
Inhaltsverzeichnis

Von der Forschung der Klimawirkung persistenter Kondensstreifen bis zum Probetrieb in der DFS.....	5
Ralph Leemüller, Aline Liedtke, Christian Zwiener, Kristina von Sack & Stefan Keller	
Rolle des Luftverkehrsmanagements bei der Reduktion der Klimawandelwirkung des Luftverkehrs.....	12
Jörg Buxbaum	
EELA – Energy-Efficient Landing Approaches: Entwicklung energieeffizienter Landeanflüge.....	24
T. Albrecht, J. Buxbaum, M. Poppe, S. Flämig*, M. Graefenhan* & W. Schiffmann* (*FernUni Hagen)	
Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandortes für GBAS Datenlink und ILS Gleitweg.....	36
Alexander Diamadis & Winfried Dunkel	
Less Stress, More Privacy: Stress Detection on Anonymized Speech of Air Traffic Controllers.....	43
Janaki Viswanathan*, Alexander Blatt*, Konrad Hagemann & Dietrich Klakow* (* Saarland University)	
Impressum.....	51

Die Autoren sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der DFS. Die Rechte an den Artikeln liegen bei den jeweiligen Autoren.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Übersicht der Artikel in diesem Heft

Ralph Leemüller, Aline Liedtke, Christian Zwiener, Kristina von Sack & Stefan Keller: Von der Forschung der Klimawirkung persistenter Kondensstreifen bis zum Probetrieb in der DFS – Anhand von Forschungsergebnissen zum Klimateffekt von persistenten Kondensstreifen und den daraus entstehenden Zirren werden Fragen bezüglich der operativen Umsetzung zur Vermeidung von eisübersättigten Gebieten aufgezeigt. Dieser Beitrag beschreibt die Herausforderungen einer zügigen Umsetzung, die aufgrund der noch offenen Fragen existieren. Das von der Bundesregierung geförderte Projekt D-KULT ist ein wichtiger Schritt die Problemstellungen zu erfassen und Lösungen zu validieren, sodass die klimapolitischen Ziele der EU unterstützt werden können.

Jörg Buxbaum: Rolle des Luftverkehrsmanagements bei der Reduktion der Klimawandelwirkung des Luftverkehrs – In der Herausforderung, die weltweite Luftfahrt bis 2050 klimaneutral zu gestalten, kommt dem Luftverkehrsmanagement eine begrenzte, aber wichtige Aufgabe zu. Während die langfristige und hochrelevante Aufgabe der Flugsicherung sein wird, über eine passende Flugführung den contrail-induzierten Strahlungsantrieb der Luftfahrt zu beeinflussen, steht parallel dazu in den kommenden Jahren die weitere emissionsbezogene Optimierung von Verfahren und betrieblichen Arbeitsweisen im Vordergrund. Um hier Fortschritte zu erzielen, braucht es mehr flugbetriebliche Daten, passendere Umweltkennzahlen, Lotsen-assistenzsysteme, eine daten-basierte Erfolgskontrolle – und ein transparentes, zwischen den Prozesspartnern abgestimmtes Bild darüber, welche Optimierungspotentiale tatsächlich noch mit einem angemessenen Verhältnis zwischen Nutzen, Aufwand und ggf. potentiellen Einschränkungen für Luftraumnutzer erschließbar sind.

Tim Albrecht, Jörg Buxbaum, Matthias Poppe, Steffen Flämig*, Matthias Graefenhan*, Wolfgang Schiffmann* (*FernUni Hagen): EELA – Energy-Efficient Landing Approaches - Entwicklung energieeffizienter Landeanflüge – Durch kontinuierliche Sinkflüge bei geringer Triebwerksleistung können bei Anflug und Landung von Verkehrsflugzeugen sowohl Treibstoff als auch klimaschädliche CO₂-Emissionen eingespart werden. Gleichzeitig verringern sich auch die Lärmemissionen für die Anwohner der Flughäfen. Im vorliegenden Beitrag wird ein neues Verfahren zur Berechnung der Anflugrouten unter Berücksichtigung des Windeinflusses vorgestellt das in Abstimmung mit der DFS an der FernUniversität in Hagen (FU) entwickelt wurde. Dabei wird ein ursprünglich für Gleitflüge nach Triebwerksausfällen entwickeltes Verfahren zur Verwendung bei Continuous Descent Operations (CDO) weiterentwickelt. Neben dem Verfahren wird der EELA-Ansatz aus Sicht der DFS eingeordnet und bewertet.

Alexander Diamadis & Winfried Dunkel: Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandortes für GBAS Datenlink und ILS Gleitweg – Die in diesem Artikel beschriebenen Simulationen und Arbeitsschritte zur Entwicklung eines Lösungsvorschlages zur Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandorts für den Datenlink des GBAS und dem Gleitweg des ILS sind im Rahmen einer Bachelorarbeit im Fachbereich Elektro- und Informationstechnik an der Hochschule Darmstadt in Zusammenarbeit in der Abteilung SIS/ND (Satellitenavigation und technische Dienste) entstanden.

Janaki Viswanathan*, Alexander Blatt*, Konrad Hagemann & Dietrich Klakow* (* Saarland University): Less Stress, More Privacy: Stress Detection on Anonymized Speech of Air Traffic Controllers – Flugverkehrskontrolle induziert mentale Beanspruchung mit Einfluss auf die menschliche Sprachproduktion. Die rechtzeitige Erkennung hoher mentaler Beanspruchung und das Ergreifen angemessener Gegenmaßnahmen ist ein Schlüsselpunkt für die Aufrechterhaltung des hohen Sicherheitsniveaus im Luftverkehr. In diesem Artikel werden verschiedene Architekturen zur Stresserkennung für anonymisierte Sprache beim Fluglotsen evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schutz der Persönlichkeitsrechte kein Hindernis für den Aufbau leistungsfähiger Deep-Learning-basierter Modelle für weiterführende Anwendungen basierend auf FVK Sprachdaten darstellen muss.

Von der Forschung der Klimawirkung persistenter Kondensstreifen bis zum Probetrieb in der DFS

Ralph Leemüller, Aline Liedtke, Christian Zwiener, Kristina von Sack & Stefan Keller

Zusammenfassung

Anhand von Forschungsergebnissen zum Klimaeffekt von persistenten Kondensstreifen und den daraus entstehenden Zirren werden Fragen bezüglich der operativen Umsetzung zur Vermeidung von eisübersättigten Gebieten aufgezeigt. Dieser Beitrag beschreibt die Herausforderungen einer zügigen Umsetzung, die aufgrund der noch offenen Fragen existieren. Das von der Bundesregierung geförderte Projekt D-KULT ist ein wichtiger Schritt die Problemstellungen zu erfassen und Lösungen zu validieren, sodass die klimapolitischen Ziele der EU unterstützt werden können.

Überblick

In einigen Bereichen stellt man fest, dass die Zeitdauer von einer Idee über Forschung bis zum regelmäßigen Betrieb recht groß ist. Insbesondere bei Firmen mit einem hohen Sicherheitsniveau, wie der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH, stellt man den Sachverhalt häufig fest. Doch warum ist das so?

Betrachtet man Forschungspublikationen, so werden Ergebnisse sehr fundiert beschrieben und einer schnellen Einführung sollte eigentlich nichts mehr im Wege stehen. Häufig wurden jedoch für eine Nutzung wichtige Aspekte bzw. Voraussetzungen nicht ausreichend betrachtet. Erfahrungen in der DFS zeigen, dass u.a. die Erstellung bzw. Änderungsbeschreibung von Betriebsverfahren, Sicherheitsbewertungen, ggfs. Zertifizierung durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) oder Ausbildung des Betriebspersonals (Fluglotsen, u.a.) recht viel Zeit beanspruchen. Diese Punkte können nicht von der Forschung berücksichtigt werden, da es nicht deren Aufgabe oder deren Bereich ist. Ein Proof of Concept (Validierung) einer betrieblichen Durchführung fand in der Forschung oft ebenfalls nicht statt, was erneute Fragestellungen an die Forschung zurückgeben kann. Am Beispiel von klimaoptimierten Flugrouten soll dieser Sachverhalt dargestellt werden.

In diesem Beitrag werden zuerst ein Überblick der Klimaschutzmaßnahmen der DFS sowie der aktuelle Stand der Forschung zu persistenten Kondensstreifen gegeben. Anschließend werden die Auswirkungen auf die operative Nutzung und der zukünftige Probetrieb beschrieben.

Klimaschutz in der DFS

Der Klimaschutz war und ist für die DFS schon immer ein wichtiger Bestandteil ihres Handelns. Seit einigen Jahren sind in dem DFS Umwelt- und Klimaschutzkonzept (DUKK) 0 die Leitlinien, Erfolge, Handlungsfelder und Maßnahmen der DFS im Bereich Umwelt zusammengefasst. Die vier zentralen Säulen des Konzepts sind Lärmschutz, Klimaschutz, Ressourcenschonung und Förderung der Biodiversität – die als „Keimzelle“ für den betrieblichen Umwelt- und Klimaschutz verfasst wurden.

Die DFS arbeitet kontinuierlich daran, die Flugeffizienz von Strecken zu optimieren, sowohl an den horizontalen wie vertikalen Anteilen. Die horizontalen Flugeffizienz (HFE) wurde durch die Einführung von Free Route Airspace so gut, dass innerhalb Deutschlands eine weitere Optimierung an ihre Grenzen gekommen ist. Zusätzliche Verbesserungen sind nur grenzüberschreitend mit benachbarten Flugsicherungen möglich [2], [3].

In dem Bereich der vertikalen Flugeffizienz (VFE) werden die sogenannten Continuous Descent Operations (CDO) weiterentwickelt. Ebenso werden bei Abflügen die Continuous Climb Operations (CCO) so oft wie möglich angewendet.

Am Beispiel des Optimized Profile Descent (OPD) handelt es sich um angepasste Standard Arrival Routes (STAR), die einen kontinuierlichen Sinkflug aus der Reiseflughöhe ermöglichen. Die Continuous Descent Operations (CDO)-Trajektorie beginnt dabei bereits im oberen Luftraum in dem auf der STAR Höhenfenster an bestimmten Wegpunkten definiert sind. Damit wird den Airlines und dem Lotsen ein Sinkflugprofil angeboten, das zu einer Verringerung von Horizontalfluganteilen, Treibstoffverbrauch und Schadstoffausstoß führt [2].

Persistente Kondensstreifen

Zu den klimawirksamen Emissionen der Luftfahrt gehören nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern auch Non-CO₂-Emissionen, die nach den bisherigen Erkenntnissen deutlich stärker zum Klimawandel beitragen.

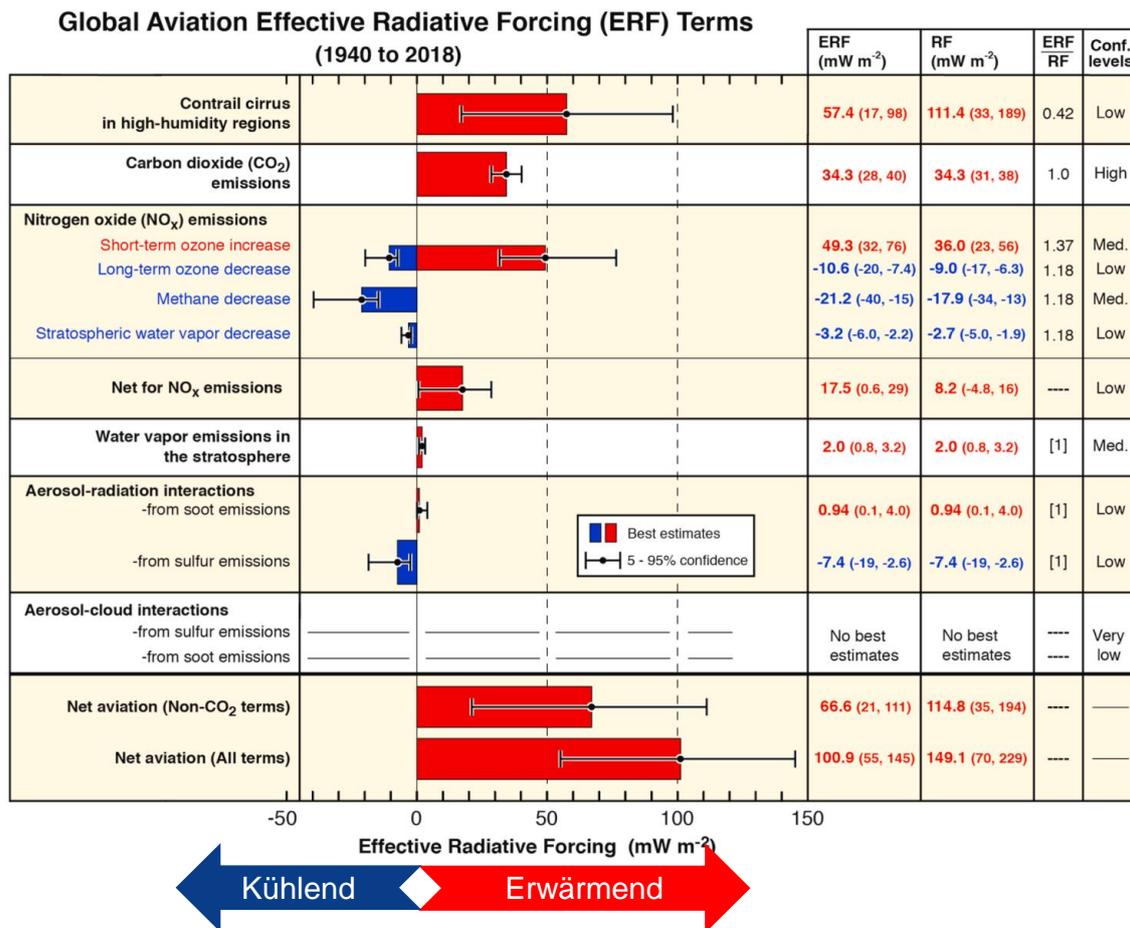


Abbildung 1: Strahlungsantriebe (Effective Radiative Forcing, ERF) verschiedener klimawirksamer Effekte der Luftfahrt [4].

In Abbildung 1 sind für verschiedene Klimaeffekte (Kondensstreifen-Zirren, CO₂, NO_x und andere) die jeweiligen Beiträge dargestellt, wie sie sich auf die Strahlungsbilanz zur Erderwärmung auswirken. Der effektive Strahlungsantrieb ist die Summe der physikalischen Prozesse des Wärmeaustauschs zwischen Erde und Weltall. Ist der Wert positiv, so wird mehr Wärme auf die Erde eingestrahlt als abgegeben wird und die Erde wärmt sich langfristig auf.

Anhand der Länge der Fehlerbalken ist erkennbar, dass die Unsicherheiten der einzelnen Größen der Non-CO₂-Effekte relativ hoch sind. Betrachtet man die Summe der Strahlungsantriebe, so stellen die Non-CO₂-Effekte etwa 2/3 des gesamten Strahlungsantriebs dar.

Um den Einfluss des Klimaeffekts auf die Erderwärmung zu bestimmen, sind die Einzeleffekte mit einer geeigneten Metrik zeitlich zu integrieren. Der Weltklimarat (IPCC) verwendet als Metrik das GWP100 (Global Warming Potential auf 100 Jahre) [5]. Hierbei wird deutlich, dass CO₂ den größten

Einfluss hat. Die Non-CO₂-Effekte sind dennoch nicht zu vernachlässigen. Insbesondere ist die Klimawirkung von Kondensstreifenzirren und NO_x deutlich erkennbar (Abbildung 2).

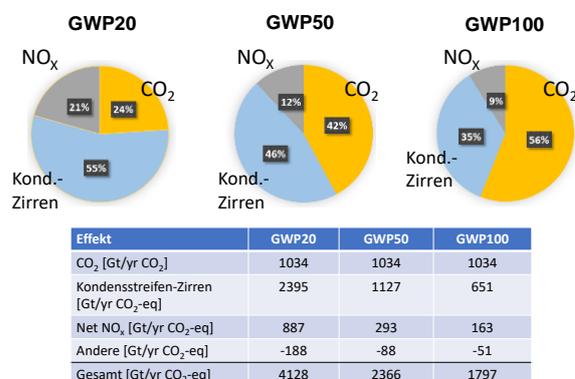


Abbildung 2: Einfluss der klimatologischen Wirkung von CO₂- und Non-CO₂-Effekte der Luftfahrt bei verschiedenen Zeitskalen (Metriken) (in Anlehnung an Lee [4]).

Idee der Meidung von ISSR

Ein aktuelles Forschungsthema ist die Verringerung von Eiswolken (Zirren), die aus persistenten Kondensstreifen in eisübersättigten Gebieten (ice supersaturated regions, ISSR) entstehen.

Kondensstreifen werden im Allgemeinen in höheren Flugflächen (im Bereich der Tropopause und der unteren Stratosphäre) durch Kondensation des aus den Triebwerken emittierten Wasserdampfs an Rußpartikeln gebildet. Die Lebensdauer beträgt dabei jedoch nur Sekunden bis wenige Minuten, dadurch haben sie keinen merklichen Einfluss auf den Klimawandel. Kondensstreifen, die jedoch in eisübersättigten Gebieten (ISSR) entstehen, können bis zu mehreren Stunden persistent vorhanden bleiben. Eisübersättigte Gebiete sind Luftschichten mit einer relativen Luftfeuchtigkeit größer als 100%. Diese Gebiete können eine laterale Ausdehnung bis zu 450km haben. In der Vertikalen sind sie allerdings in der Regel zwischen 250m - 500m dick [6]. Die darin entstandenen persistenten Kondensstreifen können sich durch Winde und Diffusionsprozesse zu Wolken (Zirren) ausbreiten. Diese Zirren haben einen Einfluss auf die Erderwärmung, da sie die Abkühlung der Erde in den Nachtstunden reduzieren. Entstehen die Zirren dagegen in den Morgenstunden, so haben sie einen kühlenden Einfluss, da sie die Sonnenstrahlen in das Weltall zurückreflektieren. Der Gesamteffekt wird in der Forschung jedoch als erwärmend betrachtet [4].

In Abbildung 3 sind beispielhaft ISSR in der Flugfläche 330 im oberen Luftraum der DFS dargestellt. Die ISSR werden auf Basis der Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berechnet. Die Daten des DWD werden alle 6 Stunden neu berechnet mit aktualisierten Vorhersagen bis zu 48h in stündlicher Auflösung [7]. Für jeden dreidimensionalen Punkt muss das Kriterium der Eisübersättigung und das Schmidt-Appleman-Kriterium für die Entstehung der Kondensstreifen zutreffen. Das Schmidt-Appleman-Kriterium beschreibt das thermodynamische Gleichgewicht beim Ausstoß des Wasserdampfes eines Triebwerks. Abhängig von den Temperaturen und Partialdrücken können sich Eiskristalle bilden, die als Kondensstreifen sichtbar werden [8], [9].

Es liegt auf der Hand, dass man die Erzeugung von persistenten Kondensstreifen verhindern kann, indem kein Flugzeug durch die eisübersättigten Gebiete fliegt. In der Klimaforschung wird seit einigen Jahren die Meidung der ISSR diskutiert. Diese Gebiete können horizontal durch Routenänderung oder vertikal durch Höhenänderung umflogen werden [10], [11], [12].

Ice Supersaturation Regions

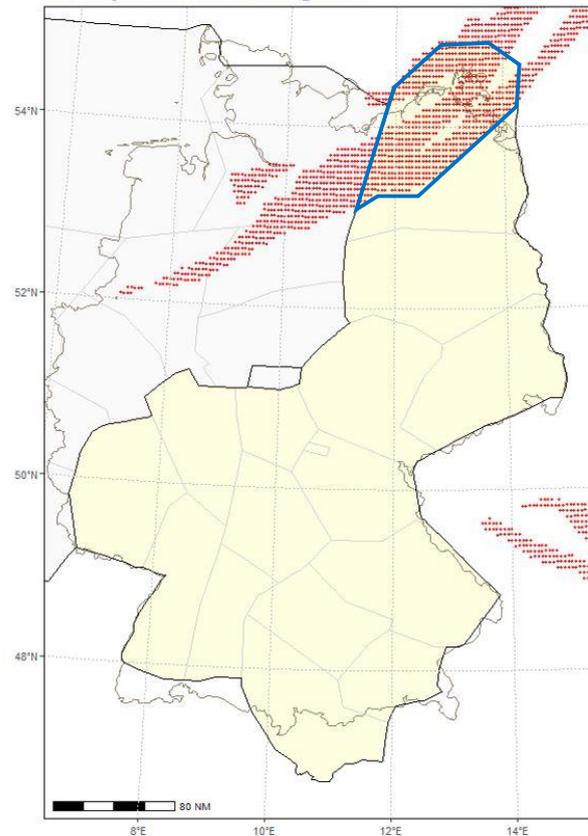


Abbildung 3: Darstellung von ISSR im Luftraum Karlsruhe am 10. August 2022 um 5:00 (UTC) in Flight Level 330.

Herausforderungen bei der Meidung von ISSR

Die vorliegenden Studien betonen, dass einer betrieblichen Einführung nichts im Wege stehen würde. Allerdings fand bisher kein Vergleich der Genauigkeit der Lage der vorhergesagten ISSR mit einem durchgeführten Versuch statt.

Die horizontalen Ausdehnungen der ISSR können bis 450km groß werden. Ein seitliches Umfliegen dieser Gebiete benötigt Platz im Luftraum, welcher im dicht beflogenen Zentraleuropa kaum vorhanden ist. Der EASA-Report [12] empfiehlt daher das laterale Umfliegen über dem Atlantik, welches auch in Übereinstimmung mit der Studie von Grewe [10] ist. Die Vermeidung einer erheblichen Flugwegverlängerung durch das Umfliegen erfordert dabei eine Optimierung der Routenplanung. Eine längere Route führt neben einer höheren Flugdauer auch zu einem erhöhten Kerosinverbrauch und damit zu vermehrter CO₂-Emission, was es zu vermeiden gilt.

Das Über- oder Unterfliegen der ISSR ist in dicht beflogenen Lufträumen die bessere Wahl. Aufgrund der geringen freien Luftraumkapazität sollte die Höhenänderung möglichst gering ausfallen. Dies setzt wiederum voraus, dass die Grenzen der eisübersättigten Gebiete sehr gut bestimmt sind. In der Studie von Gierens [13] wird festgestellt: „Die Probleme sowohl der Wetter- als auch der Klimamodelle, die relative Feuchte korrekt vorherzusagen, und insbesondere die Unterschätzung von Häufigkeit und Grad der Eisübersättigung, führen jedoch zu einer sehr geringen Zuverlässigkeit bei der Vorhersage der Kondensstreifenpersistenz.“

Flugrouten werden aus wirtschaftlichen Gründen regelmäßig sowohl lateral als auch vertikal für minimalen Kerosinverbrauch und den damit einhergehenden möglichst minimalen CO₂-Eintrag geplant. Dem Klimaeffekt, basierend auf der Vermeidung von persistenten Kondensstreifen und den nicht entstehenden Zirren, muss der Effekt der zusätzlichen CO₂-Emissionen durch nicht optimalen Flugrouten und Höhen gegenübergestellt werden. Es ist nur dann eine Meidung der ISSR sinnvoll, wenn die Klimabilanz positiv ausfällt. Die Berücksichtigung der gegenläufigen Klimaeffekte wurde in der Studie von Teoh [11] ansatzweise in Simulationen durchgeführt, dieses sollte jedoch mit real durchgeführten Flugversuchen verifiziert werden. Hierbei ist es wesentlich, dass nicht die Strahlungsantriebe miteinander verglichen werden, sondern die Temperaturreduktion durch die passende Metrik errechnet wird, um die Klimabilanz zu erhalten. Dieser Aspekt wird in der aktuellen Klimadiskussion häufig außer Acht gelassen. Die Verlässlichkeit der Prognoseberechnung bezüglich der Lage und Grenzen der ISSR spielt eine wichtige Rolle bei dem Verfahren zum Umfliegen dieser. Dies wird durch die folgenden vier Fälle illustriert.

Erfolgreiches Umfliegen (Abbildung 4 links): Die ISSR wurde korrekt vorhergesagt und durch die neue Route wurden die persistenten Kondensstreifen vermieden. Die vorherbestimmten Abstände zur Meidung der Gebiete waren richtig gewählt. Es kommt zwar zu einer erhöhten CO₂-Emission durch die nicht optimale Strecke. Die gesamte Klimabilanz ist jedoch positiv.

Fehlgeschlagenes Umfliegen (Abbildung 4 rechts): Die vorhergesagte ISSR existiert zu dem Zeitpunkt nicht oder nicht mehr. Es wurden auf der neuen Route zwar keine persistenten Kondensstreifen erzeugt, aber es kommt auf Grund der unnötigen Umleitung zu einer erhöhten CO₂-Emission ohne den positiven Effekt der Einsparung durch Zirren. Die Klimabilanz ist negativ.

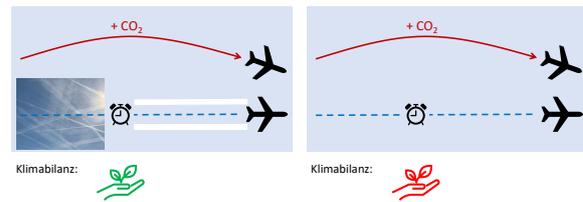


Abbildung 4: Links: erfolgreiches Umfliegen durch korrektes Vorhersagen der ISSR. Rechts: Fehlgeschlagenes Umfliegen durch nicht mehr existentes ISSR (modifiziert nach [14]).

Fehlgeschlagenes Umfliegen (Abbildung 5 links): Das vorhergesagte Gebiet existiert zu dem Zeitpunkt des Durchflugs nicht mehr, dagegen existiert aber auf der neuen Strecke eines. Es wurden auf der neuen Route zusätzliche persistente Kondensstreifen erzeugt. Das Umleiten wäre nicht nötig gewesen. Es kommt durch die nicht optimale Strecke zu einer erhöhten CO₂-Emission und zusätzlich kommt der Effekt der Zirren hinzu. Die Klimabilanz ist negativ.

Fehlgeschlagenes Umfliegen (Abbildung 5 rechts): Das vorhergesagte Gebiet ist zu dem Zeitpunkt des Re-Routings erheblich größer als vorhergesagt. Es wurden auf der neuen Route persistente Kondensstreifen erzeugt. Es kommt neben dem Effekt der Zirren zusätzlich durch die nicht optimale Strecke zu einer erhöhten CO₂-Emission. Die Klimabilanz ist negativ.

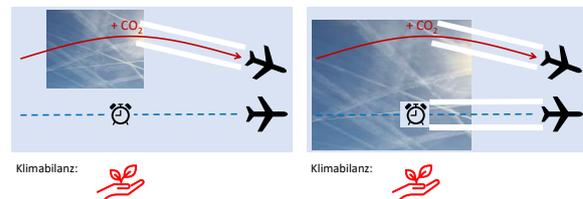


Abbildung 5: Links: fehlgeschlagenes Umfliegen durch ISSR auf der neuen Route. Rechts: Fehlgeschlagenes Umfliegen durch erheblich größeres ISSR (modifiziert nach [14]).

Ein erfolgreiches Umfliegen setzt, wie schon erwähnt, eine genaue und verlässliche Kenntnis der Grenzen der ISSR und der zeitlichen Änderung voraus. Zusätzlich müssen die notwendigen Abstände der neuen Flugstrecken zu dem eisübersättigten Gebiet groß genug sein, damit keine ungewollten persistenten Kondensstreifen entstehen. Der benötigte Luftraum (Größe der ISSR) muss in diesen Fällen freigehalten werden und es kann ein Kapazitätsengpass bei der Flugführung entstehen.

Für Flugsicherungen, wie die DFS, ergeben sich weitere Anforderungen hinsichtlich der Integration dieser Verfahren in den operativen Betrieb. Die

Verlagerung des Verkehrs zur ISSR-Vermeidung verringert die Luftraumkapazität und führt so zu einer erhöhten Verkehrsdichte in den ISSR-freien Lufträumen. Dies könnte unter ungünstigen Bedingungen zu einer Mehrbelastung des operativen Personals führen. Für Airlines kommen neben den operativen Betriebsverfahren, auch im erfolgreichen Fall, noch ein erhöhter Kerosinverbrauch und damit zusätzliche Kosten hinzu. Diese Kosten können gegebenenfalls durch den Emissionshandel kompensiert werden.

Projekt D-KULT

In dem Forschungsprojekt D-KULT (Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport, Juni 2022 bis Mai 2025), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) der Bundesrepublik Deutschland (LuFo VI-2), werden wesentliche Fragestellungen bearbeitet, die oben aufgeworfen wurden. Zwei Schwerpunkte sind in dem Projekt vorgesehen. Zum einen die Durchführung eines Probetriebs im oberen Luftraum der DFS und Simulationen zur Berechnung der entstehenden Klimaeffekte des Fluges und zum anderen die Optimierung der Klimaeffizienz im europäischen Luftraum.

Das Projektkonsortium besteht aus den Firmen: DLR, DWD, LH-Airline, LH-Systems, LH-Technik, Jeppesen, PACE und DFS. Assoziierte Projektpartner sind BDL, Airbus, DHL/EAT und Eurocontrol MUAC. Das Konsortium wird vom DLR geleitet.

Innerhalb des Schwerpunkts „Probetrieb“ soll überprüft werden, ob persistente Kondensstreifen entstanden sind oder vermieden wurden. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe von Satellitenbeobachtungen. Das Umfliegen der vorhergesagten ISSR mit im Vorfeld definierten Voraussetzungen wird validiert. Zu den Voraussetzungen gehören die vorhergesagten Lagen und das Zeitverhalten der klimawirksamen Gebiete und der angenommenen Abstände des geänderten Flugweges zu den Grenzen der ISSR.

In Abbildung 3 ist eine ISSR in FL330 für einen bestimmten Tag berechnet und dargestellt. Betrachtet man alle Flight-Level, so erhält man die Obergrenze FL340 und Untergrenze FL330 des Gebiets. Der Luftraum, den es zu vermeiden gilt, ist im selben Bild als blaue Umrandung skizziert. Die Größe beträgt in diesem Beispiel etwa 210km x 210km.

Untersucht man den Zeitverlauf des prognostizierten Gebietes, so erhält man in diesem Beispiel eine einigermaßen stabile ISSR von etwa 3h Dauer. Anschließend verlagert es sich südwärts und löst sich innerhalb von 2h auf.

In der Flugsicherung werden Flugzeuge in Höhen von 10er Flight-Level (FL320, FL330, ...) geführt. Dabei werden sie in sogenannten geraden oder ungeraden Flight-Levels je nach Flugrichtung geführt. Daraus ergibt sich, dass Flieger in einer Richtung die Level FL320 und FL 360 verwenden und in die andere Richtung die Höhen FL 310 und FL 350 (siehe Abbildung 6). Die Flughöhen beim Probetrieb werden 1000ft über oder unter den Grenzen der ISSR sein, um die Vorhersage der Gebiete zu validieren. Die Satellitenüberwachung in D-KULT soll nun bestätigen, dass die Flugzeuge in FL320 und FL350, die nächsten Flughöhen an dem klimawirksamen Grenzen, keine persistenten Kondensstreifen erzeugen. Dieses beschriebene Verfahren muss allerdings oft genug durchgeführt werden, um eine statistische Signifikanz zu erzielen.

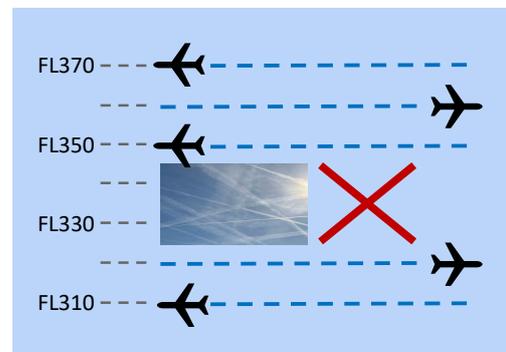


Abbildung 6: Klimawirksame Zone mit den umliegenden Höhenlevel.

Vorläufige Erkenntnisse der Berechnungen von ISSR, die im Bereich ‚Forschung & Entwicklung‘ der DFS gewonnen wurden, zeigen Gebiete mit vertikalen Dicken bis zu 6000ft, zeitliche Verläufe mit mehr als 7h und stellenweise sehr zerklüftete Gebiete. Daher ist es erforderlich, mehr Erfahrung und Grundlagen zur Einteilung von solchen Gebieten zu erhalten.

Wie sich die Einschränkung der Luftraumkapazität auswirkt, soll im Vorfeld mit Simulationen analysiert werden. Auf Basis dieser Simulation werden geeignete Tageszeiten für den Probetrieb ermittelt, welche in das Versuchsdesign einfließen. Zur Realisierung des Probetriebs muss noch eine Änderungsbeschreibung der aktuellen Betriebsverfahren gemäß des Versuchsdesigns erstellt werden. Auf dieser Basis wird eine Sicherheitsbewertung durchgeführt. Erst nach Genehmigung der Sicherheitsbewertung kann der Probetrieb erfolgen. Die Erzeugung dieser Unterlagen benötigt gewisse Zeit, die die Prüfverfahren vorschreiben.

Das Betriebspersonal muss im Vorfeld zum Probetrieb eingewiesen werden. Bei der DFS arbeiten

beispielsweise in der EBG Ost des oberen Luftraums etwa 160 Lotsen. Da die ISSR jeden Tag woanders im Luftraum entstehen können, müssen für ein erfolgreiches Verfahren alle Lotsen geschult werden. Die Informationen der tagesaktuellen ISSR-Situation und den Möglichkeiten zur Meidung der ausgewählten klimawirksamen Zonen sind dem Lotsen zielgerichtet bekannt zu machen.

Während des Probetriebs müssen auch alle Luftraumnutzer über das Verfahren mittels der NOTAMs (Notice to Airmen) informiert werden, da den Piloten gegebenenfalls ungeplante Höhenänderungen angewiesen werden, die nicht ihrer berechneten optimalen Flughöhe entsprechen. Eine entsprechende Phraseologie in der Kommunikation zwischen Piloten und Lotsen ist mitzuteilen, damit es nicht zu unnötigen Nachfragen während des Funkkontaktes kommt und damit die Arbeitslast der Lotsen erhöht wird. Die im zweiten Schwerpunkt des Projekts stattfindenden Simulationen zur Klimaeffizienz dienen auch zur Beurteilung der Klimabilanz bei dem erfolgten Probetrieb. Ob Regeln für operative Eingriffe in die heute spritoptimierten Flugpläne auf Basis der Klimabilanz innerhalb des Projekts D-KULT beschrieben werden können, ist aufgrund der Kürze der Projektlaufzeit noch nicht absehbar. Der Probetrieb soll eine validierte Aussage zu den Grenzen der ISSR und ausreichenden Abstände der Flugzeuge zu diesen liefern. Ein weiteres Ergebnis soll zudem die Klassifikation von klimawirksamen Gebieten sein, welche aufgrund ihrer Größe, Lage und Zeitverhalten für eine erfolgreiche Meidung geeignet sind. Zudem werden Entwürfe zu Verfahrensbeschreibungen für den operativen Betrieb vorliegen.

Insgesamt soll das Projekt D-KULT eine Faktengrundlage insbesondere aus Flugsicherungssicht liefern, aufgrund derer dann eine mögliche Umsetzung der ISSR-Vermeidung im operationellen Betrieb diskutiert werden kann. Diese Erkenntnisse können anschließend auf einen größeren geografischen Raum (z.B. Europa) angewendet werden. Dazu werden Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger bereitgestellt.

Dieser Artikel beruht auf einem Vortrag beim 71. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022 - DLRK 2022, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DGLR und erscheint auch im Tagungsband [15].

Abkürzungsverzeichnis und Referenzen

BAF	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
BDL	Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V.
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland
CCO	Continuous Climb Operations
CDO	Continuous Descend Operations
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
DHL/EAT	Deutsche Post DHL Group / European Air Transport Leipzig GmbH
D-KULT	Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport
DLH	Deutsche Lufthansa
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DUKK	DFS Umwelt- und Klimaschutzkonzept
DWD	Deutscher Wetterdienst
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EBG	Einsatz-Berechtigungsgruppe
EU	Europäische Union
FL	Flight Level
GWP100	Global Warming Potential auf 100 Jahre
HFE	horizontale Flugeffizienz
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change / Weltklimarat
ISSR	Ice Supersaturated Regions
LH	Lufthansa
LuFo	Luftfahrt-Forschungsprogramm
MUAC	Maastricht Upper Airspace Center
NOTAM	Notice to Airmen
OPD	Optimized Profile Descend
PACE	PACE AEROSPACE & IT GmbH
STAR	Standard Arrival Routes
VFE	vertikale Flugeffizienz

Referenzen

- [1] DUKK, DFS Umwelt- und Klimaschutzkonzept 2022, Langen: Deutsche Flugsicherung GmbH.
- [2] DFS Mobilitätsbericht (2021). Luftverkehr in Deutschland. Mobilitätsbericht 2021.
- [3] Buxbaum, J., „Rolle des Luftverkehrsmanagements bei der Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs“, Beitrag zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022.
- [4] Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S. J., Freeman S., Forster P. M., Fuglestedt J., Gettelman A., DeLeon R. R., Lim L. L., Lund M. T., Millar R. J., Owen B., Penner J. E., Pitari G., Prather M. J., Sausen R. and Wilcox L. J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018. *Atmospheric Environment*.
- [5] IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V. et al., Cambridge University Press. 7 August 2021 In Press.
- [6] Gierens, K. et al. (2020). *Meteorol. Z.*, 29, 165-176.
- [7] WAWFOR Datensatz für die Luftfahrt, World Aviation Weather FORecast. Flyer Deutscher Wetterdienst DWD.
- [8] Schmidt, E., *Schriften Der Dtsch. Akad. Der Luftfahrtforsch.* 44, 1-15 (1941).
- [9] Appleman, H., *Bull. Amer. Met. Soc.*, 34, 14-20 (1953).
- [10] Grewe V., Matthes S., Frömming C., Brinkop S., Jöckel P., Gierens K., Champougny T., Fuglestedt J., Haslerud A., Irvine E. and Shine K. (2017). Feasibility of climate-optimized air traffic routing for trans-Atlantic flights. *Environ. Res. Lett.* 12. 034003. ISSN 1748-9326 doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ba0>.
- [11] Teoh, R., Schumann, U., Majumdar, A. & Stettler, M. E. J., (2020). Mitigating the climate forcing of aircraft contrails by small-scale diversions and technology adoption. *Environmental Science and Technology*, 54(5), pp. 2941-2950.
- [12] EASA-Report (2020). Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Arrowsmith et al, 23.11.2020.
- [13] Gierens K., Matthes S. and Rohs S. (2020). How well can persistent contrails be predicted? In '3rd ECATS Conference, Making Aviation Environmentally Sustainable' Book of Abstracts Matthes S. and Blum A. (eds).
- [14] David S Lee (2021). Setting the scene: climate change and its impact on air traffic control. FA-BEC Research Workshop: Climate Change and the Role of Air Traffic Control, 22-23 September 2021, Vilnius, Lithuania
- [15] Leemüller, R. (2022). Von der Forschung zur Inbetriebnahme am Beispiel von klimaoptimierten Flugrouten. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. <https://doi.org/10.25967/570064>. urn:nbn:de:101:1-2022102815551119856033.

Rolle des Luftverkehrsmanagements bei der Reduktion der Klimawandelwirkung des Luftverkehrs

Jörg Buxbaum

Zusammenfassung

In der Herausforderung, die weltweite Luftfahrt bis 2050 klimaneutral zu gestalten, kommt dem Luftverkehrsmanagement eine begrenzte, aber wichtige Aufgabe zu. Während die langfristige und hochrelevante Aufgabe der Flugsicherung sein wird, über eine passende Flugführung den contrail-induzierten Strahlungsantrieb der Luftfahrt zu beeinflussen, steht parallel dazu in den kommenden Jahren die weitere emissionsbezogene Optimierung von Verfahren und betrieblichen Arbeitsweisen im Vordergrund. Um hier Fortschritte zu erzielen, braucht es mehr flugbetriebliche Daten, passendere Umweltkennzahlen, Lotsenassistenzsysteme, eine datenbasierte Erfolgskontrolle – und ein transparentes, zwischen den Prozesspartnern abgestimmtes Bild darüber, welche Optimierungspotentiale tatsächlich noch mit einem angemessenen Verhältnis zwischen Nutzen, Aufwand und ggf. potentiellen Einschränkungen für Luftraumnutzer erschließbar sind.

Herausforderungen der Luftfahrt in Bezug auf Klimawandel

Seit 1940 hat die weltweite Luftfahrt kumuliert über 33 Mrd. Tonnen CO₂ in die Atmosphäre emittiert, allein rund 50% davon in den letzten 20 Jahren [1]. Das entspricht etwa der 45fachen Menge des jährlichen CO₂-Ausstoßes Deutschlands von 2021 [2].

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels steht die Luftfahrt wie andere Industrien vor der Herausforderung, ihre seit Jahrzehnten zunehmend wachsenden CO₂-Emissionen (Abbildung 1) zu begrenzen, zu reduzieren und langfristig möglichst eine Klimaneutralität zu erreichen.

Diese Klimaneutralität wird maßgeblich getrieben über neue Triebwerkskonzepte, neuartige Kraftstoffe und dazu passende Luftfahrzeuge. Vordringlichstes Ziel der Industrie ist dabei, die CO₂-Emissionen langfristig zu eliminieren. Da ein großer Teil der Klimawirkung der Luftfahrt aus den Wolkenbildungen aufgrund von Emissionen in Reiseflughöhe resultiert und „nur“ rund ein Drittel durch das emittierte CO₂ selber [4] müssen zusätzlich zur CO₂-Reduktion Maßnahmen in Bezug auf die Flugführung getroffen werden, um klimasensitive Lufträume auszuspüren.

Dies gilt z.B. auch für mögliche Flüge mit Wasserstoffantrieb. Andernfalls würden nur Teile der Klimawandelwirkung der Luftfahrt berücksichtigt. Forschungsarbeiten hierzu sind Teil des Projekts D-KULT („Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport“) [5], das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms unter Beteiligung der DFS von 2022 bis 2025 laufen wird. Contrail-induzierte Klimawirkungen stehen in diesem Paper nicht im Fokus.

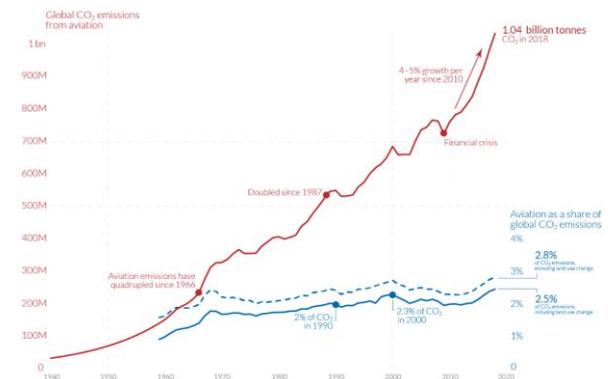


Abbildung 1: Entwicklung der jährlichen CO₂-Emission des weltweiten Luftverkehrs (inkl. Luftfracht und Militärflugverkehr) von 1940 bis 2018 [3].

Erwartungen an das Luftverkehrsmanagement

In Strategiedokumenten der Luftfahrt [6] werden die größten Potentiale zur CO₂-Reduktion in neuartigen Antriebskonzepten und Luftfahrzeugen gesehen. Allerdings könnten diese potenziellen Entwicklungen erst in einigen Jahrzehnten Wirkung zeigen. Zum einen, da die Entwicklung viel Zeit kostet und mit noch ungelösten technologischen Fragen verbunden ist. Zum anderen ist aufgrund der typischen Einsatzdauer von Flugzeugen von bis zu 25 Jahren damit zu rechnen, dass konventionell betriebene Flugzeuge auch im Jahr 2050 noch fliegen, sofern keine regulativen Maßnahmen eine vorzeitige Ausmusterung bedingen.

Umso mehr richtet sich aktuell der Blick auf kurzfristige Maßnahmen, die ohne nennenswerte Technologierisiken und ggf. ohne massiven Kapitaleinsatz umsetzbar scheinen.

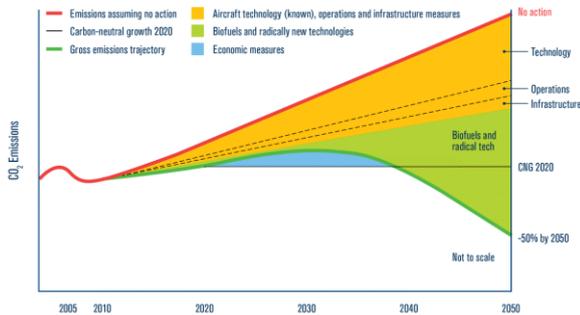


Abbildung 2: Schematische Darstellung der IATA-CO₂-Emissionsroadmap (International Air Transport Association) bis 2050 (Quelle: [6]).

Institutionen wie das Umweltbundesamt [7] und EUROCONTROL [8] rechnen mit einem Einsparpotential von 10% bis 15% an Treibstoff und damit CO₂ durch eine „effizientere Luftraumnutzung“ bzw. Verbesserungen im Luftverkehrsmanagement in Europa. Gemäß EASA (European Union Aviation Safety Agency) [9] entspricht dies rund einer Tonne CO₂ bzw. rund 300 kg Kerosin pro Flug, wovon laut EASA-Berechnungen knapp 40% durch Verkürzung der tatsächlichen Flugwege im Reiseflug erreicht werden können. EASA benennt ausdrücklich die Rahmenbedingungen für diese Werte: Verzögerungsfreies Taxi-Out, durchgängig kontinuierlicher Steigflug, optimale Reiseflughöhe, Reiseflug über Großkreisentfernung, durchgängig kontinuierlicher Sinkflug, keine Flugwegverlängerung im Flughafennahbereich, keine Verzögerungen beim Taxi-In.

Es gilt als noch offene Forschungsfrage, in welchem Maße es sich bei diesen Potentialen um theoretische Werte handelt, die lediglich in einer idealisierten Welt erschließbar scheinen und welcher Anteil davon sich tatsächlich mit welchem Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand, unter Beteiligung welcher Prozesspartner und ggf. unter Inkaufnahme von Nachteilen für die Luftfahrt unter welcher Verkehrsbelastung realisieren lässt. Berechnungen wie die der EASA gehen von idealen Einzelflügen aus, allerdings finden pro Tag allein im deutschen Luftraum durchschnittlich bis zu 8.600 Flüge der zivilen Großluftfahrt statt. (Ein Nachteil wäre beispielsweise die Kappung von Verkehrszahlen im Luftraum, da eine Maximalauslastung von Luftraum stets zulasten umweltoptimierter Flugführung stattfindet.) Einige von Institutionen publizierte Zahlenbeispiele für erwartete Flugwegverkürzungen im Streckenbereich halten generell einer Plausibilitätsprüfung nicht stand, siehe auch nachfolgenden Abschnitt zu Erwartungen von EUROCONTROL an Free Route Airspace.

Einflussmöglichkeiten von Air Traffic Management (ATM)

Bezogen auf die von EUROCONTROL [10] verwendeten zeitlichen Vorläufe im Luftverkehrsmanagement bestehen viele Möglichkeiten, Flugverkehr umweltgerechter zu organisieren, z.B.:

Strategisch (bis 7 Tage vor Betriebstag)

- Etablierung von „Continuous Climb Operation“ Abflugverfahren (CCO) und „Continuous Descent Operation“ Anflugverfahren (CDO) an Flughäfen
- Zeitliche und räumliche Optimierung der Gestaltung und Aktivierung von militärischen Übungsflugräumen [z.B. auch über Military Variable Profile Areas (MVPA), Flexible Use of Airspace (FUA)]
- Entwurf treibstoffoptimierter Flugverfahren für den Flughafennahbereich unter Abwägung lärmimmissionsrelevanter Aspekte
- Etablierung von Direct Routings für große Lufträume (z.B. Free Route Airspace FRA)
- Optimierung grenzüberschreitender Routenführungen

Prä-taktisch (1 – 6 Tage vor Betriebstag)

- Feinjustierung der Nutzung militärischer Übungsgebiete
- Ausarbeitung von Demand-Capacity-Mechanismen und passender Routenführungen auf Grundlage des prognostizierten Verkehrs in Verbindung mit der Wetterprognose

Taktisch (am Betriebstag)

- Adäquate Koordination von An- und Abflügen zur optimalen Umsetzung von CCO und CDO insbesondere an hochbelasteten Flughäfen
- Berücksichtigung klimarelevanter Höhenschichten bei der Optimierung der Verkehrsflussplanung für den Betriebstag
- Vorschlag klimaoptimierter, planmäßiger Flugwege bezogen auf Einzelflüge unter Berücksichtigung von Luftraumbelastungen und Konfliktprognosen
- Bevorzugte [Air Traffic Flow Management (ATFM)]-Behandlung von klimaoptimierten Flügen und Luftfahrzeugen, die z.B. mit klimafreundlicheren Kraftstoffen betrieben werden

Operativ (Entscheidungen des Lotsen bei der unmittelbaren Flugverkehrskontrolle)

- Verringerung von Taxizeiten auf Basis von Arbeitsverfahren, die auf hochentwickelten Rollführungssystemen basieren
- Verringerung der Verweildauer in der TMA (Terminal Manoeuvring Area) durch optimierte, KI-gestützte (Künstliche Intelligenz) Anflugassistenzsysteme und abstandsmindernde Flugverfahren [Eindrehunterstützung, Abstandhaltung auf dem Endanflug unter Berücksichtigung des Windfeldes, RECAT (Wake Turbulence Recategorization), TBS (Time Based Separation)]
- Hoher Umsetzungsgrad treibstoff- und lärmoptimierter An- und Abflugverfahren (CCO, CDO)
- Verstärkte Nutzung klimaoptimierter Flughöhen zur Verringerung des negativen Effekts von Eiswolken/ Cirren
- Echtzeiterfassung von Verbrauchsdaten einzelner Flüge und Abgleich mit dem operativ erreichbaren Optimum, Darstellung der Flugführungsalternativen am Lotsenarbeitsplatz

Etliche der Maßnahmen bedürfen neuer und genauerer Informationen mit entsprechendem Vorlauf, z.B.:

- Wetterinformationen (Ist-Situation und Prognose inkl. Nowcast von Windfeldern, Schlechtwetterzonen, Gefahrengebieten)
- Einzelflugbezogene Flugleistungsprognose auf Basis von Borddaten inkl. aktueller Flugzeugmasse
- Borddaten (z.B. optimaler Top of Descent TOD, Cost Index CI, optimale Flughöhe sowie ggf. passender Zeitpunkt für Step-Climbs, aktuelle Masse, Trajektorieninformationen)

Entwicklung von Umweltkennzahlen der Flugsicherung

Die Relevanz von Umweltkenngrößen in der Aufgabenerfüllung der Flugsicherung ist bei Flugsicherungsorganisationen weltweit in den letzten 25 Jahren gestiegen. Einen Meilenstein stellte dabei in Europa die Gründung der Central Flow Management Unit (CFMU, heute: Network Manager, NM) im Jahr 1995 dar [11], die über zunehmend weiterentwickelte Mechanismen zur Demand-Capacity-Steuerung eine massive Verringerung von Holdingzeiten im europäischen Luftraum erreichte, verbunden mit einer Verminderung des Treibstoffverbrauchs (Abbildung 3).

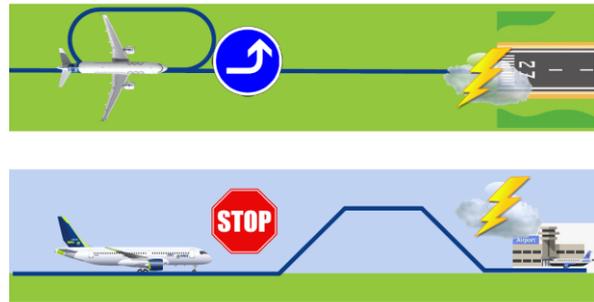


Abbildung 3: Statt wie früher Warteschleifen anzuweisen (oben), werden heute z.B. bei Schlechtwetter am Zielflughafen Flüge am Ursprungsflughafen zurückgehalten und damit Treibstoff gespart.

Durch die Etablierung eines europäischen ATM-Leistungsregimes und die Einführung von umweltbezogenen Leistungskennzahlen (wie z.B. HFE – Horizontal Flight Efficiency) erhielten Flugsicherungen zusätzlich Anreize, Maßnahmen zu treffen, um noch direktere und umweltgerechtere Flugverläufe anzubieten. Die Einführung von Arrival-Management-Systemen an hochfrequentierten Flughäfen leistete ebenfalls einen Beitrag zur wetter- und verkehrsabhängigen Justierung von Demand-Capacity-Prozessen im Flughafennahbereich.

Auch über eine Intensivierung von grenzüberschreitenden Luftraumgestaltungen und Streckenführungen konnte in Europa eine Verbesserung der HFE erreicht werden. Dies spielt deswegen eine Rolle, da der Großteil der Flüge in Europa grenzüberschreitend stattfindet, im Bereich der DFS etwa 90% [12]. Mittlerweile liegt die mittlere Flugwegabweichung im deutschen Luftraum bei 0,81%, das entspricht 2,9 km Verlängerung im Vergleich zum direkten Flugweg (Abbildung 4).



Abbildung 4: Entwicklung der horizontalen Streckeneffizienz im deutschen Luftraum, 2012 – 2021 [12].

Im europäischen wie im vergleichbar mit zivilem Großluftverkehr frequentierten US-amerikanischen Luftraum liegt die horizontale Streckeneffizienz nahezu gleichauf bei rund 3%, was einer Flugstrecke

von etwa 30 km oder 2,5 Minuten Flugzeit entspricht [13]. 2007 hatte dieser Wert noch bei 4% gelegen [14].

Der Wert für die Streckeneffizienz in Deutschland ist deswegen geringer als in Europa, da die Streckeneffizienz per se besser wird, je kleiner der betrachtete Luftraum ist. In einem Flugverkehrskontrollsektor liegt die Streckeneffizienz ohne Holding oder anderer Effekte oft nahe 0%.

Für diese Flugwegverlängerungen gibt es Gründe, die vielfach aufgrund höher priorisierter Zielkennwerte aus anderen KPA (Key Performance Area) bestehen (Abbildung 5). So resultiert ein Teil der Flugwegverlängerungen aus militärischen Übungsgebieten, die im Gegensatz zu den USA überwiegend zentral und damit in hochfrequentierten Lufträumen liegen. Beispielsweise wirkt die TRA205/305 „Lauter“ (Temporary Restricted Area) südwestlich vom Flughafen Frankfurt massiv auf Ost-West-Flüge in diesem Bereich wie auch auf An- und Abflüge vom Flughafen Frankfurt. Teilweise sind auch umweltrelevante Gründe (Fluglärmmmission) dafür verantwortlich, dass längere Flugrouten gewählt werden. Gerade bei längeren Flügen kann sich positiv auf den Gesamtverbrauch auswirken, wenn eine windoptimierte Flugroute gewählt wird, die ggf. deutlich von einer direkten Verbindung abweicht.



Abbildung 5: Auswahl möglicher Gründe für Flugwegverlängerungen [15].

Vor dem Hintergrund, dass die aktuellen umweltrelevanten KPI (Key Performance Indicator) für Flüge tatsächlich nur grobe Indikatoren sind, entwickelt die DFS aktuell neue Kennzahlen. Ein möglicher Schwerpunkt solcher, ergänzender Kennzahlen liegt in exakt nachgebildeten Emissionswerten von Flugverkehr in unterschiedlichen Flugsituationen und unter Wettereinfluss (Windfeld). Damit kann sowohl eine realistische Post-Ops-Analyse stattfinden wie auch eine realistische Erfassung, welche Emissionswerte bei „optimaler Flugführung“ (z.B. zur verkehrsschwachen Zeit) überhaupt erwartbar sind und als mögliche

Referenz herangenommen werden können. Aus F&E-Sicht (Forschung & Entwicklung) bietet sich langfristig die Möglichkeit, aktuelle Emissionswerte in Bezug auf eine Referenz ggf. zusammen mit angemessenen Handlungsvorschlägen in geeigneter Weise den Fluglotsen an ihrem Arbeitsplatz anzuzeigen, um ihnen damit die Umsetzung einer umweltoptimierten Flugführung zu erleichtern.

Erkenntnisse aus Projekten

Aus der Vielzahl abgeschlossener und laufender umweltbezogener Vorhaben im Zuständigkeitsbereich der DFS zeigen folgende sechs Beispiele entsprechende Entwicklungen und den erwarteten bzw. gemessenen oder abgeschätzten klimabezogenen Nutzen.

Horizontale Flugeffizienz

Projekt COBRA

Im Projekt COBRA (Cooperative Optimisation of Boundaries, Routes and Airspace) entwickelten die Kontrollzentralen Karlsruhe und Maastricht seit 2020 neue grenzüberschreitende Verfahren, die Ende 2021 in Kraft gesetzt wurden. Sie vereinfachen auch den Durchflug durch die TRA „Lauter“ zu Zeiten, in denen die militärische Übungszone nicht aktiv ist. Erwartet wird eine jährliche Reduktion von rund 6.000 Tonnen CO₂ allein durch die Optimierung der Anflüge nach Frankfurt an Wochenenden [16].

Projekt Free Route Airspace FRA

Vor rund 10 Jahren gestartet, hat das europäische Programm zum Ziel, möglichst vielen Flügen direkte bzw. frei wählbare Flugrouten anzubieten. Nach Abschluss soll gemäß EUROCONTROL eine jährliche Ersparnis von 6 Millionen Tonnen Kerosin und 20 Millionen Tonnen CO₂ erreicht werden [17].

Das entspräche einer Reduktion von rund 10% der in Europa jährlich verbrauchten Menge an Kerosin [18] bzw. einer Reduktion von 545 kg Kerosin pro Flug bei einer angenommenen Anzahl von 11 Millionen Flügen jährlich. Angesichts eines typischen Verbrauchs von 2,5 Tonnen Kerosin pro Stunde für einen in Europa gebräuchlichen Airbus A320 [19] und einer Reisegeschwindigkeit von 820 km/h käme dies einer beabsichtigten Streckenreduktion durch „Free Route Airspace“ von 179 km gleich. Angesichts der derzeitigen Flight Extension von rund 30 km [13] ist dieses Ziel wenig plausibel.

In der DFS startete „Free Route Airspace“ mit dem Projekt „Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe (FRAMaK)“, in dem die Anzahl grenzüberschreitender Flugrouten zwischen den beiden Kontrollzentralen auf 466 direkte Strecken anwuchs. Laut den vom Projekt veröffentlichten Zahlen konnten die jährlichen Flugstrecken im betroffenen Luftraum um 1,5 Mio. NM verkürzt werden. Bis zu 9.000 Tonnen Treibstoff wurden eingespart und CO₂-Emissionen um 30.000 Tonnen reduziert. Auf wieviel Flüge sich diese Mengen verteilen ist nicht publiziert. Innerhalb des Zuständigkeitsbereichs des Luftraums von FABEC (Functional Airspace Block European Central) rechnet die DFS langfristig mit etwa 1,9 Mio. Tonnen CO₂-Ersparnis pro Jahr auf Basis der Streckenlängenreduzierung.

Im Folgeprojekt „Free Route Airspace FRA“ konzentrierten sich die Entwicklungen seit 2018 ebenfalls zunächst auf den hochbelasteten oberen Luftraum der Kontrollzentrale Karlsruhe und in der nötigen Abstimmung u.a. mit angrenzenden europäischen Flugsicherungen, den Airlines, der Bundeswehr und dem Network Manager. Begonnen als Arbeitsprinzip für wenig frequentierte Nachtstunden, kann in vielen Lufträumen das Prinzip in Deutschland mittlerweile auch in vielen Lufträumen der Kontrollzentralen Bremen und München über den ganzen Tag angewendet werden. In Zukunft soll auch die Nutzung der im Gebiet der DFS-Kontrollzentralen Bremen und München bestehenden, noch auf die Nachtstunden begrenzten FRA-Lufträume zeitlich ausgeweitet werden. Darüber hinaus strebt die DFS an, in Zusammenarbeit mit den Nachbarstaaten und benachbarter Flugsicherungen weitere grenzüberschreitende FRA-Optionen zu schaffen. So begann ab dem 24. März 2022 die Implementierung einer grenzüberschreitenden Schnittstelle zwischen dem Free Route Airspace Karlsruhe SÜD in Deutschland und dem SECSI FRA (Southeast Europe Common Sky Initiative Free Route Airspace) an der Grenze zu Österreich [20].

So offensichtlich sinnvoll und ambitioniert die Free-Route-Entwicklungen sind, so wenig sind konkrete Messungen verfügbar, die die tatsächlich umgesetzten Einsparungen pro Flug(verbinding) vorher/nachher darlegen. Hier besteht im Sinne der Nachverfolgung von Projektzielen ein Nachholbedarf, es benötigt dazu umfassende individuelle und repräsentative Flugverbrauchsdaten der Airlines und eine dazu passende, sinnvolle Aufarbeitung.

Einführung satellitengestützter Abflugrouten

Satellitengestützte Flugverfahren bieten ein Potential, kürzere und gleichzeitig möglichst flug-

lärmoptimierte Abflugrouten entwerfen zu können. In einem von INEA geförderten Vorhaben entwickelte die DFS für den Flughafen Düsseldorf eine neue RNP-1 Abflugroute (rot in Abbildung 6), die im Vergleich zu einer konventionellen Abflugroute (schwarz dargestellt) 20 km (11 NM) Streckenverkürzung bringt. Damit verbunden ist nach Angaben der DFS ca. 25 kg Spritersparnis pro Flug; das entspricht rund 80 kg CO₂. Bei gemittelten 6.000 Flügen pro Jahr entspräche das einer CO₂-Reduktion von rund 480 Tonnen. Es ist zu ergänzen, dass die neue, kürzere Streckenführung aufgrund veränderter Fluglärm-betroffenheiten bei den Anrainern zu Diskussionen führt.

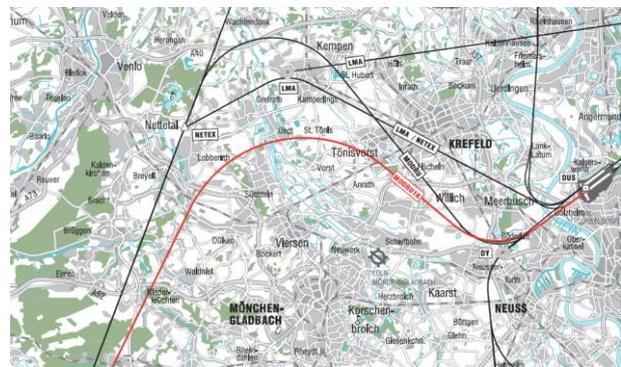


Abbildung 6: Satellitengestütztes Navigationsverfahren am Flughafen Düsseldorf, Abflusstrecke MODRU (rot).

Vertikale Flugeffizienz

Angesichts zunehmend ausgeschöpfter Potentiale zur Verkürzung von Flugstrecken kommt der vertikalen Optimierung von Flugverläufen eine wachsende Rolle zu. Dabei sind drei Flugverlaufsegmente zu unterscheiden:

1. **Steigflug** – Ziel ist hier ein kontinuierlicher, möglichst energieeffizienter vertikaler Flugverlauf.
2. **Reiseflug** – günstigstenfalls findet dieser in der abhängig von der aktuellen Flugzeugmasse optimalen Höhe statt – in Zukunft allerdings auch in Berücksichtigung klimasensitiver Höhenbänder [5].
3. **Anflug** – optimal ist hier ein kontinuierlicher Sinkflug ab Top of Descent, der ohne verbrauchsrelevante Horizontalflugphasen auskommt.

Während in verkehrsschwachen Zeiten die Umsetzung dieser Ziele oft darstellbar ist, liegt die Herausforderung darin, derartige Flugprofile auch zu Hochlastzeiten für möglichst viele Flüge anzubieten. Exemplarisch zeigt Abbildung 7 den vertikalen Flugverlauf von Flügen zwischen Hamburg und

München. Selbst auf dieser vergleichsweise kurzen Strecke (etwa 375 NM) erreichten die Flüge eine Gipfelhöhe von (Flight Level) FL330 bis FL370. Ein einziger, wesentlich tiefer geführter Flug an diesem Tag stellte eine Ausnahme dar und war ggf. die Auswirkung der im Rahmen des Ukraine-Kriegs eingeführten Korridore für Militärflugverkehr. Nennenswerte Horizontalflugphasen im Abflug sind nicht erkennbar. Im Anflug zeigen sich die für einen hochfrequentierten Flughafen typischen Horizontalflugphasen, die u.a. entstehen, um konfliktfrei zu abfliegendem Verkehr zu bleiben sowie wenn Flüge auf Transitions geführt werden und aufgrund des Parallelbahnbetriebs in festen, jeweils unterschiedlichen Höhen auf den Endanflug gedreht werden.

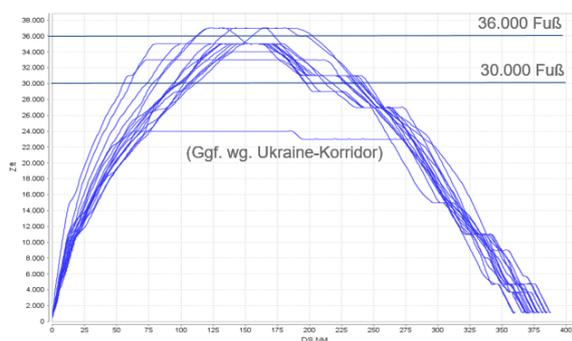


Abbildung 7: Vertikaler Flugverlauf aller Flüge Hamburg – München am 8. Mai 2022, Quelle: DFS Lage- und Informationszentrum.

Seit vielen Jahren werden an Flughäfen in Deutschland sogenannte CDO-Verfahren angeboten und insbesondere zu verkehrsschwachen Zeiten genutzt. CDO steht für „Continuous Descent Operations“ und bedeutet, dass Anflüge im Idealfall ohne schubrelevante Horizontalflugphasen geführt werden sollen [21]. Aufgrund unterschiedlicher örtlicher Rahmenbedingungen ist allerdings die flächendeckende Auswertung, wieviel Anflüge auf deutsche Flughäfen CDO-konform erfolgen, derzeit nicht möglich.

Low Demand Concept (LDC) München und Frankfurt

Der coronabedingte Verkehrseinbruch 2020 bot die Chance einer intensiven Nutzung umwelteffizienter Anflugverfahren. Lufthansa und DFS entwickelten deshalb im Frühjahr 2020 im Vorhaben LDC ein Verfahren für die Flughäfen München und Frankfurt, so dass Piloten bereits ab Verlassen des Reisefluges ihren Sinkflug so planen und einleiten konnten, damit dieser idealerweise kontinuierlich bis zum Endanflug verläuft. Zusätzlich wurde die planerische Streckenlänge (Zuführung zum Flughafennahbereich) verkürzt. Flugspurenauswertungen zeigen exempla-

risch eine deutlich höhere Nutzungsquote des kontinuierlichen Sinkfluges als 2019 (Abbildung 8).

Im Sommer 2021 erreichte die Lufthansa Group für Anflüge auf München und Frankfurt nach eigenen Angaben eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs im Vergleich zu konventionellen Anflügen um rund 40 Tonnen pro Monat (Abbildung 9). Unklar ist, auf wieviel Anflüge diese Menge bezogen ist. Seit erneutem Anwachsen der Verkehrszahlen wird daran gearbeitet, die Verfahren des LDC-Konzepts auch bei höheren Verkehrsmengen umsetzen zu können.

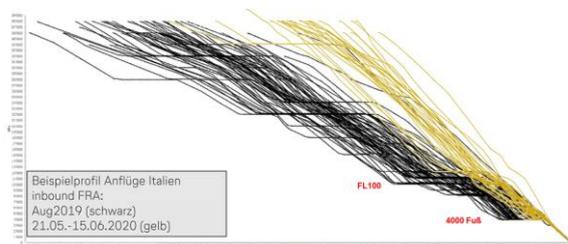


Abbildung 8: Vertikalprofile für DLH-Anflüge aus Italien kommend nach Frankfurt, Quelle: Lufthansa.

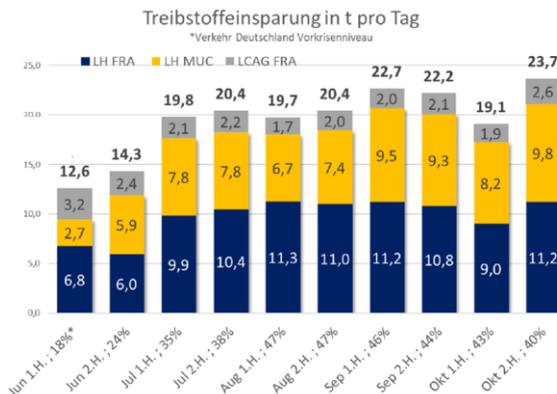


Abbildung 9: Treibstoffersparnisse durch optimierte Anflüge der DLH auf die Flughäfen München und Frankfurt sowie Lufthansa Cargo in Frankfurt, Juni 2021 – Oktober 2021, Quelle: Lufthansa.

Optimized Profile Descend (OPD)

Das OPD-Verfahren für Anflüge aus Süden nach Frankfurt wurde seit 2015 entwickelt und befindet sich seit 2016 in der betrieblichen Erprobung und Weiterentwicklung. Auf der sogenannten EMPAX-Anflugroute wird den Anflügen ermöglicht, kontinuierliche Sinkanflüge ab Verlassen der Reiseflughöhe bis Flughafennahbereich umzusetzen. Gemäß Abschätzung der DFS ergibt sich eine Sponsorsparnis pro Anflug von etwa 40 kg, das entspricht rund 125 kg CO₂. Bei mehr als 20.000 derartigen Anflügen in 2019 konnte auf Grundlage dieser Werte eine Einsparung von rund 2.500 Tonnen CO₂ erreicht werden.

Grenzen der (insbesondere gleichzeitigen) Optimierung von Steig- und Sinkflügen bestehen unter Hochlastbedingungen aus verschiedenen Gründen. Eine wesentliche Herausforderung ist die Konfliktfreiheit zwischen an- und abfliegendem Verkehr, wenn beide potentiellen Konfliktpartner ihre Steig- bzw. Sinkrate frei wählen können. Potentielle Konfliktpunkte im Flughafennahbereich München zeigt die Abbildung 10 (Flugzeugsymbole sind illustrativ eingebracht).

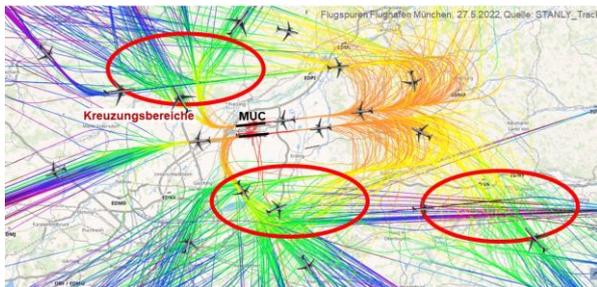


Abbildung 10: Flugverläufe am Flughafen München, 27. Mai 2022, Betriebsrichtung West, d.h. Landungen von Osten kommend. Quelle: DFS, STANLY_Track.

Rollführung am Flughafen

Seit 2007 arbeitet die DFS im Vorhaben A-CDM (Airport Cooperative Decision Making) daran, die Planung und Koordination von Anlasszeiten, Off-Block-Zeiten und Startzeiten zusammen mit den Fluggesellschaften und den Flughafenbetreibern zu optimieren. Die DFS hat ermittelt, dass seit Ersteinführung von A-CDM in München im Jahr 2007 rund 456.000 t CO₂-Ersparnis erreicht wurde. Etwa 50.000 t jährliche CO₂-Verringerung schätzt die DFS für alle aktuell sechs deutschen A-CDM-Flughäfen durch die optimierten Verfahren.

Relation zu anderen potentiellen Maßnahmen und Rolle der Systempartner

Luftverkehr ist ein komplexer, vielschichtig verzahnter Prozess. Eine umweltoptimierte Anpassung des Luftverkehrsmanagements und flugbetrieblicher Prozesse setzt die Mitwirkung vieler Prozessbeteiligter voraus. Es bestehen auch Verbesserungspotentiale, zu deren Erschließung die Luftraumnutzer selber in Federführung gehen können, z.B.:

Economic Fuel Tankering

„Fuel Tankering“ ist eine Praxis, bei der ein Flugzeug mehr Treibstoff mitführt als für den Flug benötigt wird, um eine Betankung auf dem Zielflughafen zu reduzieren oder zu vermeiden. Grund dafür sind z.B. hohe Treibstoffkosten am Zielflughafen. „Tankering“

erhöht den Treibstoffverbrauch und damit die Menge des ausgestoßenen CO₂ [22].

Gemäß Abschätzung von EUROCONTROL [23] wurde 2018 bei 21 % der Kurz- und Mittelstreckenflüge in Europa Tankering betrieben, was für die Fluggesellschaften in dem Jahr eine Nettoeinsparung von 265 Mio. EUR bedeutete, aber 286.000 Tonnen zusätzlichen Treibstoff verbrannte, d.h. 0,54 % des gesamten in Europa verbrauchten Kerosins. Dabei entstanden über 900.000 Tonnen CO₂ [23]. Seitens der Airlines stehen derzeit keine belastbaren Zahlen zur Verfügung, in welchem Maße Tankering in Europa durchgeführt wird, aus welchen Gründen und welcher Trend sich über der Zeit in Verbindung mit veränderten Treibstoffkosten ergibt.

Untersuchungen zeigen außerdem, dass mit steigendem SAF-Anteil (Sustainable Aviation Fuel) am Treibstoff und damit verbundenen Mehrkosten im Jahr 2035 fast 80 % der internationalen Flüge von und nach EU-Flughäfen „Tankering“ durchführen könnten. Potentielle Folge wäre eine Reduktion des SAF-Absatzes auf EU-Flughäfen und Reduktion der erwarteten CO₂-Emissionsvorteile um etwa ein Viertel [24]. Angesichts dieser Effekte wäre eine prinzipielle und ggf. wirksame Option, ATM-Mechanismen so anzupassen, dass ökonomisches Tankering zu niedriger Priorität in Verkehrsflusssteuerungen und z.B. Outboundprozessen führt – im Gegenzug könnten Flugzeuge mit einem hohen Anteil an SAF und ohne Tankering entsprechend bevorzugt behandelt werden. Der Rechtsrahmen dafür müsste noch entwickelt werden.

Gebühreninduzierte Flugwegverlängerung

Während auf der einen Seite die freie Wählbarkeit direkter bzw. optimaler Routenführungen im Fokus der ATM-Entwicklung in Europa steht, ist andererseits in Untersuchungen durch EUROCONTROL feststellbar, dass Airlines nicht zwingend die kürzeste Flugroute wählen. Vielmehr ist ebenfalls ein Kriterium bei der Flugplanung, welche Kosten durch die Flugsicherungsgebühren auf dem Weg entstehen. Da diese in Europa von Staat zu Staat variieren, können durch Vermeidung von „Hochpreisgebieten“ und moderater Verlängerung des Flugweges u.U. im Saldo Flugkosten reduziert werden.

Simulationen von EUROCONTROL zeigen, dass trotz Flugwegverlängerung (+11,1 NM) und damit verbundenen Mehrverbrauch und -emission (+50 kg Kerosin, +159 kg CO₂) mit einer Flugroute, die die hochpreisigen Lufträume der Niederlande und Belgiens ausspart, günstigere Flugbetriebskosten erreicht werden können (Abbildung 11).



Abbildung 11: Illustration der Änderung der auf Flugsicherungsgebühren billigsten Flugrouten von 2021 zu 2022 am Beispiel der Verbindung EKBI-LEBL (Billund-Barcelona), Quelle: EUROCONTROL.

Gemäß EUROCONTROL sind gebührenkostenoptimierte Flugrouten in Europa gebräuchlich, insbesondere zu verkehrsschwachen Zeiten. Folge sind betrieblich unnötige Flugwegverlängerungen und (teilweise nicht prognostizierbare) Änderungen von Flugströmen von Jahr zu Jahr in Abhängigkeit der länderbezogenen Gebührenentwicklungen.

Um derartige Planungen und die damit verbundenen umweltrelevanten Auswirkungen zu vermeiden, kann eine Harmonisierung der Flugsicherungsgebühren sinnvoll sein. Bisher sind Ansätze dazu gescheitert, ein Grund dafür kann darin bestehen, dass eine Harmonisierung zwar einem Anteil der Fluggesellschaften verminderte Betriebskosten brächte (insbesondere in Zentraleuropa), einem anderen Anteil jedoch deutliche Kostensteigerungen. EUROCONTROL schätzt letztere auf bis zu 70 Millionen EUR jährlich pro Airline [25]. Es bestehen keine Pläne für Ausgleichsmechanismen, um diese potentiellen Effekte bei einer „Common Unit Rate“ zu kompensieren.

Beide Beispiele machen deutlich, dass auch den Luftraumnutzern selber eine signifikante Rolle zukommt, bestehende Optimierungspotentiale zu heben. Sie haben darüber hinaus auf vielfältige Weise die Möglichkeit, die Flugsicherungen bei ihren umweltbezogenen Initiativen zu unterstützen, z.B. durch

- einzelflugbezogene Messung von Treibstoffverbräuchen
- Lieferung flugbetrieblich relevanter Informationen (z.B. aktuelle Abflugmassen, Cost Index)
- Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durch Beratung, Daten, Flugversuche

- langfristige Unterstützung neuartiger Flugführungskonzepte, die einen umfangreichen Datenaustausch Bord-Boden in Echtzeit voraussetzen [ADS-C EPP (Automatic Dependent Surveillance Contract - Extended Projected Profile) u.a.]

Technische Enabler

Derzeitige Projekte zur umweltbezogenen Optimierung kommen größtenteils ohne nennenswerte technische Änderungen am Lotsenarbeitsplatz, im Cockpit oder im Datenaustausch Bord-Boden aus. Als eine der Ausnahmen könnten Arrival-Management-Systeme gelten: Im Projekt XMAN (Extended Arrival Management System) wurde im Bereich des FABEC eine systemgestützte und optimierte Koordinierung und Synchronisierung der Anflugströme zu den verkehrsreichsten Flughäfen umgesetzt. Durch die damit erreichte Verkürzung von Anflugwegen errechnete die DFS eine jährliche CO₂-Ersparnis von bis etwa 110.000 bis 215.000 Tonnen innerhalb des FABEC-Luftraums.

Folgende Assistenzsysteme könnten beispielsweise umweltgerechtere Flugführungen unterstützen:

- Informationssystem für Fluglotsen, das KI-gestützt die verbleibende Restflugstrecke bis zum Endanflug berechnet und damit eine CDO-konforme Vertikalführung unterstützt
- Prognosesysteme, die den Beginn des Startlaufs sowie die 4-D-Abflugtrajektorie von Einzelflügen berechnet und damit den Lotsen unterstützt, CDO-konforme Anflüge zu CCO-konformen Abflügen zu staffeln
- Assistenzsystem zur Optimierung der tatsächlichen Abstände auf dem Endanflug unter Berücksichtigung des herrschenden Windfelds – Forschungsarbeiten dazu hat die DFS im Projekt FUTURE („Fluglotsenunterstützung Endanflug“) durchgeführt das 2022 abgeschlossen wurde. Als Nutzen einer derartigen Lotsenassistenz konnte eine Verkürzung von Flugwegen in der TMA beobachtet werden.
- Informationssystem für Fluglotsen, um eisgesättigte Lufträume zu vermeiden – inkl. Empfehlungen einer alternativen Führung unter Berücksichtigung einzelflugbezogener Verbräuche und Emissionen. (Vorarbeiten dazu finden aktuell im LuFo-Vorhaben D-KULT statt [5].)

Die für diese Systeme nötigen Daten liegen teilweise der Flugsicherung nicht vor und müssten in Echtzeit und in ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen.

Langfristig ist zu erwarten, dass eine Verbesserung des Datenaustauschs zwischen Bord und Boden auch umweltgerechtere Flugführungen unterstützen kann. Allerdings ist bei maßgeblichen Entwicklungen (z.B. ADS-C EPP) nicht mit einer Einsatzreife bezogen auf die weltweite Luftverkehrsflotte in den nächsten 5 – 10 Jahren zu rechnen. Umso wichtiger scheint, den „Early Adoptern“ im Sinne eines „Best equipped, best served“-Prinzips zu begegnen. Entsprechende betriebliche Konzepte dafür sind noch zu erstellen. Ähnlich verhält es sich mit dem avisierten digitalen, latenzfreien, kombinierten Sprach-Datenaustausch zwischen Bord und Boden, mit dessen betrieblichem und flächendeckenden Einsatz nicht vor 2035 gerechnet werden kann.

Mittelbar kann eine weitergehende Automatisierung der Flugverkehrskontrolle über die damit angestrebte Workloadreduktion zu einem höheren Anteil an umweloptimierten Flugführungen beitragen (siehe Abbildung 12). Die durch die Arbeiterleichterung bei den Fluglotsen erschlossenen kognitiven Potentiale können genutzt werden, um Einzelflügen umweltgerechtere Flugpfade anbieten zu können.

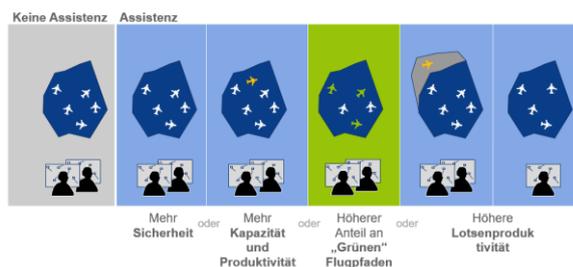


Abbildung 12: Schematische Darstellung, in welcher Weise eine Workloadreduktion durch Lotsenassistenz genutzt werden kann.

In Realzeitsimulationen gemessen wurde dieser Effekt in dem DLR-Projekt AcListant (Active Listening Assistant), unter Beteiligung von DFS-Approachlotsen. Durch Nutzung von Spracherkennung zur Dokumentation von Freigaben anstelle händischer Eingaben an einem simulierten Lotsenarbeitsplatz für die Anflugkontrolle Düsseldorf zeigte sich eine durchschnittliche Anflugverkürzung von 77 Sekunden, was einem Minderverbrauch von 40 bis 52 kg Kerosin pro Anflug gleichgesetzt wurde [26].

Ausblick

In den letzten Jahren wurden viele Anstrengungen unternommen, Luftverkehr energieeffizienter und umweltgerechter zu führen. Teils in regional bezogenen Projekten, teilweise im großen Maßstab und in grenzüberschreitender Zusammenarbeit. Die

zielgerichtete Fortführung dieser Aktivitäten ist eine Aufgabe von wachsender Relevanz für das Luftverkehrsmanagement. Als Fokus bietet sich dabei die weitere Verbesserung der vertikalen Flugeffizienz an. Die Zusammenarbeit zwischen den Prozesspartnern – namentlich Flugsicherung und Airlines – ist in diesen Entwicklungen essenziell.

Das Ziel einer Klimaneutralität kann zwar mit diesen Optimierungen nicht maßgeblich unterstützt werden. Bei angenommenen 3% Verkehrswachstum wäre eine Verminderung der spezifischen CO₂-Emissionen pro Flug von z.B. 6% bereits nach rund 2 Jahren hinsichtlich der absoluten CO₂-Emission kompensiert. Allerdings stellen diese Entwicklungen einen wichtigen Baustein dar, um überhaupt die offenbar trotz der Corona Pandemie global weiterwachsenden CO₂-Emissionen der Luftfahrt in einem ersten Schritt und ohne nennenswerten, ggf. disruptiven Technologieeinsatz begrenzen helfen zu können.

Ob angesichts absehbarer Wachstumsszenarien ohne eine zahlenmäßige Deckelung des weltweiten Luftverkehrs in den nächsten 15 Jahren eine Reduktion der absoluten Emissionswerte in der Luftfahrt möglich wird, scheint selbst bei Annahme einiger sehr ambitionierter Optimierungspotentiale im laufenden Betrieb fraglich.

Dessen unbenommen genießt selbst bei neuartigen Flugzeugen (z.B. mit Wasserstoffantrieb oder elektrisch betrieben) eine klimaoptimierte Trajektorie im Flugbetrieb eine hohe Relevanz, da sie neben der Umwelt- und Kostenrelevanz auch eine Bedeutung für sicher planbare Reichweiten hat. Energieeffizient zu fliegen wird aus diesem Grund auch mit „grünen“ Antrieben ein wichtiges Ziel bleiben – unter Einschluss aller ATM-Prozesse.

Im Rahmen dieser weiteren betrieblichen Optimierungen besteht zum einen ein deutlicher Verbesserungsbedarf in der realistischen Abschätzung, welche flugbetrieblichen Potentiale in welchen Flugphasen noch erschlossen werden können. Hier braucht es einen gemeinsamen, einvernehmlichen Blick aller Prozesspartner und Interessengruppen auf Basis nachvollziehbarer Zahlen – in ganz Europa, denn rund neun von zehn Flügen überfliegen mindestens eine Ländergrenze.

Zum anderen zeigt sich sehr deutlich, dass es an der einzelflugbezogenen Messung von Verbesserungen mangelt. Nur konkrete Messungen können bei der Abschätzung helfen, wieviel von den (einvernehmlich ermittelten) Potentialen durch einzelne Maßnahmen tatsächlich gehoben worden sind – inwieweit sich

Effekte unterschiedlicher Maßnahmen addieren oder ggf. gegenseitig kompensieren - und wieviel Potential noch verbleibt. Angesichts der geringen Einsparungen pro Flug können diese Daten vielfach nicht über Simulationen erfasst werden, da Simulatoren – selbst, wenn sie mit Messwerten aus Flugversuchen kalibriert sind – ggf. nicht die erforderliche Genauigkeit bieten und in den meisten Fällen wesentliche Parameter nicht berücksichtigen (CI, Power-setting, Klappensetzung, FMS-Eingaben (Flight Management System), aktuelle Flugzeugmasse, Windfeld). Die erforderlichen, maßnahmenbegleitenden Messungen sollten einem mindestens europäisch oder auf FAB-Ebene (Functional Airspace Block) abgestimmten Muster folgen und allen europäischen Prozesspartnern im Luftverkehr zur Verfügung stehen.

Dieser Artikel beruht auf einem Vortrag beim 71. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022 - DLRK 2022, veranstaltet von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DGLR und erscheint auch im Tagungsband.

Abkürzungsverzeichnis

A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
AcListant	Active Listening Assistant
ADS-C EPP	Automatic Dependent Surveillance Contract - Extended Projected Profile
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management
CCO	Continuous Climb Operation
CDO	Continuous Descent Operation
CFMU	Central Flow Management Unit
CI	Cost Index
COBRA	Projekt "Cooperative Optimisation of Boundaries, Routes and Airspace"
DFS	DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
D-KULT	Projekt „Demonstrator Klima- und Umweltfreundlicher Lufttransport“
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EU	Europäische Union
FAB	Functional Airspace Block

FABEC	Functional Airspace Block European Central
FL	Flight Level
FMS	Flight Management System
FRA	Free Route Airspace
FRAMaK	Projekt "Free Route Airspace Maas-tricht and Karlsruhe"
FUA	Flexible Use of Airspace
FUTURE	Projekt „Fluglotsenunterstützung Endanflug“
HFE	Horizontal Flight Efficiency
IATA	International Air Transport Association
KI	Künstliche Intelligenz
KPA	Key Performance Area
KPI	Key Performance Indicator
LDC	Low Demand Concept
LuFo	Luftfahrtforschungsprogramm
MVPA	Military Variable Profile Area
NM	Network Manager ODER Nautical Miles
OPD	Optimized Profile Descend
R&D	Research & Development
RECAT	Wake Turbulence Recategorization
RNP-1	Required Navigation Performance Level 1
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SECSI	Southeast Europe Common Sky Initiative Free Route Airspace
TBS	Time Based Separation
TMA	Terminal manoeuvring Area
TOD	Top of Descent
TRA	Temporary Restricted Area
XMAN	Extended Arrival Management System

Referenzen

- [1] Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S. J., Freeman S., Forster P. M., Fuglestedt J., Gettelman A., DeLeon R. R., Lim L. L., Lund M. T., Millar R. J., Owen B., Penner J. E., Pitari G., Prather M. J., Sausen R. and Wilcox L. J. (2020) "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018."
- [2] Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> abgerufen 4.9.2022.
- [3] Ritchie, H., "Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?", Our World in Data, <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation> abgerufen 2.9.2022.
- [4] EASA-Report (2020). Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Arrowsmith et al, 23.11.2020.
- [5] Leemüller, R., „Von der Forschung zur Inbetriebnahme am Beispiel von klimaoptimierten Flugrouten“, Beitrag zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022.
- [6] IATA Aircraft Technology Roadmap 2050, <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/Technology-roadmap-2050.pdf> abgerufen 2.9.2022.
- [7] Umweltbundesamt, „Umweltschonender Luftverkehr lokal – national – international“, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-06_texte-130-2019_umweltschonender_luftverkehr_0.pdf abgerufen 4.9.2022.
- [8] EUROCONTROL Think Paper #16 - Reducing aviation emissions by 55% by 2030, <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-16-reducing-aviation-emissions-55-by-2030> abgerufen 4.9.2022.
- [9] EASA European Aviation Environmental Report 2019, https://www.easa.europa.eu/eco/sites/default/files/2021-09/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HIRES_190311.pdf abgerufen 5.12.2022.
- [10] Crawford, K., EUROCONTROL Network Management Operations Centre <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/ACAO-ICAO%20ATFM%20Workshop/1.3.1-%20EUROCONTROL%20Experience.pdf> abgerufen 4.9.2022.
- [11] EUROCONTROL, Central Flow Management Unit (CFMU) Creation <https://skybrary.aero/articles/central-flow-management-unit-cfmu> abgerufen 4.9.2022.
- [12] DFS Mobilitätsbericht (2021) Luftverkehr in Deutschland. Mobilitätsbericht 2021 <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/luftverkehr-in-deutschland-mobilitaetsbericht-2021.pdf?cid=gvb> abgerufen 4.9.2022.
- [13] Buxbaum, J., Einbindung des Luftverkehrs in intermodale Reisen, Internationales Verkehrswesen, 9/2022.
- [14] Performance Review Report 2007, EUROCONTROL, 2008 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/prr-2007.pdf> abgerufen 4.9.2022.
- [15] Buxbaum, J., „Leistungskennzahlen der Flugsicherung und ihre Wechselwirkung“, DLR Kolloquium Flugführung 2015 https://www.kolloquium-flugfuehrung.de/wp/wp-content/uploads/2015/02/2015-02-24_Leistungskennzahlen.pdf abgerufen 12.8.2022.
- [16] Pressemitteilung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, „DFS kooperiert mit Eurocontrol bei der Optimierung von grenznahen Lufträumen“, 16.11.2021.
- [17] EUROCONTROL, "Free Route Airspace" <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace> abgerufen 4.9.2022 .
- [18] Renewable Carbon News (2020) "Can the European Union's kerosene demand be met by the amount of biomass produced in the EU?" <https://renewable-carbon.eu/news/can-the-european-unions-kerosene-demand-be-met-by-the-amount-of-biomass-produced-in-the-eu/> abgerufen 5.12.2022.
- [19] AviationInfo.net, "A320 Fuel Burn Per Hour | Airbus A320 Fuel Consumption" <https://aviationinfo.net/a320-fuel-burn-per-hour-airbus-a320-fuel-consumption/> abgerufen 4.9.2022.
- [20] Pressemitteilung Austro Control, 4.3.2022 https://www.austrocontrol.at/unternehmen/medien/presse__news/detail/fab_ce_-_fabec_-_erweiterung_des_grenzueberschreitenden_freien_luftraums_fuer_einen_klimaschonenden_flugverkehr#:~:text=Die%20neue%20grenz%C3%BCberschreitende%20Schnittstelle%20wird,M%C3%A4rz%202022
- [21] ICAO, „Continuous Descent Operations Manual“, 2010, https://applications.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/102600063919931_en.pdf abgerufen 4.9.2022.

- [22] EUROCONTROL Think Paper #1 “Fuel Tankering: economic benefits and environmental impact” <https://www.eurocontrol.int/publication/fuel-tankering-european-skies-economic-benefits-and-environmental-impact> abgerufen 4.9.2022.
- [23] EUROCONTROL Think Paper #10 “Flying the ‘perfect green flight’: How can we make every journey as environmentally friendly as possible?” <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-10-flying-perfect-green-flight> abgerufen 5.12.2022
- [24] Tabernier, L., Deransy, R. (EUROCONTROL), Rutherford, D., (ICCT), “Economic Fuel Tankering: A Threat to Aviation Decarbonisation”, ICAO Environmental Report, 2021.
- [25] EUROCONTROL Think Paper #18 “One size fits all – A common unit rate for Europe?”, 6.9.2022.
- [26] Helmke, H., Ohneiser, O., Buxbaum, J., Kern, C., “Increasing ATM Efficiency with Assistant Based Speech Recognition”, Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017).

EELA – Energy-Efficient Landing Approaches: Entwicklung energieeffizienter Landeanflüge

T. Albrecht, J. Buxbaum, M. Poppe, S. Flämig*, M. Graefenhan* & W. Schiffmann* (*FernUni Hagen)

Zusammenfassung

Durch kontinuierliche Sinkflüge bei geringer Triebwerksleistung können bei Anflug und Landung von Verkehrsflugzeugen sowohl Treibstoff als auch klimaschädliche CO₂-Emissionen eingespart werden. Gleichzeitig verringern sich auch die Lärmemissionen für die Anwohner der Flughäfen. Im vorliegenden Beitrag wird ein neues Verfahren zur Berechnung der Anflugrouten unter Berücksichtigung des Windeinflusses vorgestellt das in Abstimmung mit der DFS an der FernUniversität in Hagen (FU) entwickelt wurde. Dabei wird ein ursprünglich für Gleitflüge nach Triebwerksausfällen entwickeltes Verfahren zur Verwendung bei Continuous Descent Operations (CDO) weiterentwickelt. Neben dem Verfahren wird der EELA-Ansatz aus Sicht der DFS eingeordnet und bewertet.

Einleitung und bisherige Arbeiten

Ein vollständiger Triebwerksausfall ist für Piloten eine extreme Belastungssituation. Unter großem Zeitdruck müssen sie in der Regel nicht revidierbare Entscheidungen treffen, die existenzielle Bedeutung für Passagiere und Besatzung haben. Die Piloten müssen trotz unvollständiger Informationen über die aktuelle Situation intuitiv eine Flugroute wählen, die das antriebslose Flugzeug so leitet, dass es passgenau in der richtigen Abfanghöhe am Beginn eines geeigneten Notlandeplatzes oder der Landebahn eines nahegelegenen Flugplatzes ankommt.

Seit Ende 2016 werden am Lehrstuhl Rechnerarchitektur geeignete Notlandeassistenzenverfahren entwickelt, die Piloten in einer solchen Situation bestmöglich unterstützen sollen. Ein zentraler Punkt ist, dass Flugzeuge im Gleitflug dem Windversatz ausgesetzt sind und diesen nur durch Abflug einer geeigneten Flugroute kompensieren können. Die klassische Berechnung solcher Routen basiert auf sogenannten Dubins-Pfaden [1] und ist aufgrund des Windes sehr komplex, wenn hierbei das Erdbezugssystem zugrunde gelegt wurde. An der FU Hagen wurde 2017 das sogenannte Moving Target-Prinzip entwickelt, das durch einen Wechsel ins Windbezugssystem einen signifikanten Geschwindigkeitsgewinn erzielt [2]. Für die bekannte Notwasserung des US Airways-Fluges 1549, bei dem Kapitän Sullenberger einen Airbus A320 im Jahr 2009

nach einem (fast) vollständigen Triebwerksausfall in den Hudson River steuerte [6], kann auf einem einfachen Tablet-PC in nur zwei Millionstel Sekunden berechnet werden, über welche Route eine sichere Rückkehr zum Flugplatz La Guardia möglich gewesen wäre [2]. Mit dem mittlerweile um eine benutzerfreundliche Aktionsanzeige erweiterten Assistenzsystem konnte im Jahr 2020 eine Person ohne große Flugerfahrung sogar ein Kleinflugzeug mit simuliertem Triebwerksausfall präzise bis über die Landbahnschwelle steuern. Nur das eigentliche Ausschweben und Aufsetzen wurde dann von einem Fluglehrer übernommen. Weitere Erprobungen in realen Flugzeugen und Flugsimulatoren haben gezeigt, dass das Assistenzsystem schnell und zuverlässig den Gleitpfad bei Triebwerksausfall ermitteln kann. Sogar kleinere Abweichungen des Piloten von der berechneten Route oder fehlerhafte Windschätzungen können von der entwickelten Safe2Land-App permanent nachgezogen werden.

Schnell wurde klar, dass sich die App auch zur Planung einer energieeffizienten Anflugroute eignet. Versuche im Flugsimulator zeigten jedoch, dass aufgrund der großen Überschusshöhe zwischen Reiseflug und Landbahnschwelle eine feingranulare Modellierung der Flugdynamik erforderlich ist. Durch die variable Luftdichte als Funktion der Höhe ändern sich die Beziehung zwischen angezeigter und wahrer Flugeschwindigkeit und damit auch die Gleiteigenschaften im Geradeaus- und Kurvenflug. Ebenso ändern sich die Windverhältnisse, und Fehler können sich über den längeren Zeitraum des Gleitfluges aufsummieren.

Energieeffiziente Anflüge werden üblicherweise als Continuous Descent Operations (CDO) bezeichnet. Der Begriff entstammt dem ICAO-Dokument DOC 9931 [7]. Gemäß DFS-interner Definition bezeichnet CDO eine durch Luftraum- und Verfahrensgestaltung sowie Flugverkehrskontrolle ermöglichte Betriebstechnik, bei der ein anfliegendes Luftfahrzeug vor dem Endanflugfix bei minimalem Triebwerksschub so weit wie möglich kontinuierlich sinkt. Ein CDO-Anflug endet im Regelfall mit Erreichen des obligatorischen 3°-ILS-Gleitpfades.

Seit etwa 20 Jahren gibt es für unterschiedliche Flughäfen in Deutschland Entwicklungen zur Umsetzung und es bestehen zahlreiche, örtliche CDO-

Verfahren [7]. Bei der Entwicklung werden mehrere Strategien verfolgt. Zum einen kann über eine geeignete individuelle Kursführung in Verbindung mit einer passenden Sinkfluggestaltung ein CDO-Anflug umgesetzt werden. Ein derartiges Verfahren wurde 2013 am Flughafen Frankfurt in den Regelbetrieb überführt und ermöglicht insbesondere zu verkehrsschwachen Zeiten einen hohen Anteil CDO-konformer Anflüge [26]. Entwickelt wurden ebenfalls Lösungen, die feste, bordseitig programmierbare Routenführungen mit definierten Höhenvorgaben oder Höhenfenstern verbinden (SESAR-Projekt Optimised Descent Profile). Dort wurden mehr als 30 Anflugprofile auf neun Flughäfen in Europa analysiert (u.a. München, Frankfurt, Berlin-Tegel und Stuttgart) - und Verbesserungen erarbeitet, die bei den rund 11.000 testweisen Anflügen in Summe zu knapp 90 Tonnen Treibstoffreduktion führten [4].

Auf Seite der Flugsicherung muss sichergestellt werden, dass sich auf den Routen keine weiteren Flugzeuge in kritischer Nähe befinden oder den entsprechenden Flugweg kreuzen. Bei CDO liegt die Besonderheit darin, dass die vom Lfz erflogene Höhe innerhalb eines größeren Toleranzbereiches liegt und damit schlechter vorhersehbar ist als bei Sinkflügen mit vorgegebener Rate. Die Anwendung dieses Verfahrens an Flughäfen mit hohem Verkehrsaufkommen stellt deswegen eine besondere Herausforderung dar. Es bestehen derzeit keinerlei Möglichkeiten, CDO-konforme „Transitions“ lateral flexibel zuzuweisen, um damit die gleichzeitige Konfliktfreiheit zu anderen Anflügen oder Abflügen sicherzustellen.

Für den Flughafen Frankfurt wurde 2015 ein CDO-Anflugverfahren entwickelt und erprobt, das als Ziel die Freigabe der Anflüge ab Reiseflughöhe hat. Beim „High Transition Operations“ (HTO) genannten Verfahren fliegt das Luftfahrzeug selbstständig sein optimiertes Profil innerhalb eines vertikalen Korridors bis zur Übernahme durch den Approach in Frankfurt [27].

Auch seitens der Flugzeughersteller gibt es Projekte und Produkte, um treibstoffsparende und lärmarme Anflüge zu unterstützen. So bietet Airbus für die A320-Flotte eine Flight Management System (FMS)-gestützte „Descent Profile Optimisation“-Funktion an. Diese Funktion soll Flugzeugen ermöglichen, den Sinkflug zum richtigen Zeitpunkt einzuleiten, um ineffiziente 'Level-off'-Phase am Ende des Sinkflugs zu minimieren [10].

Von der Deutschen Luft- und Raumfahrt Gesellschaft (DLR) wurde in Zusammenarbeit mit europäischen Luftfahrtgesellschaften das Low Noise Augmen-

tation System (LNAS) entwickelt und an verschiedenen Flughäfen wie Frankfurt und Zürich getestet [11]. LNAS unterstützt die Piloten vor allem dabei, beim Landeanflug eine lärmarme Konfiguration des Flugzeugs zu wählen - der Einsatz von Bremsklappen soll möglichst vermieden werden. Dabei werden gleichzeitig auch Treibstoffverbrauch und CO₂ Emissionen reduziert. Im Gegensatz zu EELA beginnen die CDO bei LNAS erst ab 7000 ft über der Landebahn. Grundsätzlich könnten die CDO aber schon aus der Reiseflughöhe beginnen, allerdings erfolgt bei LNAS ein geradliniger CDO und der Windeinfluss wird nicht berücksichtigt.

Für das hier vorgestellte EELA-System sollte von Anfang an eine möglichst enge Kooperation zwischen der FernUniversität in Hagen und der DFS erfolgen, um die Möglichkeiten und Grenzen seines Einsatzes frühzeitig auszuloten. Insbesondere muss stets beachtet werden, dass nicht nur Energieeffizienz, sondern jederzeit auch die Flugsicherheit gewährleistet werden. In einem vom Land NRW geförderten Progres-Projekt wurden daher zwischen 2020 und 2021 alle Entwicklungen an der FernUniversität in regelmäßigen (virtuellen) Treffen mit der DFS abgestimmt. Dieses Papier fasst den aktuellen Stand zusammen.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über Verfahren zur Anflugkontrolle gegeben. Dann wird dargestellt, wie die ursprünglichen Bahn-berechnungsverfahren auf Basis sogenannter Dubins-Pfade modifiziert wurden, um die o.g. Probleme zu lösen. Die völlig neu entwickelte Methode der kinematoiden Ketten erlaubt es nun auch für sehr lange Gleitanflüge (CDO) den Top of Descent (ToD) zu ermitteln und ab diesem Punkt kontinuierlich sinkend zum Final Approach Fix (FAF) zu gleiten.

Arbeitsweisen der Anflugkontrolle

An hochfrequentierten Flughäfen wird der Verkehr über standardisierte Flugrouten und flexible Eindrehpunkte zur Landebahn geführt. Für eine optimale Auslastung der Anflugkapazität werden Anflüge vom Gegenanflug (parallel und entgegen der Landerichtung) zum passenden Zeitpunkt nacheinander auf den Endanflug gedreht.

Eine Reduzierung von Lärmemission und Treibstoffverbrauch wird dabei dadurch erreicht, dass Fluglotsen den anfliegenden Maschinen möglichst konstante Sinkflüge anweisen, was je nach Verkehrsbelastung und ICAO-Vorgaben gut oder weniger gut umsetzbar ist. Auch über geeignete Geschwindigkeitsvorgaben kann die Lärmemission begrenzt werden.

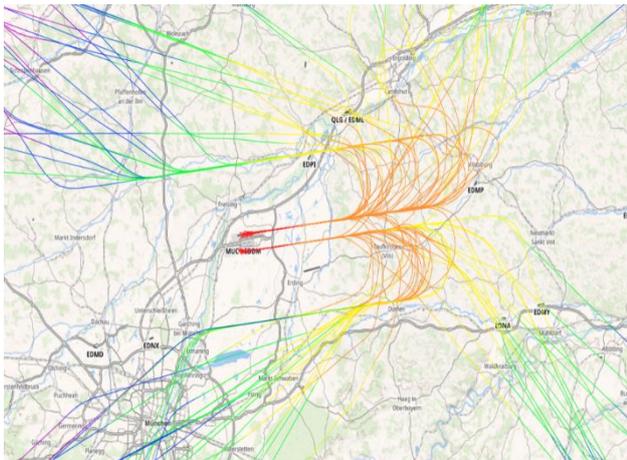


Abbildung 1: Anflüge auf den Flughafen München, 16.2.2022. Quelle: STANLY_Track3 (dfs.de).

Bedingt durch Faktoren wie ICAO-Vorgaben, paralleler Verkehr, Stafflungsart (Verfahrens- oder laterale- bzw. vertikale Stafflung), Arbeitsweisen und verwendeter Anflugart, ist die Definition des optimalen Endpunkts für den EELA-Sinkflug nicht trivial. Aktuell wurde zur Vereinfachung der FAF als Endpunkt definiert, auch wenn in der Praxis dieser Punkt voraussichtlich in größerer Distanz zur Landebahn verlegt werden muss.

Simulationen bei der TU Dresden für einen Airbus A320 haben gezeigt, dass ein kontinuierlicher Sinkflug im Vergleich zu einem herkömmlichen Sinkflug Kerosineinsparungen in der Größenordnung von 100 kg bringen kann [28].

Arrival Manager

In der Anflugkontrolle der DFS sind Arrival Manager (AMAN) in Betrieb, die Anflugsequenzen und Zielzeiten für die Metering-Fixe (z.B. Punkte für Halteverfahren) und die Landebahnschwelle vorgeben.

Die Ermittlung von AMAN-Reihenfolge und -Zielzeiten erfolgt auf der Basis geschätzter Flugzeiten von der jeweils aktuellen Flugzeugposition bis zu den Zielpunkten Metering-Fix oder der Landebahnschwelle. Berechnungsgrundlage sind hinterlegte Durchschnittsanflugwege.

Zur Beschreibung der Situation verwendet der Planungsalgorithmus den Flugfortschritt, die Holdingsituation, die auf dem Endanflug etablierte Sequenz sowie Lotseneingaben.

Ein adaptives Anflugplanungssystem erkennt außerplanmäßige Führungen von Anflügen und passt Reihenfolge und Zielzeiten an neue Situationen an. Die Berechnung einer plausiblen Reihenfolge ist die

wichtigste Aufgabe der Anflugplanung [13]. Die Unterstützung von CDO-Anflügen sehen DFS-AMAN-Systeme nicht vor.

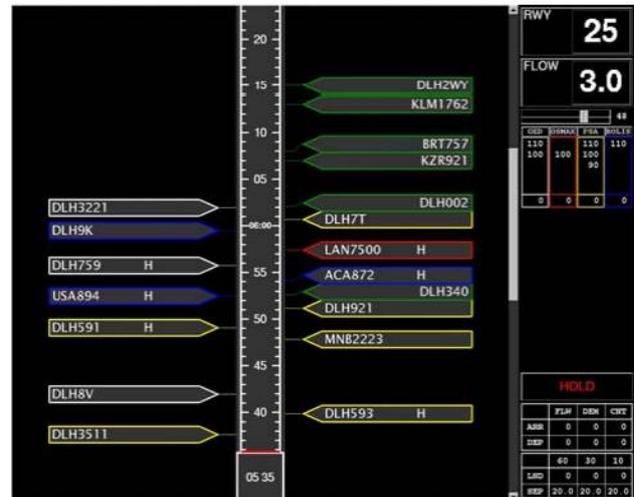


Abbildung 2: Approach AMAN-Planungsdisplay.

Rolle von ICAO-Vorgaben

Gemäß ICAO-Vorgaben soll für Anflüge ein Teilstück von mindestens 2 NM Länge als Horizontalflug vorgesehen werden [14], um das Flugzeug auf dem Landekurs zu etablieren und zu stabilisieren. In der DFS wird diese Vorgabe gem. BA-FVM [15] konkretisiert. Dieses Element kann bei entsprechender Vorplanung auch genutzt werden, um Geschwindigkeit abzubauen. Damit entfällt der Bedarf, in dieser Phase zusätzlichen Schub zu geben.

An Flughäfen mit mehreren parallelen Landebahnen muss - abhängig vom Bahnabstand - für die Nutzung von unabhängigen, parallelen ILS-Anflügen zusätzlich 1 NM Horizontalflug auf dem letzten Steuerkurs vor Erfliegen den Landekursenders gewährleistet werden [16]. Daher wird bei parallelen Anflügen meist ein längeres Horizontalflugsegment auf dem Queranflug nötig, bis eine Verfahrensstafflung durch die Landekursender die Höhenstafflung ersetzt.

EELA mittels kinematoider Ketten

Die meisten Arbeiten, welche sich mit der Berechnung von Gleitflugtrajektorien beschäftigen, basieren auf Dubins-Pfaden [5]. Dieses von L.E. Dubins 1957 entwickelte Verfahren erzeugt bis zu sechs verschiedene Pfade von einer Ausgangs- zu einer Zielposition. Eine Position ist dabei durch die X- und Y-Koordinate und das Heading definiert. Jeder dieser sechs Pfade besteht aus drei elementaren Abschnitten, welche entweder Links- oder Rechtskurven (jeweils mit konstantem Radius) oder eine Gerade (nur als mittlerer Abschnitt erlaubt) sind.

Der kürzeste dieser sechs Pfade stellt immer auch den kürzesten möglichen Weg dar.

Prinzipiell lässt sich das von Dubins gelöste Problem auf die Modellierungen eines CDO übertragen. Wir suchen dann nicht die kürzeste Verbindung zwischen zwei Positionen, sondern den Startpunkt einer Trajektorie gegebener Länge, die diesen mit einem Endpunkt verbindet. Der Startpunkt ist der Beginn des Gleitfluges (top of descent, TOD), der Endpunkt der final approach fixe (FAF). Die Länge der Trajektorie wird durch die Höhe des Flugzeuges, dessen Gleitverhalten sowie atmosphärische Bedingungen (Luftdichte, Wind) bestimmt.

Da Dubins-basierte Ansätze die Trajektorie als eine Abfolge von wenigen (meist drei) Abschnitten modellieren, gehen die meisten Ansätze davon aus, dass Eigenschaften der Trajektorie (z. B. IAS, TAS, Rollwinkel) und der Umgebung (z. B. Windrichtung und -geschwindigkeit, Luftdichte) innerhalb dieser Abschnitte konstant sind. Diese Vereinfachung kann bei kurzen Gleitflügen aus geringer Höhe, wie sie für Notlandungen in der GA typisch sind, noch toleriert werden. Für CDO über Distanzen von mehr als 100 NM und Höhendifferenzen von mehreren zehntausend Fuß ist dieser Ansatz jedoch nur noch sehr bedingt geeignet.

Es wurde deshalb ein auf kinematischen Ketten basierendes Verfahren entwickelt. Die gesamte Trajektorie wird dabei intern als eine Folge von vielen Teilabschnitten (mehrere hunderte bis tausende) modelliert. Für jeden dieser Abschnitte werden Parameter wie Geschwindigkeiten, Schräglage, Luftdichte, Windvektoren einzeln und jeweils unter Beachtung des Flugdynamischen Modells (FDM) des zu modellierenden Luftfahrzeugs berechnet. Die Gleitzahl kann sich z.B. aufgrund schwankender Leerlaufleistung ändern. Dabei erfolgt ausgehend von einer initialen Gleitzahl für das Luftfahrzeug eine permanente Anpassung der Gleitzahl anhand der aktuellen Sensordaten. Diese Folge von Zuständen bildet eine zusammenhängende Kette, ähnlich einer kinematischen Kette in der Robotik. Um eine Trajektorie auf diesen Grundlagen zu berechnen, kann auf Verfahren aus der Kinematik, insbesondere zum Lösen des inversen kinematischen Problems, zurückgegriffen werden. Da elementare Eigenschaften kinematischer Ketten aufgegeben bzw. modifiziert werden, nennen wir die Struktur kinematoide Kette. Die Details des Berechnungsalgorithmus würden den Umfang dieses Beitrags sprengen und es wird dazu auf eine demnächst erscheinende Publikation der FernUni-Arbeitsgruppe verwiesen [17].

Mit diesem Verfahren können Anflüge über große Höhenbereiche mit den damit einhergehenden Veränderungen der Luftdichte und der sich daraus ergebenden Änderung des Verhältnisses von IAS zu TAS ebenso präzise modelliert werden wie komplexe Windverhältnisse. Die Berücksichtigung der Windvektoren basiert dabei auf dem ebenfalls an der FernUni Hagen entwickelten „Moving Target“-Prinzip.

Bei konventionellen Dubins-basierten Ansätzen werden die ursprünglichen Kreisabschnitte der Trajektorie unter Windeinfluss zu Trochoiden verzerrt [5]. Diese erfordern sehr komplexe Berechnungsmethoden. Beim Moving Target-Ansatz hingegen wird die Trajektorie vom Erd- in das Windbezugssystem transformiert. Es wird dann der gesamte Windversatz über die Trajektorie berechnet. Aus diesem Gesamtversatz wird dann ein Punkt im Windbezugssystem berechnet, welcher genau um diesen Versatz entgegen der Windrichtung zum ursprünglich anzufliegenden Punkt liegt. Dieser Punkt wird nun angefliegen. Der Wind wird diesen Punkt über die Dauer des Anfluges genau so weit versetzen, dass dieser am Ende mit dem ursprünglichen Anflugpunkt identisch ist.

Auch dabei erweisen sich die kinematoiden Ketten den Dubins-Pfaden überlegen. Während bei Letzteren der Windversatz aus den Mittelwerten der Windvektoren ihrer drei Abschnitte berechnet wird, erfolgt die Berechnung auf Basis kinematoider Ketten beliebig feingliedrig. Windvektoren können sich dabei sowohl räumlich als auch zeitlich beliebig ändern. Solange diese Windverhältnisse bekannt sind bzw. hinreichend genau abgeschätzt werden können, können sie von unserem Verfahren modelliert werden, ohne dass sich dessen Berechnungskomplexität wesentlich erhöht.

In o.g. Publikationen [17] wurde außerdem gezeigt, dass mit dem Verfahren Gebiete modelliert werden können, welche umflogen werden sollen. Dies können sowohl Gebiete mit luftrechtlichen Beschränkungen, Lärmschutzgebiete als auch anderer Verkehr, dem aus Gründen der Separation ausgewichen werden muss, sein. Es können sowohl Gebiete definiert werden, die unter allen Umständen umflogen werden müssen, als auch solche, die nur dann gemieden werden, wenn andere, höher priorisierte Bedingungen dem nicht entgegenstehen. In ähnlicher Weise können von unserem Anflugverfahren auch hohe Gebäude oder andere Hindernisse berücksichtigt und umflogen werden.

Beispiele kinematoider Notfall-Gleitflüge

In [17] wurden mehrere Gleitflüge aufgrund Triebwerksausfalls aus der Vergangenheit untersucht. Obwohl es sich dabei um durch Triebwerksausfälle herbeigeführte und somit unfreiwillige Gleitflüge handelt, sind die Ergebnisse gut auf CDO, d.h. Sinkflüge mit Leerlaufleistung übertragbar.

Der wohl bekannteste ist der eingangs schon erwähnte Flug US Airways 1549. Laut Unfalluntersuchungsbericht [6] lag die Geschwindigkeit des Flugzeuges zum Zeitpunkt des Triebwerksausfalls noch etwas über der Geschwindigkeit für bestes Gleiten. Der Pilot konnte somit diesen Geschwindigkeitsüberschuss noch in Höhe umwandeln. Wir haben unsere Berechnungen für mögliche Gleitflugtrajektorien deshalb an dem Punkt begonnen, an dem gemäß der in [6] angegebene Daten der Sinkflug begann.

Zusätzlich zu den eigentlichen Positions-, Heading- und Geschwindigkeitsdaten haben wir aus [18] die Winddaten entlang der möglichen Trajektorien zum Ereigniszeitpunkt ermittelt. Wie aus der graphischen Darstellung beispielhaft für eine Trajektorie zur RWY 13 des Flughafens La Guardia in Abbildung 3 erkennbar ist, folgen sowohl Windrichtung als auch -geschwindigkeit keiner einfachen linearen Funktion.

Die mit unserem Verfahren gefundenen Trajektorien sind in Abbildung 4 dargestellt. Der herrschende Wind aus Nordwest hat auf die Trajektorien zu den RWYs 13 und 22 von La Guardia kaum Einfluss. Auf einem Teil der Trajektorien überwiegt jeweils die Rückenwindkomponente, auf einem anderen die Gegenwindkomponente. Die Auswirkungen kompensieren sich nahezu. Die Erreichbarkeit der fast gegen die Windrichtung gelegenen RWY 24 des Flughafens Teterboro ist ohne Berücksichtigung des Windes noch gegeben. Berücksichtigt man hingegen die tatsächlichen Windverhältnisse, ist diese Landebahn nur noch „gerade so“ erreichbar.

Für den Anflug auf La Guardia RWY 13 wurde ein 0,25 NM langer gerader Endanflug modelliert. Bei La Guardia RWY 22 ergibt sich praktisch von selbst ein relativ langer gerader Endanflug. Würde man für den Anflug auf die Landebahn 24 in Teterboro einen geraden Final erzwingen, wäre diese RWY nicht mehr erreichbar gewesen.

Ein weiterer Flug nach einem Triebwerksausfall war Air Transat Flight 236, auch bekannt als „The Azore Glider“ [19]. Dabei hatte ein Airbus A330 der Air Transat auf dem Weg von Kanada nach Portugal einen totalen Triebwerksausfall ca. 120 km

nordöstlich der Azoreninsel Terceira in einer Höhe von 34.500 ft (vgl. Abbildung 5).

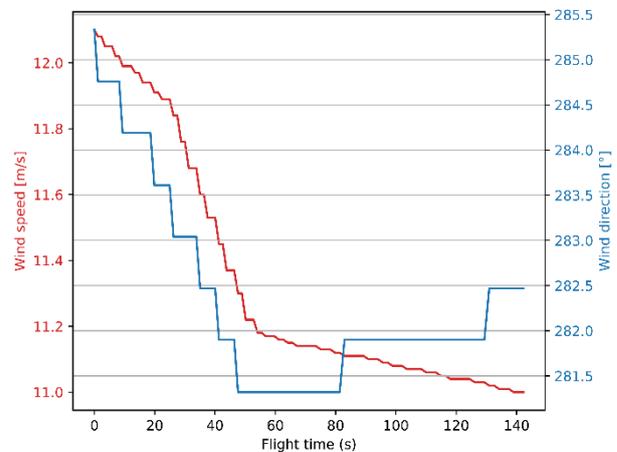


Abbildung 3: Windrichtung und -geschwindigkeit entlang einer Trajektorie zur RWY 13 des Flughafens La Guardia.

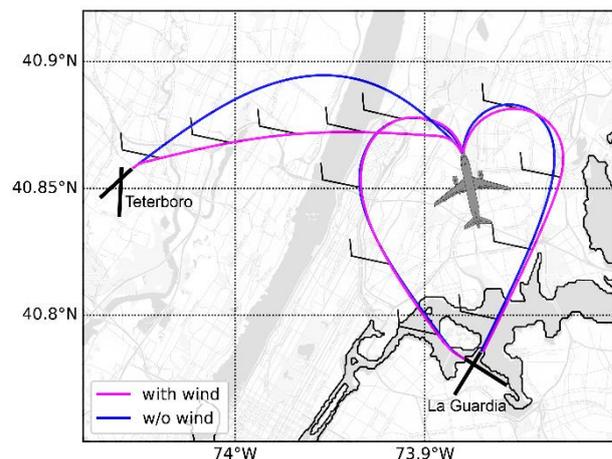


Abbildung 4: Mögliche Trajektorien des Fluges US Airways 1549 nach La Guardia und Teterboro.

An diesem Flug, welche dem Szenario eines CDO (wenn auch unfreiwillig) recht nahekommt, lassen sich weitere Vorteile unseres Verfahrens illustrieren. Während aerodynamische Eigenschaften eines Luftfahrzeugs im Wesentlichen mit der Equivalent AirSpeed (EAS) korrelieren, werden andere Parameter, wie z. B. der Kurvenradius bei gegebener Schräglage, durch die TAS bestimmt. Während der Unterschied zwischen EAS und TAS bei Flügen mit einer geringen vertikalen Ausdehnung (z. B. US Airways 1549) noch vernachlässigt werden kann, ist dieser bei Flügen aus Höhen von über 10.000 m erheblich.

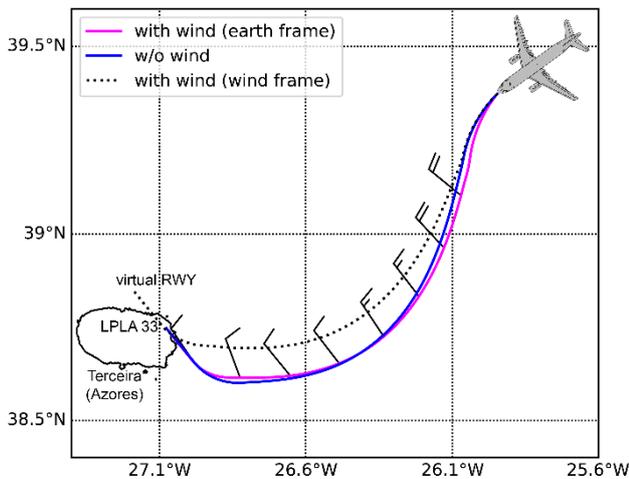


Abbildung 5: Trajektorie nach LPLA (Airport Base Aérea das Lajes) RWY 33 mit und ohne Wind. Die maximale Schräglage wurde auf 5° beschränkt. Ab einer Entfernung von 8 NM vom Landepunkt wurde die Schräglage auf 0° begrenzt und somit ein gerader Endanflug erzwungen.

In Tabelle sind die verschiedenen Parameter der Trajektorie für ausgewählte Segmente der als kinematoide Kette modellierten Trajektorie angegeben. Man sieht, dass die Höhenstufen pro Segment (definitionsgemäß) konstant bleiben, ebenso die durch das FDM konstant vorgegebene EAS von ca. 108.0 m/s (≈ 210 kt). Die entsprechende TAS ist am Beginn des Gleitfluges auf über 10.000 m Höhe noch weit höher als die EAS und bestimmt damit den minimalen Kurvenradius bei gegebener Schräglage. Im Laufe des Fluges nähert sich die TAS dann immer weiter der EAS an. Mit diesem Verfahren ist es problemlos möglich, die atmosphärisch bedingten Unterschiede zwischen EAS und TAS zu modellieren.

Tabelle 1: Ausgewählte Parameter der Trajektorie des Fluges Air Tarnsat Flight 236.

Seg. no	time	alt [m]	seg. alt [m]	length [m]	EAS [m/s]	TAS [m/s]
0	0:00	10463	104.61	1356.9	108.0	182.15
10	1:26	9417	104.61	1565.52	108.0	174.74
20	2:58	8371	104.61	1565.59	108.0	167.32
30	4:34	7325	104.61	1565.24	108.0	159.91
40	6:14	6279	104.61	1564.59	108.0	152.5
50	7:59	5232	104.61	1564.06	108.0	145.08
60	9:49	4186	104.61	1564.1	108.0	137.67
70	11:46	3140	104.61	1564.71	108.0	130.26
80	13:50	2094	104.61	1565.29	108.0	122.84
90	16:01	1048	104.61	1565.57	108.0	115.43
99	18:06	107	104.61	1565.6	108.0	108.76

Offline-Analyse eines EELA- vs. Lotsen-geführten CDO auf München

Die bei der Entwicklung von Notlandetrajektorien gewonnenen Erkenntnisse wurden verwendet, um alternative CDO-Anflüge zu tatsächlich durch-

geführten konventionellen Anflügen auf den Flughafen München zu simulieren.

Dabei wurde die Steuerung des historischen Fluges in der simulierten Umgebung ca. 150 NM vom Ziel-Flughafen entfernt durch das EELA-System übernommen und direkt ein Punkt angesteuert, von dem aus zum Final Approach Fix (FAF) in Landerichtung eingedreht wird (vergleiche auch Abbildung 6). Nach der Reiseflughöhe wird am Idle-Point der Schub soweit wie möglich reduziert und die Reiseflughöhe gehalten, bis die optimale Gleitgeschwindigkeit erreicht ist. Dabei wird vorausgesetzt, dass dies mit dem Service innerhalb der Kabine koordiniert wird. Danach beginnt der stetige Abstieg zum FAF.

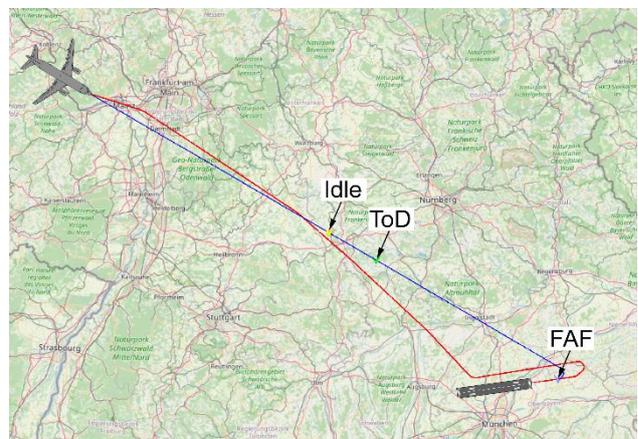


Abbildung 6: Vergleich eines realen (rot) und eines mittels EELA berechneten Anfluges (blau) auf den Flughafen München, 27.9.2019.

Es zeigte sich, dass die Flugzeit der simulierten Maschine häufig sogar kürzer war als die des zugrundeliegenden konventionellen Anfluges. Dies ist zum einen auf den kontinuierlichen Sinkflug zurückzuführen und zum anderen darauf, dass der Flug direkt zum FAF geführt wird.

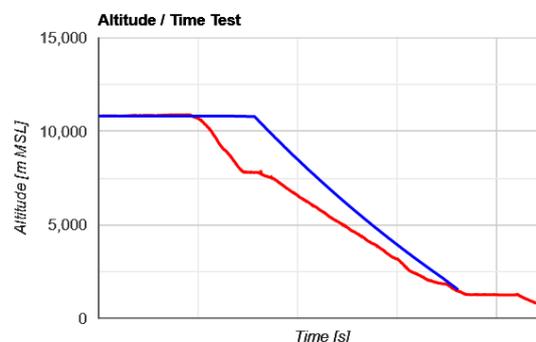


Abbildung 7: Vertikalprofile der Anflüge aus Abb. 6 über die Zeit.

Mehrwert des EELA-Verfahrens

Alle bisherigen CDO-Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie

- a) entweder auf einem flexiblen kognitiven Modell der Fluglotsen basieren – unter Nutzung vorhandener Informationen, dem eigenen Plan zur Flugverkehrsabwicklung und bestimmter Annahmen oder
- b) feste Routenführungen vorsehen, die lateral gar nicht und vertikal sehr begrenzt auf die individuell optimale Routenführung für jedes Flugzeug angepasst sind. Die bzgl. Treibstoffverbrauch optimale Trajektorie ist im Regelfall weder den Lotsen noch den Piloten bekannt, ebenso wenig der Einfluss des Windfeldes.

EELA sieht vor, auf Basis der Flugeigenschaften und des Windfeldes dem Lotsen für jeden Anflug eine optimale Trajektorie anzuzeigen. Für Einzelflüge konzentriert sich damit die Lotsenaufgabe auf ein „spurgetreues“ Abfliegen dieses Flugpfades. Damit wird eine für das Luftfahrzeug optimale Routenführung unterstützt – auf Basis einer berechneten, umweltoptimierten 4D-Trajektorie, die Grundlage sein kann für konfliktunterstützende Assistenzsysteme.

Freigaben

EELA-gestützte Anflüge bedingen, dass Fluglotsen komplizierte Flugwege per Sprechfunk an die Cockpitbesatzungen übermitteln. Diese „Kettenanweisungen“ bestehen aus einer Folge von Einzelfreigaben. Dadurch, dass nur eine einzige Flugverkehrskontrollfreigabe für mehrere folgende Manöver erteilt werden muss, besteht für die Piloten eine gute Planungsgrundlage, da Flugweg und nötige Manöver früh bekannt sind und in die Anflugplanung einfließen.

Die geringe Gesamtzahl an „Kettenanweisungen“ entlastet die Funksprechfrequenz, birgt aber auch Nachteile. Zum einen steigt mit zunehmender Länge der Anweisungen das Risiko, Anweisungen falsch zu verstehen. Auch die Korrektur von auftretenden Fehlern im Zurücklesen (Readback) der Anweisungen durch die Cockpitcrew führt zu Wiederholungen, was die Frequenzbelastung erhöht. Zum anderen haben Kettenanweisungen Ablagen zu internationalen Sprechfunkstandards und können zu Verständigungsproblemen führen, dazu noch in einer Flugphase mit hoher Cockpit-Workload. Dies führt ggf. zu erhöhten Reaktionszeiten, da sich durch die zeitliche Übertragungslänge von Kettenfreigaben auch die Zeit bis zur Ausführung erhöhen kann. Alternativ könnten auch Reihen von Einzelfreigaben

erteilt werden. Während dies für einen Einzelflug vorstellbar ist, ist solch ein Verfahren für mehrere gleichzeitig anfliegende Flugzeuge kaum umsetzbar.

Als Entlastung für Lotsen wie Piloten ist zu erwarten, dass Geschwindigkeitsvorgaben reduziert werden können, da Anfluggeschwindigkeiten über die berechneten Vertikalprofile „automatisch“ reduziert werden. Wie genau Flugleistungsparameter bei EELA hinterlegt werden müssten, um erwartungsgemäße Geschwindigkeitsverläufe zu erreichen, ist Forschungsgegenstand.

Lotsensicht

Als Alternative zu Kettenanweisungen über Sprechfunk gilt ein latenzfreier, digitaler Bord-Boden-Datenaustausch. Datennachrichten haben den Vorteil, dass die Komplexität der Anweisungen nur eine untergeordnete Rolle spielt, da sie im Cockpit visuell dargestellt und direkt in das Flight Management System (FMS) gespeist werden können. Aktuell wird ein Datenaustausch in der DFS nur im oberen Luftraum angewendet, u.a. da die Datennachrichten eine Gültigkeit von 2 Minuten besitzen. Im unteren Luftraum sind Freigaben zeitkritischer, eine große Verzögerung der Bestätigung ist dort nicht immer tolerierbar. Mit einer mandatierten Einführung eines latenzfreien, schnellen Datenaustauschs ist weltweit nicht vor 2035 zu rechnen (z.B. das L-band Digital Aeronautical Communications System, siehe [29]).

Wetter und andere Faktoren bedingen häufig situative, flexible Umplanungen der Anflugreihenfolge. Bereits weit im Voraus festgelegt Anflugreihenfolgen können z.B. durch einen medizinischen Notfall an Bord eines Anflugs mit darauffolgender Repriorisierung massiv verändert werden. Folge ist, dass folgende Luftfahrzeuge aktualisierte Freigaben mit verzögerten Anflugzeiten benötigen. Derzeit ermöglicht der Gegenanflug eine begrenzte zeitliche Pufferung, da die Luftfahrzeuge diesen bis zur Eindrehanweisung befliegen. Dadurch ist gewährleistet, dass bei kleineren Verzögerungen keine erneute Freigabe nötig wird. Routen, die ein direktes Eindrehen in den Endanflug vorsehen, müssen bei Bedarf für eine Vielzahl an Flügen angepasst werden, was eine erhebliche Belastung bedeutet.

Pilotensicht

Die Umsetzung von CDO-Anflügen setzt eine optimale Zusammenarbeit zwischen Flugsicherung und Cockpitbesatzung voraus. Aufgabe der Cockpitcrew ist, den geplanten (CDO-)Anflugweg u.a. unter

Beachtung aller navigatorischen und flugmechanischen Aspekte sicher abzufliegen.

Hilfreich für alle Cockpitbesetzungen zur Unterstützung von CDO sind gemäß [20]:

- ein von ATC genannter Zeitpunkt, an dem die Freigabe für einen Sinkflug erfolgen wird,
- eine früh kommunizierte Information „Miles to go“,
- das Wissen um das CDO-Verfahren vor dem ToD,
- frühzeitige Informationen über Abkürzungen während des Sinkflugs und
- eine Bevorzugung gegenüber Abflügen, um auf einem optimalen Profil zu bleiben.

Grundsätzlich spielt bei der Umsetzung „komplizierter“ Anflugverfahren eine große Rolle, wie diese Verfahren für die Besatzung umsetzbar sind. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

1) Programmierung von Anflugstrecken im FMS-System: Dabei wird eine begrenzte Anzahl an Anflugstrecken als Auswahlmöglichkeit seitens ATC bereitgestellt und liegt in den FMS-Systemen vor. Je nach Freigabe aktiviert die Besatzung die Anflugstrecke im FMS. Dabei ist eine möglichst einfache und eindeutige manuelle Auswahl auch unter schwierigen Bedingungen (z.B. Turbulenzen) sicherzustellen.

2) Vectoring: Anflugverfahren können wie beschrieben per Zuweisung von Radarsteuerkursen umgesetzt werden. Eine gemeinsame Sicht auf den vorberechneten Flugweg ist auch hier zwingende Voraussetzung, um der Cockpitbesatzung eine angemessene Gestaltung von Geschwindigkeits-, Sinkflug- und Klappenkonstellationen zu erlauben und einen stabilisierten Landeanflug zu ermöglichen.

Wie die Kettenanweisungen und vereinfachten Freigaben unter diesen Randbedingungen implementiert werden können, ist noch zu untersuchen.

Mögliches weiteres Vorgehen

EELA-Reifegrad

Um das mögliche weitere Vorgehen und notwendige Entwicklungsschritte zu beschreiben, ist die Bestimmung des Reifegrads von EELA nötig. Unterschieden wird dabei zwischen den realisierten EELA-Prototypen und einer Anwendung für ein CDO-Verfahren an einem Verkehrsflughafen.

Gemäß europäischer Validierungsrichtlinie E-OCVM [20] strebt die Anwendung für ein CDO-Verfahren einen Reifegrad von V1 an, d.h. ein operationelles

Konzept besteht noch Konkretisierungsbedarf bzw. wird weiterentwickelt auch in Hinblick auf die Abstimmung mit übergeordneten ICAO-Konzepten. Dagegen hat der realisierte EELA-Prototyp für Kleinflugzeuge gemäß des Technology Readiness Level (TRL, siehe auch [25]) nach Einschätzung der Autoren bereits einen TRL6. Dies beinhaltet die "System / subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment". Diese Demonstrationen wurden sowohl von der Fernuni Hagen und externen Piloten in praktischen Flugversuchen durchgeführt. So fand z.B. Mitte August eine Flugmesswoche in Nordholz Spieka (EDXN) statt, bei der ca. 20 Notlandeanflüge mit Hilfe von Safe2Land durchgeführt wurden [30].

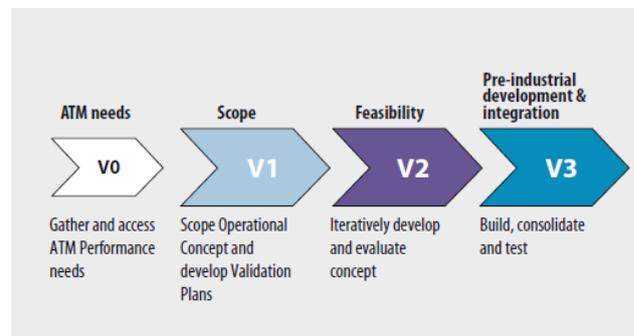


Abbildung 8: Reifegrade V0 bis V3 gemäß E-OCVM

Im Gegensatz zu Notlandverfahren sind bei der Integration von CDO-Verfahren in den An- und Abflugverkehr eines Verkehrsflughafens eine Reihe von Randbedingungen zu beachten. Da der Reifegrad einer solchen Anwendung V1 anstrebt, müssen in einem ersten Schritt die betrieblichen und technischen Lösungen entwickelt und per Simulationen bewertet werden.

Aktuell ist es an Verkehrsflughäfen nicht möglich, für anstehende Abflüge eine exakte Abflugzeit zu berechnen - aufgrund von Faktoren wie z.B. Cockpitchecks oder Enteisierung. Die genaue Integration von Abflügen in die EELA-Planungen kann damit erst nach Abheben erfolgen.

Daraus ergeben sich u.a. folgende Forschungsthemen:

- Planung und Berücksichtigung der EELA-Anflüge im AMAN;
- Integration und Konfliktfreiheit zum übrigen Anflug- und Überflugverkehr;
- Untersuchung der Staffelnminima zu EELA-Anflügen und Reaktion auf zeitliche und räumliche Abweichungen;
- Ausgestaltung von EELA-Korridoren ("Restricted Zones"), ggf. gestaffelt nach Flugzeugtypen und deren Gleitverhalten.

Erschwerend wirkt der Umstand, dass der Flugsicherung keine Verbrauchsdaten der Flugzeuge zur Verfügung stehen. Abhilfe könnten ausreichend genaue simulierte Werte sein, z.B. auf Basis des „Enhanced Jet Performance Model“ [22].

Verknüpfung mit Simulationen

Zur Untersuchung operationeller Fragestellungen und zur quantitativen Abschätzung des Nutzens eignen sich Realzeit- und Schnellzeitsimulationen. Abbildung 9 zeigt eine mögliche Integration der EELA-Prototypen in die DFS-Realzeitumgebung. Dafür könnte die auch für die JOINT-Simulationen [23] entwickelten Schnittstellen genutzt werden. Dabei empfängt der Simulator Remote Flight Messages, d.h. es erfolgt ein Austausch von Flugzustandsinformationen¹ der angeschlossenen Flugsimulatoren, die ihrerseits von den EELA-Prototypen beeinflusst werden. Im Realzeitsimulator müssen für diese Flüge die entsprechenden Flugpläne erzeugt werden. Im EELA-Prototypen wird dann unter Berücksichtigung dieser Flugpläne die exakte Trajektorie für den optimalen Gleitweg berechnet. Es können auch Wetterinformationen vom ATC-Simulator zu den angeschlossenen EELA-Prototypen übertragen werden. Diese werden mit in die Berechnung des Gleitweges einbezogen, wobei in der Praxis das Problem der Übertragung bzw. Ermittlung der Wetterdaten noch gelöst werden muss. Die Windinformationen können dabei auch während der Simulation variieren [2].

Mögliche Untersuchungsgegenstände könnten sein:

- Analyse der operationellen Umsetzbarkeit,
- Koordinationsverfahren;
- Übermittlung der Freigaben und Monitoring der EELA-Anflüge im Mixed-Mode-Betrieb;
- Arbeitslast der Lotsen; Safety-Aspekte und Staffeln zum umliegenden Verkehr,
- Ausfälle und/oder Abweichungen von den Sinkflugverfahren.

Auch per Schnellzeitsimulationen könnten Aspekte untersucht werden, um den Reifegrad zu erhöhen:

- Untersuchung zu möglichen Anwendungszeiten für EELA in München;
- Aussagen zu Anpassungen von Lufträumen und Übergabeverfahren;

- Kerosinverbrauch pro Anflug, laterales und vertikales Flugprofil, Lärmemission, Pünktlichkeit.

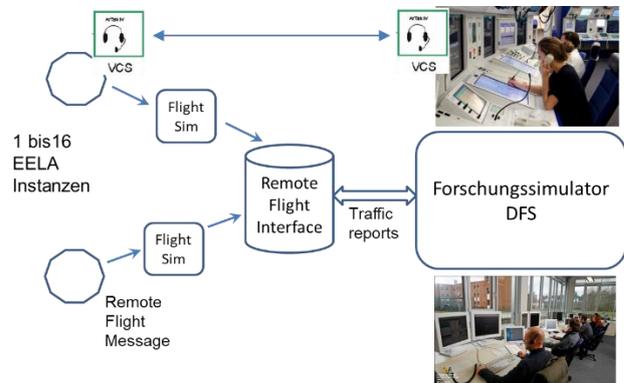


Abbildung 9: Anbindung EELA-Prototyp an Simulator.

Anwendungsmöglichkeiten

Die aktuelle DFS-Strategie berücksichtigt Vorhaben zur Reduktion der Umweltauswirkungen von Flugverkehr. In den nächsten Jahren werden verstärkt Entwicklungen und Umsetzungen von Methoden und Verfahren für klimaschonendes Fliegen unter Berücksichtigung der 'Vertical Flight Efficiency' erfolgen. Die in EELA entwickelten Verfahren können diese Entwicklungen unterstützen.

Während für den Einsatz des EELA-Prinzips an einem hochfrequentierten Flughafen noch zahlreiche Fragen bestehen, gibt es Szenarien, die eine abgewandelte, frühere Anwendung sinnvoll erscheinen lassen:

- 1) Unterstützungssystem für Fluglotsen für den Fall eines Anfluges mit Ausfall aller Triebwerke.
- 2) Unterstützungssystem für Fluglotsen beim Anflug von Einzelflügen zu extrem verkehrsschwacher Zeit.

Bei beiden Anwendungen müssten u.a. folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Nachgewiesene Genauigkeit der hinterlegten Flugleistungsdaten für realistische Gleitzahlen (inkl. aktueller Flugzeugmasse)
- Genaue Information über das Windfeld
- Sicherheitsbewertung bzgl. Datenverfügbarkeit, Algorithmen und Einbettung in betriebliche Vorgaben und Verfahren

¹ u.a. Position inkl. der Höhe, momentane Geschwindigkeiten und der Steuerkurs.

- Klärung der Darstellung der Informationen für die Fluglotsen
- Festlegung der Sprechgruppen zur Übertragung des berechneten Kurvenfluges an das Cockpit
- Schulung und (Simulator-)Training der Fluglotsen in den zuständigen Lufträumen, inkl. Non-Standard-Verfahren.

Es stellt sich auch die Frage, ob eine derartige Applikation z.B. im Electronic Flight Bag (EFB) eines Verkehrsflugzeuges umgesetzt werden kann. Dieser digitale Zwilling würde es ermöglichen, dass sich Flugsicherung und Cockpit das gleiche Bild teilen. Die nötige Kommunikation würde damit stark vereinfacht.

Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde der EELA-Algorithmus auf Basis sogenannter kinematoider Ketten eingeführt, um CDO-Routen aus der Reiseflughöhe bis zum FAF zu berechnen. Dabei wird mit dem Moving Target-Prinzip während des kontinuierlichen Gleitflugs auch der Windversatz berücksichtigt. Die EELA-basierten Anflüge wurden zunächst am Beispiel von zwei Notlandesituationen vorgestellt und dann mit Anflügen auf München mit den Arbeitsweisen der Anflugkontrolle verglichen. Der Mehrwert des EELA-Verfahrens wird anhand der dafür nötigen Freigaben aus Lotsen- und Pilotensicht diskutiert. Ebenso wird der Reifegrad des Verfahrens analysiert und es wird erörtert, wie man es in Simulatoren weiter evaluieren und sich einen Einsatz im realen Flugbetrieb vorstellen könnte. Bis dahin sind natürlich noch viele offene Fragen zu klären, welche im Wesentlichen die Kommunikation zwischen Lotsen und Piloten zur Übermittlung und Freigabe der Routen betreffen. Eine Lösung auf Basis von EFBs mit einem digitalen Zwilling könnte hierzu einen vielversprechenden Ansatz darstellen. Darüber hinaus sind für die Qualität der CDO-Routenberechnung auch gute Windschätzungen erforderlich, die beispielsweise anhand der Sensordaten bereits gelandeter Flugzeuge optimiert werden können. Obwohl hierzu schon Vorarbeiten existieren, soll dieser Ansatz künftig intensiver bearbeitet werden.

Wir danken dem Land NRW für die Finanzierung des Vorhabens im Rahmen seines Progres-Förderprogramms (Akz.: 2004pr003). Ebenso danken wir Herrn Felix Eckstein für seine Mitarbeit in der ersten Projektphase.

Abkürzungsverzeichnis

AMAN	Arrival Manager
ATC	Air Traffic Control
BA-FVM	Betriebsanweisung Flugverkehrsmanagement
CDO	Continuous Descent Operations
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EAS	Equivalent AirSpeed
EFB	Electronic Flight Bag
E-OCVM	European Operational Concept Validation Methodology
FAF	Final Approach Fix
FDM	Flugdynamisches Modell
FMS	Flight Management System
GA	General Aviation
HTO	High Transition Operations
IAS	Indicated Air Speed
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
LNAS	Low Noise Augmentation System
NM	Nautical Mile
RWY	Runway
TAS	True Air Speed
ToD	Top of Descent
TRL	Technology Readiness Level

Literatur

- [1] L.E. Dubins . "On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents". American Journal of Mathematics. 79 (3): 497–516, 1957.
- [2] M. Klein, A. Klos, J. Lenhardt, W. Schiffmann: Moving target approach for wind-aware flight path generation, International Journal of Networking and Computing, Vol. 8, Number 2, pages 351-366, 2018.
- [3] A. Klos, M. Klein, W. Schiffmann: Glide Path generation with regard to Wind misestimations. EuroGNC, 2019.
- [4] M. Klein, A. Klos, W. Schiffmann: A Smart Flight Director for Emergency Landings with Dynamical Recalculation of Stable Glide Paths, AIAA Aviation Forum, June 2020.
- [5] M. Coombes, W. Chen, P. Render: Reachability Analysis of Landing Sites for Forced Landing of a UAS, Journal of Intell Robot Syst 73:635-653, 2014.
- [6] NTSB Accident Report AAR-10/03
- [7] ICAO-Document DOC 9931, Doc 9931.1st Edition.alltext.en.docx; Aufgerufen am 02.08.2022
<https://store.icao.int/en/continuous-descent-operations-cdo-manual-doc-9931>
- [8] DFS (2022). Was wir für den Klimaschutz tun. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.dfs.de/homepage/de/umwelt/klima/>
- [9] SESAR Joint Undertaking (2017). "Green" flight arrivals into airports across Europe. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.sesarju.eu/index.php/node/2893>
- [10] Airbus (2017). LATAM Airlines rüstet mehr als 200 Flugzeuge der A320-Familie mit der treibstoffsparenden Descent Profile Optimisation-Funktion von Airbus aus. Press Release. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: [baa399da841b7c36f0f2e133d92833e2_DE-LATAM-Airlines-upgrade-with-fuel-saving-Descent-Profile-Optimisation-function.pdf](https://www.airbus.com/press-releases/2017/09/20/latam-airlines-upgrade-with-fuel-saving-descent-profile-optimisation-function.pdf) (airbus.com)
- [11] DLR (2020). Pilotenassistenzsystem LNAS ermöglicht leisere und treibstoffsparende Anflüge. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/02/20200622_testfluege-mit-dlr-forschungsflugzeug-a320-atra-in-zuerich.html
- [12] DLR (2020). Pilotenassistenzsystem LNAS wird mit Manfred-Fuchs-Preis ausgezeichnet. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2020/04/20201029_pilotenassistenzsystem-wird-mit-manfred-fuchs-preis-ausgezeichnet.html
- [13] Seidel, D. (2020). Prädiktion von Anflugsequenzen mit Verfahren des maschinellen Lernens. Innovation im Fokus 2/20, S. 15-24.
- [14] ICAO Document - DOC 8168, Volume II, Amendment 2, Kapitel 1.3.3; Aufgerufen am 02.08.2022
<https://store.icao.int/en/procedures-for-air-navigation-services-pans-aircraft-operations-volume-ii-construction-of-visual-instrument-flight-procedures-doc-8168>
- [15] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH BA-FVM Abschnitt 4.2.1.5.4.
- [16] ICAO-Document DOC 4444, Doc 4444-ATM 16th Edition - PANS-ATM 6.7.3.2.3 Abgerufen am 02.08.2022
<https://store.icao.int/en/procedures-for-air-navigation-services-air-traffic-management-doc-4444>
- [17] Flaemig, S., Graefenhan, M. & Schiffmann, W. (2022): Modelling of Aircraft Trajectories Based on Kinematoid Chains, submitted to CEAS Aeronautical Journal 2022.
- [18] Copernicus Climate Change Service. Era5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10:24381/cds:bd0915c6?tab=overview>. DOI: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.
- [19] TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES Government of Portugal MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS. Accident investigation final report. All engines-out landing due to fuel exhaustion. air transat airbus a330-243 marks c-gits lajes, azores, portugal, 24 august 2001, 2004-10-18.
- [20] Vereinigung Cockpit (2021) CCO/CDO in Europa. Mitgliedermagazin der Vereinigung Cockpit. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://vcinfo.vcockpit.de/artikel/cco-cdo-in-europa>
- [21] EUROCONTROL (2010). European Operational Concept Validation Methodology V3. February 2010 Volume I and II.
- [22] Rosenow, J. & Fricke, H. (2016). Enhanced Jet Performance Model. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Aufgerufen am 24.05.2022. Verfügbar unter: <https://www.dglr.de/publikationen/2016/420127.pdf>

- [23] Müller, C. & Tolksdorf, R. (2007). JOINT – Ein spezielles Simulations-Environment für Emergency Training. TE im Fokus, 1/07, S. 4 - 8. Langen: Deutsche Flugsicherung GmbH, URL aufgerufen am 04.10.2022: <https://www.dfs.de/homepage/de/medien/publikationen/fokus0701.pdf?cid=fnw>
- [24] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (2016). AFS Interface Control Document, Version 1.9.1 vom 29. Juli 2016.
- [25] Technology Readiness Levels. A White Paper. April 6, 1995. John C. Mankins, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology NASA USA.
- [26] 220. Sitzung der Fluglärmkommission Frankfurt, https://www.flk-frankfurt.de/eigene_dateien/sitzungen/220._sit_zung_am_24.04.2013/top_5-_praes._dfs_zur_einfuehrung_eines_cdo-regelbetriebs__24.4.2013.pdf, aufgerufen am 24.8.2022.
- [27] 229. Sitzung der Fluglärmkommission Frankfurt, 2015, Präsentation: https://www.flk-frankfurt.de/eigene_dateien/sitzungen/229._sit_zung_am_28.1.2015/top_4-_bericht_dfs_erprobung_von_kontinuierlichen_sinkfluegen_im_streckenbereich.pdf
- [28] Fricke, H., Seiß, C., Herrmann, R., "Fuel and Energy Benchmark Analysis of Continuous Descent Operations", 11. USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015), 2015.
- [29] DLR-Portal, electronic library - L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS) draft-ietf-raw-ldacs-01 (dlr.de), aufgerufen am 07.10.2022.
- [30] Safe2Land Test Flights in Nordholz Spieka, <https://www.smartfly-solutions.com/reports/>, aufgerufen am 11.10.2022.

Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandortes für GBAS Datenlink und ILS Gleitweg

Alexander Diamadis & Winfried Dunkel

Einleitung

Das Ground Based Augmentation System (GBAS) ist ein auf Satellitennavigation basiertes Präzisionslandesystem, das von der ICAO [1], EUROCAE [4] und RTCA [5] bis CAT III standardisiert ist. Die DFS hat jeweils als erste Flugsicherung weltweit GBAS CAT I (2012) und GBAS CAT II (2022) implementiert und als operationell nutzbaren Service eingeführt.

In Deutschland ist bisher jeweils ein GBAS Approach Service Type (GAST) C System am Flughafen Bremen und am Flughafen Frankfurt/Main im operationellen Einsatz, wobei die aktuell verwendeten GAST C Anlagen Anflüge der Kategorie I oder II (CAT I/II) unterstützen. Bei CAT I liegt die Höhe, in der ein Pilot entscheidet, ob er seine Landung fortsetzt oder diese abbricht, in 200 Fuß (ca. 60 Meter), bei CAT II bei 100 Fuß (ca. 30 Meter). Eine CAT III Landung ohne Sicht, eine sogenannte „Blindlandung“, ist mit diesen Anlagen nicht möglich. Eine solche Blindlandung erfordert eine GAST D Anlage und erhöhte technische Anforderungen, zum Beispiel eine sichere Datenlinkabdeckung jeder Landebahn. Ein möglicher Standort für eine GBAS Datenlink Antenne, der auch den neuesten ICAO Anforderungen für CAT III genügt, könnte der Gleitwegmast des Instrument Landing System (ILS) sein. Das ICAO DOC 9157 Aerodrome Design Manual Part 6 [3] enthält seit 2018 auch für GBAS, wie zuvor bereits für ILS, explizit entsprechende Ausnahmeregelungen. Inwiefern dies vorteilhaft umsetzbar ist, wird im Folgendem für den GBAS Datenlink anhand von rechenintensiven, aber genauen elektromagnetischen (EM) Simulationen untersucht.

Die in diesem Artikel beschriebenen Simulationen und Arbeitsschritte zur Entwicklung eines Lösungsvorschlages zur Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandorts für den Datenlink des GBAS und dem Gleitweg des ILS sind im Rahmen einer Bachelorarbeit im Fachbereich Elektro- und Informationstechnik an der Hochschule Darmstadt in Zusammenarbeit in der Abteilung SIS/ND (Satellitennavigation und technische Dienste) entstanden [7].

Funktionsweise GBAS

GBAS gehört zu den satellitengestützten Präzisionslandesystemen. Es basiert auf dem Differential GPS-

Prinzip. Anfliegende Flugzeuge nutzen dabei in Deutschland bisher ausschließlich das amerikanische Global Positioning System (GPS). Die durch die Laufzeitdifferenz zu verschiedenen GPS-Satelliten bestimmte Position eines Flugzeugs besitzt gewisse Ungenauigkeiten. Diese können durch Satellitenfehler, Signalfehler, atmosphärische Einflüsse, Umgebungsfehler (Reflexionen) oder Gerätefehler entstehen.

Bei DGPS empfängt eine Referenzbodenstation, deren GPS Antennenstandort genau eingemessen wurde, alle gerade empfangbaren GPS-Signale und kann für jeden Satelliten die Differenz zwischen der gemessenen Entfernung und der realen Entfernung berechnen. Letztere berechnet sich aus der Kenntnis der Satellitenposition, die der Satellit selbst in Form von Bahndaten und Zeitinformationen mitteilt und der eingemessenen Referenzantenne. Für jeden Satelliten entsteht daraus ein Korrekturdatensatz, der von anderen Empfängern im Umkreis der Referenzstation zur Korrektur der selbst gemessenen Entfernung und damit der eigenen Position verwendet werden kann.

GBAS erweitert nun das erläuterte Prinzip und nutzt statt einer zwei bis vier geometrisch separierte GPS Referenzantennen/-empfänger und einen digitalen, rundum abstrahlenden Datenlink genannt VHF Data Broadcast (VDB), welcher im geschützten VHF Frequenzband für Navigation (108 bis 117,95 MHz) betrieben wird.

Ausgangssituation

Im Folgenden sollen neue Lösungsmöglichkeiten für einen VDB Antennenstandort am Beispiel des komplexen Flughafens Frankfurt Main betrachtet werden. Dabei soll die zu entwickelnde Lösung möglichst einfach und auf die meisten anderen Flughäfen übertragbar sein.

Die derzeit am Flughafen Frankfurt verbaute VDB-Sendeantenne für den operationellen GLS CAT I/II Betrieb befindet sich westlich der Startbahn West (Startbahn 18), in Nord-Südrichtung mittig zwischen den Anfluggrundlinien der Südbahn und der Center Bahn (s.a Abbildung 1). Unmittelbar westlich der Anlage befindet sich eine Waldkante. Somit ist für Anflüge aus Westen über Mainz kommend die

Reichweite bei niedrigen Flughöhen begrenzt. Des Weiteren ist dieser Standort über 5 km von der Schwelle der Landebahn 25C entfernt. Für zukünftige Anwendungen wäre ein Antennenstandort mittig des Flughafens erstrebenswert, um alle Anflugrichtungen ohne Hindernisse und den damit verbundenen möglichen Einschränkungen im Betrieb versorgen zu können. Um gleichzeitig keine weiteren signifikanten Hindernisse in Schutzbereichen errichten zu müssen, kam die Idee auf, den vorhandenen Standort des ILS Gleitweges der Bahn 07C mitzuverwenden.



Abbildung 1: Frankfurt Main Flughafenkarte mit Landebahn-schwelen und dem GAST C VDB Standort.

Als Antennentyp verwendet ein europäischer Anlagenhersteller von GBAS GAST D Anlagen zwei übereinander angeordnete Kreuzdipole. Die Ergebnisse lassen sich auch auf andere Antennentypen wie die der GAST C Anlage übertragen.

GBAS Approach Service Volumes

Die International Civil Aviation Organization (ICAO) hat für GBAS VDB gewisse Bereiche über der Bahn und im Anflugbereich festgelegt, in denen Anforderungen an die Feldstärke¹ bzw. Leistungsflussdichte (-99 dBW/m² bis -27 dBW/m²) einzuhalten sind, um den Flugzeugen einen sicheren Empfang der Daten zu gewährleisten [1]. Diese Bereiche werden wie folgt aufgeteilt (siehe Abbildung 2):

1. Minimum Service Volume (bis 15 NM zum Landing Threshold Point)
2. Minimum Service Volume (bis 20 NM zum Landing Threshold Point)

3. Additional Service Volume über der Landebahn
4. Expanded Service Volume (bis 35 NM zum Landing Threshold Point)

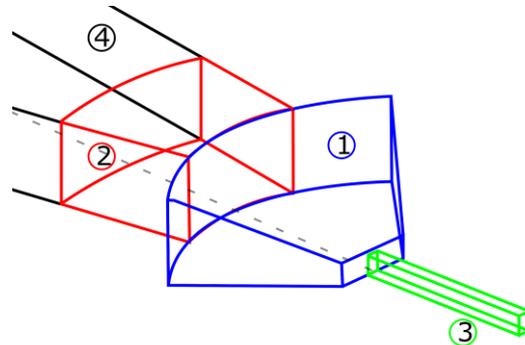


Abbildung 2: Übersicht über die GBAS Service Volumes.

Bei dem Expanded Service Volume handelt es sich um eine GBAS Option. Mit diesem erweitertem Abdeckungsbereich, in Deutschland sind bis zu 66 km vom Anlagenstandort (ca. 35NM) zugelassen, können anfliegende Flugzeuge früher und dementsprechend in einer größeren Höhe für einen GBAS basierten Anflug freigegeben werden, was den Treibstoffverbrauch der Flugzeuge und auch den Lärm am Boden reduziert.

Optimierung der VDB-Antennenhöhe

Der Anflugwinkel an den meisten Flughäfen weltweit beträgt in der Regel 3°. Am Flughafen Frankfurt gibt es zusätzlich für jedes Landebahnde einen 3,2° steilen Anflug. Da die zu erarbeitende Lösung auch auf andere Flughäfen umsetzbar sein soll, wird nachfolgend primär mit einem 3° Anflugwinkel gerechnet.

Zuerst wird die Höhe der VDB Sendeantenne über Grund so lange verändert, bis die Hauptkeule des Antennendiagramms bei einem 3° Elevationswinkel liegt. Dieses Optimierungsproblem, sowie alle nachfolgenden elektromagnetischen Simulationen wurden mithilfe der kommerziellen Software FEKO von Altair Engineering gelöst.

Die so optimierte VDB Antennenhöhe, genauer die Höhe des Antennenphasenzentrums, liegt bei diesem Antennentyp bei 12,21 m über Grund. In Abbildung 3 ist die daraus resultierende Lage der beiden VDB

¹ Die dazugehörigen Feldstärkewerte sind 215 microvolts per metre (-99 dBW/m²) und 0.879 volts per metre (-27 dBW/m²)

Kreuzdipole zusammen mit dem ILS GP Mast und deren drei Strahlern dargestellt

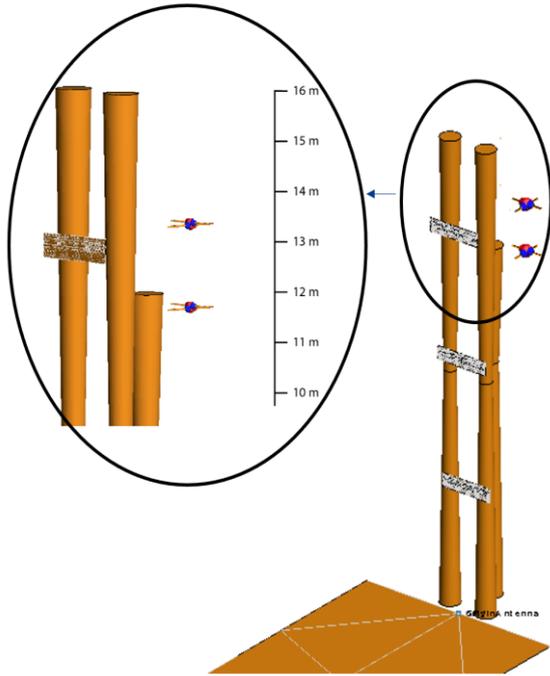


Abbildung 3: Positionierung der VDB-Sendeantenne am ILS-Gleitwegmast in optimierte Höhe.

Analyse der GBAS Approach Service Volumes

Mit dem optimierten Modell aus Antenne und ILS-Gleitwegmast lässt sich nun die Leistungsflussdichte innerhalb der GBAS Service Volumes analysieren. Zu beachten ist, dass beim Modell des ILS-Gleitweges lediglich die horizontalen Gruppenstrahler und die Reflektionsfläche vor dem Mast mit simuliert werden, da es sich bei diesen Objekten um elektrisch leitende Materialien handelt. Der Mast an sich ist aus einem GFK-Material gefertigt und beeinflusst elektromagnetische Wellen daher in der Praxis nicht.

Zunächst wird das GBAS Minimum Approach Service Volume bis 15 NM für einen Anflug auf das Bahnende von RWY 07C untersucht. Dafür wird ein Polarkoordinatensystem genutzt, dessen Ursprung in den Aufsetzpunkt der Flugzeuge auf der Landebahn gelegt wird (siehe Abbildung 4).

Innerhalb des Minimum Service Volumes werden verschiedene Anflugwege simuliert und auf Einhaltung der weiter oben angeführten Grenzwerte für die Feldstärke des Datenlinks untersucht. Bei den in der Regel anzunehmenden 50W Eingangsleistung in die VDB Sendeantenne befinden sich im ersten

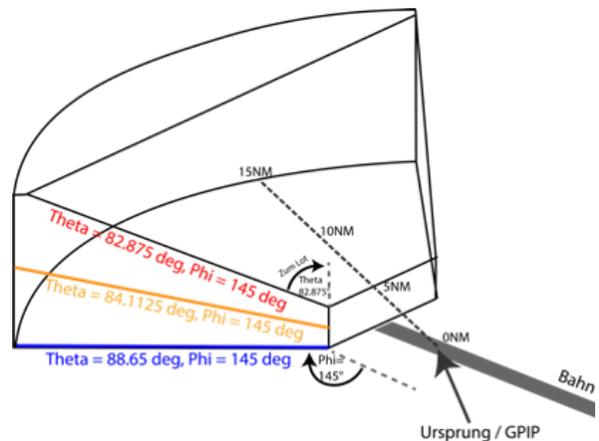


Abbildung 4: Koordinatensystem Minimum Service Volume bis 15NM von der Schwelle.

Minimum Service Volume alle Werte innerhalb der geforderten Grenzen. In Abbildung 5 ist ein vertikaler Schnitt durch das Service Volume bis 20 NM mit dem 3° Anflugpfad zu sehen.

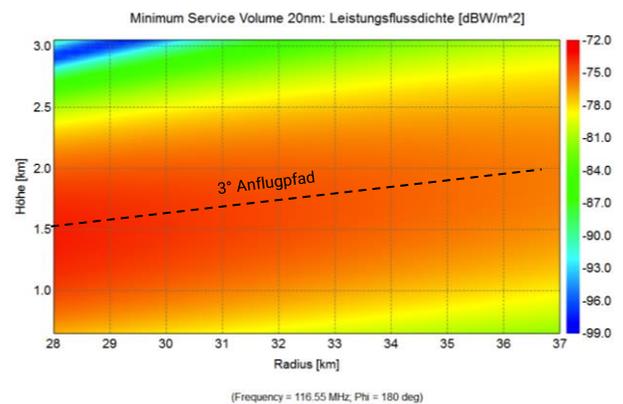


Abbildung 5: Vertikaler Schnitt - Leistungsflussdichte im Service Volume der RWY 07C bis 20NM (in 28 bis 37km Entfernung und Höhen bis 3000m).

Bei allen durchgeführten Analysen gibt es lediglich eine Überschreitung der maximal erlaubten Leistungsflussdichte von 1,6 dB direkt am Landebahnrand auf Höhe des Gleitwegmastes (Abbildung 6).

Dargestellt wird der Ort der minimalen Überschreitung als Stern in Abbildung 7. Dies ist zu erwarten, da an dieser Stelle der geringstmögliche Abstand zwischen einer Flugzeug-Empfangsantenne und der VDB-Sendeantenne auftritt.

Allerdings sollte eine Reduktion der Sendeleistung vermieden werden, da diese auch die maximale Reichweite beeinflusst. Ein Ansatz zur Minimierung des Problems wird nachfolgend näher analysiert.

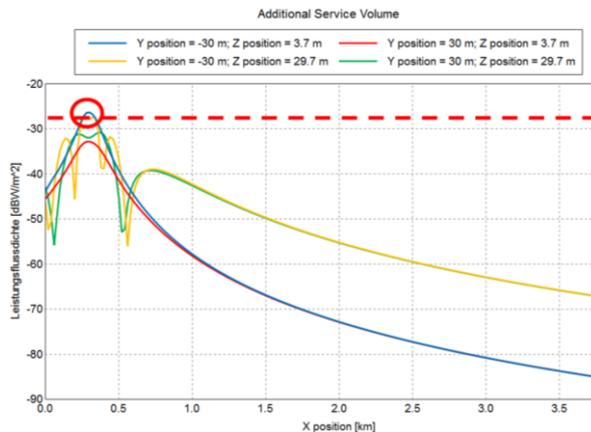


Abbildung 6: Vertikaler Schnitt am Landebahnrand 07C.

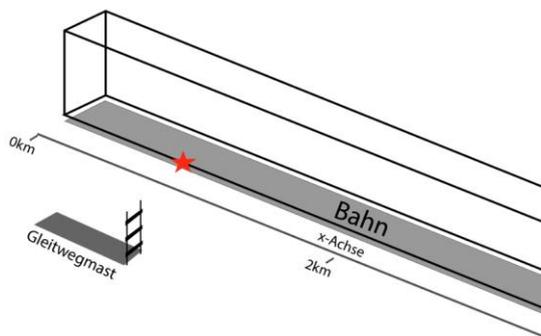


Abbildung 7: Additional Service Volume über der Bahn 07C.

Optimierung der VDB-Antennenausrichtung

Wie in einer Darstellung der horizontalen Richtcharakteristik in Abbildung 8 abgelesen werden kann, führt eine Rotation der Antenne von 45° um die Hochachse zu einer Dämpfung von ca. 1 dB (Differenzwert der eingezeichneten Punkte bei 0° und 45°). Dieser Effekt kann verwendet werden, um der vorher beschriebenen Überschreitung der Grenzwerte entgegenzuwirken. Somit beträgt die maximale Leistungsflussdichte nun -26,4 dBW/m², also 0,6 dB über dem Grenzwert von -27 dBW/m² und das nur am Landebahnrand.

Diese geringe, in der Theorie zu erwartende Überschreitung, stellt betrieblich keine Einschränkung dar, da kein landendes Flugzeug mitten über dem Landebahnrand operieren kann. Es kann daher bei der Realisierung die Empfehlung ausgesprochen werden, vorerst die Sendeleistung nicht zu reduzieren und dieses mittels Boden- und Flugmessungen [2] zu überprüfen.

Eine Analyse der anderen Service Volumes ergibt eine Einhaltung der Grenzwerte auch nach diesem Optimierungsschritt.

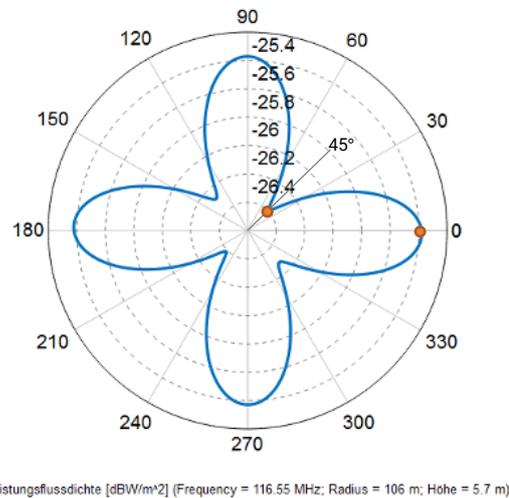


Abbildung 8: Horizontale Charakteristik VDB-Sendeantenne.

Analyse anderer Anflüge bzw. Bahnen

Für die entworfene Lösung ist eine Analyse der Anflüge auf die Schwellen 07C und 25L ausreichend, da somit Anflüge mit geringstem und größtem Abstand zur VDB-Antenne des Altbahnsystems abgedeckt werden können (Abbildung 1). In beiden Fällen treten keine Unter- bzw. Überschreitungen der VDB Feldstärke auf.



Abbildung 9: Hindernisse zwischen Antenne und Nordwestbahn.

Die Anflüge auf die Nordwestbahn 07L/25R sind mit einer VDB-Antenne am vorgeschlagenen Ort zwar möglich, allerdings ist die für Autoland und guided Takeoff (siehe [1] Kapitel 3, 3.7.3.5.3.2) geforderte Abdeckung in 12ft Höhe über der Bahn mit den notwendigen Vereinfachungen bei sehr rechenintensiven EM Simulationen nur sehr schwer genauer abzuschätzen. Topografie und große Objekte wie

Gebäude (hier z.B. die hohe Betonmauer und die Gebäude im Cargo-Bereich Nord, Abbildung 9) können aus Gründen der damit stark ansteigenden Rechenzeit von mehreren Wochen für einen Simulationslauf nicht berücksichtigt werden. Hierzu könnten noch vereinfachte Signal-Ausbreitungsmodelle wie WinProp vom gleichen Hersteller wie FEKO angewandt werden.

Die Datenlinküberdeckung der vorgeschlagenen Antennenposition ist für einen CAT I Betrieb höchstwahrscheinlich ausreichend, allerdings ist das nächste Ziel ein CAT III GBAS aufzubauen. Dafür ist ggf. ein zweiter Antennenstandort in der Nähe der Nordwestlandebahn (07L/25R) erforderlich, um auch dort die Überdeckung am Boden sicherzustellen. Ein Empfang der GBAS Korrektursignale von zwei an verschiedenen Standorten errichteten VDB Sendeantennen verspricht zudem einen vom Flughafenbetrieb unabhängigen GBAS Service. Die Anlagenarchitekturen von GAST D Anlagen unterstützen heutzutage auch Glasfaserverbindungen, um Subsysteme an weiter entfernten Orten installieren zu können. Das ist z.B. bei der Prototyp GAST D Anlage am Flughafen in Frankfurt bereits seit Jahren erprobt [6] und inzwischen in den Standards [1], [4] und [5] berücksichtigt.

VDB Leistungsflussdichte beim Überflug einer aktiven ILS Landekurs Antenne

Ein weiterer Aspekt, der bei einem Anflug mit GBAS im Fall von Frankfurt bis einschließlich CAT I Wetter beachtet werden muss, ist eine mögliche Störung durch Überflug einer aktiven Antenne eines ILS Kursenders in Gegenanflugrichtung. Diese Antenne sendet Signale in dem gleichen Frequenzbereich. Ein mit GBAS anfliegendes Flugzeug ist bei Überflug einer solchen Antenne oft nur 30 m entfernt und empfängt dieses ungewollte Signal daher sehr stark. Zugleich kann das benötigte VDB Nutzsignal bei einer weit entfernten Sendeantenne nur sehr schwach empfangen werden. Wenn das Verhältnis von gewolltem zu ungewolltem Signal für einen GBAS Bordempfänger zu schlecht wird, verliert dieser die Korrekturnachrichten und das Flugzeug müsste durchstarten. Die Empfehlung der Minimum Operational Performance Standards (MOPS) für GBAS Bodenstationen [4] besagt, dass das VDB-Signal beim Überflug eines ILS Kursenders mindestens eine Leistungsflussdichte von -70 dBW/m^2 aufweisen sollte, ohne dass weitere Analysen erforderlich sind.

Die Simulation für das VDB Nutzsignal in Frankfurt ergibt für die zu untersuchende Antennenposition die

Werte von -39.35 dBW/m^2 (Anflug 07C) und -69.95 dBW/m^2 (Anflug 25L). Mit den aktuellen ILS Anlageninstallationen in Frankfurt und dem vorgeschlagenen VDB Antennenstandort wird der Richtwert von -70 dBW/m^2 überschritten. Das VDB Signal ist also auch bei niedrigem Überflug über eine aktive ILS Landekursantenne ausreichend stark. Es ist somit keine weitergehende Analyse der genauen örtlichen Verhältnisse erforderlich.

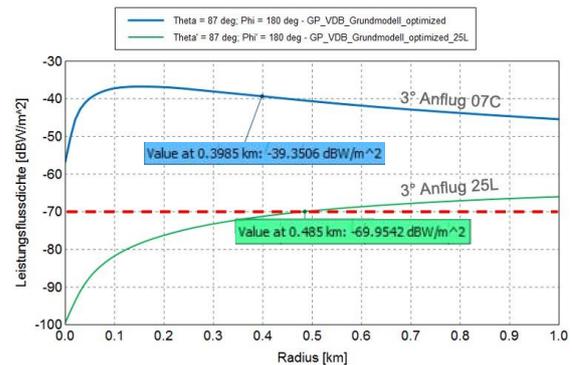


Abbildung 10: VDB-Leistungsfussdichte beim Überflug über Localizer

Analyse der Auswirkung der VDB-Antenne auf die Gleitwegsignale

Da sich mit der Montage der VDB-Antenne am ILS-Gleitwegmast auch die Charakteristik ändern könnte, muss dieses mittels einer Simulation der ILS Gleitwegsignale untersucht werden. Dazu wird aus den abgestrahlten ILS Gleitwegsignalen (Abbildung 11) das DDM (Difference in Depth of Modulation) auf Empfängerseite einmal mit (rote Kurve) und einmal ohne die VDB-Antenne (grüne Kurve) als Funktion des Anflugwinkels berechnet (Abbildung 12).

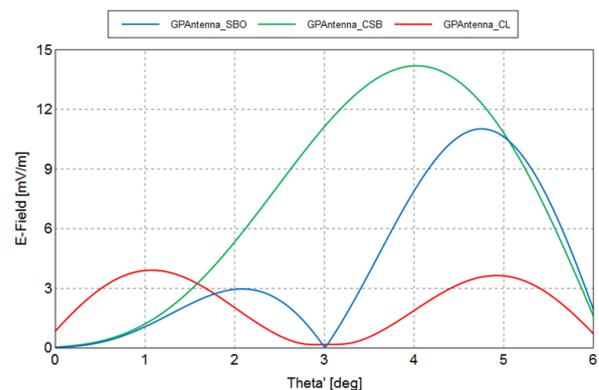


Abbildung 11: Gleitwegsignale.

Die durch die zusätzlich angebrachte VDB-Antenne erzeugte Abweichung beim DDM beträgt im relevanten Anflugwinkelbereich 0,14 μA bis 0,24 μA und ist damit um eine Größenordnung geringer als die maximal erlaubte Toleranz von 12,5 μA [1]. Demnach ist zu erwarten, dass das ILS Gleitwegsignal nicht messbar beeinflusst wird.

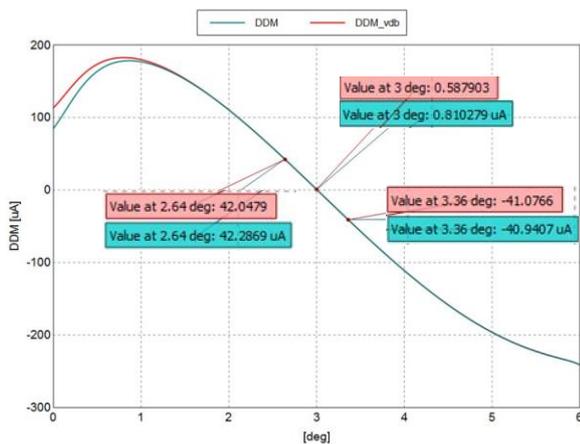


Abbildung 12: Berechnetes DDM.

Fazit

Die anfangs vorgeschlagene Position einer GBAS VDB-Antenne am ILS-Gleitwegmast genügt nach Auswertung der EM-Simulationsergebnisse allen Anforderungen an die GBAS Service Volumes [1] einschließlich eines erweiterten Nutzungsbereichs für Anflüge aus ca. 35NM [5] und beeinträchtigt gleichzeitig das ILS Gleitwegsignal nicht merklich.

Die maximale Leistungsflussdichte für das VDB-Signal wird mit -27 dBW/m² für den in Frankfurt vorgeschlagenen VDB Antennenstandort nur an einem Punkt über dem nächstliegenden Landebahnrand erreicht. Eine VDB Sendeleistung von nominell 50 Watt ist im realen Flughafenumfeld nach Boden- und Flugvermessungen voraussichtlich dennoch möglich. Bei einer Realisierung ist mit weiteren Dämpfungen und Differenzen zur Simulation durch Reflektionen, Absorption, Mehrwegeausbreitungen und Antennenfehlanspassungen zu erwarten.

Die ICAO lässt inzwischen explizit die Positionierung von GBAS VDB-Antennen im Landebahnschutzbereich unter bestimmten Bedingungen zu [3]. Der Vorteil einer solchen Lösung wäre in Zukunft eine ungehinderte Abstrahlcharakteristik der GBAS VDB Sendeantenne und eine leichte Übertragbarkeit auf andere Flughäfen. Das ist ein guter Grundstein für die anstehende Implementation von CAT III GBAS (GAST D) Systemen.

Abkürzungsverzeichnis

CAT	Category, Kategorie
dB	Dezibel
DDM	Difference in Depth of Modulation
EM	Elektromagnetische
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment
FEKO	Feldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche (Software von Altair Engineering für elektromagnetische Simulationen)
GAST	GBAS Approach Service Type
GBAS	Ground Based Augmentation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
MOPS	Minimum Operational Performance Standards
NM	Nautical mile, nautische Meile
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
RWY	Runway
VDB	VHF Data Broadcast

Literaturverzeichnis

- [1] ICAO Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation – Aeronautical Telecommunications Volume I, Seventh Edition (incl. Amendment 92), ICAO, Montreal, July 2020.
- [2] ICAO Doc 8071 Vol. II, Manual on Testing of Radio Navigation Aids - Testing of Satellite-based Radio Navigation Systems, Fifth Edition, 2007 + Corrigendum, April 2008.
- [3] ICAO DOC 9157 Aerodrome Design Manual Part 6 Frangibility, 1st Ed. incl. Amendment 1, 2018.

- [4] EUROCAE ED-114B Change 1, MOPS for Global Navigation Satellite Ground Based Augmentation System Ground Equipment to Support Precision Approach and Landing, Public Consultation, July 2022.
- [5] RTCA DO-253D Change 1, Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA, SC-159, June 2019.
- [6] Winfried Dunkel, Linda Lavik, More Results from the GAST D Multiple VDB Installation at Frankfurt Airport. ICAO NSP JWGs1, Working Paper 25, Montreal, May 2016.
- [7] Alexander Diamadis, EM-Simulationen zur Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Nutzung eines gemeinsamen Antennenstandorts für die Präzisionslandesysteme GBAS-VDB und ILS-GP, Bachelorarbeit, March 2022.

Less Stress, More Privacy: Stress Detection on Anonymized Speech of Air Traffic Controllers

Janaki Viswanathan*, Alexander Blatt*, Konrad Hagemann & Dietrich Klakow* (* Saarland University)

Deutsche Zusammenfassung

Flugverkehrskontrolle (FVK) erfordert oftmals Multi-tasking unter Zeitdruck und ist dabei stets mit der Möglichkeit gravierender Konsequenzen im Falle von Fehlern verbunden. Eine solche Situation induziert mentale Beanspruchung mit Einfluss auf die menschliche Sprachproduktion. Die rechtzeitige Erkennung mentaler Beanspruchung und das Ergreifen angemessener Gegenmaßnahmen ist ein Schlüsselpunkt für die Aufrechterhaltung des hohen Sicherheitsniveaus im Luftverkehr. Die Verarbeitung von FVK-Sprachdaten ist mit engen rechtlichen Beschränkungen verbunden, wie z. B. der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO). Die Anonymisierung von Sprachdaten birgt eine Möglichkeit diese Einschränkungen zu adressieren. In diesem Artikel werden verschiedene Architekturen zur Stresserkennung für anonymisierte Sprache beim Fluglotsen evaluiert. Die besten Netzwerke erreichen eine Stresserkennungsgenauigkeit von 93,6% auf einer anonymisierten Version des Speech Under Simulated and Actual Stress (SUSAS)-Datensatzes und eine Genauigkeit von 80,1% auf einem anonymisierten FVK-Simulationsdatensatz. Dies zeigt, dass zumindest der Schutz der Persönlichkeitsrechte kein Hindernis für den Aufbau leistungsfähiger Deep-Learning-basierter Modelle für weiterführende Anwendungen basierend auf FVK Sprachdaten darstellen muss.

Abstract

Air traffic control (ATC) demands multi-tasking under time pressure with high consequences of an error. This can induce stress. Detecting stress is a key point in maintaining the high safety standards of ATC. However, processing ATC voice data entails privacy restrictions, e.g. the General Data Protection Regulation (GDPR) law. Anonymizing the ATC voice data is one way to comply with these restrictions. In this paper, different architectures for stress detection for anonymized ATCO speech are evaluated. Our best networks reach a stress detection accuracy of 93.6% on an anonymized version of the Speech Under Simulated and Actual Stress (SUSAS) dataset and an accuracy of 80.1% on our anonymized ATC simulation dataset. This shows that privacy does not

have to be an impediment in building well-performing deep-learning-based models.

Keywords - Air traffic control, stress detection, speech, privacy, anonymization

Introduction

Air traffic controllers (ATCOs) constantly deal with a lot of information and need to choose the right procedure based on the circumstances and make quick decisions. The high level of responsibility along with the potentially fatal consequences of an error and working in shifts are known as prime sources of occupational stress [1].

Measures taken to prevent burn-outs and ATC-related incidents [2] include mandatory recovery breaks and continuous training of the ATCOs to handle stress and infrequent scenarios [1]. However, people cope with stress differently, which includes the behaviour during stress as well as the recovery time needed after stress. ATCO stress detection is an effective way to prevent incidents [3].

Monitoring ATCOs' mental state can be done in several ways. One approach is to use physiological measures like heart rate or respiration rate [4]. This has the drawback that these methods are intrusive and therefore not suitable for daily use in ATC. A less intrusive approach is to use operational speech data that are recorded anyway and are regularly deleted. A more direct approach to monitor the occurrence of stress is to use ATCO speech signals. Although stress detection for ATC speech is complicated by the fact that ATCOs are trained to remain calm even in stressful situations, Luig et al. [5] have already shown with simulated data that speech can be used to measure the workload of an ATCO. In their work, the authors argue that "stress" can be used as a term that describes "an individual's subjective capacity [...] influenced by a multitude of factors" such as working conditions as well as "remarkable events and changes in private life" ([5], p.1-2). Single influences on this mental state are regarded as "stressors". By referring to the literature ([1], [22], [23], [24] and [25] cited after [5]) the authors describe stress as a factor that affects workload. According to Luig et al., the workload level is describing the subjective capacity utilization, which cannot be

directly derived from the taskload level (related to the task complexity or size, e.g. traffic type or amount of traffic). Their approach has been to develop a speech analysis system for ATCO voice that indicates different factors of human stress with the goal to estimate from the stress level the ATCOs workload level. In contrary to that, in the work described in this article, subjective ISA workload measurements are used to estimate the stress levels, which in turn are used as a reference for a classification task based on ATC speech data.

A major restriction for any ATCO monitoring activities is privacy laws and regulations. Since ATC is a worldwide business, global and also local privacy laws must be met. With the rising collection of speech-assisted tools, there are also new guidelines that have to be met [6]. One way to avoid privacy-related issues is to remove personal information from the collected data. This can be done either on a text or speech level. On the text level, the entities can be masked or replaced that are linked to private information, for example, birth dates or phone numbers [7]. Since ATC speech is standardized and relies on a fixed phraseology¹, private entities are not as common as in normal speech. Therefore, it has been decided to focus on speech. On the speech level, anonymization assures that the original speakers - ATCOs or pilots, cannot be tracked back [8].

In the scope of this work, therefore, a stress recognition model for anonymized ATCO speech is proposed. In addition, a multiclass speaking style classification task is implemented to show that privacy does not have to be a barrier for speech processing.

Related Work

Traditional speech-based stress or emotion identifying methods are rule-based or use Hidden Markov Models (HMMs) [9]. More recent approaches rely on deep learning methods. Tomba et al. [10] show that mean energy, mean intensity and mel frequency cepstral coefficients (MFCC) can be used to detect stress. Luig et al. [5] investigate different speech features for ATCO workload detection. They use the frequency of utterances spoken per minute as an indirect indicator of stress. Borghini et al. propose to measure ATCO stress directly from brain activities using methods like electroencephalography

(EEG) [11]. In [12], the authors propose different model architectures based on deep-learning algorithms. They use convolutional layers to embed the relevant spectral input features and propose to add a long short-term memory (LSTM) network on top of the convolutional layers to capture the temporal components. The final multi-head attention layer can give more weight to the important parts of the input. This design is taken as the basis for our stress recognition model. Xu et al. [13] propose a similar architecture for emotion recognition and identify vocal tract length perturbation (VTLP) as a useful augmentation method for emotion recognition.

Speaker anonymization methods are benchmarked since 2020 in the Voice Privacy Challenge (VPC) [8]. For privacy evaluation, the VPC2020 considers various attack scenarios depending on the knowledge of the attacker. The first task is *unprotected* where both the users and the attackers use original data. The second task is *ignorant attacker* where the users anonymize their data but the attackers are unaware of it and use the original data. The third task is *lazy-informed* where both the users and attackers use anonymized data and the attacker also has access to the speaker identities. For the work at hand, the speaker anonymization method of Kai et al. [14] was used since it reaches equal error rates (EERs) above 40% on task II of the VPC2020 which indicates a high anonymization capability. The automatic speech recognition (ASR) method of the VPC2020 reaches a low word error rate (WER) of up to 10% on the anonymized speech which indicates that the anonymization of Kai et al. still allows the recognition of the spoken words.

However, other downstream tasks, i.e. applications of anonymized speech, are not investigated in the VPC2020. Therefore, an evaluation of emotion recognition has been included in this work.

Experimental Setup

Datasets

Our experiments are performed on the SUSAS [15] and DFS Munich approach simulation (DFS-MAS) datasets. The SUSAS dataset contains speech samples for different speaking styles. Nine speaking styles are considered - anger, fast, Lombard (increase of voice involuntarily when there is a background

¹ ATC phraseology examples from the Federal Aviation Administration:

https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap4_section_2.html

noise [21]), loud, clear, neutral, slow, soft, and question with 630 samples each except for neutral with 631 samples. Hence, the considered SUSAS dataset consists of 5671 samples in total. To enable binary stress detection, the following grouping of the speaking styles is suggested:

- STRESS: anger, fast, Lombard, loud
- NO-STRESS: clear, neutral, slow, soft

The label 'question' has been left out for our binary classification since it could occur in both stress and no-stress scenarios. Hence, there are 5041 samples for the stress detection task. An 80:20 split is done to create train and test sets and the train set is split again as 80:20 to create train and validation datasets. This is based on the approach used by Shin et al. [12] and results in a train | val | test split of 64%|16%|20%. This data split is used for all the experiments.

The DFS-MAS dataset was produced by the Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS). It consists of ATC simulation data for Munich approach. The ATC speech samples were uttered by two male and two female ATCOs, with each having more than ten years of work experience. Following the approach by Luig et al. [5] described above, the workload level is used here as an approximation for the stress level of an ATCO. During the 90-minute simulation run, the workload of the ATCOs was measured every five minutes via an electronically presented pop-up questionnaire using the instantaneous self-assessment of workload technique (ISA) [16][17]. For binary stress detection on the DFS-MAS dataset, the stress labels are grouped according to the ISA workload labels:

- STRESS: high, excessive
- NO-STRESS: boring, relaxed, comfortable

The DFS-MAS dataset is highly imbalanced with 60 stress and 678 no-stress samples. Therefore, data augmentation methods such as VTLP and white noise addition are applied. To ensure that the distribution of the augmented data is the same across labels, the same number of augmented samples are generated for both the classes. The standard parameters in the 'nlpaug' package [26] are used. We generate ten different augmented versions of the stress samples - five using VTLP and five using white noise addition, while the majority class (No-Stress) is just augmented once per sample. Table gives an overview of the data augmentation.

To test the performance of stress detection on anonymized data, an anonymized version of both the datasets is created. The anonymization method is described in the next section. The classification tasks

are performed on both anonymized and non-anonymized data.

Table 1: Summary of the augmented DFS-MAS dataset. The multiplication factors of the [train, validation, test] split represent the number of different copies created per clean sample.

Augmentation method	Stress [39, 9, 12]	No-stress [435, 108, 135]
None	[39, 9, 12]	[45, 18, 15]
VTLP	[39, 9, 12] * 5	[195, 45, 60] * 1
White noise	[39, 9, 12] * 5	[195, 45, 60] * 1
Total	[429, 99, 132]	[435, 108, 135]

Anonymization

As mentioned earlier, the lightweight voice anonymization (LVA) of Kai et al. [14] is used as the speaker anonymization method. Due to the high overall performance in the VPC2020 Tasks I, III, and V, waveform resampling is used as the anonymization method for the experiments here if not stated otherwise. Moreover, the gender-specific parameters are used for all the samples.

The resampling is based on the Waveform Similarity Overlap-Add (WSOLA) algorithm, which allows stretching the original speech signal by a factor a , while maintaining the correct pitch. Resampling this stretched signal by an a -times faster sampling frequency leads to the anonymized signal, which is of equal length as the original signal but varies, for example, in the pitch and formants.

Speech Preprocessing

The ATC utterances are pre-processed before they are fed through the classification network. A Wiener filter [18] is applied first to remove noise. Furthermore, a pre-emphasis filter is applied which boosts the signal-to-noise ratio of the higher-frequency components since they are more susceptible to noise. Short-time Fourier transformation (STFT) is applied to generate the spectrogram. Then the log amplitude spectrogram is obtained by taking the logarithm of the amplitude component of the spectrogram. It is further converted to a mel spectrogram (MS) using the mel-frequency conversion formula [19] together with a filter bank of 128 filters. Two different speech representations are compared. The first one is obtained by applying the logarithm to the MS. This results in the log mel spectrogram (LMS) as network input. The second speech variant is generated by

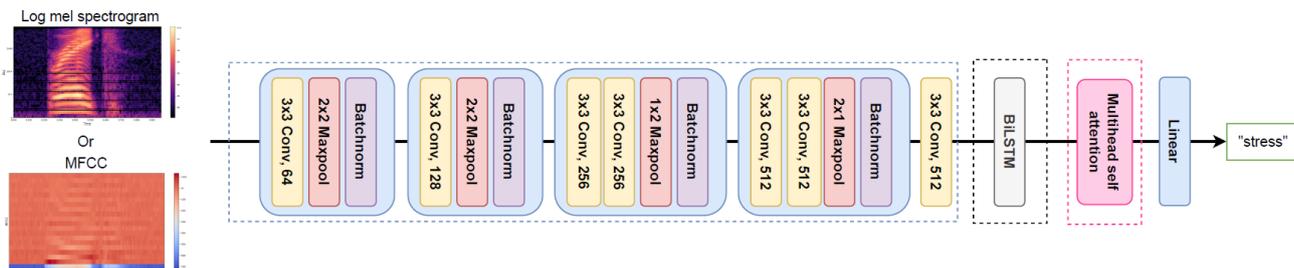


Figure 1: Stress detection network depicting all the three architectures. The network was built incrementally. The blue dotted box represents the CNN, CNN along with the black dotted box represents CRNN, and CRNN. along with the pink dotted box represents CRNN+Attention model architecture.

applying the discrete cosine transformation (DCT) to the LMS to generate the mel frequency cepstral coefficients (MFCC) [20]. Using MFCC has the advantage that the input data can be compressed without losing too much information by using the most informative DST coefficients and dropping the rest. For our experiments, 20 coefficients are used.

Stress Detection Networks

Our stress detection networks are based on [12]. Three different architectures are investigated with increasing complexity - CNN, CRNN, and CRNN+Attention. They are built using different parts of the stack: CNN + LSTM + multi-head-Attention. Figure shows the architecture of the models. Multi-head attention with four heads is used since this is the best-performing architecture in Shin et al. [12]. The experiments are repeated thrice and the mean and the standard deviation of the accuracies are calculated to check for robustness of the models.

Results

Architecture Comparison

The different architectures vary largely in their number of trainable parameters as shown in Table 2. This raises the question of whether the additional parameters lead to increased accuracy. The architecture comparison in Table 3 shows that either the CRNN or CRNN+Attention models have the highest accuracy for most of the experiments. The highest scores on the speaking style and stress classification tasks on the SUSAS dataset are reached by the CRNN architecture in combination with the LMS feature. This holds true for anonymized and non-anonymized data where the CRNN model outperforms the 11% larger CRNN+Attention model. In contrast, on the DFS-MAS dataset, the benefit of the additional attention layer of the CRNN+Attention model leads to a significant increase in accuracy of more than 5% in comparison with the CRNN model.

Table 2: Comparison of architecture sizes for different speech representations.

Model architecture	Number of trainable parameters	
	MFCC	LMS
CNN	7,435,906	8,114,818
CRNN	9,012,866	9,691,778
CRNN + Attention	10,063,490	10,742,402

Replacing MFCC with LMS as input features leads to an average performance gain of 1-2%. This comes with the trade-off that the input dimension is increased by a factor of 6.4. Therefore, using MFCC as input is a valid alternative for devices with lower computational power.

Stress Detection for ATC

ATC speech differs substantially from normal speech. It consists of a set of phraseologies that allow for handling different situations, like landing, take-off, and emergencies. In addition to that, ATCOs are supposed to give clear and calm instructions even under stressful situations. Furthermore, it is difficult to get a properly labelled, well-balanced dataset particular to the ATC scenario. This makes stress detection in this domain challenging.

Table 3 shows the difference in the accuracy of stress detection between the SUSAS and the DFS-MAS dataset. Due to the challenges mentioned above, the mean accuracy on the DFS-MAS dataset is about 20% lower. In contrast to the SUSAS data, the more complex CRNN+Attention model reaches the highest accuracies independent of the input features and the anonymization. This is another indicator of the difficulty level of the DFS-MAS dataset. Nevertheless, our best model reaches a performance of 80.1% on the DFS-MAS dataset.

Anonymization Impact

Table 3 allows the comparison of the model performance of anonymized and non-anonymized datasets trained using different model architectures and different speech features. On the SUSAS dataset, the models trained on the anonymized version have a mean average accuracy that is 1-2% less than its non-anonymized counterpart. For the CRNN+Attention network, anonymization even leads to a performance increase. Figure 2 gives a more detailed insight into the classification accuracy for each class. For both anonymized and non-anonymized data, the CRNN model with LMS feature classifies the majority of the classes correctly, with an accuracy of over 70%. On both datasets, the model has problems distinguishing similar classes, such as clear, neutral, and slow from one another. The majority of the performance drop from non-anonymized to anonymized data is due to the misclassification of neutral speech, where the accuracy drops from 70% to 57%. For the other classes, the accuracy difference is 7% or less.

The anonymization method of the target data for stress detection might not always be known. Therefore, the question is, how would the performance decrease if the inference data is anonymized while the model is trained on non-anonymized data. Comparing the first row of 4 with the best-performing models Table 3 shows

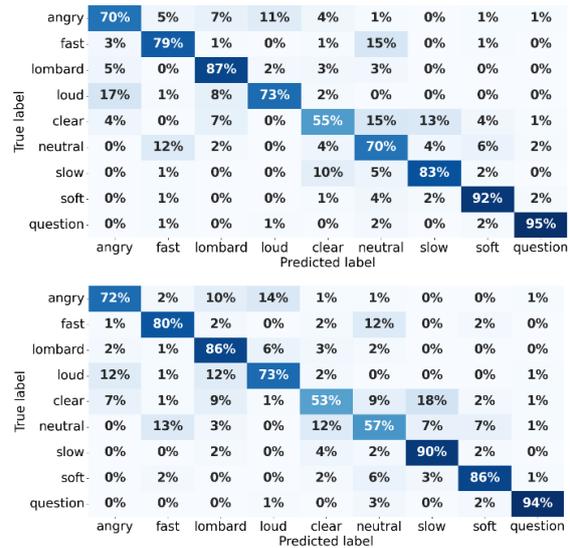


Figure 2: Confusion matrices of CRNN model with LMS feature on the non-anonymized (at the top) and anonymized (at the bottom) SUSAS dataset.

that the model performance decreases substantially for both model architectures.

While the accuracy of the CRNN+Attention model using MFCC drops from 93.9% to 80.1%, the accuracy of the CRNN model using LMS feature has an almost 19% drop - from 94.4% to 75.7%. The results are similar when the model is trained on raw SUSAS data and tested on anonymized SUSAS data.

Table 3: Mean accuracies of speaking style and stress recognition tasks on the SUSAS and DFS-MAS test sets. The standard deviation scores are given in brackets.

Anonymized	Feature	Model architecture	SUSAS		DFS-MAS
			9 Speaking styles	Stress	Stress
No	MFCC	CNN	75.6% [0.008]	93.0% [0.009]	74.2% [0.013]
		CRNN	75.8% [0.008]	93.1% [0.006]	73.5% [0.012]
		CRNN + Attention	70.6% [0.029]	93.9% [0.006]	75.6% [0.039]
	Log Mel Spectrogram (LMS)	CNN	76.8% [0.004]	93.6% [0.002]	66.9% [0.027]
		CRNN	77.7% [0.006]	94.4% [0.004]	66.9% [0.054]
		CRNN + Attention	73.9% [0.022]	93.0% [0.005]	71.6% [0.042]
Yes	MFCC	CNN	73.7% [0.006]	91.2% [0.002]	71.8% [0.042]
		CRNN	72.3% [0.008]	91.5% [0.005]	69.5% [0.046]
		CRNN + Attention	71.5% [0.009]	91.9% [0.004]	75.9% [0.044]
	Log Mel Spectrogram (LMS)	CNN	74.9% [0.008]	92.5% [0.005]	71.4% [0.006]
		CRNN	75.6% [0.015]	93.6% [0.003]	74.8% [0.036]
		CRNN + Attention	74.1% [0.003]	93.6% [0.002]	80.1% [3.384]

On the ATC-relevant DFS-MAS dataset, the anonymization leads to an increase in performance. The best performing network, CRNN+Attention, trained and tested on anonymized data outperforms the best model for non-anonymized data by 4.5%. Since the nonaugmented DFS-MAS dataset is imbalanced with less than 100 stress utterances, the anonymization could act as an additional augmentation method. It should be noted that the CNN and CRNN models do not benefit from the anonymization, but they are also outperformed by the attention model by 1.4% to 9.7%.

Table 4: Stress recognition cross-domain test accuracies. The best-performing models of Table 3 are used for testing. (A) represents the corresponding anonymized dataset.

Trained on	Tested on	MFCC	LMS
SUSAS	SUSAS (A)	80.1% [ATTN]	75.7% [CRNN]
SUSAS (A)	SUSAS	80.6% [ATTN]	78.7% [ATTN]
SUSAS	DFS-MAS	50.2% [ATTN]	50.2% [CRNN]
SUSAS (A)	DFS-MAS	64.8% [ATTN]	51.3% [ATTN]
SUSAS	DFS-MAS (A)	56.2% [ATTN]	45.3% [CRNN]
SUSAS (A)	DFS-MAS (A)	72.3% [ATTN]	52.1% [ATTN]

Cross-Domain Stress Detection

To the best of our knowledge, there are no publicly available stress-labelled ATC datasets. Therefore, it is also evaluated if it is possible to reach high stress recognition results on ATC data with a model that is trained on another domain. The results are shown in 4. For this, the best-performing SUSAS models, as marked in bold in Table 3, are used on the out-of-domain ATC data. In contrast to the results in Table 3 anonymizing the SUSAS dataset improves the cross-domain performance significantly by over 14% for the CRNN+Attention model with MFCC. The additional augmented data counteracts domain overfitting and leads therefore to a better generalization of the model. By adding anonymization also to the DFS-MAS test set, the performance increases over 22% in comparison with the non-anonymized datasets. With an accuracy of 72.3%, the difference to the best-performing model trained on the ATC data is below 8%. Interestingly, using MFCC as input gives consistently better cross-domain scores than using

LMS as input. The higher information condensation in MFCC leads to a better generalization and hence avoids overfitting to the training domain, similar to anonymization.

Conclusions

Our experiments show that anonymization is no obstacle to stress and speaking style recognition. In fact, it is observed that anonymization causes just a minor accuracy drop of 1-2% on the SUSAS dataset and even leads to a performance increase on the target ATCO speech of more than 4%. This probably comes down to the fact that anonymization can be seen as a data augmentation method, which could be beneficial, especially for low-resource tasks. Furthermore, we see that on the single speech style level, the performance drop is mainly due to the misclassification of neutral speech samples with, for example, similar clear speech samples. In other words, the classification results are stable through anonymization in the majority of the classes. In the cross-domain setting, it is shown that stress recognition models trained on out-of-domain data can be used to perform stress prediction on ATC. In this case, one should rely on MFCC as input since they generalize better than the LMS input. For our anonymization method, it is shown that if the anonymization method for ATC data is known, anonymizing the out-of-domain training data additionally improves the performance. Regarding the architectures, it is shown that a combination of MFCC and the CRNN model outperforms the CRNN+Attention models using the LMS feature in the speaking style recognition task, while having only 84% of its trainable parameters. This makes this model interesting if computational power is a limiting factor. Nevertheless, on the more demanding ATC data, the CRNN+Attention architecture outperforms the other networks by a margin, this holds also true for the cross-domain experiments.

For future work, we would like to explore different data augmentation methods which might increase the accuracy. Furthermore, we would like to investigate MFCC with different number of coefficients as an input feature since we observed equally good results as LMS. Another aspect to explore is transfer learning since it proved to be as good as the trained models on the DFS-MAS dataset. With transfer learning and the comparatively lower dimensional MFCC as an input feature, we could expand our work to have more practical applications where we could reduce the space and computational complexity to get live prediction and also train at the edge devices as and when we get new speech samples. By having a live stress detector, we could

actively reduce the workload stress of ATCOs and avoid any incidents.

In summary, it is strongly suggested to test the incorporation of anonymization methods for privacy-critical tasks, especially for air traffic control.

Acknowledgements: This work is based on the thesis "Identification of Stress from Anonymized ATCO Speech" to achieve a master's degree in Data Science and Artificial Intelligence at the Saarland University [27].

Abbreviations

ASR	Automatic Speech Recognition
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic Controller
CNN	Convolutional Neural Network
CRNN	Convolutional Recurrent Neural Network
DCT	Discrete Cosine Transformation
DFS-MAS	DFS Munich Approach Simulation
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
EEG	Electroencephalogram
EER	Equal Error Rate
FVK	Flugverkehrskontrolle
HMM	Hidden Markov Models
LMS	Log Mel Spectrogram
LSTM	Long Short-Term Memory network
LVA	Light weight Voice Anonymization
MFCC	Mel Frequency Cepstral Coefficients
MS	Mel Spectrogram
STFT	Short-Time Fourier Transform
SUSAS	Speech Under Simulated and Actual Stress
VPC	Voice Privacy Challenge
VTLP	Vocal Track Length Perturbation
WER	Word Error Rate
WSOLA	Waveform Similarity Overlap-Add

References

- [1] Giovanni Costa et al., "Occupational stress and stress prevention in air traffic control", International Labour Office Geneva, 1996.
- [2] Lejla Niksic and Ebru Arıkan Öztürk, "U.S./Europe Comparison of Atc-Related Accidents and Incidents," International Journal for Traffic and Transport Engineering, vol. 12, no. 2, pp. 155–169, apr 2022.
- [3] Kate Miriam Loewenthal, Michael Eysenck, Duncan Harris, Guy Lubitsh, Tessa Gorton, and Helen Bicknell, "Stress, distress and air traffic incidents: Job dysfunction and distress in airline pilots in relation to contextually assessed stress," Stress Medicine, vol. 16, no. 3, pp.179–183, apr 2000.
- [4] Stefan Sammito, B. Thielmann, R. Seibt, A. Klussmann, M. Weippert, and I. Böckelmann, "Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft," Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin, vol. 51, no. 2, pp. 123–141, 2016.
- [5] Johannes Luig and Alois Sontacchi, "Workload monitoring through speech analysis: Towards a system for air traffic control," in 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010, ICAS 2010, 2010, vol. 6, pp. 4729–4738.
- [6] Eugenia Politou, Efthimios Alepis, and Constantinos Patsakis, "Forgetting personal data and revoking consent under the GDPR: Challenges and proposed solutions," Journal of Cybersecurity, vol. 4, no. 1, 2018.
- [7] David Ifeoluwa Adelani, Ali Davody, Thomas Kleinbauer, and Dietrich Klakow, "Privacy guarantees for de-identifying text transformations", To cite this version: HAL Id : hal-02907939, 2020.
- [8] Natalia Tomashenko, Xin Wang, Emmanuel Vincent, Jose Patino, Brij Mohan Lal Srivastava, Paul Gauthier Noé, Andreas Nautsch, Nicholas Evans, Ju- nichi Yamagishi, Benjamin O'Brien, Anaïs Chanclu, Jean Francois Bonastre, Massimiliano Todisco, and Mohamed Maouche, "The VoicePrivacy 2020 Challenge: Results and findings," Tech. Rep., 2022.
- [9] Albino Nogueiras, Asuncion Moreno, Antonio Bonafonte, and José B. Marino, "Speech emotion recognition using hidden Markov models," in EUROSPEECH 2001- SCANDINAVIA - 7th European Conference on Speech Communication and Technology, 2001, pp. 2679–2682.

- [10] Kevin Tomba, Joel Dumoulin, Elena Mugellini, Omar Abou Khaled, and Salah Hawila, "Stress detection through speech analysis," ICETE 2018 - Proceedings of the 15th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications, vol. 1, pp. 394–398, 2018.
- [11] Gianluca Borghini, Gianluca Di Flumeri, Pietro Aricò, Nicolina Sciaraffa, Stefano Bonelli, Martina Ragosta, Paola Tomasello, Fabrice Drogoul, Uğur Turhan, Birsen Acikel, Ali Ozan, Jean Paul Imbert, G'eraud Granger, Railane Benhacene, and Fabio Babiloni, "A multimodal and signals fusion approach for assessing the impact of stressful events on Air Traffic Controllers," Scientific Reports, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, may 2020.
- [12] Hyeon Kyeong Shin, Hyewon Han, Kyunguen Byun, and Hong Goo Kang, "Speaker-invariant Psychological Stress Detection Using Attention-based Network," 2020 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, APSIPA ASC 2020 - Proceedings, pp. 308–313, 2020.
- [13] Mingke Xu, Fan Zhang, Xiaodong Cui, and Wei Zhang, "Speech Emotion Recognition with Multiscale Area Attention and Data Augmentation," ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, vol. 2021-June, pp. 6319–6323, 2021.
- [14] Hiroto Kai, Shinnosuke Takamichi, Sayaka Shiota, and Hitoshi Kiya, "Lightweight Voice Anonymization Based on Data-Driven Optimization of Cascaded Voice Modification Modules," 2021 IEEE Spoken Language Technology Workshop, SLT 2021 - Proceedings, pp. 560–566, jan 2021.
- [15] John HL Hansen, Sahar E Bou-Ghazale, Ruhi Sarikaya, and Bryan Pellom, "Getting Started with SUSAS: A Speech Under Simulated and Actual Stress Database," Eurospeech, pp. 1743–46, 1997.
- [16] C. Jordan and S. D. Brennen, "Instantaneous self assessment of workload technique (ISA)," 1992.
- [17] Barry Kirwan, Alyson Evans, Laura Donohoe, Andy Kilner, Tab Lamoureux, Toby Atkinson, and Heather MacKendrick, "Human factors in the atm system design life cycle," in FAA/Eurocontrol ATM R&D Seminar, 1997, pp. 16–20.
- [18] Jacob Benesty, Jingdong Chen, Yiteng (Arden) Huang, and Simon Doclo, "Study of the Wiener Filter for Noise Reduction," in Speech Enhancement, pp. 9–41. Springer-Verlag, dec 2005.
- [19] S. S. Stevens, J. Volkman, and E. B. Newman, "A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 8, no. 3, pp. 185–190, 1937.
- [20] Chadawan Ittichaichareon, Siwat Suksri, and Thaweesak Yingthawornsuk. "Speech recognition using mfcc." In International conference on computer graphics, simulation and modeling , volume 9, 2012.
- [21] Zollinger, S. A., & Brumm, H. (2011). „The lombard effect". Current Biology, 21(16), R614-R615.
- [22] Hagmüller, M. Rank, E. & Kubin, G., "Evaluation of the human voice for indications of workload-induced stress in the aviation environment." EEC Note No. 18/06, 2006.
- [23] Hansen, J. & Patil, S., "Speech under stress: Analysis, modeling and recognition". Lecture Notes in Computer Science, Jan 2007.
- [24] Hering, H., "Les differents types de stress professionnel appliques au controle aerien". EEC Note No. 01/02, 2002.
- [25] Scherer, K. Grandjean, D., Johnstone, T. Klasmeyer, G. & Bänzinger, T., "Acoustic correlates of task load and stress." Seventh International Conference on Spoken Language Processing, 2002.
- [26] Edward Ma. 2019. "Nlp augmentation." URL Retrieved December 12, 2022, from: <https://github.com/makcedward/nlpaug>
- [27] Viswanathan, J. (2022). „Identification of stress from anonymized ATCO speech". Master's thesis. Saarland University.

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

Innovation im Fokus erscheint halbjährlich und beschäftigt sich bevorzugt mit Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung mit Beteiligung DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Diese Ausgabe ist elektronisch im Internet (www.dfs.de > [Medien](#) > [Publikationen](#) > "Schlagworte" *Innovation im Fokus*) sowie über das DFS Intranet verfügbar. 90 Exemplare werden in gedruckter Form aufgelegt.

Wie auch der Vorgänger-Zeitschrift „TE im Fokus“ wurde dieser Zeitschrift von der Deutschen Bibliothek eine ISSN (International Standard Serial Number) zugeteilt:

Printversion: ISSN 2198-8951 (vormals: 1861-6364)

Internet-Version: ISSN 2198-896X (vormals: 1861-6372)

Datum dieser Ausgabe: 20.12.2022

DISCLAIMER

Alle hier erwähnten Warenzeichen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. Warenzeichen werden nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen von Urheber- oder Markenrechtskennzeichen darf jedoch nicht geschlossen werden, dass es sich um einen nicht geschützten Namen oder um eine nicht geschützte Marke handelt.

COPYRIGHT

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Copyright © 2022 by DFS Deutsche Flugsicherung GmbH - Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder eines GM-Eintrages.



DFS Deutsche Flugsicherung

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung,
Entwicklung und Validierung

Herausgeber:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Günter Achatz, Bereichsleitung
Planung & Innovation

Redaktion:

Dr. Konrad Hagemann
Tel. +49 (0)6103 707 5745
E-Mail: konrad.hagemann@dfs.de

Stefan Tenooort
Tel. +49 (0)6103 707 5769
E-Mail: stefan.tenooort@dfs.de

Dr. Morten Grandt
Tel. +49 (0)6103 707 1139
E-Mail: morten.grandt@dfs.de

Oliver Haßa
Tel. +49 (0)6103 707 5762
E-Mail: oliver.hassa@dfs.de

Iris Filbrich
Tel. +49 (0)6103 707 1131
E-Mail: iris.filbrich@dfs.de

Anschrift der Redaktion:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Redaktion Innovation im Fokus
Am DFS-Campus 5
63225 Langen
E-Mail: forschung@dfs.de

Nachdruck nur mit Genehmigung.

