

Formationsflug im Gesamtsystem

Teilvorhaben im Verbundprojekt FORMIC

Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-2, Förderlinie „Ökoeffizientes Fliegen“

Förderkennzeichen: 20E1508A

Projektlaufzeit: 07/2016 - 09/2019

Schlussbericht

Volker Gollnick, Tobias Marks, Majed Swaid, Florian Linke

Technische Universität Hamburg, Institut für Lufttransportsysteme, Blohmstraße 20, 21079 Hamburg

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick (Hamburg den 25.06.2020)

Vorwort

Der aerodynamische Formationsflug von Luftfahrzeugen verspricht analog zum natürlichen Vorbild große Treibstoffeinsparungen und infolgedessen u.a. eine Reduktion des CO_2 - und NO_x -Ausstoßes. Die Integration eines solch neuen Betriebsverfahrens in den Gesamtkontext des Lufttransportsystems stellt jedoch sowohl technisch als auch operationell eine große Herausforderung dar, denn der Formationsflug wirkt sich auf eine Vielzahl von Stakeholdern aus. Zu diesen zählen unter anderem Flugsicherungsdienstleister, Luftverkehrsgesellschaften und Flughäfen, Hersteller und Zulieferer aber nicht zuletzt auch die Passagiere, die das neue Verfahren akzeptieren müssen. Neben den theoretisch in den einzelnen Flugzeugformationen erzielbaren Kraftstoff- und Emissionseinsparungen ist daher vor allem die Frage nach dem systemweit operationell überhaupt erreichbaren Kraftstoffeinsparpotenzial durch Formationsflug wichtig, da es letztlich über die Realisierbarkeit eines solchen Konzeptes entscheidet, indem es Anreize für Hersteller und Betreiber bietet, die nötigen Technologien weiterzuentwickeln und letzten Endes zu beschaffen. Neben dem Kraftstoffeinsparpotenzial ist aber auch die sich durch den Formationsflug ergebende Reduktion der Schadstoffemissionen besonders vor dem Hintergrund verschärfter gesetzlicher Anforderungen ein wichtiger Anreiz für die Weiterentwicklung des Verfahrens. Dabei spielt nicht nur die absolute Einsparung und Schadstoffemissionen sondern insbesondere auch der Ort der Emissionsfreisetzung eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Auswirkungen auf Umwelt und Klima.

Das Vorhaben „Formationsflug im Gesamtsystem“ im Rahmen des Verbundvorhabens FORMIC verfolgt daher das Ziel, das aus dem Formationsflug resultierende Kraftstoffeinsparpotenzial sowie die sich daraus ergebenden Emissionseinsparungen inklusive deren örtlichen Verteilung abzuschätzen. Dazu werden Methoden zur Nachfragemodellierung, Routenoptimierung und Trajektorienberechnung miteinander verknüpft und detaillierte aerodynamische Modelle integriert. Dies erlaubt eine detaillierte Simulation des Formationsfluges mit deren Hilfe die Bewertung des Treibstoffeinsparpotenzials und der Klimawirkung ermöglicht wird.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung	9
1. Aufgabenstellung	9
1.1. Ziel	9
1.2. Ebenenansatz	9
2. Voraussetzungen	11
3. Planung und Ablauf	11
3.1. Projektstruktur FORMIC	11
3.1.1. HAP1 Systemebene	11
3.1.2. HAP2 Formationsebene	12
3.1.3. HAP3 Integration und Umwelteinflüsse	13
3.2. Arbeiten der TUHH	13
3.3. Zeitplanung	14
4. Wissenschaftlicher Stand zu Projektstart	16
4.1. Grundlagen des Formationsfluges	16
4.2. Betriebskonzepte	16
4.3. Technologien	17
4.4. Routenoptimierung	17
4.5. Ökologische Analyse	18
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	19
6. Zusammenfassung der Ergebnisse	19
II. Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse	20
7. Zusammenführung zur Gesamtsimulation (AP3.3)	20
7.1. Grundlegender Berechnungsansatz	20
7.2. Zusammenspiel der Softwaretools	22
8. Technologisches und operationelles Umfeld (AP1.1)	24
8.1. Concept of Operations	24
8.2. Leistungsindikatoren	24
8.3. Ausgewählte Luftfahrzeugtypen	26
9. Nachfrage und Szenarios (AP1.2)	27
10. Routenoptimierung (AP1.3)	29
10.1. Globale Studie	29
10.2. Lokale Studie	32
10.3. Standard Formation Definition (STAFD)	34
11. Notfallverfahren, Durchführbarkeit (AP2.1)	35
12. Trajektorienberechnung (AP2.4)	36
12.1. Integration von DRD und BDD	36

12.2. Integration der TID	37
12.3. Integration von Wind	38
13. Anwendung der Simulation (AP3.4)	40
13.1. Lokale Studie (ICAS2018)	40
13.2. Lokale Studie (Scitech 2020)	41
13.3. Globale Studie	43
14. Gesamtbewertung (AP1.4)	44
14.1. Betrachtete Szenarien	44
14.2. Ergebnisse einer globalen Studie	44
14.3. Ergebnisse einer lokalen Studie	45
14.4. Analysen zur Kraftstoffplanung	46
14.4.1. Betrachtetes Szenario	46
14.4.2. Modellierung	47
14.4.3. Ergebnisse	47
15. Projektmanagement (AP0)	48
16. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Planung	49

Nomenklatur

AEDT	Aviation Environmental Design Tool
AEIC	Aviation Emissions Inventory Code
AEM	Advanced Emission Model
AERO-MS	Aviation Emissions and evaluation of Reduction Options Modelling System
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
AIDAA	Italian Association of Aeronautics and Astronautics
AIM	Aviation Integrated Modelling
AMS	Amsterdam Airport Schiphol
AP	Arbeitspaket
ASK	Available Seat Kilometers
ATL	Hartsfield–Jackson Atlanta International Airport
ATM	Air Traffic Management
ATR	Average Temperature Response
AVL	Athena Vortex Lattice
AWSE	Aircraft wake-surfing for efficiency
BCN	Josep Tarradellas Barcelona–El Prat Airport
BDD	Base Drag Database
CDG	Charles de Gaulle Airport
CFF	Close Formation Flight
CONOPS	Concept of Operations
CPACS	Common Parametric Aircraft Configuration Schema
CSV	Comma-separated Values
DEC	Decision Point
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DLRK	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress
DODP	Double Origin Destination Pair
DODP	Double Origin/Destination-Pair
DPP	Decision Point Procedure
DRD	Drag Reduction Database
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast
EFF	Extended Formation Flight

ERA	En-Route Alternate
ETOPS	Extended Operations
FACET	Future ATM Concepts Evaluation Tool
FAST	Future Civil Aviation Scenario Software Tool
FCA	Formation Cruise Altitude
FCM	Formation Cruise Mach number
FORMIC	Formation Flight Impact on Climate
FRA	Flughafen Airport
FRG	Formationsroutengeometrie
HAM	Hamburg Airport
HAP	Hauptarbeitspaket
ICAS	International Council of Aeronautical Sciences
ILR	Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme
ILT	Institut für Lufttransportsysteme
IPA	DLR Institut für Physik der Atmosphäre
JFK	John F. Kennedy International Airport
LFZ	Luftfahrzeug
LHR	Heathrow Airport
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMU	Manchester Metropolitan University
MS	Meilenstein
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ODP	Origin Destination Pair
ORD	O'Hare International Airport
RCE	Remote Component Environment
RSP	Rendezvous Start Point
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SAGE	System for Assessing Aviation's Global Emissions
SCS	Standard Cruise Speed
SEP	Separation End Point
STAFD	Standard Formation Definition
TCM	Trajectory Calculation Module

TID	Turbulence Influence Database
ToC	Top of Climb
ToD	Top of Descent
TUHH	Technische Universität Hamburg
XML	Extensible Markup Language
YUL	Montréal–Trudeau International Airport

Teil I.

Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

1.1. Ziel

Das Ziel des Verbundvorhabens FORMIC ist die Bewertung des Formationsfluges bezüglich der zu erwartenden Reduktion der Klimawirkung durch einen verringerten Ausstoß an Treibhausgasen infolge der erzielbaren Kraftstoffeinsparungen sowie durch atmosphärische Sättigungseffekte bei der Überlagerung der Abgasfahnen der in der Formation fliegenden Luftfahrzeuge. Dabei erfolgt eine detaillierte Modellierung des Formationsfluges auf allen relevanten Ebenen in einem operationell realistischen Gesamtkontext, um ein möglichst aussagekräftiges Gesamtbild zu erzeugen. Dabei werden u.a. die maßgeblichen Ineffizienzen, die die Treibstoffeinsparungen im Formationsflug reduzieren, betrachtet sowie Modelle zu deren Quantifizierung zu erarbeitet. Diese Modellierung schließt dabei die aerodynamischen Effekte in der Formation, die Optimierung der Flugtrajektorien und der Formationsrouten sowie erstmalig eine genaue Abbildung der nichtlinearen Sättigungseffekte bezüglich Kondensstreifen und Klimachemie ein. Ergänzt werden die Arbeiten durch die Erarbeitung von Prognosen zur Luftverkehrsnachfrage, die Anpassung und Anwendung von Kostenmodellen sowie die Identifikation von Showstoppem, die weitere betriebliche und technologische Hürden für die Umsetzung des Betriebskonzeptes darstellen. Hierzu gehören beispielsweise Notfallverfahren oder Einschränkungen durch Anforderungen an den Passagierkomfort. Die Verwertung erfolgt durch die Veröffentlichung der Projektergebnisse vornehmlich in wissenschaftlichen Journalen und durch das Einwerben von Drittmitteln in Folgeprojekten. Ferner liefern die Projektergebnisse wichtige Beiträge zur Umsetzung des Konzeptes durch Entscheidungsträger in der Luftfahrt.

Das Vorhaben „Formationsflug im Gesamtsystem“ im Verbundvorhaben FORMIC (siehe Projektstruktur in Kapitel 3.1) dient neben der Koordination des Verbundes in der Entwicklung der hierfür erforderlichen Simulationsinfrastruktur mit den darin enthaltenen Methoden sowie der Anwendung dieser Simulation unter Beachtung von Umfeldbedingungen und Szenarien. Damit stellt das Vorhaben erstmals ein integriertes Modellsystem zur Verfügung, mit welchem die Änderungen der Schadstoffverteilungen aus Flugzeugtriebwerken durch Einführung des Formationsfluges quantifiziert werden, wodurch eine Abschätzung der Klimawirkung dieses Betriebskonzeptes ermöglicht wird.

1.2. Ebenenansatz

Zur Erreichung des in Kapitel 1.1 beschriebenen Ziels verfolgt das Verbundvorhaben FORMIC einen integrierten Modellierungsansatz, in dem alle relevanten Einflussfaktoren bei der Abschätzung der Kraftstoffeinsparungen und Schadstoffemissionen des Formationsfluges betrachtet werden. Abbildung 1 zeigt den dem Projekt zu Grunde liegenden Ebenenansatz, nach dem die Betrachtung des Formationsfluges erfolgt. Dabei nimmt die Detailtiefe mit jeder Ebene zu. Insbesondere ist hier die Betrachtung der Ineffizienzen, die auf den einzelnen Ebenen auftreten, von großer Wichtigkeit. Diese Ineffizienzen addieren sich und führen dazu, dass sich das Potenzial des Formationsfluges in der Einzelformation deutlich verringert. Eine genaue Betrachtung dieser Ineffizienzen ist daher für eine valide Bewertung des Formationsfluges unerlässlich. Im Folgenden werden die einzelnen Ebenen genauer erläutert.

Systemebene

Auf der Systemebene werden grundlegende Fragen zur Integration des Formationsfluges in den Gesamtkontext des Lufttransportsystems betrachtet. Dazu zählen neben einer Analyse des technischen und operationellen

Umfelds auch die Modellierung der Nachfrage an Formationsflügen, die Ableitung von Formations Szenarien sowie die Routenführung der Formationsflüge mit einer Zuordnung der einzelnen Formationspartner. Besonders diese Routenführung hat das Potenzial, die durch Umwege und nicht-optimale Zuordnung der Partner auftretenden Ineffizienzen maßgeblich zu beeinflussen.

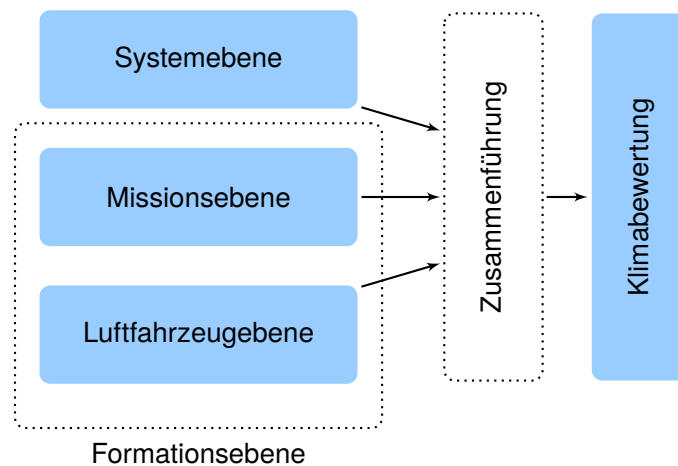


Abbildung 1 – Ebenenschema im Projekt FORMIC

Missionsebene

Auf der Missionsebene erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Arbeiten auf der Systemebene eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Trajektorien der an einer Formation beteiligten Luftfahrzeuge. Dabei ist besonders die Wahl des für die Formation optimalen Betriebspunkts ein wichtiger Aspekt zur Reduktion der hier entstehenden Ineffizienzen. Auch sind hier Notfallverfahren zu berücksichtigen, die im Falle eines vorzeitigen Formationsabbruchs durchgeführt werden müssen und weitere Ineffizienzen, beispielsweise durch die Notwendigkeit mehr Treibstoff mitzuführen, implizieren.

Luftfahrzeugebene

Die Luftfahrzeugebene beschreibt die Effekte, die innerhalb der Formation auftreten, wie z.B. die aerodynamischen Einsparungen durch den Wirbelnachlauf des vorausfliegenden Luftfahrzeugs, Ineffizienzen durch die Ablage vom Wirbel durch Positionierungsungenauigkeiten sowie die Ineffizienzen durch erhöhten Widerstand beim Ruderausschlag zur Kompensation des durch den Wirbel induzierten Rollmoments. Luftfahrzeugebene und Missionsebene werden im Rahmen des Verbundvorhabens FORMIC zur Formationsebene zusammengefasst.

Zusammenführung und Klimabewertung

Erst die Zusammenführung der Effekte aller Ebenen ermöglicht letzten Endes eine detaillierte Betrachtung und Bewertung des Formationsfluges als neues Betriebskonzept, eine Quantifizierung des möglichen Einsparpotenzials und somit auch der Einflüsse auf Umwelt und Klima.

2. Voraussetzungen

Das Vorhaben „Formationsflug im Gesamtsystem“ war eingebunden in das Verbundvorhaben FORMIC (Formation Flight Impact on Climate), im welchem neben der TUHH auch die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für die Physik der Atmosphäre (IPA) kooperierten. Die Aufteilung des Verbundprojektes in Teilvorhaben ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei betrachtete jeder Projektpartner spezifische Teilaspekte des Formationsfluges, welche zum fundierten tieferen Verständnis der physikalischen Effekte, der operationellen Umsetzung und der Auswirkungen auf das Klima notwendig waren. Erst die Zusammenführung dieser einzelnen Aspekte jedoch ermöglichte die im Projekt angestrebte Bewertung des Formationsfluges und bildete somit die Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Durchführung des Verbundprojektes.

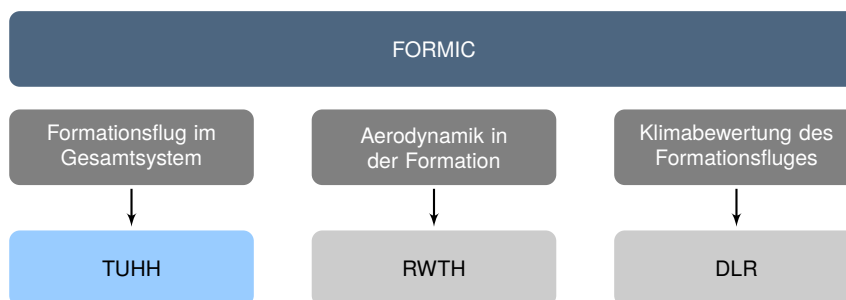


Abbildung 2 – Aufteilung des Verbundprojektes FORMIC in Teilvorhaben (Teilvorhaben der TUHH ist farblich hervorgehoben)

3. Planung und Ablauf

Wie Abbildung 1 verdeutlicht, handelt es sich bei dem Verbundprojekt FORMIC um ein hochgradig interdisziplinäres Vorhaben, welches fundamentale Atmosphären- und Klimaforschung mit universitärer Fachexpertise in den luftfahrttechnischen Disziplinen Aerodynamik und Flugmechanik/-regelung sowie betrieblichen Luftverkehrsprozessen und Methodenkompetenz im Bereich der Optimierung und Zukunftsforschung zusammenführt.

3.1. Projektstruktur FORMIC

Das Projekt FORMIC ist in 3 Hauptarbeitspakete (HAPs) gegliedert, welche die Ebenenstruktur aus Abbildung 1 widerspiegelt. Abbildung 3 zeigt den Projektstrukturplan des Projektes. Arbeitspakete mit Beteiligung der TUHH sind farblich hervorgehoben.

3.1.1. HAP1 Systemebene

HAP1 befasst sich in der Hauptsache mit der Betrachtung der Integration des Formationsfluges in den Gesamtkontext des Lufttransportsystems. Aufgrund ihrer Expertise auf diesem Forschungsfeld sowie einer hohen Beteiligung an den vorgesehenen Arbeiten ist die TUHH HAP-Leiter. In AP1.1 „Technologisches und operationelles Umfeld, (Leistungsindikatoren)“ wird zunächst das technologische Umfeld, in dem der Formationsflug stattfinden wird, analysiert und definiert. Dies beinhaltet die Betrachtung aller relevanten Stakeholder, verfügbarer Technologien sowie operationeller Randbedingungen zum heutigen Zeitpunkt sowie in der Zukunft. Daraus werden wichtige Randbedingungen für die Betrachtungen des Formationsfluges im Verbundprojekt FORMIC abgeleitet. Als wichtigstes Ergebnis liegt nach Abschluss der Arbeiten ein oder mehrere Concepts of Operations (CONOPS), also Beschreibungen, auf welche Art und Weise der im Projekt FORMIC betrachtete Formationsflug durchgeführt wird, vor. Diese CONOPS sind von großer Wichtigkeit für das Vorhaben FORMIC und bilden die

Grundlage für die weiteren Arbeiten. Zudem erfolgt in diesem Arbeitspaket die Definition der Bewertungsmetriken, auf die die Evaluierung des Formationsfluges ausgerichtet ist. Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket werden von allen Partnern gemeinsam im Rahmen eines Workshops durchgeführt. In AP1.2 „Nachfrage und Szenarios“ wird auf Basis der Ergebnisse von AP1.1 die Nachfrage für Formationsflug definiert und entsprechende Szenarien (Ist-Szenario und zukünftiges Szenario), bestehend aus Städteverbindungen, Flugzeugtypen und Frequenzen abgeleitet. AP1.3 „Tool-Anpassung Routenoptimierung“ erfolgt auf Basis der vorangehenden Arbeitspakete die Anpassung des Routenoptimierers anhand des gewählten CONOPS, so dass dieser für die in AP1.2 definierten Szenarien Formationsrouten identifizieren und Formationspartner zuordnen kann. Die so entstehenden Formations Szenarien können dann an den Trajektorienrechner zur detaillierten Berechnung der Trajektorien sowie der entlang dieser freigesetzten Emissionen übergeben werden. AP1.4 „Gesamtbewertung“ ist aufgrund der systemweiten Betrachtung auch in HAP1 angesiedelt. In diesem Arbeitspaket erfolgt nach Beendigung der umfangreichen Berechnungen in AP3.4 die Auswertung und Analyse der Ergebnisse. Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket werden von allen Partnern gemeinsam im Rahmen eines Workshops durchgeführt. Sie umfassen unter anderem die Analyse der Ineffizienzen in Formationen, eine Kostenbetrachtung sowie die Bewertung der Klimawirkung.

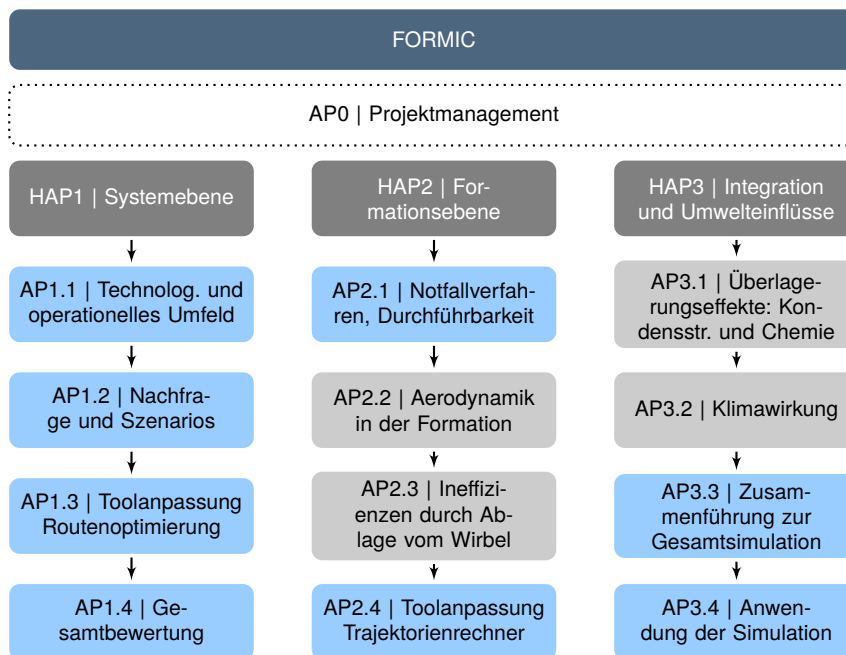


Abbildung 3 – Projektstrukturplan des Verbundprojektes FORMIC (Mitwirkungen der TUHH sind farblich hervorgehoben)

3.1.2. HAP2 Formationsebene

HAP2 beschäftigt sich mit der Betrachtung und der Modellierung der Effekte innerhalb einer Formation sowie der hierfür erforderlichen Anpassung des Trajektorienrechners. Die HAP-Leitung wird auf Grund der starken Beteiligung an den vorgesehenen Arbeiten von der RWTH übernommen. In AP2.1 „Notfallverfahren, Durchführbarkeit“ soll zunächst die Durchführbarkeit der Concepts of Operations aus AP1.1 geprüft werden, um Showstopper in einer frühen Projektphase zu identifizieren. Insbesondere erfolgen in diesem Arbeitspaket eine Betrachtung der Sicherheitsaspekte beim Flug im Wirbel eines anderen Luftfahrzeuges, die Definition von Notfallverfahren sowie die Analyse des Passagierkomforts. In AP2.2 „Aerodynamik der Formation“ wird die Aerodynamik in der Formation detailliert betrachtet und es werden auf Basis der Ergebnisse aus AP1.1 Methoden

zur Abschätzung der Kraftstoffeinsparung einer Formation erarbeitet, die dann in einem Berechnungsmodell umgesetzt werden. Auch erfolgt in diesem Arbeitspaket die Erarbeitung eines Kostenmodells zur monetären Bewertung von Formationsflügen. In AP2.3 „Ineffizienzen durch Ablage vom Wirbel“ erfolgt zusätzlich eine Betrachtung der Ineffizienzen, die durch eine Ablage der Flugzeugposition von der optimalen Position im Wirbel entstehen. Diese Betrachtung wird mit der Erstellung eines Wahrscheinlichkeitsmodells abgeschlossen, welches dann im Trajektorienrechner zur Modellierung der Positionsungenauigkeit verwendet werden kann. In AP2.4 „Tool-Anpassung Trajektorienberechnung“ wird ein Trajektorienrechner auf das in AP1.1 gewählte CO-NOPS angepasst. Auch erfolgt in diesem Arbeitspaket die Vorbereitung der Schnittstellen zur Integration der in AP2.2 und AP2.3 entwickelten aerodynamischen Modelle.

3.1.3. HAP3 Integration und Umwelteinflüsse

Dieses HAP beinhaltet die Arbeiten zur Integration der verschiedenen Modelle zu einer Gesamtsimulation sowie zur Bestimmung der Klimawirkung unter Berücksichtigung der Sättigungseffekte bei der Überlagerung der Abgasfahnen in der Formation. Aufgrund der ausgewiesenen Kompetenz auf dem Gebiet der Klimaforschung übernimmt das DLR (IPA) die HAP-Leitung. Das AP3.1 „Überlagerungseffekte: Kondensstreifen und Chemie“ dient der Erforschung der innerhalb einer Formation zu erwartenden Sättigungseffekte – sowohl in Bezug auf die Kondensstreifenbildung als auch hinsichtlich der Ozonchemie bei der Überlagerung der Stickoxidemissionen in den Abgasfahnen der Formationsteilnehmer. Die in AP3.1 gewonnenen Erkenntnisse aus komplexen Klima-Chemie-Modellen werden schließlich im AP3.2 „Klimawirkung“ derart abstrahiert, dass sie sich in dem im Projekt verwendeten Klima-Response-Modell AirClim nachbilden lassen. Die Integration der im Projekt weiterentwickelten Modelle und Werkzeuge in eine Gesamtsimulationsumgebung ist Gegenstand des AP3.3 „Zusammenführung zur Gesamtsimulation“. Hierbei wird erstmals eine Bewertungsumgebung geschaffen, mit der sich der Formationsflug ganzheitlich hinsichtlich seiner Wirkung auf Umwelt und Klima in einem realistischen Systemkontext evaluieren lässt. Die Gesamtsimulation kommt schließlich in AP3.4 „Anwendung der Simulation“ zur Anwendung, indem sie für die in AP1.2 definierten Szenarien verwendet wird. Ein wichtiges Ergebnis dieser Simulationen ist die globale Verteilung der Emissionen in Form von Emissionskatastern, also Karten der geografischen Verteilung von Schadstoffemissionen.

3.2. Arbeiten der TUHH

Die TUHH ist als Leiter des Verbundprojektes mit dem Projektmanagement (AP0) betraut. Zudem werden Beiträge zu folgenden Arbeitspaketen geleistet:

- AP1.1: Technologisches und operationelles Umfeld
- AP1.2: Nachfrage und Szenarios
- AP1.3: Tool-Anpassung Routenoptimierung AP 1.4: Gesamtbewertung
- AP2.1: Notfallverfahren, Durchführbarkeit
- AP2.4: Tool-Anpassung Trajektorienberechnung
- AP3.3: Zusammenführen zur Gesamtsimulation
- AP3.4: Anwendung der Simulation

Die TUHH ist dabei verantwortlich für die Arbeitspakete AP1.1, AP1.2, AP1.3, AP2.4, AP3.3 und AP3.4. Weitere Partner des Verbundprojektes FORMIC sind die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) sowie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Meilenstein	Beschreibung	Auswirkung auf
MS 1.1	Technologisches und operationelles Umfeld, sowie CONOPS definiert	AP 1.2; AP 2.1
MS 1.2	CONOPS auf Durchführbarkeit geprüft	AP 1.3; AP 2.4
MS 1.3	Gesamtbewertung abgeschlossen	Verbund
MS 2.1	Model zu formationsflugspezifischen Notfallprozeduren	AP 1.1; AP 2.4; AP 3.3
MS 2.3	Berechnungsmodelle angepasst	AP 3.3
MS 3.3	Gesamtsimulation integriert	AP 3.4

Tabelle 1 – Für die TUHH relevante Meilensteine des Verbundvorhabens FORMIC

3.3. Zeitplanung

Abbildung 4 zeigt den Balkenplan des Projektes FORMIC. Die Laufzeit des Vorhabens erstreckt sich über 39 Monate. Die Arbeiten der Verbundpartner sind dabei weitgehend auf die gesamte Projektlaufzeit verteilt. Die zeitliche Anordnung der einzelnen Arbeitspakete baut dabei logisch aufeinander auf. Arbeitspakete ohne inhaltliche Schnittstellen werden auch parallel durchgeführt. Verschiedene Meilensteine kennzeichnen wichtige Zwischenergebnisse bzw. kritische Entscheidungspunkte, die das weitere Vorgehen im Projekt beeinflussen können. In Tabelle 1 sind die Meilensteine des Verbundvorhabens aufgeführt und genauer beschrieben.

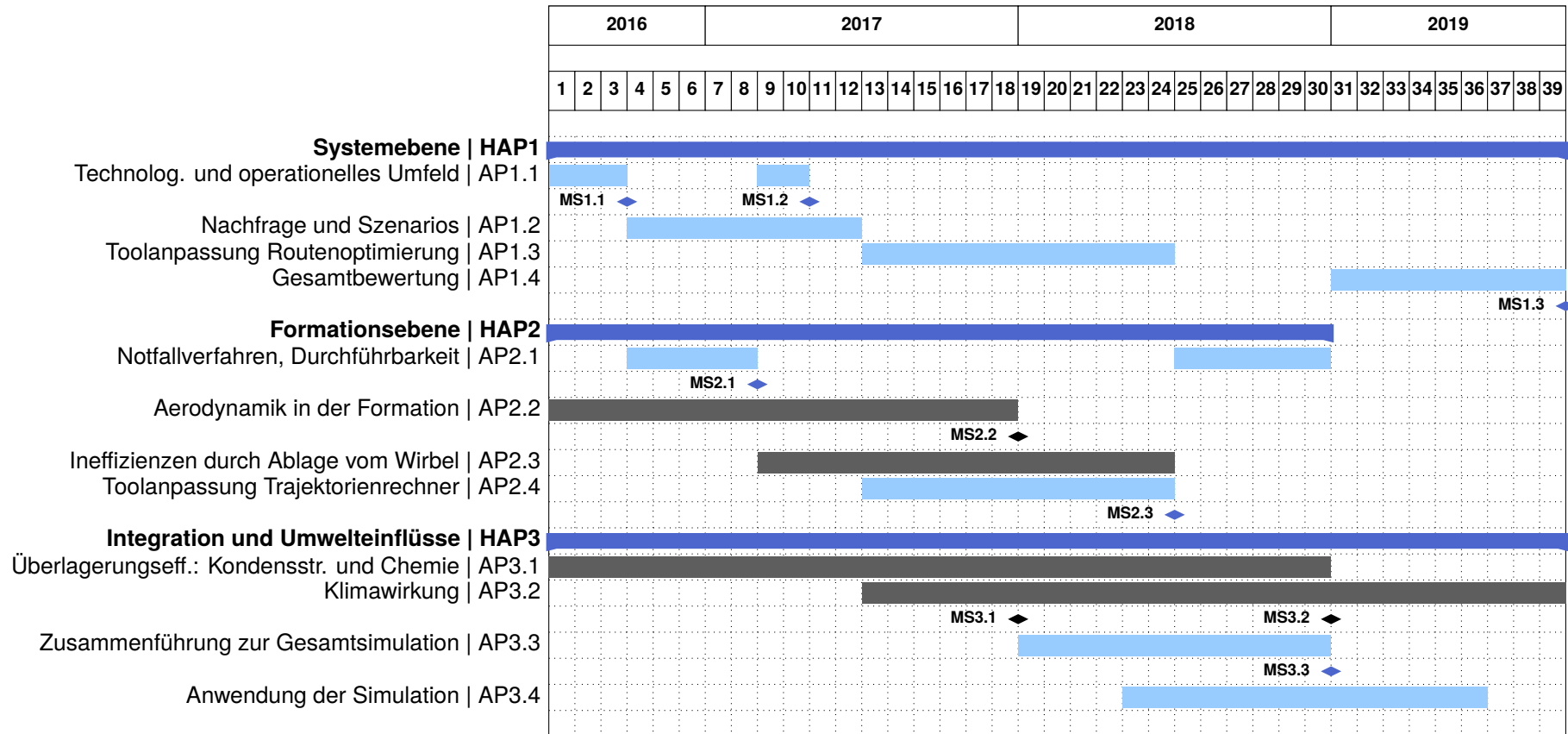


Abbildung 4 – Zeitplanung (Gantt-Chart) des Verbundprojektes FORMIC (Mitwirkungen der TUHH sind farblich hervorgehoben)

4. Wissenschaftlicher Stand zu Projektstart

4.1. Grundlagen des Formationsfluges

Abbildung 5 zeigt den beim aerodynamischen Formationsflug (auch Aircraft Wake-Surfing for Efficiency; AWSE) zu Grunde liegenden Effekt. Hierbei befindet sich ein nachfolgendes Flugzeug im durch die Wirbelschleife eines vorausfliegenden LFZ erzeugten Aufwindfeld. Um die Höhe zu halten, muss das nachfolgende LFZ daher einen Sinkflug gegenüber der aufsteigenden Luft einleiten. Um dabei nicht zu beschleunigen, muss der Schub gedrosselt werden, was letztendlich zu einer Treibstoffeinsparung führt.

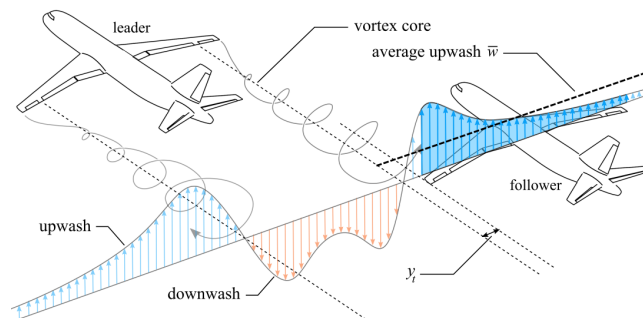


Abbildung 5 – Grundprinzip des aerodynamischen Formationsfluges aus [43]

Auch wenn der zivile aerodynamische Formationsflug in seiner operativen Umsetzung noch in ferner Zukunft liegt, steigt das Interesse an diesem Thema sowohl in der Forschungslandschaft als auch bei der Industrie derzeit an. So werden Einzelaspekte des Formationsfluges an renommierten Luftfahrtuniversitäten wie Stanford (z.B. [44]), TU Delft (z.B. [16, 6]), TU Berlin (z.B. [25, 26, 24, 30]) und der RWTH Aachen betrachtet. Aber auch außeruniversitäre Forschungseinrichtungen wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) befassen sich mit dem Thema (z.B. [52, 38, 39, 36, 40, 34, 37]). Daneben ist der Formationsflug eines der Zukunftskonzepte in der „Smarter Skies“-Vision von Airbus („The future by Airbus“) für das Jahr 2050 [1] und somit auch im Fokus von Flugzeugherstellern. Eine Betrachtung des Formationsfluges im Gesamtkontext und der daraus entstehenden Auswirkungen auf die Umwelt wie im hier vorgeschlagenen Verbundvorhaben FORMIC sind bisher nicht erfolgt. Dabei ist gerade eine solche Betrachtung maßgeblich für Entscheidungsträger in Industrie und Forschung, die für den Formationsflug notwendigen Technologien zu entwickeln und zu beschaffen. Auf EU-Ebene wird der Formationsflug in CleanSky 2 als konkretes Betriebskonzept für die Anpassung des Flugzeugentwurfes betrachtet, dies jedoch vor allem auf Einzelflugebene. Die Ergebnisse von FORMIC können hierfür eine wertvolle Ergänzung für die Betrachtung der Flottenebene darstellen.

4.2. Betriebskonzepte

Formationsflug als neuartiges Betriebskonzept ermöglicht bezogen auf den Gesamtkontext unterschiedliche spezifische Betriebsweisen. Wenngleich die Luftfahrzeuge in einer aerodynamischen Formation immer gleichermaßen im Wirbel eines vorausfliegenden Luftfahrzeuges fliegen, kann jedoch die Art und Weise, wie eine solche Formation betrieben wird und zustande kommt, stark variieren. Es kann dabei beispielsweise zwischen „spontanen“ und „geplanten“ Formationen unterschieden werden. Bei spontanen Formationen findet die Zuordnung der Formationspartner ungeplant statt, d.h. die Luftfahrzeuge kommunizieren ad-hoc miteinander und schließen sich spontan zu Formationen zusammen, wenn dies sinnvoll erscheint. Anders läuft es bei den geplanten Formationen ab, bei denen die Zuordnung der Partner inklusive der Sammel- und Trennpunkte vorausgeplant wird. Dabei sind insbesondere die Auswirkungen von zeitlichen Verzögerungen beim Start von großer Wichtigkeit. Beide Ideen werden in der Wissenschaft verfolgt. Bezüglich der tatsächlichen Durchführung des Formationsfluges wird in der Wissenschaft zwischen dem sog. Close Formation Flight (CFF) und dem Extended Formation Flight (EFF) (vgl. [44]) unterschieden. Bei letzterem befinden sich die Luftfahrzeuge in relativ

großem longitudinale Abstand zueinander (ca. 15 - 40 Spannweiten), wodurch die Gefahr einer Kollision der Luftfahrzeuge deutlich verringert wird. Flugversuche (vgl. [19, 53]) haben gezeigt, dass das Verfahren des EFF praktikabel ist und zu Treibstoffeinsparungen im zweistelligen Prozentbereich führen kann. Zudem kommt es alleine durch das Zusammenfliegen der Luftfahrzeuge und der sich daraus ergebenden geringeren Separation dazu, dass aus Sicht der Flugverkehrskontrolle die Formation als eine Einheit behandelt werden kann, wodurch sich die Kapazität des Luftraums erhöht. Formationen, die sich allein diesen Vorteil der Kapazitätssteigerung des Luftraums zu Nutze machen, werden als „lose“ Formationen bezeichnet. Auch dieser Vorteil des Formationsfluges ist Gegenstand der aktuellen Forschung (siehe dazu [25, 26], [24]).

4.3. Technologien

Auch einzelne für den Formationsflug relevante Technologien wie Regelungs- und Sensorsysteme sind Thema der aktuellen Forschung. Insbesondere ist die Auslegung von Luftfahrzeugen für den Formationsflug gerade für den Flugzeugentwurf interessant. Die Verfügbarkeit der Technologien ist dabei besonders für die Erarbeitung eines Concept of Operations interessant, da diese letztlich darüber entscheiden, in welcher Weise der Formationsflug durchgeführt werden kann. Der Einflug eines Luftfahrzeuges in die Wirbelschleppes eines anderen Luftfahrzeuges stellt ein Gefahrenpotenzial dar, das während der Start- und Landevorgänge besonders hoch ist. Aber auch im En-Route-Bereich, beispielsweise in hoch frequentierten Lufträumen, kann es zum Einflug in Wirbelschleppen, sog. Wake-Vortex-Encountern kommen. Je nach Art des Luftfahrzeuges, Stärke des Wirbels und Winkel des Einfluges kann dies dazu führen, dass die Steuerbarkeit des Luftfahrzeuges nicht ausreicht, um es auf Kurs zu halten oder dass die Struktur übermäßig beansprucht wird (vgl. [47]). Obwohl beim Formationsflug der Flug im Wirbel eines anderen Luftfahrzeugs kontrolliert abläuft, kann es auch hier zu Situationen kommen, in denen die Steuerbarkeit des Luftfahrzeuges nicht mehr gewährleistet ist. Auch der Passagierkomfort ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der über die Realisierbarkeit des Formationsfluges zur Beförderung von Passagieren entscheidet und daher Thema der aktuellen Forschung (vgl. [2]).

4.4. Routenoptimierung

Die geplanten aber auch die spontanen Formationen werfen die Frage nach einer optimalen Routenführung der an der Formation teilnehmenden Luftfahrzeuge und auch der Gesamtformation auf, denn die Wahl der Sammel- und Trennpunkte sowie der Verlauf der Formationsstrecken hat großen Einfluss auf die erzielbaren Einsparungen. Diese Optimierung muss jedoch nicht nur die Positionen optimaler Sammel- und Trennpunkte sondern auch die ideale Gruppierung der Flugzeuge identifizieren. Dieses kombinatorische Problem ist hochkomplex und trotz der essentiell wichtigen Bedeutung für den Formationsflug wenig untersucht. [20, 21] zeigen, dass ein geometrischer Ansatz das Zuordnungs- und Optimierungsproblem analytisch lösen kann. Die Autoren verwenden dabei einfache Modelle zur Abschätzung der Einsparungen innerhalb der Formation und zur Modellierung des Treibstoffverbrauchs der Luftfahrzeuge. Die Gewichtsabnahme der einzelnen Luftfahrzeuge hat jedoch einen großen Einfluss auf die Einsparungen, die in einer Formation erzielt werden können. Zudem bietet erst ein graphbasierter Ansatz, wie er im Vorhaben angestrebt wird, die Möglichkeit eine Beurteilung der Emissionen an dem Ort ihrer Entstehung durchzuführen. In [55, 54] wird ein heuristischer Ansatz verfolgt, um aus einem Routennetzwerk einen optimalen Formationsflugplan abzuleiten. Anhand verschiedener Anwendungsszenarien wird hier gezeigt, dass für gegebene Airline-Netzwerke große Treibstoffeinsparungen durch Formationsflug zu erzielen sind, wenngleich die Kosteneinsparungen durch verlängerte Flugzeiten geringer ausfallen. Ansätze zur Beurteilung des Formationsfluges im Kontext des Lufttransportsystems sind daher bekannt und Gegenstand der aktuellen Forschung. Dabei sind insbesondere Analysen zum Formationsflug im Bereich des Nordatlantiks als einem für den Formationsflug gut geeigneten Bereich durchgeführt worden. Da sich die Ansätze bei diesen einzelnen Studien jedoch von der in diesem Vorhaben angestrebten Vorgehensweise stark unterscheiden, sind sie gut als mögliche Vergleichsszenarien zu verwenden. Des Weiteren gibt

es Ansätze, die die Auswirkung des Timings auf geplante Formationsflüge betrachten. [22] zeigen, dass trotz Verspätungen beim Abflug hohe Einsparungen durch Formationsflug erzielt werden können.

4.5. Ökologische Analyse

Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen im Luftverkehr lassen sich grob in technologische, betriebliche (operationelle) sowie in regulatorische bzw. politische Maßnahmen unterscheiden. Bei den operationellen Maßnahmen kann darüber hinaus zwischen Betriebsverfahren und Betriebskonzepten differenziert werden. Als Betriebskonzepte sollen solche Maßnahmen oder Strategien verstanden werden, die komplexere Prozesse auf Flotten- oder Systemebene beinhalten. Der zivile Formationsflug ist solch ein denkbare Betriebskonzept für den zukünftigen Luftverkehr. Die Wirkungen neuer Betriebskonzepte können sich vielfältig zeigen, weshalb hier besondere Anforderungen an die für die Untersuchung verwendeten Modelle gestellt werden. Insbesondere die hohe Diversität der hier denkbaren Konzepte macht eine systematische Herangehensweise für eine Analyse schwierig, weshalb in der Vergangenheit maßgeschneiderte Methoden zum Einsatz kamen. Für die Quantifizierung der ökologischen Wirkungen von Maßnahmen (z.B. Technologien oder Strategien) existiert weltweit eine ganze Reihe von Softwarewerkzeugen. Diese Systeme unterscheiden sich bedingt durch die unterschiedlichen Anwendungen, für welche sie konzipiert wurden, hinsichtlich ihres Funktionsumfangs sowie ihrer Detailtiefe. Trotz steigender Speicherkapazitäten und Rechnerleistungen enthalten die Programme vereinfachende Annahmen, um das komplexe Umfeld des Luftverkehrs auch in Ermangelung detaillierterer Daten (z.B. Atmosphärenbedingungen, Flugleistungen, Informationen über verwendete Triebwerke, Triebwerksleistungen, Flugbetriebsdaten der Flugzeugbetreiber etc.) zu modellieren. Zu den wichtigsten Werkzeugen gehören das Aviation Environmental Design Tool (AEDT) der FAA [28], die Emissionskatastersoftware System for Assessing Aviation's Global Emissions (SAGE) [23] – zukünftig auch Teil von AEDT, das Future Civil Aviation Scenario Software Tool (FAST) der Manchester Metropolitan University (MMU), das Future ATM Concepts Evaluation Tool (FACET) der NASA mit der darin enthaltenen Environmental Toolbox [13], der quelloffene Emissionskatastercode Aviation Emissions Inventory Code (AEIC) des MIT [48], das Advanced Emission Model (AEM) der EUROCONTROL [18], das Aviation Emissions and evaluation of Reduction Options Modelling System (AEROMS) sowie das Aviation Integrated Modelling (AIM) Projekt der University of Cambridge [45]. Diese Werkzeuge sind vor allem in der Lage, mit Hilfe von Flugbewegungsdaten und Flugleistungsmodellen in Kombination mit Kraftstoffmassenstrom-Korrelationsverfahren, Emissionsverteilungen oder globale Emissionskataster (kartografische Darstellung gerasterter Schadstoffverteilungen) zu berechnen. Derartige Kataster sind jedoch bisher vor allem für die Darstellung historischer sowie prognostizierter Luftverkehrsemissionen und technologischer Effizienzsteigerungen zum Einsatz kamen, selten jedoch als Kataster zur Beurteilung des Einflusses operationeller Maßnahmen auf die globale Verteilung von Emissionen. Ausnahmen bilden hier die Projekte TRADEOFF [12], CATS [27] sowie REACT4C [14], in denen die Klimawirkung von Änderungen typischer Höhenprofile bzw. der lateralen Routenführung untersucht wurden. Ferner sind Betriebskonzepte gemäß obiger Definition nur einzeln untersucht worden, z.B. von Braun [3], wobei ein eingeschränkter Untersuchungsbereich auf einzelne Luftverkehrsgesellschaften bzw. Flotten gewählt wurde, so dass eine Erstellung von Katastern wenig sinnvoll gewesen wäre.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde unter Leitung des Instituts für Lufttransportsysteme (ILT) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule (RWTH) Aachen sowie dem Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) durchgeführt.

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Teilvorhabens „Formationsflug im Gesamtsystem“ des Verbundprojektes FORMIC wurde zusammen mit den Projektpartnern ein Modellsystem zur Gesamtbewertung des Formationsfluges hinsichtlich des Kraftstoffeinsparpotenzials und der zu erwartenden reduzierten Klimawirkung entwickelt. Im Folgenden werden die Hauptergebnisse des Teilvorhabens aufgelistet:

- Festlegung eines CONOPS sowie operationeller Randbedingungen für den aerodynamischen Formationsflug
- Entwicklung eines Prognosetools zur Aufbereitung und Prognose von Flugplänen für Formationsflug
- Anpassung des Trajektorienrechners TCM für den aerodynamischen Formationsflug
 - Anpassung an die besonderen Gegebenheiten des aerodynamischen Formationsfluges
 - Integration von aerodynamischen Interaktions-Datenbanken zur Ermittlung der Einsparungen
 - Integration von Windeffekten und atmosphärischen Störungen
- Erarbeitung einer Methodik und Erstellung eines Routenoptimierers für die Bestimmung globaler Formationsflugrouten und Zuordnung der Formationspartner
- Erarbeitung einer Methodik und Erstellung eines Routenoptimierers für die Ermittlung windoptimaler Formationsflugrouten
- Aufbau einer Gesamtsimulationskette zur Bewertung der Klimawirkung des Formationsfluges
- Durchführung von lokalen und globalen Studien zu Analyse von ausgewählten Teilaspekten des Formationsfluges
- Durchführung von lokalen und globalen Studien zu Analyse der Klimawirkung des Formationsfluges

Im Rahmen der durchgeführten Studien konnte gezeigt werden, dass auf Basis aktueller Flugpläne bereits eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Durchführung von aerodynamischem Formationsflug existiert (ca. 5% aller betrachteten Flüge, siehe Kapitel 14), und dass hierdurch eine Verringerung der Klimawirkung der beteiligten Flüge in Größenordnungen von 22% - 24% erzielt werden kann. Zudem wurde gezeigt, dass der Wind einen starken Einfluss sowohl auf die Routenführung als auch die Einsparungen der Formationsteilnehmer (bis zu 1% bezogen auf den Gesamtkraftstoffverbrauch) haben kann. Zudem wirkt sich eine windoptimale Routenführung auf die geforderten Abflugzeiten aus. Eine nötige Startzeitflexibilität von bis zu 18 Minuten wurde im Rahmen der durchgeführten Studien ermittelt. Ferner zeigte sich, dass auch die Kraftstoffplanung starken Einfluss auf die Einsparungen durch Formationsflug haben kann. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der aerodynamische Formationsflug dazu beitragen kann, die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren. Effekte durch Windeinfluss und Kraftstoffplanung sollten dabei jedoch nicht vernachlässigt werden.

Teil II.

Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Projektergebnisse des Vorhabens detailliert dargestellt. Die Gliederung erfolgt dabei gemäß der im Arbeitsplan definierten Arbeitspakete. Für jedes Arbeitspaket werden die einzelnen durchgeführten Arbeit aufgeführt und die Arbeitsergebnisse beschrieben. Um ein besseres Verständnis bezüglich des Zusammenspiels der einzelnen Arbeiten zu erlangen, wird zunächst jedoch das AP3.3 „Zusammenführung zur Gesamtsimulation“ beschrieben.

7. Zusammenführung zur Gesamtsimulation (AP3.3)

Ziel des Arbeitspaketes war es, die einzelnen im Projekt entstandenen Software-Tools (Routenoptimierer, angepasster Trajektorienrechner, aerodynamisches Interaktionsmodell, Modell zur Abschätzung der Positionsungenauigkeit) zu einer Gesamtsimulation zusammenzuschließen, so dass für ein vorgegebenes Formationszenario eine Verteilung der Emissionen berechnet werden kann. Diese Emissionsverteilungen können dann wiederum an das angepasste Tool zur Klimabewertung übergeben werden, welches dann eine Abschätzung der durch den aerodynamischen Formationsflug erzielte Veränderung der Klimawirkung ermittelt. Der Zusammenführung der einzelnen Tools zu einer funktionierenden Berechnungskette kam eine zentrale Bedeutung innerhalb des Projektes FORMIC zu.

7.1. Grundlegender Berechnungsansatz

Abbildung 6 zeigt den bei der Gesamtberechnung verfolgten Ansatz. Das grundlegende Zusammenspiel der einzelnen Software-Tools wurde zunächst im Rahmen eines Workshops im AP1.1 (Kapitel 8) geklärt. Die einzelnen hier dargestellten Schritte werden im Folgenden näher erläutert.

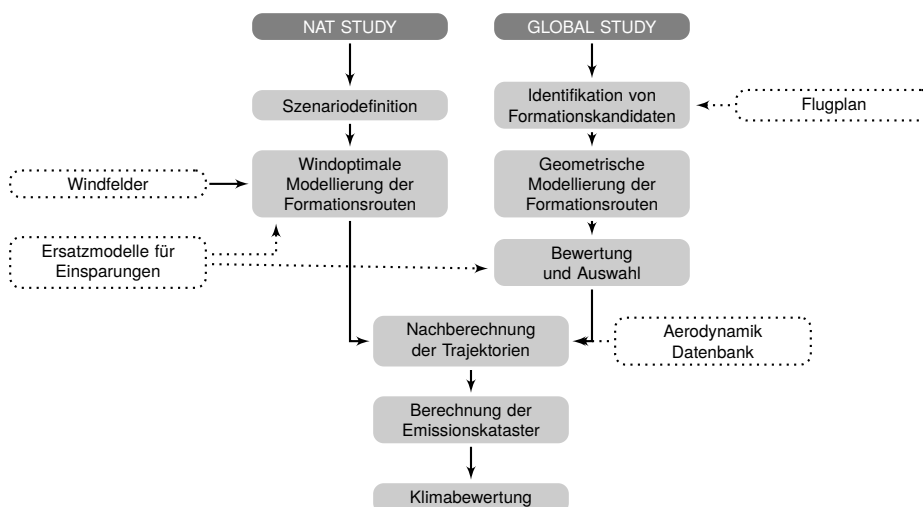


Abbildung 6 – Ansatz zur Gesamtberechnung der Klimawirkung des aerodynamischen Formationsfluges im Projekt FORMIC

Identifikation von Formationskandidaten

In der globalen Studie werden mögliche Formationskandidaten auf Basis von Flugplänen identifiziert. Um die immense Anzahl möglicher Formationen im Vorfeld einzuschränken werden unterschiedliche Filter angewendet. Diese Filter identifizieren unmögliche Formationen auf Basis der Flugstrecke, Startzeit, Start- und Zielflughafen sowie Flugrichtung. Zudem können Filter für Flugzeugtypen, Airlines, Flughäfen und mehr verwendet werden.

Geometrische Modellierung der Formationsrouten

Die Flugrouten der identifizierten möglichen Formationskandidaten werden im nächsten Schritt mit dem geometrischen Ansatz von Kent et. al. [20] modelliert. Die geometrisch optimale Formationsroute kann jedoch aufgrund der unterschiedlichen Abflugzeiten der Formationspartner in der Regel nicht umgesetzt werden, weil der Zeitversatz am Rendezvouspunkt zu groß ist. Es wird daher auf Basis der Abflugzeiten und Fluggeschwindigkeiten geprüft, ob die beiden Formationsteilnehmer einen gemeinsamen Rendezvouspunkt erreichen können. Ist dies der Fall, wird der nächstmögliche Rendezvouspunkt bezogen auf den geometrisch optimalen Rendezvouspunkt für die weitere Modellierung ausgewählt (vgl. [8]). Das genaue Verfahren ist in Kapitel 10.1 detailliert beschrieben.

Bewertung der Einsparungen und Auswahl

Die Bewertung der Einsparungen basiert auf Ersatzmodellen, die die relative treibstoffbasierte Metrik λ_f auf Basis der Formationsgeometrie abschätzen können. Diese Modelle werden mit Hilfe der Kriging-Methode auf Basis eines vorberechneten Datensatzes an Beispielformationen erzeugt und mit Hilfe eines Validierungsdatsatzes geprüft. Dabei werden die Einsparungen mit dem Trajektorienrechner, wie er in Kapitel 12 beschrieben wird bestimmt. Durch die so erzeugten Ersatzmodelle können dann für eine beliebige Formationsroutengeometrie, welche durch die Formations- und Missionsparameter charakterisiert ist, die Einsparungen abgeschätzt werden. Die Erzeugung der Ersatzmodelle wird in [33] und [39] detailliert beschrieben.

Nachberechnung der Trajektorien

Zur Berechnung der Formationstrajektorien wird der hausinterne Trajektorienrechner *Trajectory Calculation Module*¹ (TCM) verwendet (vgl. [29, 31]). Die Berechnung der Trajektorie von Leader und Follower werden dabei getrennt voneinander durchgeführt. Zur Berücksichtigung der Wirbelstärke des Leaders muss jedoch das Berechnungsergebnis der Trajektorienberechnung des Leaders bei der Berechnung des Followers übergeben werden. Zudem ist die Datenbank der vorberechneten Schubeinsparungen (Drag Reduction Database, DRD) für die Berechnung der Einsparungen im jeweiligen Flugzustand notwendig. Diese wurden im Verbundprojekt FORMIC durch die RWTH entwickelt und bereitgestellt. Ein Vergleich des einfachen analytischen Modells mit dem Datenbankmodell wurde zusammen mit der RWTH in [43] veröffentlicht. Winde wirken sich ggf. stark auf die Flugleistungen aus und können daher während der Berechnung der Trajektorie ebenfalls berücksichtigt werden. Hierzu werden als Datengrundlage die European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [10] Atmosphärenkennfelder verwendet.

Windoptimale Modellierung der Formationsrouten

Nicht nur die Einsparungen einer Formation durch AWSE werden durch den Wind beeinflusst, auch die optimale Routenführung ändert sich in einem gegebenen Windfeld. Für die Bestimmung einer windoptimalen Routenführung der Formations- und der Referenzflüge wurde ein Optimal-Control-Ansatz verwendet, wie er in [42] beschrieben wird. Da sich die Routengeometrie einer Formation aus 7 Segmenten² zusammensetzt, wird für jedes einzelne Segment eine windoptimale Routenführung berechnet. Alle Segmente werden dann zusammengesetzt und bilden eine vollständige Formationsroutengeometrie (FRG). Die so entstandenen FRGs

¹Fortschrittliches Softwarewerkzeug zur Berechnung von 4D-Flugzeugtrajektorien mit Teilmodulen zur Bestimmung optimaler Vertikalprofile, Routenoptimierung und Berechnung von Emissionsverteilungen. Das Werkzeug besitzt Schnittstellen zu verschiedenen Flugleistungsmodellen (einschl. EUROCONTROL BADA 4) sowie für die Verarbeitung realatmosphärischer Daten (Wind, Temperatur, Druck)

²Anflug-, Weiterflug- und Referenzsegment für Leader und Follower sowie Formationssegment für beide

werden dann mit Hilfe von Ersatzmodellen bewertet, wie in Kapitel 7.1 beschrieben wird. Um nun die windoptimale FRG zu identifizieren, werden der Rendezvouspunkt (Rendezvous Starting Point; RSP) und der Separationspunkt (Separation End Point; SEP) durch einen Optimierungsalgorithmus so lange verschoben, bis ein Maximum der Einsparungen gefunden wurde (vgl. hierzu Kapitel 10.2).

Erzeugung von Emissionskatastern

Aus den durch die Nachberechnung resultierenden Trajektoriendaten werden im nächsten Schritt Emissionskataster für die einzelnen Emissionsarten abgeleitet, indem der berechnete Treibstoffmassenfluss entlang der Trajektorie mit Emissionsdaten, welche für Zertifizierungszwecke erhoben wurden, gemäß der Boeing Fuel Flow Method 2 [9] korreliert wird. Die Emissionskataster der unterschiedlichen Emissionsarten werden dann herangezogen, um die Veränderung der Klimawirkung durch aerodynamischen Formationsflug abzuschätzen. Das zur Erzeugung der Kataster am Institut verwendete Softwaretool GRIDLAB wurde entsprechend angepasst. Zu diesen Anpassungen zählte zum einen die Berücksichtigung der Häufigkeit einer Formation³ und zum anderen die Zusammenlegung der Formationsrouten eines Szenarios zur Erzeugung von Formationskatastern, welche die Anzahl der Formationen in einer Gitterbox repräsentieren (vgl. z.B. Abbildung 24).

Klimabewertung

Die Emissionskataster der einzelnen Emissionsarten werden verwendet, um die durch Formationsflug erzeugten Änderungen der Klimawirkung mit Hilfe des Klima-Chemie-Responsemodells AirClim [15, 4] zu berechnen, welches durch das DLR Institut für die Physik der Atmosphäre bereitgestellt wird. Die sich durch Formationsflug ergebenden Änderungen in AirClim wurden dabei entsprechend durch die Projektpartner umgesetzt. Diese sind insbesondere Überlagerungseffekte der Kondensstreifen und Sättigungseffekte der Atmosphärenchemie durch die lokal stark erhöhten Emissionswerte⁴.

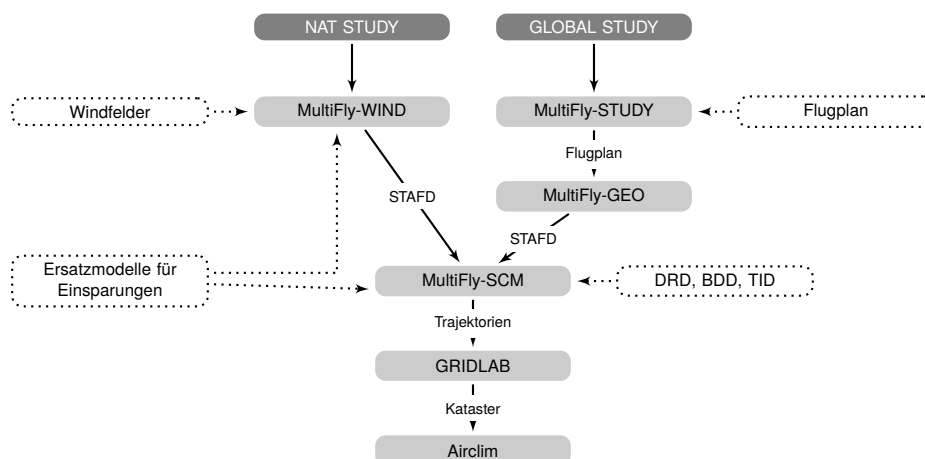


Abbildung 7 – Zusammenspiel der Softwaretools im Projekt FORMIC

7.2. Zusammenspiel der Softwaretools

Der in Kapitel 7.1 beschriebene Berechnungsansatz für die Gesamtsimulation wurde durch die Erstellung unterschiedlicher Software-Werkzeuge umgesetzt. Die Verknüpfung der Werkzeuge ist in Anlehnung an Abbildung 6 in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurden neue Module zum MultiFly Toolkit⁵ (MultiFly-GEO, MultiFly-WIND,

³z.B. wenn diese im betrachteten Studienzeitraum mehrfach auftritt

⁴Die Emissionen von Leader und Follower addieren sich bei einer Formation, wohingegen bei Einzelflügen die Emissionen getrennt betrachtet werden. Hierdurch können sich ggf. formationsbedingte Sättigungseffekte bemerkbar machen.

⁵Software-Toolkit zur Berechnung von Formationen bestehend unter anderem aus Routenoptimierer, Berechnungstool für STAFD-Dateien, Formationseditor und Tools zur Durchführung übergeordneter Parameterstudien zum Formationsflug

MultiFly-STUDY) hinzugefügt und andere Softwaretools erweitert (GRIDLAB) oder angepasst (TCM). Zum finalen Aufbau der Berechnungsketten wurde neben der direkten Implementierung in Matlab das Remote Component Environment (RCE) verwendet. Dies ermöglicht die serverbasierte Bereitstellung der Tools für interne und externe Partner und ermöglicht eine intuitive graphische Verknüpfung der einzelnen Werkzeuge zu komplexen Berechnungsketten. Abbildung 8 zeigt beispielhaft den im Projekt FORMIC realisierten RCE-Ablaufplan. Zur Verwendung der Tools müssen diese in RCE hinterlegt und mit geeigneten Parametern, Eingangs- und Ausgangsvariablen verknüpft werden. Die Integration von Tools in Matlab erfordert zudem passende Wrapper Funktionen in der Programmiersprache Python, um Matlab mit den richtigem Programmaufruf zu starten. Die in diesem Bericht vorgestellten Tools wurden im Rahmen des Projektes FORMIC entsprechend in RCE integriert und die erforderlichen Wrapper und Hilfsfunktionen wurden erstellt. In Abbildung 8 sind die einzelnen Softwaretools als Kästen repräsentiert. Über entsprechende Verknüpfungs-, Import- und Exportelemente sind die einzelnen Module miteinander verknüpft. Auch die Einbindung von AirClim, welches serverseitig beim DLR Institut für die Physik der Atmosphäre zur Verfügung steht, wurde im Rahmen eines Tests in die Kette extern erfolgreich eingebunden.

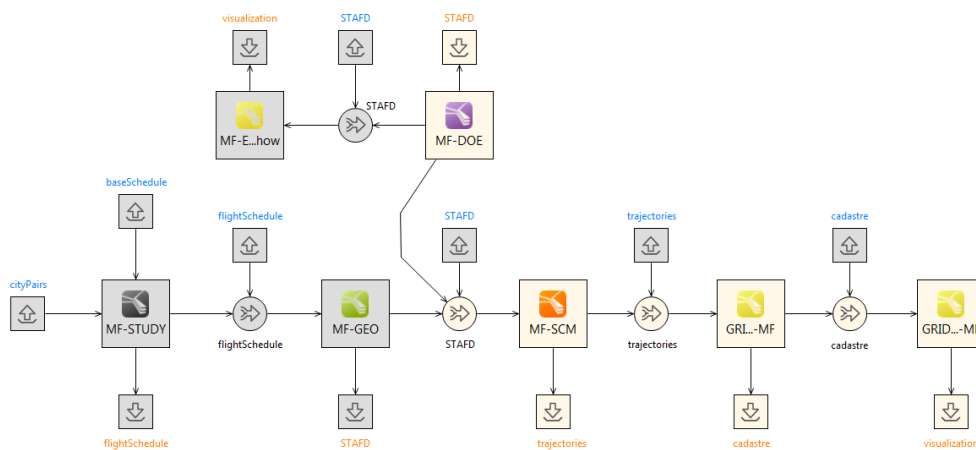


Abbildung 8 – Beispielhafte Verknüpfung der Einzelmodule zur Simulationskette im Remote Component Environment (RCE)

8. Technologisches und operationelles Umfeld (AP1.1)

In diesem Arbeitspaket sollten die Grundlagen für die erfolgreiche Umsetzung des Formationsfluges im Lufttransportsystem erarbeitet werden. Neben einer Definition des technologischen Umfeldes, in dem der Formationsflug stattfinden soll, sollte hier vor allem das Concept of Operations (CONOPS) definiert werden. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes dienen als Grundlage für die weiteren detaillierten Betrachtungen des Formationsfluges im Projekt FORMIC. Zur Integration des Formationsfluges in das Gesamtsystem war daher zunächst ein Verständnis der Abhängigkeiten der einzelnen Systemteilnehmer wichtig. Die einzelnen Stakeholder, die durch Formationsflug betroffen sind, sollten identifiziert, Abhängigkeiten geklärt sowie notwendige Enabler-Technologien, welche Voraussetzung für den Formationsflug sind, betrachtet werden. Auch die Definition des zukünftigen Umfeldes, in welchem der Formationsflug stattfinden soll, sollte in diesem AP behandelt werden, um schon im Vorfeld mögliche Showstopper zu identifizieren.

8.1. Concept of Operations

Die oben genannten Fragestellungen wurden im Rahmen eines Workshops der Projektpartner gemeinsam analysiert. Auf Basis dieser Analyse wurde anschließend ein Concept of Operations⁶ (CONOPS) erarbeitet. Dieses ist in Tabelle 2 dargestellt. Das Hauptmerkmal dieses CONOPS ist es, dass sich auf eine Betrachtung der Formationen von zwei Teilnehmern beschränkt wurde. Dies stellt den einfachsten Fall einer Formation dar und es kann erwartet werden, dass dieser als erstes zum Einsatz kommen wird. Die Tatsache, dass der Formationsflug als Extended Formation Flight mit longitudinalen Abständen von ca. 30 Spannweiten durchgeführt wird, führt außerdem dazu, dass das Wirbelsystem hinter zwei in Formation fliegenden Luftfahrzeugen chaotischen Charakter aufweisen kann und daher die Teilnahme eines dritten Luftfahrzeuges ausgeschlossen werden kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt des CONOPS war die Festlegung, dass der Formationsflug geplant abläuft, das heißt, die Teilnehmer vor dem Flug wissen, mit wem sie in Formation fliegen, wann und wo sie sich treffen. Des Weiteren wurden in der Hauptsache Langstreckenflugzeuge der Wirbelschleppenkategorien Super Heavy, Upper Heavy und Lower Heavy⁷ betrachtet, da angenommen werden kann, dass sich Formationsflug hauptsächlich auf Langstreckenflügen lohnen wird. Spezielle Anpassungen der Luftfahrzeuge mit Ausnahme der Integration notwendiger Kommunikations- und Sensorsysteme wurden nicht angenommen. Bezüglich der Durchführung des Fluges wurde angenommen, dass es pro Paarung nur ein Formationssegment gibt und keine Positionswechsel, Höhenanpassungen während der Formation stattfinden, Kurswechsel hingegen erlaubt sind. Des Weiteren wurde angenommen, dass die Routenwahl frei erfolgen kann und beide Teilnehmer ggf. von ihrer geplanten Einzelflugroute zu Gunsten der Formationsteilnahme abweichen können.

8.2. Leistungsindikatoren

Im Rahmen des oben genannten Workshops wurden zudem Metriken und Leistungsindikatoren zur Bewertung des Formationsfluges bestimmt sowie grundlegend zu betrachtende Szenarien festgelegt. Als operationelle Bewertungsindikatoren wurden die relativen λ_f und absoluten Δm_{Bf} treibstoffbasierten Metriken gemäß Gleichung 1 ausgewählt. Hierin beschreibt m_B den Treibstoffverbrauch der Referenzmission (ref) bzw. der Mission mit aerodynamischen Formationsflug (awse). Der Gesamtverbrauch wird dabei über alle Formationsteilnehmer summiert.

$$\lambda_f = \frac{\Delta m_{Bf}}{m_{Bfref}} = \frac{\sum m_{Bref} - \sum m_{Bawse}}{\sum m_{Bref}} \quad (1)$$

⁶Unter CONOPS ist hier die Art und Weise zu verstehen, in der der Formationsflug betrieben wird. Im Vordergrund stehen dabei Fragen wie z.B.: Wie viele Luftfahrzeuge nehmen an einer Formation teil? Schließen sich die Luftfahrzeuge spontan zusammen oder wird die Formation vorausgeplant? Welchen Abstand haben die Luftfahrzeuge? Wechseln die Formationsteilnehmer ihre Position?

⁷gemäß RECAT-EU [11]

Eigenschaft	Auswahl
Anzahl der LFZ in einer Formation	2
Art der LFZ	Serienflugzeuge
Triebwerke	2-strahlig, 4-strahlig
Wirbelschleppen Kategorie	Super Heavy, Upper Heavy, Lower Heavy
Range	Langstrecken
Body	Single aisle, double aisle
Airlines/Konsortia	alle
Formationstopologie	Staffel
Formationsbildung	geplant
long. Abstand	Extended Formation Flight (30 Spannweiten)
lat./vert. Abstand	Optimal im Sweetspot
Ort des Fluges	Freie Wahl der Routen
Positionswechsel	nein
Kursänderungen	ja
Höhenanpassungen	nein
Anzahl Formationssegmente	1
Ggf. Rerouting (Fliegen von Umwegen)	beide
Notfallverfahren	Treibstoff für Solomission
Windeinfluss	ja (nur Nordatlantik)
Cost-Sharing	Faire Aufteilung zwischen Teilnehmern
Optimierung	kostenoptimal (Treibstoff und Zeit), klimaoptimal

Tabelle 2 – Übersicht über das durch die Projektpartner im Rahmen eines Workshops festgelegte CONOPS

Für die Abschätzung der Klimawirkung und dem Abschwächungspotenzial durch Formationsflug wurde die quantitative Klimametrik Average Temperature Response (ATR) festgelegt. Die ATR wird dabei als durchschnittlicher globaler Mittelwert der bodennahen⁸ Temperaturänderung über einen Zeithorizont von 50 Jahren betrachtet.

$$\delta ATR = \frac{ATR_{awse} - ATR_{ref}}{ATR_{ref}} \quad (2)$$

Zur Betrachtung des durch aerodynamischen Formationsflug erzeugten Unterschiedes in der Klimawirkung wurde zudem die Kennzahl δATR definiert. Diese beschreibt gemäß Formel 2 den Unterschied der ATR mit (awse) und ohne Formationsflug (ref) bezogen auf den Fall ohne Formationsflug (ref).

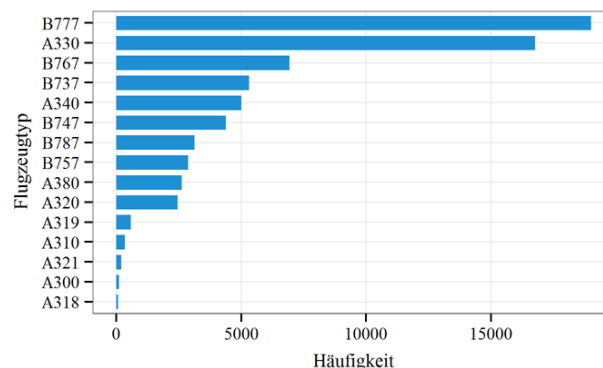


Abbildung 9 – Häufigkeitsverteilung der Luftfahrzeugtypen auf Basis der vorliegenden Flugplandaten

⁸gemessen in 2m Höhe über dem Boden

8.3. Ausgewählte Luftfahrzeugtypen

Aufgrund der Tatsache, dass für das gewählte CONOPS nur Langstreckenflüge ausgewählt wurden, wurde die Betrachtung der konkreten Luftfahrzeugtypen stark eingeschränkt. Dies war notwendig, um die Anzahl der später im Projekt durchzuführenden rechenintensiven Berechnungen der aerodynamischen Datenbanken einzuschränken. Die Auswahl der Luftfahrzeugtypen wurde dabei auf Basis einer Analyse der meistgenutzten Luftfahrzeugtypen in dem vorhandenen Flugplan durchgeführt. Abbildung 9 zeigt die Verteilung der LFZ-Typen geordnet nach deren Frequenz im betrachteten Zeitraum. Da aus Sicherheitsgründen eine Fokussierung auf Flugzeuge mit den Wirbelschleppenkategorien (Super Heavy, Upper Heavy und Lower Heavy; gemäß RECAT-EU [11]) angestrebt wurde, konnten kleinere Muster (A319, A321, A318, A320, B737) sowie ältere Modelle (A310, A300, B757) vernachlässigt werden. Aufgrund der älteren Datengrundlage kann zudem davon ausgegangen werden, dass der Airbus A350 zukünftig auf den betrachteten Strecken vermehrt eingesetzt werden wird, weshalb er in die Betrachtungen mit aufgenommen wurde. Die im Rahmen des Projektes betrachteten Luftfahrzeugtypen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Hersteller	Luftfahrzeugtyp
Airbus	A330
	A340
	A380
	A350
Boeing	B777
	B767
	B747
	B787

Tabelle 3 – Übersicht über die im Projekt FORMIC betrachteten Luftfahrzeugtypen

Damit ergaben sich insgesamt 64 verschiedene Formationspaarungen, für welche die entsprechenden aerodynamischen Datenbanken und Ersatzmodelle für die Bestimmung der Einsparungen im Verlaufe des Projektes berechnet werden sollten.

9. Nachfrage und Szenarios (AP1.2)

Ziel des Arbeitspaketes war es, anhand des in AP1.1 definierten technologischen Umfelds, zeitlichen Horizont sowie CONOPS, Luftverkehrsszenarios zu definieren, auf dessen Basis in nachfolgenden Arbeitspaketen eine plausible Abschätzung des Aufkommens an Formationsflug definiert werden kann. Dies beinhaltet die Definition eines Ist-Luftverkehrsszenarios und eines Zukunftsszenarios für einen relevanten Zeithorizont für den Nordatlantik-Korridor, welche die Luftverkehrsnachfrage zwischen Europa und Nordamerika, verwendete Flugzeuggrößen, Frequenzen und Tageszeiten der durchgeführten Flüge beinhaltet. Ist- und Zukunftsszenario sollten zudem als Referenzen für den Vergleich mit dem Formationsszenario herangezogen werden.

Zur Aufarbeitung und Prognose der Flugpläne wurde ein neues Modul der MultiFly-Umgebung mit Namen MultiFly-STUDY geschaffen. In Abbildung 10 ist der grundsätzliche Ablauf des Tools dargestellt. Die einzelnen Ablaufschritte werden im Folgenden kurz dargestellt.

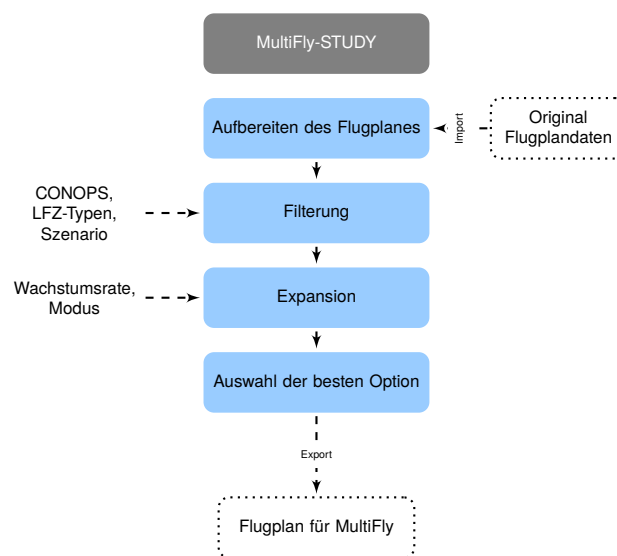


Abbildung 10 – Grundlegender Ablaufplan von MultiFly-STUDY

Aufbereiten des Flugplanes

Zunächst werden Flugplandaten, welche in Form einer CSV-Datei vorliegen, eingelesen. Die Flugplandaten werden hierbei aus der Sabre ADI (Airport Data Intelligence) Datenbank⁹ extrahiert. Aufgrund des speziellen Ausgabeformates werden die Daten im Anschluss daran aufbereitet. Diese Aufbereitung beinhaltet die Erzeugung von Einzelflügen für den betrachteten Zeitraum aus den gegebenen Flugplänen sowie die Umrechnung auf eine einheitliche Zeitkoordinate.

Filterung

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Flüge anhand von Filterkriterien gefiltert. Diese sind beispielsweise durch verschiedene Randbedingungen aus dem betrachteten CONOPS (vgl. Kapitel 8.1) bzw. aus dem jeweils betrachteten Szenario (vgl. Kapitel 14.1) gegeben. Hierzu zählen beispielsweise Flugzeugtypen (vgl. Kapitel 8.3), Streckenlängen, Start- und Zielflughäfen etc.

Expansion

Nach dem Filtern des Flugplanes kann gegebenenfalls eine Expansion erfolgen. Hierbei werden gemäß einer vorgegebenen Wachstumsrate zusätzliche Flüge zum Flugplan hinzugefügt. Dabei kann zwischen dem Modus

⁹jetzt Sabre Market Intelligence (MI) [46]

„Flüge“ bzw. „ASK“ gewählt werden. Hierbei werden die geforderten Wachstumsraten auf Basis der Fluganzahl bzw. der ASK ermittelt. Da nur ganze Flüge zu einem Flugplan hinzugefügt werden können, lässt sich eine geforderte Wachstumsrate jedoch nicht exakt abbilden. Abbildung 11 zeigt die möglichen Wachstumsraten unter Zuhilfenahme der verschiedenen Rundungsoptionen in Matlab.

Auswahl

Eine geforderte Wachstumsrate kann durch Auswahl der jeweils geeigneten Rundungsoption jedoch mit ausreichender Genauigkeit getroffen werden.

Export

Zur weiteren Verwendung in der Berechnungskette wird der so erzeugte Flugplan in ein allgemeines Datenformat (Comma-separated Values; CSV) exportiert und steht für weitere Berechnungszwecke zur Verfügung.

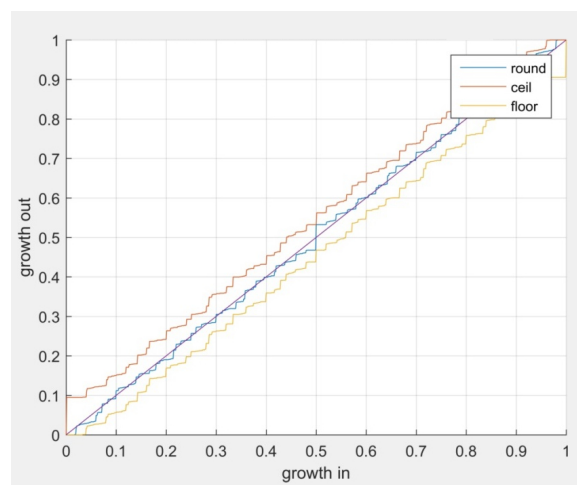


Abbildung 11 – Übersicht über die verschiedenen Rundungsoptionen. Bei richtiger Auswahl der Rundungsoption kann die angestrebte Wachstumsrate sehr genau getroffen werden.

10. Routenoptimierung (AP1.3)

Auf Basis der Arbeiten in AP1.1 und AP1.4. wurde im Projekt zwischen einer globalen und einer lokalen Studie unterschieden. Beide Ansätze erforderten die Anpassung bzw. Neuentwicklung eines Routenoptimierers. Beide im Projekt umgesetzte Methoden werden im Folgenden kurz dargestellt. Der Gesamtansatz der Berechnung ist in Abbildung 6 dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass beide Ansätze nach der Berechnung der Formationsrouten zusammengeführt werden, sodass eine gemeinsame Basis für die detaillierte Auswertung gegeben ist. Um aus der prognostizierten Nachfrage konkrete Formationspartner einander zuzuordnen sowie sich daraus ergebende optimale Formationsrouten abzuleiten, ist die Entwicklung bzw. Anpassung eines Routenoptimierers für Formationen erforderlich. Ziel dieses Arbeitspaketes war es daher, die an der TUHH entwickelten Methoden und Software-Tools (MultiFly) anhand der Ergebnisse aus AP1.1 so anzupassen, dass sie auf die Szenarien aus AP1.2 angewendet werden können.

10.1. Globale Studie

Zur Ermittlung globaler Formationsrouten wurde ein neues Modul der MultiFly-Umgebung mit Namen MultiFly-GEO geschaffen. Abbildung 12 zeigt den schematischen Ablauf der Berechnungsschritte bei MultiFly-GEO. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden kurz dargestellt. Die Entwicklung der Methodik der globalen Studie wurde maßgeblich im Rahmen einer Masterarbeit [7] durchgeführt und veröffentlicht. Zudem erfolgte eine Veröffentlichung im Rahmen des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses (DLRK) 2017 [8].

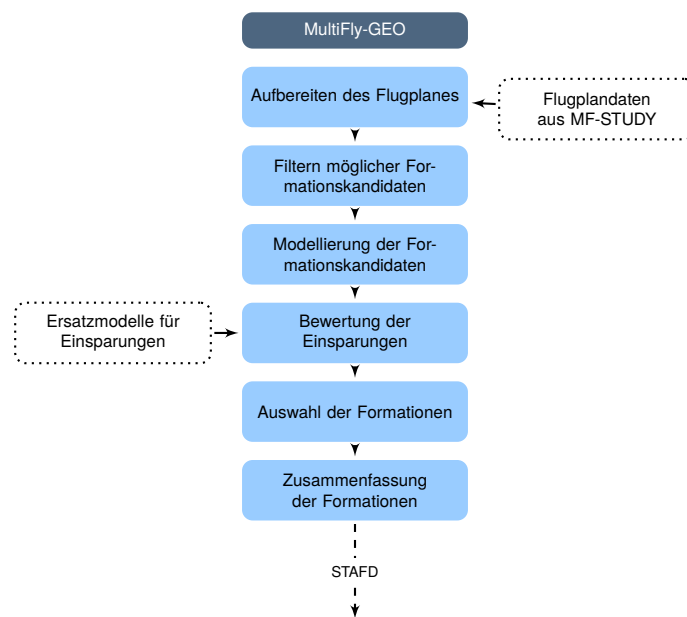


Abbildung 12 – Vorgehensweise zur Bestimmung von globalen Formationsroutengeometrien auf Basis von Flugplandaten

Aufbereiten des Flugplanes

Zunächst wird der aus MultiFly-STUDY gegebene Flugplan für die weitere Berechnung vorbereitet und gegebenenfalls vorgefiltert (z.B. Flugzeugtypen, Streckenlängen etc.). Dies kann helfen, schon im Vorfeld den Rechenaufwand maßgeblich zu begrenzen.

Filtern möglicher Formationskandidaten

Es folgt im nächsten Schritt eine umfassende Filterung möglicher Formationskandidaten, um die riesige Menge an möglichen Paarungen weiter zu reduzieren. Dabei wird von der Grundannahme ausgegangen, dass

jedes LFZ prinzipiell mit jedem anderen eine Formation bilden kann. Im Verlaufe der Filterung werden dann alle unmöglichen Formationen die nicht plausibel sind aus der Liste möglicher Formationen gestrichen. Hierbei wurden verschiedene Annahmen darüber getroffen, wann eine Paarung grundsätzlich nicht zustande kommen kann. Die unterschiedlichen Ansätze wurden anschließend in entsprechenden Filterschritten umgesetzt. Die engen Grenzen der Filter ermöglichen dabei eine maximale Reduktion der Kandidaten, ohne geeignete Formationen zu übersehen. Die einzelnen Filterschritte zum Herausfiltern unmöglicher Formationen sind in folgendem aufgelistet und beschrieben.

Abflugzeit

Bei diesem Filter werden die Abflugzeiten der Formationsteilnehmer verglichen. Liegen die Abflugzeiten der beiden LFZ zu weit auseinander, ist eine Formation nicht durchführbar. Als Kriterium für diesen maximalen zeitlichen Abstand wurde eine Flugzeit von 1,2 Stunden gewählt.

Distanz

Bei diesem Filter wird die Lage der Startflughäfen miteinander verglichen. Liegen die Startflughäfen der beiden LFZ zu weit auseinander, ist eine Formation nicht plausibel. Als Kriterium für diesen maximalen geographischen Abstand der Startflughäfen wurde 1000 km gewählt.

Azimut

Bei diesem Filter werden die Azimutwinkel der beiden LFZ bei deren Start verglichen. Da die Modellierung der Flugrouten durch Großkreise erfolgt, gibt dies die Richtung zum Zielflughafen an. Fliegen die LFZ daher in grundsätzlich unterschiedliche Richtungen, ist eine Formation nicht praktikabel. Als Kriterium für diesen maximalen Unterschied im initialen Azimut wurde eine Abweichung von 20° herangezogen.

Modellierung der Formationskandidaten

Die gefilterten übrig gebliebenen Formationskandidaten werden im Anschluss nach der Methode von Kent et al. [20] geometrisch modelliert. Diese Methode wurde dahingehend erweitert, dass auch Innenwinkel mit mehr als 120° entsprechend berechnet werden können (vgl. [7, 8]). Da die geometrisch optimalen Rendezvous- und Separationspunkte aufgrund der im Flugplan festgelegten Abflugzeiten der Formationspartner jedoch in der Regel nicht gleichzeitig erreicht werden können, wird für die jeweilige Formation eine sogenannte Rendezvouslinie erzeugt (vgl. Abbildung 13). Diese Linie beschreibt alle Punkte, die auf Basis der Abflugzeiten der Formationspartner gleichzeitig erreicht werden können. Der auf dieser Linie gelegene Punkt mit dem geringsten Abstand zu dem geometrischen Optimalpunkt (RSP_{opt}) wird dann zur weiteren Konstruktion der Formationsroutengeometrie herangezogen.

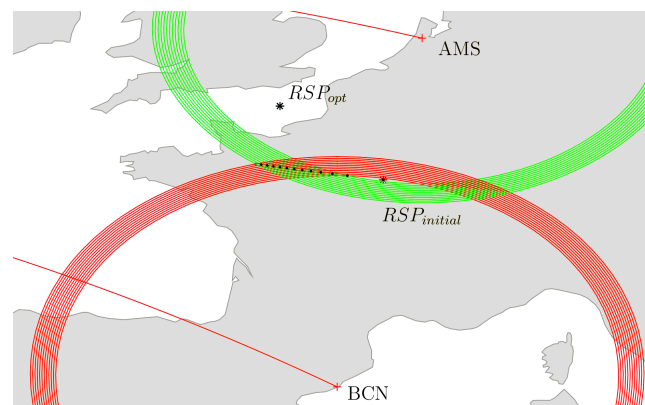


Abbildung 13 – Konstruktion der Rendezvouslinie durch Bestimmung der Schnittpunkte der Isochronen (rot und grün) beider Formationsteilnehmer aus [7]

Bewertung der Einsparungen

Die Bewertung der identifizierten Formationskandidaten erfolgt für die modellierten Formationsrouten auf Basis von Ersatzmodellen für die Einsparungen. Hierzu werden die nötigen Parameter aus dem gegebenen Routenverlauf und der Mission abgeleitet. Das Ersatzmodell liefert dann die abgeschätzten Einsparungen. Die hier verwendeten Ersatzmodelle wurden nach der in [39] und [33] beschriebenen Methode erzeugt. Als Basis für die aerodynamische Simulation wurde allerdings das im Projekt durch die Projektpartner entwickelte verbesserte aerodynamische Modell (vgl. Kapitel 12) verwendet.

Auswahl der Formationen

Auf Basis der Bewertung der einzelnen Formationskandidaten erfolgt im nächsten Schritt die Auswahl der besten Formationen. Dies ist notwendig, da jedes LFZ jeweils nur an einer Formation teilnehmen kann. Die Auswahl erfolgt anhand der Höhe der relativen Einsparungen λ_f . Wird eine Formation ausgewählt, werden alle weiteren Formationen, bei denen die jeweiligen beteiligten Flüge vorkommen, aus der Liste der möglichen Formationskandidaten gestrichen. Dies geschieht so lange, bis die Liste der Formationskandidaten leer und jeder Flug einer Formation zugeordnet wurde.

Zusammenfassung der Formationen

Da in dem betrachteten Zeitraum einzelne Flüge öfter vorkommen können, beispielsweise an jedem Wochentag, können auch gleiche Formationen mehr als einmal auftreten. In diesem Arbeitsschritt werden daher alle gleichen Formationen gezählt. Jede einzigartige Formation wird dann mit der entsprechenden Anzahl der aufgetretenen Formationen im Zeitraum versehen. Duplikate werden entsprechend aus der Liste entfernt. Beim Export der Formationsdaten wird diese Anzahl mit in der Datei hinterlegt.

Export

Die identifizierten Formationen werden im letzten Schritt im STAFD-Datenformat (Standard Formation Definition; siehe Kapitel 10.3) exportiert und stehen dann zur weiteren Berechnung beispielsweise mit MultiFly-SCM (vgl. Kapitel 12) zur Verfügung.

10.2. Lokale Studie

Zur Ermittlung windoptimaler Formationsrouten wurde ein neues Modul der MultiFly-Umgebung mit Namen MultiFly-WIND geschaffen. Dieses berechnet auf Basis eines DODPs die windoptimale Formationsroutengeometrie bei gegebenen Missionsdaten. Abbildung 14 zeigt schematisch den hierbei verfolgten Ansatz. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden kurz erläutert. Die Methodik der lokalen Studie wurde durch eine Veröffentlichung auf der ICAS 2018 Konferenz [42] dokumentiert (vgl. auch Kapitel 13.1). Eine weitere auf dieser Methodik aufbauende Arbeit wurde im Rahmen des Scitech Forums 2020 [41] veröffentlicht (vgl. auch Kapitel 13.2).

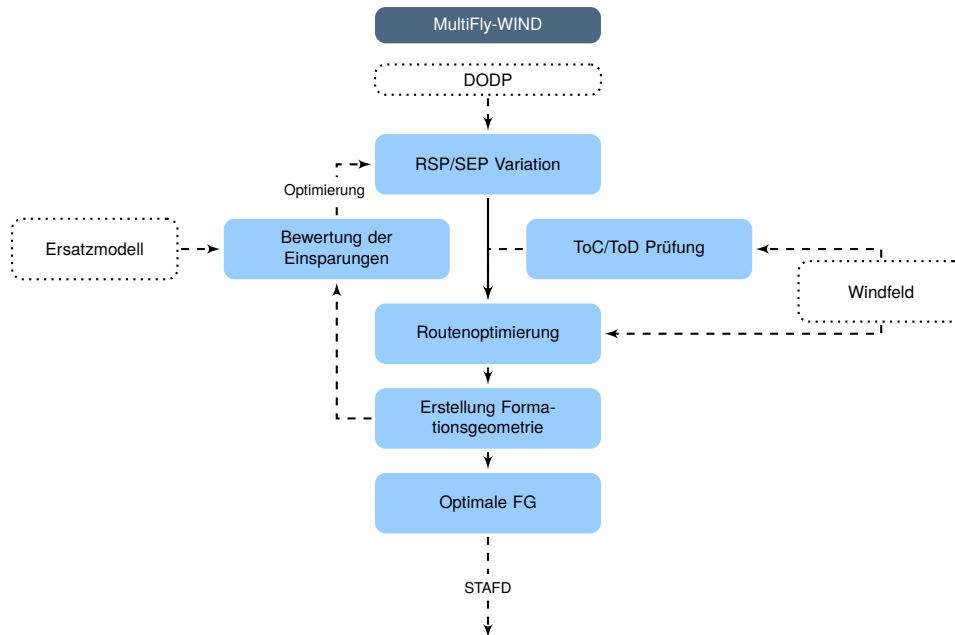


Abbildung 14 – Vorgehensweise zur Bestimmung einer windoptimalen Formationsgeometrie in MutiFly-WIND

RSP/SEP Variation

Auf Basis des DODPs wird zunächst eine initiale RSP/SEP-Kombination festgelegt. Ist der Optimierungsprozess schon am Laufen, wird die RSP/SEP-Kombination durch den übergeordneten Optimierer angepasst. Dieser übergeordnete Optimierer wird weiter unten detaillierter dargestellt.

ToC/ToD Prüfung

Sind die Positionen von RSP und SEP definiert, folgt eine Überprüfung, ob die geplanten Orte bei gegebener Windsituation erreicht werden können. Dieser Prozess ist beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt. Hier wird auf Basis von Standard-Steigflugprofilen, die in einer Datenbank für verschiedene Flugzeugtypen, Beladungszustände und Streckenlängen vorliegen, durch einen Mappingprozess ein angepasstes Steigprofil erstellt. Dieser Mappingprozess bildet das standardisierte Steigprofil auf die windoptimale Bodenspur ab, wobei zudem das gegebene Windfeld dem Steigprofil überlagert wird. Als Resultat entsteht ein windoptimales Steigprofil. Mit Hilfe dieses windoptimalen Steigprofils wird nun geprüft, ob der jeweilige Formationsteilnehmer beim Erreichen des RSP schon die Reise Flughöhe erreicht hat. Ist dies nicht der Fall, stellt der gewählte RSP keine valide Option dar. Der gleiche Vorgang wird analog für den SEP durchgeführt. Liegt der SEP nach dem ToD, kann der Formationsteilnehmer den notwendigen Sinkflug auf der verbleibenden Strecke bis zur Landung am Zielflughafen nicht mehr durchführen. Der gewählte SEP ist in diesem Fall keine valide Option.

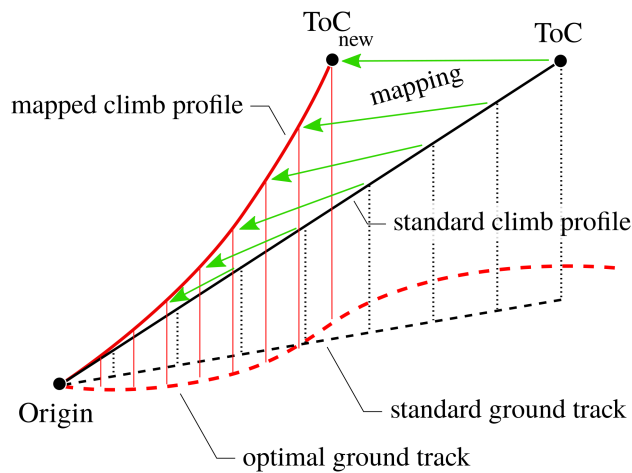


Abbildung 15 – Mapping eines Standard Steigflugprofils auf die windoptimale Bodenspur aus [42]

Routenoptimierung

Sind nach der ToC/ToD Prüfung die Positionen von RSP und SEP als valide eingestuft worden, findet eine Routenoptimierung der einzelnen Formationssegmente statt. Hierzu werden minimum time tracks im Reiseflug durch einen Optimal Control Ansatz abgeschätzt. Dieser Ansatz ist in [42] detailliert beschrieben, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

Erstellung Formationsgeometrie

Die Einzelsegmente werden im Anschluss an den Routenoptimierungsprozess zu einer Routengeometrie zusammengesetzt. Eine solche Routengeometrie ist beispielhaft in Abbildung 16 dargestellt. Man erkennt hier die starke Anpassung der Routengeometrie durch das Windfeld.

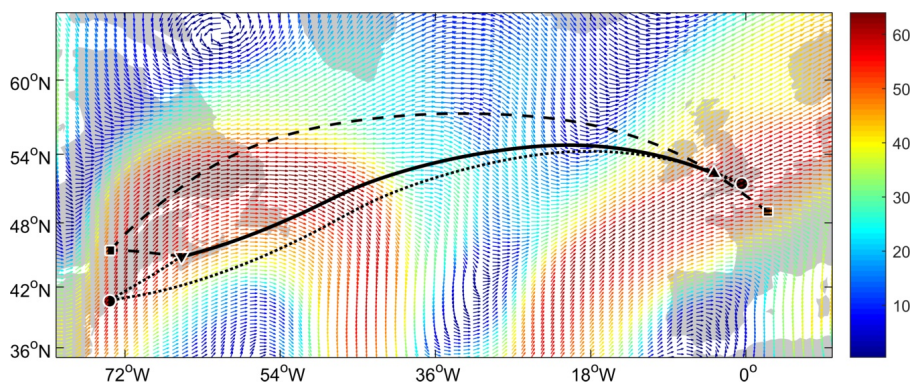


Abbildung 16 – Beispielhafter windoptimaler Routenverlauf einer Formation. Sowohl Leader als auch Follower weichen stark von ihrer optimalen Referenzroute (gestrichelt, gepunktet) ab.

Bewertung der Einsparungen

Auf Basis der im vorigen Schritt erzeugten Routengeometrie findet anschließend eine Bewertung selbiger statt. Die Bewertung erfolgt hierbei mit dem entsprechenden Ersatzmodell (vgl. [39]), welches für die jeweilige Luftfahrzeugkombination im Vorfeld berechnet wurde. Hierzu wurde der Trajektorienrechner (vgl. Kapitel 12) mit den im Projekt erarbeiteten erweiterten aerodynamischen Modellen verwendet. Mit Hilfe der so berechneten Ersatzmodelle lassen sich auf Basis der Routengeometrie und der Missionsparameter die Einsparungen durch

Formationsflug abschätzen. Die so abgeschätzte Einsparung der Formation geht anschließend in den übergeordneten Optimierungsprozess ein, bei dem die geographische Lage von RSP und SEP optimiert werden.

Übergeordnete Optimierung

Bei dem übergeordneten Optimierungsprozess werden durch Verändern der geographischen Positionen von RSP und SEP die Einsparungen einer Formation maximiert. Hierbei kommt ein sog. Pattern Search Algorithmus zum Einsatz, wie er beispielhaft für die Wahl des optimalen RSP in Abbildung 17 dargestellt ist. Zunächst erkennt man die geprüften RSP Positionen (schwarz und blau), wobei die schwarze Markierung einen nicht validen RSP (vgl. Kapitel 10.2) kennzeichnet. Für ein initiales RSP-Raster um einen Startpunkt werden alle Routengeometrien erzeugt und bewertet. Wird an einem der Punkte eine höhere Einsparung ermittelt, wird dieser als nächster Startpunkt gewählt. Konnte keine höhere Einsparung ermittelt werden, wird die Schrittweite der Rasters halbiert und die Berechnung erfolgt erneut. Dieser Prozess läuft gleichzeitig für die Lage des SEP ab. Wird eine festgelegte Schrittweite unterschritten, wird der Prozess abgebrochen und die RSP/SEP Kombination mit der höchsten Einsparung gewählt.

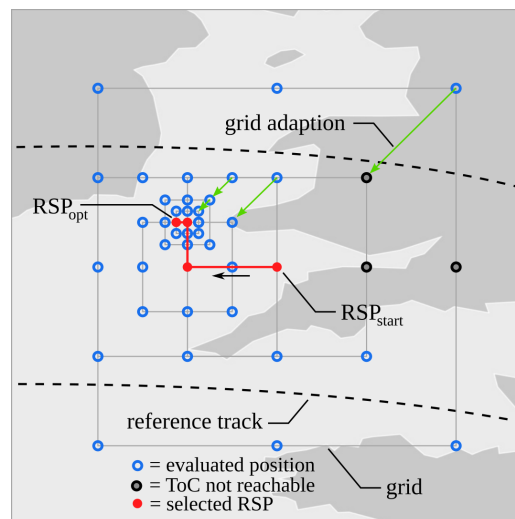


Abbildung 17 – Vorgehen des übergeordneten Optimierers (pattern search) zum Auffinden der RSP/SEP Position mit den höchsten Einsparungen aus [42]

Export

Die in den vorherigen Schritten identifizierten windoptimalen Formationsgeometrien werden anschließend im STAFD-Datenformat (siehe Kapitel 10.3) exportiert und stehen dann zur weiteren Berechnung mit MultiFly-SCM (vgl. Kapitel 12) zur Verfügung.

10.3. Standard Formation Definition (STAFD)

Der Austausch der Formationsdaten erfolgt über das XML-basierte Austauschformat STAFD (Standard Formation Definition), das sich an das vom DLR entwickelte CPACS-Format anlehnt. Zur Übergabe der Formationsdaten zwischen Routenoptimierer und Trajektorienrechner wurde dieses Format gemäß dem gewählten CONOPS angepasst. Der Routenoptimierer der globalen Studie (MultiFly-GEO vgl. Kapitel 10.1) sowie der der lokalen Studie (MultiFly-WIND vgl. Kapitel 10.2) wurden mit entsprechenden Exportfunktionen ausgestattet, so dass identifizierte Formationen im STAFD-Format an den Trajektorienrechner MultiFly-SCM weitergegeben werden können. Die Formationsdefinition STAFD wurde im Rahmen eines internen Berichtes dokumentiert (siehe [32]), so dass die Ergebnisse für weiterführende Arbeiten am Institut zur Verfügung stehen.

11. Notfallverfahren, Durchführbarkeit (AP2.1)

Ziel des Arbeitspaketes ist es, für die in AP1.1 definierten CONOPS entsprechende Notfallverfahren zu definieren sowie die Durchführbarkeit des Formationsfluges nach diesen CONOPS zu prüfen. Dabei sollen vor allem Showstopper identifiziert werden, die sich aus aerodynamischen bzw. regelungstechnischen Anforderungen ergeben und die die Durchführbarkeit des Formationsfluges verhindern könnten.

Für dieses Arbeitspaket wurden im Rahmen eines Workshops und eines Partnertreffens an der RWTH die grundlegenden Inhalte erarbeitet. Hierbei wurden die einzelnen Gefahren nach ihrer Auswirkung strukturiert erarbeitet. Hierbei wurde wie folgt unterschieden, wobei einzelne Ursachen aufgeführt werden:

1. Verhindern Formationsflug an sich
 - a) Passagierakzeptanz/Passagierkomfort
 - b) Zulassung durch Gesetzgeber
 - c) Piloten – Workload
 - d) Flexibilität der Airlines
 - e) Eignung der Luftfahrzeuge
 - f) Cost-Sharing Modelle
2. Verhindern Zustandekommen der Formation
 - a) Nicht Erscheinen
 - b) Verspätungen
 - c) Kommunikation AP-AP
3. Verhindern/Beenden Formation aus Sicherheitsgründen
 - a) Ausfall des Station-Keeping-Systems
 - b) Triebwerk
 - i. Gefahr durch ablösende Teile
 - ii. Gefahr durch Feuer
 - iii. Gefahr durch Rauch
 - iv. Gefahr durch Abbremsung des Leaders
 - c) Eisbildung am Leader
 - d) Böen und CAT
 - e) Eispartikel in Contrails
 - f) Einfluss der turbulenten Wirbelströmung auf die Messsensorik des Followers
 - g) Kontinuierlicher Seitenwind
4. Verhindern/Beenden aus ökonomischen Gründen
 - a) Ungeeignete ATC Vorgaben (z.B. ungünstiges FL)
 - b) Windeinfluss
 - c) Kraftstoffplanung
 - d) ETOPS-Planung (nach schwächerem LFZ)

Die einzelnen oben genannten Aspekte wurden im Rahmen des Arbeitspaketes weiter erarbeitet und bewertet. Als kritisch eingestufte Aspekte wurden dabei detailliert betrachtet und entsprechend dokumentiert.

12. Trajektorienberechnung (AP2.4)

Ziel des Arbeitspaketes war die Anpassung des am ILT entwickelten Trajektorienrechners TCM und dessen für den Formationsflug angepassten Variante TCM-MultiFly auf die spezifische Problemstellung des Formationsfluges mit dem in AP1.1 definierten CONOPS, um aus den in AP1.3 vom Routenoptimierer ermittelten optimalen Formationsrouten valide 4D-Trajektorien für die einzelnen Luftfahrzeuge zu bestimmen.

Als Trajektorienrechner wurde das hausinterne Trajectory Calculation Module (TCM) [29] gewählt und gemäß den Vorgaben aus den anderen Arbeitspaketen angepasst. Das dadurch entstandene TCM-MultiFly wurde in die Berechnungsketten integriert. Da TCM-MultiFly im Zuge der Berechnung einer Formation mehrfach verwendet wird, wird das übergeordnete Tool, welches eine Formation berechnet als MultiFly-SCM (STAFD Calculation Module) bezeichnet, denn als Grundlage der Berechnung dient MultiFly-SCM eine STAFD Datei, in der die Formation vollständig definiert ist. Dies ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt. Auf Basis der STAFD-Datei wird für beide Formationsteilnehmer eine valide 4D-Trajektorie sowohl für den Referenzflug als auch für die Formationsmission bestimmt. Dabei wird die Formationstrajektorie des Leaders bei der Berechnung der Formationstrajektorie des Followers herangezogen, um die Wirbelstärke und somit die Höhe der Einsparungen des Followers abzuschätzen. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Anpassungsschritte detaillierter erläutert.

12.1. Integration von DRD und BDD

Im Rahmen des Projektes FORMIC wurde das einfache analytische Berechnungsmodell zur Berechnung der Einsparungen des Followers durch ein höherwertigeres Modell ersetzt, bei dem die Widerstandseinsparung des Followers in Form einer Datenbank (Drag Reduction Database; DRD) in den Berechnungsprozess integriert wurde. Bei der Ermittlung der relativen Einsparungen einer Formation können jedoch auf Grund von Modellunterschieden nur relative Werte verwendet werden, weshalb zusätzlich die Interpolation der Widerstandswerte im Flug ohne Formation notwendig wurde. Diese Base Drag Database (BDD) wurde ebenfalls für alle betrachteten Flugzeugtypen erstellt und in den Berechnungsprozess integriert. Eine detaillierte Beschreibung zur Erzeugung der DRD und BDD ist in [56] gegeben. Die Arbeiten erfolgten in enger Absprache mit der RWTH.

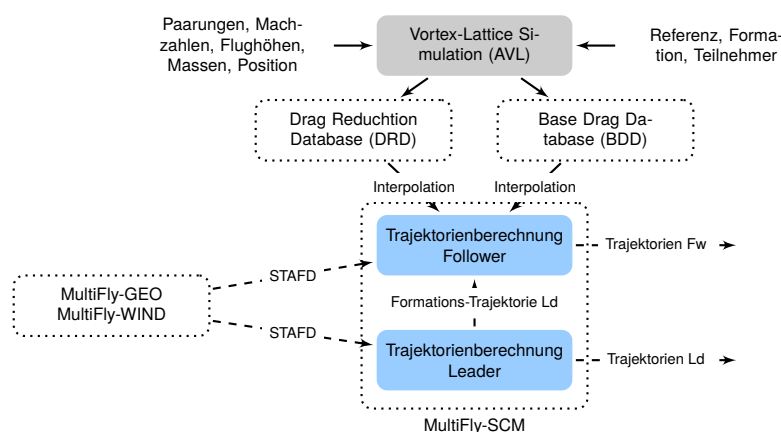


Abbildung 18 – Vorgehensweise zur Erzeugung und Integration der BDD und DRD in die Trajektorienberechnung

Abbildung 18 zeigt schematisch, wie die DRD und BDD in den Berechnungsablauf integriert wurden. Ein Vergleich des einfachen aerodynamischen Modells mit der verbesserten Methode zeigte eine gute grundlegende

Übereinstimmung und Vergleichbarkeit und wurde in [43] veröffentlicht. Abbildung 19 (links) zeigt hierzu exemplarisch die Berechnungsergebnisse für die Widerstandseinsparung des Followers für das einfache analytische Modell $\Delta c_{D\text{simple}}$ gegen das Datenbankmodell $\Delta c_{D\text{drd}}$ für unterschiedliche Abstände der Luftfahrzeuge k_t (vgl. hierzu Abbildung 5 wobei $k_t = y_t/b_l$ gilt mit b_l als Spannweite des Leaders und y_t als Abstand der Flügelspitze des Followers zum Wirbelkern des Leaders).

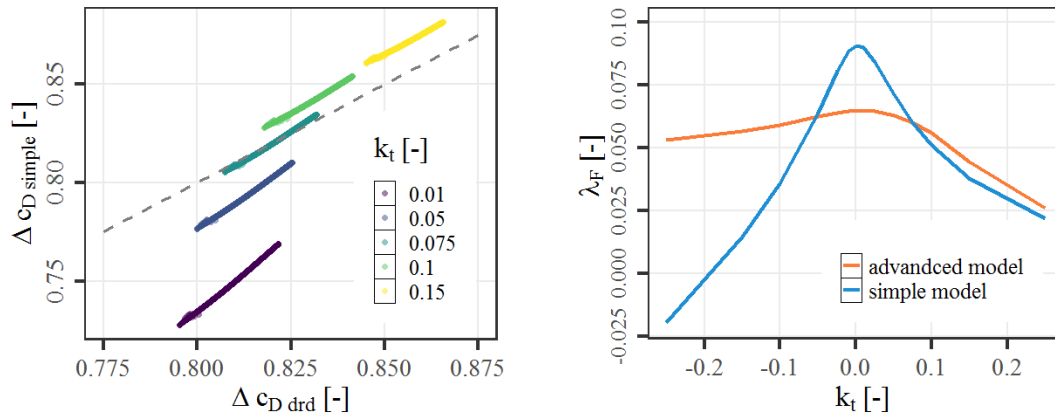


Abbildung 19 – Widerstandseinsparung des Followers für das einfache analytische Modell $\Delta c_{D\text{simple}}$ gegen das höherwertige Modell $\Delta c_{D\text{drd}}$ für unterschiedliche Abstände der Luftfahrzeuge k_t aus [43] (links); Für eine Beispielmision erzielte Einsparungen der Formation λ_f für beide Modelle über k_t aus [43] (rechts)

Man erkennt, dass die Ergebnisse grundsätzlich den gleichen Charakter aufweisen und im Falle $k_t = 0,075$ nahezu identisch sind. Abbildung 19 (rechts) zeigt die für eine Beispielmision erzielten Einsparungen der Formation λ_f für beide Modelle über k_t . Man erkennt ebenfalls, dass sich bei $k_t \approx 0,075$ beide Kurven schneiden, beide Modelle also die gleichen Einsparungen berechnen. Für niedrigere k_t schätzt das einfache Modell die Einsparungen höher, für größere k_t niedriger als das höherwertige Modell. Die in diesem AP entwickelte Methodik sowie ein Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsmodelle wurde im Rahmen der AIDAA 2019 Konferenz veröffentlicht [43].

12.2. Integration der TID

Die in AP2.3. durchgeführte Betrachtung zur Analyse von atmosphärischen Störungen auf die Ablage vom Wirbel durch die RWTH erforderten ebenso wie die verbesserte Methode zur Abschätzung der Schubeinsparungen des Followers eine Anpassung des Trajektorienrechners. Hierbei erarbeitete die TUHH zusammen mit der RWTH entsprechende Schnittstellen und Integrationsmethoden. Abbildung 20 zeigt die grundlegende Vorgehensweise zur Erzeugung der Widerstandsreduktions-Datenbank (Turbulence Influence Database; TID) und der Integration in den Trajektorienrechner. Zentrales Element stellt dabei eine Simulation der Flugzeugreaktion auf eingeprägte Böen und Turbulenzen dar. Für eine Bandbreite an Variationen (Paarungen, Machzahlen, Flughöhen, Massen, Position) sowie für die Turbulenz- und Böenstärke (nach [5]) werden diese Simulationen durchgeführt und die Auswirkungen auf den Widerstand des Followers erfasst. Diese Veränderung kann dann entsprechend als Schubveränderung herangezogen werden. Die Berechnungsergebnisse werden in der TID abgelegt. Im Trajektorienrechner kann dann bei jedem Berechnungszeitschritt mit den aktuellen Luftfahrzeugmassen, -typen etc. ein Wert aus der TID interpoliert werden, welcher dann mit der im unbelasteten Flug errechneten Widerstandseinsparung multipliziert wird. Verschiedene Interpolationsmethoden wurden getestet. Eine Überprüfung der Werte wurde durch einen Validierungsdatensatz durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Kriging-Methode hier die beste Übereinstimmung der Schätzung mit den berechneten Werten lieferte, weshalb diese Methode in MultiFly-TCM integriert wurde.

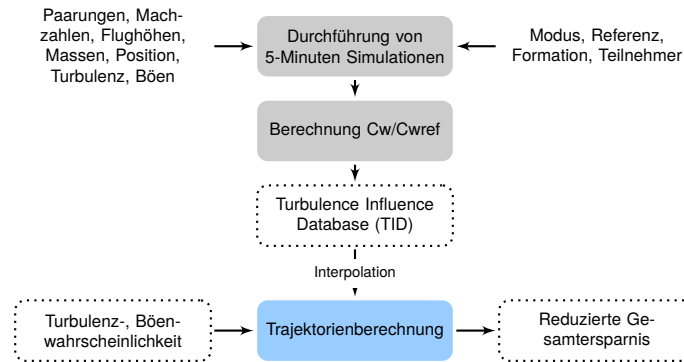


Abbildung 20 – Vorgehensweise zur Erzeugung und Integration der TID

Die Böen- bzw. Turbulenzhäufigkeit wird mit Hilfe von Verteilungsfunktionen auf die jeweilige Flugtrajektorie aufgeprägt (Turbulenz-Mapping). Dazu wird in jedem Zeitschritt eine Zufallsvariable (0 bis 1) erzeugt, mit deren Hilfe der Reduktionsfaktor aus der TID abgeleitet werden kann. Hier wird ebenso wie bei der DRD und BDD Interpolation auf die Kriging-Methode zurückgegriffen. Dieser wird in einem nächsten Schritt mit der berechneten Widerstandseinsparung multipliziert. Dies ist in Abbildung 21 (unten) dargestellt. Man erkennt den Einbruch der Einsparungen von ca. 20% auf ca. 7% infolge der Störung. Zur Ermittlung der Abbildungsfunktionen werden jedoch zukünftig statistische Informationen über Turbulenz- und Böenhäufigkeit benötigt. Gegebenenfalls müssen für unterschiedliche Flughöhen unterschiedliche Abbildungsfunktionen erstellt werden. Diese in diesem AP entwickelte Methodik wurde im Rahmen der AIDAA 2019 Konferenz veröffentlicht [43].

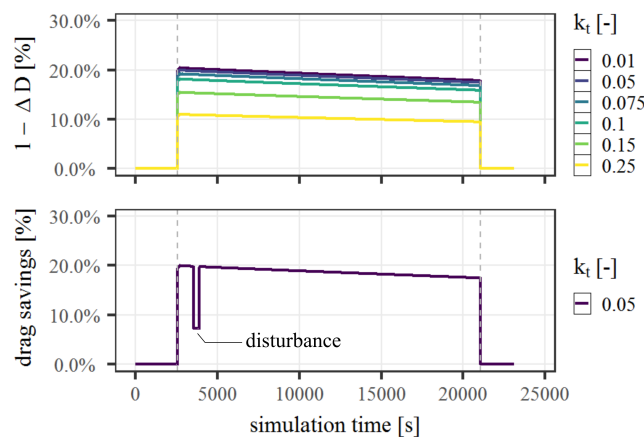


Abbildung 21 – Verlauf der Widerstandseinsparung für verschiedene laterale Abstände k_t zwischen Leader und Follower (oben); Verlauf der Widerstandseinsparung für $k_t = 0,05$ und Reduktion der Einsparung durch eine Störung (unten) aus [43]

12.3. Integration von Wind

Insbesondere ist dabei für die Betrachtung des Nordatlantiks eine Integration der Windeffekte in das Simulationstool TCM (Trajectory Calculation Module) notwendig. Die Implementierung der Windeffekte wurde durchgeführt und anhand von Beispielrechnungen validiert. Die Berücksichtigung von Windeffekten ermöglicht insbesondere auch eine Betrachtung der Kraftstoffplanungsstrategie beim Formationsflug, welche in [50] bereits veröffentlicht wurde. Im Zuge dieses Arbeitspaketes ist MutliFly-TCM um die Möglichkeit erweitert worden, bei der Berechnung von Trajektorien aufbereitete Atmosphärendaten aus den Archiven des ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) zu berücksichtigen. Diese Atmosphärendaten umfassen unter anderem

den horizontalen Windgeschwindigkeitsvektor, die Temperatur sowie die Dichte und wurden aus dem numerischen Modell des ERA-Interim Projektes abgeleitet, welches auf realen Messdaten basiert. In der aufbereiteten Form sind die Daten horizontal in Form eines regelmäßigen Koordinatengitters angeordnet, vertikal sind sie auf insgesamt 60 Schichten (sog. Modellevels) verteilt, welche sich in ihrer Höhe an den lokalen topographischen Gegebenheiten der Erdoberfläche orientieren. Um die meteorologischen Einflüsse bei der Berechnung einer Trajektorie zu berücksichtigen, wird in jedem numerischen Schritt zwischen den acht nächstgelegenen Datenpunkten eine effiziente, lineare Interpolation ausgeführt. Zur Ermittlung des Windvektors, welcher in eine Nord- und eine Ostkomponente aufgeteilt ist, werden die beiden Anteile zunächst getrennt voneinander interpoliert und anschließend in einem Schritt zur vektoriellen Superposition mit dem Geschwindigkeitsvektor des Flugzeugs überlagert, um daraus den notwendigen Steuerwinkel abzuleiten und unter den lokalen Windeinflüssen den notwendigen Kurs halten zu können. Als Ergebnis folgt daraus eine um den Windeinfluss korrigierte Geschwindigkeit über Grund.

13. Anwendung der Simulation (AP3.4)

In diesem Arbeitspaket soll die Gesamtsimulation auf die in AP1.2 definierten Szenarien angewendet werden. Ziel ist es, für diese Szenarien Emissionsverteilungen in Form von Emissionskatastern zu bestimmen.

13.1. Lokale Studie (ICAS2018)

Die in Kapitel 10.2 vorgestellte Methodik zur Berechnung windoptimaler Formationsrouten wurde im Rahmen einer Studie zur Ermittlung der optimalen Rendezvous- und Trennpunkte sowie zur Ermittlung der Einsparungen durch Formationsflug unter Berücksichtigung von Wind verwendet. Tabelle 4 fasst die Rahmenbedingungen der Studie zusammen.

Eigenschaft	Wert
LFZ Typ	Boeing 777-200
FCA	39000ft
FCM	0.84
loadfactor	0.8
Id Origin	LHR
Id Destination	JFK
fw Origin	AMS, CDG, FRA, HAM
fw Destination	YUL
Jahr	2012
Tage	366

Tabelle 4 – Rahmenbedingungen der in [42] veröffentlichten Studie

In der Studie wurden unterschiedliche Untersuchungsfälle betrachtet. Diese unterschieden sich in der Wahl des RSP/SEP Kombination. Im Fall ohne Wind (nwd) wählen die Formationen die optimale Formationsroute ohne Windeinfluss. Im Optimalfall (opt), wird die jeweilige optimale Position von RSP und SEP für jeden Tag ermittelt. Im Direktfall (dct) wird auf Basis der Verteilung der optimalen RSP und SEP Positionen für jedes DODP durchschnittliche Positionen ermittelt, welche dann für die Berechnung der Einsparungen für alle Tage verwendet werden. Im Direktfall alle (all), werden diese durchschnittlichen Positionen für alle DODPs zusammen bestimmt. Die unterschiedlichen Betrachtungsfälle sind in Tabelle 5 nochmals übersichtlich dargestellt.

Fall	Index	RSP/SEP
ohne Wind	nwd	optimal without wind
optimal	opt	optimal with wind
direct	dct	fixed per DODP
direct all	all	fixed for all

Tabelle 5 – Betrachtungsfälle der in [42] veröffentlichten Studie

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Studie kurz vorgestellt. Abbildung 22 (links) zeigt die Verschiebung der λ_f -Konturen bei einer Variation des RSP. Deutlich ist der Einfluss des Windes (rote Konturen) auf die Lage und Höhe des Optimums zu erkennen. Eine Berechnung des windoptimalen RSP/SEP-Kombinationen für den in Tabelle 4 dargestellten Studenumfang ist in Abbildung 22 (rechts) zu sehen. Man erkennt eine starke Streuung der Lage der Optimalpunkte sowie unterschiedliche Werte für λ_f (Farbe und Größe der Punkte). Die gemittelten Werte für die einzelnen DODPs (gelb, Fall *dct*) sowie für alle DODPs zusammen (grün, Fall *all*) sind ebenfalls in der Abbildung gekennzeichnet. Werden die RSP/SEP Positionen auf diese Orte fixiert, lässt sich eine Reduktion der Einsparungen gegenüber dem windoptimalen Fall *opt* erkennen.

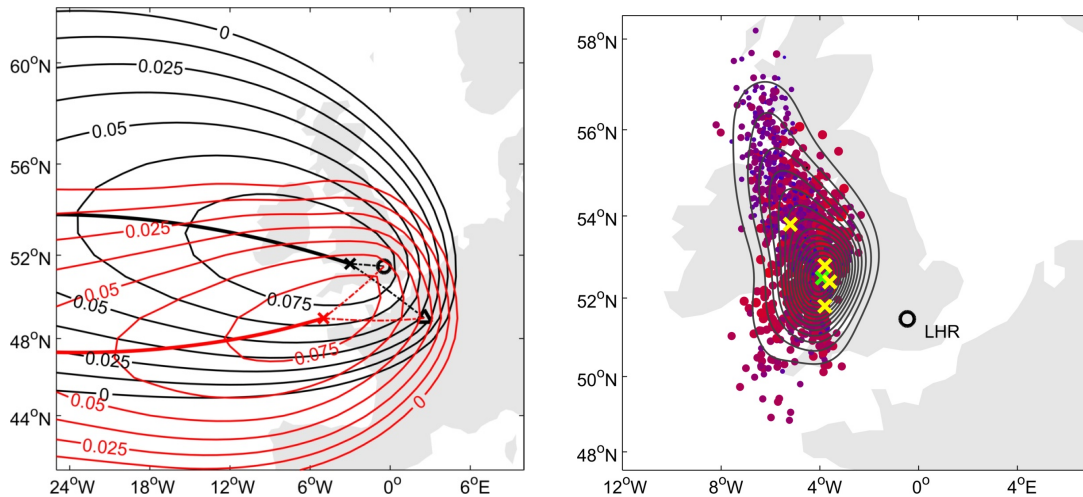


Abbildung 22 – λ_f -Konturen bei einer Variation des RSP ohne Wind (schwarz) und mit Wind (rot) aus [42] (links); Optimale RSP-Positionen für alle DODPs und gemittelter Werte im *dct* Fall (gelb) und *all* Fall (grün) aus [42] (rechts)

Dies ist in Abbildung 23 dargestellt. Hier sind für die unterschiedlichen Startflughäfen des Followers in Kombination mit einem Leader aus LHR die gemittelten relativen λ_f und absoluten Δm_{Bf} Einsparungen (vgl. Kapitel 8.1) dargestellt. Klar zu erkennen ist, dass im windoptimalen Fall *opt* die erzielbaren Einsparungen am größten sind. Werden RSP und SEP fixiert (*dct*, *all*) verringern sich diese Einsparungen um bis zu 1%. Findet keine Berücksichtigung von Wind statt (*nwd*) fallen die Einsparungen je nach DODP geringer oder sogar höher aus. Letzteres lässt auf eine ungeeignete Wahl der gemittelten RSP und SEP Positionen schließen.

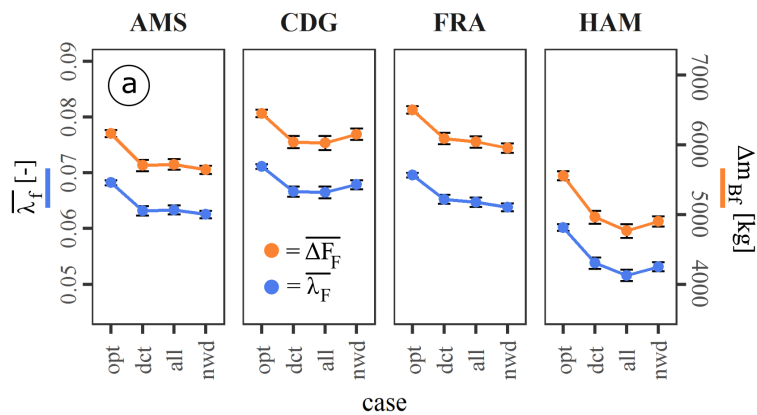


Abbildung 23 – Gemittelte relative $\bar{\lambda}_f$ und absolute $\overline{\Delta m_{Bf}}$ Einsparungen für variable Follower Startflughäfen und Leader aus LHR sowie für alle Betrachtungsfälle gemäß Tabelle 5 aus [42]

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine Berücksichtigung des Einflusses des Windes auf die Wahl der Rendezvous- und Trennpunkte einer aerodynamischen Formation zu einer deutlichen Erhöhung der Einsparungen führen kann.

13.2. Lokale Studie (Scitech 2020)

Die in Kapitel 10.2 vorgestellte Methodik zur Berechnung windoptimaler Formationsrouten wurde in einer zweiten Studie angewendet, um den Einfluss der windoptimalen Routenwahl auf den zeitlichen Versatz der Formationsteilnehmer beim Abflug zu bewerten. Dieser kommt durch die Varianz der Flugzeiten der Teilnehmer zum RSP zustande, wenn sich dieser windbedingt verschiebt. Die Rahmenbedingungen wurden im Vergleich zur

vorherigen Studie verändert und ist in Tabelle 6 dargestellt.

Eigenschaft	Wert
LFZ Typ	Boeing 777-200
FCA	39000ft
FCM	0.84
loadfactor	0.8
Id Origin	LHR, AMS, CDG
Id Destination	ATL, ORD, JFK
fw Origin	LHR, AMS, CDG
fw Destination	ATL, ORD, JFK
Wettersituationen	8 (nach [17])

Tabelle 6 – Rahmenbedingungen der in [42] veröffentlichten Studie

Dabei wurden alle 81 Kombinationen von Start- und Zielflughäfen für Leader und Follower modelliert und für 8 repräsentative Wettersituationen auf dem Nordatlantik nach [17] berechnet¹⁰. Flugzeugtyp, Flughöhe und -geschwindigkeit sowie Ladefaktoren der LFZ stimmen mit der vorhergehenden Studie überein. Die sich daraus ergebenden Formationsrouten sind in Form eines Formationskatasters in Abbildung 24 dargestellt. Deutlich sind Formations-„Hotspots“ über der Irischen See und über dem US Bundesstaat Maine zu erkennen.

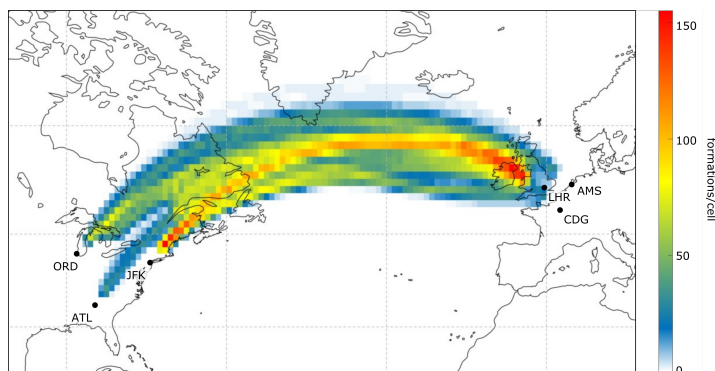


Abbildung 24 – Formationskataster aller 648 in der Studie betrachteten Formationen aus [41]. Es lässt sich eine Häufung der Formationen über der Irischen See und ein „Formationskorridor“ über den Atlantik bis zum US Bundesstaat Maine erkennen.

Im Folgenden werden weitere ausgewählte Ergebnisse der Studie kurz vorgestellt. Die ausgewählten 360 unterschiedlichen DODPs zeigten wie zu erwarten einen Startzeitversatz, welcher auf die unterschiedlichen Anflugwege der Formationsteilnehmer zum Rendezvouspunkt zurückzuführen ist, wenn diese am Rendezvouspunkt gleichzeitig eintreffen sollen. Der Startzeitversatz δt_{dep} kann damit mit dem Zeitversatz bei der Ankunft am RSP δt_{RSP} gleichgesetzt werden, welcher sich aus der Differenzen der Ankunftszeiten beider Formationsteilnehmer t_{RSPA} und t_{RSPB} ergibt.

$$\delta t_{dep} = \delta t_{RSP} = t_{RSPA} - t_{RSPB} \quad (3)$$

Die Spannweite des Zeitversatzes Δt_{dep} ergibt sich aufgrund der jeweils acht betrachteten Wettersituationen und lässt sich aus der Differenz des maximalen Zeitversatzes $max(\delta t_{dep})$ und dem minimalen Zeitversatz

¹⁰Hieraus ergeben sich 648 modellierte Formationen. Da jedoch durch die Betrachtung aller möglichen Paarungen alle Formationen doppelt berechnet wurden (mit jeweils einem anderen Formationsteilnehmer als Leader), wurde die jeweils bessere dieser Varianten für die weitere Berechnung herangezogen. Insgesamt bleibt damit ein Datensatz von 360 Formationen für die Auswertung übrig.

$\min(\delta t_{dep})$ bestimmen.

$$\Delta t_{dep} = \max(\delta t_{dep}) - \min(\delta t_{dep}) \tag{4}$$

Die Spannweite des Zeitversatzes Δt_{dep} ist in Abbildung 25 (a) für alle DODPs in Minuten dargestellt. Man erkennt, dass z.B. das DODP CDG-AMS+ORD-ATL ein Δt_{dep} von fast 18 Minuten aufweist. Abbildung 25 (b) zeigt die Verteilung des Startzeitversatzes für DODPs mit Startflughäfen AMS und CDG und jeweils unterschiedlichen Zielflughäfen. Auch hier ist die große Spannweite des Zeitversatzes zu erkennen. Zudem fällt auf, dass auch ein Vorzeichenwechsel auftreten kann. Dies bedeutet, dass an einem Tag LFZ A zuerst starten muss und an einem anderen Tag LFZ B. Abbildung 25 (b) zeigt zudem die Mittelwerte (Raute) und gewichteten Mittelwerte¹¹ (Kreuz) des Zeitversatzes. Diese Werte können dann beispielsweise zur Ableitung eines optimalen Zeitversatzes herangezogen werden (vgl. hierzu auch [41]).

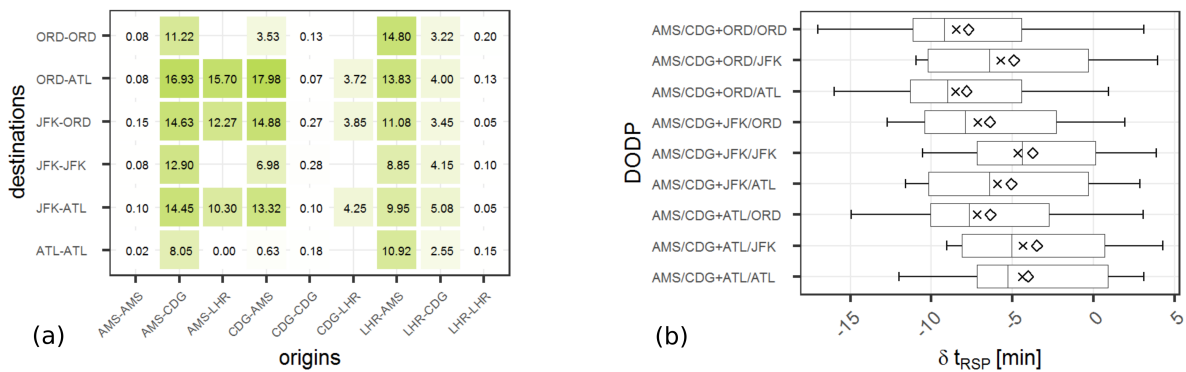


Abbildung 25 – Die Spannweite des Zeitversatzes Δt_{dep} für alle DODPs aus [41] (a); Verteilung, Durchschnitt (Raute) und gewichteter Durchschnitt (Kreuz) für die Verbindung AMS/CDG-X/X aus [41] (b)

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Berücksichtigung von Wind auf den Verlauf der Formationsrouten und dadurch auch auf die Abflugzeiten einen starken Einfluss haben kann. Für die erforderliche Flexibilität der Abflugzeiten wurde im betrachteten Szenario ein Wert von ca. 18 Minuten ermittelt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser Wert noch größer ausfällt, da nur eine begrenzte Auswahl an Wettersituationen betrachtet wurde.

13.3. Globale Studie

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde eine globale Studie zur Identifikation von Formationspartnern durchgeführt (vgl. [7]). Die Arbeit wurde mit dem Ferchau Engineering GmbH Preis der DGLR 2017 ausgezeichnet. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses (DLRK) veröffentlicht [8]. Hier konnten für ein globales Szenario von über 9000 ausgewählten Formationen durchschnittliche Einsparungen von ca. 5,4% für die Gesamtformation ermittelt werden. An dieser Stelle wird jedoch nicht auf die Ergebnisse der Arbeit eingegangen, sondern auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen.

¹¹Die Gewichtung erfolgt auf der Basis der Häufigkeiten der Wettersituationen wie sie in [17] angegeben sind.

14. Gesamtbewertung (AP1.4)

Das Arbeitspaket AP1.4 „Gesamtbewertung“ schließt sich an das Ende aller durchgeführten Arbeiten an. Dabei sollten unter anderem anhand der Berechnungsergebnisse der Gesamtsimulation (AP3.4) Aussagen über die Klimawirkung des Formationsfluges getroffen werden. Die TUHH unterstützt dabei die Arbeiten des IPA. Zudem erfolgt durch die TUHH eine Sensitivitätsanalyse für den Formationsflug, um Abhängigkeiten zwischen den Formationsparametern und den Formationsmetriken zu identifizieren.

14.1. Betrachtete Szenarien

Die im Rahmen des Projektes zu behandelnden Szenarien wurden im Rahmen des Workshops AP1.1 grundsätzlich erarbeitet. Das Ergebnis des Workshops ist in Tabelle 7 dargestellt. Grundsätzlich wurde zwischen einer *globalen* und einer *lokalen* Studie unterschieden. Beide Studien sollten die klimatologischen Auswirkungen des Formationsfluges in unterschiedlichen Detailgraden und aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Es ist anzumerken, dass der Workshop zu einem sehr frühen Projektzeitpunkt stattfand. Diese Szenarien, insbesondere die lokale Studie, wurden daher im weiteren Verlauf des Projektes angepasst. Während einige Betrachtungsaspekte gestrichen wurden, wurden andere wiederum hinzugefügt. Dies ist in Tabelle 7 entsprechend deutlich gemacht.

Global	Lokal (Nordatlantik)
<ul style="list-style-type: none"> - Zuordnung von Formationspartnern - Identifikation von Formationsrouten - Berechnung der Emissionen - Kraftstoff-, kostenoptimales Formationsrouting - Bewertung des Formationsflugs Potential - Klimawirkung - Klimatologische Betrachtung eines repräsentativen Zeitraums 	<ul style="list-style-type: none"> - Zusätzliche Betrachtung der Sättigungseffekte - Verschiedene Höhen / Step Climbs - Windeinfluss - Klimaoptimales Formationsrouting - Klimawirkungsfunktion - Betrachtung eines konkreten Tages - Basis für Sensitivitäten in der globalen Studie
	<ul style="list-style-type: none"> - Windoptimales Formationsrouting - Betrachtung der Kraftstoffplanung - Betrachtung des Zeitversatzes

Tabelle 7 – Übersicht über Betrachtungsszenarien (Ergebnis Workshop AP1.1); Erweiterungen im Projektverlauf (grün)

14.2. Ergebnisse einer globalen Studie

Die *globale Studie* dient vornehmlich dem Zweck, die Effekte auf globaler Ebene zu bewerten. Aufgrund der hohen Anzahl von Formationen wurde die dabei angestrebte Modellierung der Formationen mit Hilfe eines einfachen geometrischen Ansatzes durchgeführt. In der globalen Studie wurden daher in einer ersten Analyse repräsentative AWSE Szenarios für die weltgrößten Flughäfen definiert, indem mit oben beschriebenen Methode vorliegende Flugpläne entsprechend analysiert wurden. Es wurden dabei drei verschiedene Szenarien betrachtet: *top30* (30 weltgrößten Flughäfen), *top50* (50 weltgrößten Flughäfen), *all* (alle Flughäfen). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die betrachteten Szenarien.

Szenario	Gesamtanzahl Flüge	Flüge in Formation	Anteil
top30	10469	437	4.17 %
top50	16528	847	5.12 %
all	33018	2223	6.73 %

Tabelle 8 – Überblick über die in der globalen Studie betrachteten Szenarien

Zudem wurde bei den Analysen ausschließlich der Flugzeugtyp Boeing B777 betrachtet, da zum Zeitpunkt der Studie die aerodynamischen Modelle der anderen LFZ-Kombinationen noch nicht vorlagen. Für diese Szenarien wurden mit der oben beschriebenen Methode die Formationsgeometrien erstellt und daraus die Emissionskataster abgeleitet. Basierend auf diesen Katastern wurde dann die Klimawirkung quantitativ abgeschätzt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden zudem bei der Berechnung der Referenzmission unterschiedliche Einstellungen für die Festlegung der Flughöhe und der Fluggeschwindigkeit gewählt (vgl. Tabelle 9).

Einstellung	Flughöhe	Fluggeschwindigkeit
XX	optimal	SCS
AX	FCA	SCS
XM	optimal	FCM
AM	FCA	FCM

Tabelle 9 – Benutzte Einstellungen der Studie für die Festlegung der Flughöhen und Fluggeschwindigkeiten in der Referenzmission

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Studie kurz vorgestellt. Abbildung 26 (links) zeigt die relative (λ_f) und absolute (Δm_{Bf}) treibstoffbasierte Metriken nach Formel 1 für die verschiedenen Szenarien und die Einstellung AM. Die identifizierten Formationen erzielen im Mittel Einsparungen zwischen 5% und 6%. Dies entspricht im betrachteten Fall ca. 6500kg bis 7200 kg Treibstoff pro Formation.

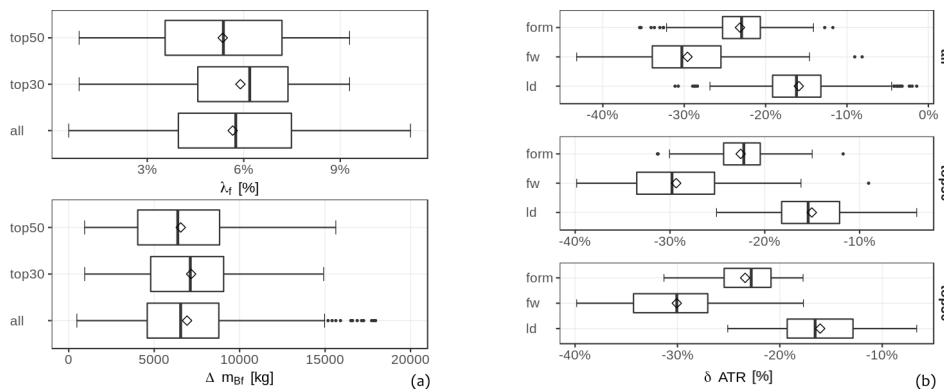


Abbildung 26 – Relative (λ_f) und absolute (Δm_{Bf}) treibstoffbasierte Metriken für die verschiedenen Szenarien und die Einstellung AM aus [35] (a); relative Temperaturantworten δATR für die Einstellung AM getrennt nach Leader (ld), Follower (fw) und Formation (form) aus [35] (b)

Abbildung 26 (rechts) zeigt die Änderung der Temperaturantwort δATR gemäß Formel 2 für die Einstellung AM getrennt nach Leader (ld), Follower (fw) und Formation (form) (b). Man erkennt, dass sich insgesamt für alle Szenarien eine Reduktion der Klimawirkung durch Formationsflug ergibt. Die Durchschnittswerte liegen zwischen 22% und 24%. Hierbei trägt der Follower jeweils einen größeren Anteil bei, da der Treibstoffverbrauch und somit die erzeugten Emissionen durch AWSE reduziert werden. Die reduzierte Klimawirkung des Leaders kommt durch die Überlagerung der Kondensstreifen (vgl. [51]) zustande, deren Effekt zu gleichen Teilen auf Leader und Follower aufgeteilt wird. Die vorgestellte Studie befindet sich zur Zeit in Veröffentlichung [35].

14.3. Ergebnisse einer lokalen Studie

Bei der *lokalen Studie* wurde die Betrachtung geographisch auf die Region des Nordatlantiks eingeschränkt. Dies macht insbesondere deshalb Sinn, da es sich hier um einen der meistfrequentierten Lufträume der Welt

handelt. Hier findet die Analyse daher in einem höherem Detailgrad statt. Hierzu zählt insbesondere die Betrachtung von Wind, da dieser einen starken Einfluss auf die Routenführung der Formation, deren Einsparungen und die Startzeitdifferenzen hat (vgl. [42] und [41]). Die lokale Studie wird mit den gleichen Annahmen wie bei der Anwendung der Simulation (vgl. Kapitel 13.2) durchgeführt. Aus den so ermittelten Formationsgeometrien wurde wie bei der globalen Studie die Klimawirkung abgeschätzt. Die Ergebnisse sind prinzipiell mit denen der globalen Studie vergleichbar, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen sondern auf die in Veröffentlichung befindliche Arbeit [35] verwiesen wird.

14.4. Analysen zur Kraftstoffplanung

Die zur strategischen Kraftstoffplanung durchgeführten Analysen hatten das Ziel, das Potenzial der zusätzlichen Einsparungen zu ermitteln, welches sich aufgrund einer verringerten Abflugmasse ergibt, wenn die erwarteten formationsbedingten Kraftstoffeinsparungen bereits im Zuge der Flugplanung des Followers berücksichtigt werden. Ob der Follower die erwarteten Einsparungen realisieren kann, hängt jedoch gänzlich vom Erfolg der Formationsdurchführung ab. Unter dem Aspekt dieser operationellen Unsicherheit birgt die Berücksichtigung der erwarteten Einsparungen im Zuge der Flugplanung des Followers das Risiko, dass im Falle einer gescheiterten Formationsbildung nicht ausreichend Kraftstoff zur Verfügung steht, um den kommerziellen Zielflughafen erreichen zu können. Nach dem Vorbild der bereits seit Jahren etablierten Decision Point Procedure (DPP) ist eine Methode entworfen worden, die dem Follower eine signifikante Reduktion des mitzuführenden Kraftstoffes gestattet und für den Fall einer gescheiterten Formationsbildung die Möglichkeit einer Zwischenlandung zum Nachtanken einkalkuliert. Die Methode sieht die Definition eines sogenannten Entscheidungspunktes (Decision Point, DEC) vor; während der Missionsdurchführung muss der Pilot beim Passieren des DEC die Entscheidung treffen, ob ein Weiterflug zum Zielflughafen sicher durchgeführt werden kann, oder ob der ebenfalls zuvor definierte Ausweichflughafen (En-Route-Alternate, ERA) zum Nachtanken angesteuert wird. Unter Berücksichtigung der Positionen von DEC und ERA wird schließlich die Kraftstoffbedarfsermittlung durchgeführt. Während die Sicherheit durch diese Planungsmethode nicht beeinträchtigt wird, bestehen mögliche Konsequenzen jedoch in einer Erhöhung der Missionskosten, der Flugzeit sowie des Kraftstoffverbrauchs. Auch eine reduzierte Planungssicherheit hinsichtlich der Ankunftszeit am Zielflughafen und dem Erreichen von Anschlussflügen könnte die Folge einer solchen Zwischenlandung sein und sich damit negativ auf den Passagierkomfort auswirken, letztere Aspekte sind jedoch aufgrund der schlechten Quantifizierbarkeit dieser indirekten Effekte vorerst nicht berücksichtigt worden. Da aktuell noch keine Informationen zur langfristig realisierbaren Erfolgswahrscheinlichkeit einer Formationsdurchführung im europäischen Luftraum vorliegen, die zur abschließenden Bewertung des betrachteten Nordatlantik Szenarios notwendig wären, ist die Empfehlung von Betankungsstrategien derzeit nur bedingt möglich. In einem ersten Schritt konnte jedoch das Potenzial der Methode quantifiziert und mit den möglichen Mehrkosten gegenübergestellt werden. Diese Ergebnisse sind zusammen mit der Beschreibung der angepassten AWSE-DPP Methode in [50] veröffentlicht worden. Eine weitere Studie befindet sich in Veröffentlichung [49], in welcher für die fehlenden Daten zur realisierbaren Erfolgswahrscheinlichkeit Annahmen getroffen werden, um das Potenzial einer weiter fortgeschrittenen AWSE-DPP Methode näher zu beleuchten.

14.4.1. Betrachtetes Szenario

Die AWSE-DPP Methode ist auf das Double OD-Paar LHR-CDG/JFK-YUL auf Basis der Routenführung mit optimierter Formationsgeometrie (siehe Kapitel 10.2) für 14 verschiedene Atmosphärentage des Jahres 2012 getestet worden. Beide Formationspartner sind als B777 modelliert worden und operieren bei einer Machzahl von 0,8 auf einer Reiseflughöhe von 39000 ft.

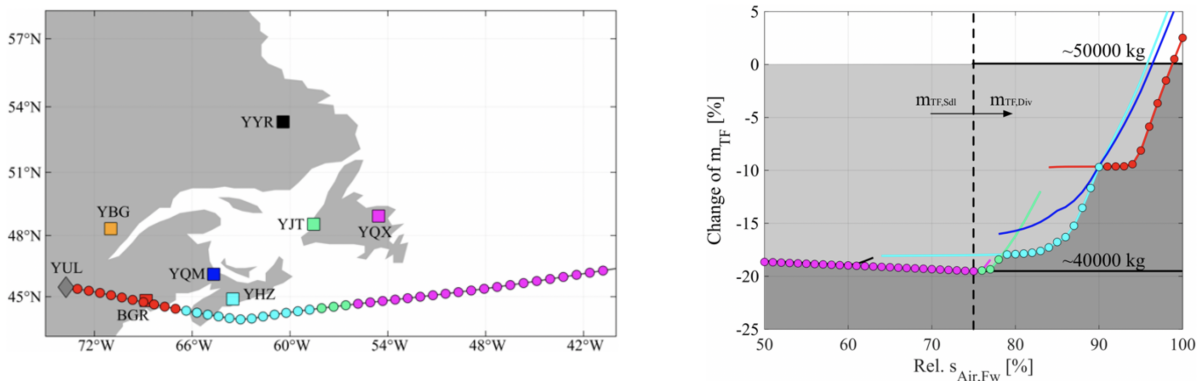


Abbildung 27 – Route des Followers mit lokaler Zuordnung pot. DEC zu ERA mit minimaler, resultierender Masse m_{TF} aus [50] (links); Minimale mitzuführende Kraftstoffmenge m_{TF} gemäß AWSE-DPP im Vergleich zu konventioneller Planung, abhängig von gewählttem DEC und ERA aus [50] (rechts)

14.4.2. Modellierung

Auf Basis der Datensätze zur Formationsgeometrie, welche als Eingangsparameter dienen, ist die Routenführung des Followers unter Berücksichtigung der meteorologischen Einflüsse in prozentuale Schritte hinsichtlich der Flugzeit eingeteilt worden (siehe Abbildung 27, links). Jeder dieser Schritte repräsentiert einen potenziellen DEC (farbige Kreise) entlang der Route. Ausgehend von jedem DEC ist eine Routenoptimierung (siehe Kapitel 10.2) zu den verfügbaren ERAs (farbige Quadrate) ausgeführt worden. Unter Verwendung von MultiFly-TCM ist schließlich für die beiden betrachteten Fälle – eine Mission zum Zielflughafen mit Formationseinsparungen (Kennzeichnung: Sdl.) und eine Ausweichmission zum ERA ohne Formationseinsparungen (Kennzeichnung: Div.) - der Kraftstoffbedarf ermittelt worden. Dies bildet die Basis der Kraftstoffplanung, welche exemplarisch in Abbildung 27 (rechts) dargestellt wird.

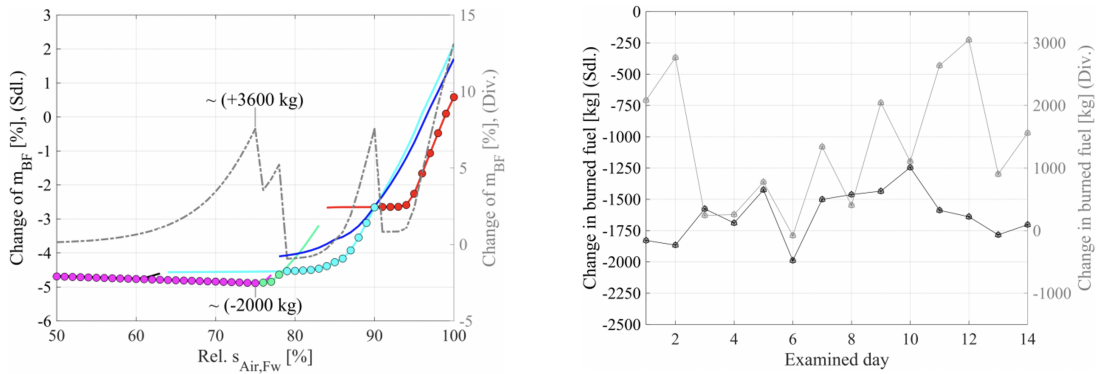


Abbildung 28 – Beispiel zum Einfluss von AWSE-DPP auf den Kraftstoffverbrauch m_{BF} mit konventioneller Betankung als Basiswert. Linke Skala: Formationserfolg (Sdl.), Rechte Skala: Formationsmisserfolg (Div.) aus [50] (links); Gesamtübersicht zum Einfluss von AWSE-DPP auf den Kraftstoffverbrauch m_{BF} mit konventioneller Betankung als Basiswert. Linke Skala: Formationserfolg (Sdl.), Rechte Skala: Formationsmisserfolg (Div.) aus [50] (rechts)

14.4.3. Ergebnisse

In Abbildung 28 (links) sind die Kraftstoffeinsparungen, welche durch Anwendung der AWSE-DPP realisiert werden könnten, im Vergleich zu einer konventionellen Kraftstoffplanung aufgetragen. Es hat sich gezeigt, dass die Berücksichtigung der erwarteten Einsparungen in der Kraftstoffplanung im Erfolgsfall zu einer weiteren Re-

duktion des Kraftstoffverbrauchs um nahezu 5% führen kann. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass das Verhältnis des potenziell einzusparenden Kraftstoffes zu der Menge an zusätzlich aufzuwendendem Kraftstoff für eine Ausweichmission zum ERA mit anschließendem Weiterflug zum kommerziellen Ziel mit den atmosphärischen Tagen stark variiert (Abbildung 28, rechts). Jedoch kann durch eine geschickte Wahl von ERA und DEC die Menge an zusätzlichem Kraftstoffbedarf für einen Formationsmisserfolg signifikant beeinflusst werden.

15. Projektmanagement (AP0)

Typische Projektmanagementaufgaben wurden von der TUHH im Verbundprojekt FORMIC wahrgenommen. Hierzu zählten unter anderem die Organisation und Durchführung von Workshops und Projekttreffen, die Durchführung von regelmäßigen Telefonkonferenzen zur Abstimmung der Arbeitsinhalte sowie Bereitstellung und Pflege einer Online-Plattform zum Austausch von Projektdokumenten und Dateien.

16. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Planung

Die im Vorhaben „Formationsflug im Gesamtsystem“ der TUHH im Verbundprojekt FORMIC angestrebten Ziele (vgl. Kapitel 1.1):

- Entwicklung einer erforderlichen Simulationsinfrastruktur mit den darin enthaltenen Methoden
- Anwendung der Simulation unter Beachtung von Umfeldbedingungen und Szenarien

wurden erfüllt. Hierbei erfolgte eine entsprechende Aufteilung der Ressourcen gemäß dem Projektplan. Der Aspekt der Kraftstoffplanung, welcher sich im Laufe des Projektes als wichtiger Einflussfaktor beim Formationsflug herausstellte, wurde zudem betrachtet. Dies war vor allem daher möglich, da die Simulationsinfrastruktur die hierfür notwendigen Hilfsmittel bereitstellte. Die Ergebnisse wurden zum Teil veröffentlicht oder befinden sich in Veröffentlichung. Folgende Übersicht stellt die im Rahmen des Projektes entstandenen Publikationen dar.

Studentische Arbeiten:

- Drews, K., *Identifikation und Modellierung ziviler Formationsflüge auf Basis von globalen Flugplandaten*. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg, 2016
- Schmitz, G., *Konzepterstellung und Analyse des Formationsfluges ziviler Luftfahrzeuge beim Start von parallelen Startbahnen*. Masterarbeit, Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 2017

Promotionen:

- Marks, T., *Modellansätze zur Bewertung von Formationsflügen im Lufttransportsystem*. Doktorarbeit, Technische Universität Hamburg, 2019

Konferenzbeiträge:

- Drews, K., Marks, T., Konieczny, G., Linke, F. und Gollnick, V., *Identification and modeling of civil formation flight routes based on global flight schedule data*. Number DLRK2014-340220. 66. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), 2017
- Marks, T., Swaid, M., Lührs, B. und Gollnick, V., *Identification of optimal rendezvous and separation areas for formation flight under consideration of wind*. 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2018
- Swaid, M., Marks, T., Lührs, B. und Gollnick, V., *Quantification of formation flight benefits under consideration of uncertainties on fuel planning*. 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2018
- Marks, T., Zumegen, C., Gollnick, V. und Stumpf, E., *Assessing formation flight benefits on trajectory level including turbulence and gust*. Italian Association of Aeronautics and Astronautics (AIDAA) XXV International Congress, 2019
- Marks, T. und Swaid, M., *Optimal timing and arrangement for two-aircraft formations on north atlantic under consideration of wind*. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020

In Veröffentlichung/Abstract eingereicht:

- Marks, T., Dahlmann, K., Grewe, V., Gollnick, V., Linke, F., Matthes, S., Stumpf, E., Swaid, M., Unterstrasser, S., Yamashita, H. und Zumegen, C., *Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight*. Extended abstract, ECATS 3rd Conference, 2020
- Swaid, M., Marks, T. und Gollnick, V., *Adapting the fuel planning to operational uncertainties of aircraft wake-surfing for efficiency*. Extended abstract, ECATS 3rd Conference, 2020
- Dahlmann, K., Matthes, S., Yamashita, H., Unterstrasser, S., Grewe, V. und Marks, T., *Assessing the climate impact of formation flights*. Extended abstract, 3rd ECATS Conference, 2020
- Zumegen, C., Marks, T. und Stumpf, E., *Bewertung von Formationsflügen mit Langstreckenflugzeugen für verschiedene Flugzustände und atmosphärische Störungen*. Abstract, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), 2020
- Schmitz G. und Marks, T., *Potential analysis for simultaneous formation flight departures*. Abstract, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), 2020
- Marks, T., Dahlmann, K., Linke, F. und Matthes, S., *Modelling the climate impact of formation flight*. Extended abstract, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2021

Die im Vorhaben „Formationsflug im Gesamtsystem“ der TUHH im Verbundprojekt FORMIC durchgeführten Arbeiten bieten die Bearbeitung weitere Fragestellungen im Kontext des aerodynamischen Formationsfluges am Institut und bietet zudem eine Grundlage für die Analyse zukünftiger operationeller Maßnahmen im Luftverkehr insbesondere vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung.

Literatur

- [1] Airbus. Airbus unveils its 2050 vision for 'smarter skies'. Press Release.
- [2] N. Bizinos and C. Redelinghuys. Tentative study of passenger comfort during formation flight within atmospheric turbulence. *Journal of Aircraft*, 50(3):886–900, 2013.
- [3] M. Braun. *Airline Schedule Planning for Evaluating Economic and Climate Impacts of Future Aircraft Concepts*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Dezember 2012.
- [4] K. Dahlmann, V. Grewe, C. Frömming, and U. Burkhardt. *Can we reliably assess climate mitigation options for air traffic scenarios despite large uncertainties in atmospheric processes?*, volume 46, pages 40 – 55. 2016.
- [5] Department of Defense. MIL-HDBK-1797 - flying qualities of piloted aircraft, 1997.
- [6] H. Dijkers, R. van Nunen, D. B. T. Gutleb, L. Herinckx, H. Radfar, E. V. Rompuy, S. Sayin, J. de Wit, and W. B. van Blokland. Integrated design of a long-haul commercial aircraft optimized for formation flying. In *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, number AIAA 2011-6969, 2011.
- [7] K. Drews. Identifikation und Modellierung ziviler Formationsflüge auf Basis von globalen Flugplandaten. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg, 2016.
- [8] K. Drews, T. Marks, G. Konieczny, F. Linke, and V. Gollnick. *Identification and modeling of civil formation flight routes based on global flight schedule data*. Number DLRK2014-340220. 66. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2017.
- [9] D. DuBois and G. C. Paynter. "Fuel Flow Method2" for Estimating Aircraft Emissions. SAE International, 08 2006.
- [10] ECMWF. European center for medium range weather forecast, 2019.
- [11] EUROCONTROL. *RECAT-EU - European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure*, 2015.
- [12] C. Frömming, M. Ponater, K. Dahlmann, V. Grewe, D. S. Lee, and R. Sausen. Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19), 2012.
- [13] S. Grabbe. *Future ATM Concepts Evaluation Tool (FACET) User Manual V 1.5*. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, 2010.
- [14] V. Grewe, C. Frömming, S. Matthes, S. Brinkop, M. Ponater, S. Dietmüller, P. Jöckel, H. Garny, E. Tsati, K. Dahlmann, O. A. Søvdde, J. Fuglestedt, T. K. Berntsen, K. P. Shine, E. A. Irvine, T. Champougny, and P. Hullah. Aircraft routing with minimal climate impact: the REACT4C climate cost function modelling approach (V1.0). *Geoscientific Model Development*, 7(1):175–201, 2014.
- [15] V. Grewe and A. Stenke. Airclim: An efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8:4621–4639, 08 2008.
- [16] L. Herinckx, T. Gutleb, R. van Nunen, E. V. Rompuy, D. Bos, H. Dijkers, J. de Wit, H. Radfar, S. Sahin, and D. W. B. van Blokland. Formation flying as an innovative air transportation system for long-haul commercial flight: A focus on operational feasibility and potential gain. In *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, number AIAA 2011-6990, 2011.

- [17] E. A. Irvine, B. J. Hoskins, K. P. Shine, R. W. Lunnon, and C. Froemming. Characterizing north atlantic weather patterns for climate-optimal aircraft routing. *METEOROLOGICAL APPLICATIONS*, 20:80–93, 2013.
- [18] F. Jelinek, S. Carlier, and J. Smith. Advanced Emission Model (AEM3) v1.5 – Validation Report. EEC Report EEC/SEE/2004/004, EUROCONTROL Experimental Centre, Brétigny sur Orge, Frankreich, 2004.
- [19] H. Jordan. Air force research laboratory utilizes 'surfing' formation flight to reduce fuel cost. News Release, 10 2012.
- [20] T. Kent and A. Richards. *A Geometric Approach to Optimal Routing for Commercial Formation Flight*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2012.
- [21] T. Kent and A. Richards. On optimal routing for commercial formation flight. 2013.
- [22] T. Kent and D. A. Richards. Accounting for the effect of ground delay on commercial formation flight. In *UKACC International Conference on Control*, 2014.
- [23] B. Kim, G. Fleming, S. Balasubramanian, A. Malwitz, J. Lee, J. Ruggiero, I. Waitz, K. Klima, V. Stouffer, D. Long, P. Kostiuik, M. Locke, C. Holsclaw, A. Morales, E. McQueen, and W. Gillette. System for Assessing Aviation's Global Emissions (SAGE), Version 1.5, Technical Manual. FAA-EE-2005-01, Federal Aviation Administration, September 2005.
- [24] A. Knoll and S. Steger. Verfahren für den 'losen' Formationsflug. In *62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2013.
- [25] A. Knoll, S. Steger, and M. Heni. Der 'lose' Formationsflug unter Flugsicherungsaspekten. In *61. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2012.
- [26] A. Knoll, S. Steger, and M. Heni. Flugregelungsanforderungen an den 'losen' Formationsflug. In *61. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2012.
- [27] A. Koch. *Climate impact mitigation potential given by flight profile and aircraft optimization*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), November 2013.
- [28] J. Koopmann. *Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Technical Manual, Version 2a*. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2013.
- [29] F. Linke. Trajectory Calculation Module (TCM) - tool description and validation. Technical report, 2014.
- [30] R. Luckner and A. Kaden. Formationsflug von Verkehrsflugzeugen zur Treibstoffeinsparung. In *64. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2015.
- [31] B. Lührs, F. Linke, and V. Gollnick. Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien. In *63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. 63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2014.
- [32] T. Marks. Softwaredokumentation STAFD. Technical Report IB-328-2015-20, DLR-LY, 2017.
- [33] T. Marks. *Modellansätze zur Bewertung von Formationsflügen im Lufttransportsystem*. Dissertation, Hamburg Technical University, 2019.
- [34] T. Marks, J. Berling, and V. Gollnick. Assessment of potential formation flight benefits based on european flight plan data. In *65. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, number DLRK2016-420139, 2016.
- [35] T. Marks, K. Dahlmann, V. Grewe, V. Gollnick, F. Linke, S. Matthes, E. Stumpf, M. Swaid, S. Unterstrasser, H. Yamashita, and C. Zumegen. *Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight (abstract submitted)*. ECATS 3rd Conference, 2020.

- [36] T. Marks and V. Gollnick. Ant Colony Optimization zur Routenoptimierung von Formationsflügen ziviler Verkehrsflugzeuge. In *63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, number DLRK2014-340285, 2014.
- [37] T. Marks and V. Gollnick. Influence of aircraft type and order on fuel savings gained by two-aircraft formations. In *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2016.
- [38] T. Marks, F. Linke, and V. Gollnick. Ein Ansatz zur Bewertung des Konzeptes von Formationsflügen ziviler Verkehrsflugzeuge im Lufttransportsystem. In *62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, number DLRK2013-301392, 2013.
- [39] T. Marks, F. Linke, and V. Gollnick. Entwicklung einer Methode zur vereinfachten Ermittlung von Leistungsmerkmalen ziviler Formationsflüge. In *63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, number DLRK2014-340220, 2014.
- [40] T. Marks, F. Linke, and V. Gollnick. Evaluation of potential fuel savings by introducing formation flight on a north atlantic scenario. In *5th International Air Transport and Operations Symposium (ATOS)*, 2015.
- [41] T. Marks and M. Swaid. Optimal timing and arrangement for two-aircraft formations on north atlantic under consideration of wind. In *AIAA Scitech 2020 Forum*. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.
- [42] T. Marks, M. Swaid, B. Lührs, and V. Gollnick. Identification of optimal rendezvous and separation areas for formation flight under consideration of wind. In *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018.
- [43] T. Marks, C. Zumegen, V. Gollnick, and E. Stumpf. Assessing formation flight benefits on trajectory level including turbulence and gust. In *Italian Association of Aeronautics and Astronautics XXV International Congress*. Italian Association of Aeronautics and Astronautics XXV International Congress, September 2019.
- [44] S. A. Ning. *Aircraft drag reduction through extended formation flight*. Dissertation, Stanford University, 2011.
- [45] T. Reynolds, S. Barrett, L. Dray, A. Evans, M. Köhler, M. Vera-Morales, A. Schäfer, Z. Wadud, R. Britter, H. Hallam, and R. Hunsley. Modelling environmental and economic impacts of aviation: Introducing the aviation integrated modelling project. In *Proceedings of the 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, Belfast, Northern Ireland*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [46] Sabre Airline Solutions. Sabre AirVision Market Intelligence, Global Demand Data - Insight into Global Schedule and Market Information, Brochure, 2016.
- [47] C. Schwarz and K.-U. Hahn. Gefährdung beim Einfliegen in Wirbelschleppen. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2003*, number DGLR-JT2003-242, 2003.
- [48] N. Simone, M. Stettler, S. Eastham, and S. Barrett. Aviation Emissions Inventory Code (AEIC) User Manual (R1). LAE-2013-001-N, Laboratory for Aviation and the Environment, Massachusetts Institute of Technology, Januar 2013.
- [49] M. Swaid, T. Marks, and V. Gollnick. *Adapting the fuel planning to operational uncertainties of aircraft wake-surfing for efficiency (abstract submitted)*. ECATS 3rd Conference, 2020.
- [50] M. Swaid, T. Marks, B. Lührs, and V. Gollnick. Quantification of formation flight benefits under consideration of uncertainties on fuel planning. In *ICAS 2018*, 2018.
- [51] S. Unterstrasser and A. Stephan. *Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails*, pages 1–36. Cambridge University Press, 2020.

-
- [52] D. Vechtel, D. Fischenberg, and J. Schwithal. Analysis of formation flight for energy saving using less-generated wake flow fields. In *Deutscher Luft- und Raumfahrt-Kongress*, September 2016.
- [53] G. Warwick. Birds do it. *Aviation Week*, 01 2014.
- [54] J. Xu, S. A. Ning, G. Bower, and I. Kroo. Aircraft route optimization for heterogenous formation flight. In *53rd AIAA Conference*, number AIAA 2012-1524, 2012.
- [55] J. Xu, S. A. Ning, G. Bower, and I. Kroo. Aircraft route optimization for formation flight. *Journal of Aircraft*, 51(2):490–501, March-April 2014.
- [56] C. Zumegen and E. Stumpf. Flight behaviour of long-haul commercial aircraft in formation flight. In *Air Transport Research Society, ATRS World Conference*. Air Transport Research Society, ATRS World Conference, 2019.