

VON DER FORSCHUNG ZUR INBETRIEBNAHME AM BEISPIEL VON KLIMAOPTIMIERTEN FLUGROUTEN

Dr. R. Leemüller,
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Am DFS-Campus 10, 63225 Langen, Deutschland

Zusammenfassung

Anhand von Forschungsergebnissen zum Klimaeffekt von persistenten Kondensstreifen und den daraus entstehenden Zirren sind einige Fragen bezüglich der operativen Umsetzung zur Vermeidung von eisübersättigten Gebieten aufgezeigt worden. Dieser Beitrag beschreibt auf Grund der noch offenen Fragen die Herausforderungen einer zügigen Umsetzung. 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.

1. ÜBERBLICK

In einigen Bereichen stellt man fest, dass die Zeitdauer von einer Idee über Forschung bis zum regelmäßigen Betrieb recht hoch 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 noch nicht ausreichend betrachtet. Erfahrungen in der DFS zeigen, dass unter anderem die Erstellung bzw. Änderungsbeschreibung von Betriebsverfahren, Sicherheitsbewertungen, ggfs. Zertifizierung durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF), 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 dessen 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 wird zuerst ein Überblick der Klimaschutzmaßnahmen der DFS und der aktuelle Stand der Forschung zu persistenten Kondensstreifen gegeben. Anschließend werden die Auswirkungen auf die operative Nutzung und der zukünftige Probebetrieb beschrieben.

2. KLIMASCHUTZ IN DER DFS

Der Klimaschutz war und ist für die DFS schon immer ein wichtiger Bestandteil ihres Handelns.

Die DFS optimiert kontinuierlich die Flugeffizienz von Strecken, sowohl horizontal wie vertikal.

Die horizontalen Flugeffizienz (HFE) wurde durch die Einführung von Free Route Airspace so hoch optimiert, dass innerhalb Deutschlands eine weitere Optimierung an

ihre Grenzen gekommen ist. Zusätzliche Verbesserungen sind nur grenzüberschreitend mit Nachbar-Flugsicherungen möglich [1], [2].

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

Am Beispiel des Optimized Profile Descend (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 indem 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 [1].

Seit einigen Jahren sind in dem DFS Umwelt- und Klimaschutzkonzept (DUKK) 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.

3. 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.

In der Abbildung für Strahlungsantrieb (BILD 1) ist für verschiedene Klimaeffekte (Kondensstreifen-Zirren, CO₂, NO_x und andere) die Größe dargestellt.

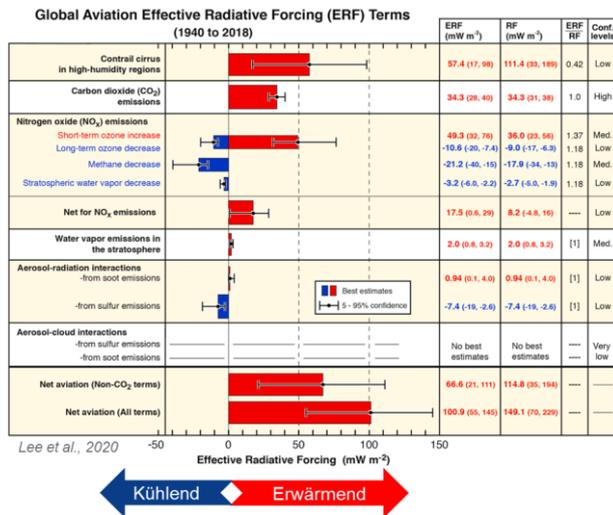


BILD 1. Strahlungsantriebe (Effective Radiative Forcing, ERF) verschiedener klimawirksamer Effekte der Luftfahrt [3]

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 jedoch die Einzeleffekte mit einer geeigneten Metrik zeitlich zu integrieren. Der Weltklimarat (IPCC) verwendet als Metrik das GWP100 (Global Warming Potential auf 100 Jahre) [4]. 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. (BILD 2)

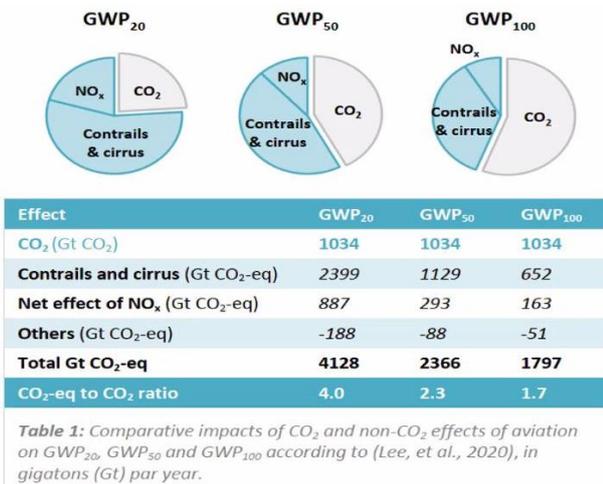


BILD 2. Einfluss der CO₂- und Non-CO₂-Effekte für verschiedene Zeitskalen [3]

3.1. 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 [5]. 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.

In Abbildung 3 (BILD 3) sind beispielhaft ISSR in der Flugfläche 330 im oberen Luftraum der DFS dargestellt.

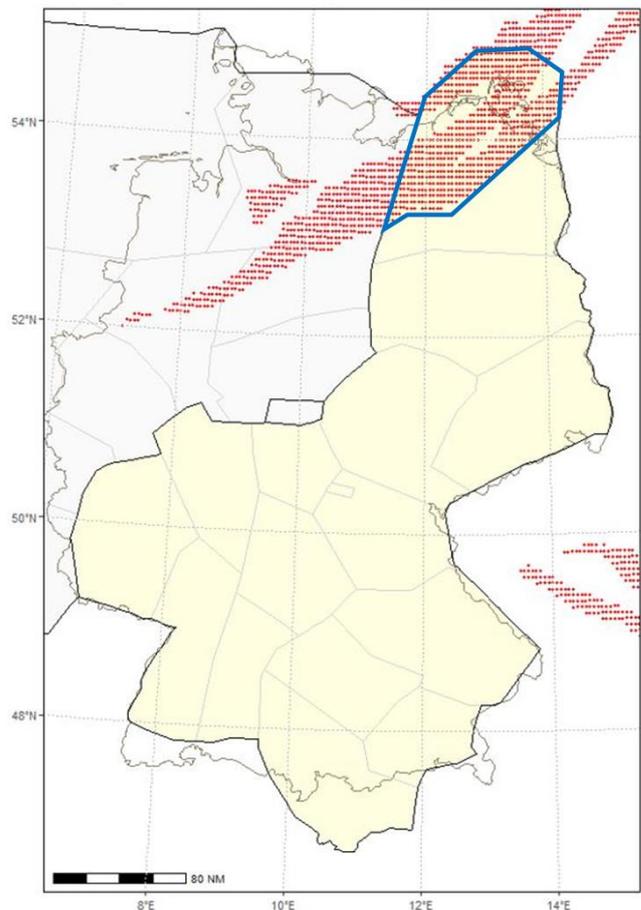


BILD 3. Darstellung von ISSR im Luftraum Karlsruhe

am 10. August 2022 um 5:00 (UTC) in Flight Level 330.

Die ISSR-Gebiete werden auf Basis der Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berechnet. Die Daten des DWD werden alle 6 Stunden Neuberechnet mit aktualisierten Vorhersagen bis zu 48h in stündlicher Auflösung [6]. Für jeden dreidimensionalen Punkt muss das Kriterium der Eisübersättigung und das Schmidt-Appleman-Kriterium der Kondensstreifenentstehung zutreffen.

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-Gebiete diskutiert. Diese Gebiete können horizontal durch Routenänderung oder vertikal durch Höhenänderung umflogen werden [7], [8], [9].

4. HERAUSFORDERUNGEN

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-Gebiete können bis 450km groß werden. Ein seitliches Umfliegen dieser Gebiete benötigt Platz im Luftraum, welcher in dicht beflogenen Zentraleuropa kaum vorhanden ist. Der EASA-Report [8] empfiehlt daher das laterale Umfliegen über dem Atlantik, welches auch in Übereinstimmung mit der Studie von Grewe [7] 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 zu vermeiden gilt.

Das vertikale Über- oder Unterfliegen der ISSR-Gebiete ist in dicht beflogenen Lufträumen die bessere Wahl. Allerdings 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 [10] 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.“

Dem Klimaeffekt, basierend auf der Vermeidung von persistenten Kondensstreifen und den daraus entstehenden Zirren, müssen die nicht optimalen Flugrouten und Höhen gegenübergestellt werden. Durch den erhöhten Kerosinverbrauch entstehen mehr CO₂-Emissionen. 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 [8] 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-Gebiete spielt eine wichtige Rolle bei dem Verfahren zum Umfliegen dieser. Dies wird durch die folgenden vier Fälle illustriert.

Erfolgreiches Umfliegen (BILD 4 links): Das ISSR-Gebiet wurde korrekt vorhergesagt und durch die neue Route wurden die persistenten Kondensstreifen vermieden. Die vorherbestimmten Abstände zur Meidung der ISSR-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 (BILD 4 rechts): Das vorhergesagte ISSR-Gebiet 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.

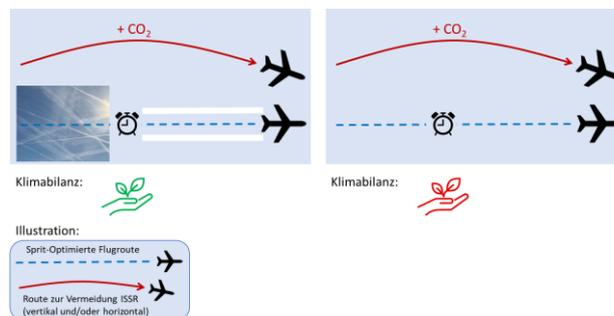


BILD 4. Links: erfolgreiches Umfliegen durch korrektes Vorhersagen der ISSR. Rechts: Fehlgeschlagenes Umfliegen durch nicht mehr existentes ISSR (modifiziert nach [11])

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

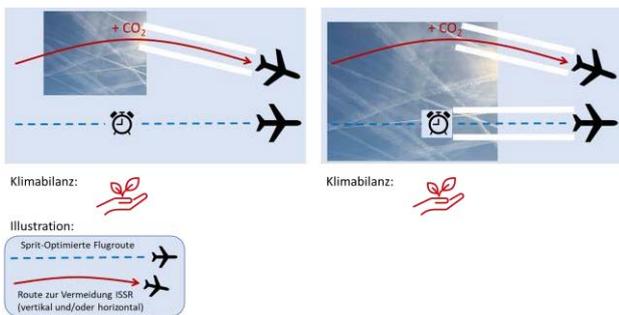


BILD 5. Links: fehlgeschlagenes Umfliegen durch ISSR auf der neuen Route. Rechts: Fehlgeschlagenes Umfliegen durch erheblich größeres ISSR-Gebiet (modifiziert nach [11])

Ein erfolgreiches Umfliegen setzt, wie schon erwähnt, eine genaue und verlässliche Kenntnis der Grenzen der ISSR-Gebiete 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 des ISSR-Gebiets) muss in diesen Fällen freigehalten werden und es kann ein Kapazitätsengpass bei der Flugführung entstehen.

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

5. 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 in Kapitel 4 aufgeworfen wurden. Zwei Schwerpunkte sind in dem Projekt vorgesehen. Zum einen die Durchführung eines Probetriebs im oberen Luftraum der DFS und Simulationen zur Berechnung aller Klimaeffekte eines Fluges und zum anderen die Optimierung der Klimaeffizienz im europäischen Luftraum.

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

Im dichtbeflogenen deutschen Luftraum wird in der Regel nur eine Höhenänderung zur Meidung der eisübersättigten Gebiete zur Anwendung kommen. Die Höhenänderung ist dabei so gering wie möglich zu halten.

In BILD 3 ist ein ISSR-Gebiet in FL330 für einen bestimmten Tag vorhanden. 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 ein einigermaßen stabiles ISSR-Gebiet von etwa 3h Dauer. Anschließend verlagert es sich südwärts und löst sich innerhalb von 2h auf.

Die Forschung geht von einer ausreichenden Höhenänderung von 2000ft aus, um ein eisübersättigtes Gebiet zu meiden. 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 Richtung 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 BILD 6). Die Höhenänderungen beim Probetrieb werden 1000ft von den Grenzen des ISSR Gebietes sein, um die Vorhersage der ISSR 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.

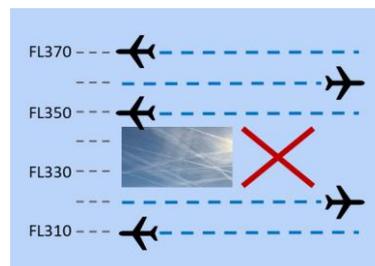


BILD 6. Klimawirksame Zone mit den umliegenden Höhenlevel

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-Gebiete 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 die Airlines über das Verfahren informiert werden, da den Piloten gegebenenfalls ungeplante Höhenänderungen angewiesen werden, die ggfs. nicht seiner 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. Nur eine positive Klimabilanz wird eine operative Nutzung in Europa möglich machen. Ob Regeln zu geänderten Flugrouten auf Basis der Klimabilanz innerhalb des Projekts D-KULT beschrieben werden können, ist aufgrund der Kürze der Projektlaufzeit noch nicht absehbar.

Der Probetrieb wird eine validierte Aussage zu den Grenzen der ISSR-Gebiete 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.

Fundierte Grundlagen für einen operationellen Betrieb werden als Ergebnis aus dem Projekt D-KULT erwartet, die anschließend auf einen größeren geografischen Raum (z.B. Europa) angewendet werden können. Dazu werden Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger bereitgestellt.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DFS Mobilitätsbericht (2021) Luftverkehr in Deutschland. Mobilitätsbericht 2021
- [2] Buxbaum, J., „Rolle des Luftverkehrsmanagements bei der Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs“, Beitrag zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2022
- [3] 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*.
- [4] 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.
- [5] Gierens, K. et al., 2020: *Meteorol. Z.*, 29, 165-176.
- [6] WAWFOR Datensatz für die Luftfahrt, World Aviation Weather FORecast. Flyer Deutscher Wetterdienst DWD
- [7] 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>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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).
- [11] David S Lee (2021) Setting the scene: climate change and its impact on air traffic control. FABEC Research Workshop: Climate Change and the Role of Air Traffic Control, 22-23 September 2021, Vilnius, Lithuania