

Programm Luftfahrtforschung V-III

Abschlussbericht

von:

Technische Universität Dresden – Institut für Luftfahrt und Logistik
Professur: Technologie und Logistik des Luftverkehrs

Vorhaben: ReMAP

ReMAP

Risikoanalyse und Konfliktlösung multikriteriell gekoppelter An- und Abflugverfahren innerhalb eines umfänglichen Parameterraums mit Unterstützung von High-Performance-Computing

Gefördert durch:

Förderkennzeichen: 20E1728

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2018 bis 31.08.2022



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. H. Fricke

Ort: Dresden

Datum: 28.02.23

Inhalt

1.	Einleitung	3
2.	Aufgabenstellung	4
3.	Voraussetzungen.....	5
4.	Planung und Ablauf.....	5
5.	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	6
6.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
7.	Erzielte Ergebnisse	6
7.1	HAP1 – Ziele und Anforderungen	8
7.2	HAP2 – Flugverfahrensmodellierung.....	9
7.3	HAP3 – Risiko- und Lärmbewertung.....	15
7.4	HAP4 - Implementierung dynamischer Flugverfahren	19
7.5	HAP5 – Prototypische Validierung und Kapazitätsbewertung	22
8.	Nutzen und Verwertbarkeit	24
9.	Fortschritt bei anderen Stellen	26
10.	Veröffentlichungen und Vorträge	27
11.	Liste der erstellten Dokumentationen	27
12.	Literaturverzeichnis	27

1. Einleitung

Das Einzelvorhaben ReMAP (Risikoanalyse und Konfliktlösung multikriteriell gekoppelter An- und Abflugverfahren innerhalb eines umfänglichen Parameterraums mit Unterstützung von High-Performance-Computing) wurde an der Technischen Universität Dresden (TUD) vom 01.08.2018 bis 31.08.2022 bearbeitet.

Die seit vielen Jahrzehnten praktizierte Führung der Luftfahrzeuge vom Flughafen in das Streckennetz bzw. von dort auf den Endanflug respektiv in Form fixer SID^[1] und STAR^[2] Routen wird seit den letzten 10 Jahren als nicht mehr zeitgemäß erachtet: Variables Verkehrsaufkommen an einem Flughafen profitiert effizienzseitig von stets angepasste Streckenführungen, um z. B: kapazitätsoptimiert operieren zu können. Diese Anpassung erfolgt de facto bisher durch Vergabe individueller „Radarvektoren“ seitens der Fluglotsen an die Flugzeugführer, die aufgrund ihrer Individualität widerstreitenden Optimalitätskriterien wie insbesondere Emissionen versus Durchsatz offensichtlich nur selten hinreichend genügen können. Im Anflugbereich setzen sich nun zunehmend in gewissem Grad flexible „Transitions“ hin zum Endanflug durch, ermöglicht durch Flächen-/Satellitennavigation (RNP/RNAV bis herunter auf 0,3 NM Navigationsgenauigkeit nach ICAO). Hierdurch kann die Sequenzierung und Staffelung der Luftfahrzeuge im Flughafennahbereich – u.a. in Deutschland häufig in S-förmig gestalteter sog. „Trombonen“ - standardisiert in der Länge angepasst werden: Hieraus ergibt sich eine lastabhängige, standardisierte und damit recht verlässliche Optimierung der Routen auf die jeweilige Nachfrage/Verkehrslast hinsichtlich flughafenseitiger Kapazität. Abflugverfahren werden i.d.R. im Nachgang mit dem Ziel geplant, a) laterale Kreuzungspunkte mit Anflugstrecken möglichst zu vermeiden und b) vertikal Abflüge stets über Anflüge zu führen, um flugleistungsbedingt stets auf der sicheren Seite zu sein. Hierdurch resultiert offensichtlich eine wesentliche Einschränkung im Erzielen einer kapazitätsseitigen Optimierung von gleichermaßen An- und Abflug, bedingt durch eine rein sicherheitsseitig konservative Vorgehensweise, die lärmseitig häufig suboptimale Lösungen liefert und nicht alternativlos ist.

Das Projekt ReMAP nutzt konsequent die Möglichkeiten des neuen ICAO PBN-Standards [1] und fügt sich mit einer sicherheitsbewerteten Kopplung ökoeffizient ausgelegter Abflugverfahren in das Bestreben maximaler Effizienz im Luftverkehr bei höchster Sicherheit ein. Ausgehend der umfassenden Vorarbeiten zur Optimierung von Flugtrajektorien an Lehrstuhl werden Abflüge am Flughafen München (EDDM) energieeffizient und unter jeweils aktuellen Wetterbedingungen gestaltet. Anders als bisher folgen diese jedoch nicht mehr ausschließlich der Fluglärmminimierung, sondern einer komplexen Zielfunktion, die eine Lärmkomponente nach ECAC Doc 29 beinhaltet. So kann die Lärmbelastung in einer Metropolregion reduziert und gleichzeitig den steigenden Anforderungen nach ökoeffizienter Flugdurchführung mit Senkung des Brennstoffbedarfes entsprochen werden. Die Organisation des Verkehrs erfolgt nunmehr nicht nach vorgegebenen Routen auf SIDs oder STARs, sondern in Form von trichterförmigen Verfahrensoptimierungsräumen (Traffic Flow Funnels, kurz: Funnel, vgl. Abbildung 1), deren Dimensionierung für den Abflug eine Funktion individueller Steigleistung, der Richtung der Destinationen ist, die dabei auch eine räumliche Begrenzung durch ankommenden

[1] SID Standard Instrument Departure: Standardisiertes Abflugverfahren am Flughafen in Abhängigkeit der Bahn, der Bahnbetriebsrichtung und eventueller Richtung des Flugziels

[2] STAR Standard Terminal Arrival Route: Standardisiertes Anflugverfahren, entspricht einer vertikalen und lateralen Routenführung vom Reiseflug (über Transitions) zum Initial Approach Fix

Verkehrsströme erfährt. Luftfahrzeuge (LFZ) verpflichten sich zum Aufenthalt ausschließlich im zugewiesenen Funnel und garantieren so der Flugverkehrskontrolle eine robuste Vorhersehbarkeit der Flugverläufe und damit einen sicheren Verkehrsfluss. Im Gegenzug ist jedem LFZ die Durchsetzung seines individuell optimalen Abflugprofiles im Lichte einer Continuous Climb Operation, COO zugeordnet. Die Begrenzung der Flugdurchführung nur innerhalb der Funnels nutzt damit das Konzept der Performance-Based Navigation (PBN) sowie die Anforderung an die technische Navigationsleistungsfähigkeit Required Navigation Performance (RNP) der Approach-Klasse APCH, vgl. ICAO PBN Manual Doc 9613 AN/937.

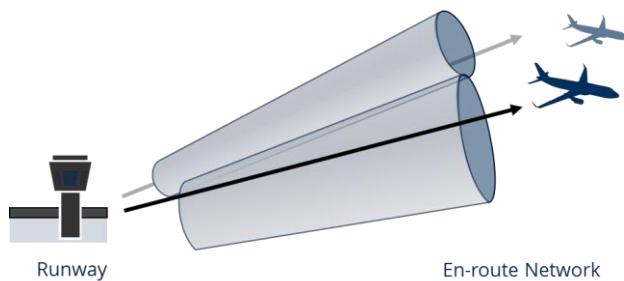


Abbildung 1: Prinzipskizze zweier *Funnel* als Verfahrensräume für den Abflug von einem Flughafen.

2. Aufgabenstellung

Das Vorhaben gliedert sich in fünf Hauptarbeitspakete (HAP). In HAP1 erfolgte die Definition funktionaler Anforderungen an die Weiterentwicklung der institutsinternen Modelle zur Trajektorienoptimierung und Kollisionsrisikobewertung. Einleitend fand eine fokussierte Aufarbeitung wesentlicher Methoden und Forschungsergebnisse zu ökoeffizienten An- und Abflugverfahren, Anforderungen an die Kommunikations-, Navigations- und Überwachungstechnologien und Navigationsgenauigkeit hinsichtlich Grenzrisiken (Target Level of Safety, TLS) statt. Darauf aufbauend wurde in diesem HAP das korridororientierte Flugverfahrenskonzept beschrieben und in funktionale Modellerweiterungen überführt.

Das Ziel des zweiten HAP bestand in der ökoeffizienten Modellierung eines möglichst optimalen Abflugverfahrens. Hierzu erfolgte zunächst die Aufarbeitung von Emissionsbewertungsfunktionen aus Vorarbeiten und der gesetzlich normierten Lärmberechnungsverfahren. Da die optimale Gestaltung der Trajektorie durch die vorherrschenden Wetterbedingungen und luftfahrzeugspezifischen Parameter (z.B. aktuelle Masse, Alter von Triebwerk und Hülle) dominiert wird, erfolgte eine Modellierung dieser Störfaktoren. Ferner waren Konfliktlösungsstrategien für Verkehr bei drohender Staffelungsunterschreitung zu entwickeln.

HAP3 beschäftigte sich mit dem Aufspannen sicherer LFZ-Bewegungsräume (Korridore/Funnel) auf Basis von Risikobewertungsmethoden und unter Beachtung von Störfaktoren aus HAP2. Dies zielte auf die Erweiterung des integrierten Sicherheitsbewertungsmodells (iSBM) des Lehrstuhls ab, welche ursprünglich mit der Trajektorienoptimierung verknüpft werden sollte. Das iSBM erwies sich aus Gründen der Limitierung auf feste Flughöhen (Lateralmodell), strikter Routendefinition, hoch spezialisierter Lotsenanweisungen sowie stark vereinfachtem Dynamikmodell (keine Betrachtung der LFZ-spezifischen Flugleistung) allerdings als wenig geeignet, was auch mit erheblichem Mehraufwand in der Implementierung nicht überwunden werden konnte. Als

geeignetere Alternative erwies sich hingegen die Auslegung der Funnel aus der Trajektorienoptimierung einzelner Flüge, die zusammengefasst und durch Clusterverfahren in Hauptverkehrsströme getrennt als Verfahrensräume beschrieben werden können. Die Bewertung der Betriebssicherheit wurde in einen nachträglichen Schritt hinsichtlich erhöhter Konfliktrisiken (bspw. durch Überlappung der Korridore) verlagert.

Das vierte HAP hatte zum Ziel, An- und Abflugkorridore iterativ unter Nutzung der mit der Trajektorienoptimierung verknüpften Risikomodellierung sowie High Performance Computing (HPC) taktisch konfliktbefreit zu modellieren. Durch Monte-Carlo-Simulationen von Flügen unterschiedlicher Destinationen und in verschiedenen Wetterszenarien konnten die Verfahrensräume in einem Schritt abgeleitet und Funnel generiert werden. Mit Auslöschung risikoreicher Überlappungen der Funnel auf Basis des PBN-Konzeptes konnte schließlich die hoch rechenaufwendige und iterative Anpassung der Funnel umgangen werden.

In HAP5 erfolgte eine Bewertung des Verkehrsführungskonzeptes mittels Funnel durch Aufstellung und Testen von Betriebsszenarien. Aufbauend auf den Ergebnissen aus HAP1 werden die Betriebsszenarien hier dimensioniert, parametrisiert, deren Verkehrsstrom modelliert und mittels Umsetzung auf die Funnel aus HAP4 appliziert.

3. Voraussetzungen

Im Projekt ReMAP konnte die TUD auf Vorarbeiten für angestrebte Arbeitsziele zurückgreifen, wenn auch nicht in dem Ausmaß, wie zur Antragstellung erwartet (siehe Hinweis zum iSBM). Essenziell waren hingegen bisherige Forschungsaktivitäten im Bereich „Trajectory Management“ und „Safety/Security Assessment“. Ersteres bietet mit der Software TOMATO (Trajektorienoptimierung und -bewertung) sowie SOPHIA (Flugleistungsmodell) die Grundlagen für die laterale und vertikale Trajektorienoptimierung. Deren ursprünglicher Einsatzzweck liegt im En-Route-Bereich, so dass im Projekt ReMAP umfangreiche Neuimplementierungen für den Flughafennahmbereich erforderlich waren. Ergänzend wurden im Rahmen des SESAR-WP-E-Projektes UTOPIA sowie des DFG-Projektes [410540389](#) Systemstörungen und stochastische Unsicherheiten bereits restriktionsbehafteter vierdimensionale Trajektorien generiert [2]. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen einer Dissertation [3] bereits ein Flugleistungsmodell am Lehrstuhl entwickelt und validiert, das die Grundlage für SOPHIA in den vorangegangenen LuFo-Projekten *MEFUL* sowie *ProfiFuel* war.

Die Berechnung der Emissionen wurde ebenfalls im Projekt ProfiFuel mithilfe eines neu entwickelten Triebwerk-Moduls ermöglicht und über sog. Ecological Performance Indicators (EPI) quantifiziert. Die Bewertung der Emissionen für die Trajektorienoptimierung fand ansatzweise bereits im Projekt MEFUL statt, allerdings nur für eine begrenzte Anzahl von Luftfahrzeugtypen und Flugkonfigurationen. Dies galt nicht für die Berechnung von Fluglärm.

4. Planung und Ablauf

Aus Gründen der Besetzung mit geeignetem Personal und Einstellungsverzögerungen begann die fachliche Projektarbeit unter Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber erst im Januar 2019. Das Vertragsverhältnis mit dem wissenschaftlichen Mitarbeiter wurde dann zum Ende der Probezeit nach sechs Monaten aufgrund mangelnden Engagements beendet. Ab August 2019 wurde das Projekt dann von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern erst mit je einer halben Stelle und anschließend ab November 2020 mit voller Besetzung fortgeführt. Der entstandene Rückstand

gegenüber dem Plan wurde so in Verbindung mit einer bewilligten kostenneutralen Projektverlängerung aufgeholt. Die Meilensteine M1 (Anforderungsanalyse der Modelle), M2 (Trajektorienberechnungsmodell mit multikriterieller Zielfunktion) sowie M5 (Validierung der Betriebsszenarien) konnten allerdings nur mit geringer Verzögerung erreicht werden. Von der Erfüllung der Meilensteine M3 (funktionale Erweiterung iSBM), M4.2 (Korridore werden konfliktbefreit), M4.3 (Simulation ist auf dem HPC-Rechencluster) wurde durch einen dem Projektgeber über die Zwischenberichte kommunizierte fachliche Änderung der Arbeitspakete abgesehen. So wurde die Kollisionsrisikomodellierung des iSBM nicht mehr als notwendig zur Zielerreichung erachtet, was so auch die stochastische Simulation per HPC-Rechencluster ausschließt. Demgegenüber wurde das Projekt um Inhalte ergänzt bzw. insbesondere im Bereich der Trajektorienmodellierung vertieft, welche sich im Laufe der Bearbeitung des Vorhabens für relevant herausstellte. Die formalen Vorgaben des Projektträgers, mindestens zwei wissenschaftliche Publikationen bzw. Einbringen der erweiterten Expertise in Anschlussvorhaben, wurden erfüllt.

5. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Durch das Vorhaben ReMAP konnte der wissenschaftliche Stand auf dem Gebiet der Trajektorienoptimierung im Flughafennahmbereich und unter Integration von Fluglärm in der Zielfunktion deutlich gesteigert werden, da neben der flugleistungsabhängigen Gestaltung eines 4D-Optimierungsgitters auch – nach unserer Kenntnis – erstmals Schall nach ECAC Doc 29 in eine dynamische 4D Routenoptimierung implementiert wurde. Dadurch wurde eine bis dato unerreicht genaue Bewertung der Einzelabflugtrajektorie in einem neuen Flugverfahrenskonzept möglich.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Einzelvorhaben ReMAP erfolgte keine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen.

7. Erzielte Ergebnisse

Die bereits in den LuFo-Projekten MEFUL und ProfiFuel entwickelte und validierte Simulationsumgebung zur Optimierung von Flugtrajektorien wurde im Projekt ReMAP umfassend zur Verarbeitung von flugleistungsabhängigen, dynamischen Pfadsuchgittern, Lärmbewertung von Einzelflugereignissen und Verkehrsorganisation in Funnels erweitert.

Diesen Aufgaben wurde in den fünf Hauptarbeitspaketen sukzessive nachgegangen. Abbildung 2 bietet eine Übersicht über die für ReMAP bislang vorhandenen Teilmodule, welche im Ganzen die Simulationsumgebung *Toolchain for multi criteria trajectory optimization* (TOMATO) darstellen.

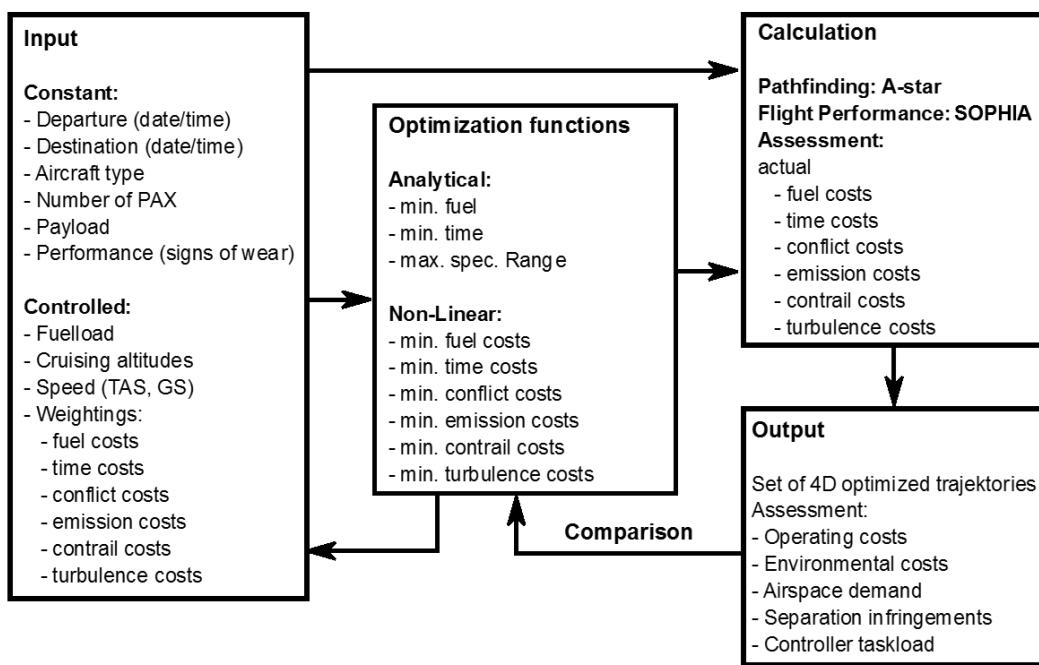


Abbildung 2: Simulationsumgebung TOMATO mit Optimierungszielen und -strategien, Kennzeichnung der Ein- und Ausgangsdaten, sowie der Teilmodule
(Bildquelle Abschlussbericht LuFo V-I 20V1508C „ProfiFuel“).

TOMATO verwendete für die Optimierung eines ökoeffizienten Luftverkehrssystems bislang dynamische (zeitliche Auflösung: 1 Sekunde) und räumlich hoch aufgelöste (räumliche Auflösung 0.25°) Eingangsdaten wie atmosphärische Zustandsgrößen, Betriebskosten einer Fluggesellschaft oder die aktuelle Luftraumstruktur. Hierzu werden operationelle Planungsdaten durch ein externes Netzwerk- und Flottenoptimierungsmodell bereitgestellt. Wesentliche in ReMAP umgesetzte Erweiterung betreffen die Blöcke „Calculation“: Durch eine neue Gitterstruktur der Pfadsuche, Kosten durch Schallereignisse, entsprechende Ausgaben im Block „Output“ und die hintergründige Flugleistungsrechnung durch tabelliert bereitgestellte Daten für eine Beschleunigung der Berechnung wurde die Funktionalität deutlich erweitert. Da nunmehr auch nur einzelne Segmente von Flügen berechnet werden können (z. B. Abflug), erfolgte eine intensive Neugestaltung aller Konfigurationselemente und Berechnungsschritte.

Die im Projekt konzipierte Methode zur Trajektorienoptimierung ist in Abbildung 3 zusammengefasst. Hier werden die TOMATO-Kernmodule a) Pfadsuche, b) Optimierung des Vertikalprofils und c) Bewertung der Trajektorie („Assessment“) genutzt und um ein neues 3D-Abfluggitter und der Bewertung der Schallemissionen erweitert.

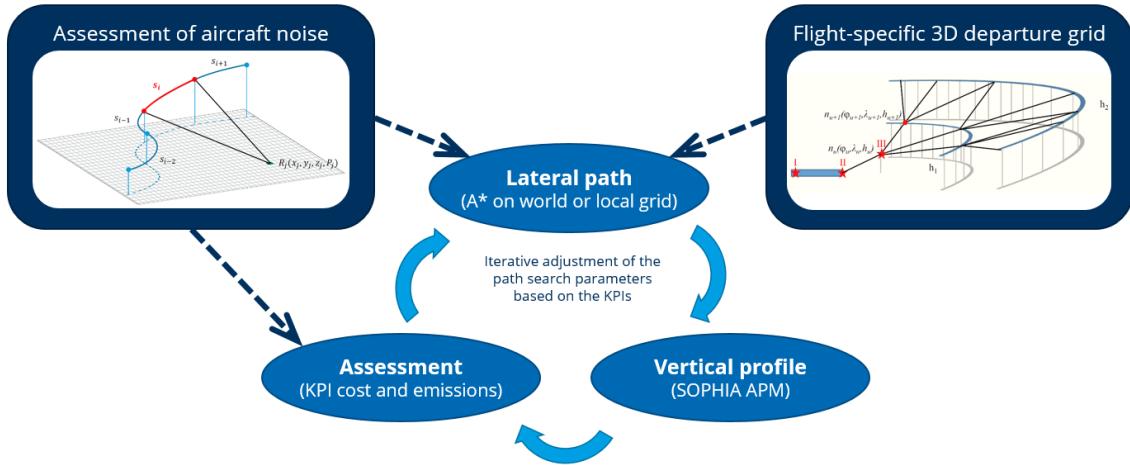


Abbildung 3: Iterativ verschaltete Kernmodule TOMATO (hellblau) und Erweiterung durch ReMAP.

7.1 HAP1 – Ziele und Anforderungen

Im ersten und zweiten AP dieses HAP erfolgte eine Recherche ökoeffizienter An- und Abflugverfahren und Definition von Communication, Navigation, Surveillance (CNS)-Anforderungen. In dieser Rekapitulation gegenwärtig implementierter sowie in der Erforschung befindlicher Flugverfahren im An- und Abflugbereich wurden bisherig bekannte Verfahren hinsichtlich der Kriterien Sicherheit, technische und kurzfristige Implementierbarkeit, Durchsatz, Wirtschaftlichkeit/Effizienz, Umwelt und Flexibilität vorwiegend quantitativ bewertet. Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurden Einsatzmöglichkeiten des Point-Merge-Verfahrens im Rahmen des ReMAP Konzepts speziell für den Flughafen München (EDDM) untersucht, wobei keine Interaktion mit Verkehr weiterer in der Nähe befindlicher Flughäfen unterstellt wurde. Insgesamt zeigte sich, dass im operationellen Betrieb und besonders in Hochlastzeiten an überwiegend klassischen Verfahren zugunsten eines hohen Verkehrs durchsatzes festgehalten wird. Zunehmend zeichnete sich jedoch eine Flexibilisierung in Richtung CDO unter zumindest weiterhin lateralen Restriktionen ab (Point Merge, DFS CDO Tunnel Frankfurt). Mit Grundlage heutiger Anforderungen des PBN können diese als auch das in ReMAP unterstellte Flugverfahren implementiert werden (AP 1.2). Dafür müssen jedoch die vertikalen und horizontalen Verteilungsfunktionen des Positionsfehlers der entsprechenden Navigationstechnologie als „Total System Error“ in die Berechnung der Funnels einfließen. Diese definieren die Separationsabstände der LFZ innerhalb des Funnels sowie die minimal notwendigen Abstände unabhängig betriebener Funnels. In AP 1.3 wurde eine umfangreiche Unfalluntersuchung für Part 121 und Part 91 Flugoperationen auf Basis der [NTSB-Datenbank](#) (Zeitraum 2009-2018) durchgeführt. Ein besonderer Fokus lag dabei im Studium Luft-Boden-bezogener Probleme in der Kommunikation, welche neben Verständnisproblemen zwischen Cockpit und Lotsen auch durch die Laufzeit Einfluss auf die Positionsgenauigkeit und damit die Zuverlässigkeit des Aufenthalts eines LFZ im Funnel aufweisen [4], [5]. Jener Prozess wurde im iSBM nachgebildet und per Bericht im DFG-Projekt 119520566 als Wirkung auf die Navigationsunsicherheit bewertet¹. Das hieraus als Status Quo resultierende Risiko dient, neben bestehenden Regularien, als untere Grenze des TLS (Target Level of Safety) für die Entwicklung von An- und Abflugverfahren in ReMAP. Die Untersuchungen zeigen, dass sich diesem TLS entsprechend alle untersuchten technisch, betrieblich sowie menschlich

¹ <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/119520566>

bedingten Navigationsunsicherheiten dem Konzept des PBN unterordnen lassen und die geforderte Genauigkeit von Advanced RNP² mit 1 NM (P-RNAV) im Flughafennahbereich auf in ReMAP erstellte Verfahrensräume übertragbar ist (vgl. PBN Manual ICAO Doc 9613 Edition 5 Table II-A-1-1, Anforderungen identisch auch für Anflüge mit RNP APCH). Die Anforderungen sind für die Flugphase des Final Approach mit 0,3 NM in dieser RNP-Klasse höher, wird jedoch durch ReMAP nicht berührt. Ein Flugverfahrenskonzept mit longitudinal veränderlichen Verfahrensräumen als Funnels, welche durch LFZ zur sicheren Verkehrsführung nicht verlassen werden sollen, sind demzufolge für Abflüge von Verkehrsflughäfen technisch möglich (AP 1.4). Darüber hinaus wurden die Unfallursachen beitragenden Faktoren der historischen Unfälle analysiert und für die Bewertung stochastischer Störfaktoren (AP 2.2) aufbereitet.

7.2 HAP2 – Flugverfahrensmodellierung

Im HAP2 „Flugverfahrensmodellierung“ wurde die Trajektorienoptimierung in TOMATO zur Unterstützung lärm- und flugleistungsoptimierter Abflüge befähigt. Die bislang in TOMATO enthaltenen Bewertungsfunktionen zur Ökoeffizienz wurden kritisch mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft überprüft (Strahlungshaushalt: CO₂, NO_x, Ruß, H₂O, SO_x, Luftqualität: CO, C_xH_x). Parallel dazu fand die Implementierung der Wirkung von Kondensstreifen in TOMATO statt, welche jedoch keinen Einfluss auf die niedrigeren Flughöhen hat, wie sie Untersuchungsgegenstand in ReMAP sind (vgl. Abschlussbericht LuFo V-II „ProfiFuel“, Förderkennzeichen 20V1508C). Die gemeinsame Bewertung der vorgenannten Emissionen mit der Schallimmission durch LFZ als Fluglärm, bislang bewertet als äquivalente Dauerschallpegel (z. B. L_{DEN}), ist als Bewertung einzelner Trajektorien komplex. Infolge wurde zur Einführung einer rein binären Entscheidungslogik auf die Einstufung für zumutbare sowie nicht-zumutbare Schallereignisse zurückgegriffen, welche als Metastudie zum Community Tolerance Level von der ICAO zusammengestellt wurde [6]. Die flächendeckende und zeitaggregierende Umwandlung in Dauerschallpegel ist mit den herkömmlichen Methoden wie „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB)“ möglich und kann in die iterative räumliche Ausgestaltung der Funnels für ausgewählte Flugbetriebstage als limitierender Layer in TOMATO zurückfließen. Gesellschaftlich als auch aus Sicht der Optimierung geeigneter ist jedoch die Kombination aus Verkehrskoordinierung durch Wahl eines Funnels (gerechte Verteilung des Lärms) mitsamt lärmreduzierenden Maßnahmen in der Einzelflugoptimierung. Die Berechnung von Schallpegeln des Fluglärmes erfolgte im HAP3 und fließt als Modul einerseits direkt während der Optimierung der Flugtrajektorie als auch in die Gesamtbewertung der Trajektorie ein.

Wie in HAP1 erarbeitet, haben Unsicherheiten der Positionsgenauigkeit Einfluss auf die Optimierung: Diese erfordern eine Separation von Funnels untereinander von mindestens Abstand RNP1, welcher laut Eurocontrol bei geringer Geschwindigkeit (<300 kts) und 90°-Turns auf Abflugrouten in 1 von 1.000 Flügen überschritten wird (s. Eurocontrol PBN Route Spacing Handbook [7]). Die Erhöhung der Abstandsforderung bzw. die Einführung einer hinreichenden zeitlichen Komponente sichert eine Senkung dieses Wertes in Richtung des TLS zu. Gleichzeitig zeigt sich dadurch, dass Positionsungenauigkeiten durch Kommunikation im prozeduralen Abfliegen von RNAV-Verfahren vernachlässigbaren Einfluss zeigen. Diese treten mehr durch Vectoring der Flugsicherung auf, welches im Konzept der Funnels nicht vorgesehen ist (ein weiterer

² Ein RNP von 1 NM bedeutet, dass das Flugzeugnavigationssystem in der Lage sein muss, seine Position innerhalb eines Kreises mit einem Radius von einer Seemeile zu berechnen.

Grund der Zurücksetzung des iSBM für die hiesige Forschung). Technische und weitere Unsicherheiten während der Flugdurchführung, auf welche im Sinne einer flugleistungsbasierten Optimierung kein Einfluss genommen werden kann, gelten dem RNP zugeordnet. Die zitierte Studie der Eurocontrol weist die Einhaltung der Vorgaben bereits zum heutigen Stand der Technik nach. Der Zweck der Funnels soll jedoch durch deren Gestaltung als Verfahrensraum die Möglichkeit zum flugleistungstechnischen Optimum (konkret Betriebskosten, Brennstoffkosten) liefern. Diese beeinflussenden und gleichzeitig stochastischen Faktoren wie atmosphärische Zustandsparameter (vorrangig Wind) sind in Vorarbeiten bereits umfassend beschrieben und für ReMAP wiederum hinsichtlich neuer Erkenntnisse aufgearbeitet (DFG-Projekt [347224103](#), Jahre 2017 bis 2022, DFG-Projekt [327114631](#), Jahre 2017 bis 2022). Die hohe Komplexität, z.B. des 4D-Windverhaltens, wurde dabei statt mittels aggregierter Wahrscheinlichkeitsfunktionen mithilfe geeigneter Szenarien (Vorhersagen für verschiedene Betriebsstunden, Tage, oder sog. Ensembles als Variation in Wettermodellen und damit der Beschreibung von Unsicherheiten zur jeweiligen Wettervorhersage [8], vgl. Abbildung 4) beschrieben.

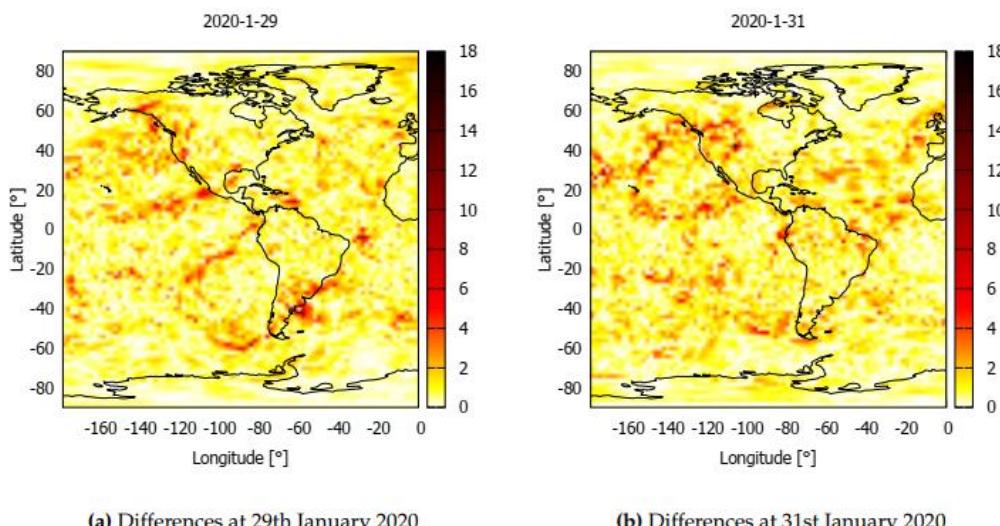


Abbildung 4: Standardabweichung der Windgeschwindigkeit entsprechend der 21 Ensemble-Mitglieder des Global Ensemble Forecast System (GEFS) an zwei Tagen [8].

Optimierungsgitter für frei planbare Abflüge

Die Modellierung jeder optimierten Trajektorie (AP 2.3) folgt einem deterministischen Ansatz. Hiernach führt ein Satz von Randbedingungen und Eingaben (vgl. Abbildung 2) in TOMATO zu einer einzelnen optimierten Trajektorie. Die Wiederholung dieses Schrittes für eine Reihe der Eingabedaten (bspw. wechselnde Wettervorhersagen, hier Global Forecast System 0.25° genutzt) liefert sodann eine Bandbreite von lateral/vertikalen Trajektorien und beschreibt so einen Verfahrensraum – bislang noch speziell für eine konkret gleichbleibende Flugintention (Start, Ziel, Start-/Landebahn, Flugzeugmuster, Beladung). Ein Funnel basiert sodann auf einer Kombination und damit lateraler und vertikaler Ausdehnung mehrerer Verfahrensräume wechselnder Intentionen bzw. variierender Parameter, vgl. hierzu die Ausführungen zu HAP4. Zur Optimierung der einzelnen Abflugtrajektorie musste TOMATO infolge um die Gestaltung eines entsprechenden Pfadsuchgitters erweitert werden, deren Methode in [9] beschrieben und publiziert wurde (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

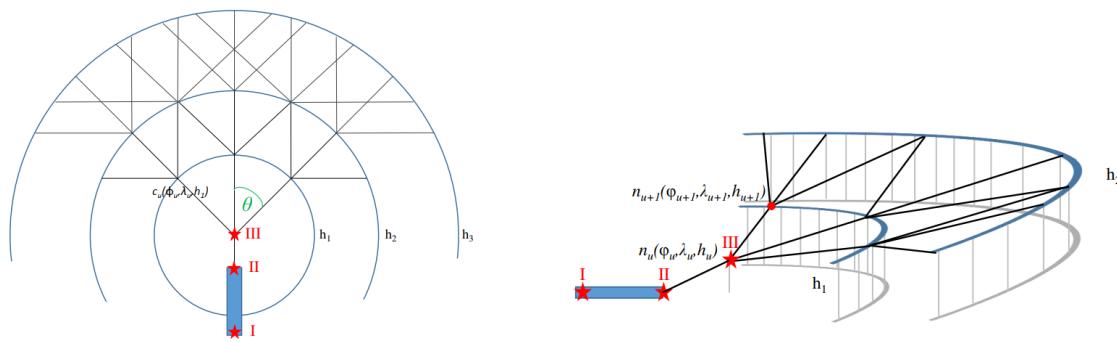


Abbildung 5: Draufsicht (links) und 3D-Ansicht (rechts) eines vereinfachten 3D-Pfadsuchgitters für den Abflug mit $\theta = 45^\circ$ und drei verschiedenen Optimierungshöhen $A = \{h_1, h_2, h_3\}$. Das Gitter erweitert sich an der verlängerten Startbahnmittellinie (blau) des Knotens III, der auch der aktuelle Knoten n_u ist, welcher unter anderem zum möglichen Folgeknoten n_{u+1} führt [9].

Während der Pfadsuche mittels A*-Algorithmus stehen üblicherweise zeitabhängige Parameter nicht zur Verfügung. Jedoch werden zur Ausgestaltung des 3D-Pfadsuchgitters die individuellen Flugeigenschaften des genutzten LFZ-Musters benötigt, welche wiederum von der Zeit sowie der aktuellen Masse (Beladung und sich ändernder Kraftstoffvorrat), über die Zeit und Treibwerkskonfiguration abhängen. Aus diesem Grund wurden tabellierte Flugleistungsdaten im Voraus berechnet. So kann die Flugleistung während der Pfadsuche deutlich präziser berechnet werden. Diese Tabellen bilden ein für diese Konfiguration per OpenAP [10] berechnetes Steigprofil an beliebig gesetzten Stützpunkten ab, zum Beispiel je 100 m Flughöhe, und umfassen die charakteristischen Werte Geschwindigkeit, Schub, Brennstoffdurchfluss, Steigungswinkel und -rate (vgl. Abbildung 6).

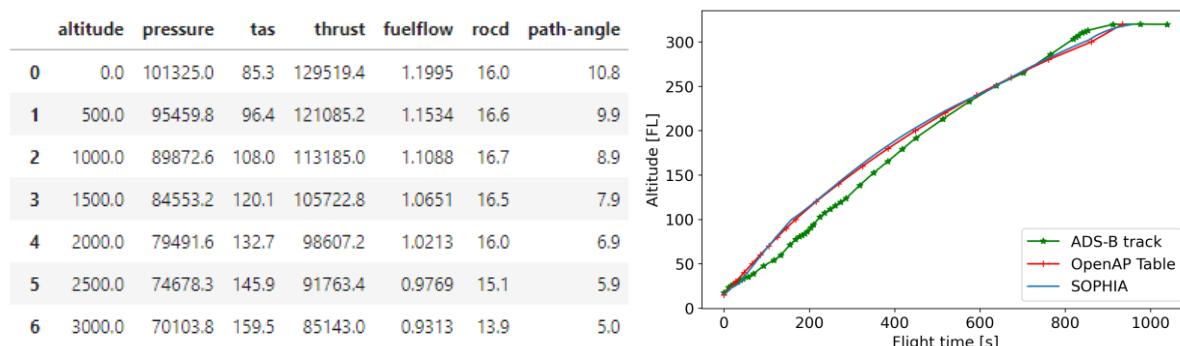


Abbildung 6: Tabellierte Flugleistung (Airbus A320) und Vergleich zwischen Modell OpenAP, SOPHIA sowie einem öffentlichen ADS-B basierten Flugverlauf dieses LFZ-Modells (Details siehe [9]).

Ausgehend von einem zu überfliegenden Fixpunkt in einer Höhe von $h_0=100$ m auf verlängerter Bahnachse (Punkt III, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) beginnt das Optimierungsgitter, wobei mit jeweils konstantem *Track* oder einem *Turn* (θ) weitere Gitterpunkte in konischer Form zur nächsten Flughöhe h_u erstellt werden. Die Anzahl zu untersuchenden Flughöhen wird im Set der Optimierungshöhen $A = \{h_1, h_2, h_3, \dots\}$ definiert. Die jeweils laterale Entfernung ergibt sich unter Anwendung der tabellierten Flugleistungsdaten (look-up-table). Jede Kante zwischen zwei Gitterpunkten wird mit einem Zeitaufwand sowie einem Brennstoffverbrauch belegt, welche auch den Wind gemäß Wettervorhersage für die jeweiligen Position und Höhe berücksichtigen. Im Verlauf der Pfadsuche wird sich so im Steigflug einer Zielhöhe sowie einem definierten Ziel-Wegpunkt, bspw. einem Übergabepunkt ins Enroute-Streckennetz, genähert. Sind

beide Kriterien erreicht, ist die Suche abgeschlossen. Die Generierung des Gitters anhand der spezifischen Flugleistung ermöglicht dabei ein individuelles, optimales COO-Steigflugprofil. Dies unterscheidet sich deutlich von Gittern, welche generalisiert für alle LFZ und Massen existieren, im Vertikalprofil jedoch kurze Horizontalflugphasen bis zur Erreichung des jeweils nächsten Gitterpunktes erzwingen würden. Der Aufwand in der Berechnung des Gitters korreliert mit der Wahl möglicher Kurvensegmente ausgehend von jedem Gitterpunkt sowie der Anzahl von Optimierungshöhen A. Ein Optimierungslauf mit $|A|=11$ Höhenschichten bis Flugfläche FL=140 sowie $\theta=30^\circ$ Turns benötigt auf aktuellen Arbeitsplatzrechnern ca. 3 min Rechenzeit je Abflug. Abbildung 7 zeigt das Optimierungsgitter für den Abflug vom Flughafen München (EDDM). Die farbliche Hervorhebung differenziert die Kostenhöhe vom Gitterpunkt zum definierten Ziel. Abgeschnittene Pfade wurden durch die Pfadsuche als nicht zielführend im Sinne der Optimierung ausgeschlossen.

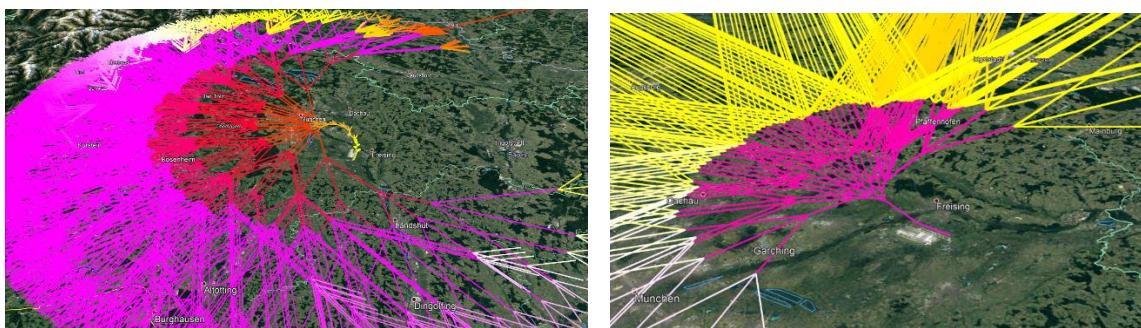


Abbildung 7: Pfadsuche, Abflug vom Flughafen EDDM, Startbahn 26R.

Optimierungsgitter durch Funnels

Die mithilfe des 3D-Pfadsuchgitters optimierten Trajektorien dienen vorrangig der Ausgestaltung der Funnels. Für die Flugdurchführung am Betriebstag erfolgt eine erneute Optimierung des Fluges, wobei dieser innerhalb eines ihm zugewiesenen Funnels verbleiben muss (Zuordnung bspw. durch geringste Distanz des Funnel-Endpunktes zum definierten Zielpunkt/Zielflughafen oder mittels gezielter Vorgaben der Flugsicherung). Hierzu wurde ein weiteres Pfadsuchgitter in TOMATO entwickelt, welches die Realisierung eines optimalen Flugweges erlaubt, allerdings innerhalb des Funnels verbleiben muss (*Funnel Grid*). Der Funnel ergibt sich aus der Clusterung von Flügen im Sinne von Verkehrsströmen (s. HAP4) und bildet so ein beschreibbares geometrisches Konstrukt. Die in Abbildung 1 gezeigten Funnels lassen sich als Folge von mit Gitterpunkten durchsetzten Flächen mit variierender Größe vereinfachen, ohne die Gefahr des Verlassens des ursprünglichen Trichters zu verursachen (*Gates*). Die Wahl fiel hierbei auf die Form eines Rechtecks, da nur so leichten als auch schweren LFZ (hohe und niedrige Steigleistung) ermöglicht werden kann, die gesamte Breite des Funnels ausnutzen zu können (vgl. Abbildung 8).

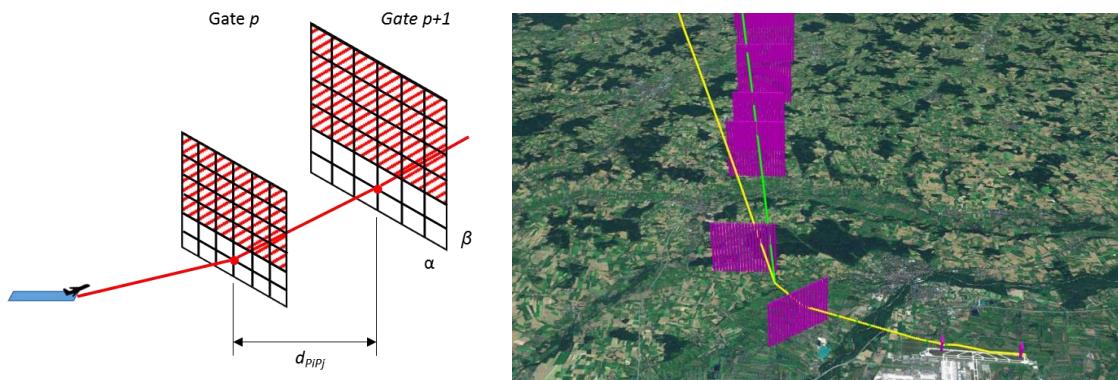


Abbildung 8: Funnel Grids aus einer Abfolge von mit Gitterpunkten beinhalteten Gates schematisch und am Beispiel von Flügen vom Flughafen EDDM, Startbahn 26R. α und β beschreiben als Produkt die Anzahl der Punkte je Gate. Der grüne Abflug rechts ist auf den Funnel limitiert, der gelbe wurde frei ohne den Funnel optimiert.

Allgemein sind alle Punkte zwischen zwei Gates p und $p+1$ kombinierbar, womit der Verlauf einer Pfadsuche entlang einzelner, konsekutiver Gitter abbildbar ist. Ein Gate darf dabei nicht übersprungen werden. Verhindert die verfügbare Flugleistung eine dieser Verbindungen, z.B. unzureichende Steigleistung eines schwer beladenen LFZ, werden diese bereits vor der Pfadsuche eliminiert (vgl. roter Teil eines Gates in Abbildung 8 links). Die Kantengewichte zwischen den Gitterpunkten umfassen wiederum Zeit- und Brennstoffkosten für die Pfadsuche und werden nach gleicher Methode wie unter dem Optimierungsgitter für frei planbare Abflüge (s.o.) generiert.

Konfliktlösungen

Gemäß den vorhergehenden Ausführungen werden Abflüge sukzessive einzeln optimiert, wobei zur Gewährleistung eines sicheren Verkehrs diese entweder räumlich über zugewiesene Funnel oder zeitlich separiert werden. Eine angeschlossene Methode zur 4-dimensionalen Konfliktdetektion (AP 2.4) sowie Vorschlag eines 2-dimensionalen Ausweichmanövers bzw. allein über die Höhenstaffelung garantieren den sicheren Betrieb. Hierfür erfolgte wiederum die Abschätzung der Flugleistung über OpenAP [10]. Die Abbildung 9 zeigt für eine drohende Staffelungsunterschreitung die empfohlenen horizontalen Ausweichmanöver für LFZ „blau“ (AC1). Beide LFZ behalten dabei ihre Steigrate (AC1) bzw. Sinkrate (AC2) bei.

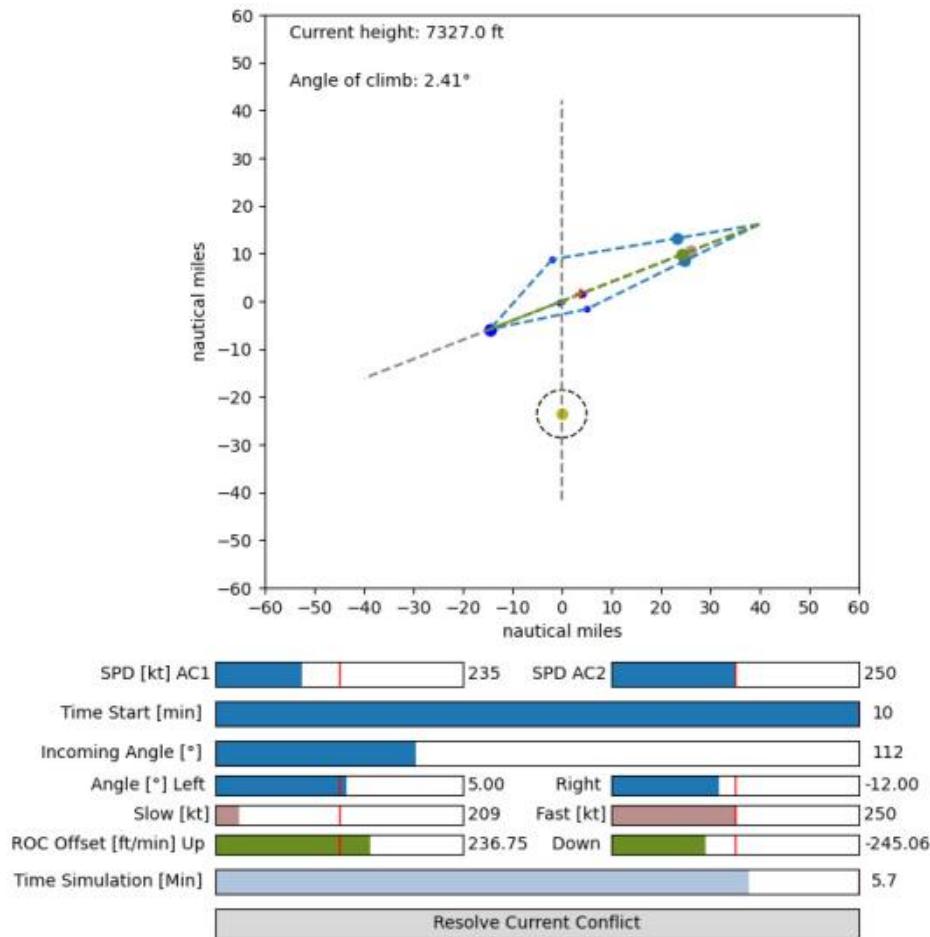


Abbildung 9: Oberfläche des 2D-Konfliktlösungsmoduls im Bereich von 120 NM * 120 NM mit möglicher Staffelungsunterschreitung zwischen zwei LFZ (blaues LFZ von West nach Ost, grünes LFZ von Süd nach Nord). Das rote Kreuz markiert den Punkt der geringsten Separation (CPA) und blaue Linien zeigen Konfliktlösungsoptionen. MA Kirschbaum, TU Dresden.

Für denkbare Situationen von Staffelungsunterschreitungen zwischen zwei LFZ wurden im Voraus Lösungsoptionen berechnet, damit diese für denkbare Schnellzeitsimulationen in kurzer Zeit zugänglich sind. Diese Ausweichoptionen mit Manöver Links-Turn inkl. notwendigen Winkels wird für drei Steigraten (ROC) des AC1 und der jeweils dazu relativen Steigrate des AC2 sowie der Konfliktgeometrie (Schnittwinkel beider Kurse gemäß Abbildung 9) exemplarisch in Abbildung 10 gezeigt. Die Güte dieser Links-Turn oder anderer Manöver (Rechts-Turn, Änderung der Raten) bewertet der Algorithmus über die Ermittlung des jeweiligen zusätzlichen Brennstoffbedarfs.

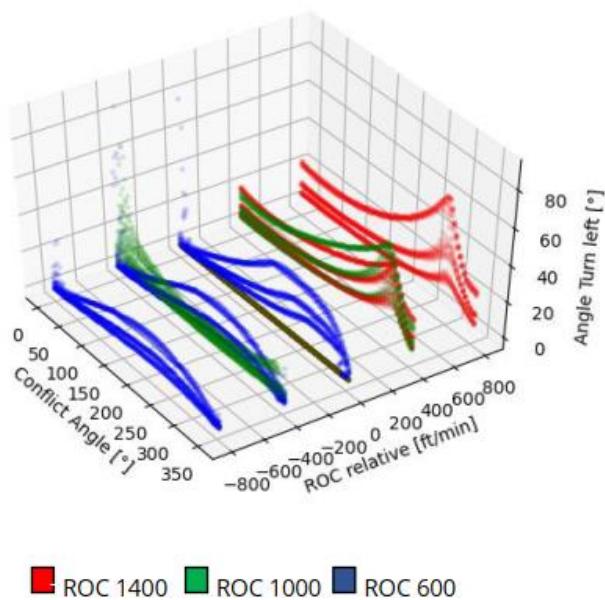


Abbildung 10: Ausweichwinkel nach links je Konfliktgeometrie und relativer Steigrate für zwei LFZ im Steigflug (3D), vgl. Situation in Abbildung 9. Die Stufung der Kurvenverläufe entspricht den drei Vorlaufzeiten der Konfliktlösung von T=2; 5; und 10 min. MA Kirschbaum, TU Dresden.

7.3 HAP3 – Risiko- und Lärm bewertung

Wie in Kapitel 4 bereits dargelegt, wurde die Kollisionsrisikomodellierung des iSBM nicht mehr als notwendig zur Zielerreichung erachtet. Stattdessen wurden die Funnels derart ausgelegt, dass eine räumliche Überschneidung ausgeschlossen werden kann. Aufgrund der daraus resultierenden Risikoreduktion wurde die Risikobewertung nicht weiterverfolgt und stattdessen der Fokus auf die Weiterentwicklung der Trajektorienoptimierung gelegt. Diese Änderung wurde anhand der Zwischenberichte bereits kommuniziert.

Dementsprechend fokussiert sich dieses HAP auf die Lärm berechnung und -bewertung. Fluglärm ist ein politisch brisantes Thema, insbesondere im Umfeld hoch ausgelasteter Verkehrsflughäfen. Es existieren umfangreiche regulatorische Vorgaben zur Gestaltung von An- und Abflugverfahren, in Deutschland kumuliert im Fluglärmgesetz [11]. Alle Standards basieren auf Schalldruckpegel, häufig sog. Dauerschallpegeln, welche die Lärmmissionen auf unterschiedliche Weise über längere Zeiträume mitteln. Dies dient einerseits dem möglichst gleichmäßigen Verteilen der für den Betrieb der Flughäfen leider unvermeidlichen Lärmmissionen, während andererseits besonders lärmsensitive Bereiche wie Schulen oder Krankenhäuser zusätzlichen Schutz durch striktere Grenzwerte erhalten sollen. Hierbei handelt es sich um ein über Jahrzehnte ausgehandeltes, politisch als auch lärmphysiologisch unzureichendes Konstrukt, welches für die Betroffenen wesentliche Lärmgrenzen sicherstellt. Für die Bewertung von Einzeltrajektorien zum Zwecke der Optimierung ist es jedoch wenig geeignet.

Hierbei bietet Doc. 29 der European Civil Aviation Conference (ECAC) [12], [13] mit der Schalldruckgröße *Sound Exposure Level* L_{SEL} ein Maß, welches die Betrachtung einzelner Trajektorien an einem geografischen Ort ermöglicht. Aus diesem Grund wurde für ReMAP ein Verfahren entwickelt, welches den L_{SEL} gemäß ECAC Doc. 29 sowohl während der Suche des optimalen Flugpfades mit dem A* als auch anschließend in der Bewertung durch TOMATO berücksichtigt. Da der L_{SEL} in dB zunächst keine Vergleichbarkeit mit den anderen Zielen der multikritisierten Optimierungsfunktion, wie Treibstoffverbrauch, Zeitkosten sowie

Schadstoffemissionen besitzt, wurde dieser mit einer Kostenrate in € je betroffenem Einwohner in Lärmkosten überführt. Diese Kosten fließen zwar zunächst in die Zielfunktion der Optimierung der Trajektorien ein, orientieren sich zunächst noch nicht an den tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten, da diese schwer zu quantifizieren sind. Die im Rahmen von ReMAP entwickelte Methodik lässt jedoch eine rasche Anpassung der Kostensätze zu, sobald eine bessere Datenlage gegeben ist.

Die Berechnung des L_{SEL} nach ECAC Doc. 29 erfolgt wahlweise anhand von Flugverfahren oder mittels von Radar-Anlagen erfassten Flugspuren [12]. Letzteres Verfahren wurde in ReMAP adaptiert und in TOMATO integriert [14]. Hierbei wird zunächst der Flugpfad in geradlinige Segmente unterteilt, um dann für jedes Segment die Lärmimmissionen auf Grundlage der Schrägentfernung zu einem sogenannten Receiver am Boden zu bestimmen, siehe Abbildung 11. Da der Fluglärm wesentlich vom aktuellen Schub des Luftfahrzeugs abhängig ist, muss dieser berücksichtigt werden. Die EUROCONTROL Aircraft Noise and Performance (ANP) Datenbank [15] stellt hierfür Noise-Power-Distance (NPD) Tabellen bereit, welche die Korrelation zwischen Schub und Schrägentfernung je Triebwerkmodell anhand einzelner Stützstellen abbilden. ECAC Doc. 29 Volume II [13] beinhaltet unter anderem Berechnungsvorschriften, mit denen die NPD-Werte sowohl über die Schrägentfernung als auch über den Schub inter- bzw. extrapoliert werden können. Da der Schub bei der Planung neuer An- und Abflugverfahren bzw. bei der Auswertung von Flugspuren üblicherweise unbekannt ist, werden Standard-Profile zur Abschätzung des Schubs bereitgestellt. Diese wurden jedoch im Rahmen des Projektes ReMAP nicht verwendet, da der Schub mit TOMATO und SOPHIA simulativ ermittelt werden kann.

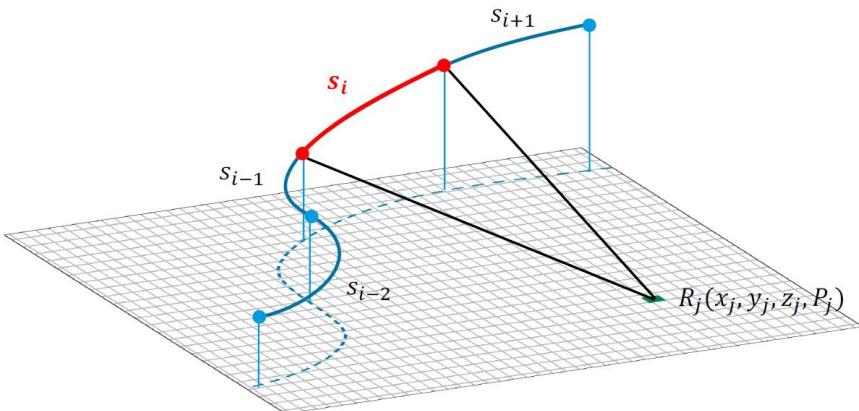


Abbildung 11: Berechnung eines Einzellärmpegels für ein Trajektorien-Segment auf der Grundlage von ECAC Doc. 29 zur Integration in die Trajektorienoptimierung [14]

Eine zentrale Herausforderung hierbei war, dass der Fluglärm bereits in der Pfadsuche des A* berücksichtigt werden soll, dort die Flugleistungsparameter von SOPHIA jedoch noch nicht zur Verfügung stehen. Dies beinhaltet neben dem Schub auch die aktuelle Flughöhe zur Bestimmung der Schrägentfernung zum Receiver, wie in Abbildung 11 dargestellt. Wie bereits in HAP2 skizziert, wurde dies durch das entwickelte 3D-Pfadsuchgitter (vgl. Abbildung 5) gelöst, welches mithilfe der tabellierten Flugleistung (vgl. Abbildung 6) Schub und Flughöhe hinreichend präzise approximieren kann. In der nachfolgenden hochauflösenden Vertikaloptimierung mit SOPHIA werden die Approximationen sodann zur abschließenden Bewertung durch präzise Berechnung ersetzt.

Für die Berechnung des Fluglärms werden weiterhin Receiver benötigt, welche die Lärmimmission am Boden modellieren. Hierfür wurde ein homogenes geodätisches Gitter erzeugt, das sog.

Receiver Grid in Abbildung 12. Die Geländehöhe wurde dabei vom frei verfügbaren Geländemodell GTOP30³ vom United States Geological Survey (USGS) mit einer Auflösung von 30 Bogensekunden bereitgestellt. Da Fluglärm insbesondere dann relevant ist, wenn durch ihn Anwohner gestört werden, sollen bevölkerungsreiche Gebiete folglich mit gleichermaßen höheren Lärmkosten belegt werden. Aus diesem Grund wurden den Receivern die Anzahl der im Gebiet des Receivers befindlichen Anwohnern zugeordnet, wobei die frei verfügbare Datenbank WorldPop⁴ die Daten in derselben Auflösung wie GTOP 30 anbietet.

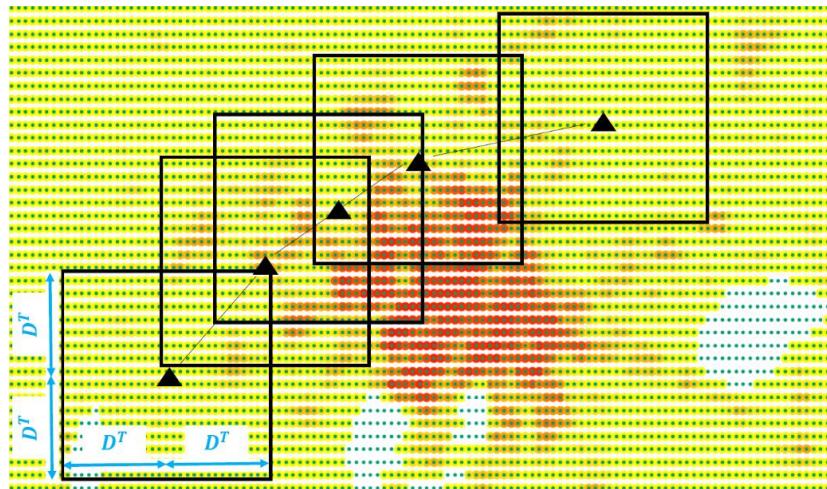


Abbildung 12: Receiver-Grid zur Berechnung der Lärmabsbreitung anhand der Trajektorien-Segmente mit der Bevölkerungsdichte des Großraums München im Hintergrund (hohe Bevölkerungsdichte in rot) [14].

Mit der beschriebenen Methodik wurden L_{SEL} für jeden Receiver bestimmt, welche sodann in Kosten überführt wurden. Dies erfolgte mehrfach pro Iteration in TOMATO. Zunächst wurde innerhalb der Pfadsuche des A* für jede Kante ein Kantengewicht (Kosten) berechnet, welches die voraussichtlichen Kosten (Lärm, Umweg durch Wind, Treibstoff und Zeit) beinhaltet, sollte dieser Weg zum Erreichen des Ziels eingeschlagen werden. Damit konnte ein kürzester Pfad unter Berücksichtigung des Lärms gefunden werden. Anschließend wurde entlang dieses Pfades ein hochauflösendes, optimiertes Vertikalprofil mit SOPHIA berechnet. Ausgehend von diesem Profil wurden im Assessment sodann die tatsächlichen Kosten des Fluges bestimmt, welcher erneut eine Bewertung des Lärms anhand des präzisen Profils enthält. Da die Berechnung des L_{SEL} ein sehr rechenzeitintensiver Vorgang ist, wurde zur Beschleunigung eine optimale Größe des Grids sowohl für die Pfadsuche als auch für das Assessment des hochauflösenden Profils bestimmt.

Um die berechneten L_{SEL} je Receiver in Kosten zu überführen, musste ein von der Bevölkerungsanzahl des Receivers abhängige Kostenrate bestimmt werden. Da es sich um Fluglärm um ein höchst subjektives Thema handelt und zudem Grenzwerte für L_{SEL} nicht zur Verfügung stehen, wurde die Metastudie zum sog. Community Tolerance Level (CTL) des „2019 Environmental Report“ der ICAO [6] adaptiert. Hierfür wurde das folgende Bewertungsschema angenommen: Durchschnittlich reagieren Anwohner ab 75 dB negativ auf Fluglärm [6], daher wurden alle bestimmten $L_{SEL} \leq 75$ dB der Kategorie „heavy“ zugeordnet. Da Menschen jede 10 dB als doppelt so lauwahrnehmen, wurde weiterhin $55 \text{ dB} \leq L_{SEL} < 75 \text{ dB}$ als Kategorie für „moderate“ Lärmbelastung definiert. Darunter wird Fluglärm von der Bewertung nicht betrachtet, da der

³ Siehe <https://earthexplorer.usgs.gov>

⁴ Siehe <https://www.worldpop.org>

Umgebungslärm in der Regel höher ist und somit eine Überbewertung sehr niedriger Fluglärmpegel vermieden wurde. Den beiden Kategorien wurden Kostenraten zugeordnet. Diese wurden sodann mit der Anzahl der Anwohner multipliziert und über alle Receiver aufaddiert, um die Summe der Lärmkosten zu bestimmen. Dieser Ansatz ermöglichte es einerseits, besonders starke Lärmbelastung stärker zu „bestrafen“, während andererseits auch moderate Lärmbelastung berücksichtigt wurde. Sofern detailliertere Informationen bezüglich geeigneter Grenzwerte des L_{SEL} bzw. zu den gesellschaftlichen Lärmkosten eines einzelnen Flugereignisses verfügbar sind, können diese in die von ReMAP erarbeiteten Bewertungsfunktionen integriert werden. Die zwei hier genannten Stufen sind dabei beliebig erweiterbar. Nachfolgende Abbildung 13 zeigt exemplarisch die resultierenden Lärmkosten in Abhängigkeit der Flughöhe (vertikal) und der Bevölkerungsdichte, wobei höhere Lärmkosten grün bis gelb dargestellt sind.

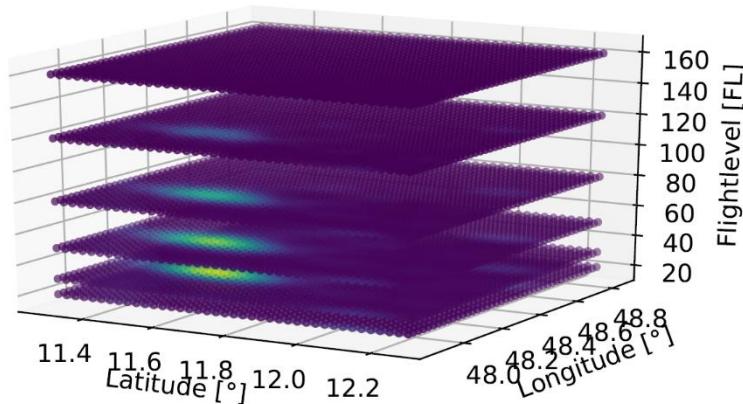


Abbildung 13: Histogramme der Lärmkosten nach Flughöhe und Bevölkerungsdichte, wobei höhere Bevölkerungsdichten und niedrige Flughöhen höhere Lärmkosten (grün) induzieren [14].

Auf Grund der fehlenden Datengrundlage bezüglich gesellschaftlicher Lärmkosten von Einzelflugereignissen wurden die Kostenraten für die beiden Kategorien heavy und moderate mit einer Sensitivitätsanalyse bestimmt. Hierfür wurde ein reduzierter Flugplan für Abflüge am Verkehrsflughafen EDDM erzeugt, welcher aus acht in unterschiedliche Himmelsrichtungen abfliegenden Flüge besteht. Hiermit konnte in der Sensitivitätsanalyse einerseits bestimmt werden, ab wann der dicht besiedelte Raum der Münchner Innenstadt südlich des Flughafens umflogen wird (minimaler gewünschter Effekt) bzw. ab wann sämtliche Siedlungsgebiete im Flughafennahrbereich vermieden werden. Neben den Lärmkosten finden hierbei die Kosten des Windes (längere Flugstrecke zur ruhenden Luft bei Gegenwind), die Treibstoffkosten, zeitabhängige Kosten (v.a. Personal und Wartung) sowie Emissionskosten jenseits des Lärms Betrachtung. Diese Kosten werden in der Sensitivitätsanalyse jederzeit und unverändert betrachtet. Als Referenz hierbei gilt die „Free optimization“ mit beiden Lärmkostenraten auf 0 €, jedoch unter Berücksichtigung aller anderen Kostenfunktionen. Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Verlagerung der optimalen Trajektorien, welche sich mit steigenden Lärmkostenraten von den Bereichen mit hohen Bevölkerungsdichten (in rot) entfernen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Verlagerung der Trajektorien zusätzlichen Treibstoffverbrauch induziert, welcher jedoch anhand der Lärmkostenraten ausbalanciert werden kann. Weitere Ergebnisse der Untersuchung finden sich in der zugehörigen Projektpublikation [14].

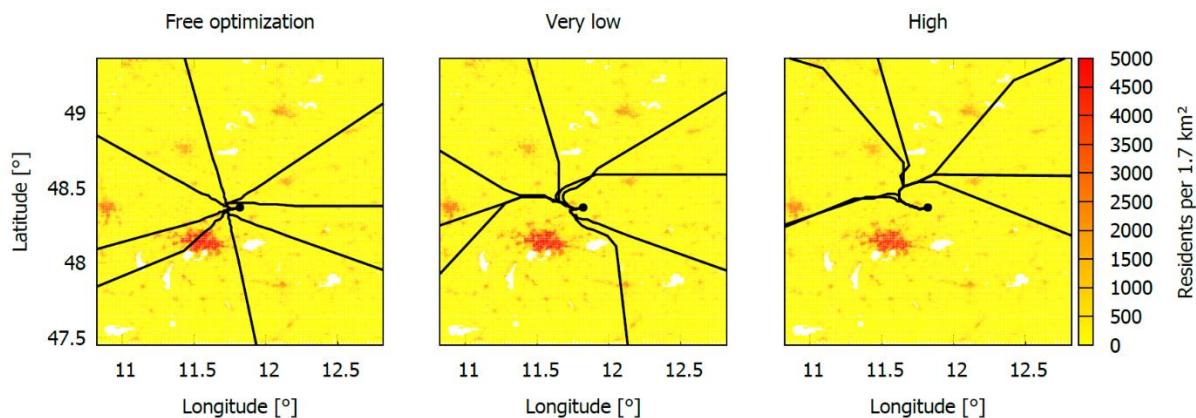


Abbildung 14: Resultierende Flugrouten je Kostenszenario. Ohne Berücksichtigung der Lärmkosten wählen die Beispiel-Trajektorien die windoptimalen Flugrouten (links), während ein geringer Lärmkostensatz bereits die Innenstadt von München erfolgreich umfliegt (Mitte). Der hohe Lärmkostensatz zwingt alle Flüge auf Routen nach Norden (rechts) [14].

Mit der dargelegten Entwicklung der Lärmkostenraten konnte erfolgreich demonstriert werden, dass Fluglärm bei der Optimierung von Trajektorien unter Berücksichtigung der Bevölkerung abgebildet werden kann. Obwohl die Methoden exemplarisch für EDDM durchgeführt wurden, ist eine Übertragung der Erkenntnisse auf beliebige Flughäfen in Europa mit dem aktuellen Stand jederzeit möglich.

7.4 HAP4 - Implementierung dynamischer Flugverfahren

Das Ziel dieses HAP4 war die taktisch konfliktbefreite und iterative Modellierung der An- und Abflugkorridore unter Nutzung der verknüpften Risikomodellierung und Trajektorienoptimierung. Die in der Vorhabensbeschreibung angedachte prototypische Implementierung wurde dabei umgesetzt, wobei die Risikomodellierung und damit insb. AP 4.3 aus vorgenannten Gründen zurückgestellt wurde. Die Prozedur der Ausgestaltung von Funnels ist nun die folgende:

- I) Verkehr wird gemäß der tatsächlich beobachteten Flugbewegungen (Beispiel Flughafen EDDM) generiert. Diese entstammen ADS-B-Daten des OpenSky Networks. Ein Szenario bezieht vom 01. bis 31. September 2019 insgesamt 3535 Abflüge ein, welche die Qualitätskriterien an Datenqualität erfüllen. Davon entfallen 1165 Abflüge auf die Abflüge von Schwelle 26R.
- II) Die Flüge dieser ADS-B-Daten dienen als Referenzszenario gegenüber den optimierten Flügen und werden gemäß untenstehendem Clustering in *ADS-B Funnel* überführt.
- III) Mit den Flugplaninformationen jener Flüge und einer Bandbreite von Wettervorhersagen entsprechend des genannten Zeitraums September 2019 werden Flüge für TOMATO konfiguriert. Darunter fallen 23 Wetterszenarien, welche durch Windrichtung den Bahnbetrieb mit Start auf 26R begründen. Die tatsächliche Beladung ist unbekannt und wird mit insgesamt 15 Referenzmassen zwischen Leermasse und maximaler Abflugmasse des LFZ als variierender Parameter in die Simulation eingebracht.
- IV) Alle genannten Flüge mit einer Destination in Richtung 260° bis 90° (nach Norden) mit jeweils der gesetzten Abflugmasse und je Wetterszenario werden mit TOMATO und den genannten Gittern optimiert. Die resultierende Kurvenschar wird zur Bildung von Funnels wiederum dem Clustering überführt (*optimized Funnel*).

- V) Jeder Flug wird limitiert auf den jeweils zugeordneten Funnel und entsprechend dessen Grids (*optimized* sowie *ADS-B Funnel*) erneut mit weiteren Wetterszenarien berechnet. Das Potenzial der Optimierung lässt sich so direkt vergleichen.
- VI) Das Clustering beachtet noch keine Vermeidung der Überlappung von Funnel, wodurch Abhängigkeiten zwischen Funnel während des Flugbetriebs bestehen und mitunter unerwünscht sind. Mit der Verengung der Funnel gemäß der aus HAP1 genannten RNP lässt sich diese Abhängigkeit vermindern bzw. auflösen.

Für die Erstellung der Funnels wurde ein Clustering-Algorithmus entwickelt und implementiert, welcher auf dem Verfahren des Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) aufbaut. Um einen definierten Endpunkt der Funnels zu generieren, wurde ein Radius von 100 NM um den Flughafenbezugspunkt angenommen und die Trajektorien darüber hinaus abgeschnitten. Das Clustering für die Funnels erfolgt in den folgenden sechs Schritten, die in Abbildung 15 schematisch dargestellt sind:

1. Das „Inner Clustering“ ordnet die Trajektorien einem gemeinsamen Startbahnende zu;
2. Das „Outer Clustering“ bündelt nahegelegene Flüge auf dem Radius von 100 NM zu gemeinsamen Endpunkten;
3. Das „Preliminary Clustering“ gruppiert alle Trajektorien mit demselben Startbahnende und Endpunkten;
4. Das „Sub-Clustering“ trennt Cluster von Trajektorien, welche zwar dasselbe Startbahnende und denselben Endpunkt haben, aber dazwischen signifikant divergieren;
5. Für jedes dieser Cluster wird eine „Mean Trajectory“, also eine gemittelte Trajektorie als Grundlinie berechnet; und
6. Schließlich werden sog. Gates entlang der gemittelten Trajektorie platziert, um die laterale und vertikale Ausdehnung des Funnel zu definieren.

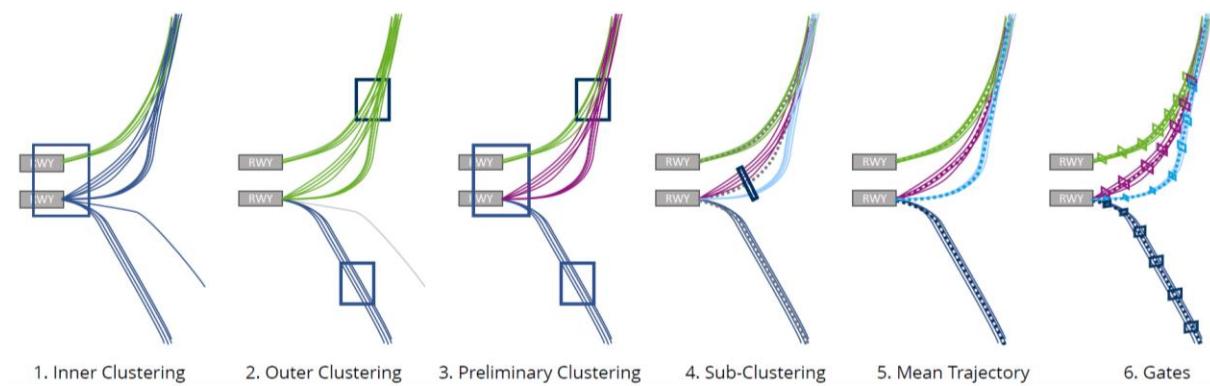


Abbildung 15: Prinzipielle Darstellung des Algorithmus zur Generierung der Traffic Flow Funnels aus Einzeltrajektorien

Im ersten Schritt wird jede Trajektorie einem Inner Cluster mithilfe einer Nearest-Neighbor-Search zwischen dem ersten Datenpunkt und den Koordinaten der am Flughafen EDDM verfügbaren Startbahnende (Departure End of Runway, DER) zugewiesen. Im ersten Schritt von Abbildung 15 werden die Trajektorien entsprechend den Startbahnenden in zwei Gruppen unterteilt, wobei die blaue Gruppe der südlichen Start- und Landebahn (SLB) Flüge enthält, die in Richtung Norden und Süden abfliegen, sowie eine kleine Gruppe von Ausreißern zwischen den beiden Hauptströmen.

Im zweiten Schritt wird jede Trajektorie einem Outer Cluster mit DBSCAN unter Verwendung des letzten Datenpunktes zugewiesen. Die Anzahl der Cluster wird von DBSCAN selbst bestimmt, als Parameter wurden der Nachbarschaftsradius $\epsilon = 6000$ m sowie die Mindestanzahl an Trajektorien

je Cluster auf 50 gesetzt. Mit diesen Parametern wurden sinnvolle äußere Cluster identifiziert, während Ausreißer entfernt wurden. Ausreißer existierten vor allem in den ADS-B-Daten aufgrund von Eingriffen durch die Flugsicherung, wie beispielsweise Radar-Vectoring oder „Direct to“-Anweisungen bei geringer Verkehrslast. Derartige Verfahren sollten kein Bestandteil eines Funnels sein und wurden daher entfernt.

Drittens werden die inneren und äußeren Cluster im sog. Preliminary Clustering kombiniert. Wie in 3. von Abbildung 15 gezeigt, erzeugt das Preliminary Clustering die gewünschten Ergebnisse für die grünen und blauen Trajektorien. Für den violetten Satz werden jedoch mehrere Funnels mit demselben Inner und Outer Cluster zu einem einzigen, sehr weit ausgedehnten Cluster zusammengeführt.

Dementsprechend muss das Sub-Clustering im vierten Schritt prüfen, ob Trajektorien innerhalb eines Clusters signifikant vom Rest abweichen. Dazu werden die Trajektorien durch lineare Interpolation mit 100 Zwischenpunkten ergänzt, um eine ausreichende Punktdichte zu erreichen. Auf die Punkte wird sodann in aufsteigender Reihenfolge vom Startbahnhende an ein rollierendes Fenster angewendet, um Punkte mit mehr als eine lokale Standardabweichung σ Abweichung vom lokalen Mittelwert der Punkte zu identifizieren. Die betroffenen Trajektorien dieser Punkte werden einem neuen Sub-Cluster zugeordnet, wobei das Verfahren iterativ durchgeführt wird. In 4. von Abbildung 15 wird die Gruppe der nach Süden gerichteten Trajektorien aus dem lila Cluster in einem weiteren, hellblauen Cluster aufgeteilt.

Auf der Grundlage der so bestimmten Cluster wurden als nächstes die Funnels generiert. Schritt 5 berechnet die gemittelten Trajektorien für alle Cluster mit mindestens 10 Trajektorien enthalten. Die gemittelte Trajektorie ergibt sich hierbei aus dem arithmetischen Mittel der Punkte mittels rollierenden Fensters vom Startbahnhende bis zum Endpunkt. Die so erhaltene gemittelte Trajektorie wird mit einer modifizierten Akima-Interpolation geglättet.

Im sechsten und letzten Schritt werden rechteckige Gates in regelmäßigen Abständen lotrecht zur mittleren Trajektorie platziert, um die Funnel aufzuspannen. Die obere und untere Grenze des Gates werden aus der maximalen und minimalen Höhe der zugeordneten Punkte berechnet. Die laterale Ausdehnung wird mit $3 \cdot \sigma$ berechnet. Das Rechteck des Gates wird dann mit einem einheitlichen Gitter gefüllt, um Zwischenpunkte für die Reoptimierung mit dem Funnel Grid (vgl. Abbildung 8) zu ermöglichen.

Nachfolgende Abbildung 16 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der Funnels, welche aus den ADS-B-Daten erzeugt wurden. Die mittleren Trajektorien werden hierbei zusammen mit den Gates in Rot dargestellt, wobei die Rahmenfarbe die Gates eines Funnels identifiziert. Die blauen Punkte stammen aus den ADS-B-Rohdaten und wurden gemäß den zuvor genannten Kriterien als Ausreißer identifiziert.

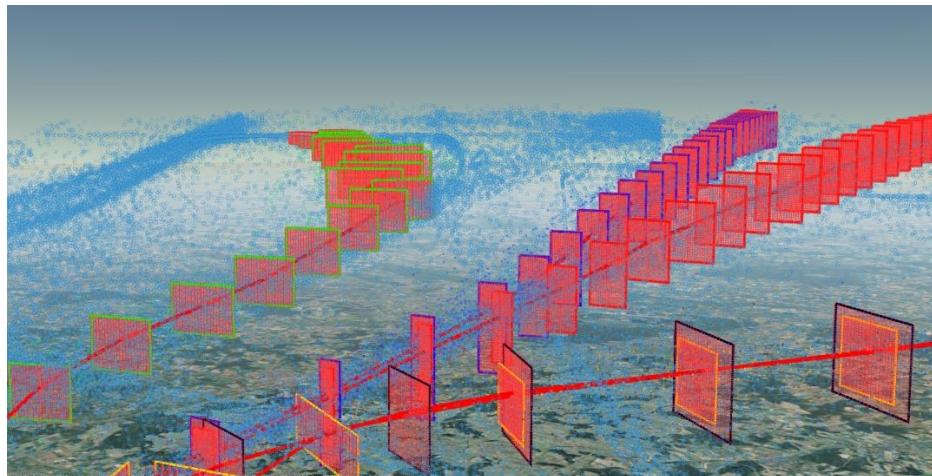


Abbildung 16: Vier von sieben mittels öffentlicher ADS-B-Daten (blau) generierter Traffic Flow Funnels (rot) mit rechteckigen Gates

7.5 HAP5 – Prototypische Validierung und Kapazitätsbewertung

Die zuvor beschriebenen Schritte zur Trajektorienoptimierung und die darauffolgende Funnel-Berechnung werden für Abflüge am Flughafen EDDM angewendet. Für eine nachvollziehbare Bewertung und um Störungen durch den Verkehr im Parallelbetrieb zu vermeiden, wurde ein Verkehrsszenario für eine Betriebsrichtung einer SLB erstellt. Das Szenario deckt Abflüge auf Startbahn 26R, somit zu Flugzielen auf der Nordseite des Flughafens ab. Funnel werden hierbei zunächst aus ADS-B-Daten erstellt und sodann mit TOMATO innerhalb dieser ADS-B-Funnels reoptimiert. Anschließend wird derselbe Flugplan frei, d.h. ohne Funnels optimiert, wobei hier Unsicherheiten in Form von variablen ATOM (60% bis 90%) und 23 verschiedenen Wettervorhersagen mittels GRIB2 betrachtet werden. Aus diesen Trajektorien entstehen sodann optimierte Funnels. Die optimierten Funnels wurden abschließend validiert, indem unter erneut veränderten Wetterbedingungen innerhalb der optimalen Funnels reoptimiert wurde.

Für die ADS-B-Funnels konnten insgesamt 1165 Flüge mit gültigen Daten für Schwelle 26R ermittelt werden. Daraus ergaben sich 7 Funnels zu je 40 Gates, wie auf der linken Seite der nachfolgenden Abbildung 17 dargestellt. Die Ausrichtung der Trichter zeigt, dass die Mehrzahl der Abflüge in Richtung Westen und Norden führt. Abflüge nach Osten sind in einem einzigen Trichter gebündelt, der nach Nord-Nordosten zeigt. Die Untersuchung der Rohdaten zeigt, dass eine kleine Anzahl von Flügen auch direkt nach Osten fliegt, diese jedoch nicht die für einen Funnel erforderliche Mindestanzahl erreichen. Für die optimierten Funnels wurden in einer Monte-Carlo-Simulation 9098 Abflüge aus der Kombination von ATOM, Wetter und Destinationen berechnet, was in insgesamt 35 Funnels mündete. Die deutlich höhere Anzahl von Clustern wird durch die diversifizierten Trajektorien mit einer direkteren Wegführung induziert, wie auf der rechten Seite von Abbildung 17 erkennbar ist.

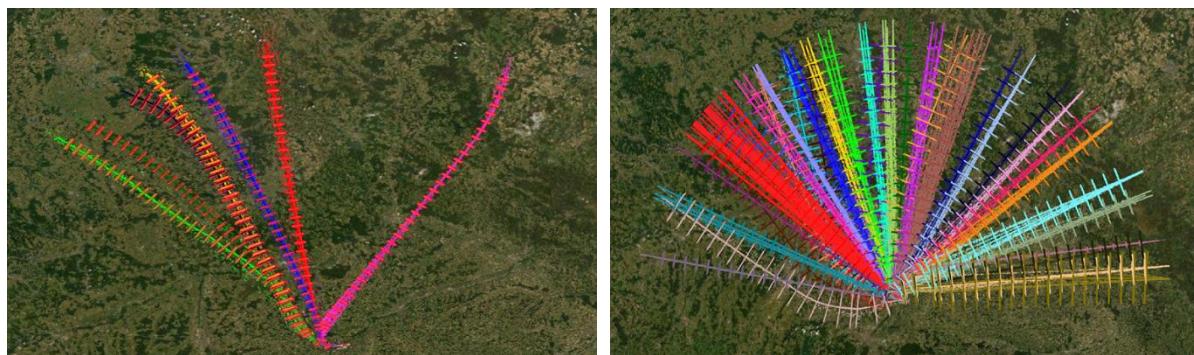


Abbildung 17: Resultierende Traffic Flow Funnels auf Grundlage von öffentlichen ADS-B-Daten als Status Quo (links) und auf Grundlage der optimierten Trajektorien (rechts).

Um die Auswirkungen der optimierten Funnels auf die Flugeffizienz zu bewerten, wurden alle Flüge des Flugplans innerhalb der beiden Funnels erneut mithilfe des Funnel-Grids optimiert. Die große Anzahl optimierter Funnels erlaubt erwartungsgemäß eine größeres Optimierungspotenzial. Für die aus den optimierten Flügen entwickelten Trichter wird eine durchschnittliche Einsparung von 16 kg pro Abflug erreicht. Dies entspricht einem Wert von etwa 0,4% für den gesamten Flug. Die zurückgelegte Entfernung über Grund bis zum Zielort wird ebenfalls um 0,5% reduziert. Die Streuung dieser Werte ist in Abbildung 18 dargestellt. Obwohl diese Einsparungen recht gering erscheinen, wurde nur die erste Hälfte der Steigflugphase bis FL250 bis zum Radius von 100 NM – somit insgesamt nur ein kleiner Teil der gesamten Trajektorie – berücksichtigt. Dennoch konnte im Durchschnitt eine Treibstoffmasse von 956 kg und einer Gesamtstrecke von 108 km pro Flug eingespart werden. Detaillierte Resultate finden sich in der zugehörigen Projektpublikation [9].

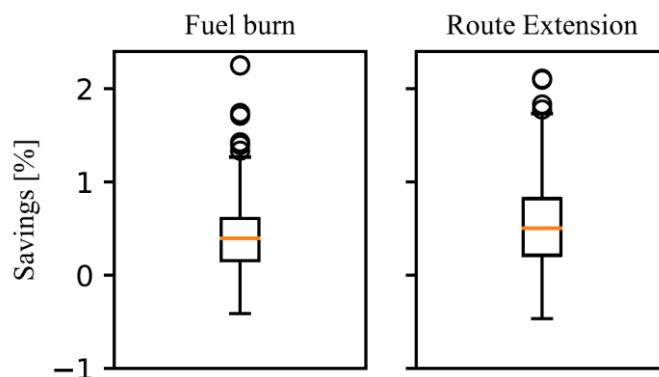


Abbildung 18: Einsparungen bei der Flugeffizienz (Treibstoffmasse links, Verkürzung der Route rechts) über alle Flüge im Szenario durch die optimierten Funnels

Eine zentrale Erkenntnis von ReMAP ist, dass die Anzahl der optimierten Funnels erheblich zunimmt, was für die Flugsicherung eine Herausforderung darstellen könnte. Es gibt Möglichkeiten, die Anzahl der Funnels iterativ zu reduzieren, wenn ein Verlust an Optimierungspotential aus Gründen der Safety erforderlich ist. Prinzipiell ist es mit der Methodik von ReMAP möglich, Abflüge in benachbarte Funnels zu verlegen. Dabei sollte das verlorene Treibstoffeinsparungspotential durch die Reduktion der Funnels berücksichtigt werden. TOMATO kann das entwickelten Funnel Grid nutzen, um Second-Best-Lösungen unter den Funnels zu finden.

8. Nutzen und Verwertbarkeit

In ReMAP wurden erfolgreich Traffic Flow Funnels entwickelt, die sich von den derzeitigen ATC-Verfahren unterscheiden. Innerhalb dieser Funnels können die LFZ ihre individuelle, flugleistungsabhängige Trajektorie in Bezug auf die Treibstoffeffizienz erreichen. Die Funnels wurden mit einem innovativen 3D-Suchgitter generiert, welches die flugzeugtypspezifische Flugleistung abbildet. Daraus wurden mit einem auf DBSCAN basierenden Clustering-Algorithmus die Funnels abgeleitet. Unter der Annahme, dass ein Flug seine optimale Trajektorie innerhalb des Funnels planen kann, wurde das Treibstoffeinsparungspotenzial im Vergleich zu Funnels aus historischen ADS-B-Daten erforscht. Die entwickelte Methodik ist geeignet, Abflugverkehr aus ADS-B-Daten und optimierte Profile gleichzeitig zu bündeln. Der Flughafen München (EDDM) diente als Anwendungsfall, auch wenn die Methoden auf andere Flughäfen einfach übertragen werden können. Das Konzept der Funnels wurde somit grundlegend validiert. Die Größe der Funnels wird hierbei vor allem durch die variablen ATOMs in der Vertikalen und die Destinationen in der Lateralen beeinflusst. Das Wetter spielt bei der Dimensionierung des Funnels ebenfalls eine wesentliche, jedoch im Vergleich nachrangige Rolle. Im Allgemeinen verbreitert sich jeder Funnel kurz nach dem Start, bleibt dann aber bis zum Ende bei einem Radius von 100 NM vom Flugplatzbezugspunkt ziemlich ähnlich.

Die Durchführung des ReMAP Forschungsprojektes lässt sich aufgrund seiner vielfältigen bereits umgesetzten und zukünftigen Verwertungsmöglichkeiten als erfolgreich einstufen. Forschungsergebnisse wurden bereits in mehreren hochrangigen Konferenzbeiträgen (u. a. Best Paper Award) sowie in einem Journal publiziert. Hierdurch konnte ein großes Fachpublikum angesprochen werden, wodurch der Wissenstransfer zu anderen Forschungseinrichtungen sowie in die Industrie ermöglicht wird. Durch den erfolgten wissenschaftlichen Diskurs kann so die TU Dresden ihren Status als Exzellenz-Universität national wie international festigen und die Vorreiterrolle Deutschlands in der Erforschung eines umweltfreundlichen Luftverkehrssystems unter Berücksichtigung operationeller Randbedingungen stärken. Durch die Grundlagenforschung in ReMAP war es zudem möglich, Methoden, Ergebnisse und Diskussionspunkte in die erfolgreiche Bearbeitung weiterführender und vertiefender Forschungsarbeiten zu übertragen. So ergibt sich aus offenen Forschungsfragen direkt aus ReMAP ein Anschlussvorhaben zur Thematik der tatsächlichen Lärmausbreitung unter Windeinfluss, welches demnächst als Grundlagenforschung bei der DFG beantragt wird. Dies baut auf die bislang erzielten Ergebnisse und Vorarbeiten der Softwareimplementierung auf. Außerdem werden Erkenntnisse in der Optimierung und Pfadsuche auf künftige Probleme übertragen werden. Über ein beantragtes Graduiertenkolleg im Fokus der Advanced Air Mobility und damit vergleichbaren Problemen in der Koordination von Drohnen bzw. Flugtaxis wird voraussichtlich gegen Ende des Jahres 2023 entschieden. Das weiterentwickelte TOMATO wird hier in mehrere Teilprojekte einfließen. Zudem lag in der Bearbeitungszeit von ReMAP die Bewilligung des DFG-Projektes [445666898](#) "Sicherheitsoptimierte Anflugsteuerung auf große Flughäfen" im Jahr 2021. Die bislang erreichten Kenntnisse insb. zu Verfahrensräumen und Störfaktoren im Flughafennahbereich flossen auch bereits in die Bearbeitung dieses Vorhabens ein.

Während des Projektfortschritts liefen parallel drei Dissertations- und ein Habilitationsvorhaben. Hierin promovieren Herr Hannes Braßel im Bereich Flugbetriebssicherheit (Safety) mit Fokus auf LiDAR, Herr Martin Lindner schloss eine Arbeit im Bereich der multikriteriell optimierten Flottenallokation im Jahr 2023 ab, Herr Thomas Zeh promoviert auf dem Gebiet der stochastischen, multivariablen Trajektorienoptimierung. Alle laufenden Arbeiten sollen bis Ende 2023

abgeschlossen sein. Weiter habilitierte sich Frau Dr. habil. Judith Rosenow im Bereich der Trajektorienoptimierung für das Gebiet Luftverkehr.

Folgende Forschungsschwerpunkte zeigen aus operationeller Sicht hohes Potential für weitere Forschungsanträge:

- Nach Fokussierung der Einzeltrajektorie muss nun intensiver der Verkehrsfluss mitsamt operationeller Flugsicherung unter Gewährleistung des globalen Optimums untersucht werden (Kosten, Sicherheit, Ökologie). Teile davon werden bereits im auf ReMAP basierenden DFG-Antrag aufgegriffen.
- Integration des rege in der Wissenschaft diskutierten kontrollierten Formationsfluges von Flugzeugen [16]–[19] und insb. Drohnen [20]–[23] als Möglichkeit einer halbautonomen Separation innerhalb von Funnel. Dies unterstützt die Flugsicherung und integriert bereits Ansätze der Wirbelschleppenthematik, benötigt jedoch ebenfalls Forschung in präziser Flugleistungsmodellierung und -regelung.
- Berücksichtigung von Drohnen-Funnels in der An- und Abflugsteuerung an hoch frequentierten Flughäfen im Rahmen des künftigen U-Space-Konzeptes [24].
- Harmonisierung der Luftraumstruktur zur flexibleren Wahl der Übergabepunkte zwischen En-Route und An- bzw. Abflug.
- Überlegung für ein dynamisches Funnel-Konzept und Umschaltung der Funnel-Nutzung bei Betriebsrichtungswechsel.

Die bislang erzielten Ergebnisse dienen abschließend auch der projektnahen Ausbildung des MINT-Nachwuchses, da Inhalte in Lehrveranstaltungen integriert und diskutiert werden („Betrieblich-logistische Strukturen des Luftverkehrs“, „Safety und Airline Management“). Zudem konnten insgesamt vier Studierende mit der Bearbeitung wissenschaftlich anspruchsvoller Themen ihre Studien- und Abschlussarbeiten durch die Betreuung der Projektmitarbeiter durchführen.

9. Fortschritt bei anderen Stellen

Die Bemühungen um einen durch operationell erreichten lärmreduzierten Flugverkehr sowie einen sicheren, effizienten Flugbetrieb insb. an frequentierten Flughäfen sind vielfältig, belegen die wissenschaftliche Notwendigkeit und werden aufgrund der gesellschaftlichen Relevanz weiterhin Gegenstand der Forschung bleiben. Im Bereich des reduzierten Flugverkehrs wird dabei vorwiegend an lärmoptimierten An- und Abflugverfahren mit idealem Zeitpunkt der Konfigurationsänderung des LFZ geforscht:

- Pilot Assistant System [25], [26]: Deren Verwendung trägt zu effizienterem und geräuschärmeren Fliegen bei. Diese Systeme, u. a. entwickelt beim DLR, sind grundlegend kompatibel mit dem ReMAP-Ansatz und profitieren von einem höheren Freiheitsgrad in der Flugdurchführung. Dies wurde für Funnels im Heliokopterflug bereits angewandt [27].
- Berechnung des LFZ-induzierten Lärms und der Ausbreitung durch Wind im städtischen Umfeld [28].
- Unter Nutzung neuester Simulationstechnologie, den kürzlichen Verbesserungen in Methoden des maschinellen Lernens und in Kombination mit hoher Rechenleistung konnten Fortschritte in der computer-gestützten Modellierung von Schall erzielt werden [29], [30].

Im Bereich der Trajektorienoptimierung werden regelmäßig neue Erkenntnisse mit Fragestellungen publiziert, u. a. auch wie und mit welchen Effekten eine Vermeidung von Emissionen möglich ist:

- Fortschritte wurden zudem innerhalb der Problemklassen des Optimal Control Problem bzw. genetischen Algorithmen an anderen Stellen erzielt, welche ebenfalls zur Trajektorienoptimierung im An- und Abflugbereich herangezogen wurden [31]–[35].
- Das in ReMAP verwendete Gitter zur Abflugoptimierung zeigt Ähnlichkeiten zu einem Gitter zur Berücksichtigung von Step-Climbs/-Descents [36]. Zudem wird in einer Publikation [37] ebenfalls ein A*-Algorithmus zum Auffinden eines Pfades zur Umgehung von bevölkerungsreichen Regionen genutzt. Der Ansatz der Lärmberechnung ist stark vereinfacht und nur auf Empfänger direkt unter dem LFZ beschränkt.

Die Kombination beider Problemklassen, die flugleistungsbasierte Optimierung sowie die Minimierung der Umwelteinflüsse, ist jedoch deutlich seltener Forschungsthema [38]–[40]. Die methodischen Ansätze zur Optimierung unterscheiden sich deutlich, fokussieren jedoch oftmals aus Gründen der effizienten Flugkoordinierung das Verfolgen strikter Routen, selten mit Möglichkeiten der Flexibilisierung. Das Forschungsprojekt ReMAP fokussiert damit im weit beforschten Umfeld recht isoliert auf ein innovatives Verkehrsplanungs- und -steuerungskonzept. Dieses benötigt jedoch weitere Forschung für ein stets sichere Flugdurchführung.

10. Veröffentlichungen und Vorträge

Konferenzbeiträge

- Thomas Zeh, Martin Lindner, Judith Rosenow, and Hartmut Fricke, "Optimization of Departure Routes Beyond Aircraft Noise Abatement," presented at the International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2022), Tampa, FL, 2022.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften

[keine]

Veröffentlichung in Fachjournals

- Martin Lindner, Thomas Zeh, Hannes Braßel, Judith Rosenow, and Hartmut Fricke, "Traffic Flow Funnels Based on Aircraft Performance for Optimized Departure Procedures," Future Transportation, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2022.

11. Liste der erstellten Dokumentationen

1. Zwischenbericht ReMAP April 2020
2. Zwischenbericht ReMAP April 2021
3. Zwischenbericht ReMAP April 2022
4. Abschlussbericht ReMAP Februar 2023

12. Literaturverzeichnis

- [1] ICAO Doc 9613, *Performance-based navigation (PBN) manual*, 3. Aufl. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2008.
- [2] T. Pabst, T. Kunze, M. Schultz, und H. Fricke, „Modeling external disturbances for aircraft in flight to build reliable 4D trajectories“, gehalten auf der 3rd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, Jan. 2013.
- [3] M. Kaiser, „Optimierung von Flugtrajektorien strahlgetriebener Verkehrsflugzeuge bei konkurrierenden SESAR Zielfunktionen mittels Entwicklung eines hochpräzisen Flugleistungsmodells“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.
- [4] R. L. Helmreich, „On error management: lessons from aviation“, *BMJ*, Bd. 320, Nr. 7237, S. 781–785, März 2000, doi: 10.1136/bmj.320.7237.781.
- [5] M. Vogel, C. Thiel, und H. Fricke, „A quantitative Safety Assessment Tool based on Aircraft Actual Navigation Performance“, gehalten auf der International Conference on Research in Airport Transportation (ICRAT 2010), Budapest, 2010.
- [6] T. Gjestland, „Aircraft Noise Annoyance“, in *2019 Environmental Report -- Destination Green -- The Next Chapter*, Montréal: International Civil Aviation Organization, 2019, S. 89–92.
- [7] EUROCONTROL, „European PBN Route Spacing Handbook - European PBN Route Spacing Handbook“, Apr. 2020. Zugriffen: 22. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-european-pbn-route-spacing-handbook-3.pdf>
- [8] M. Lindner, J. Rosenow, T. Zeh, und H. Fricke, „In-Flight Aircraft Trajectory Optimization within Corridors Defined by Ensemble Weather Forecasts“, *Aerospace*, Bd. 7, Nr. 10, Art. Nr. 10, Okt. 2020, doi: 10.3390/aerospace7100144.

- [9] M. Lindner, T. Zeh, H. Braßel, J. Rosenow, und H. Fricke, „Traffic Flow Funnels Based on Aircraft Performance for Optimized Departure Procedures“, *Future Transportation*, Bd. 2, Nr. 3, Art. Nr. 3, Sep. 2022, doi: 10.3390/futuretransp2030040.
- [10] J. Sun, J. M. Hoekstra, und J. Ellerbroek, „OpenAP: An Open-Source Aircraft Performance Model for Air Transportation Studies and Simulations“, *Aerospace*, Bd. 7, Nr. 8, Art. Nr. 8, Aug. 2020, doi: 10.3390/aerospace7080104.
- [11] *Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550)*. 1971.
- [12] „Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports -- Volume 1: Applications Guide“, European Civil Aviation Conference, Neuilly-sur-Seine, ECAC.CEAC Doc 29, Dez. 2016.
- [13] „Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports -- Volume 2: Technical Guide“, European Civil Aviation Conference, Neuilly-sur-Seine, ECAC.CEAC Doc 29, Dez. 2016.
- [14] T. Zeh, M. Lindner, J. Rosenow, und H. Fricke, „Optimization of Departure Routes Beyond Aircraft Noise Abatement“, gehalten auf der International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2022), Tampa, FL, 2022.
- [15] EUROCONTROL Experimental Centre, „The Aircraft Noise and Performance (ANP) Database : An international data resource for aircraft noise modellers“, 2021. <https://www.aircraftnoisemodel.org/> (zugegriffen 12. November 2021).
- [16] M. Huo, H. Duan, und X. Ding, „Manned Aircraft and Unmanned Aerial Vehicle Heterogeneous Formation Flight Control via Heterogeneous Pigeon Flock Consistency“, *Un. Sys.*, Bd. 09, Nr. 03, S. 227–236, Juli 2021, doi: 10.1142/S2301385021410053.
- [17] Q. Zhang und H. H. T. Liu, „Robust Nonlinear Close Formation Control of Multiple Fixed-Wing Aircraft“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 44, Nr. 3, S. 572–586, 2021, doi: 10.2514/1.G004592.
- [18] T. E. Kent und A. G. Richards, „Potential of Formation Flight for Commercial Aviation: Three Case Studies“, *Journal of Aircraft*, Bd. 58, Nr. 2, S. 320–333, 2021, doi: 10.2514/1.C035954.
- [19] I. Ransquin, D.-G. Caprace, M. Duponcheel, und P. Chatelain, „Wake Vortex Detection and Tracking for Aircraft Formation Flight“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 44, Nr. 12, S. 2225–2243, 2021, doi: 10.2514/1.G006028.
- [20] H. T. Do u. a., „Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey“, *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, Bd. 8, Nr. 27, S. e3–e3, Juni 2021, doi: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
- [21] H. Chen, X. Wang, L. Shen, und Y. Cong, „Formation flight of fixed-wing UAV swarms: A group-based hierarchical approach“, *Chinese Journal of Aeronautics*, Bd. 34, Nr. 2, S. 504–515, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.03.006.
- [22] V. S. M. Rosa und E. M. Belo, „Virtual Structure Formation Flight Control Based on Nonlinear MPC“, in *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Juni 2021, S. 1383–1390. doi: 10.1109/ICUASS1884.2021.9476810.
- [23] P. Ma, J. Ji, J. Sui, und M. Lei, „Research on Cooperative Formation Flight Control of Multi-UAV with Communication Time Delay“, in *2021 International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS)*, Mai 2021, S. 54–58. doi: 10.1109/CSEPS53726.2021.00017.
- [24] EUROCONTROL, „CORUS U-space Concept of Operations“, Okt. 2019. Zugegriffen: 27. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>
- [25] D. Jäger, C. Zellmann, J. M. Wunderli, M. Scholz, F. Abdelmoula, und M. Gerber, „Validation of an airline pilot assistant system for low-noise approach procedures“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 99, S. 103020, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.103020.
- [26] J. Kurz und J. Blinstrub, „Conceptual Design of a Pilot Assistance System for Customised Noise Abatement Departure Procedures“, gehalten auf der Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress

- 2022, Dresden, Deutschland, Sep. 2022. Zugegriffen: 27. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/188751/>
- [27] B. I. Gursky, W. F. J. Olsman, und N. Peinecke, „Development of a tunnel-in-the-sky display for helicopter noise abatement procedures“, *CEAS Aeronaut J*, Bd. 5, Nr. 2, S. 199–208, Juni 2014, doi: 10.1007/s13272-014-0100-9.
- [28] M. Horck, „Aircraft induced sound propagation in the urban context: A scale model wind study towards urban noise abatement using a self-build wind tunnel“, 2020, Zugegriffen: 27. Februar 2023. Verfügbar unter: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5bb9eff2-8379-4b0c-a9c8-611427456ca4>
- [29] H. Y. Akdeniz, M. Z. Sogut, und O. Turan, „Prediction and simulation of aircraft noise in the international Eskisehir Hasan Polatkan airport (LTBY)“, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Bd. 93, Nr. 1, S. 171–179, Jan. 2020, doi: 10.1108/AEAT-03-2020-0056.
- [30] R. Merino-Martínez u. a., „A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays“, *CEAS Aeronaut J*, Bd. 10, Nr. 1, S. 197–230, März 2019, doi: 10.1007/s13272-019-00383-4.
- [31] S. Salgueiro, J. Thomas, C. Li, und R. J. Hansman, „Operational Noise Abatement through Control of Climb Profile on Departure“, in *AIAA Scitech 2021 Forum*, Jan. 2021. doi: 10.2514/6.2021-0007.
- [32] X. Prats, V. Puig, und J. Quevedo, „Equitable Aircraft Noise-Abatement Departure Procedures“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 34, Nr. 1, S. 192–203, Jan. 2011, doi: 10.2514/1.49530.
- [33] A. W. A. Hammad, D. Rey, A. Bu-Qammaz, H. Grzybowska, und A. Akbarnezhad, „Mathematical optimization in enhancing the sustainability of aircraft trajectory: A review“, *International Journal of Sustainable Transportation*, Bd. 14, Nr. 6, S. 413–436, Juni 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1570403.
- [34] M. Villegas Díaz, V. F. Gómez Comendador, J. García-Heras Carretero, und R. M. Arnaldo Valdés, „Environmental benefits in terms of fuel efficiency and noise when introducing continuous climb operations as part of terminal airspace operation“, *International Journal of Sustainable Transportation*, Bd. 14, Nr. 12, S. 903–913, Okt. 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1651924.
- [35] R. Ghaemi, D. Lax, E. Westervelt, M. Darnell, und N. Visser, „Optimal Variable-Speed Climb for a Fixed-Wing Aircraft“, in *AIAA Aviation 2019 Forum*, Juni 2019. doi: 10.2514/6.2019-3617.
- [36] A. Murrieta-Mendoza, C. Romain, und R. M. Botez, „3D Cruise Trajectory Optimization Inspired by a Shortest Path Algorithm“, *Aerospace*, Bd. 7, Nr. 7, Art. Nr. 7, Juli 2020, doi: 10.3390/aerospace7070099.
- [37] D. Kim und R. P. Liem, „Population-Aware Sequential Flight Path Optimization for Low-Noise and Low-Fuel Consumption Departure Trajectory“, *AIAA Journal*, Bd. 60, Nr. 11, S. 6116–6132, Nov. 2022, doi: 10.2514/1.J061603.
- [38] Y. Tian, L. Wan, K. Han, und B. Ye, „Optimization of terminal airspace operation with environmental considerations“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 63, S. 872–889, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.06.018.
- [39] J. Zhou, S. Cafieri, D. Delahaye, und M. Sbihi, „Optimization-Based Design of Departure and Arrival Routes in Terminal Maneuvering Area“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 40, Nr. 11, S. 2889–2904, Nov. 2017, doi: 10.2514/1.G002728.
- [40] J. Wan, H. Zhang, F. Liu, W. Lv, und Y. Zhao, „Optimization of Aircraft Climb Trajectory considering Environmental Impact under RTA Constraints“, *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2020, S. 2738517, Aug. 2020, doi: 10.1155/2020/2738517.