCA	Formationsflughöhe
FCS	Formationsfluggeschwindigkeit
FltNum	Flugnummer
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organisation
Orgn	Abflughafen (IATA-Code)
TAS	True Airspeed (Wahre Fluggeschwindigkeit)
THY	ICAO-Code Turkish Airlines
ToC	Top of Climb
ToD	Top of Descent
RSP	<i>Rendezvous Starting Point</i>
SAA	South African Airways
SEP	<i>Seperation End Point</i>
USA	United States of America
USAF	United States Air Force
UTC	Coordinated Universal Time

## Indizes

<b>Index</b>	<b>Bezeichnung</b>
<i>adj</i>	angepasst
<i>ben</i>	Formationsphase
<i>early</i>	Früher startender Flug
<i>fw</i>	Follower
<i>ld</i>	Leader
<i>late</i>	Später startender Flug
<i>mittel</i>	Mittelwert
<i>opt</i>	Geometrisch optimal
<i>ref</i>	Referenz
<i>route</i>	Gesamte Formationsroute eines Fluges

## Flughäfen

<b>IATA-Code</b>	<b>Bezeichnung</b>
ADD	Addis Abeba Bole International Airport (Addis Abeba, Äthiopien)
AMS	Amsterdam Schiphol Airport (Amsterdam, Niederlande)
ATL	Hartsfield Jackson Atlanta International Airport (Atlanta USA)
BCN	Barcelona International Airport (Barcelona, Spanien)
BKK	Suvarnabhumi Airport (Bangkok, Thailand)
BOG	El Dorado International Airport ( Bogota, Kolumbien)
BOM	Chhatrapati Shivaji International Airport (Mumbai,Indien)
CDG	Charles de Gaulle International Airport (Paris, Frankreich)
DOH	Hamad International Airport (Doha, Katar)
DXB	Dubai International Airport (Dubai, Vereinigte Arabische Emirate)
EWR	Newark Liberty International Airport (Newark, USA)
GIG	Rio Galeao Tom Jobim International Airport (Rio de Janeiro, Brasilien)
GRU	Sao Paulo International Airport (Sao Paulo, Brasilien)
GYE	Jose Joaquin de Olmedo International Airport (Guayaquil, Ecuador)
HKG	Hong Kong International Airport (Hong Kong)
KIX	Kansai International Airport (Osaka, Japan)
ICN	Incheon International Airport (Seoul, Südkorea)
IST	Atatürk International Airport (Istanbul, Türkei)
JFK	John F Kennedy International Airport (New York, USA)
KUL	Kuala Lumpur International Airport (Kuala Lumpur, Malaysia)
LAX	Los Angeles International Airport (Los Angeles, USA)
LHR	London Heathrow Airport (London, Großbritannien)
MAD	Adolfo Suarez Madrid-Barajas Airport (Madrid, Spanien)
MEM	Memphis International Airport (Memphis, USA)
MIA	Miami International Airport (Miami, USA)
NAT	North Atlantic Tracks
NRT	Narita International Airport (Tokio, Japan)
PEK	Beijing Capital International Airport (Peking, China)
PVG	Shanghai Pudong International Airport (Shanghai, China)
SCL	Comodoro Arturo Merino Benitez Airport (Santiago de Chile, Chile)
SIN	Singapore Changi Airport (Singapur, Singapur)
SSG	Malabo Airport (Malabo, Äquatorialguinea)
YYZ	Lester B. Pearson International Airport (Toronto, Kanada)

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Seit jeher können Formationen von Zugvögeln, wie in **Abbildung 1.1**, am Himmel beobachtet werden. Anhand dieser Beobachtung wurde das aerodynamische Einsparpotential von Formationsflügen bereits früh vermutet. 1914 erklärte Wieselsberger den Zusammenhang zwischen der Wirbelentstehung an einem voraus fliegenden Vogel und dessen unterstützender Wirkung auf den Flug der folgenden Vögel [37]. Die Idee des Formationsflugs lässt sich so auch auf die Luftfahrt anwenden. An den Flügelspitzen eines fliegenden Flugzeugs bilden sich Wirbelschleppen. Diese Wirbelschleppen bilden ein Aufwindfeld hinter dem Flugzeug und erlauben darin positionierten Folgeflugzeugen eine Reduktion der Schubkraft. Das Prinzip des Formationsflugs wurde seit dem sowohl im Bezug auf Zugvögel, als auch auf die Luftfahrt weiter wissenschaftlich behandelt.



Abbildung 1.1: Zugvögel im Formationsflug © Tarek Effat

Schlichting bezifferte 1942 die so erreichbare Leistungsparsnis für drei Flugzeuge mit 14 % [29]. Beobachtungen und Messungen in der Natur kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. So haben Experimente mit Pelikanen gezeigt, dass gemeinsamer Flug in Formation die Herzfrequenz der einzelnen Pelikane um bis zu 14.5 % senkt [8]. Es liegt ebenso nahe, dass Tiere nicht nur aus energetischen Gründen in Formation fliegen, sondern auch zur Erleichterung der Navigation und der Sicherheit, die eine Gemeinschaft bietet. Aus ähnlichen Gründen wird in der Luftfahrt ebenfalls in Formation geflogen, wenn auch überwiegend im militärischen Flugbetrieb. Hervorzuheben sind dabei die strategischen Formationen von Kampfflugzeugen im

Einsatz sowie bei der Luftbetankung. Darüber hinaus stellen Formationsgeometrien im Kunstflug einen Zweck an sich dar. Aus Sicht der Flugsicherung kann der Formationsflug eine Möglichkeit bieten, die Kapazität des Luftraumes zu erhöhen, indem sich Flugzeuge zu Formationen zusammenfassen und ihre Abstände zueinander selbstständig regeln [1]. Dieses als „loser Formationsflug“ bezeichnete Verfahren sowie der militärische und kunstfliegerische Formationsflug sollen nicht Gegenstand dieser Arbeit sein, da deren Ziel nicht die Treibstoffeinsparung ist.

Maßnahmen zur Treibstoffeinsparung sind für die aktuellen Herausforderungen, denen sich die Luftfahrt stellen muss, von entscheidender Bedeutung. Besonders in Zeiten von Wachstumsraten der geflogenen Passagierkilometer von 7,1% (2015) [12] ist es notwendig die kommerzielle Luftfahrt effizienter werden zu lassen. Die IATA hat deshalb das Ziel formuliert, dieses Wachstum ohne zusätzliche Emissionen von Treibhausgasen umzusetzen [7] und zu diesem Zweck im Jahr 2007 die sogenannte *Four-Pillar Strategy* verfasst. Die Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele wurden dafür in vier Kategorien eingeteilt. In der ersten Kategorie soll durch technologische Verbesserungen die Effizienz der Flugzeuge selbst erhöht werden, während in der zweiten Kategorie der Flugbetrieb zu Einsparungen beitragen soll. Die dritte Kategorie behandelt die Bereitstellung von verbesserter Infrastruktur an den Flughäfen und der Flugsicherung. Die vierte Kategorie ist wirtschaftlicher Natur und soll durch finanzielle Anreize zum klimaneutralen Wachstum des Luftverkehrs beitragen [10]. Der Formationsflug lässt sich in dieser Einteilung den flugbetrieblichen Maßnahmen zuordnen und soll aus diesem Grund auf sein Einsparpotential hin untersucht werden.

Wenn auch der zivile Formationsflug zur kommerziellen Passagierbeförderung aktuell nicht zulässig ist (FAR Part 91 Sec. 91.111) , bleibt der Vorteil, dass es sich um ein betriebliches Verfahren handelt, welches ohne neue Infrastruktureinrichtungen oder konstruktive Änderungen am Flugzeug auskommt. Jedoch ist an der Umsetzung des Formationsflugs eine Vielzahl von Akteuren beteiligt. Zu allererst ist es der Betreiber eines Luftfahrzeugs, der die administrativen Bedingungen schaffen muss, Ersparnisse aus dem Formationsflug an alle beteiligten Formationspartner zu verteilen. Dem übergeordnet liegt es, in der Verantwortung der Flugsicherung und Zulassungsorganisationen für die Schaffung und Einhaltung von Sicherheitsstandards zu sorgen. Letztlich müssen auch die Passagiere vorbehaltlos sein gegenüber diesem Verfahren.

Es wurden bereits zu den verschiedensten Aspekten des Formationsflugs Forschungsergebnisse veröffentlicht. So ist die Wirbelentstehung sowie die Auswirkungen auf das Folgeflugzeug schon mehrfach dokumentiert. Ebenso wurden die Positionierung und Regelung der Formation erforscht. In der aktuellen Situation sind die einzelnen, grundlegenden Aspekte des Formationsflugs bereits hinreichend erklärt, um in darauf aufbauenden Schritten die operationelle Umsetzung weiter zu ergründen. Auf diesem Gebiet sind ebenfalls Forschungsbemühungen unternommen worden, welche zum Teil auch den Weg für diese Arbeit geebnet haben. Alle bisherigen Publikationen betrachten lediglich einzelne Ausschnitte, wie z.B. Regionen oder einzelne Airlines, dabei wird jedoch nur die geographische Lage der Formationspartner als Kriterium berücksichtigt. Um nun einen weiteren Schritt in Richtung Realitätsnähe zu unternehmen, sollen die tatsächlichen Flugplanzeiten in die Modellierung der Formationen aufgenommen werden. Die Ansätze zur Ermittlung von Flugpaaren, die sich für eine Formation eignen, lässt sich in zwei Gruppen nach Verhagen einteilen. Verhagen unterscheidet zentrale Ansätze, welche die Formationen zentralisiert

vor Flugbeginn auf Grundlage von Flugplänen zuordnen und dezentrale Ansätze, bei denen sich die Formationen in der Luft durch Kommunikation der Flugzeuge untereinander spontan bilden [35].

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Ergebnisse bisheriger Forschung und Experimente versprechen eine Kraftstoffersparnis im zivilen Formationsflug. Die Anwendung auf den Flugbetrieb bringt jedoch auch einige nachteilige Effekte mit sich, welche die Treibstoffeinsparung reduzieren. So müssen die Formationspartner von ihrer, für den Einzelflug, idealen Flugroute abweichen, um von den Einsparungen des Formationsflugs profitieren zu können. Es handelt sich also um einen Kompromiss aus Einsparungen und dafür nötigem Umweg.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, die potentielle Treibstoffeinsparung durch Formationsflüge global abzuschätzen. Die Randbedingungen und Einschränkungen sollen dabei so gewählt werden, dass sich ein möglichst realitätsnahes Modell ergibt. Das betrifft im Besonderen die Abflugzeiten der Flugpläne. Ebenso soll die Wahl der Formationsroute den bestmöglichen Kompromiss aus den geographischen Gegebenheiten und den Vorgaben des Flugplans darstellen. Das Ergebnis dieser Arbeit soll helfen die Möglichkeiten des Formationsflugs einzuschätzen und einen Orientierungshorizont für weitere Forschung zu liefern. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz soll darlegen, wie sich auf Basis heutiger Flugpläne bereits Formationsflüge umsetzen lassen und welche Ersparnisse erzielt werden können. Neben den erzielbaren Einsparungen, sind die nachteiligen Effekte, wie verlängerte Flugzeit durch Umwege, und deren Einfluss zu erörtern. Dies kann als Grundlage für eine spätere Optimierung der Flugpläne oder auch der Flugzeuge selbst dienen, wie es von Herinckx et al. in [9] beschrieben wird. Auf globaler Ebene gilt es zu ermitteln, welche Gestalt der Formationsflug auf Basis der heutigen Flugpläne annehmen würde und welche Eigenschaften dieser aufweist.

## 1.3 Vorgehen

Zur Erreichung der formulierten Ziele wird die Arbeit wie folgt aufgebaut.

Das zweite Kapitel erläutert zunächst die Grundlagen des Formationsflugs. Dazu werden aus dem aktuellen Stand der Technik die Zusammenhänge erklärt, auf denen alle weiteren Ausführungen beruhen. Außerdem werden die wichtigsten Studien zu Formationsflugrouten kurz vorgestellt.

Im dritten Kapitel soll die Methodik zur Identifikation und Modellierung der Formationsflüge entwickelt werden. Zu diesem Zweck wird zunächst der Rahmen abgesteckt. Nach Auswahl und Aufbereiten der Datengrundlage, wird ein System aus Vorfiltern vorgestellt. Die Vorfilterung hilft, die Datenmenge und somit den Rechenaufwand zu reduzieren. In der anschließenden Routenbestimmung wird unter Zuhilfenahme eines geometrischen Ansatzes, ein Verfahren zur Ermittlung der bestmöglichen Formationsroute vorgestellt. Die so gefundenen Formationen werden im

Anschluss bewertet, so dass aus dem ursprünglichen Flugplan ein Formationsflugplan generiert werden kann. Abschließend wird auf die Implementierung der Methodik in Matlab<sup>®</sup> eingegangen.

Das vierte Kapitel dient der Darstellung der gewonnenen Ergebnisse. Nach ersten statistischen Analysen wird der erstellte Flugplan aus Formationen analysiert und seine Auswirkungen auf den Luftverkehr untersucht. Dabei wird der Frage nachgegangen, welcher Aufwand betrieben werden muss, um vom Formationsflug profitieren zu können.

Das abschließende fünfte Kapitel fasst die Arbeit zusammen und gleicht die Ergebnisse mit der Zielsetzung dieser Arbeit ab. Über das abschließende Fazit hinaus, wird ein Ausblick auf weitere für den Formationsflug relevante Aspekte gerichtet.

## 2. Grundlagen

Dieses Kapitel soll die grundlegenden Zusammenhänge des Formationsflugs erklären und einen Überblick über die bisherige Forschung und deren Ergebnisse geben. Die spätere Wahl der Randbedingungen für die vorliegende Arbeit werden so gewählt, dass sich, aufbauend auf dem aktuellen Stand der Technik, neue Erkenntnisse gewinnen lassen.

### 2.1 Aerodynamik und Flugmechanik

In diesem Abschnitt werden die aerodynamischen Grundlagen und die flugmechanischen Auswirkungen erklärt, die zu Treibstoffeinsparungen im Formationsflug führen.

Unter den Tragflügeln eines Flugzeugs entstehen durch den relativen Unterdruck an der Oberseite und den relativen Überdruck auf der Unterseite Strömungsbewegungen der Luft in Spannweitenrichtung. An den Flügelspitzen wird aus dieser Strömungsbewegung eine Umströmung, die zu einer Wirbelausbildung führt. Dieses Phänomen erzeugt einen zusätzlichen Widerstand am Flugzeug, den induzierten Widerstand. Durch die Bewegung des Flugzeugs werden aus den Flügelspitzenwirbeln Wirbelschleppen, in denen die Luft kreisförmig strömt [17].

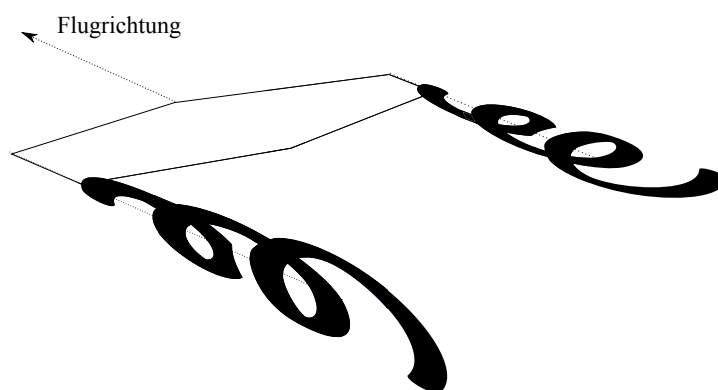


Abbildung 2.1: Wirbelentstehung und Ausbreitung im Nachlauf eines Tragflügels

**Abbildung 2.1** blickt in Flugrichtung des Flugzeugs, dabei stömt die Luft auf der Außenseite der Wirbel aufwärts und auf der Innenseite abwärts. Die beiden Wirbel an den Spitzen der Tragflächen eines Flugzeugs sind somit gegenläufig.



Im Bereich hinter den Flügeln beginnen die Wirbel sich mit weiteren Einzelwirbeln, die an Klappen oder Steuerflächen entstehen, aufzurollen [19]. Weiter stromabwärts bewegen sich die Wirbel spiralförmig lateral nach innen und vertikal nach unten. Dieser Aufrollprozess ist etwa zehn Spannweitenlängen hinter dem Flugzeug abgeschlossen, und der Wirbelzerfall beginnt. Weiteren Einfluss auf die Lage und die Entwicklung der Wirbel hat der Wind [38].

An dieser Stelle soll die gängige Benennung der Formationsteilnehmer eingeführt werden. Diese wird im Weiteren verwendet.

*Leader*: Vorausfliegendes Flugzeug

*Follower*: Folgendes Flugzeug

Die Literatur unterscheidet Formationsflüge in *Close Formation Flight (CFF)* mit longitudinalen Abständen bis zu zehn Spannweiten und *Extended Formation Flight (EFF)* mit longitudinalen Abständen ab zehn Spannweiten. Im Fall des *CFF* sind die Flügelspitzenwirbel noch nicht vollständig aufgerollt und es kommt zu Einflüssen des *Followers* auf den *Leader*. So ist der induzierte Widerstand des *Leaders* auch abhängig von der Nähe zum *Follower*. Auf diese Art lassen sich im *CFF* Treibstoffeinsparungen bei beiden Formationsteilnehmern feststellen [21]. Durch die sehr geringen Abstände zwischen den Flugzeugen und die hohe Fluggeschwindigkeit, ist die Kollisionsgefahr nicht vertretbar. Ning et al. [27] haben aus diesem Grund den *EFF* weiter verfolgt. Die erzielbaren Einsparungen sind dabei geringer, aber immer noch ausreichend, wie in **Abbildung 2.2** zu sehen [27]. Ein weiterer Vorteil ist der einseitige Einfluss des *Leaders* auf den *Follower*. Ein wechselseitiger Einfluss erhöht die Komplexität und damit den Rechenaufwand stark.

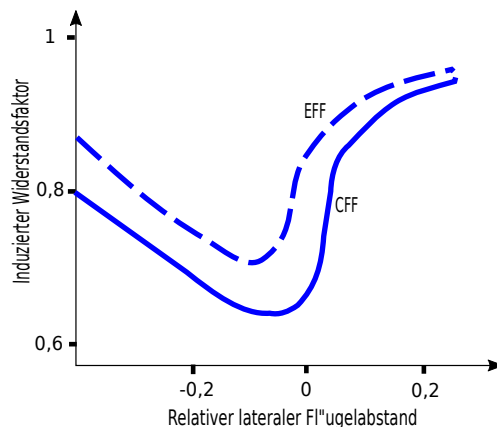


Abbildung 2.2: Qualitativer Vergleich der Widerstandseinsparung im *EFF* und *CFF* nach [21]

Nach Ning et al. [27] lassen sich im *EFF* 26 – 31% des induzierten Widerstands reduzieren [27]. Durch den größeren Abstand zwischen *Leader* und *Follower*, muss der *Follower* nicht mehr primär relativ zum *Leader* ausgerichtet werden. Viel mehr muss der Wirbel als Referenz dienen. Zwar wird der Wirbel vom *Leader* generiert und ist damit in seiner ursprünglichen Position bestimmt, aber weiter stromabwärts

wirken Wind und Böen auf die Position des Wirbels ein. Das Ausrichten am Wirbel des *Leaders* ist auf mehreren Ebenen anspruchsvoll. Die Steuereingaben des *Leaders* müssen an den *Follower* übermittelt werden, um zusammen mit Wetterdaten die Position des Wirbels abzuschätzen.

Bezüglich der nötigen Regelungstechnik für den Formationsflug und der Identifikation der Wirbelfelder, wurden bereits Untersuchungen angestellt. Jedoch nutzen die meisten Studien die Annahme, dass der *Follower* immer optimal im Wirbel des *Leaders* positioniert ist. Dieser optimale Punkt innerhalb des Wirbels, der die größtmögliche Treibstoffeinsparung bietet, wird als *Sweet Spot* bezeichnet [23]. Es besteht demnach noch Bedarf, diese Annahme zu konkretisieren und technologisch weiter zu entwickeln, wie Windels in [38] darlegt. In Experimenten der Amerikanischen Luftwaffe USAF (*United States Air Force*) mit C-17 Transportflugzeugen konnte das bereits vorhandene Autopilotensystem zum Formationsflug genutzt werden, um feste Positionen relativ zum *Leader* über längere Zeiträume zu halten [16] [34]. Zur optimalen Positionierung muss ein solches System jedoch auch in der Lage sein, die Entwicklung des Wirbels abzuschätzen, damit eine Positionierung relativ zum Wirbel stattfinden kann.

Nachdem auf die Entstehung und Ausbreitung der Wirbel eingegangen wurde, soll im nächsten Schritt der *Follower* genauer betrachtet werden. Dieses Flugzeug befindet sich im Aufwindfeld des Wirbels, der von dem *Leader* erzeugt wurde. Durch die zusätzliche Vertikalkomponente der Anströmung erhöht sich der effektive Anstellwinkel des Flugzeugs. Als Folge erhöht sich der generierte Auftrieb des Flugzeugs, bzw. es verringert sich der induzierte Widerstand. Das wiederum lässt sich auch als verringerten Schubbedarf verstehen, so dass es letztendlich zu einer Treibstoffeinsparung kommt.

Die Wirkung des Aufwindfeldes ist lokal begrenzt, so dass die Auftriebsverteilung von dem Referenzzustand im Einzelflug abweicht. Das entstehende Rollmoment muss durch Querruderausschläge ausgeglichen werden. Das bedeutet, der ursprüngliche Flugzustand muss durch Trimmung wiederhergestellt werden. Der Querruderausschlag erzeugt seinerseits einen Widerstand, der die Einsparung mindert. Ferner kann es durch diese Querruderausschläge zu aeroelastischen Phänomenen wie Buffeting kommen, insbesondere bei transsonischen Fluggeschwindigkeiten [38].

Transsonische Fluggeschwindigkeiten stellen eine weitere Herausforderung des Formationsflugs dar. Durch die veränderte Anströmung des *Followers* entstehen bei den üblichen Reisefluggeschwindigkeiten zusätzliche Kompressibilitätseffekte. Der daraus resultierende Widerstand ist in der Lage, die Einsparung an induziertem Widerstand auszugleichen. Ning et al. [26] konnten jedoch zeigen, dass eine Reduktion der Machzahl um 2,5 % ausreicht, um die Kompressibilitätseffekte zu umgehen [26]. Wenn Formationsflüge also bei niedrigeren Machzahlen stattfinden sollen, verschiebt sich nach Ning et al. die optimale Reiseflughöhe um 1000 *ft* nach unten. Als unmittelbarer Nachteil folgt daraus eine verlängerte Reisezeit. Es lässt sich jedoch ein Kompromiss finden, indem der laterale Abstand des *Followers* erhöht wird. Mit zunehmendem lateralem Abstand, werden die Aufwindgeschwindigkeiten geringer [21]. Dabei muss jedoch in Kauf genommen werden, dass die Einsparungen des induzierten Widerstands ebenfalls abnehmen.

## 2.2 Flug- und Routenführung

Dieser Abschnitt soll den aktuellen Stand der operationellen Umsetzung des Formationsflugs näher eräutern. Zu diesem Zweck werden anfangs die üblichen Formationsgeometrien beschrieben. Im Anschluss wird die allgemeine Routenführung von Flugzeugen erklärt, um davon die Grundlagen der Formationsrouten abzuleiten.

Die in dieser Arbeit betrachteten Formationen aus zwei Flugzeugen erlauben wenig Variationsmöglichkeiten in der Anordnung. Wie das vorherige Kapitel gezeigt hat, fliegt der *Follower* mit mindestens zehn Spannweiten Abstand hinter dem *Leader*. Lateral sind die Flügelspitzen von *Leader* und *Follower* ebenfalls versetzt. An dieser Stellen sollen die Formationengeometrien für ab drei teilnehmenden Flugzeugen auch vorgestellt werden, da sie die zuvor erklärten Aspekte veranschaulichen. **Abbildung 2.3** zeigt die drei verschiedene Anordnungsvarianten.

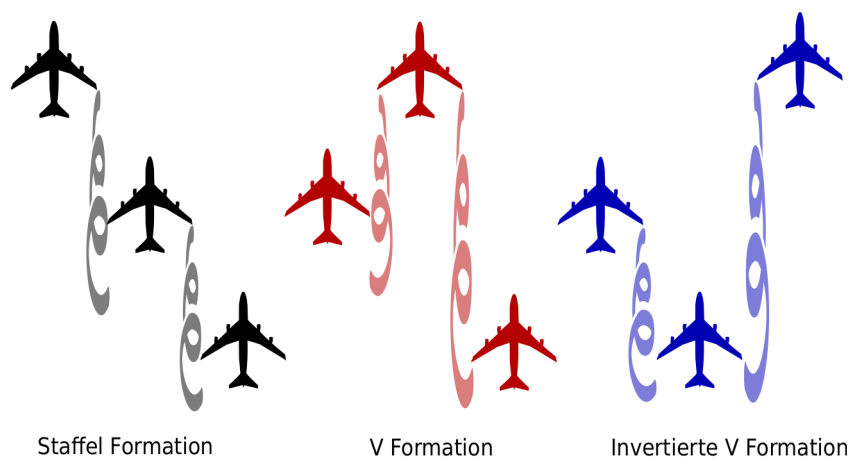


Abbildung 2.3: Formationsgeometrien

Die V-Formation ist ihrer der Gestalt ähnlich zu Formationen von Zugvögeln, jedoch wird das dritte Flugzeug ebenfalls mit mindestens zehn Spannweiten hinter das zweite Flugzeug positioniert. Andernfalls wären zu geringe laterale Abstände zwischen den *Follower* die Folge [21]. Die beiden vom *Leader* erzeugten Wirbel werden je von einem der *Follower* zur Widerstandsreduktion genutzt. Anders ist es bei der *Staffelformation*, welche als simple Verlängerung der Formation aus 2 Flugzeugen angesehen werden kann. Die *Follower* fliegen dabei jeweils im Nachlauf ihres vorausfliegenden *Leaders*. Diese beiden Formationsgeometrien erzeugen bei den *Follower* asymmetrische Auftriebsverteilungen, die zu Rollmomenten führen. Anders ist es bei der *Invertierten V-Formation*, da sich das dritte Flugzeug dabei im Wirbelfeld beider Flugzeuge befindet. Außerdem wird in dieser Anordnung nahezu die komplette Treibstoffeinsparung der Formation am dritten Flugzeug realisiert. Nachteilig ist die schwierige Positionierung des Flugzeugs, da es sich an zwei unterschiedlichen Wirbeln orientieren muss [6].

Im Bezug auf die Flugroute von Flugzeugen, ist in einem ersten Schritt die kürzeste Verbindung zwischen zwei Orten von Interesse. Auf der Erdoberfläche ist die kürzeste Verbindung ein Großkreissegment. Im Flugbetrieb weichen Flugzeuge jedoch aus vielen Gründen von diesen kürzesten Routen ab. Gerade in Regionen mit

hohem Luftverkehrsaufkommen ist die zentrale Steuerung des Verkehrs durch Flugsicherungsorganisationen nötig. Hierbei spielt auch die Kapazität des Luftraumes eine Rolle, so dass es im Zuge der Verkehrsflusssteuerung zu Abweichungen von der kürzesten Route kommt. Ein weiterer Grund können Luftraumsperrungen über Krisenregionen oder andere politische Hindernisse sein. Bei der Erstellung des Flugplans hat ebenso das Wetter Einfluss auf die geplante Route. Der Formationsflug lässt sich nach Ning et al. [26] nur bei leichten Turbulenzen umsetzen.

Weiterhin werden Flugpläne auf minimale Kosten, kürzeste Reisezeit oder minimalem Treibstoffverbrauch optimiert [20]. Neben diesen Einflüssen, können auch die ETOPS-Eigenschaften des Flugzeugs zu einer längeren Route führen [3].

Bei Flügen über den Nordatlantik kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Zwischen Europa und Nordamerika herrscht ein hohes Verkehrsaufkommen, welches jedoch nicht herkömmlich überwacht und gesteuert werden kann. Das liegt an der fehlenden Radarabdeckung in den meisten Teilen des Nordatlantiks. Um jedoch alle Sicherheitsstandards zu gewährleisten werden feste Flugrouten für alle Flugzeuge festgelegt. Diese sind als *North Atlantic Tracks*, NAT, bekannt und ändern sich zweimal täglich. Damit passen sie sich der vorherrschenden Flugrichtung, ostwärts oder westwärts und der Wetterlage an[4]

**Abbildung 2.4** zeigt exemplarisch zwei tatsächlich geflogene Routen und die zugehörigen Großkreissegmente. Die Informationen zu den tatsächlich geflogenen Routen wurden dem Internetdienst *Flightradar24* [5] in Intervallen entnommen. Zwischen den einzelnen Punkten wurde die Route interpoliert.

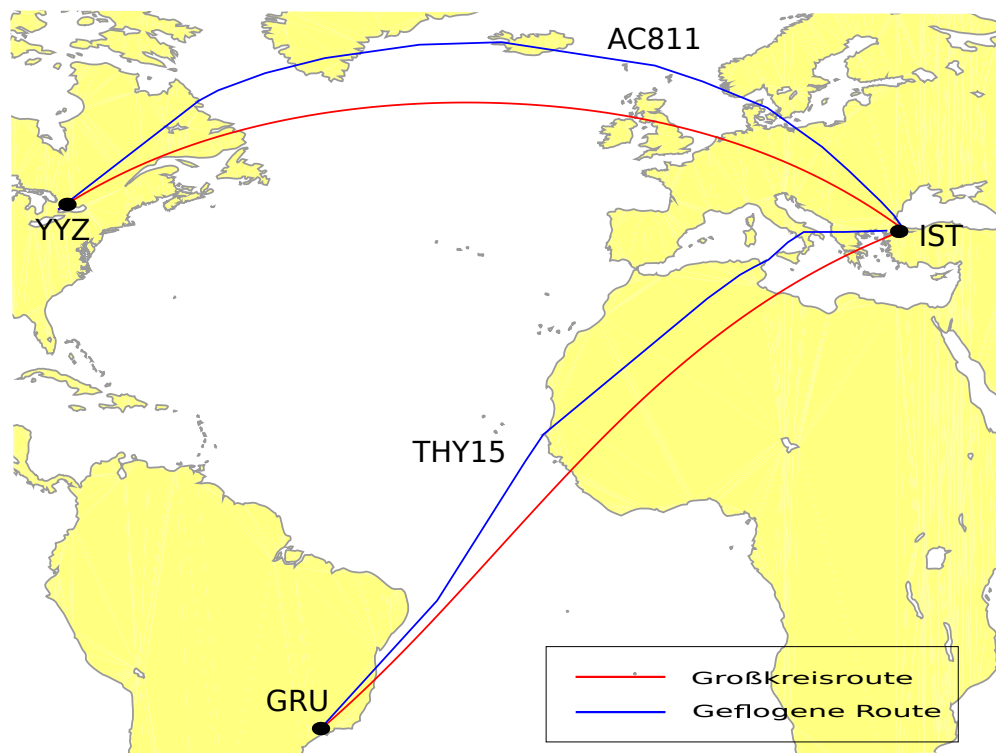


Abbildung 2.4: Tatsächlich geflogene Routen und Großkreisrouten

Die Routenführung von Formationen unterliegt ebenso den erklärten Einschränkungen. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit, werden alle Routen jedoch entlang Großkreisen modelliert und angenommen.

Damit Formationen zustande kommen müssen die Teilnehmer von ihrer optimalen Einzelflugroute abweichen und einen zusätzlichen Umweg fliegen. Die Bestimmung der Länge dieses Umwegs basiert ebenfalls auf Großkreissegmenten. Da Formationen nur im Reiseflug stattfinden sollen, fliegt jeder Teilnehmer zunächst allein auf seine Reiseflughöhe. Von diesem *Top of Climb* (ToC) genannten Punkt ist der Flug bereit, einer Formation beizutreten. In **Abbildung 2.5** sind die ToC gekennzeichnet. Die folgenden Bezeichnungen sind analog zu Marks et al. [32] gewählt, da das darin entwickelte Bewertungsmodell in dieser Arbeit auch Anwendung finden soll. Es ist weiter zu erkennen, dass beide Flüge von ihrer Einzelflugstrecke, die als Referenz dient, abweichen müssen, um den Startpunkt der Formationsphase zu erreichen. Dieser Startpunkt wird als *Rendezvous Start Point* (RSP) bezeichnet. Die Strecken zwischen den Abflughäfen und dem Rendezvous Punkt sind mit  $a$  gekennzeichnet. Ab dem RSP bis zum *Separation End Point* (SEP) fliegen die Teilnehmer in Formation. Danach fliegen beide einzeln zu ihren Zielflughäfen. Diese letzte Phase trägt den Index  $b$ . Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden *Rendezvous Start Point* und *Separation End Point* im Folgenden als *Rendezvous Punkt* und *Break up Punkt* bezeichnet. Der *Break up Punkt* kann mit dem *Top of Descent* (ToD) zusammenfallen, wenn die Formationsphase bis zum Ende des Reiseflugs eines der Teilnehmer reicht. Gleiches gilt analog für den ToC und *Rendezvous Punkt*.

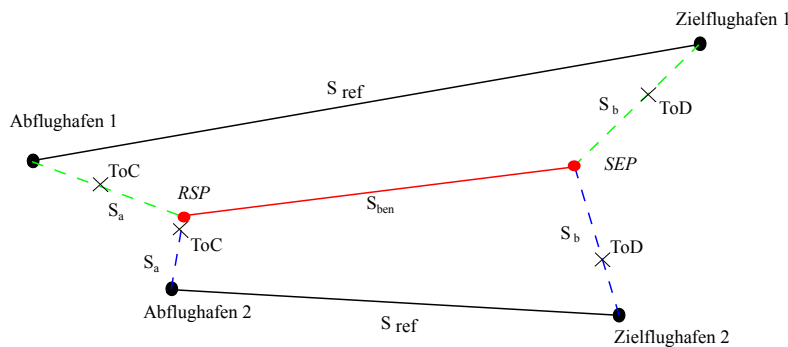


Abbildung 2.5: Formations- und Referenzrouten mit *Rendezvous* und *Break up* Punkten

Parameter	Definition
ref	Referenzroute
ben	Formationsphase mit Widerstandsreduktion
ToC	Top of Climb; Beginn des Reiseflugs
ToD	Top of Descent; Ende des Reiseflugs
RSP	Rendezvous Start Point; Beginn der Formationsphase
SEP	Separation End Point; Ende der Formationsphase
a	Strecke vom Abflughafen zu RSP
b	Strecke vom SEP zum Zielflughafen
route	Formationsroute bestehend aus a, ben, b

Tabelle 2.1: Punkte und Streckenabschnitte von Formationsrouten

Im folgenden Abschnitt werden die bisherigen Ansätze zur Identifikation von Formationspaaren beschrieben. Man ist bestrebt sinnvolle und aussichtsreiche Formationspaare anhand einfacher Parameter zu erkennen, da sich auf diese Weise Datenmengen schnell reduzieren lassen.

Bower et al. haben dafür in [6] Flüge mit verschiedenen Abflughäfen aber gleichem Zielflughafen betrachtet. Ziel der Betrachtung war es, herauszufinden, wie weit die Abflughäfen auseinander liegen dürfen, damit es bei gegebener Reisedistanz noch zu einer Treibstoffeinsparung kommt (vgl. Bower et al. [6]). Dabei wurde die Annahme getroffen, dass sich alle Abflughäfen gleich weit von dem gemeinsamen Zielflughafen befinden. Der *Rendezvous* Punkt soll dabei auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Abflughäfen liegen. Für die Steigflugphase werden pauschal 100 nm angesetzt. Bower et al. definiert in [6] das *Break even city spacing* als Kenngröße für den maximalen Abstand zwischen den Abflughäfen. Für Formationen aus zwei Flugzeugen beträgt dieser maximale Abstand 33 % der Reisedistanz. Demnach ergibt sich für alle Distanzen zwischen den Abflughäfen, die kleiner sind als 33% der Reisedistanz, eine Treibstoffeinsparung [6].

Eine weitere Studie von Xu et al [14]. betrachtet die Umsetzung von Formationsflügen in den Flugbetrieb als Optimierungsproblem. Ausgehend von einem Flugplan mit  $n$  Flügen ergeben sich  $n(n - 1)$  mögliche Formationen aus je zwei Flugzeugen [14]. Die daraus folgende Datenmenge sowie der Rechenaufwand stellen die größte Herausforderung dar. Aus diesem Grund wenden Xu et al. heuristische Filtermethoden an, um ungünstige Formationen früh zu eliminieren und nur die aussichtsreichen Kandidaten weiter zu berücksichtigen. Flugpaare die sich für Formationen eignen, müssen in ähnliche Richtungen fliegen und in nicht allzu großer Distanz zueinander starten. Außerdem müssen die Flüge eine zeitliche Überlappung aufweisen. Dieser heuristische Ansatz reduziert die Menge der Formationen, die an der Optimierung teilnehmen deutlich und hält den Rechenaufwand im hinnehmbaren Bereich. In der anschließenden Optimierung generieren Xu et al. einen neuen Flugplan, der die beste Kombination von Formationen enthält [14]. Dabei werden die Abflugzeiten als variabel angesehen [15].

In einer weiteren Studie von Kent et al. wird näher auf die Routenführung von Formationen eingegangen, indem der optimale *Rendezvous* Punkt bestimmt wird [25]. Dazu wird auf den sogenannten *Fermatpunkt* eingegangen. Das von Kent et al. entwickelte Verfahren wird in dieser Arbeit ergänzt und weiterentwickelt und daher erst in den folgenden Kapiteln eingehend erklärt.

## 2.3 Bewertungsmethoden

Dieses Kapitel beschreibt die Ansätze zur Bewertung von Formationen. Im Falle von mehreren potentiellen Formationspartnern für einen Flug ist zum Vergleich eine einheitliche Meßgröße notwendig. Dabei können Formationen nach zwei verschiedenen Ansätzen bewertet bzw. optimiert werden. Die Zielsetzung der Bewertung kann in minimalem Treibstoffverbrauch oder in minimalen Kosten liegen [14]. Die Komplexität der Betriebskosten übersteigt die des Kraftstoffverbrauchs deutlich. Im Bezug auf Formationsflüge führen die notwendigen Umwege zu zusätzlicher Flugzeit, welche wiederum die Crewkosten erhöhen. Geänderte Flugrouten ziehen ebenfalls mögliche

Änderungen in den Navigationsgebühren nach sich. Die Auswirkungen des Formationsflugs auf Betriebskosten müssen aufgrund ihrer Komplexität separat behandelt werden. Werner hat dazu einen Bewertungsansatz entwickelt, der die Betriebskosten von Formationen analysiert [36]. In dieser Arbeit wird der minimale Treibstoffverbrauch als Ziel gesetzt, so dass die Länge der geflogenen Strecken die Bewertungsgrundlage bildet. Diese Kopplung zwischen Flugstreckelänge und Treibstoffverbrauch wird unter der Annahme getroffen, dass der Wettereinfluss unberücksichtigt bleibt.

Marks et al. haben eine umfangreiche Methode zur Bewertung von Formationen im *Extended Formation Flight* Modus entwickelt. Im Folgenden wird die Methode und die Einflussgrößen näher beschrieben, da diese Bewertungsmethode auch in dieser Arbeit zur Anwendung kommt. Ausgehend von numerischen Simulationen verschiedenster Formationen im DLR Tool *MultiFly* konnten Abbildungsfunktionen zur Bewertung von Formationen generiert werden. Das Tool *MultiFly* nutzt dazu einen Trajektorienrechner, der mit einem Wirbelmodell gekoppelt wurde. Dabei wird angenommen, dass der *Follower* immer optimal im Wirbel positioniert ist. Die so gefundenen Abbildungsfunktionen lassen sich als Polynome zweiten Grades formulieren und erfassen dabei alle Einflüsse auf die Effizienz der Formation mit einem ausreichend hohen Bestimmtheitsmaß. Auf diese Weise sind Ersatzmodelle entstanden, die es erlauben Formationen aus verschiedenen Flugzeugtypen anhand weniger Parameter zu charakterisieren und zu bewerten [31]. Diese frühe Bewertungsmöglichkeit, die keine ausführliche Trajektorienberechnung benötigt, ebnet den Weg für die Optimierung und Identifikation von Formationen in großen Datenmengen.

Marks et al. teilen Formationsflüge in die bereits in **Tabelle 2.1** und **Abbildung 2.5** vorgestellten Phasen auf. Zusätzlich wird der sogenannte *Deviation Start Point* (DSP) definiert. Dieser Punkt bezeichnet den Punkt, ab dem ein Flugzeug von seiner Einzelroute abweicht, um an einer Formation teilzunehmen [31]. Da in der vorliegenden Arbeit die Flugrouten bereits vor dem Start bestimmt werden, fliegen alle Flüge die an Formationen teilnehmen bereits von Beginn an auf einer angepassten Flugroute. Ein zusätzlicher *Deviation Start Point* erübrigt sich somit.

Die benötigten Parameter zur Bewertung von Formationen werden im folgenden Abschnitt in Anlehnung an Marks et al. definiert und beschrieben. Anhand der Parameter lässt sich die treibstoffbasierte Metrik  $\lambda$  abschätzen. Diese ist nach Marks et al. [31] definiert.

$$\lambda = \frac{F_{ref} - F_{form}}{F_{ref}} \quad (2.1)$$

$F_{ref}$  beschreibt den Treibstoffbedarf der Einzelflüge der Formationspartner, während  $F_{form}$  sich auf den Treibstoffbedarf der Formation bezieht. Um  $\lambda$  anhand **Gleichung 2.1** zu berechnen, wäre eine komplette Simulation der Formation nötig. Wie zuvor beschrieben kann  $\lambda$  aber auch mit Hilfe der Ersatzfunktionen abgeschätzt werden.

Dazu muss in einem ersten Schritt der relative Umweg  $\sigma$  aus der Referenzroutendistanz  $S_{ref}$  und der Formationsroutendistanz  $S_{route}$  nach **Gleichung 2.2** errechnet werden.

$$\sigma = \frac{S_{route} - S_{ref}}{S_{ref}} \quad (2.2)$$

Des Weiteren muss der Anteil der Formationsphase  $\xi_{ben}$  an der Formationsroute  $S_{route}$  ermittelt werden. Der zugehörige Zusammenhang für  $\xi_{ben}$  ist in **Gleichung 2.3** gegeben, wobei  $S_{ben}$  die Länge der Formationsphase beschreibt.

$$\xi_{ben} = \frac{S_{ben}}{S_{route}} \quad (2.3)$$

Analog ist der relative Streckenanteil  $\xi_a$  der Strecke  $S_a$  vom Abflughafen zum  *Rendezvous* Punkt in **Gleichung 2.4** definiert.

$$\xi_a = \frac{S_a}{S_{route}} \quad (2.4)$$

Darüber hinaus wird die Gesamtlänge der Formationsroute  $S_{route}$  benötigt. Neben diesen Angaben zu den Flugrouten, müssen die Ladefaktoren  $lf$  bekannt sein. Für jede Kombination aus Flugzeugtypen besteht eine eigenes Ersatzmodell. Die Masse der Flugzeuge wird dann über den Ladefaktor dargestellt. Zuletzt sind noch die Flughöhe der Formation  $FCA$  und die Formationsmachzahl  $FCS$  anzugeben.

Mit Ausnahme der Flughöhe und der Formationsmachzahl werden alle Angaben sowohl für den *Leader*, als auch den *Follower* benötigt. Die folgende **Tabelle 2.2** liefert eine Zusammenfassung der benötigten Parameter, wobei der Index  $ld$  den *Leader* und der Index  $fw$  den *Follower* bezeichnet.

Parameter	Beschreibung
$\sigma_{ld}$	Relativer Umweg des <i>Leaders</i>
$\sigma_{fw}$	Relativer Umweg des <i>Followers</i>
$\xi_{ben,ld}$	Relative Länge der Formationsphase des <i>Leaders</i>
$\xi_{ben,fw}$	Relative Länge der Formationsphase des <i>Followers</i>
$\xi_{a,ld}$	Relative Länge der Prä-Formationsphase des <i>Leaders</i>
$\xi_{a,fw}$	Relative Länge der Prä-Formationsphase des <i>Followers</i>
$S_{route,ld}$	Länge der Formationsroute des <i>Leaders</i>
$S_{route,fw}$	Länge der Formationsroute des <i>Followers</i>
$lf_{ld}$	Ladefaktor <i>Leader</i>
$lf_{fw}$	Ladefaktor <i>Follower</i>
$FCA$	Formationsflughöhe
$FCS$	Formationsmachzahl

Tabelle 2.2: Parameter zur Abschätzung von  $\lambda$  nach [31]

Die treibstoffbasierte Metrik  $\lambda$  kann somit nach **Gleichung 2.1** berechnet werden, oder aber anhand der aufgezählten Parameter nach abgeschlossener Flugplanung abgeschätzt werden. Die Ersatzfunktion für  $\lambda$  kann somit als **Gleichung 2.5** dargestellt werden.

$$\lambda = f(\sigma_{ld}, \sigma_{fw}, \xi_{ben,ld}, \xi_{ben,fw}, \xi_{a,ld}, \xi_{a,fw}, S_{route,ld}, S_{route,fw}, lf_{ld}, lf_{fw}, FCA, FCS) \quad (2.5)$$



Marks et al. haben außerdem noch eine Zeit-basierte Metrik  $\tau$  entwickelt [31]. Zur Ermittlung dieser Metrik müssen die Flugzeit für die Referenzroute  $T_{ref}$  und die Flugzeit der Formationsroute  $T_{form}$  bekannt sein. Die Zeit-basierte Metrik  $\tau$  kann dann anhand **Gleichung 2.6** bestimmt werden.

$$\tau = \frac{T_{ref} - T_{form}}{T_{ref}} \quad (2.6)$$

Die vorgestellte Bewertungsmethode von Marks et al. erlaubt es, anhand von Parametern, die sich in der Flugplanung ergeben, eine Abschätzung der Treibstoffeinsparung und der Flugzeit vorzunehmen. Auf diese Weise wird eine transparente Vergleichbarkeit geschaffen, die für große Datenmengen nötig ist.

## 2.4 Studien

Dieses abschließende Kapitel der Grundlagen soll die bisherigen Studien zur Umsetzung des Formationsflugs kurz erläutern und die Ergebnisse gesammelt darstellen. Alle im Folgenden beschriebenen Studien beziehen sich auf den Formationsmodus *Extended Formation Flight* und auf eine optimale Positionierung des Folgeflugzeugs im Wirbelfeld (vgl. [6] [14] [31]).

Bower et. al. [6] haben für ihre Studie einzelne Flüge aus dem Flugplan der Frachtfluggesellschaft FedEx gewählt. Betrachtet wurden fünf Verbindungen aus dem Nordwesten der USA nach Memphis (*MEM*) in Tennessee. Die Verbindungen wurden ausgesucht, da die Ankunftszeiten in Memphis bereits dicht bei einander liegen und die Länge der Flugrouten vergleichbar sind. Zusätzlich wurden die Abflugzeiten angepasst, so dass alle fünf Flüge zur gleichen Zeit in Memphis ankommen. Zum Einsatz kommen in diesem Szenario drei verschiedene Flugzeugtypen und es werden sowohl Formationen mit zwei, als auch mit drei Flugzeugen geflogen. Den Flügen wird pauschal eine Steigflugphase von 100 *nm* zugeteilt, bevor sie für Formationen zur Verfügung stehen [6].

Das Ziel der folgenden Optimierung des Flugplans ist die Minimierung des Treibstoffverbrauchs. Die zur Optimierung freie Variable ist dabei die geographische Lage des *Rendezvous* Punkts und in einem weiteren Schritt die Flugzeit. Die gesamte Treibstoffeinsparung bei einem lateralen Abstand der Flugzeuge von 90% der Spannweite, beträgt 11,4 % bei unveränderter Flugzeit. Wird eine Verlängerung der Flugzeit bis zu 10 Minuten erlaubt, ist eine Treibstoffeinsparung von 13,5 % möglich. Die verlängerte Flugzeit führt zu längeren Formationsflugphasen, da die *Rendezvous* Punkte sich weiter vom Zielflughafen entfernen (vgl. Bower et al. [6]).

Zur Studie von Bower et. al. ist anzumerken, dass es sich nur um wenige Flüge handelt, die von Beginn an in ihren Abflugzeiten und Routen ähnlich sind. Ferner wurden die Abflugzeiten angepasst und alle Flüge haben den gleichen Zielflughafen. Die so erreichten Ergebnisse sind vielversprechend, aber in der Höhe nicht für größer angelegte Studien zu erwarten.

Umfangreichere Studien wurden von Xu et al. in [14] für das Langstreckennetz von *South African Airways* und einmal für Transatlantikflüge der *Star Alliance* in östlicher Richtung angestellt. In beiden Fällen wurden Formationen von bis zu drei

Flugzeugen gebildet, wobei es jedoch auch zu Einzelflügen kommen kann. Bei Formationsflügen innerhalb einer Fluggesellschaft müssen die Einsparungen nicht auf verschiedene Unternehmen verbucht werden. Es müssen also keine zusätzlichen, unternehmensübergreifende Strukturen geschaffen werden. Xu et al. gehen jedoch davon aus, dass der Formationsflug mit verschiedenen Fluggesellschaften betrieben werden muss, um sein Potential auszuschöpfen. Aus diesem Grund wurde für die zweite Studie ein Flugplan eines Verbundes von Fluggesellschaften, *Star Alliance*, gewählt, da sich dort ein Verbuchungssystem am Ehesten realisieren lässt [14].

Das Langstreckennetz von *South African Airways* umfasste zum Zeitpunkt der Studie 31 Flüge und wurde mit fünf verschiedenen Flugzeugtypen bedient. Die erste heuristische Vorauswahl erlaubte eine Abweichung in der Abflugs- und Ankunftszeit von einer Stunde. Die Azimutwinkel der Formationskandidaten durften bis zu  $120^\circ$  auseinander liegen. Das Streckennetz wurde im Anschluss einmal für minimalen Treibstoffverbrauch und einmal für minimale Betriebskosten im Formationsflug optimiert. Analog wurde für die betrachteten Flüge der *Star Alliance* vorgegangen. Da es sich dabei jedoch um 150 Flüge handelt, wurden die Kriterien der heuristischen Vorauswahl verschärft. Die Flexibilität der Ankunfts- und Abflugzeiten wurde um 90% auf 6 Minuten reduziert und die Differenz der Azimutwinkel auf  $30^\circ$  abgesenkt [14]. Die in den beiden Studien abgeschätzten Einsparungen an Treibstoff und Kosten sind in den nachfolgenden **Tabellen 2.3** und **2.4** zusammengefasst.

Studie	Treibstoffeinsparung	Betriebskosteneinsparung
SAA	5,8%	1,3%
Star Alliance	7,7%	2,2%

Tabelle 2.3: Einsparungen im Formationsflug für minimalen Treibstoffverbrauch nach [14]

Studie	Treibstoffeinsparung	Betriebskosteneinsparung
SAA	4,8%	2,0%
Star Alliance	6,9%	2,6%

Tabelle 2.4: Einsparungen im Formationsflug für minimale direkte Betriebskosten nach [14]

Im Vergleich zu der Studie von Bower et al. fallen die Einsparungen hier geringer aus, da die Studie von Xu et al. durch den Verzicht auf Anpassungen am Flugplan einen größeren Realitätsbezug hat. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen für *South African Airways* und die *Star Alliance* lassen den Schluss zu, dass die erzielbaren Einsparungen mit der Anzahl der Flüge wächst [14]. Ausgehend von den Ergebnissen für *South African Airways* wurde eine weitere Untersuchung zur Vermeidung von Kompressibilitäteeffekten unternommen. So zeigt eine Reduktion der Machzahl um 2,5% keine Auswirkungen auf die Identifikation und die erreichbaren Einsparungen der Formationen. Weiterhin wurde die zuvor von Ning et al. vorgeschlagene Erhöhung des lateralen Abstandes simuliert und mit den Ergebnissen der ersten Optimierung verglichen. Die Erhöhung des lateralen Abstandes um 10% der Spannweite des *Leaders* wirkt sich dabei deutlich auf die Anzahl der identifizierten Formationen aus [14].

Xu et al. merken zu ihrer heuristischen Vorauswahl an, dass möglicherweise aussichtsreiche Formationen zu früh entfernt werden können [14]. Der Grund dafür liegt einerseits in der einzelnen Betrachtung der Parameter Abflugzeit, und Entfernungen und andererseits in der Abschätzung der Kriterien ohne analytische Grundlage. Zudem fällt auf, dass zu der Bestimmung des *Rendezvous* und *Break up* Punktes keine Angaben gemacht werden. Die genaue Route der Formation und die Aufteilung in die einzelnen Flugphasen sind somit nicht klar nachvollziehbar.

Eine weitere Studie von Marks et al. [33] hat sich ebenfalls mit dem hohen Verkehrsaufkommen auf dem Nordatlantik auseinander gesetzt. Marks et al. haben für eine Woche im Januar 2015 den häufigsten Flugzeugtyp ermittelt und dessen 20 meist frequentierten Verbindungen in westlicher Richtung [33]. Dabei wurde angenommen, dass die Formationsphase der Flüge entlang der *North Atlantic Tracks* (NAT) führen und die Flugzeiten flexibel sind [33]. Die bereits genutzte Organisation der NAT bietet sich somit für Formationsflüge an. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus und dem bereits vorgestellten Bewertungsschema von Marks et al. [31] wurde der bestmögliche Formationsflugplan generiert. Dabei kam es zu einer durchschnittlichen, täglichen Treibstoffeinsparung von 3,1%. Des Weiteren ist aufgefallen, dass die Formationen in den meisten Fällen die höchstmögliche Flughöhe wählen [33]. Dabei musste eine Vielzahl der Flüge ihre Flugrouten gar nicht ändern, da die Referenzrouten beider Flüge ohnehin schon den gleichen NAT wählten [33].

Die Studie von Marks et al. zeigt, dass sich Formationsflug bereits innerhalb bestehender operationeller Strukturen lohnen kann. Dennoch sind weitere Studien mit verschiedenen Flugzeugtypen nötig [33].

## 3. Methodik

In diesem Kapitel wird das Modell zur Identifikation und Modellierung der Formationsrouten entwickelt und vorgestellt. Im Anschluss daran werden die generierten Formationsrouten bewertet um daraus einen validen Formationsflugplan zu erstellen.

### 3.1 Definition der Rahmenbedingungen

In der Motivation zu dieser Arbeit wurde dargelegt, wie diese Studie näher an die Realität rücken soll. Insbesondere vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.4 vorgestellten Studien. Dennoch müssen einige Einschränkungen gemacht werden, um eine fundierte Umsetzung möglich zu machen. Der sich daraus ergebende Rahmen setzt sich wie folgt zusammen.

#### **Formationsgröße**

Die Formationsgröße wird auf zwei Flugzeuge begrenzt, da Formationen aus mehreren Flugzeugen die Komplexität der Flugplanung erhöhen. Des Weiteren scheint es sinnvoll ein neues operatives Verfahren, wie den Formationsflug, zunächst in seiner einfachsten Form zu beschreiben und anzuwenden. Ferner nimmt die Komplexität größerer Formationen stärker zu, als die erzielbare Ersparnis [21]. Ebenfalls muss der betrachtete Zeitraum eingegrenzt werden. Die Wahl einer Woche ist hier sinnvoll, da die Frequenzen der Flugpläne auch in diesem Intervall verfasst sind.

#### **Flugzeuggröße und Flugdistanz**

Eine weitere Randbedingung betrifft die Größe der Flugzeuge, die bei dieser Betrachtung berücksichtigt werden sollen. Da die Wirbelintensität von dem erzeugten Auftrieb eines Flugzeuges abhängt, eignen sich schwere Flugzeuge besser für den Formationsflug. Demnach sollte die Wahl auf möglichst schwere Flugzeuge fallen. Zusätzlich sollte die Flugstrecke von ausreichender Länge sein, damit der Aufwand in Form der Umwege in günstiger Relation zur Ersparnis der Formationsflugphase steht. Aus diesem Grund werden nur Flüge berücksichtigt, deren Flugstrecke länger ist als 1000 nautische Meilen.

#### **Routenführung**

Die Grundlage der Routenführung der Einzel- und Formationsrouten sind Großkreis-segmente, da diese die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche darstellen. Obwohl diese Randbedingung im Widerspruch zum realen Flugbetrieb steht, ist sie nötig um die Realisierbarkeit in Bezug auf Komplexität und

Rechenzeit zu gewährleisten. Aus selbigem Grund werden Wettereinflüsse auf den Luftverkehr vernachlässigt.

### Formationsbildung

Die Bildung der Formation soll außerdem nur im Reiseflug stattfinden, da alle anderen Flugphasen im Vergleich dazu als kurz angesehen werden können. Hinzu kommt, dass das *Rendezvous* Manöver eine zusätzliche Arbeitsbelastung für den Piloten darstellt und daher nicht mit anderen, ohnehin arbeitsreichen Flugphasen, kollidieren soll.

### Anpassungen am Flugplan

In dieser Studie bleiben die vorgegebenen Abflugzeiten der Flüge unverändert. Damit zwei Flugzeuge in Formation fliegen können, müssen jedoch Anpassungen am Referenzflug vorgenommen werden. Der dazu verwendete Parameter ist die geographische Lage des *Rendezvous* Punktes. Auf diese Weise ändert sich primär nur die Flugroute, und die Abflugzeit bleibt unverändert. Eine Anpassung der Flugroute zieht jedoch eine Veränderung der Flugzeit nach sich, wodurch die Ankunftszeiten des Flugplans möglicherweise nicht eingehalten werden können.

## 3.2 Grundidee und Aufbau der Methodik

Nachdem die Randbedingungen definiert sind, soll in diesem Abschnitt die Vorgehensweise vorgestellt werden. Ausgehend von einem Datensatz mit Flugplandaten soll eine Liste mit Formationen generiert werden. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in **Abbildung 3.1** dargestellt.

Die nachfolgenden Kapitel orientieren sich an dem hier vorgestellten Aufbau. Zunächst werden die Rohdaten eingelesen und für die weitere Verwendung aufbereitet. Danach lassen sich bereits erste statistische Auswertungen erstellen. Diese beschreiben den Flugverkehr von Langstreckenflügen im betrachteten Zeitraum und geben Aufschluss über den Zustand auf dem der Formationsflug basiert.

Im Anschluss wird aus den aufbereiteten Daten mit Hilfe eines Systems aus Vorfiltern eine Vorauswahl an aussichtsreichen Formationen identifiziert. Die Vorfilter sollen anhand simpler, im Flugplan verfügbarer Daten, erkennen, ob eine Formation sinnvoll erscheint. Auf diese Weise sollen rechenintensive Modellierungen für eindeutig abwegige Formationen früh vermieden werden. Für jeden Flug soll so eine Liste mit möglichen Formationspartnern erstellt werden, die in den weiteren Schritten eingehender modelliert werden.

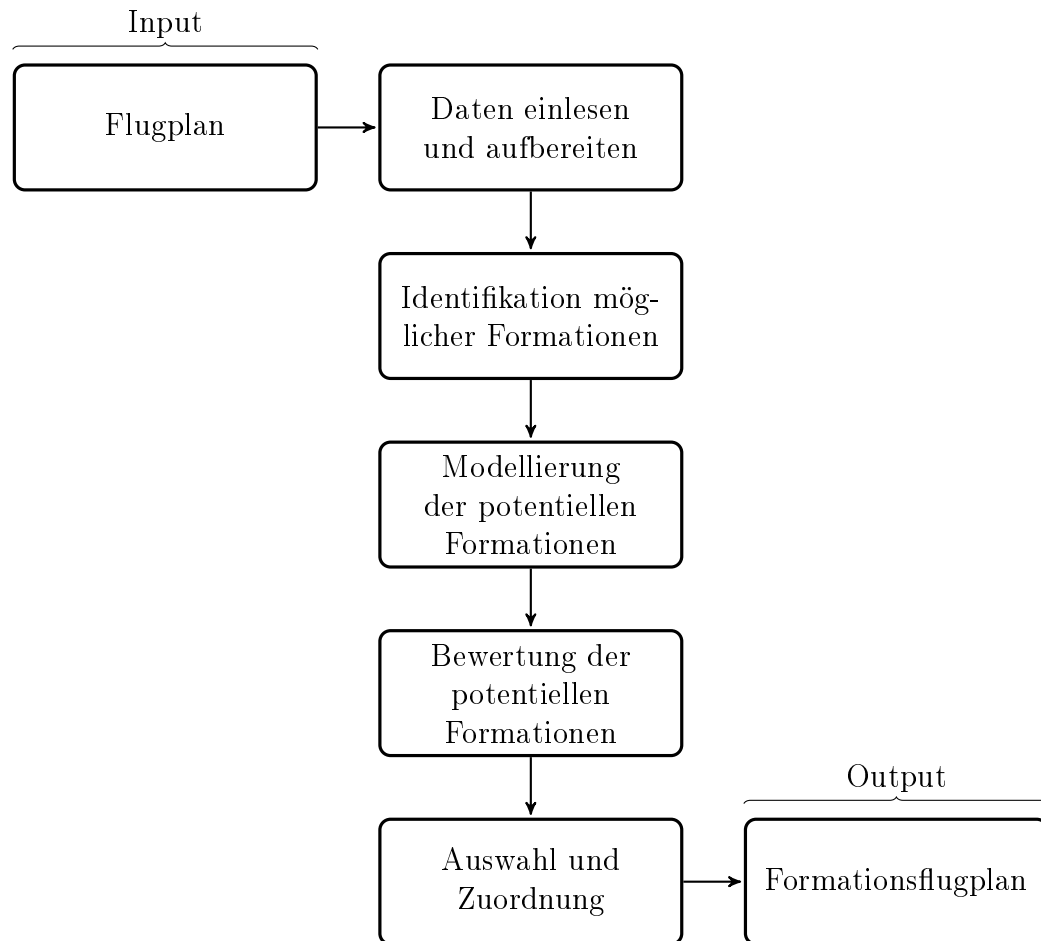


Abbildung 3.1: Vorgehensweise zur Generierung eines Formationsflugplans

Im dritten Schritt werden die Flugrouten der potentiellen Formationen modelliert. In zwei Schritten wird dazu zunächst die geometrisch optimale Flugroute ermittelt. Danach wird eine tatsächlich fliegbare Route anhand der optimalen Route generiert.

Alle so modellierten Formationen werden im Hinblick auf ihre Treibstoffeinsparung nach der Methode von Marks et al. [31] bewertet.

In einem abschließenden Schritt wird aus der Vielzahl an potentiellen Formationen eine valide Liste an Formationen generiert. Auf diese Weise wird aus einem Datensatz mit Flügen, ein Formationsflugplan abgeleitet. Dieser steht dann zur Auswertung zur Verfügung.

### 3.3 Datenauswahl und -aufbereitung

Die Datengrundlage dieser Studie ist ein Flugplan für den Monat Oktober aus dem Jahr 2014. Der Flugplan umfasst über 396000 Datensätze im .csv Format und stammt aus der ADI-Datenbank (Airport Data Intelligence) [28]. In **Abbildung 3.2** sind exemplarisch einige Flüge aus den Rohdaten dargestellt. Die fett dargestellten Kategorien sind von Bedeutung und werden im weiteren Verlauf berücksichtigt.

Orgn	Dest	Operating Airline	FliNum	Fleet	FleetName	ScheduleType	DepTime	ArrTime	DepTerminal	ArrTerminal	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	EffDate	DiscDate	Distance(kms)	Depcount	EquipmentCapacity	FlightDuration
BRU	NSI	SN	373	332	Airbus A330-200	AIR	1450	2145	-	-	M	-	-	-	S	-	-	20141027	20141031	5289	1	283	415
DYR	DME	UN	112	777	BOEING 777	AIR	1525	1450	-	-	M	-	-	-	F	-	-	20141027	20141031	6228	2	335	445
EZE	SCL	LA	532	787	BOEING 787-800	AIR	1820	2030	A	-	M	T	W	T	-	S	S	20141001	20141007	1179	6	247	130
MSP	LAS	DL	1811	320	Airbus A320	AIR	2135	2256	1	1	-	-	-	-	F	-	-	20141003	20141024	2090	4	150	201

Abbildung 3.2: Beispielhafte Rohdaten

Die Detailtiefe der Flugzeugtypen ist nicht gleichbleibend, wie in der ersten und zweiten Zeile zu sehen ist. Zum Teil ist nur der Flugzeugtyp, nicht aber die Version angegeben.

Die Frequenz gibt Aufschluss über die Wochentage an denen ein Flug stattfindet, während der Betriebszeitraum Start- und Endzeitpunkt der Bedienung einer Strecke angibt.

### Auswahl der Flugzeugtypen

Im Zuge der Datenaufbereitung, werden die Datensätze in einem ersten Schritt nach Flugzeugtypen und Flugdistanzen gefiltert. Es sollen nur Flugzeuge der Wirbelschleppenkategorie *HEAVY* und *SUPERHEAVY* nach der ICAO-Klassifizierung [13] berücksichtigt werden. Eine Übersicht der verwendeten Flugzeugtypen ergibt sich aus **Tabelle 3.1**.

Der Flugzeugtyp Airbus A350 kann nicht berücksichtigt werden, da der Betrachtungszeitraum (Oktober 2014) vor der Indienststellung dieses Typs liegt.

Des Weiteren finden sich Flugzeugtypen vergleichbarer Größe in den Rohdaten, die hier ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich um 6 Einträge des Typs McDonnell Douglas MD-11, 21 Einträge des Typs Iljuschin IL-96, sowie 88 Einträge des Typs Airbus A300. Zum Einen ist die Anzahl dieser Flugzeugtypen gering im Vergleich zu den berücksichtigten Flugzeugtypen, zum Anderen sind diese Typen in den gängigen Flugleistungsmodellen und nicht implementiert. Gleiches gilt für die Ersatzmodelle zur Bewertung von Formationen.

### Flughafeninformationen und Harmonisieren der Zeitangaben

Für spätere Berechnungen werden die Ortskoordinaten und Angaben zur Zeitzone der Flughäfen benötigt. Das open-source Projekt *OpenFlights.org* stellt eine Datenbank mit Informationen zu über 6900 Flughäfen weltweit im Internet bereit [22]. Diese wurde genutzt um eine Datenbank für die in dieser Studie berücksichtigten Flughäfen zu erstellen. Die Informationen über die Zeitzone, in der ein Flughafen liegt, wird benötigt, da alle Zeitangaben der Rohdaten Ortszeiten sind. Da zur Ermittlung geeigneter Flüge als Teilnehmer einer Formation die Abflugzeiten verglichen werden müssen, ist es notwendig alle Zeitangaben auf eine Zeitzone zu beziehen. In dieser Studie sind alle Zeitangaben auf die koordinierte Weltzeitzone UTC 0 bezogen. Infolgedessen müssen in den Rohdaten auch die Angaben zur Frequenz der Flüge angepasst werden, weil die Abflugzeiten durch die Zeitverschiebung in den vorangehenden oder nachfolgenden Tag verschoben werden können.

Im Folgenden soll der zu betrachtende Zeitraum genauer eingegrenzt werden. Die Rohdaten beziehen sich auf einen gesamten Monat, während der zu betrachtende Zeitraum eine Woche betragen soll. Zu diesem Zweck muss die Woche mit den meisten Flügen gefunden werden. **Abbildung 3.3** zeigt die Verteilung der Fluganzahlen im Oktober 2014. Auf der X-Achse ist jeweils das Startdatum einer Woche eingetragen. Ein Eintrag über einem Datum beschreibt die Anzahl der Flüge in der Woche, die an dem angegebenen Datum beginnt.

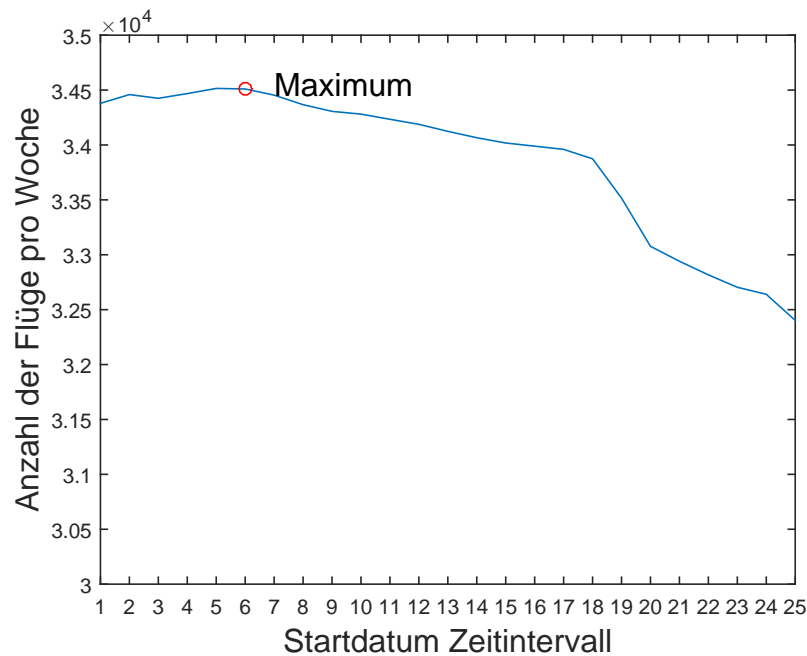


Abbildung 3.3: Verteilung der Fluganzahl pro Woche im Oktober 2014

Der Zeitraum mit den meisten Flügen beginnt am Montag, den 06. Oktober 2014, und dauert 7 Tage bis Sonntag, den 12. Oktober 2014. In diesem Zeitraum finden sich 34510 Flüge. Für alle folgenden Arbeitsschritte wird der Flugplan dieses Zeitraumes zugrunde gelegt.

### Zeitformat

Ein Flugeintrag beschreibt mittels der Frequenzangabe bis zu sieben Flüge. Da jedoch jeder Flug einzeln gelistet sein muss, um eine eindeutige Zuordnung vornehmen zu können, müssen die Frequenzangaben zu einzelnen zusätzlichen Einträgen expandiert werden. Ein dazu notwendiger Schritt bezieht sich auf die Zeitangaben. Die Uhrzeiten werden im 24 Stunden Zeitformat angegeben, sodass zur eindeutigen Identifikation eines Fluges sowohl eine Zeitangabe, als auch ein Flugtag nötig sind. Um die Komplexität des Programms zu verringern, soll der Zeitpunkt eines Fluges nur über eine Variable zu identifizieren sein. Zu diesem Zweck wird eine durchgängige Zeitkoordinate für den Zeitraum einer Woche eingeführt. Die 24 Stunden eines Tages werden auf 1 normiert, so dass anstatt mit Stunden, Minuten und Tagen nur mit Dezimalzahlen gerechnet werden kann. Wenn 24 Stunden mit dem Intervall 0 bis 1 abgebildet werden können, lässt sich das Prinzip genauso auf eine Woche erweitern. Das Intervall 0 bis 7 stellt somit in diesem Fall den Zeitraum von Montag 00:00



Uhr bis Sonntag 24:00 Uhr dar. Das unten stehende Beispiel erklärt das dezimale Zeitformat.

Dienstag 12:00 Uhr wird zu 1.5

Donnerstag 15:45 Uhr wird zu 3.65625

Die Zeitangabe in Dezimalform bietet noch einen weiteren Vorteil. Bei Flügen in den Tagesrandzeiten, kurz vor oder nach Mitternacht, soll bei der Suche nach geeigneten Formationspartnern auch der nachfolgende oder vorausgegangene Tag berücksichtigt werden. Eine Zeitspanne, die sich über zwei Tage erstreckt lässt sich im beschriebenen, dezimalen Zeitformat besser umsetzen, als im 24 Stunden Format mit zusätzlicher Tagesangabe.

Im letzten Schritt der Datenaufbereitung wird für alle Flüge der Azimutwinkel zu Beginn des Fluges am Abflughafen berechnet.

Nach der Datenaufbereitung lassen sich einige statistische Auswertungen der Daten anstellen. **Tabelle 3.1** zeigt die Verteilung aller Flüge auf die einzelnen Flugzeugtypen sowie deren mittlere Flugdistanz und Dauer. Im Bezug auf alle Flüge ist die Anzahl der vergleichsweise kurzen Flugdistanzen größer, wie **Abbildung ??** zeigt. Die durchschnittliche Dauer aller Flüge beträgt knapp acht Stunden. Sollte eine Reduktion der Datenmenge nötig werden um den Rechenaufwand zu verringern, kann in Erwägung gezogen werden, Flüge mit kurzer Distanz zu ignorieren. Für alle Flüge beträgt die mittlere Flugdistanz 3320,7 nm bzw. 6149,9 km .

Die nachfolgende **Abbildung 3.5** visualisiert die Verteilung der Flugzeugtypen und dient gleichzeitig als Legende für **Abbildung 3.6**.

Flugzeugtyp	Fluganzahl	Flugdistanz [nm] ([km])	Flugdauer [HH:MM]
A 310	360	2187,8 (4051,8)	05:36
A 330	10867	2770,9 (5131,7)	06:55
A 340	2391	3835,7 (7103,7)	09:10
A 380	1414	3981,3 (7373,4)	09:18
B 747	2264	3829,1 (7091,5)	08:55
B 767	4713	2857,7 (5292,5)	07:11
B 777	10733	3694,1 (6841,5)	08:43
B 787	1768	3409,0 (6313,6)	08:07

Tabelle 3.1: Verteilung der Flugzeugtypen und Missionsdaten

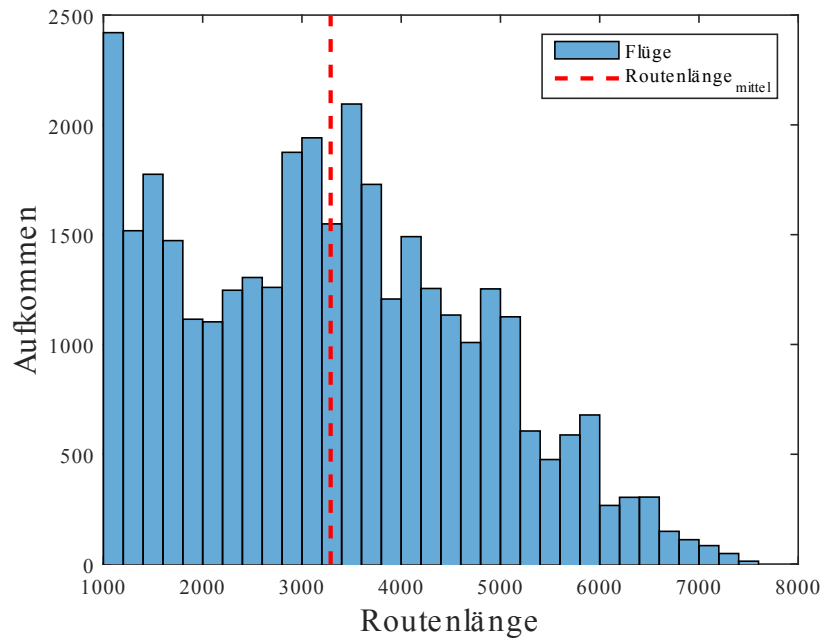


Abbildung 3.4: Verteilung der Flugdistanzen

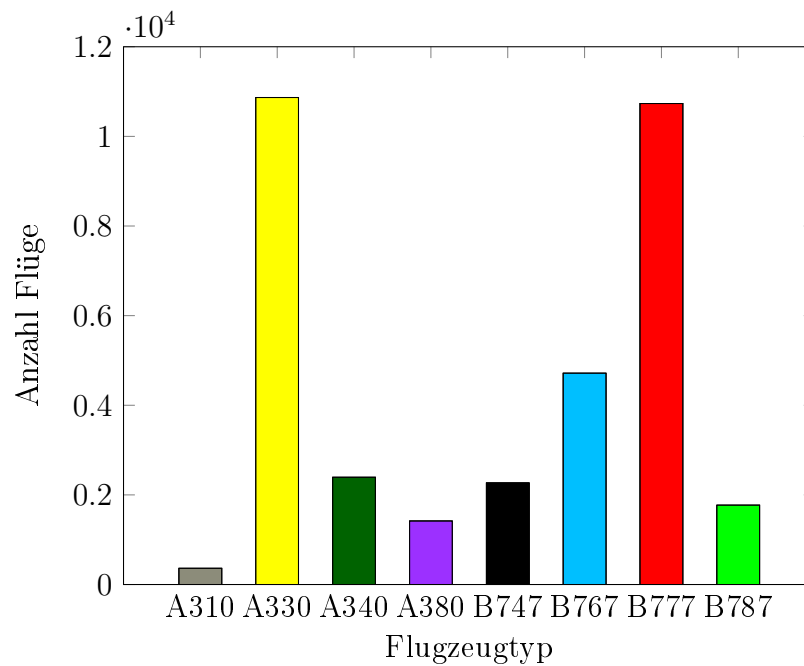


Abbildung 3.5: Anteilige Verteilung der Flugzeugtypen

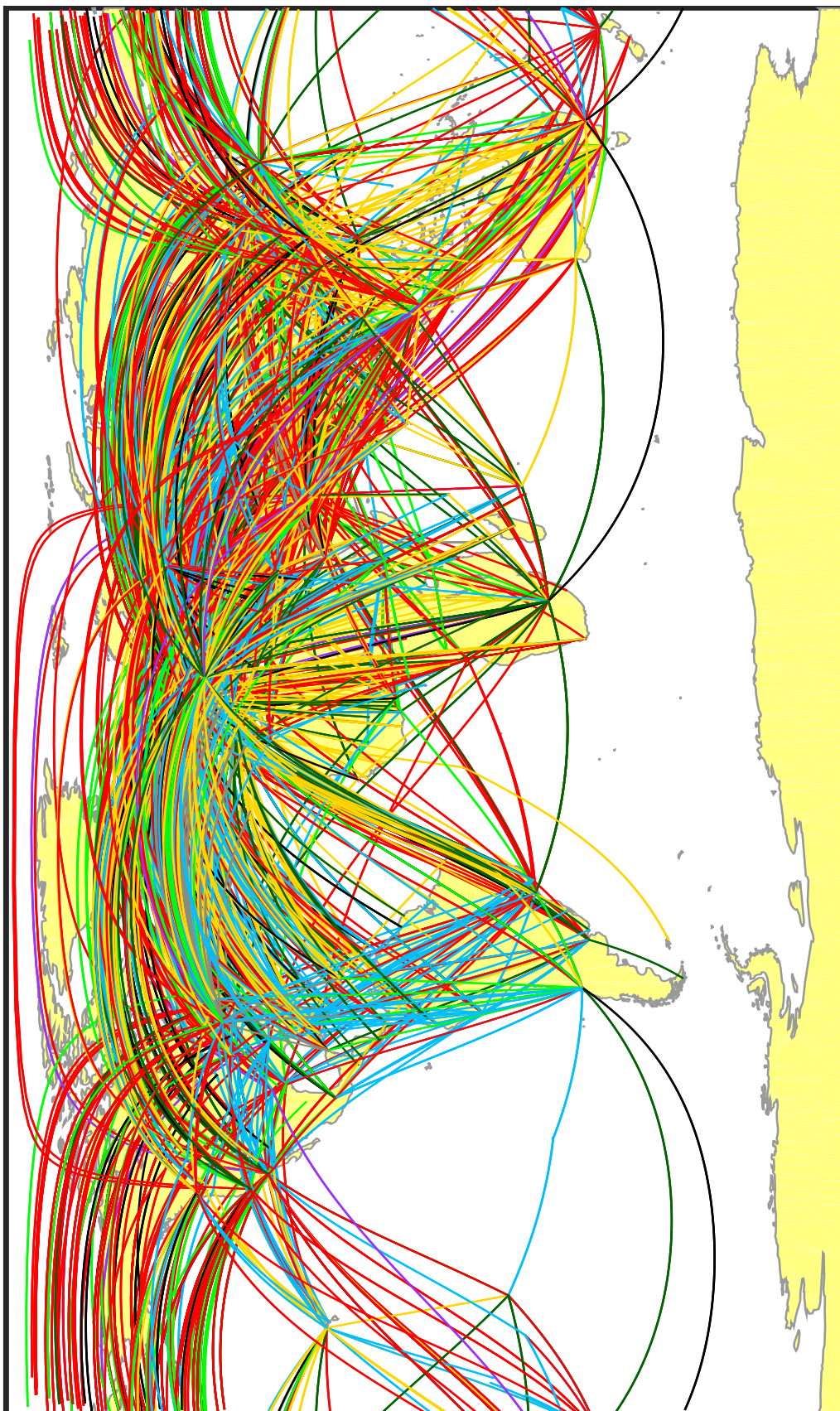


Abbildung 3.6: Flugverbindungen nach Flugzeugtypen im Zeitraum vom 06. Oktober bis zum 12. Oktober 2014

## 3.4 Vorauswahl

Dieses Kapitel beschreibt wie mittels einer Vorfilterung die potentiellen Formationen aus den über 34000 Flügen in der Datenbank identifiziert werden.

### 3.4.1 Filterarchitektur

Die Vorfilterung besteht dabei aus mehreren, zum Teil heuristischen, Filtern. Bevor auf die einzelnen Filter eingegangen wird, soll zunächst das dahinter stehende Konzept und das Zusammenwirken der Filter erläutert werden.

Primär wird davon ausgegangen, dass jeder Flug mit allen anderen Flügen in der Datenbank eine Formation bilden kann. Bei 34510 Flügen im betrachteten Zeitraum beträgt die Anzahl der theoretisch möglichen Formationen über 1,19 Milliarden. Diese große Anzahl kann man sich als Matrix mit je 34510 Spalten und Zeilen vorstellen. Jedes Element der Matrix repräsentiert eine Formation. Die sich so ergebende Filtermatrix ist eine Dreiecksmatrix in der jede Formation zweimal vorkommt. Es ist demnach ausreichend, nur eine Seite der Diagonalen zu betrachten. Eine solche Matrix ist exemplarisch in **Abbildung 3.7** abgebildet. Die dort eingetragenen Nullen sind die Diagonale der Matrix, jede Null stellt dabei eine Formation aus ein und demselben Flugzeug dar. Daher werden nur die Elemente unterhalb der Diagonalen betrachtet und das Element auf der Diagonalen als Einzelflug bezeichnet.

Flug	1	2	3	.	.	.	34510
1	E						
2	1	E					
3	1	1	E				
.	1	1	1	E			
.	1	1	1	1	E		
.	1	1	1	1	1	E	
34510	1	1	1	1	1	1	E

E	Einzelflug
0	Abwegige Formation
1	Potentielle Formation

Abbildung 3.7: Initiale Filtermatrix mit allen theoretisch möglichen Formationen

Das erste Element einer Spalte ist der Einzelflug und alle Elemente darunter sind mögliche Formationspartner für diesen Einzelflug.

Die Matrix kann systematisch abgearbeitet werden, indem ausgehend von dem Element in der ersten Spalte und ersten Zeile (Einzelflug) alle darunterliegenden Elemente dieser Spalte als potentielle Formationskandidaten der Filterung unterzogen werden. Im darauf folgenden Schritt kann das Element der zweiten Zeile und zweiten Spalte derselben Prozedur unterzogen werden.

Alle Formationskandidaten für alle Einzelflüge werden der Filterung unterzogen. Passiert eine Formation, also ein Element der Filtermatrix, den Filter, bleibt die 1 als Eintrag bestehen. Wird der Filter nicht passiert, wird der Eintrag zu 0 geändert. Aufgrund der Datenmenge werden die Filter hintereinander geschaltet, so dass ab der zweiten Filterebene nur Formationen betrachtet werden, die die vorherigen Filter passiert haben. Auf diese Weise wird die Anzahl an potentiellen Formationen mit jedem Filterschritt geringer.

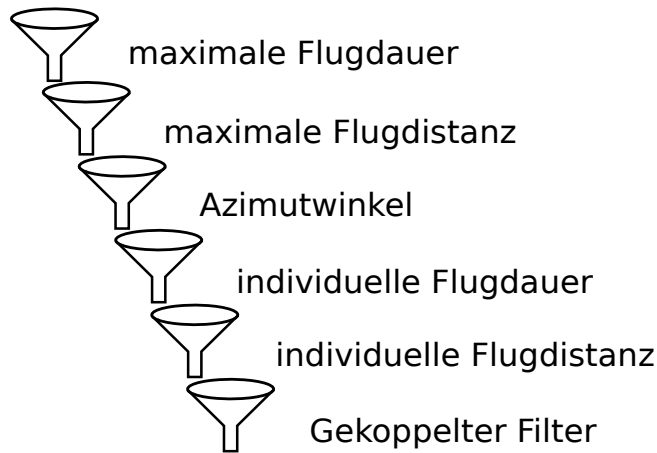


Abbildung 3.8: Filterarchitektur

Der gesamte Filterprozess besteht aus den sechs in **Abbildung 3.8** dargestellten Filtern, die im nächsten Kapitel eingehend erklärt werden. Die Anordnung der Filter ist dabei so gewählt, dass Filter mit simplen Kriterien als erstes durchlaufen werden. So reduziert sich die Datenmenge für die komplexeren Filter und der Rechenaufwand kann reduziert werden.

Flug	1	2	3	.	.	.	34510
1	E						
2	0	E					
3	0	1	E				
.	0	0	0	E			
.	0	0	1	0	E		
.	1	0	0	0	1	E	
34510	0	1	0	0	0	1	E

E Einzelflug  
 0 Abwegige Formation  
 1 Potentielle Formation

Abbildung 3.9: Filtermatrix nach Durchlaufen der Filter

Nach dem Durchlaufen der Filter besteht die Filtermatrix nur noch aus den identifizierten, potentiellen Formationen, wie **Abbildung 3.9** zeigt. Jede potentielle Formation wird dabei durch den Eintrag 1 in der entsprechenden Zelle vermerkt, wobei die Indizes die beteiligten Flüge angeben.

### 3.4.2 Heuristische Filter

An dieser Stelle soll der Ansatz zur Vorauswahl näher beschrieben werden. Die Vorauswahl ist nötig, um den Rechenaufwand in einem beherrschbaren Rahmen zu halten. Möglich wird die Vorauswahl dadurch, dass sich viele Formationen bereits durch einfachste logische Beziehungen ausschließen lassen. Solche heuristischen Ansätze wurden bereits von Xu et al. in [14] und Kent et al. in [25] angewandt.

#### Filter 1 : maximale Flugdauer

Das Kriterium für die erste Filterebene ist die Abflugzeit, die bereits alle auf die Zeitzone UTC 0 bezogen wurden. Prinzipiell kann ein Flug zu jeder Zeit des Reisefluges eine Formation mit einem anderen Flug bilden. Da es sich bei den zugrunde liegenden Daten jedoch um eine ganze Woche handelt, sind zu einem beliebigen Abflugzeitpunkt eines Fluges die Mehrzahl der anderen Flüge bereits gelandet oder nicht gestartet. Für die Abflugzeit eines einzelnen Fluges kann also ein Zeitintervall definiert werden, in dem sich die Abflugzeiten der potentiellen Formationskandidaten befinden müssen. Für die Größe des Intervalls wird die längste in der Datenbank vorkommende Flugdauer herangezogen. Diese beträgt 17 Stunden und 55 Minuten. Für einen einzelnen betrachteten Flug muss bei diesem Filter die Abflugszeit eines potentiellen Formationskandidaten entweder 17:55 Stunden vor oder nach dem Abflug des betrachteten Fluges liegen. Da das Intervall zeitlich sowohl voran als auch zurück definiert wurde, kann ein einzelner Flug zum Einen als erster Formationspartner starten, oder zum Anderen zu einem früher startenden Flug als Partner hinzustoßen. Die Wahl des Filterkriteriums führt dazu, dass alle Flüge die sich zeitgleich in der Luft befinden als potentielle Formationspaare erkannt werden.

In der Modellvorstellung der zuvor erläuterten Filtermatrix werden nur diejenigen Elemente mit einem Eintrag 1 versehen, deren Abflugzeit im Intervall des Elementes der ersten Zeile der betreffenden Spalte steht. Die darauf folgenden Filter betrachten im Anschluss nur noch die Elemente, die einen Eintrag aufweisen. Auf diese Weise wird die Anzahl der möglichen Formationen kontinuierlich verringert.

#### Filter 2 : maximale Flugdistanz

Die zweite Filterebene ist ähnlich dem ersten Filter in ihrem Aufbau und Prinzip. Das Kriterium ist dabei die längste in der Datenbank vorkommende Flugdistanz, welche 7240 nautische Meilen beträgt. Auf diese Weise werden nur Flugpaare in Betracht gezogen, deren Abflughäfen in Flugreichweite der Flugzeuge liegen.

#### Filter 3 : Azimutwinkel

In der dritten Filterebene wird der Azimutwinkel der Flüge als Kriterium angesetzt. Analog zum Vorgehen in der ersten Filterebene werden hier die Intervallgrenzen in beide Richtungen definiert. Es sollen alle Flüge als geeignete Formationsteilnehmer identifiziert werden, deren Azimutwinkel um weniger als  $20^\circ$  vom Azimutwinkel des Fluges abweicht. Dieser Filter soll sicherstellen, dass nur Flugpaare ausgewählt werden, deren Zielflughäfen sich in ähnlicher Richtung befinden. Die Wahl des Grenzwertes des Kriteriums kann, im Gegensatz zum vorherigen Filter, an keiner Datengrundlage festgemacht werden. Xu et al. [15] verwenden in ihrer Studie zum Routennetz der Star Alliance über dem Nordatlantik einen Grenzwert von  $30^\circ$  [14]. Da es sich im Fall dieser aktuellen Studie um eine globale Betrachtung mit einer

größeren Datenmenge handelt, wird der Grenzwert kleiner und somit auch restriktiver gesetzt. An späterer Stelle dieser Arbeit lässt sich die hier notwendige Annahme kritisch überprüfen. Da in einem späteren Schritt alle gefundenen Formationspaare bewertet werden sollen, kann die Abweichung im Azimutwinkel zweier Flüge dann in Beziehung zu der Bewertung der Formation gesetzt werden.

#### **Filter 4 und 5 : individuelle Flugdauer und Flugdistanz**

Im Hinblick auf regional beschränkte Studien, können die bereits vorgestellten Filter bereits ausreichen. Dies trifft im Besonderen auf Nordatlantikstudien zu, da es sich bei Flügen aus Nordamerika zumeist um Flüge in östlicher Richtung handelt, während Flüge mit westlicher Flugrichtung zumeist in Europa starten. Die Flugrichtung gibt in diesem Fall also bereits Aufschluss über das Ursprungsgebiet des Fluges. Auf globaler Ebene ist dieser Zusammenhang jedoch nicht gültig. Nach den beschriebenen Filtern haben zwei als geeignet identifizierte Flüge lediglich eine ähnliche Flugrichtung und Abflugszeit. Trotzdem können diese Flüge von weit entfernten Flughäfen starten, sodass deren Flugbahn zwar in ähnlicher Richtung verlaufen, aber gegeneinander verschoben sind. Die bisherigen Filter ziehen somit alle Flüge heran, die sich zur selben Zeit in der Luft befinden, deren Entfernung zueinander technisch erfliegbar ist und deren Flugrouten in ähnliche Richtung verlaufen.

Es sind demzufolge weitere Filter nötig, um einem Flug nur weitere Flüge aus einem bestimmten geographischen und zeitlichen Umkreis zuzuordnen. Die folgenden beiden Filter nutzen nochmals die Abflugszeit und Distanz der Abflughäfen als Kriterien; jedoch nicht pauschal die Maximalwerte, sondern die tatsächliche Abflugszeit und Flugdistanz der einzelnen Flüge. Bei der Suche nach Formationspartnern für einen Einzelflug wird demnach dessen Flugdistanz und -dauer als Intervallgröße festgelegt. Das Filterkriterium ist somit dynamisch und passt sich jedem Flug an.

### **3.4.3 Gekoppelter Filter**

Die Kriterien der vorgestellten Filter basieren jeweils auf einem Parameter und erfordern wenig Rechenaufwand im Vergleich zu dem folgenden Filter. Aus diesem Grund sind auch nur diese Filter als heuristisch zu bezeichnen, zumal der folgende Filter eine Kopplung mehrerer Parameter darstellt. Dabei ist die Grundannahme, dass die Entfernung der Abflughäfen gekoppelt mit der Abflugszeit betrachtet werden muss, um eine fundierte Aussage über die Formationsfähigkeit zweier Flüge treffen zu können. Der Flug mit der längeren Flugstrecke kann umso weiter entfernt vom Flughafen des Fluges mit der kürzeren Flugstrecke starten, je früher er im Bezug auf den kürzeren Flug startet. Dem Flug mit der längeren Strecke wird dementsprechend Zeit gegeben, die größere Distanz zu überwinden. Die Parameter Abflugszeit und Entfernung der Abflughäfen treten somit nochmals in gekoppelter Form in Erscheinung.

Des Weiteren prüft dieser Filter, ob zwei Flüge überhaupt zu einer Formation fähig sind. Erreicht ein Flug seinen Reiseflugzustand, kann der potentielle Formationspartner bereits nicht mehr einzuholen sein. Das bedeutet, unter Voraussetzung einer vorgegebenen Reisefluggeschwindigkeit, dass sich die beiden Flugzeuge zu keinem Zeitpunkt an einem Ort befinden können. Es kann demzufolge nicht zu einer Formation kommen, da dafür eine Anpassung der Fluggeschwindigkeiten nötig wäre, die außerhalb des Rahmens dieser Arbeit liegt.

Das Prinzip dieses Filters zur Formationsfähigkeit zweier Flüge soll nun anhand eines Beispiels erklärt werden.

Dazu wird ein Flug von Amsterdam (*AMS*) nach Atlanta (*ATL*) als Ausgangsflug herangezogen, für den sich potentielle Formationspartner finden sollen. Zur Auswahl steht ein Flug von Barcelona (*BCN*) nach Miami (*MIA*) sowie ein weiterer Flug von Paris (*CDG*) nach New York (*EWR*). Die Flüge haben folgende Abflugzeiten:

Einzelflug	<i>AMS - ATL : 08:15 Uhr</i>
Pot. Formationspartner	<i>BCN - MIA : 07:45 Uhr</i>
Pot. Formationspartner	<i>CDG - EWR : 09:00 Uhr</i>

Da die Formationen erst im Reiseflug gebildet werden sollen, wird zunächst ermittelt zu welcher Uhrzeit der später startende Flug seine Reiseflughöhe erreicht. Neben der Uhrzeit, wird auch die im Steigflug zurückgelegte Distanz bestimmt. Zur Berechnung dieser Parameter, wird die Flugleistungsdatenbank *BADA 4* benutzt. Diese wurde von der Europäischen Organisation zur Sicherung der Luftfahrt, *EUROCONTROL*, erstellt und betrieben [2]. Für den Zeitpunkt, ab dem beide Flugzeuge im Reiseflugzustand sind, lassen sich für beide Flüge die geflogene Distanz berechnen. Die möglichen Positionen der Flugzeuge können im Anschluss als Kreise um deren Abflughafen dargestellt werden. Der Radius des Kreises ist dann die Flugdistanz. **Abbildungen 3.10** und **3.11** zeigen die Reichweitenkreise für beide Formationspaare.

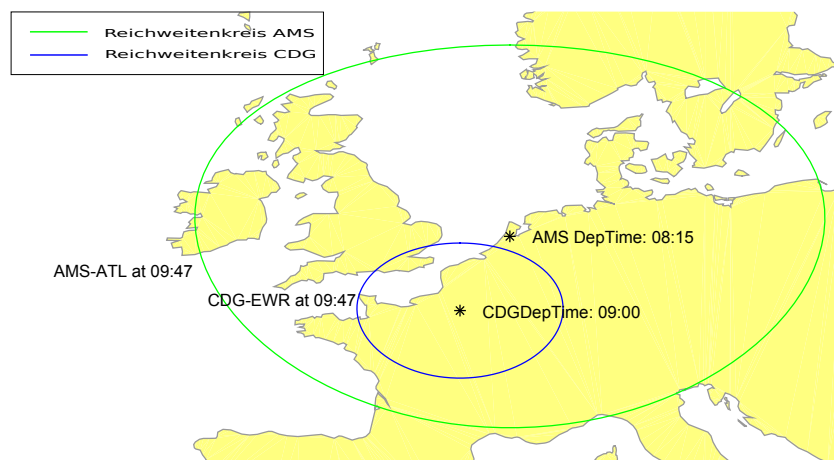


Abbildung 3.10: Reichweitenkreise zu Beginn der Reiseflugphase für die Flüge von *AMS* nach *ATL* und *CDG* nach *EWR*

In **Abbildung 3.10** erreicht der spätere Flug um 09:47 Uhr seine Reiseflughöhe. Die möglichen Positionen, die der Flug zu diesem Zeitpunkt haben kann sind als blauer Kreis um den Abflughafen Paris (*CDG*) dargestellt. Zur selben Zeit hat der früher losgeflogene Flug aus Amsterdam (*AMS*) schon eine längere Distanz zurückgelegt, die als grüner Kreis



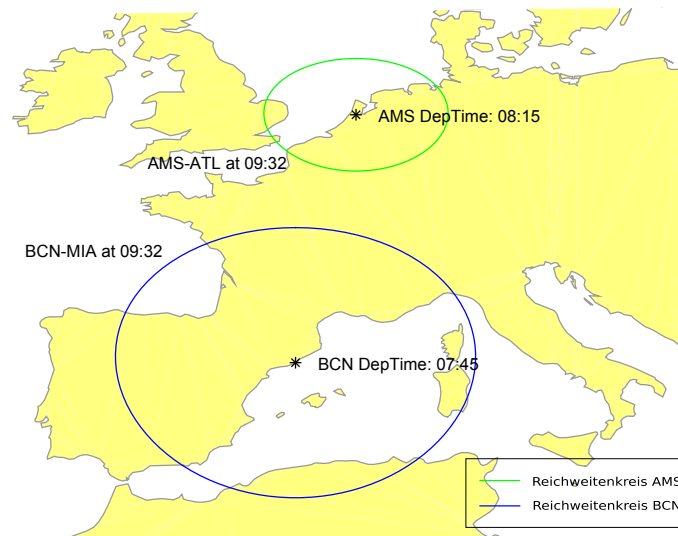


Abbildung 3.11: Reichweitenkreise zu Beginn der Reiseflugphase für die Flüge von *AMS* nach *ATL* und *BCN* nach *MIA*

dargestellt ist. Für diese beiden Flüge ergibt sich kein möglicher Schnittpunkt der Flugrouten, da der Kreis des späteren Flugs vollständig in dem Kreis des späteren Flugs liegt. Würden beide Flugzeuge mit der selben Geschwindigkeit fliegen, so wäre der frühere Flug uneinholbar für den späteren Flug. Jedoch können sich die Fluggeschwindigkeiten unterscheiden, so dass ein Einholen theoretisch denkbar wäre. Ein Einholen ist theoretisch möglich wenn die Fluggeschwindigkeit des später startenden Fluges größer ist als die des frühen Fluges. Ist das nicht der Fall, sind diese Flüge nicht Formationsfähig und werden nicht weiter berücksichtigt.

Das Flugpaar in **Abbildung 3.11** hingegen passiert den Filter. Auch wenn sich die dargestellten Kreise noch nicht schneiden, ist abzusehen, dass sie sich im weiteren Flugverlauf beider Flüge schneiden werden.

Die Darstellungen in den **Abbildungen 3.10** und **3.11** dienen der Veranschaulichung des gekoppelten Filterkriteriums.

Geometrisch formuliert heißt es ,dass die Summe der Flugdistanz des späteren Flugs  $Late_{dist}$  und des Abstandes beider Abflughäfen  $Origin_{dist}$  größer sein muss, als die Flugdistanz des früheren Fluges  $Early_{dist}$ , wie **Abbildung 3.12** zeigt. **Gleichung 3.1** stellt die Bedingung für den Schnitt zweier Kreise mathematisch dar.

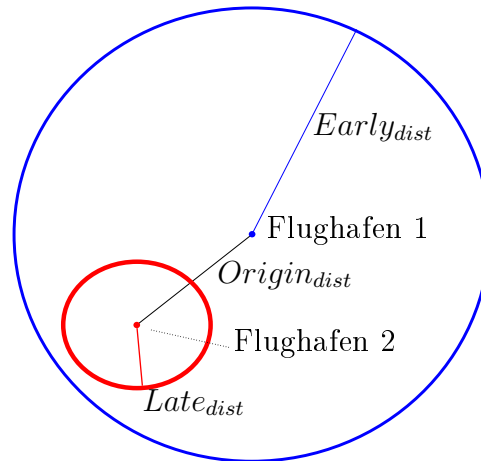


Abbildung 3.12: Geometrische Voraussetzung zur Schnittfähigkeit zweier Kreise

$$Origin_{dist} + Late_{dist} \geq Early_{dist} \quad (3.1)$$

Für potentielle Formationen, die **Gleichung 3.1** nicht erfüllen, muss geprüft werden, ob ein Einholen theoretisch möglich ist. Dazu muss die Reisefluggeschwindigkeit des späten Fluges  $v_{cruise,late}$  größer sein als die Reisefluggeschwindigkeit des frühen Fluges  $v_{cruise,early}$ .

$$v_{cruise,late} > v_{cruise,early} \quad (3.2)$$

Die Geschwindigkeiten in **Gleichung 3.2** wurden aus den Flugzeit- und Flugdistanzangaben aus den Rohdaten bestimmt. Es handelt sich dabei um einen Durchschnittswert über alle Flugphasen. Ferner bezieht sich die Flugzeit auf die tatsächlich geflogene Route, während für die Berechnung der Geschwindigkeit nur die Entfernung entlang eines Großkreissegments herangezogen werden kann.

### 3.4.4 Filterergebnisse

Die Filter des vorgestellten Filtersystems haben die Menge an potentiellen Formationspaaren anhand einfacher Parameter deutlich verringert. Insgesamt wurden aus den theoretisch über 1 Milliarde denkbaren Formationen über 99 % herausgefiltert. Nach dem 6. Filter befinden sich nur noch 2.584.718 Formationspaare in der Liste der potentiellen Formationen. Mit 0,217 % der Ausgangsdaten ist also nur eine Bruchteil der denkbaren Flugpaare einer Woche geeignet näher betrachtet zu werden.

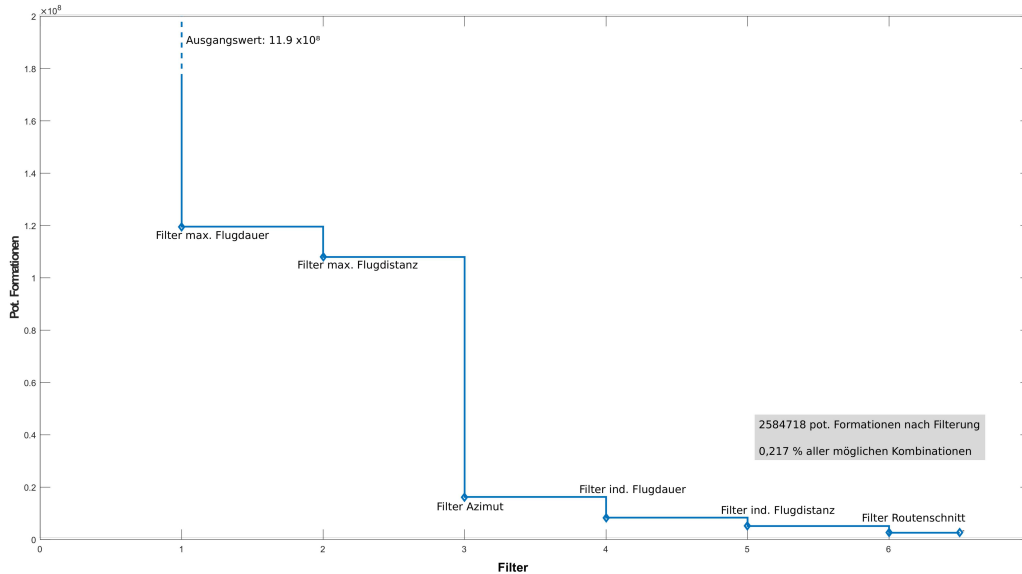


Abbildung 3.13: Anzahl der potentiellen Formationen während der Vorfilterung

**Abbildung 3.13** zeigt den Verlauf der Datenmenge beim Durchlaufen der Filter. Dabei muss festgestellt werden, dass diese Formationspaare sich nach dem Filterprozess lediglich als formationsfähig deuten lassen. Ob es bei den identifizierten Formationen tatsächlich zu Einsparungen kommt, kann erst nach Modellierung der Route und der anschließenden Bewertung festgestellt werden. Durchschnittlich wurden pro Flug 74 Kandidaten für eine Formation gefunden. 5,3% der identifizierten Formationen haben den gleichen Zielflughafen und nur 1,5% den gleichen Abflughafen.

Die Parameter Abflugzeit und Distanz zwischen den Abflughäfen wurde jeweils zweimal abgefragt. Auf die ersten beiden Filter mit pauschalem Kriterium kann verzichtet werden. Sie sind jedoch mit geringerem Rechenaufwand als die Filter 4 und 5 verbunden, da ein pauschal gültiges anstelle ein für jeden Einzelflug individuelles Kriterium abgefragt wird. Die ersten beiden Filter sind demzufolge die schnellsten und werden aufgrund der großen Datenmenge eingesetzt.

Eine alternative Anordnung der Filter sollte zu dem gleichen Ergebnis führen, jedoch sind Abweichungen in den Rechenzeiten zu erwarten. Das Durchlaufen der Filter in der hier vorgestellten Anordnung benötigt eine Rechenzeit von etwa 50 Stunden.

## 3.5 Routenbestimmung

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird die geographisch optimale Route ermittelt und im Anschluss die bestmögliche Route anhand der Flugplandaten abgeleitet.

### 3.5.1 Optimale Route

Das Ergebnis der vorausgegangenen Filterung ist eine Liste mit potentiellen Formationen, bestehend aus jeweils zwei Flügen. Es bestehen also für jeden Flug mehrere geeignete Formationspartner. Ein Flug kann jedoch nur an einer Formation teilnehmen, sodass eine Auswahl getroffen werden muss. Aus diesem Grund müssen die in der Vorauswahl gefundenen Formationen bewertet werden. Dabei stützt sich die Bewertung auf die geflogene Route der Formation. Als Grundlage der Bewertung müssen somit die Flugrouten der Formationen modelliert werden.

Die Routenbestimmung in dieser Studie basiert auf dem von Kent et al. vorgestellten Prinzip des Fermat-Torecelli Punktes [24]. Der Fermat-Torecelli Punkt ist der Punkt in einem Dreieck für den die Summe der Abstände zu den Eckpunkten minimal wird [30]. Die Bedeutung dieses Punktes für den Formationsflug wird ersichtlich, wenn man die Eckpunkte eines Dreiecks als Flughäfen versteht. Von zwei Eckpunkten startet jeweils ein Flugzeug und fliegt zu dem dritten Eckpunkt als gemeinsames Ziel beider Flüge. Sollen diese beiden Flüge in Formation fliegen, stellt sich die Frage, an welchem Ort die Flugzeuge sich treffen sollen, um von dort an in Formation zu fliegen. Dabei ist klar, dass jedes Flugzeug von seiner für den Einzelflugfall idealen Flugroute abweichen muss. Es wird demzufolge ein Umweg in Kauf genommen, um später von der Formationsflugphase zu profitieren. Jedoch sollte der Umweg so klein wie möglich sein, damit die Gesamtersparnis der Formation nicht unnötig gemindert wird. An dieser Stelle, kann mittels des Fermat-Torecelli Punktes der optimale *Rendezvous* Punkt bestimmt werden. Der Fermatpunkt lässt sich auf einfache, geometrische Weise konstruieren, wie **Abbildung 3.14** zeigt.

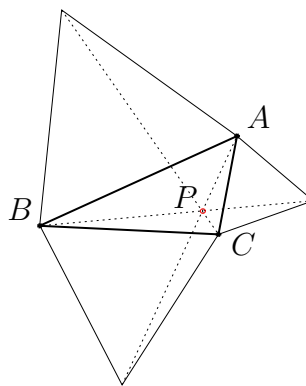


Abbildung 3.14: Geometrische Konstruktion des Fermat-Torecelli Punktes  $P$  nach [24]

Dazu wird an jede Seite des Dreiecks  $ABC$  ein gleichseitiges Dreieck angelehnt. Die Punkte  $A, B$  und  $C$  werden nun mit den gegenüberliegenden äußeren Eckpunkten

der gleichseitigen Dreiecke verbunden, sodass sich der Schnittpunkt  $P$  ergibt. Alternativ lässt sich der Punkt  $P$  auch als Schnittpunkt der Umkreise der gleichseitigen Dreiecke konstruieren. Der Punkt  $P$  ist somit der Fermatpunkt, für den die Summe der Abstände zu den Punkten  $A$ ,  $B$  und  $C$  des Dreiecks minimal wird. Dieser Zusammenhang ist für ebene als auch sphärische Dreiecke gültig.

Kent et al. haben in [24] erkannt, dass die Schnittwinkel zwischen den Strecken  $\overline{AP}$ ,  $\overline{BP}$  und  $\overline{CP}$   $120^\circ$  betragen. Darauf aufbauend lässt sich das Fermat Problem von einem Dreieck entkoppeln und auf zwei Punkte anwenden. Für zwei Punkte ergibt sich dann ein Kreisbogen auf dem der Fermat Punkt liegt, sobald Informationen zu einem dritten Punkt verfügbar sind. Auf die Routenbestimmung von Formationsflügen bedeutet dies, dass sich anhand von zwei Abflughäfen bereits ein Kreisbogen, auf dem der spätere Fermatpunkt liegen wird, bestimmen lässt. Da sich dieses Verhalten analog auf den *Break up* Punkt vor zwei Zielflughäfen übertragen lässt, kann die Route einer Formation aus zwei Flugzeugen mit unterschiedlichen Abflug und Zielflughäfen modelliert werden. Dieses Verfahren wird in **Abbildung 3.15** verdeutlicht.

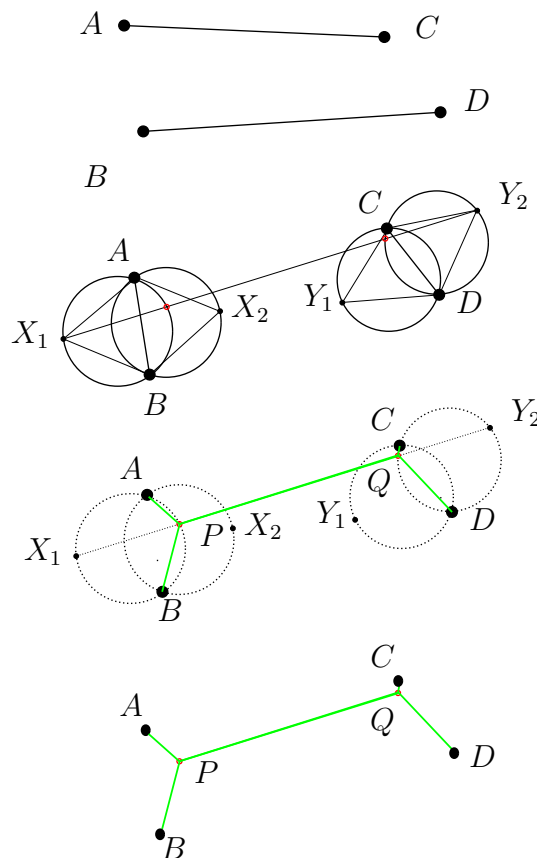


Abbildung 3.15: Geometrische Konstruktion der kürzesten Formationsroute nach [24]

In **Abbildung 3.15** handelt es sich um einen Flug von  $A$  nach  $C$ , der mit dem Flug von  $B$  nach  $D$  eine Formation bilden soll. Zur Ermittlung der kürzesten Route werden zunächst ausgehend von der Strecke zwischen den Abflughäfen bzw. Zielflughäfen gleichseitige Dreiecke zu beiden Seiten hin aufgespannt. Im Anschluss werden die Umkreise um die Dreiecke konstruiert. Es ergeben sich neben den Punkten  $A$ ,

$B$ ,  $C$  und  $D$  die äußeren Eckpunkte  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$  und  $Y_2$ . Die äußeren Eckpunkte mit der längsten Entfernung zueinander werden verbunden, in diesem Fall die Strecke  $\overline{X_1Y_2}$ . Die Schnittpunkte dieser Strecke mit den Umkreissegmenten zwischen den Flughäfen sind somit der *Rendezvous* Punkt  $P$  und *Break up* Punkt  $Q$  der Formation. Dieses Verfahren erlaubt eine schnelle Routengenerierung für Formationen, jedoch ist es in der Form leider nicht auf alle Flugpaare anwendbar. Der Fermatpunkt liegt nur innerhalb des Dreiecks, wenn keiner der Innenwinkel größer als  $120^\circ$  ist. Für Dreiecke bei denen einer der drei Innenwinkel größer als  $120^\circ$  ist, ist der Fermatpunkt mit einem Dreieckseckpunkt deckungsgleich [18], wie **Abbildung 3.16** zeigt. Im Bezug auf die Formationsflugrouten bedeutet dies, dass der *Rendezvous* Punkt an dem Abflughafen liegt, der näher zu den Zielflughäfen liegt.

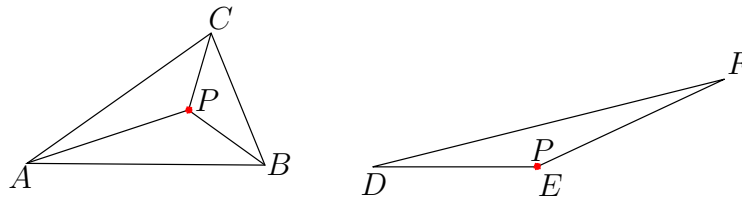
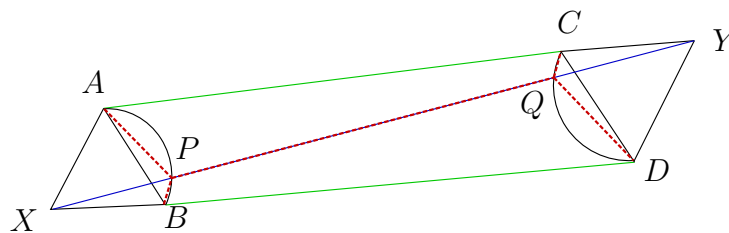


Abbildung 3.16: Fermatpunkte  $P$  für Dreiecke mit allen Innenwinkeln kleiner als  $120^\circ$  und einem Innenwinkel größer als  $120^\circ$

Das Verfahren von Kent et al. aus [24] muss also mit der Information zu den verschiedenen Winkelbeziehungen in Dreiecken ergänzt werden. Mit der Erweiterung ergeben sich dann die zwei in **Abbildung 3.17** dargestellten Fälle. Schneidet die Verbindungslinie zwischen den äußeren Eckpunkten nicht die Segmente der Umkreise, wird der näher an der Formationsroute liegende Abflughafen bzw. Zielflughafen als *Rendezvous* und *Break up* Punkt gewählt.

Formationsrouten mit Winkeln kleiner als  $120^\circ$



Formationsrouten mit Winkeln über  $120^\circ$

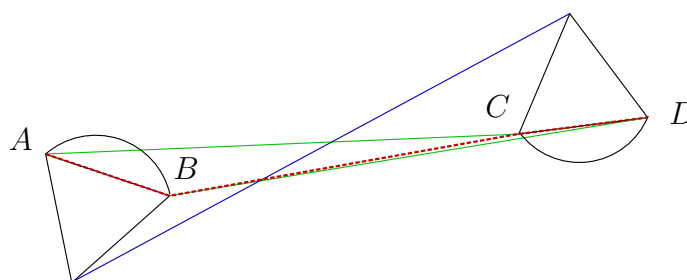


Abbildung 3.17: Formationsrouten für Dreiecke mit allen Innenwinkeln kleiner als  $120^\circ$  und einem Innenwinkel größer als  $120^\circ$

Mit dieser Erweiterung lässt sich für ein Paar aus Abflughäfen und Zielflughäfen eine geometrisch kürzeste Formationsroute generieren. Diese Route wird im Rahmen dieser Arbeit als optimal angesehen. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang lediglich, dass die Route geographisch die Kürzeste ist. Ob sich mit den jeweiligen Formationen eine Treibstoffeinsparung erzielen lässt muss in der Bewertung der Formationen ermittelt werden. **Abbildung 3.18** zeigt eine Formationsroute für einen Flug von London (*LHR*) nach Mumbai (*BOM*) und von Paris (*CDG*) nach Shanghai (*PVG*).

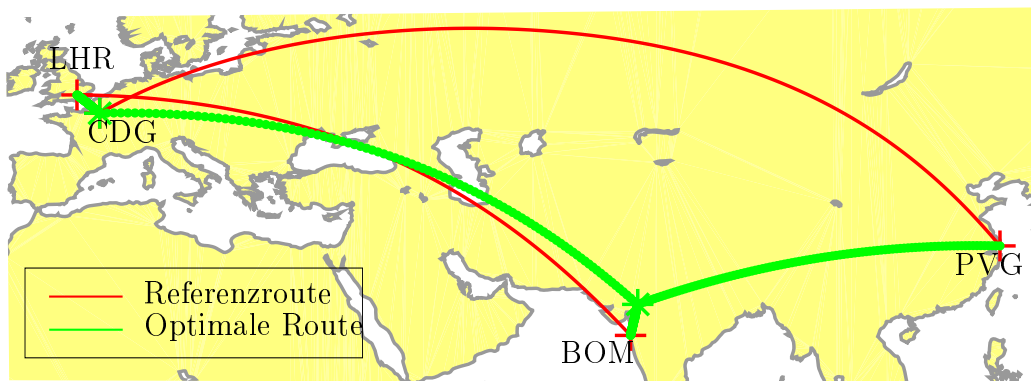


Abbildung 3.18: Optimale Formationsroute

Die Einzelflugg Routen sind in rot dargestellt und die Formationsrouten in grün. Im Fall einer Formation fliegt der in London (*LHR*) startende Flug zunächst in Richtung Paris (*CDG*). Von dort an beginnt die Formationsphase und reicht bis zum *Break up* Punkt. Ab dem *Break up* Punkt fliegen beide Flüge weiter zu ihren Zielflughäfen. In diesem Beispiel treten beide Fälle des Fermat Punkt Problems in Erscheinung. Da die Konstruktion der Dreiecke zwischen den beiden Abflughäfen und den Zielflughäfen Winkel über  $120^\circ$  zeigen, wird ein Eckpunkt des Dreiecks, hier Paris (*CDG*), zum Fermatpunkt. Der geographisch optimale *Rendezvous* Punkt fällt also mit dem Abflughafen des zweiten Fluges zusammen. Für die Zielflughäfen tritt der klassische Fall des Fermat Punkt Problems in Kraft, wodurch der *Break up* Punkt vor dem Zielflughäfen liegt.

Die Flugroutengenerierung wurde für alle identifizierten, potentiellen Formationen durchgeführt. Für einige der identifizierten Formationen ließen sich keine Routen erzeugen, da die Flüge geographisch zu weit auseinander lagen. Es stellt sich die Frage, wie diese Flüge die Vorfilter passieren konnten. Der Grund dafür soll im Folgenden an einem Beispiel erläutert werden.

Die Vorfilter haben einem Flug von Paris (*CDG*) nach Santiago de Chile (*SCL*) einen im Vergleich dazu regionalen Flug von Osaka (*KIX*) nach Hong Kong (*HKG*) zugeordnet. Es soll nun geklärt werden wie der Flug von Osaka (*KIX*) nach Hong Kong (*HKG*) als potentieller Formationskandidat identifiziert werden konnte. Die Abflugzeiten liegen in diesem Fall etwas mehr als drei Stunden auseinander und die Azimutwinkel weichen um  $14^\circ$  voneinander ab. Die zeitabhängigen Filter und die Abfrage der Azimutwinkel konnte also passiert werden. Der Flugdistanzfilter nutzt die Länge des Einzelflugs als Kriterium. Im Falle des Fluges von Paris (*CDG*) nach Santiago de Chile (*SCL*) sind das 6292 nm. Der Abflughafen des Formationspartners darf also maximal um diese Entfernung entfernt liegen. **Abbildung 3.19** zeigt die Lage der Flugrouten und den Reichweitenkreis um Paris (*CDG*). Es lässt sich erkennen, dass der Flug von Paris (*CDG*) mit einer Flugstrecke von 6292nm es nach Osaka (*KIX*) schaffen kann um dort einer Formation beizutreten.

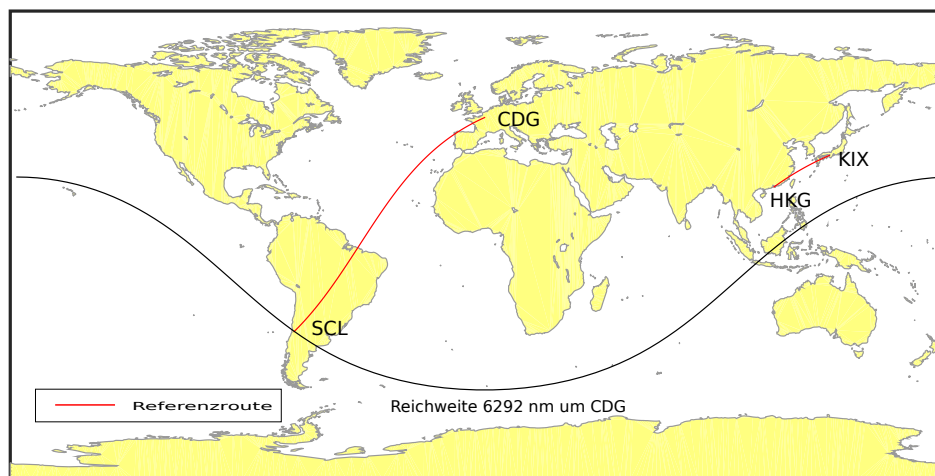


Abbildung 3.19: Nicht modellierbare Formationsrouten

Intuitiv lässt sich schnell erkennen, dass diese beiden Flüge nicht für eine Formation geeignet sind. Eine Anpassung der Filter ist möglich, führt aber zur Nichtbeachtung möglicher anderer Formationen, wie folgende Überlegung zeigt.

Zusätzlich zur Abfrage der Entfernung eines Formationspartners vom Abflughafen, könnte die Entfernung vom Zielflughafen abgefragt werden. Dabei würde sich der in **Abbildung 3.20** von den Reichweitenlinien eingeschlossene Bereich ergeben. Demnach würden nur Flüge innerhalb dieses Bereiches als Formationspartner in Frage kommen.

Dieser Bereich ist in **Abbildung 3.20** zwischen den Punkten *A*, *B* und den beiden Reichweitenlinien zu sehen. Eine derartige Wahl des Filterkriteriums hätte zur Folge, dass ein in Osteuropa startender Flug mit einem Ziel in Südamerika nicht berücksichtigt werden würde. In diesem Fall würden nur Flüge infrage kommen, die der Flug aus Paris (*CDG*) sozusagen abholen würde. Der Flug aus Paris (*CDG*) selbst kann in dieser Filterdefinition nicht abgeholt werden.



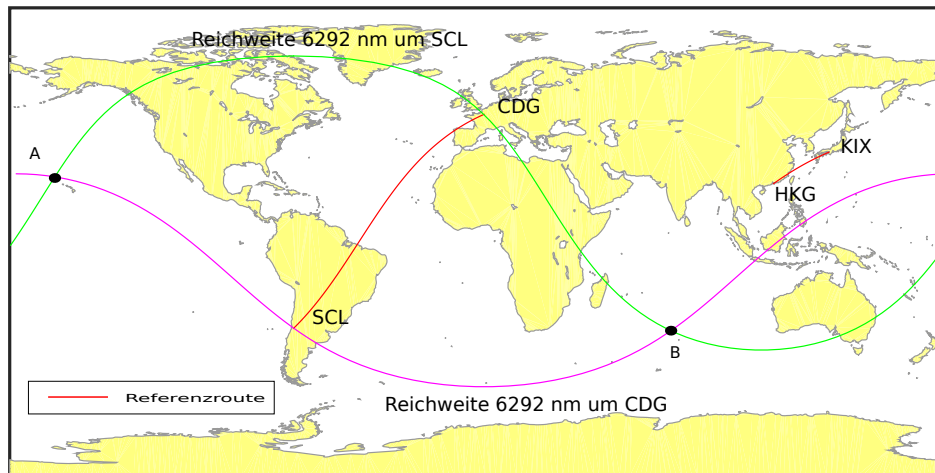


Abbildung 3.20: Alternatives Filterkriterium

Dieses Beispiel soll zeigen, dass die Filter nur diejenigen Kriterien verwenden, die keine potentiellen Formationen ausschließen. Dabei muss jedoch in Kauf genommen werden, dass nicht formationsfähige Flugpaare die Filter ebenfalls passieren. Insgesamt konnten 161566 Formation, also 6,25% der identifizierten Formationen, nicht modelliert werden.

### 3.5.2 Bestmögliche Route

Das vorangegangene Kapitel hat für die identifizierten Formationen die optimale Route auf Basis der geographischen Lage der Abflug- und Zielflughäfen ermittelt. Diese Route ist in den meisten Fällen unter den gegebenen Randbedingungen nicht fliegar, da eine Anpassung der Reisegeschwindigkeit bzw. Warteschleifen oder Anpassungen der Abflugzeiten eingeplant werden müssten. In diesem Kapitel wird von dem optimalen *Rendezvous* Punkt der bestmögliche *Rendezvous* Punkt abgeleitet, indem die Abflugzeiten und Flugleistungseigenschaften der Flugzeuge berücksichtigt werden. Die Generierung dieser Route erfolgt in mehreren Schritten, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### Identifikation früher und später Flug

Als Erstes muss anhand der Abflugzeiten der beiden Flüge einer Formation bestimmt werden, welcher Flug als Erster und welcher Flug im Anschluss als zweiter Flug startet.

$Flight_{early}$  = Flug der Formation, der als Erster startet

$Flight_{late}$  = Flug der Formation, der als Zweiter startet

#### Abschätzen der Steig und Sinkleistung

Da Formationen nur im Reiseflug gebildet werden sollen, muss für jeden Flug Anfang und Ende der Reiseflugphase bestimmt werden. Dazu werden die Dauer und

die zurückgelegte Distanz der Steig- und Sinkflugphase für beide Flüge bestimmt. Zur Bestimmung dieser Informationen wird die bereits vorgestellte und genutzte *BADA 4* Flugleistungsdatenbank von *EUROCONTROL* [2] eingesetzt. Die Steig- und Sinkleistung werden anhand der folgenden Parameter bestimmt:

- Flugzeugtyp
- Flugdistanz
- Ladefaktor

In Kapitel 3.3 wurde bereits angemerkt das die Informationen zum eingesetzten Flugzeugtyp nicht von durchgängiger Qualität sind. Zum Teil ist nur der Flugzeugtyp bekannt, nicht jedoch die Version. Sobald nur eine Information zum Flugzeugtyp verfügbar ist, wird für die Abschätzung in der *BADA 4* Datenbank die kleinste Version des Typs angenommen. Dies geschieht unter der Annahme, dass dieser auch die schwächsten Flugleistungseigenschaften aufweist. Die Flugdistanz ist in den Rohdaten vorhanden und kann ohne Einschränkungen übernommen werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei um Entfernungen entlang Großkreissegmenten handelt, die von der tatsächlich geflogenen Distanzen abweichen. Die Rohdaten machen keine Angaben über die Passagier Ladefaktoren der einzelnen Flüge, so dass dieser Parameter auf alternativem Weg bestimmt werden muss. Die IATA veröffentlicht für jeden Monat Kennzahlen zur Auslastung von kommerziellen Flügen. Im Oktober 2014 lag der durchschnittliche Ladefaktor international bei 78% [11]. Dieser Wert wird in dieser Studie als Ladefaktor für alle Flüge gesetzt.

### Bestimmen des initialen *Rendezvous* Punktes

An dieser Stelle soll der erste mögliche Schnittpunkt zwischen den zwei Formationsmitgliedern ermittelt werden. Zuerst muss allerdings ermittelt werden, ab welchem Zeitpunkt beide Flugzeuge sich im Reiseflugzustand (*cruise*) befinden. Dazu wird zunächst der späte Flug betrachtet und anhand der abgeschätzten Steigzeit der Zeitpunkt des Reiseflugbeginns (*ToC*, *Top of Climb*) bestimmt. Anschließend wird geprüft, ob sich der frühe Flug zu diesem Zeitpunkt auch schon im Reiseflug befindet. Ist dies der Fall, wird die zurückgelegte Entfernung des frühen Flugs bestimmt. Diese besteht dann aus einer abgeschlossenen Steigflugphase und einer Reiseflugphase. Ist der frühe Flug noch nicht im Reiseflug, wird mittels dessen Steigzeit sein Eintrittszeitpunkt in den Reiseflug bestimmt. In diesem Fall muss dann für den späten Flug bestimmt werden, welche Distanz er bis zu dem Eintrittszeitpunkt in den Reiseflug zurückgelegt hat. Letztlich wird auf diese Weise der Zeitpunkt bestimmt ab dem beide Flüge im Reiseflugzustand sind. Dieser Zeitpunkt wird mit  $t_{cruise}$  bezeichnet. Für beide Flüge lässt sich eine zurückgelegte Distanz zum Zeitpunkt  $t_{cruise}$  bestimmen. Die Definitionen der Distanzen  $S_{early,cruise}$  und  $S_{late,cruise}$  sind in **Gleichung 3.3** und **3.4** zu sehen.

$$S_{early,cruise} = S_{early}(t = t_{cruise}) \quad (3.3)$$

$$S_{late,cruise} = S_{late}(t = t_{cruise}) \quad (3.4)$$

Im Hinblick auf den initialen *Rendezvous* Punkt gilt es zwei Fälle zu unterscheiden. Im Einfachsten Fall schneiden sich die Reichweitenkreise mit den Distanzen  $S_{early,cruise}$  und  $S_{late,cruise}$  bereits, wie in **Abbildung 3.21** dargestellt. In diesem Fall muss nur noch der näher am Ziel liegende Schnittpunkt der beiden Kreise ausgewählt werden. In diesem Fall ist der initiale *Rendezvous* Zeitpunkt  $t_{initial}$  gleich dem Zeitpunkt  $t_{cruise}$

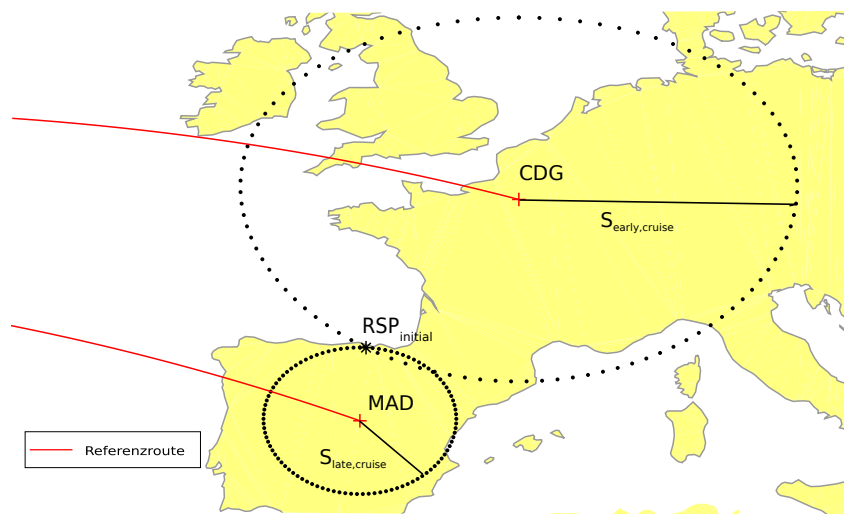


Abbildung 3.21: Initialer *Rendezvous* Punkt bei vorhandenem Schnittpunkt der Reichweitenkreise zum Zeitpunkt  $t_{cruise}$

Sollten sich auf diese Weise noch kein Schnittpunkt ergeben, wird der initiale *Rendezvous* Punkt wie folgt ermittelt. Der erste mögliche Schnittpunkt kann erreicht werden, wenn beide Flüge auf einander zu fliegen. Der initiale Schnittpunkt liegt dann auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Abflughäfen. Der Zeitpunkt  $t_{initial}$  ergibt sich dann aus **Gleichung 3.5**.

$$t_{initial} = t_{cruise} + \frac{Origin_{dist} - S_{early,cruise} - S_{late,cruise}}{v_{cruise,early} + v_{cruise,late}} \quad (3.5)$$

Von der Entfernung zwischen den beiden Abflughäfen  $Origin_{dist}$  müssen die bereits zurückgelegten Distanzen  $S_{early,cruise}$  und  $S_{late,cruise}$  abgezogen werden. Die entstehende Differenz wird durch die Summe der Reisefluggeschwindigkeiten  $v_{cruise,early}$  und  $v_{cruise,late}$  dividiert. Die resultierende Zeit wird mit  $t_{cruise}$  addiert und es ergibt sich  $t_{initial}$ . Dieser zweite Fall ist in **Abbildung 3.22** veranschaulicht.

Für jede Formation wird auf diese Weise ein initialer *Rendezvous* Punkt, mit zugehöriger Zeitinformation, ermittelt. Die Berechnung der Schnittpunkte von Kreisen und Entfernungen auf der Erdoberfläche werden mit Hilfe der MATLAB<sup>®</sup> Mapping Toolbox<sup>™</sup> bestimmt. Die zugrunde liegenden Formeln der sphärischen Trigonometrie sind zu umfangreich für eine Darstellung in dieser Arbeit.

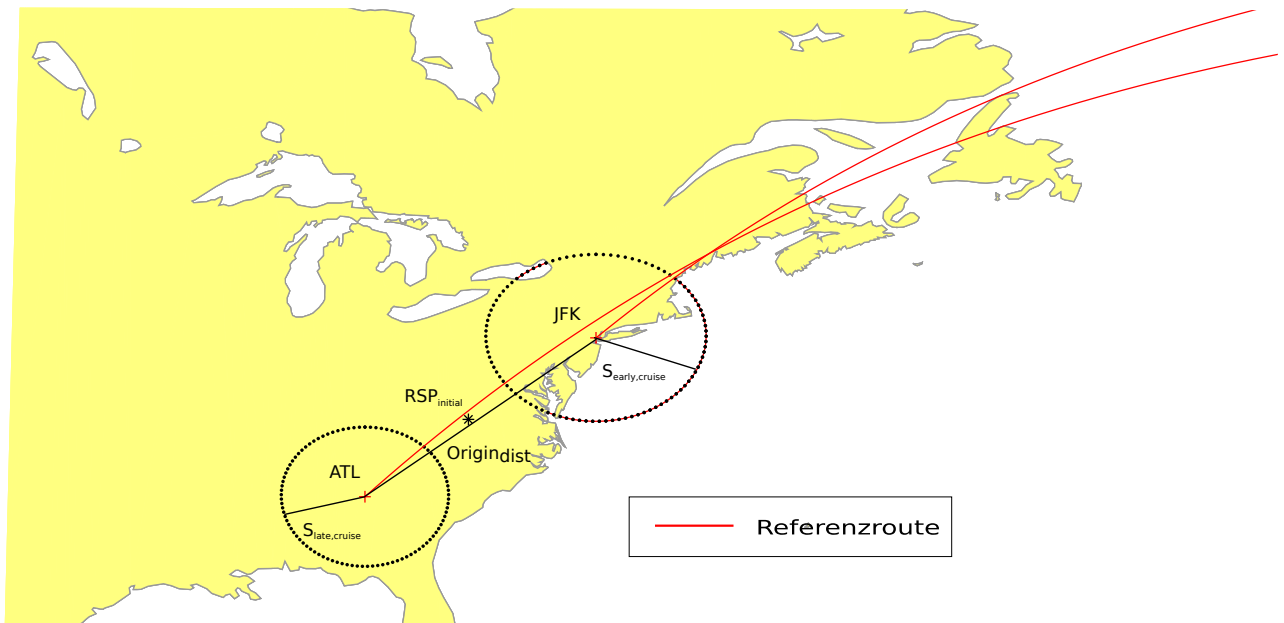


Abbildung 3.22: Initialer *Rendezvous* Punkt bei fehlendem Schnittpunkt der Reichweitenkreise zum Zeitpunkt  $t_{cruise}$

### Überschlägige iterative Bestimmung des bestmöglichen *Rendezvous* Punktes

Der bestmögliche *Rendezvous* Punkt muss sich an dem zuvor bestimmten optimalen *Rendezvous* Punkt orientieren. Diese Aufgabe lässt sich als Optimierungsproblem verstehen, bei dem aus der Vielzahl an möglichen *Rendezvous* Punkten derjenige gesucht wird, der den geringsten Abstand zum optimalen *Rendezvous* Punkt aufweist. Zur Lösung dieses Problems wird iterativ vorgegangen, weshalb auch die zuvor bestimmten initialen *Rendezvous* Punkte ermittelt wurden. Der resultierende *Rendezvous* Punkt ist also am optimalen *Rendezvous* Punkt optimiert und wird daher als bestmöglicher *Rendezvous* Punkt verstanden. Des Weiteren ist durch den initialen *Rendezvous* Punkt ausgeschlossen, dass dieser innerhalb einer Steigflugphase der Formationsteilnehmer liegt.

Zur Bestimmung des bestmöglichen *Rendezvous* Punkts wird die zurückgelegte Distanz beider Flüge zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Dabei kommt ein Zeitintervall von  $t_{int} = 5 \text{ min}$  zum Einsatz. Nach jedem Zeitintervall wird der Schnittpunkt der Reichweitenkreise mit den Radien

$$S_{early}(t = t_{cruise} + counter * t_{int})$$

$$S_{late}(t = t_{cruise} + counter * t_{int})$$

um die Abflughäfen bestimmt.

Der Parameter *counter* zählt dabei die Iterationsschritte. Nach jedem Iterationsschritt wird die Distanz  $opt_{dist}$  zwischen dem gefundenen Schnittpunkt und dem optimalen *Rendezvous* Punkt bestimmt. Solange diese Distanz abnimmt, werden weitere Iterationsschritte durchgeführt. Auf diese Weise lässt sich auf 5 *min* genau der *Rendezvous* Punkt mit dem geringsten Abstand zum optimalen *Rendezvous* Punkt bestimmen. Es wird der Schnittpunkt als neuer *Rendezvous* Punkt ausgewählt, für den die Distanz  $opt_{dist}$  minimal wird. Der zugehörige Zeitpunkt  $t_{RV}$  lässt sich anhand der **Gleichung 3.6** berechnen.

$$t_{RV} = t_{initial} + counter * t_{int} \quad (3.6)$$

**Abbildung 3.23** zeigt das Ergebnis und die gefundenen Schnittpunkte einer Iteration.

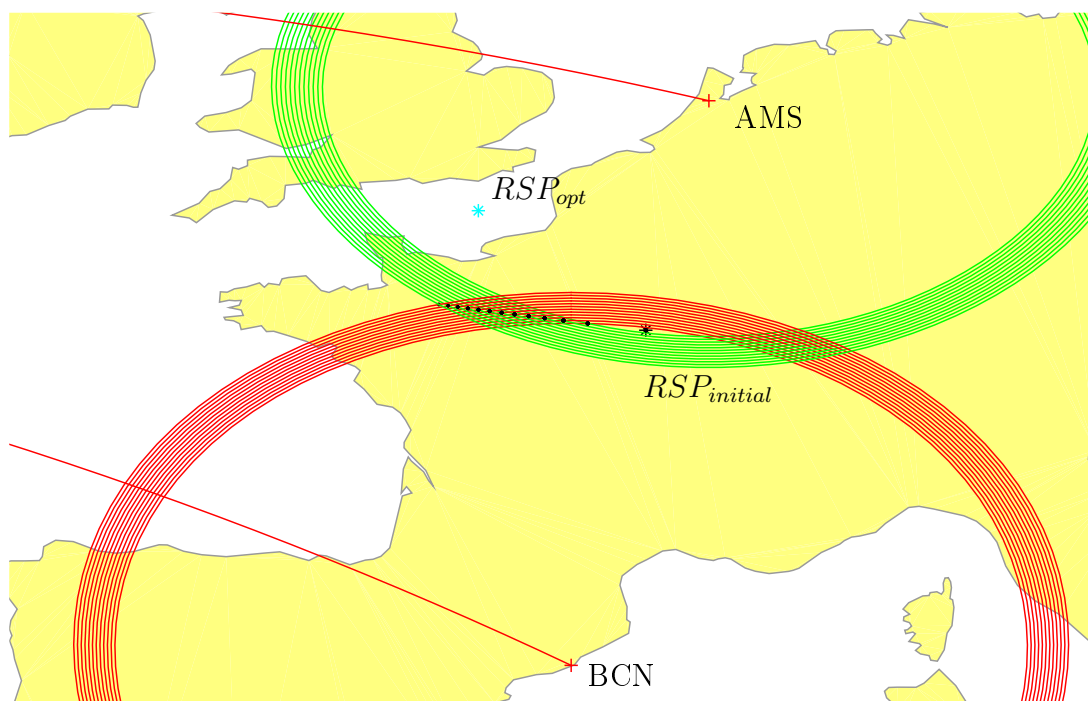


Abbildung 3.23: Iterative Ermittlung des bestmöglichen *Rendezvous* Punktes anhand des optimalen *Rendezvous* Punktes

Die in **Abbildung 3.23** gezeigte Iteration besteht aus 13 Iterationen. In **Abbildung 3.24** ist die Entfernung zwischen dem optimalen *Rendezvous* Punkt und den gefundenen möglichen *Rendezvous* Punkten aufgetragen.

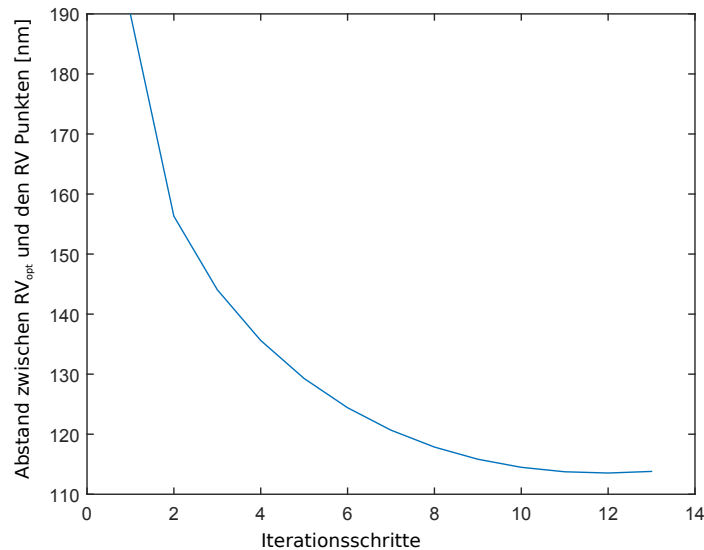


Abbildung 3.24: Verlauf des Abstandes zwischen  $RSP_{opt}$  und den iterativ ermittelten möglichen *Rendezvous* Punkten

### Detaillierte Bestimmung des bestmöglichen *Rendezvous* Punktes

Ein Zeitintervall von 5 *min* entspricht, bei einer Reisefluggeschwindigkeit von 460 *kt*, etwa 23 *nm* bzw. 42,6 *km*. Um das Ergebnis noch weiter zu verfeinern, wird ausgehend von der ersten Iteration eine zweite Iteration ausgeführt. Das Vorgehen ist dabei analog, mit Ausnahme des auf  $t_{int} = 0,5$  *min* reduzierten Intervalls. Das in der ersten Iteration, gefundene Minimum gibt keine Auskunft darüber, ob das tatsächliche Minimum zeitlich davor oder dahinter liegt. Aus diesem Grund nutzt der zweite Iterationsdurchlauf die Ergebnisse des vor dem Minimum liegenden Zeitintervalls als Initialwerte.

### Routenmodellierung für gleiche Startflughäfen

Für den Sonderfall der 39900 identifizierten Formationen mit gleichem Abflughafen kann die Suche nach einem *Rendezvous* Punkt nicht mittels der vorgestellten Methode bestimmt werden. Die Wahl der Randbedingungen führt dazu, dass diese Formationen nur durch Einholen des frühen Fluges durch den stäten Flug zustande kommen können, da der Fermatpunkt zum Bilden der Formation der gemeinsame Abflughafen ist. Der spätere Flug muss also schneller sein, damit es zu einer Formation kommen kann. Ferner muss er in der Lage sein, den frühen Flug einzuholen, bevor dieser sein Ziel erreicht hat. Diese schwer zu erfüllenden Kriterien zeigen einen Nachteil der Wahl der Randbedingungen auf. Wären Warteschleifen oder andere Flugplananpassungen vorgesehen, ließen sich die vielversprechenden Formationen mit gleichem Abflughafen besser modellieren. Von den identifizierten Formationen mit gleichem Abflughafen konnten nur für 6663 Formationen Flugrouten modelliert werden. In den verbleibenden 83 % der Formationen, war der spätere Flug nicht in der Lage den frühen Flug innerhalb der Flugzeit einzuholen.

Ein ähnliches weiteres Phänomen hat sich bei der Routenmodellierung gezeigt und führt zu einer weiteren Reduktion. Es handelt sich dabei um das Einholen bei verschiedenen Startflughäfen. Der 6. Filter zur Formationsfähigkeit prüft, im Falle von

zunächst nicht formationsfähigen Flügen, ob der späte Flug schneller ist als der frühe Flug. Es kommt jedoch vor, dass die Flugzeit nicht zum Einholen des frühen Fluges ausreicht. In diesem Fall kann kein *Rendezvous* Punkt gefunden werden und die Formation ist ebenfalls nicht modellierbar. Dieser Fall ist bei 289641 Formationen eingetreten.

### Bestimmung der Break up Punkte

In der gleichen Weise wie die *Rendezvous* Punkte wurden die optimalen *Break up* Punkte mit Hilfe des Fermatpunkt Ansatzes bestimmt. Diese Punkte werden nun als *Break up* Punkte verwendet. Jedoch muss geprüft werden, ob sich die *Break up* Punkte noch in der Reiseflugphase der Flüge befinden oder bereits in der Sinkflugphase.

Dazu wird der Abstand zwischen dem Break up Punkt und den Zielflughäfen mit den aus der *BADA 4* Datenbank abgeschätzten Flugdistanzen der Sinkflugphase verglichen. Sollte der *Break up* Punkt zu nah an einem der Zielflughäfen liegen, wird der *Break up* Punkt auf der Verbindungslinie zwischen dem *Break up* Punkt und dem *Rendezvous* Punkt verschoben. Der *Break up* Punkt fällt dann mit dem Beginn der Sinkflugphase (ToD, *Top of Descent*) einer der beiden Flüge zusammen. **Abbildung 3.25** zeigt das beschriebene Vorgehen.

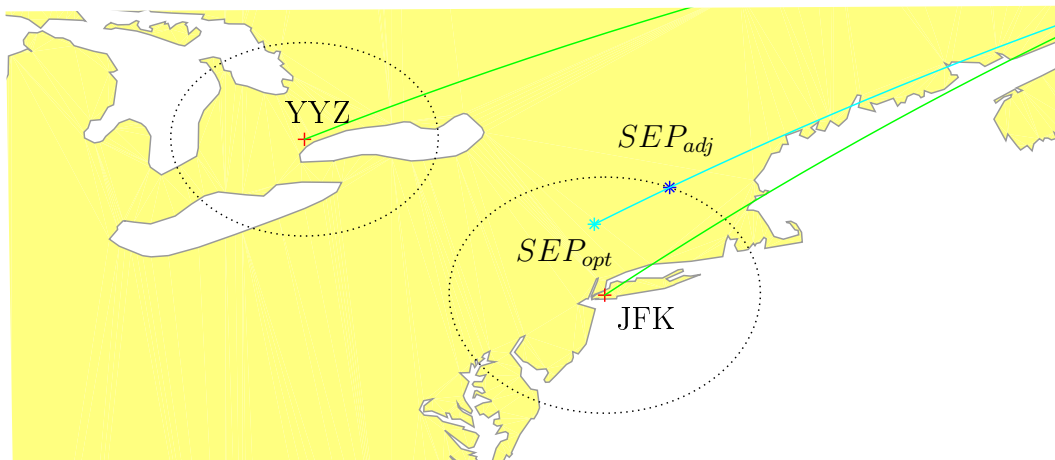


Abbildung 3.25: Verschobener *Break up* Punkt (*SEP*) aufgrund Konflikt mit Sinkflugphase

Nach Durchlaufen der vorgestellten Schritte, sind die bestmöglichen Routen für die identifizierten Formationen modelliert. Der *Rendezvous* Punkt ist geographisch bestimmt und auch der Zeitpunkt ab dem die Formationsphase beginnt ist bekannt. Der *Break up* Punkt ist ebenfalls definiert und analog zum *Rendezvous* Punkt nicht in Konflikt mit den Steig- oder Sinkflugphasen der beteiligten Flüge. **Abbildung 3.26** zeigt eine modellierte bestmögliche Route (schwarz) mit der zugehörigen optimalen Route (grün) und den beiden Einzelrouten (rot) als Referenz.

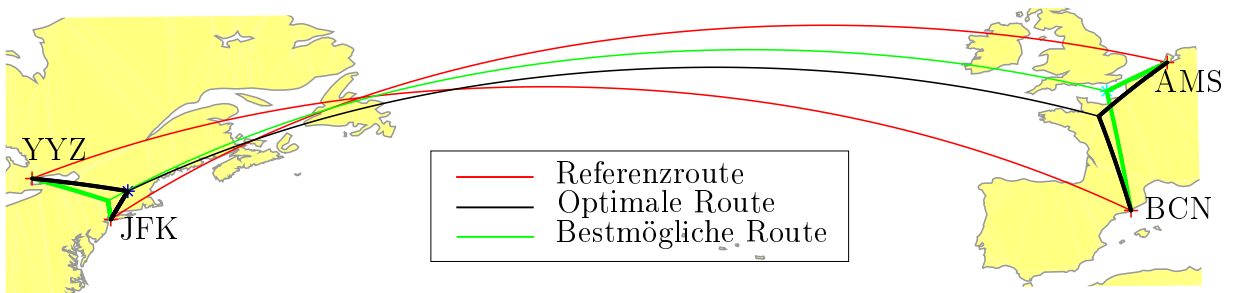


Abbildung 3.26: Optimale und bestmögliche Route im Vergleich

Von den in der Vorfilterung 2.584.718 identifizierten Formationen, konnten 18,7% nicht modelliert werden. Es bleiben somit 2.100.274 zur weiteren Verfügung.

### 3.6 Routenbewertung

Nachdem alle Routen modelliert wurden, bestehen für jeden einzelnen Flug noch eine Vielzahl an potentiellen Formationspartnern. Als Grundlage der späteren Auswahl müssen alle gefundenen Formationen bewertet werden. Dazu soll die von Marks et al. in [32] entwickelte Methode zur Ermittlung von Leistungsmerkmalen ziviler Formationsflüge angewandt werden. Im weiteren Verlauf dieser Studie können Formationen mit Beteiligung des Typs Airbus A310 nicht weiter berücksichtigt werden, da hierfür keine Ersatzmodelle vorliegen. Der Aussagekraft dieser Studie schadet das nicht, da der betroffene Typ lediglich 360 Einträge in der Flugdatenbank betrifft. Es werden demnach nur noch 34150 Flüge betrachtet. Die nun zur Anwendung kommende Methode wurde in Kapitel 2.3 bereits vorgestellt und wird hier wieder aufgegriffen. Die treibstoffbasierte Metrik  $\lambda$  soll anhand der Ersatzmodelle, wie in **Gleichung 2.5** definiert, abgeschätzt werden. Dazu müssen anfangs die Routenparameter anhand der modellierten Routen berechnet werden. Die Ersatzmodelle, die zur anschließenden Bewertung genutzt werden, sind Abbildungsfunktionen und nur innerhalb eines bestimmten Parameterbereichs gültig. Die zur Bewertung notwendigen Parameter und deren zulässiger Wertebereich sind in der folgenden **Tabelle 3.2** dargestellt.

Für Formationen mit Parametern außerhalb der zulässigen Wertebereiche, ergeben sich unplausible Bewertungen. Da somit weitere Formationen nicht bewertbar sind, ergibt sich eine weitere Reduktion in der Anzahl der potentiellen Formationen auf 225.459.

Die Ladefaktoren werden, wie in Kapitel 3.5 nach dem von der IATA ermittelten Durchschnittswert [11], zu 0,78 gesetzt. Es bleiben die Flughöhe und Machzahl der Formation zu bestimmen. Hierzu müssen Annahmen getroffen werden. Wie von Ning et al. in [26] dargelegt und im Kapitel zu den Grundlagen beschrieben, sollten Formationen mit möglichst geringer Machzahl und leicht erhöhter Flughöhe fliegen [26]. Dabei muss jedoch ebenfalls gewährleistet werden, dass die Flugleistungseigenschaften beider Flugzeuge die gewählte Flughöhe und Machzahl erlauben. Zur Wahl der Flughöhe der Formation wird wieder die *BADA 4* Datenbank zu Rate gezogen und auf Basis der Einzelmissionen, die Reiseflughöhe bestimmt. Aus den Reiseflughöhen der Einzelflüge wird dann die Niedrigere als Formationsflughöhe gewählt. Dies



Parameter	Beschreibung	min	max
$\sigma_{ld}$	Relativer Umweg (Leader)	0	0,15
$\sigma_{fw}$	Relativer Umweg (Follower)	0	0,15
$\xi_{ben,ld}$	Rel. Länge der Formationsphase (Leader)	0,1	0,1
$\xi_{ben,fw}$	Rel. Länge der Formationsphase (Follower)	0,1	0,9
$\xi_{a,ld}$	Rel. Länge der Prä-Formationsphase (Leader)	0,1	0,9
$\xi_{a,fw}$	Rel. Länge der Prä-Formationsphase (Follower)	0,1	0,9
$S_{route,ld}$	Länge der Formationsroute (Leader) [km]	1000	14000
$S_{route,fw}$	Länge der Formationsroute (Follower) [km]	1000	14000
$l_{fid}$	Ladefaktor Leader	0	1
$l_{fid}$	Ladefaktor Follower	0	1
$FCA$	Formationsflughöhe [ft]	30000	40000
$FCS$	Formationsmachzahl [Mach]	0,76	0,86

Tabelle 3.2: Zulässige Wertebereiche der Parameter zur Abschätzung von  $\lambda$  nach [31]

widerspricht zwar der Empfehlung nach möglichst hohen Flughöhen zur Effizienzsteigerung, gewährleistet jedoch, dass beide Flugzeuge diese Flughöhe erreichen können.

Als Nächstes soll die Machzahl der Formation bestimmt werden. Die Machzahl  $Ma$  ist der Quotient aus der Fluggeschwindigkeit  $v_{cruise}$  und der Schallgeschwindigkeit  $a_{Schall}$ .

$$Ma = \frac{v_{cruise}}{a_{Schall}} \quad (3.7)$$

Die in **Gleichung 3.7** genannte Fluggeschwindigkeit  $v_{cruise}$  kann nicht wie zuvor aus der Flugdatenbank entnommen werden. Die dort verfügbaren Fluggeschwindigkeiten sind *Geschwindigkeiten über Grund* und berücksichtigen Windeinfluss. Sie ist daher zur Berechnungen von Flugzeiten und zurückgelegten Distanzen zu verwenden. Zur Bestimmung der Machzahl wird die *Wahre Fluggeschwindigkeit*,  $TAS$  (*True airspeed*) benötigt. Also die Geschwindigkeit mit der sich das Flugzeug durch die umgebende Luft bewegt. Diese kann wie die Flughöhe, abhängig von Flugstrecke, Flugzeugtyp und Ladefaktor, aus der *BADA 4* Datenbank gewonnen werden. Dabei ergeben sich wieder für die beiden Einzelflüge je eine Geschwindigkeit. Als Formationsfluggeschwindigkeit wird die Niedrigere ausgewählt. Das hilft der Verringerung von Kompressibilitätseffekten und befindet sich innerhalb der Flugleistungsgrenzen beider Formationsteilnehmer. Zur Ermittlung der Machzahl fehlt noch eine Information über die Schallgeschwindigkeit  $a_{Schall}$  in der Formationsflughöhe. Diese kann anhand der Internationalen Standardatmosphäre einfach bestimmt werden.

Sobald alle Parameter zur Abschätzung von  $\lambda$  bestimmt wurden, kann jede Formation hinsichtlich ihrer zu erwartenden Treibstoffeinsparung bewertet werden. Da es mitunter einen entscheidenden Unterschied macht welches Flugzeug der *Leader* ist und welches der *Follower*, wird die Anordnung variiert und jede Formation zwei Mal bewertet. Die *Leader / Follower* Kombination mit dem höheren  $\lambda$  wird anschließend gewählt.

An dieser Stelle kann dann auch der Zeitpunkt des Erreichens des *Break up* Punktes bestimmt werden, da nun die Fluggeschwindigkeit der Formation bekannt ist.

Abschließend werden für jede Formation die folgenden Informationen ausgegeben.

- Formation-ID
- Flight-ID Teilnehmer 1
- Flight-ID Teilnehmer 2
- *Rendezvous* latitude
- *Rendezvous* longitude
- *Rendezvous* time
- *Break up* latitude
- *Break up* longitude
- *Break up* time
- Flight-ID Leader
- $\lambda$
- Formationsflughöhe
- Formationsmachzahl

Die Bewertung der Formationen zeigt eine auffällig hohe Zahl an negativen Bewertungen. Also Formationen, die statt zu einer Treibstoffeinsparung zu einem Mehrverbrauch führen. **Abbildung 3.27** zeigt die Bewertungen aller Formationen. Der durchschnittliche  $\lambda$  Wert liegt bei 0,3%. Die Bewertungen streuen stark zwischen dem Minimum bei  $-19,85\%$  und dem Maximum bei  $16,61\%$ .

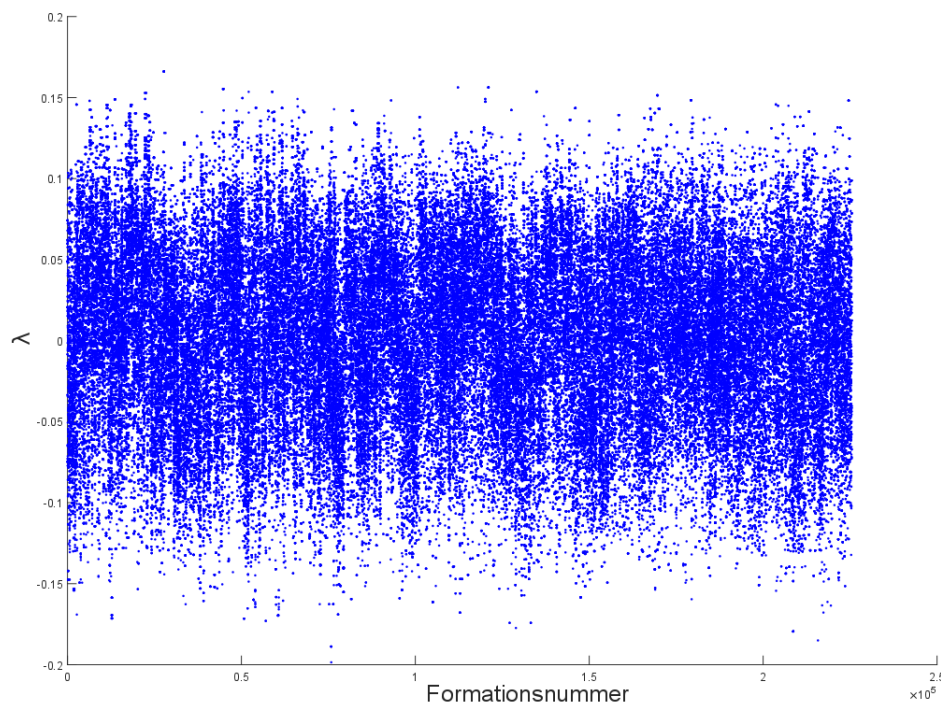


Abbildung 3.27: Streuung der  $\lambda$  Bewertungen aller 225.459 identifizierten Formationen

Die Standardabweichung um den Mittelwert beträgt 4,89%. **Abbildung 3.28** zeigt, dass die Anzahl der positiven Bewertungen größer ist, als die der Negativen. Dennoch lässt sich von einer annähernden Normalverteilung ausgehen.

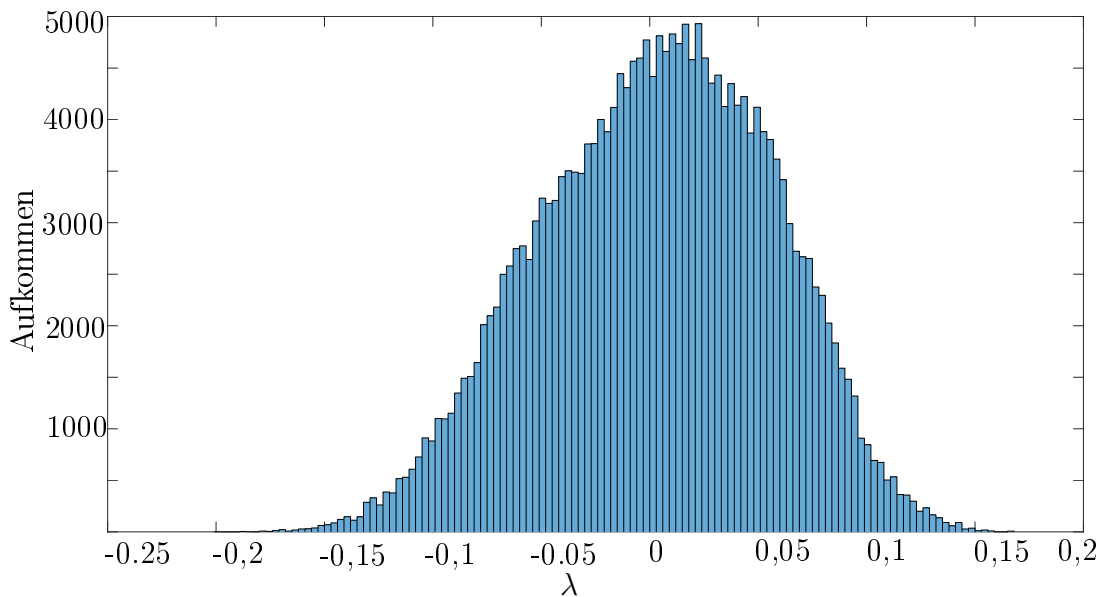


Abbildung 3.28: Häufigkeitsverteilung der  $\lambda$  Bewertungen der identifizierten Formationen

Im Hinblick auf die Vorfilterung lässt sich vermuten, dass die Vorfilter zu viele Formationen als potentiell gute Formationen klassifiziert haben. Davon ausgehend, wäre eine Verschärfung der Filterkriterien eine naheliegende Anpassung. Jedoch muss ebenfalls bedacht werden, dass die von den Filtern identifizierten Formationen in der Routenmodellierung noch angepasst werden. Aufgrund der gewählten Randbedingungen, die die Geschwindigkeitsanpassungen und Änderungen in den Abflugzeiten ausschließen, weichen die bestmöglichen Formationsrouten von den optimalen geographischen Routen ab. Dabei kann es zu positivem und negativem Einfluss auf die Metrik  $\lambda$  kommen. **Abbildung 3.29** zeigt exemplarisch für eine Formation die optimale Flugroute nach dem geometrischen Verfahren und die bestmögliche Route unter Berücksichtigung der Abflugzeiten.

Die Abweichung der beiden *Rendezvous* Punkte in **Abbildung 3.29** reicht aus, um von einer mit 0,9% positiv bewerteten Route (optimale Route, grün) zu einer negativen Bewertung (schwarze Linie) von  $-1,15\%$  zu gelangen.

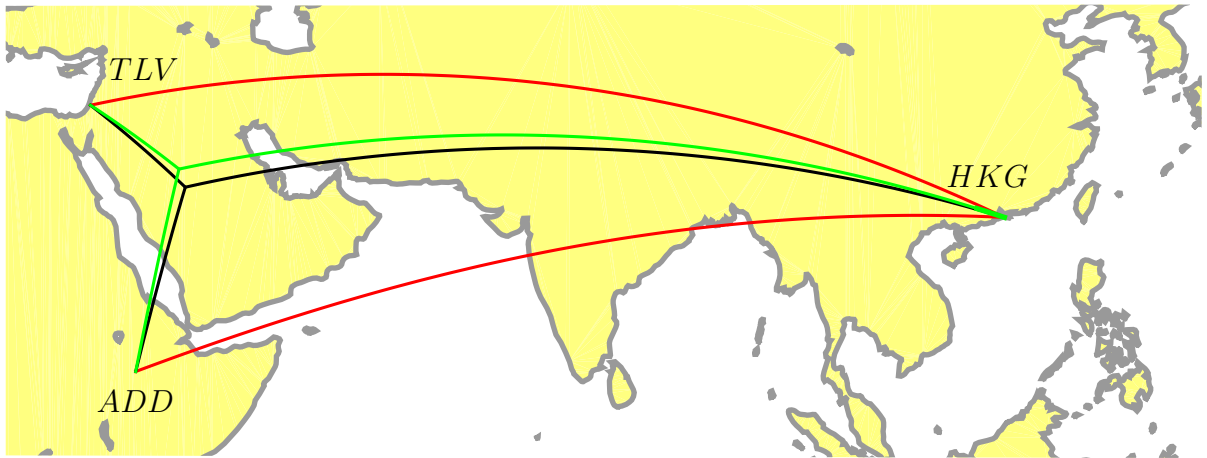


Abbildung 3.29: Auswirkung eines verschobenen *Rendezvous* Punktes auf die Bewertung der Formation

Eine Auswertung der berechneten  $\lambda$ -Bewertungen im Hinblick auf die Parameter der Filterung lässt Trends erkennen. Jedoch scheint es kaum möglich anhand dieser Trends pauschal gültige Aussagen zu treffen, wie **Abbildungen 3.30 bis 3.33** nahe legen. Die Ergebnisse streuen stark, so dass eine Verschärfung der Filterkriterien zwar viele ungeeignete Formationen streichen würde, aber dabei eine ungewisse Zahl an aussichtsreichen Formationen übergehen würde.

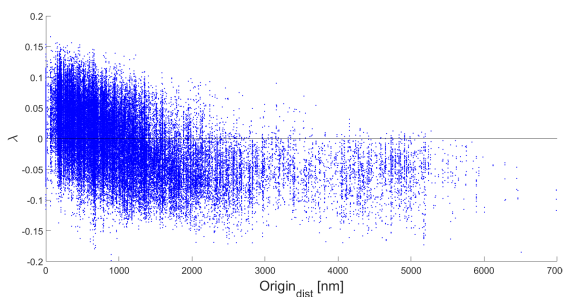


Abbildung 3.30:  $\lambda$  über Entfernung der Abflughäfen

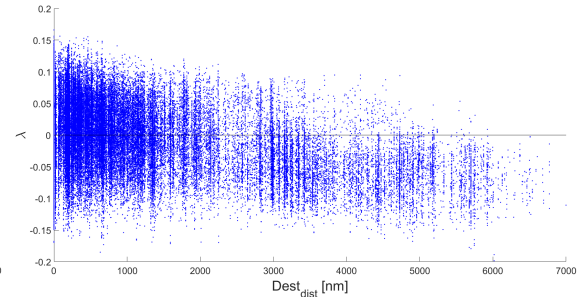


Abbildung 3.31:  $\lambda$  über Entfernung der Zielflughäfen

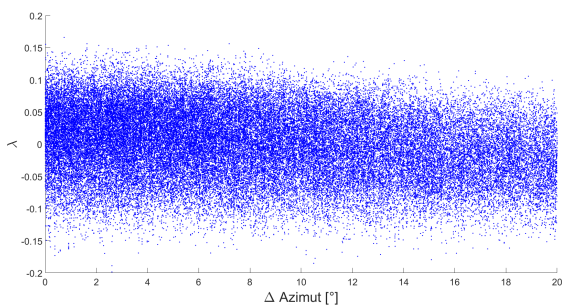


Abbildung 3.32:  $\lambda$  über Abweichung der Azimutwinkel

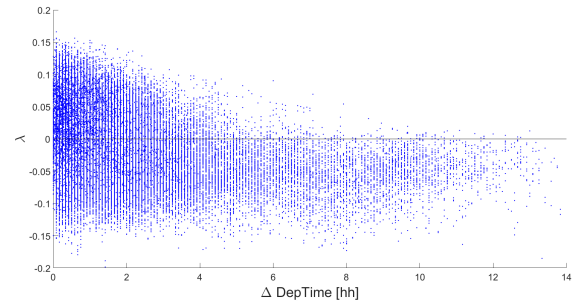


Abbildung 3.33:  $\lambda$  über Differenz der Abflugzeiten

Im Hinblick auf die Entfernungen zwischen den jeweiligen Abflug- und Zielflughäfen, lässt sich in **Abbildung 3.30** und **3.31** erkennen, dass bis zu einem Abstand von ca.

6000nm noch Formationen mit Treibstoffeinsparungen gefunden werden können. Ein entsprechendes Filterkriterium, das Entfernungen über 6000nm nicht zulässt, würde zudem auch nur noch wenige Formationen ausschließen. Dieses pauschale Kriterium birgt die Gefahr, aussichtsreiche Formationen zu ignorieren und leistet nur einen kleinen Beitrag zur Datenreduktion.

Ähnliches zeichnet sich in **Abbildung 3.33** ab. Größer werdende Differenzen der Abflugzeiten, erlauben immer weniger Treibstoff einsparende Formationen. Jedoch gibt es auch hier Ausnahmen von dem erkannten Trend. Im Unterschied zu den Entfernungen, lässt sich aber eine größere Menge an Formationen ausmachen, die sich herausfiltern lassen würden. Jedoch würde eine Verschärfung der Filter bis zu einer Zeitdifferenz von über 12 Stunden noch aussichtsreiche Formationen übergehen.

Bei der Diskussion über eine Anpassung der Filter, muss entschieden werden, ob ein Übersehen hinnehmbar ist. Formationen, die die Vorfilter passieren und anschließend doch verworfen werden, stellen kein Problem dar. Nachteilig ist lediglich der höhere Rechenaufwand, durch die größere Anzahl an potentiellen Formationen, die modelliert werden müssen. Mit verschärften Filterkriterien ließe sich eine Reduktionen der Datenmenge und damit der Rechenzeit erreichen. Allerdings nur als Kompromiss, der Gefahr läuft aussichtsreiche Formationen durch pauschale Kriterien zu ignorieren.

## 3.7 Formationsauswahl

Dieses Kapitel erläutert, wie aus den identifizierten Formationen ein valider Formationsflugplan erstellt wird. In einem solchen Plan, darf jedes Flugzeug maximal einer Formation zugeordnet werden. Für den Fall, dass ein Flug keiner Formation zugeordnet wird, fliegt dieser Flug nach dem ursprünglichen -Flugplan.

Die identifizierten Formationen sind alle im Hinblick auf Treibstoffeinsparung bewertet worden, so dass alle Formationen mit einander verglichen werden können. Formationen, die ein negativen  $\lambda$  Wert aufweisen, würden im Formationsflug mehr Treibstoff verbrauchen, als im Einzelflug. Da der Einzelflug zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs die bessere Wahl darstellt, werden alle Formationen mit negativem  $\lambda$  aus der Liste der identifizierten Formationen entfernt. Die Anzahl der zur Auswahl stehenden Formationen hat sich im Laufe der Routenmodellierung und Bewertung immer weiter reduziert. Die nachfolgende **Tabelle 3.3** gibt eine Übersicht über den Verlauf der Datenmenge.

Zur Erstellung des Formationsflugplans kann aus 121052 Formationen gewählt werden. Bei 34150 betrachteten Flügen bestehen für jeden Flug durchschnittlich über 3 Flüge als Formationspartner zur Wahl. Maximal lassen sich bei dieser Menge an betrachteten Flügen 17075 Formationen bilden. In diesem Fall wäre jeder betrachtete Flug einer Formation zugeordnet.

Mit dieser großen Anzahl an möglichen Formationen, lässt sich eine Vielzahl an Kombinationen finden. Es soll jedoch eine Kombination mit einer möglichst hohen globalen Treibstoffeinsparung gefunden werden. Die naheliegende Lösung ist es, für jeden Flug eine Liste mit den Formationen zu erstellen an denen dieser Flug beteiligt ist. Aus dieser individuellen Formationsliste soll dann diejenige Formation

Vorgang	Abzug	Formationen
Theoretisch mögliche Formationen		$> 1 * 10^9$
Identifizierte Formationen durch Vorfilterung		2 584 718
Nicht modellierbare Formationen	161 566	2 423 152
Gleicher Abflughafen Einholen nicht möglich	33 237	2 389 915
Rendezvous nicht möglich	289 641	2 100 274
Umwegparameter außerhalb des Bewertungsbereichs	1 832 788	267 486
Formationen mit Beteiligung der A310	42 027	225 459
Negativ bewertete Formationen	104 407	121 052

Tabelle 3.3: Verlauf der Formationsanzahl im Zuge der Vorfilterung, Routenmodellierung und Bewertung

ausgewählt werden, die den höchsten  $\lambda$  Wert aufweist. Es wird auf diese Weise also die jeweils beste Formation, je Flug ausgewählt. Da eine Formation immer aus zwei Flugzeugen besteht, ist es bei dieser Auswahl möglich, dass die ausgewählte Formation nicht die optimale Formation für den zweiten Flug ist. Folglich besteht für jede Formation der Zweifel, ob die Formation aus Sicht beider Partner die jeweils Beste ist. Neben dem Bestreben jedes einzelnen Fluges, den bestmöglichen Formationspartner zu finden, steht die globale erreichbare Summe aller Einsparungen. Die Suche nach diesem Maximum ist ein Optimierungsproblem, da für die maximale globale Treibstoffeinsparung nicht zwangsläufig jedem Flug der individuell beste Formationspartner zugeordnet werden würde. Ferner müsste jede Formation anstelle einer relativen Größe, wie der Metrik  $\lambda$ , durch eine absolute Summe an einzusparendem Kraftstoff charakterisiert sein. Diese Arbeit konzentriert sich darauf, aus den identifizierten Formationen auf die dargelegte Weise einen validen Formationsflugplan zu erstellen. Nachdem eine Formation ausgewählt wurde, müssen die teilnehmenden Flugzeuge als zugeordnet markiert werden, um weiteren Formationen nicht zur Verfügung zu stehen. Für die ausgewählten Formationen werden im Anschluss noch weitere Formationsparameter, wie z.B. die Ankunftszeit, berechnet. Die Berechnung dieser Formationsparameter findet erst nach der Auswahl statt, da diese Informationen nur für die ausgewählten Formationen von Bedeutung sind. Für die spätere Auswertung und Analyse des erzeugten Formationsflugplans werden die zuvor errechneten Parameter gespeichert.

Insgesamt konnte der vorgestellte Algorithmus zur Erstellung des Formationsflugplans 9863 Formationen bilden. Das bedeutet, dass sich von den 34150 betrachteten Flügen 57% einer Formation zuweisen lassen, die zu einer Treibstoffeinsparung führt. Der durchschnittliche  $\lambda$ -Wert beträgt im erstellten Flugplan 0,0544. Die Formationen führen im Mittel zu einem um 5,44% verringerten Treibstoffverbrauch gegenüber den Einzelflügen.

## 3.8 Umsetzung

Dieses Kapitel soll einen Einblick in die Umsetzung der entwickelten Methodik geben. Besonders der Umgang mit den großen Datenmengen und die damit verbundenen Schwierigkeiten werden erläutert.

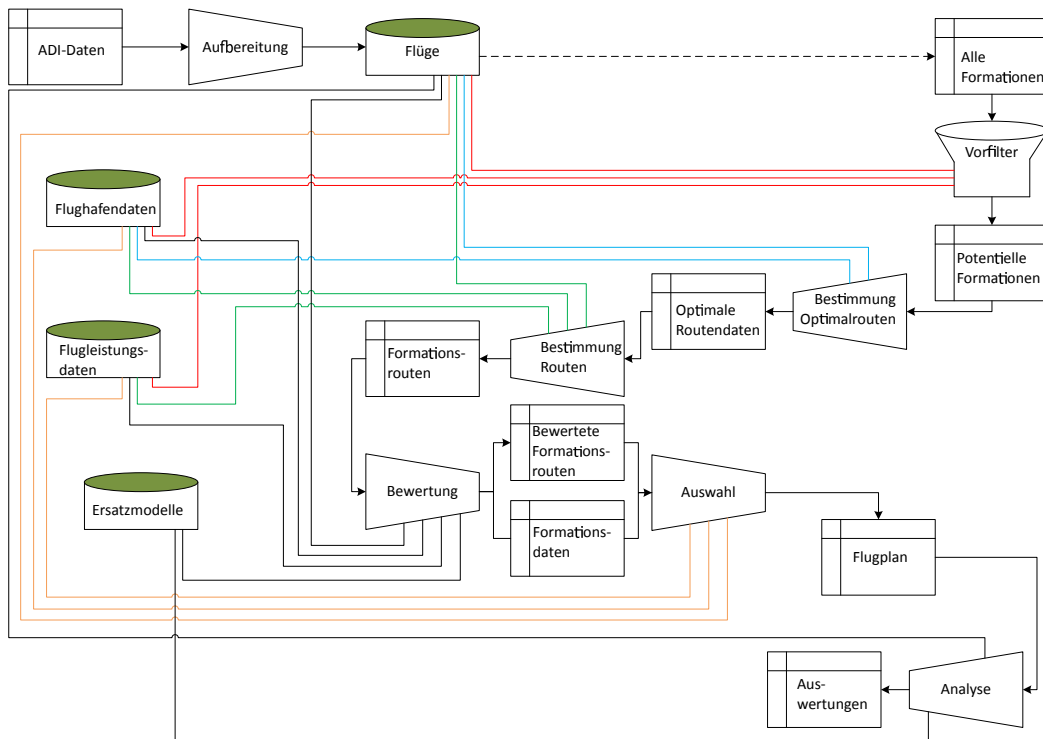


Abbildung 3.34: Modularer Aufbau des Programmcodes mit Zugriffen zwischen den Modulen

Der folgende Ablauf und Programmcodes hat sich sukzessive entwickelt. Der Aufbau des Programmcodes ist modular und die Abfolge ist in Anlehnung an den Aufbau dieser Arbeit erstellt worden. **Abbildung 3.34** zeigt die Module und deren Beziehung zu einander in der Übersicht. Die Inhalte der Module sind in den vorherigen Kapiteln bereits erklärt worden, während der Aufbau der einzelnen Module im Anhang beschrieben wird. Jedes Modul wird mit Eingangsdaten versorgt und erstellt seinerseits eine Ausgabe. Die Module greifen dazu auf verschiedene Datenbanken zu. Die Datenbanken sind global definiert und können aus jedem Modul angesprochen werden. Die Flughafendatenbank enthält die geographische Position und die lokale Zeitzone aller Flughäfen. Die Module können somit anhand des IATA-Codes des Flughafens, die benötigten Informationen erhalten. Die Datenbank mit Informationen zu den Flugleistungseigenschaften der Flugzeuge, basiert auf der bereits erwähnten BADA 4 Datenbank von EUROCONTROL. Neben den Informationen zur Steig- und Sinkleistung lassen sich Informationen zur wahren Reisefluggeschwindigkeit und Flughöhe abfragen. Dazu muss der Flugzeugtyp, die Flugstrecke und der Ladefaktor an die Datenbank übermittelt werden. Die Ersatzmodelle zur Bewertung der Formationen stammen von Marks et al. [32] und erlauben die Bewertung aller Kombinationen der sieben hier betrachteten Flugzeugtypen.

Das Einlesen der ADI-Daten im *.csv*-Format ist sehr zeitaufwendig, sodass alle weiteren Daten im *.mat*-Format gespeichert werden. Die Ladezeiten und Speicherzeiten betragen hier wenige Sekunden. Nachdem aus den ADI-Daten die zu betrachteten Flüge herausgefiltert wurden und die Datensätze für die weitere Verarbeitung aufbereitet wurden, stehen diese als Flugdatenbank allen folgenden Modulen zur Verfügung. Es müssen also nicht die gesamten Informationen zu einem Flug weitergegeben werden, sondern nur eine Identifikationsnummer. Jedes Modul kann anhand dieser Identifikationsnummer alle benötigten Informationen zu einem Flug abfragen.

Aus der Anzahl der Flüge in der erstellten Flugdatenbank, lässt sich die Formationsmatrix mit allen theoretisch möglichen Formationen ableiten. Die sich ergebende Matrix, wie in **Abbildung 3.9** dargestellt, wäre zu groß um sie auf herkömmliche Weise in den Arbeitsspeicher zu laden. Es muss auf sogenannte *sparse-Matrizen* ausgewichen werden. Diese verbrauchen deutlich weniger Speicherplatz, da nur die Elemente ungleich 0 abgespeichert werden.

In einem ersten Entwurf wurden die Filterstufen als zwei ineinander geschachtelte *for-Schleifen* aufgebaut. Die so zu erwartenden Rechenzeiten lagen bei mehreren Wochen. Abhilfe zur Beschleunigung konnte durch Vektorisierung und Parallelisierung des Codes erreicht werden. Die Parallelisierung nutzt mehrere Prozessorkerne zur gleichzeitigen Ausführung der Schleifendurchläufe. Unter Vektorisierung versteht man, das gleichzeitige Anwenden einer Rechenoperation auf mehrere Variablen, also einen Vektor. Auf diese Weise lassen sich *for-Schleifen* durch vektorisierten Code ersetzen, was die Leistung und Schnelligkeit erhöht. Nachteilig ist dabei, dass der Code unübersichtlich wird; eine *for-Schleife* lässt sich im Gegensatz intuitiv leichter nachvollziehen.

Trotz aller Bemühungen zur Beschleunigung des Codes sind die Rechenzeiten immer noch lang, wie **Tabelle 3.4** zeigt. Die Beschleunigungsmaßnahmen waren jedoch nötig, um akzeptable Rechenzeiten zu erzielen. Für alle Berechnungen wurde ein Desktop-PC eingesetzt. Der Computer verfügt über einen AMD Athlon™ Dual Core Processor 5000B mit 2,6 GHz und 6 GB Arbeitsspeicher. Implementiert wurde das Modell in MATLAB® R2014b. Zur Berechnung von Entfernungen und Schnittpunkten von Großkreisen, Großkreissegmenten und Kleinkreisen wurde die MATLAB® Mapping Toolbox™ benutzt. Insgesamt beträgt die benötigte Rechenzeit über 170 Stunden, also knapp eine Woche.

Modul	Rechenzeit [hh:mm]
Filter maxTime	5:30
Filter maxDistance	15:45
Filter Azimutwinkel	9:00
Filter indTime	1:30
Filter indDistance	1:00
Filter Routenschnitt	16:30
Ermittlung optimale Routen	46:00
Ermittlung bestmögliche Routen	60:00
Bewertung der modellierten Formationen	15:00
Erstellung eines validen Formationsflugplan	1:00

Tabelle 3.4: Rechenzeiten der einzelnen Module





## 4. Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich der Analyse und Interpretation der Ergebnisse, die mit der entwickelten Methode erzeugt wurden. Das vorliegende Ergebnis ist ein Formationsflugplan. Dieser besteht aus den Flugdaten der Einzelflüge und weiteren Parametern, die die Formation beschreiben. Die folgende Auswertung soll die Eigenschaften dieses Formationsflugplans behandeln. Die Einflüsse der einzelnen Parameter, wie Umwege oder Differenzen der Abflugzeiten, auf die Treibstoffeinsparung einer Formation können hier nicht untersucht werden. Die Treibstoffeinsparung ist von mehreren, teils gekoppelten, Parametern abhängig und das vorliegende Ergebnis ist lediglich eine Auswahl der identifizierten Formationen. Um die Sensitivitäten der Parameter zu untersuchen, müssten Formationen unter systematischer Variation der Parameter simuliert werden. Der Datensatz mit Flügen, aus dem der Formationsflugplan abgeleitet wurde, ist zudem als Stichprobe aller Flüge zu verstehen. Die Ergebnisse des hier untersuchten Formationsflugplans lassen sich daher nicht für die Gesamtheit des Weltluftverkehrs direkt übernehmen. Die folgende Betrachtung der Ergebnisse wird sich also mit der Gestalt des erzeugten Formationsflugplans befassen. Neben der global erreichbaren Treibstoffeinsparung, sind die damit verbundenen Auswirkungen auf den Flugplan der betrachteten Woche von Interesse.

### 4.1 Allgemeine statistische Auswertungen

Der erste Abschnitt stellt die Ergebnisse vor und führt einige Statistiken zur ersten Auswertung des Formationsflugplans an.

Aus den 34510 Flügen in der Flugdatenbank konnten 9863 Formationen gebildet werden. Das bedeutet über 57% der betrachteten Flüge lassen sich einer treibstoffeinsparenden Formation zuordnen. Die übrig bleibenden 14784 Flüge fliegen unverändert nach dem ursprünglichen Flugplan. Der erstellte Flugplan besteht somit aus einer Gruppe von Formationen und einer weiteren Gruppe aus Einzelflügen. Alle ausgewählten Formationen lassen sich dabei ohne Veränderung der Abflugzeiten oder Anpassungen der Fluggeschwindigkeit bilden. Der gefundene Formationsflugplan beschreibt daher, wie sich der Formationsflug auf Grundlage eines realen Flugplans, umsetzen ließe. Weitere, allgemeine Angaben zu dem erstellten Formationsflugplan sind in **Tabelle 4.1** zusammengefasst.

Betrachteter Zeitraum	6. bis 12.10.2014
Anzahl der zugrunde liegenden Flüge	34.510
Theoretisch mögliche Formationen	$> 1,19 * 10^9$
Durch Vorfilterung identifizierte Formationen	2.584.718
Zur Auswahl stehende Formationen nach Bewertung	121.052
Potentielle Formationspartner pro Flug	3, 5
Gebildete Formationen	9.863
Flüge in Formation	19.726
Verbleibende Einzelflüge	14.784
Durchschnittliche Treibstoffeinsparung	5,44%

Tabelle 4.1: Überblick Formationsflugplan

Die ausgewählten Formationen lassen sich in vier verschiedene Arten einteilen. Die am häufigsten vorkommende Formation besteht aus jeweils verschiedenen Abflug- und Zielflughäfen. Daneben gibt es Formationen mit unterschiedlichen Zielen, die aber von einem gemeinsamen Abflughafen starten. Anders herum können zwei Flüge einer Formation denselben Zielflughafen haben, aber von verschiedenen Flughäfen gestartet sein. Der vierte und seltenste Fall ergibt sich, wenn beide Flüge denselben Abflug- und Zielflughafen aufweisen. **Tabelle 4.2** zeigt die Verteilung auf die vorgestellten Arten.

Formationsart	Anzahl	$\lambda_{mittel}$
Unterschiedliche Ab- und Zielflughäfen	6311	5,44%
Gleicher Abflughafen	671	3,56%
Gleicher Zielflughafen	2817	5,9%
Gleicher Ab - und Zielflughafen	64	2,49%

Tabelle 4.2: Formationsarten nach Ab- und Zielflughäfen sowie durchschnittliche Treibstoffeinsparung

In **Tabelle 4.2** zeigen die Formationen mit gleichem Zielflughafen ein überdurchschnittlich hohes  $\lambda$ . Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der *Break up* Punkt nur durch die Sinkflugphasen der beteiligten Flüge verschoben wird. Diese Flüge zeigen also eine lange gemeinsame Formationsphase. Auffällig ist dagegen, dass die Formationen mit gleichem Abflughafen in Relation deutlich schlechter bewertet werden. An dieser Stelle, zeigt sich eine nachteilige Eigenschaft der gewählten Randbedingungen. Da auf Anpassungen der Fluggeschwindigkeiten und Abflugzeiten verzichtet wird, kommen Formationen von gleichen Abflughäfen nur zustande, wenn der spätere Flug in der Lage ist, den früher Startenden einzuholen. Die nach der Einholphase übrig bleibende Formationsphase ist somit kürzer und erklärt die niedrige Bewertung. Die geringe Anzahl der Formationen mit gleichem Abflughafen, erklärt sich damit, dass ein Einholen mit den vorgegebenen Fluggeschwindigkeiten in der Mehrzahl der Fälle nicht möglich ist. Die erklärten Effekte der Formationen mit gleichem Abflughafen, gelten ebenfalls für die Formationen mit gleichem Ab- und Zielflughafen.

Zu Anfang dieser Arbeit wurde die Verteilung der Flugzeugtypen im Flugplan vorgestellt. Eine ähnliche Auswertung lässt sich mit dem Formationsflugplan anstellen.

Dabei muss bedacht werden, dass sich die Verteilung der Flugzeugtypen im Ausgangsflugplan in der Häufigkeit der Formationsteilnahmen widerspiegelt. An dieser Stelle steht jedoch die Verteilung auf *Leader* und *Follower* im Vordergrund. **Abbildung 4.1** zeigt wie oft ein Flugzeugtyp an einer Formation teilnimmt und in welcher Rolle.

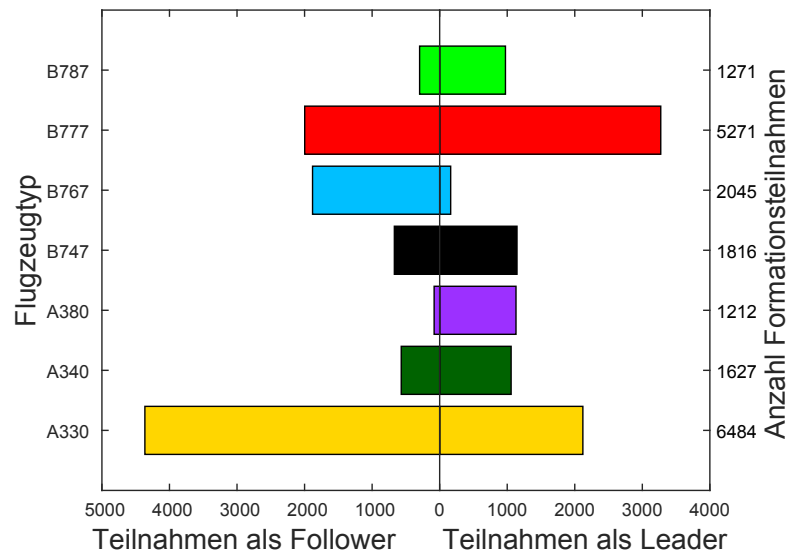


Abbildung 4.1: Anzahl der Formationsteilnahmen und Position nach Flugzeugtyp

Die Darstellungen in **Abbildung 4.1** zeigen deutliche Unterschiede in der Häufigkeit der Formationsteilnahme als *Leader*. So ist der Airbus A380 in 93% seiner Formationsteilnahmen als *Leader* beteiligt. Wie in den Grundlagen dieser Arbeit dargelegt, sind die Intensitäten der erzeugten Wirbel abhängig von dem Gewicht des *Leaders*. Für besonders schwere Flugzeuge, wie im Falle des Airbus A380, ist die hohe *Leader-Quote* nachvollziehbar. Das Gewicht des Flugzeuges im Flug setzt sich aus dem Strukturgewicht, der zugeladenen Nutzlast und dem Kraftstoffgewicht zusammen. Das Strukturgewicht ist ein fixer Parameter, die Zuladung wird über den Ladefaktor modelliert und ist in dieser Studie für alle Flüge gleich. Es bleibt das Kraftstoffgewicht, welches über die Routenlänge in die Modellierung eingeht. Flüge mit großen Flugzeugen, auf verhältnismäßig kurzen Strecken, werden durch die geringe Kraftstoffmasse dann mitunter zu ungeeigneten *Leadern*. Besonders auffällig sind die Flugzeuge B767 und A330, da beide die geringsten *Leader-Quoten* vorweisen können. Es lässt sich demnach schlussfolgern, dass die verschiedenen Flugzeugtypen unterschiedlich gut als *Leader* geeignet sind.

## 4.2 Analyse der Formationsparameter

Nachdem das letzte Kapitel die Einsparmöglichkeiten des Formationsflugs vorgestellt hat, soll dieses Kapitel untersuchen, welche Aufwände für diese Einsparungen nötig sind.

Damit Formationen zustande kommen, müssen in den meisten Fällen Umwege geflogen werden. Im Mittel beträgt die Flugstrecke aller in dieser Arbeit betrachteten Flüge  $3320,7nm$ . Der durchschnittliche, relative Umweg eines Fluges bei Teilnahme an einer Formation liegt bei  $3,19\%$ . Ein durchschnittlicher Flug muss demzufolge, bei Formationsteilnahme, einen Umweg von  $105,93nm$  in Kauf nehmen. Die Längen der Umwege beider Teilnehmer einer Formation können sich dabei jedoch unterscheiden, sind in ihrer Häufigkeit jedoch ähnlich verteilt, wie **Abbildung 4.2** verdeutlicht. Die beiden Teilnehmer einer Formation werden im Rahmen dieser Auswertung als *Flug A* und *Flug B* bezeichnet.

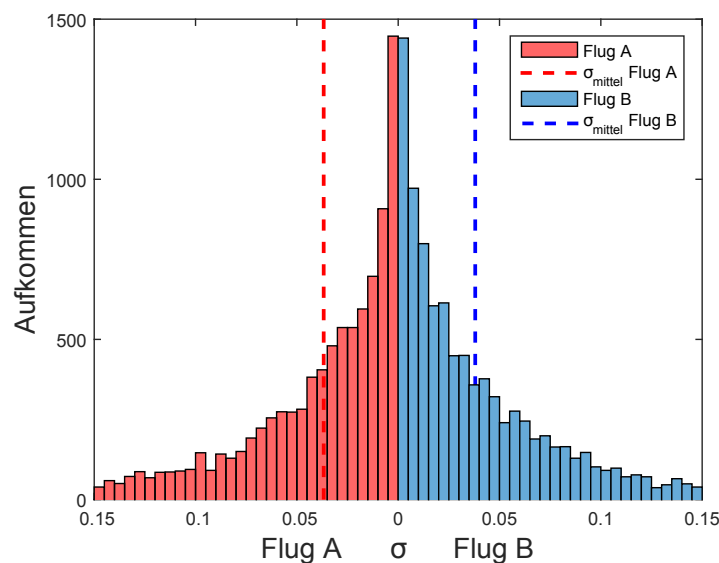


Abbildung 4.2: Häufigkeitsverteilung und Durchschnitt der relativen Umwege  $\sigma$  beider Formationsteilnehmer

Kleine  $\sigma$ -Werte bedeuten eine geringe Abweichung von der Referenzroutenlänge. Formationen mit nur geringen Umwegen sind häufiger zu finden, als Formationen mit großen Umwegen. Die Bewertung einer Formation hängt zwar, wie zuvor erklärt, von 11 Parametern ab, jedoch ist der Schluss zulässig, dass sich ein kurzer Umweg positiv auf die Bewertung auswirkt. Die in **Abbildung 4.2** zu sehende Verteilung der Umwege wurde um 989 negative  $\sigma$ -Werte bereinigt. Diese knapp unter null liegenden Werte lassen sich mit den verschiedenen benutzten Datenquellen und den Formationen mit gleichen Ab- oder Zielflughäfen erklären. Bei Formationen mit großer Ähnlichkeit zwischen den Einzel- und Formationsrouten, ergeben sich die Längen der Prä- und Postformationsphasen maßgeblich aus den Längen der Steig- und Sinkflugphasen. Diese basieren auf der *BADA 4* Datenbank, während die übrigen Entfernungen auf den ADI-Daten beruhen. Außerdem konnte als Eingangsgrößen zur Bestimmung der Steig- und Sinkflugphasen nicht immer die genaue Version

eines Flugzeugtyps verwendet werden, da die ADI-Daten dafür keine durchgehende Detailtiefe vorweisen.

Der relative Umweg kann, wie zuvor geschehen, zur Beschreibung und zur Bewertung einzelner Formationen genutzt werden. Darüber hinaus gibt er aber weiterhin Auskunft über das zusätzliche Verkehrsaufkommen. Global erhöht sich im hier betrachteten Fall die zurückgelegte Flugstrecke um 3,19%. Besonders aus Sicht der Flugsicherung und der Verwaltung der Luftraumkapazitäten ist diese Zahl von Bedeutung. Die Erhöhung der zurückgelegten Flugstrecke kann in diesem Zusammenhang als zusätzliches Verkehrsaufkommen verstanden werden.

Eine weitere Charakteristik der Formationen ist die relative Länge der Formationsphase  $\xi_{ben}$ . Die Flugzeuge fliegen bis zum *Rendezvous* Punkt und dann ab dem *Break up* Punkt allein. Dazwischen liegt die Formationsphase, in der es zur Treibstoffeinsparung kommt. **Abbildung 4.3** zeigt die Häufigkeitsverteilung der relativen Formationsphasenlängen für alle Formationsteilnehmer. Im Mittel beträgt die relative Länge der Formationsphase 76,76% für die beiden Formationsteilnehmer. Trotz des hohen Mittelwerts zeigt sich, dass einige Formationen nur eine sehr kurze Formationsphase vorweisen können.

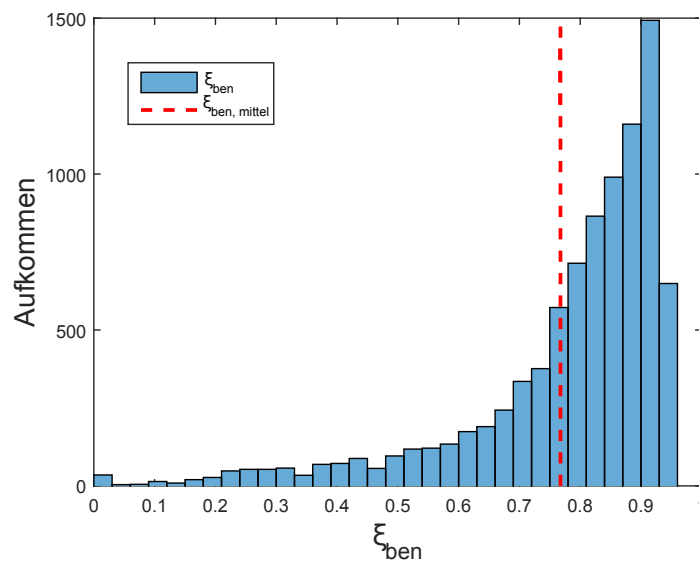


Abbildung 4.3: Häufigkeitsverteilung und Durchschnitt der relativen Länge der Formationsphase  $\xi_{ben}$

Im Hinblick auf eine operationelle Umsetzung sollte eine Mindestgröße für  $\xi_{ben}$  definiert werden, ab der Formationen gebildet werden. Es ist dafür zu untersuchen, ab welcher Formationsphasenlänge sich der Aufwand in Form der *Rendezvous* und *Break up* Manöver lohnt. Global betrachtet ist  $\xi_{ben}$  für beide Teilnehmer ähnlich verteilt. Das Verhältnis zwischen den  $\xi_{ben}$ -Werten beider Teilnehmer, offenbart indes, dass es neben den in **Tabelle 4.2** dargestellten, noch weitere Formationsarten zu unterscheiden gilt. **Abbildung 4.4** zeigt beispielhaft die  $\xi_{ben}$ -Werte beider Teilnehmer von 25 Formationen des erstellten Formationsflugplans.

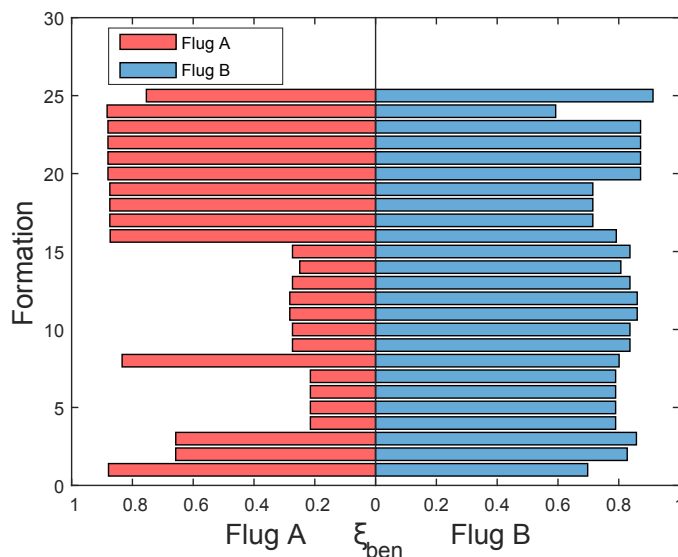


Abbildung 4.4: Ausschnitt der relativen Länge der Formationsphase  $\xi_{ben}$  beider Formationsteilnehmer

Die Längen der relativen Formationsphasen können für beide Teilnehmer ähnlich lang sein, wie es im oberen Teil der Darstellung in **Abbildung 4.4** der Fall ist. Eine Formation mit ähnlichen  $\xi_{ben}$ -Werten ist in **Abbildung 4.5** dargestellt.

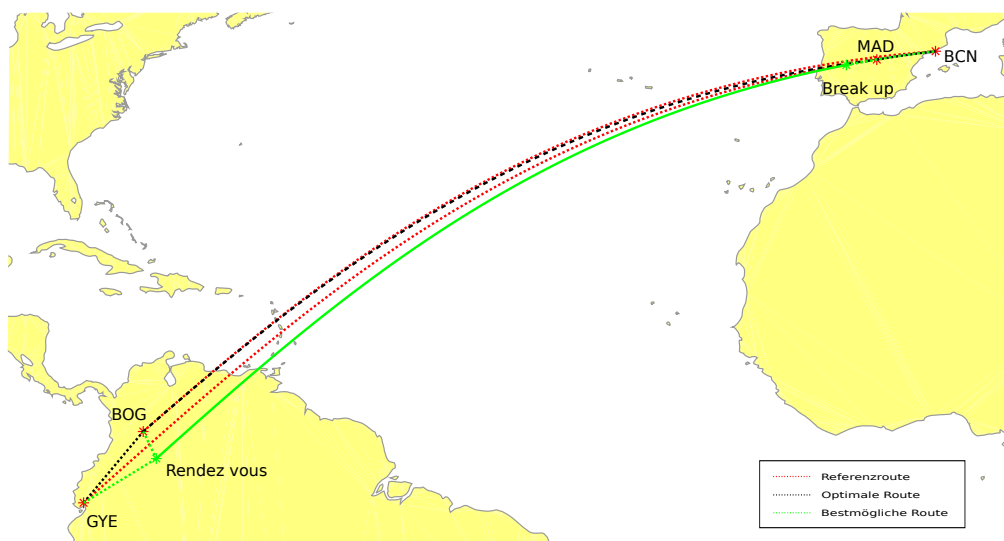


Abbildung 4.5: Formationsroute mit ähnlichem  $\xi_{ben}$  für beide Teilnehmer

Die Flugrouten der Flüge von Bogota (*BOG*) nach Barcelona (*BCN*) und von Guayaquil (*GYE*) nach Madrid (*MAD*) liegen nicht weit auseinander. Die relativen Anteile der Formationsphasen betragen 88,13% und 87,09%. Bei Betrachtung dieser beiden Flüge leuchtet die Formationfähigkeit unmittelbar ein.

Die Formationen im unteren Teil der Darstellung in **Abbildung 4.4** unterscheiden sich hingegen zum Teil stark in ihren relativen Längen der Formationsphasen. Dieser Fall tritt ein, wenn ein Flugpaar über geringere Ähnlichkeit in den Flugrouten

verfügt. Im Falle einer Formation zeigen sich dann deutlich verschiedene  $\xi_{ben}$ -Werte, wie in **Abbildung 4.6** zu sehen.

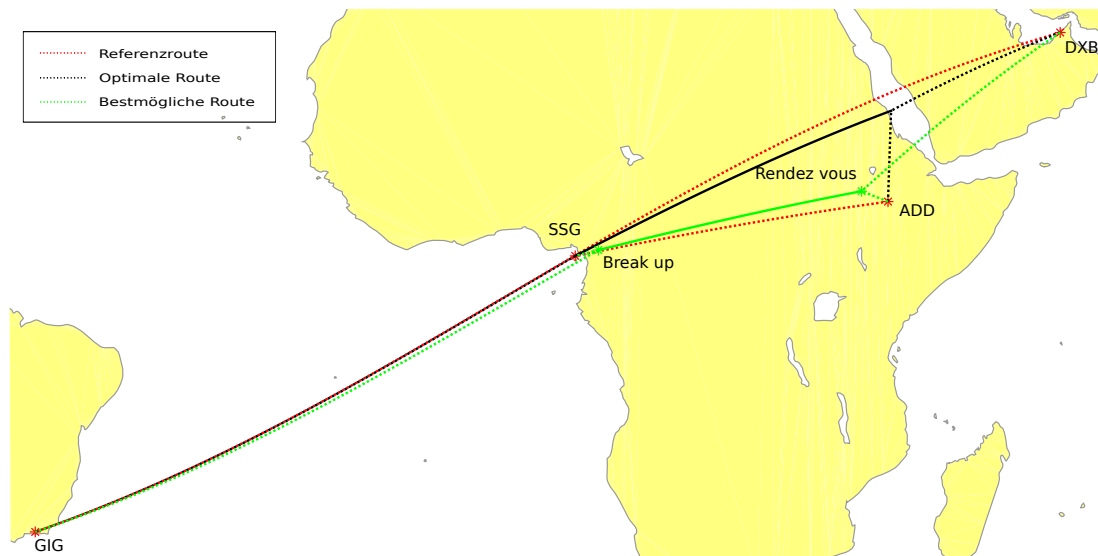


Abbildung 4.6: Formationsroute mit deutlich verschiedenen  $\xi_{ben}$  für beide Teilnehmer

Der Flug von Dubai (*DXB*) nach Rio de Janeiro (*GIG*) bildet hier eine Formation mit einem deutlich kürzeren Flug von Addis Abeba (*ADD*) nach Malabo (*SSG*). Der in Dubai (*DXB*) startende Flug passt seine Route an, um mit dem in Addis Abeba (*ADD*) startenden Flug eine Formation zu bilden. Die gemeinsame Formationsphase über Zentralafrika bedeutet für den Flug aus Dubai (*DXB*) einen  $\xi_{ben}$ -Wert von 23,64%, während der Flug aus Addis Abeba (*ADD*) 83,76% seiner Flugstrecke in Formation fliegt. Bei dieser Art der Formation liegt ein kürzerer Flug sozusagen auf dem Weg eines längeren Fluges und wird abgeholt.

Rückblickend auf die diskutierte Verschärfung der Filterkriterien, zeigt sich, dass auch Formationen, die zunächst nicht unmittelbar einleuchtend wirken, zu einer Treibstoffeinsparung führen können. Die dargestellte Formation bringt es, trotz der im Vergleich kurzen Formationsphase, zu einer Treibstoffeinsparung von 2,67%. Die beiden Abflughäfen liegen dabei über 1300nm, die Zielflughäfen über 3400nm auseinander. Eine Verschärfung der Filterkriterien würde Gefahr laufen, Formationen dieser Art zu ignorieren. Gerade in Regionen mit verhältnismäßig geringem Verkehrsaufkommen wie über Zentralafrika oder dem Südatlantik (vgl. **Abbildung 3.6**) und mit großen Distanzen zwischen den Flughäfen können Formationen dieser Art einen Beitrag zur globalen Treibstoffeinsparung leisten.

Die Gestalt einer Formation besteht neben der zuvor untersuchten Formationsphase auch aus den Prä- und Postformationsphasen, in denen die beteiligten Flugzeuge allein fliegen. Wie die relative Länge der Formationsphase  $\xi_{ben}$  ergeben sich für die Strecken zum *Rendezvous* Punkt und ab dem *Break up* Punkt für jeden Teilnehmer relative Streckenanteile. In **Abbildung 4.7** ist zu erkennen, dass die Anteile  $\xi_a$  und  $\xi_b$  zueinander ähnlich sind.



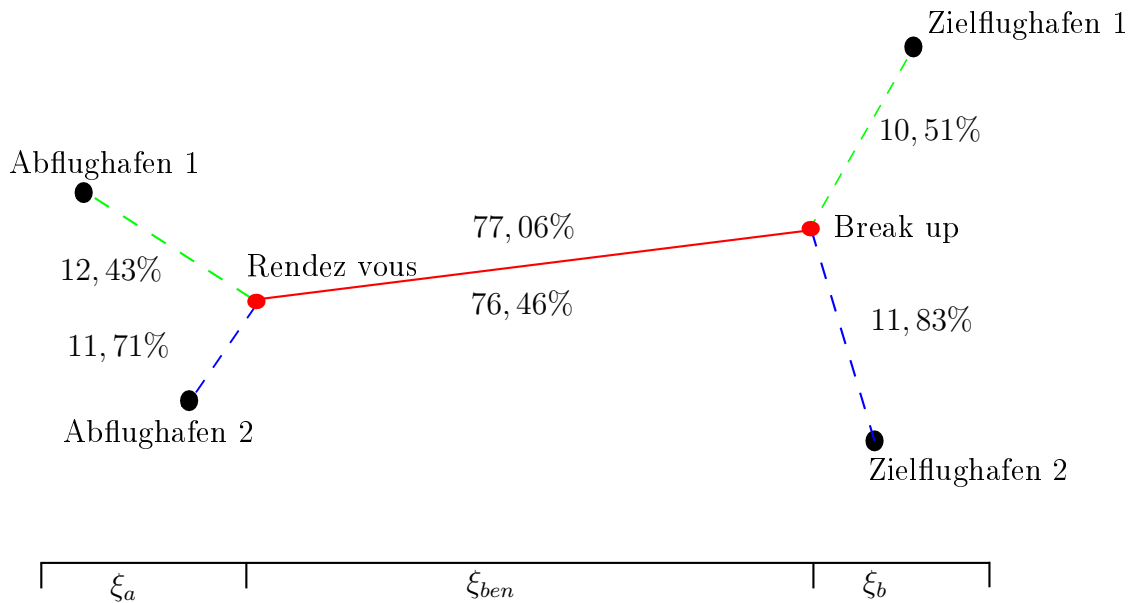


Abbildung 4.7: Relative Längen der Formationsphasen

Aufgrund der Routenmodellierung und der damit einhergehenden Verschiebung des geometrisch optimalen *Rendezvous* Punkts, wäre zu erwarten gewesen, dass die Flugphasen vor der gemeinsamen Formationsphase länger sind, als die der abschließenden Postformationsphase. Offenbar hat diese Anpassung der Formationsrouten nur geringe Auswirkung auf  $\xi_a$  und  $\xi_b$ . Zudem beträgt die durchschnittliche Distanz zwischen dem geometrisch optimalen *Rendezvous* Punkt und dem angepassten Bestmöglichen lediglich  $220,4nm$ .

Ferner zeigt die geringe Differenz zwischen den Anteilen der Formationsphasen von weniger als 1%, dass die Anzahl der Formationen, wie sie in **Abbildung 4.5** dargestellt sind, überwiegt.

### 4.3 Auswertung der Formationsmetriken

Nachdem im vorherigen Kapitel untersucht wurde, welche Gestalt die einzelnen Formationen annehmen, betrachtet dieses Kapitel die ausgewählten Formationen aus einer globalen Perspektive. Zu diesem Zweck kommen erneut, die von Marks et al. in [32] entwickelten Metriken zum Einsatz.

Die durchschnittliche  $\lambda$ -Bewertung der ausgewählten Formationen liegt bei 5,44% und ist im Histogramm zur  $\lambda$ -Verteilung in **Abbildung 4.8** eingezeichnet. Das Histogramm zeigt deutlich, dass die überwiegende Mehrheit der Formationen mit  $\lambda$ -Wert zwischen 0% und 10% bewertet wurde. Es ist weiterhin zu sehen, dass 875 der Formationen eine  $\lambda$ -Bewertung unter 1% zeigen. Analog zum vorgeschlagenen Vorgehen für kleine  $\xi_{ben}$ -Werte, beziehen sich die folgenden Auswertungen nur auf Formationen, die eine Treibstoffeinsparung von mehr als 1% vorweisen können. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich der Aufwand der Formationsbildung und -Planung für vergleichsweise geringe Einsparungen nicht lohnt.

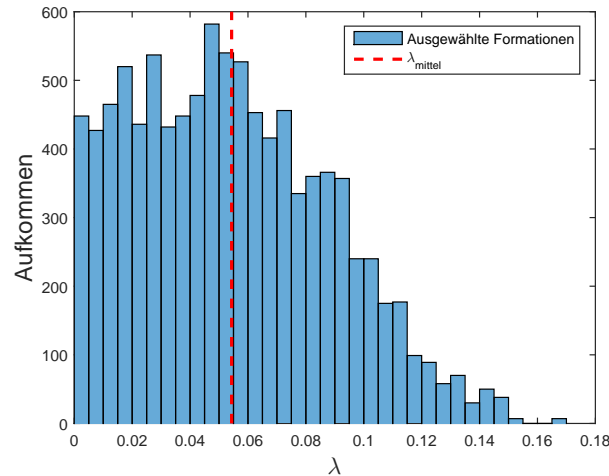


Abbildung 4.8: Verteilung und Mittelwerte der  $\lambda$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan

Die Einsparungen, die durch den Formationsflug erzielt werden können, erfordern zusätzliche Flugstrecken. Diese Umwege wurden bereits erläutert und analysiert. Darüber hinaus haben die Umwege noch eine weitere Auswirkung. Zusätzliche Flugstrecke erhöht die Flugzeit. Ein Flugzeug, das an einer Formation teilnimmt benötigt demnach mehr Zeit, um zu seinem Zielflughafen zu kommen. Primär ist hier der Umweg zu nennen, doch auch die Anpassung der Fluggeschwindigkeit in der Formation nimmt Einfluss auf die Flugdauer. Die zusätzliche Flugdauer kann ebenfalls mittels der Ersatzmodelle von Marks et al. [32] abgeschätzt werden. Der ermittelte  $\tau$ -Wert ist in **Gleichung 2.6** definiert. Der  $\tau$ -Wert ist der Faktor, um den sich die Flugzeit gegenüber dem Einzelflug erhöht. Die Verteilung der zusätzlichen Flugzeiten des *Leaders* und *Followers* sind in **Abbildung 4.9** und **4.10** dargestellt.

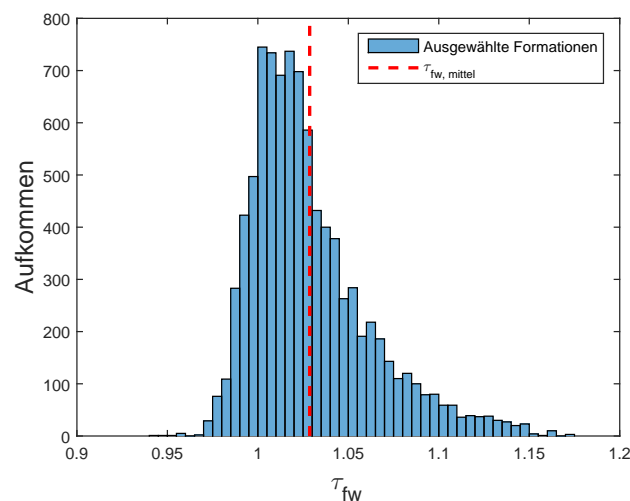


Abbildung 4.9: Verteilung und Mittelwerte der  $\tau_{fw}$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan

Sowohl für die zusätzliche Flugzeit des *Leaders*, als auch für den *Follower* ergeben sich einige Flugzeitverkürzungen ( $\tau < 1$ ). Diese Ergebnisse lassen sich ebenfalls auf die unterschiedlichen Datenquellen zur Bestimmung der einzelnen Routenabschnitte zurückführen. Besonders im Falle von Formationen, die nur wenig von den Referenzrouten der Einzelflüge abweichen, können sich durch die Bestimmung der Steig- und Sinkflugphase auf Basis der *BADA 4*-Datenbank Abweichungen ergeben. Zu diesem Fall kann es insbesondere bei Formationen mit gleichem Ab- oder Zielflughafen kommen.

Für alle Formationsteilnehmer erhöht sich die Flugzeit im Durchschnitt um 4,15%. Zusammen mit der gemittelten Flugzeit aller berücksichtigten Flüge von 7:59 Stunden, erhöht sich die Flugzeit um knapp 20 Minuten. Auch wenn die zusätzliche Flugzeit im Minutenbereich bei einem Langstreckenflug von vielen Stunden gering wirkt, ergeben sich daraus nachteilige Konsequenzen. Zum Einen folgen aus einer erhöhten Flugzeit höhere Crewkosten für den Betreiber des Flugzeugs. Des Weiteren ist ein einzelnes Flugzeug als Ressource länger an einen Flug gebunden. Für Fluggesellschaften bedeutet dies, dass eventuell mehr Flugzeuge benötigt werden, um einen bestehenden Flugplan einzuhalten. Bei getrennter Betrachtung der zusätzlichen Flugzeit für *Leader* und *Follower* in den **Abbildungen 4.9** und **4.10** fällt auf, dass der *Leader* im Mittel eine gegenüber dem *Follower* deutlich erhöhte zusätzliche Flugzeit benötigt. Der *Leader* benötigt eine um durchschnittlich 5,34% verlängerte Flugzeit, während sich die Flugzeit des *Follower*s im Mittel nur um 2,95% verlängert. Dieser Unterschied in der benötigten Flugzeit, lässt den folgenden Schluss zu: *Flug A* beginnt seinen Flug vor *Flug B* und passt seine Flugroute an, um *Flug B*, nah an dessen Abflughafen, zu erreichen. Die Flugroute liegt demzufolge, unter den nötigen Anpassungen auf dem Weg des *Fluges A*. *Flug A* kann somit als der Flug mit der längeren Flugstrecke und dem größeren Umweg gesehen werden. Er ist demzufolge auch potentiell schwerer und somit besser als *Leader* geeignet.

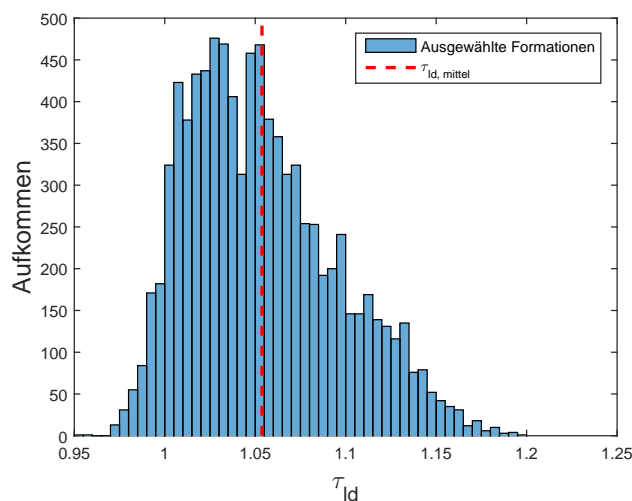


Abbildung 4.10: Verteilung und Mittelwerte der  $\tau_{ld}$ -Bewertung im ausgewählten Formationsflugplan

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass die relativen Einsparungen durch Formationsflug, nicht ohne Auswirkungen auf den Flugbetrieb durch erhöhtes Verkehrsaufkommen

und längere Flugzeiten umzusetzen sind. Im betrachteten Zeitraum, führen die gefundenen Formationen zu einer durchschnittlichen Einsparung von 5,44% bei einem Umweg von 3,19%. Um von diesen relativen Angaben zu einem absoluten Wert zu gelangen, kommen nochmals das Ersatzmodell von Marks et al. [32] zum Einsatz, um die eingesparte Treibstoffmenge  $\Delta_{fuel}$  abzuschätzen. Hierbei muss betont werden, dass die Abschätzung absoluter Werte mit einem größeren Fehler behaftet sind, als die zuvor untersuchten relative Größen. **Abbildung 4.11** zeigt die Häufigkeitsverteilung der eingesparten Kraftstoffmenge. Einige Formationen führen trotz der positiven  $\lambda$ -Bewertung zu einem Mehrverbrauch an Kraftstoff. Der in dieser Studie ermittelte Flugplan aus Formationen und verbleibenden Einzelflügen für eine Woche erlaubt eine abgeschätzte globale Einsparung von über 54000 Tonnen Kraftstoff.

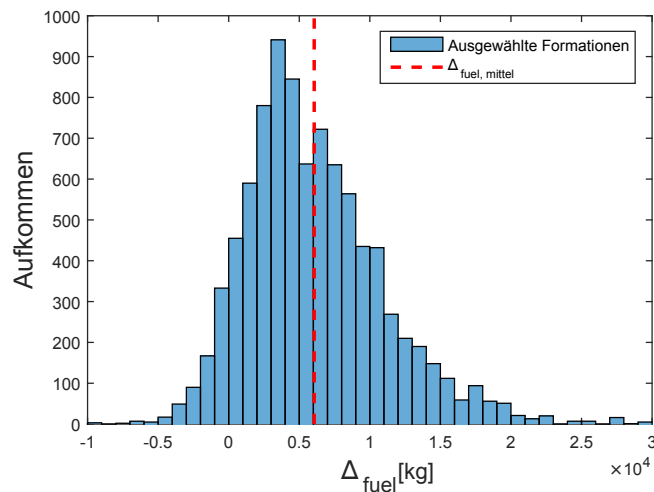


Abbildung 4.11: Verteilung der eingesparten Kraftstoffmenge im ausgewählten Formationsflugplan

Der Mittelwert der eingesparten Kraftstoffmenge liegt bei  $6058\text{kg}$ . Die maximal vorkommende absolute Einsparung einer einzelnen Formation beträgt über 29 Tonnen. Der Abflughafen beider Teilnehmer ist Dubai (*DXB*). Beide Flüge werden mit einem Airbus A380 ausgeführt, deren Zielflughäfen New York (*JFK*) und Amsterdam (*AMS*) sind.

## 4.4 Geographische Auswertung der Formationsrouten

Dieses Kapitel geht auf die geographische Gestalt des erstellten Formationsflugplans ein. Auf diese Weise sollen übergeordnete Zusammenhänge und die bedeutendsten Flughäfen erkannt werden.

Die ausgewählten Formationen, sowie die verbleibenden Einzelflüge sind in **Abbildung 4.12** dargestellt. Die Farbkodierung gibt dabei Auskunft über die von der Formation erreichten Treibstoffeinsparung. Der Übersicht halber sind nur die Formationsphasen der Formationen eingezeichnet.

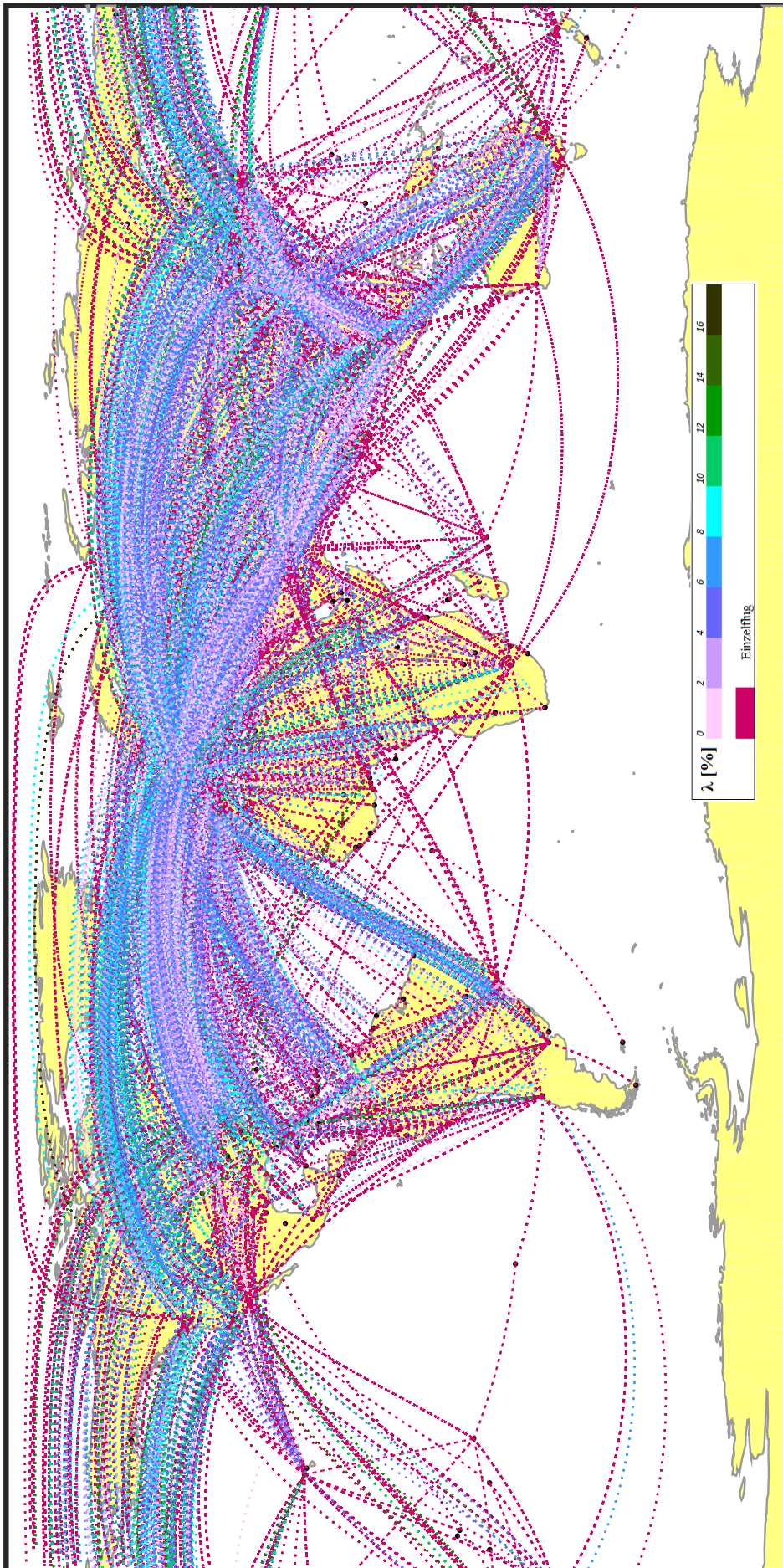


Abbildung 4.12: Formationen mit relativer Treibstoffersparung und verbleibende Einzelflüge im Zeitraum vom 06. Oktober bis zum 12. Oktober 2014

Aus **Abbildung 4.12** geht hervor, dass Europa eine hohe Bedeutung für den Formationsflug zukäme. Ausgehend von den europäischen Flughäfen lassen sich Formationen in alle bedeutenden Regionen der Luftfahrt ausmachen. Besonders deutlich wird dies bei Verbindungen über dem Atlantik in Richtung Nord- und Südamerika. Zwischen der Westküste Nordamerikas und den fernöstlichen Flughäfen sind ebenfalls sehr hohe Dichten an Formationsflügen zu erkennen. Zwischen den Regionen Europa, Naher Osten und Südostasien ist die Dichte an Formationen zu hoch, um die genauen Verläufe nachvollziehen zu können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese verkehrsreichen Regionen sowohl untereinander, als auch zu den übrigen Regionen ein hohes Formationsaufkommen zeigen. Die Verteilung der Formationsdichten erlaubt die Annahme, dass neben der geographischen Lage auch die Verbindungsfrequenzen von Bedeutung für den Formationsflug sind. So ist der Nordatlantik als eine der verkehrsreichsten Regionen des Luftverkehrs auch für den Formationsflug von außerordentlicher Bedeutung. Die Verteilung der verbleibenden Einzelflüge lässt zudem vermuten, dass diese nicht nur aus geographischen Gründen nicht zugeordnet werden konnten. Vielmehr kann das Angebot an potentiellen Partnern aufgrund geringen Verkehrsaufkommens nicht ausreichend gewesen sein.

Die Betrachtung aller Formationen zugleich, lässt über die vorherigen Auswertungen hinaus, kaum weitere Schlüsse zu. Daher soll nun die Verteilung der Formationen auf die einzelnen Flughäfen betrachtet werden. In **Abbildung 4.13** sind die 15 Flughäfen mit dem höchsten Verkehrsaufkommen dargestellt. Datengrundlage sind dabei die 34510 betrachteten Langstreckenflüge. Daneben sind für jeden Flughafen die Anzahl der Abflüge angegeben, die an einer Formation teilnehmen.

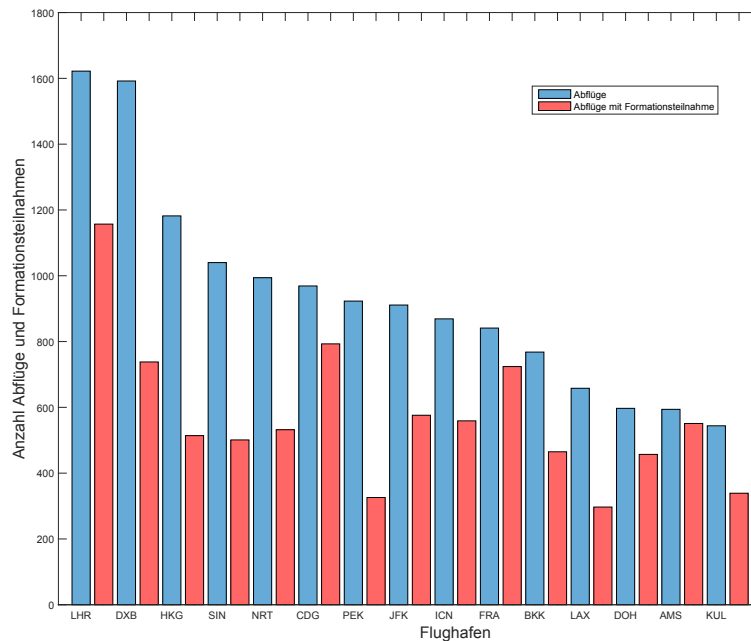


Abbildung 4.13: Anzahl der Abflüge und Formationsteilnahmen der Flughäfen mit dem größten Verkehrsaufkommen

Der Londoner Flughafen Heathrow (*LHR*) ist sowohl bei der Anzahl der Abflüge, als auch bei den Formationsteilnahmen führend. Bei Betrachtung der weiteren Flughäfen fällt auf, dass die europäischen Flughäfen einen sehr hohen Anteil an Formationsteilnahmen vorweisen können. Der Anteil der Formationsteilnahmen der Flughäfen *CDG*, *FRA*, *AMS* liegt durchschnittlich bei 83,75%, während der Durchschnitt der 15 in **Abbildung 4.13** dargestellten Flughäfen bei 63,16% liegt. Diese Flughäfen liegen zudem innerhalb eines Umkreises von weniger als 360nm um London (*LHR*). Am Flughafen Peking (*PEK*) zeigt sich, dass die Bedeutung eines Flughafens für den Formationsflug nicht nur von dem Verkehrsaufkommen abhängt, sondern auch von der geographischen Lage und den Frequenzen der Verbindungen abhängig scheint.

Zur weiteren Analyse sind in **Abbildung 4.14** die 150 verkehrsreichsten Flughäfen eingezeichnet, wobei die 15 Flughäfen aus **Abbildung 4.13** zusätzlich hervorgehoben sind.

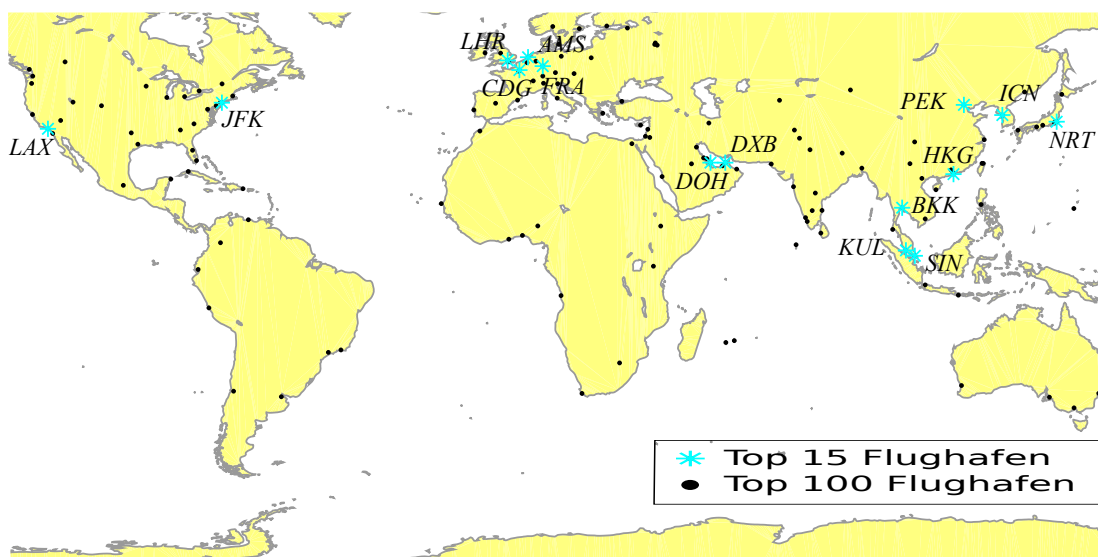


Abbildung 4.14: Flugverbindungen nach Flugzeugtypen im Zeitraum vom 06.Oktober bis zum 12.Oktober 2014

Es ist zu erkennen, dass sich die wichtigsten Formationsflughäfen neben Nordeuropa auf drei weitere Regionen verteilen. Zwei Flughäfen finden sich jeweils in Nordamerika (*JFK*, *LAX*) und im Nahen Osten (*DOH*, *DXB*), die verbleibenden sieben Flughäfen finden sich im Fernen Osten (*KUL*, *BKK*, *SIN*, *HKG*, *PEK*, *ICN*, *NRT*). Ein Flughafen mit hohem Formationsaufkommen muss demnach neben einem hohen Verkehrsaufkommen auch geographisch günstig zu weiteren Flughäfen gelegen sein.

Die bisherige Auswertung des Formationsflugplans hat gezeigt, dass Nordeuropa eine der Regionen mit dem größten Formationsaufkommen wäre. Aus diesem Grund sollen die hier ankommenden und abfliegenden Formationen eingehender betrachtet werden. Dazu wird primär auf den Flughafen London Heathrow (*LHR*) eingegangen. Der Flughafen im Nordwesten Europas liegt für Flüge aus Kontinentaleuropa mit westlicher Flugrichtung nahezu auf deren Route. Anders herum, überfliegen in London startende und in südlicher bis östlicher Richtung fliegende Flugzeuge, das Europäische Festland. Flügen, die in London (*LHR*) starten, bieten sich also geographisch ausreichend Möglichkeiten zur Formationsbildung. Hinzu kommt, dass die



in der Umgebung befindlichen Flughäfen ihrerseits ebenfalls ein hohes Verkehrsaufkommen zeigen. **Abbildung 4.15** zeigt die häufigsten Abflughäfen der Formationspartner für in London (*LHR*) startende Flüge.

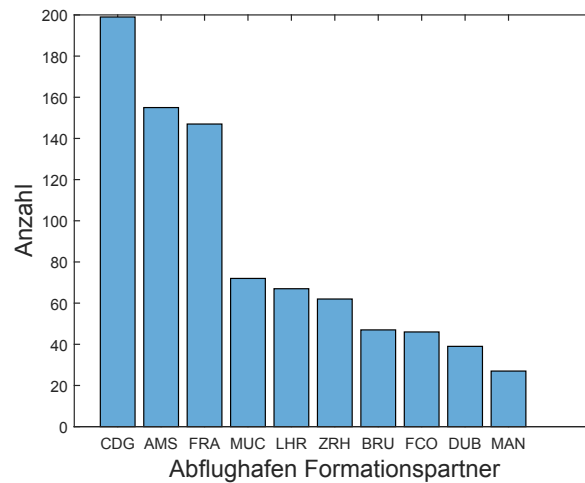


Abbildung 4.15: Abflughäfen der Formationspartner mit London (*LHR*)

Erwartungsgemäß liegen die Abflughäfen der Formationspartner dicht an London (*LHR*), wobei London (*LHR*) selbst auch als Abflughafen des Partners in Frage kommt. Es handelt sich in diesem Fall dann um eine Formation mit gleichem Startflughafen. Analog dazu kann London (*LHR*) auch Zielflughafen beider Teilnehmer einer Formation sein. Werden Formationen mit London (*LHR*) als Zielflughafen betrachtet, ist dies der häufigste Fall, wie **Abbildung 4.16** zeigt. Die meisten Formationen haben London (*LHR*) als Ziel beider Teilnehmer. Darauf folgen, ähnlich zu den Abflughäfen, die verbleibenden verkehrsreichen Flughäfen Europas.

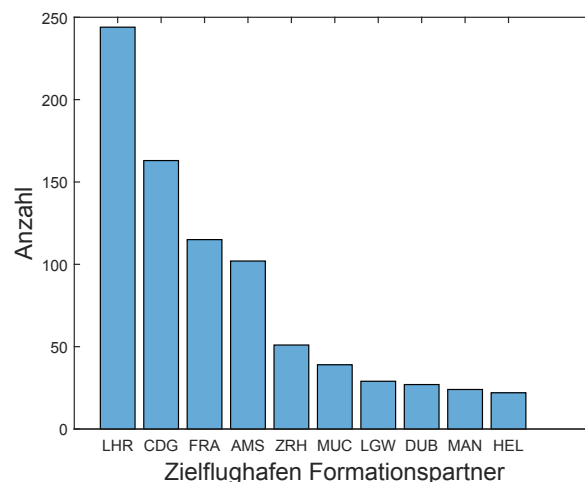


Abbildung 4.16: Zielflughäfen der Formationspartner mit London (*LHR*)

Im Folgenden sollen die *Rendezvous* und *Break up* Punkte der Formationen mit Beteiligung des Flughafens London (*LHR*) und den wichtigsten Flughäfen (*AMS*,



(*CDG*, *FRA*, *MUC*) der Formationspartner näher betrachtet werden. *Rendezvous* und *Break up* Punkte mit Flügen weiterer Flughäfen sind ebenfalls dargestellt. Die Farbkodierung für die folgenden **Abbildungen 4.17** und **4.18** sind in **Tabelle 4.3** definiert.

Farbe						
Partnerflughafen	LHR	CDG	FRA	AMS	MUC	ANDERE

Tabelle 4.3: Formationsarten und durchschnittliche Treibstoffeinsparung

Die *Rendezvous* Punkte der Formationen, bei denen mindestens einer der Abflughäfen London (*LHR*) ist, sind in **Abbildungen 4.17** visualisiert.

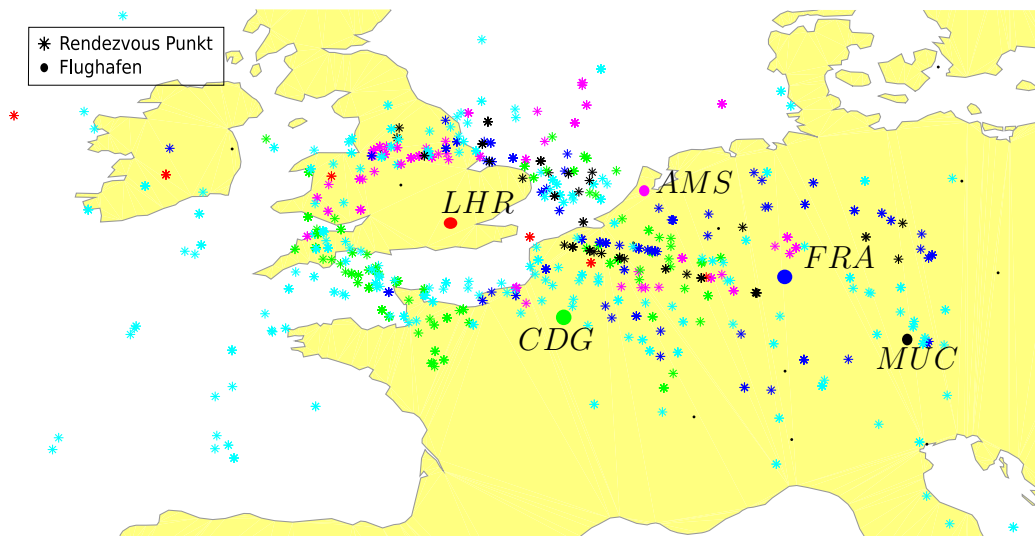


Abbildung 4.17: *Rendezvous* Punkte mit (*LHR* als beteiligter Startflughafen)

Die *Rendezvous* Punkte bilden eine Ellipse um London (*LHR*), da es frühestens zu einer Formation kommen kann, wenn die Flüge aus London (*LHR*) ihre Reiseflughöhe erreicht haben. Außerhalb dieser Ellipse verteilen sich die *Rendezvous* Punkte in alle Richtungen. Da der *Rendezvous* Punkt neben der geographischen Lage der Abflughäfen noch von den Abflugzeiten bestimmt wird, sind die *Rendezvous* Punkte unregelmäßig verteilt. Für Formationen mit London (*LHR*) als Abflughafen für beide Teilnehmer, sind die *Rendezvous* Punkte zum Teil weit von dem Startflughafen entfernt. An dieser Stelle zeigt sich der Einfluss der Abflugzeit deutlich, da der *Rendezvous* Punkt weit in Flugrichtung verschoben ist.

Im Gegensatz zu den *Rendezvous* Punkten, sind die *Break up* Punkte nur von der geographischen Lage der Zielflughäfen und der Länge der Sinkflugphase abhängig. In **Abbildung 4.18** sind alle *Break up* Punkte der Formationen mit London (*LHR*) als einem der Zielflughäfen eingezeichnet. Die Farbkodierung (vgl. **Tabelle 4.3**) gibt dabei Aufschluss über den Zielflughafen des zweiten Fluges. Formationen, die aus westlicher Richtung kommen, erreichen zunächst London (*LHR*). Folglich bildet sich westlich von London (*LHR*) eine Zone mit vielen *Break up* Punkten. Die Entfernung zum Flughafen London (*LHR*) ergibt sich dabei aus den Sinkflugdistanzen. Deutlich

zu erkennen sind die Sinkflugdistanzen bei den rot eingefärbten *Break up* Punkten. Diese gehören zu Formationen, bei denen beide Teilnehmer London (*LHR*) zum Zielflughafen haben. Nachdem London erreicht wurde, fliegt der Formationspartner weiter zu seinem Zielflughafen. Für Flüge aus südlicher bis nordöstlicher Richtung werden die Flughäfen in Kontinentaleuropa zuerst erreicht, so dass sich um diese Flughäfen elliptische Segmente mit *Break up* Punkten bilden. Diese sind farblich gekennzeichnet. Ab diesen *Break up* Punkten fliegt der Flug mit dem Ziel London (*LHR*) dann im Einzelflug weiter. Auch um weiter von London (*LHR*) entfernte Flughäfen lassen sich solche Anhäufungen von *Break up* Punkten ausmachen (vgl. *FCO*, *IST*). Bei globaler Betrachtung eines Flughafens und aller Formationen an denen dieser Flughafen beteiligt ist, ist zu vermuten, dass ein Teil der *Break up* Punkte als Ellipse um diesen Flughafen liegt. In diesen Fällen wird der entsprechende Flughafen zuerst erreicht. Ein Teilnehmer einer Formation geht dort in den Sinkflug über, während der andere Formationsteilnehmer seinen Reiseflug zu seinem Zielflughafen fortsetzt. Der andere Teil der *Break up* Punkte, die einem Flughafen zugeordnet werden können, liegen dann unregelmäßig verstreut. In diesen Fällen wurde entweder der zweite Zielflughafen der Formation zuerst erreicht, oder der *Break up* Punkt liegt fernab von den Zielflughäfen.

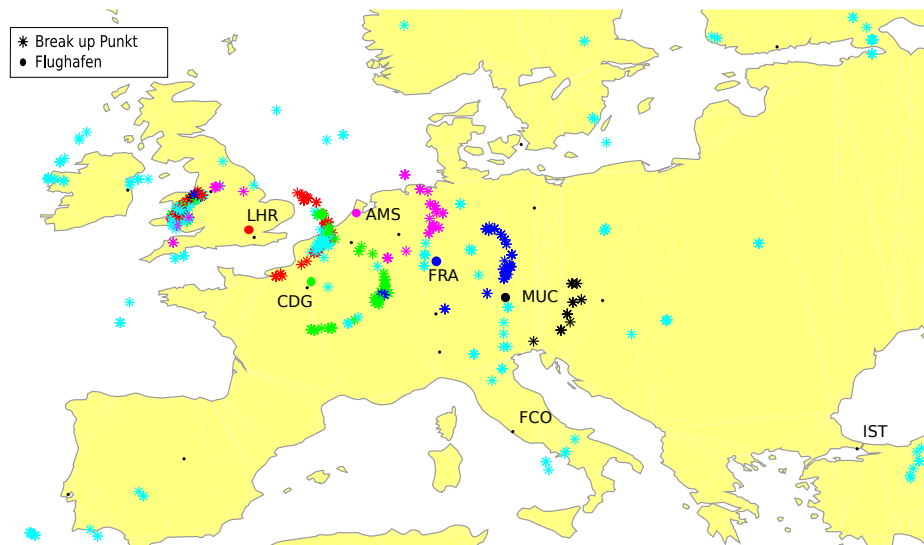


Abbildung 4.18: Breakup Punkte mit LHR als beteiligtem Zielflughafen

Solche Betrachtungen, wie sie hier für den Flughafen London (*LHR*) angeführt wurden, sind auch für weitere Flughäfen möglich. Der gewählte Flughafen bietet jedoch, durch seine Nähe zu anderen großen Europäischen Flughäfen, die Möglichkeit die geographische Verteilung von *Break up* und *Rendezvous* Punkten zu analysieren. Die Betrachtung der geographischen Verteilung des Formationsfluges hat gezeigt, dass die bereits bekannten, verkehrsreichen Flughäfen des Weltluftverkehrs, auch für den Formationsflug von Bedeutung sind. Jedoch ist das Verkehrsaufkommen nicht alleine für das Formationsaufkommen entscheidend. Vielmehr ist die Zahl der verkehrsreichen Flughäfen im Umfeld des Flughafens von Bedeutung.



## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieses abschließende Kapitel fasst das Vorgehen und die gewonnenen Ergebnisse zusammen und ordnet diese vor dem Hintergrund der anfänglichen Zielsetzung ein. Darüber hinaus werden weitere Aspekte angesprochen, die zur Realisierung des Formationsflugs noch weiter wissenschaftlich bearbeitet werden sollten.

Die Motivation der Arbeit lag in der bis dato nicht vorhandenen globalen Betrachtung des Potentials des Formationsflugs. Die vorhandenen Studien waren zum Einen beschränkt auf einzelne Regionen oder Organisationen und zum Anderen in ihren Randbedingungen und Einschränkungen deutlich von der Realität entfernt. Der Anspruch dieser Arbeit lag somit auf einer globalen Abdeckung unter realitätsnahen Randbedingungen. Realitätsnah, da die große Datenmenge und die Komplexität der Auswahl und Modellierung eine Reduktion der Datenmenge erforderlich macht, um die Beherrschbarkeit zu gewährleisten. Die Einschränkungen der vorliegenden Studie lassen dennoch einen realistischen Blick auf die Gestalt und Eigenschaften des Formationsflug im operationellen Umfeld zu. Im Wesentlichen beschränkt diese Studie sich auf Langstrecken, die mit den 7 größten Flugzeugtypen befliegen werden. Dabei werden Routen immer als Großkreissegmente angenommen. Wettereinfluss, sowie Verehrflusssteuerung hingegen werden vernachlässigt. Die Abflugzeiten und Reisefluggeschwindigkeiten der einzelnen Flüge blieben unverändert, so dass ein tatsächlicher Flugplan die Grundlage der Studie darstellt. Der übrig bleibende freie Parameter zur Modellierung der Formationsrouten ist somit die geographische Lage des *Rendezvous* und *Break up* Punktes. Bevor mit der Identifikation der potentiellen Formationspaare begonnen werden konnte, musste der globale Flugplan des Oktober 2014 für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden. Im Zuge dessen wurden Datenbanken mit Informationen zu Ortskoordinaten und Zeitverschiebungen für über 6500 Flughäfen erstellt. Die Datenaufbereitung umfasste die Harmonisierung der Abflugzeiten auf eine Referenzzeitzone und die Implementierung eines dezimalen Zeitformats für eine betrachtete Woche. Im Anschluss wurde für die betrachteten Flugzeugtypen die Woche mit den meisten Flugbewegungen ermittelt und als Ausgangsdatensatz für die Identifikation der Formationen definiert. Alle Betrachtungen beziehen sich auf die Woche von Montag, dem 06. Oktober 2014 bis Sonntag, dem 12. Oktober 2014. Der auf diese Weise entstandene Datensatz von 34510 Flügen dient als Grundlage der darauf folgenden Vorfilterung. Die Idee der Vorfilterung ist die, dass sich aus über 34000 Flügen theoretisch über eine Milliarde Formationen bilden lassen. Der sich daraus ergebende Rechenaufwand würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Darüber hinaus wäre die Mehrheit der Formationen, aufgrund einfachster logischer Zusammenhänge, nicht durchführbar. So kann eine Formation nur gebildet werden, wenn beide Teilnehmer zur selben Zeit in der Luft sind und die Flugrichtungen nicht entgegengesetzt sind. Die Vorfilterung muss demzu-

folge die Datenmenge auf ein beherrschbares Maß reduzieren, indem sie abwegige Formationen erkennt und herausfiltert. Das geschieht durch die hinter einander geschaltete Betrachtung der Abflugzeit, der Distanz zwischen den Abflughäfen und des Azimutwinkels. Der letzte Filter koppelt Abflugzeit und die Distanz zwischen den Abflughäfen und bestimmt, ob zwei Flüge überhaupt in der Lage sind, sich an einem gemeinsamen Punkt zu treffen. Während des Durchlaufens dieser Filterarchitektur reduziert sich die Datenmenge nach jeder der sechs Filterstufen, bis letztendlich rund 2,5 Millionen Formationen zur weiteren Betrachtung übrig bleiben. Jedem Flug können im Durchschnitt 74 Formationspartner vorgeschlagen werden.

Für diese verbleibenden Formationen wird eine Formationsroute ermittelt. Die Ermittlung der Formationsroute basiert auf dem geometrischen Problem des Fermat Punktes, das sich auch auf der sphärischen Erdoberfläche anwenden lässt. Der Fermat Punkt wurde bereits von Kent et al. [24] zur Entwicklung eines Modellierungsansatzes von Formationsrouten angewandt. Jedoch lässt sich dieser Ansatz nur auf bestimmte geometrische Anordnungen der Abflug- und Zielflughäfen anwenden, so dass der Routenmodellierungsansatz in dieser Arbeit erweitert wurde. Für jede Formation kann so eine optimale Route ermittelt werden, bei der die Summe aller Routenabschnitte beider Formationsteilnehmer ihr Minimum erreicht. Die so gefundene Route kann jedoch nicht geflogen werden, da der optimale *Rendezvous* Punkt im allgemeinen nur unter Anpassung der Abflugzeiten oder der Fluggeschwindigkeit erreichbar ist. Demzufolge muss ein alternativer *Rendezvous* Punkt gefunden werden, der unter den gegebenen Randbedingungen erreichbar ist und gleichzeitig eine möglichst kurze Gesamtroute darstellt. Diese bestmögliche Route wird ermittelt, indem für zwei Flüge der erste mögliche Routenschnittpunkt, in Form von zwei Reichweitenkreisen, bestimmt wird. Von diesem initialen Schnittpunkt werden iterativ weitere Schnittpunkte zu späteren Zeitpunkten bestimmt. Der Schnittpunkt für den die Distanz zum optimalen *Rendezvous* Punkt ein Minimalwert annimmt, wird als bestmöglicher *Rendezvous* Punkt gewählt. Die ermittelten *Break up* und *Rendezvous* Punkte werden auf Konflikte mit den Steig oder Sinkflugphasen überprüft und wenn nötig angepasst. Die Informationen zu den Steig und Sinkflugphasen der einzelnen Flüge stammen dabei aus einem Flugleistungsmodell. Im Anschluss werden die identifizierten Formationen unter Verwendung der Routenparameter, dem durchschnittlichen Ladefaktor des betrachteten Zeitraumes und Informationen zum Flugzeugtyp und dessen Flugleistung bewertet. Die Reise Flughöhe und -geschwindigkeit der Formation wird dabei so gewählt, dass kein Flugzeug seine Flugleistungsgrenzen verlassen muss. Die Bewertung geschieht mit Ersatzmodellen und schätzt die zu erwartende Treibstoffeinsparung der Formation ab. Zusätzlich werden *Leader* und *Follower* unter den Teilnehmern zugeordnet.

Ein Blick auf die Ergebnisse der Bewertung zeigt, dass eine Vielzahl der Formationen negativ bewertet wurden. Als Folge wurde eine Anpassung der Filter diskutiert. Eine Betrachtung der Bewertungsergebnisse in Abhängigkeit der Filterparameter hat gezeigt, dass eine Verschärfung der Filter die Gefahr bergen würde, Formationen mit Einsparpotential zu übergehen. Darüber hinaus dient die Vorfilterung in dieser Arbeit primär dazu, die Datenmenge zu reduzieren und den Rechenaufwand in einem beherrschbaren Rahmen zu halten. Sollten nach der Vorfilterung zusätzliche Formationen nicht weiter berücksichtigt werden, entsteht dadurch keinerlei Nachteil. Die Filter und deren Kriterien können daher unverändert bleiben. Es ist demnach akzeptabel, dass auch nach der Vorfilterungen Formationen nicht weiter berücksichtigt

werden, weil sich deren Route nicht modellieren lässt bzw. negativ bewertet wurde. Durch die Bewertung der Formationen ist eine Vergleichbarkeit der Formationen gewährleistet, die es erlaubt eine Auswahl und somit einen Formationsflugplan zu erstellen. Dieser Formationsflugplan soll eine global hohe Treibstoffeinsparung erreichen und muss gewährleisten, dass kein Flug doppelt zugeordnet wird. Zur Erstellung eines solchen Plans wurde der Datensatz mit allen Flügen herangezogen. Für jeden Flug wurde der Formationspartner ausgewählt, mit dem sich die höchste relative Treibstoffeinsparung erzielen ließ. Dabei ist aus Sicht des zugeordneten Partners diese Formation möglicherweise nicht die beste Formation an der dieser teilnehmen kann. Ziel dieser Arbeit war es jedoch zunächst eine valide Liste mit Formationen und Einzelflügen zu erstellen, mit der eine möglichst hohe Treibstoffeinsparung verbunden ist. Die Auswahl eines Formationsflugplans kann ebenso als Optimierungsproblem verstanden werden, wenn die maximal erzielbare Treibstoffeinsparung erreicht werden soll. Dazu müsste die Bewertung der einzelnen Formationen jedoch absolute Werte liefern. Für solche absoluten Bewertungen sind die Ersatzmodelle zwar vorhanden, jedoch mit einem höheren Fehler behaftet, als die Ersatzmodelle für relative Bewertungsmetriken.

Ausgehend von dem Datensatz der betrachteten Flüge, konnten 9863 Formationen gebildet werden. Das entspricht einem Anteil von 57% der Flüge die sich einer Formation zuordnen lassen. Nach der Vorfilterung standen für jeden Flug im Durchschnitt 74 potentielle Kandidaten zur Verfügung. Diese Anzahl hat sich nach der Routenmodellierung und Bewertung auf 3,5 reduziert. Diese geringe Anzahl an geeigneten Formationskandidaten zeigt, dass Studien wie diese einen umfangreichen Datensatz benötigen, um aussagefähige Ergebnisse zu erzielen. Der erzeugte Formationsflugplan zeigt dennoch deutlich, dass sich der Formationsflug bereits auf Grundlage der aktuellen Flugpläne umsetzen ließe und dabei einen beträchtlichen Beitrag zur globalen Treibstoff- und Emissionseinsparung leistet. Jede der ausgewählten Formationen spart durchschnittlich 5,44% Treibstoff ein, was in Summe einer abgeschätzten, globalen Treibstoffeinsparung von über 54.000 Tonnen Kraftstoff entspricht. Diese Studie hat somit gezeigt, dass der Formationsflug ein großes Potential aufweist um einen Beitrag zur Umsetzung der *Four-Pillar-Strategy* der IATA zu leisten.

Die zu erwartende Einsparung ist dabei aber nur unter Aufwand in Form von zusätzlichen Flugwegen und verlängerten Flugzeiten realisierbar. Eine durchschnittliche Formation benötigt einen Umweg von 3,19% und eine um 4,15% verlängerte Flugzeit. Dabei ist aufgefallen, dass der *Leader* den größeren Umweg fliegt. Geographisch hat sich gezeigt, dass sich die Dichte des Formationsfluges, dem Verkehrsaufkommen des aktuellen Luftverkehrs ähnelt. Formationsflug lässt sich besonders dort gut umsetzen, wo mehrere verkehrsreiche Flughäfen dicht bei einander liegen. Die verkehrsreichen Europäischen Flughäfen können dabei die meisten ihrer Abflüge als Formationsflüge verzeichnen.

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass Formationsflug bereits unter heutigen Flugplänen möglich ist und dabei zu hohen Einsparungen führt. Die sich dabei ergebenden Auswirkungen auf den Luftverkehr wurden in dieser Studie ebenfalls genannt und beschrieben. Durch die realitätsnahen Randbedingungen und die Modellierung von tatsächlich fliegbaren Routen, kann das abgeschätzte globale Kraftstoffeinsparpotential als Ausgangswert bzw. Horizont weiterer Forschung dienen. Die fundierte Abschätzung, dass der Formationsflug ausreichend Potential hat, den globalen

Treibstoffverbrauch zu senken, kann weitere und tiefer gehende Untersuchungen legitimieren. Weitere Studien des Formationsflugs sind nötig um die Auswirkungen auf den Luftverkehr und die Steuerung von Formationen besser zu verstehen. Gerade im Bereich der Bewertung von Formationen ist es von großer Bedeutung alle mit dem Formationsflug in Verbindung zu bringenden Kosten zu berücksichtigen. Ferner kann diese Arbeit als Grundlage für einer Untersuchung zur Anpassung von Flugplänen und deren Abflugzeiten dienen. Eine gezielte Anpassung der Flugpläne für mehr und längere Formationsphasen, kann die erzielbaren Einsparungen möglicherweise noch deutlich erhöhen. Ebenfalls sollte der Einfluss von Störungen in Form von Verspätungen einzelner Flüge weiter behandelt werden. Eine mögliche Schwäche des in dieser Studie verfolgten Ansatzes ist, dass die Flugpläne für alle Flüge verfügbar sein müssen, um einen Formationsflugplan zu erstellen. Zudem braucht dieser Prozess zu viel Zeit, um auf kurzfristige Abweichungen vom Flugplan reagieren zu können. Eine weitere Schwäche ergibt sich im Hinblick auf Formationen mit gleichem Startflughafen. Diese vielversprechenden Formationen, können auf Grund der gewählten Randbedingungen nur durch Einholen modelliert werden. Zur Ausnutzung auch dieses Potentials sollten Warteschleifen oder Geschwindigkeitsanpassungen modelliert werden. Zusätzliche Bemühungen sollten ebenfalls in die Regelungstechnik und Systemkommunikation investiert werden, da diese wie auch die meisten vorherigen Studien eine Positionierung des *Follower* im sogenannten *Sweet Spot* des Wirbels annehmen. Die entwickelte Methodik kann außerdem weiter angepasst werden, um den Formationsflug in einzelnen Regionen oder unter einzelnen Fluggesellschaften bzw. Luftfahrtallianzen zu untersuchen.

Das globale Potential zur Treibstoffeinsparung des Formationsflugs konnte in dieser Studie unter Anwendung einer Identifikationsmethodik und eines entwickelten Ansatzes zur Formationsroutenmodellierung abgeschätzt werden. Dank realistischer Randbedingungen, der Daten eines Flugleistungsmodells und Ersatzmodellen zur Bewertung, konnten belastbare Ergebnisse erzielt werden. Die abschließende Auswertung hat die dafür nötigen Aufwände dargestellt und die Auswirkungen auf den Luftverkehr angedeutet. Der Formationsflug erlaubt signifikante Einsparungen des Kraftstoffverbrauchs und sollte weiter verfolgt und wissenschaftlich behandelt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] A. KNOLL, M. H. S.Steger: Der „loseFFormationsflug unter Flugsicherungsaspekten. In: *Deutscher Luft und- Raumfahrtkongress* (2012)
- [2] ANGELA NUIC, Mihai-George I. Chantal Poinso P. Chantal Poinso: ADVANCED AIRCRAFT PERFORMANCE MODELING FOR ATM. ENHANCEMENTS TO THE BADA MODEL. In: *24th Diital Avionics System Conference* (2005)
- [3] ASSISTANCE, Flight Operations Support & L.: Getting to grips with ETOPS issue V / Airbus Customer Service. 1998. – Forschungsbericht
- [4] EUROPEAN, ICAO ; OFFICE, North A.: NORTH ATLANTIC OPERATIONS AND AIRSPACE MANUAL V.2016-1 / ICAO. 2016. – Forschungsbericht
- [5] FLIGHTRADAR24: *Routendaten der Flüge THY15 und AC811 protokolliert am 08.09.2016.* <https://www.flightradar24.com>
- [6] GEOFFREY C. BOWER, Ilan K. Tristan C. Flanzer F. Tristan C. Flanzer: Formation Geometries and Route Optimization for Commercial Formation Flight. In: *27th AIAA Applied Aerodynamics Conference* (2009)
- [7] HARDEMAN, Andreas: Aviation and Climate change. In: *IATA Aviation & Environment* (2008)
- [8] HENRI WEIMERSKIRCH, Yannick C. Julien Martin M. Julien Martin: Energy saving in flight formation. In: *NATURE VOL 413* (2001)
- [9] HERINCKX, L.E.: Formation flying as an innovative air transportation system for long-haul commerical flight: A focus on operational feasibility and potential gain. In: *AIAA Aviation Technology,Integration and Operations Conference* (2011)
- [10] IATA: A global approach to reducing aviation emissions - First stop: carbon neutral growth by 2020 / The International Air Transport Association. 2009. – Forschungsbericht
- [11] IATA: Air Passenger Market Analysis October 2014. (2014)
- [12] ICAO: TABLES RELATING TO THE WORLD OF AIR TRANSPORT IN 2015 / International civil aviation organization. 2015. – Forschungsbericht
- [13] ICAO: DOC 8643 Aircraft Type Designators. (2016)



- [14] JIA XU, Geoffrey Bower Ilan K. S. Andrew Ning N. S. Andrew Ning: Aircraft Route Optimization for Formation Flight. In: *JOURNAL OF AIRCRAFT* (2014)
- [15] JIA XU, Geoffrey Bower Ilan K. S. Andrew Ning N. S. Andrew Ning: Aircraft Route Optimization for Heterogeneous Formation Flight. In: *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (2014)
- [16] JOE PAHLE, Dryden Flight Research C. Dave Berger B. Dave Berger: *A preliminary Flight Investigation of Formation Flight for Drag Reduction on the C-17 Aircraft*. 2011
- [17] JOHN D. ANDERSON, Jr.: *Fundamentals of AERODYNAMICS, FIFTH EDITION*. McGRAW-HILL, 2011
- [18] KHULOUD GHALIEH, Mowaffaq H.: The Fermat Point of a Spherical Triangle. In: *The Mathematical Gazette, Vol. 80, No. 489. (Nov., 1996) pp. 561-564* (1996)
- [19] KLAR, Jan-Ulrich: *Aerodynamik von Wirbelschleppen bei hochmanövrierfähigen Flugzeugen*, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität München, Diss., 2012
- [20] MENSEN, Heinrich: *Handbuch der Luftfahrt, 2. Auflage*. Springer Vieweg, 2013
- [21] NING, S. A.: *AIRCRAFT DRAG REDUCTION THROUGH EXTENDED FORMATION FLIGHT*, Department of aeronautics and astronautics of Stanford University, Diss., 2011
- [22] OPENFLIGHTS.ORG: *Airport database*. <http://openflights.org/data.html>, January 2012
- [23] R. LUCKNER, A. K.: Formationsflug von Verkehrsflugzeugen zur Treibstoffeinsparung. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress* (2015)
- [24] RICHARDS, Thomas E. Kent ; Dr. Arthur G.: A Geometric Approach to Optimal Routing for Commercial Formation Flight. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference* (2012)
- [25] RICHARDS, Thomas E. KenThomas E. K.: Analytical Approach to Optimal Routing for Commercial Formation Flight. In: *JOURNAL OF GUIDANCE AND DYNAMICS* (2015)
- [26] S. ANDREW NING, Michael J. A. Ilan Kroo K. Ilan Kroo: Extended Formation Flight at Transonic Speeds. In: *Journal of Aircraft Vo. 51, No. 5* (2014)
- [27] S. ANDREW NING, Tristan C. Flazer Ilan K.: Aerodynamic Performance of Extended Formation Flight. In: *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (2010)
- [28] SABRE: *Airpot Data Intelligence*. – Datenbank, Lizenz erforderlich
- [29] SCHLICHTING, H.: *Leistungsparsnis im Verbandsflug*. 1942
- [30] SHEN, Yujin ; TOLOSA, Juan: The Weighted Fermat Triangle Problem. In: *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences* (2008)

- 
- [31] T. MARKS, V. G. F. Linke L. F. Linke: ENTWICKLUNG EINER METHODE ZUR VEREINFACHTEN ERMITTLUNG VON LEISTUNGSMERKMALEN ZIVILER FORMATIONSFLÜGE.
- [32] T. MARKS, V. G. F. Linke L. F. Linke: EIN ANSATZ ZUR BEWERTUNG DES KONZEPTS VON FORMATIONSFLÜGEN ZIVILER VERKEHRSFLUGZEUGE IM LUFTTRANSPORTSYSTEM. (2013)
- [33] TOBIAS MARKS, Volker G. Florian Linke L. Florian Linke: Evaluation of potential fuel savings by introducing formation flight on a North Atlantic scenario. In: *Air Transport and Operations Symposium* (2015)
- [34] TRISTAN C. FLANZER, William B. B. Stefan R. Bieniawski B. Stefan R. Bieniawski: Operational Analysis for the Formation Flight for Aerodynamic Benefit Program. In: *52nd Aerospace Science Meeting* (2014)
- [35] VERHAGEN, C.M.A.: *Formation flight in civil aviation - Development of a decentralized approach to formation flight routing*, Delft University of Technology Faculty of Aerospace Engineering, Diplomarbeit, 2015
- [36] WERNER, Nicolas: *Entwicklung eines Berechnungsmodells für das DLR-Tool MultiFly zur monetären Bewertung von Formationsflügen*. Mai 2016
- [37] WIESELSBERGER, C.: Beitrag zur Erklärung des Winkelfluges einiger Zugvögel. In: *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, Jahrgang V, Heft 15, Seite 225-229* (1914)
- [38] WINDELS, E.R.G.: *Formation Flight analysis of wake sensitivity, drag and control in trimmed flight*, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Diplomarbeit, 2015



# A. Anhang Modulübersicht

<i>Name</i>	<b>Ersatzmodelle nach Marks et al. [32]</b>
<i>Datei</i>	surro_Leader_Follower.m; delay_analysis.m ; delta_fuel_analysis.m;
<i>Beschreibung</i>	Abschätzung der $\lambda$ -Bewertungen, $\tau$ -Bewertungen und der absoluten Treibstoffeinsparung
<i>Input</i>	<p>           Relativer Umweg <i>Leader</i>            Relativer Umweg <i>Follower</i>            Relative Länge der Formationsphase <i>Leader</i>            Relative Länge der Formationsphase <i>Follower</i>            Relative Länge der Präformationsphase <i>Leader</i>            Relative Länge der Präformationsphase <i>Follower</i>            Relative Länge der Formationsroute <i>Leader</i>            Ladefaktor <i>Leader</i>            Ladefaktor <i>Follower</i>            Formationsmachzahl            Formationsflughöhe         </p>
<i>Zugriffe</i>	–
<i>Output</i>	<p> <math>\lambda</math>  <math>\tau_{Leader}</math>  <math>\tau_{Follower}</math>            Absolute Treibstoffeinsparung         </p>
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abschätzen der Bewertungsmetriken mittels Abbildungsfunktionen</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Flughafendatenbank</b>
<i>Datei</i>	lat.m; long.m; utc.m
<i>Beschreibung</i>	Bereitstellung von Informationen zu geographischer Lage und Zeitverschiebung anhand des IATA-Codes eines Flughafens
<i>Input</i>	IATA-Code
<i>Zugriffe</i>	Airports_database.mat
<i>Output</i>	Breitengrad Längengrad Zeitverschiebung
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identifizieren des Index des IATA-Codes in Airports_database.mat</li> <li>2. Ausgabe von Längengrad, Breitengrad und Zeitverschiebung</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Flugleistungsdatenbank</b>
<i>Datei</i>	ALT.m; TAS.m; TOC.m; TOD.m;
<i>Beschreibung</i>	Bereitstellung von Informationen zu Steig- und Sinkleistung, Flughöhe und wahrer Fluggeschwindigkeit anhand des Flugzeugtyps und der Flugstrecke
<i>Input</i>	Flugzeugtyp Flugstrecke
<i>Zugriffe</i>	B4Profiles.mat ac_references.mat
<i>Output</i>	Dauer Steigflug Zurückgelegte Distanz im Steiflug Dauer Sinkflug Zurückgelegte Distanz im Sinkflug Flughöhe Wahre Fluggeschwindigkeit
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identifizieren des Index des Flugzeugtyps in B4Profiles.mat</li> <li>2. Definieren der Profilwerte für Interpolation</li> <li>3. Interpolation</li> <li>4. Ausgabe der Leistungsparameter</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Datenaufbereitung</b>
<i>Datei</i>	Import.m
<i>Beschreibung</i>	Importieren der Input-Daten mit anschließender Bereinigung und Aufbereitung
<i>Input</i>	Flights.mat
<i>Zugriffe</i>	Flughafendatenbank
<i>Output</i>	HL_Flights0612.mat
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Flüge nach Flugzeugtypen und Routenlänge auswählen</li> <li>2. Abflug und Ankunftszeiten auf UTC 0 umrechnen</li> <li>3. Durchgängige Zeitkoordinate einführen</li> <li>4. Woche mit den meisten Flügen identifizieren</li> <li>5. Frequenzen expandieren</li> <li>6. Statistiken erstellen</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Vorfilterung</b>
<i>Datei</i>	Vorfilter.m
<i>Beschreibung</i>	Identifizieren der potentiellen Formationen mittels heuristische Vorfilterung anhand der Abflugzeiten, Distanzen zwischen den Ziel-flughäfen und Azimutwinkel. Überprüfung der Formationsfähigkeit durch Kopplung der Abflugzeit und der Distanz zwischen den Ab-flughäfen
<i>Input</i>	HL_FLights0612.mat
<i>Zugriffe</i>	Flughafendatenbank Flugleistungsdatenbank
<i>Output</i>	Formation_Results.mat
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Filtern der Formationen anhand der maximalen Flugzeit</li> <li>2. Filtern der Formationen anhand der maximalen Flugdistanz</li> <li>3. Filtern der Formationen anhand des Azimutwinkels</li> <li>4. Filtern der Formationen anhand der individuellen Flugzeit</li> <li>5. Filtern der Formationen anhand der individuellen Flugdistanz</li> <li>6. Filtern der Formationen durch Kopplung von Abflugzeit und Distanz zwischen den Abflughäfen</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Routenmodellierung</b>
<i>Datei</i>	Opt_Routing.m; Pos_Routing
<i>Beschreibung</i>	Generieren der geometrisch optimalen Route mit Hilfe der Fermat-Punkt Ansatzes und anschließende Anpassung der Flugroute an die Abflugzeiten und Flugleistungseigenschaften der beteiligten Flüge
<i>Input</i>	Formation_Results.mat
<i>Zugriffe</i>	Flughafendatenbank Flugleistungsdatenbank Flugdatenbank
<i>Output</i>	Formation_Routing.mat
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bestimmen der geometrische optimalen Flugroute</li> <li>2. Ableitung der bestmöglichen Flugroute unter Berücksichtigung der Abflugzeit</li> <li>3. Anpassen des <i>Break up</i> Punktes an die Sinkflugphasen</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Routenbewertung</b>
<i>Datei</i>	Formation_Assessment_4_1.m
<i>Beschreibung</i>	Berechnen der Formationsparameter und Bewertung mit anschließender <i>Leader / Follower</i> Zuordnung
<i>Input</i>	Formation_Routing.mat
<i>Zugriffe</i>	Flugdatenbank Ersatzmodelle Formationsbewertung Flugleistungsdatenbank Flughafendatenbank
<i>Output</i>	Formation_Routing.mat Formation_Data.mat
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Flugdaten auslesen und Routendaten berechnen</li> <li>2. Bestimmen der Cruise altitude und Machzahl während der Formationsphase</li> <li>3. Berechnen und Speichern der Formationsparameter</li> <li>4. Variation <i>Leader / Follower</i> und Berechnung von Lambda</li> <li>5. Vergleich der Lambdas und Zuordnung <i>Leader / Follower</i></li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Formationsauswahl</b>
<i>Datei</i>	Selection_5.m
<i>Beschreibung</i>	Auswahl der besten Formation je Flug und erzeugen eines validen Formationsflugplans
<i>Input</i>	Formation_Routing.mat Formation_Data.mat Fop_Routing.mat
<i>Zugriffe</i>	Flugdatenbank Flughafendatenbank
<i>Output</i>	Formations.mat
<i>Aufbau</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Flugdatenbank laden</li> <li>2. Formationspartner identifizieren</li> <li>3. Besten Formationspartner auswählen</li> <li>4. Flüge als zugeordnet markieren</li> <li>5. Alle weiteren Formationen mit Beteiligung der zugeordneten Flüge löschen</li> <li>6. Formationsflugplan erzeugen</li> </ol>

<i>Name</i>	<b>Auswertung</b>
<i>Datei</i>	Formation_Parameter_analysis.m; Formation_types.m; Leader_Follower_analysis.m; Top_airports.m; LHR_airports_and_BU.m; LHR_airports_and_RV.m;
<i>Beschreibung</i>	Auswertungen des Formationsflugplans
<i>Input</i>	Formation_Routing.mat Formation_Data.mat Formations.mat Fop_Routing.mat
<i>Zugriffe</i>	Flugdatenbank Flughafendatenbank Flugdatenbank Ersatzmodelle
<i>Output</i>	Auswertungen und Statistiken





