EINE KLIMABEWERTUNG ZUM VERFAHREN ZUR VERMEIDUNG VON PERSISTENTEN KONDENSSTREIFEN

R. Leemüller, K. von Sack, N. Waltenberg,
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Am DFS-Campus 10, D-63225 Langen, Deutschland

Zusammenfassung

Bei der DFS erfolgte eine Echtzeitsimulation zur Validierung des operationellen Konzepts eines taktischen Vermeidungsverfahrens für Gebiete mit potenziell langlebiger Kondensstreifenbildung unter realistischen Bedingungen der Flugverkehrskontrolle. Ergänzend wurde eine nachgelagerte Analyse der klimatologischen Wirkungen initiiert, um die potenzielle Wirksamkeit des Verfahrens hinsichtlich des Einflusses auf den Klimawandel zu bewerten. Die Studie identifizierte dabei sowohl wissenschaftliche als auch operationelle Herausforderungen, die durch die angewandte Methodik offengelegt wurden. Zur Entwicklung eines sicheren, wirksamen und operationell tragfähigen Systems für das Flugverkehrsmanagement müssen diese Fragestellungen in zukünftigen Forschungsarbeiten adressiert und weiter untersucht werden.

1. EINLEITUNG

Der Klimaeffekt des Luftverkehrs ist unbestritten: Die Luftfahrt trägt derzeit etwa 3,5 % zum gesamten anthropogenen effektiven Strahlungsantrieb des Klimas bei (Lee et al., 2021) [1]. Dieser Anteil wird aufgrund der hohen Nachfrage und deren Wachstumsrate sowohl absolut als auch im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern und Industriesektoren weiter zunehmen (Grewe et al., 2021 [2]; Klöwer et al., 2021 [3]).

Bisherige Studien zur Vermeidung von Kondensstreifen und zur klimawirkungsoptimierten Flugführung basierten überwiegend auf Modellierungsansätzen und simulationsgestützten Bewertungen (z. B. Grewe et al., 2017 [4]; Teoh et al., 2020 [5]; Niklaß et al., 2020 [6]). Während diese Studien das theoretische Potenzial betrieblicher Maßnahmen zur Verringerung der Klimawirkungen des Luftverkehrs aufzeigten, wurde der Fokus von der theoretischen Machbarkeit auf die betriebliche Umsetzbarkeit erweitert. Ziel war der Nachweis der operativen Anwendbarkeit durch eine Echtzeitsimulation unter realistischen Bedingungen der Flugverkehrskontrolle.

Aus diesem Grund wurde das Forschungsprojekt D-KULT (Demonstrator für klima- und umweltfreundlichen Lufttransport) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Das Projekt stellte einen wichtigen Schritt zur Untersuchung der Klimawirkungen des Luftverkehrs und mögliche Minderungsmaßnahmen dar. Die Untersuchungen waren nur durch die enge Zusammenarbeit von Wetterdiensten, Forschungseinrichtungen, Flugsicherungsorganisationen und Fluggesellschaften möglich und lieferten damit eine belastbare Grundlage für politische und betriebliche Entscheidungsträger [7].

Ziel des Projekts war die Erprobung von Verfahren zur Verringerung der Klimawirkungen des Luftverkehrs durch optimierte Flugtrajektorien. Ein zentraler Aspekt bestand in der Entwicklung von Methoden und unterstützenden Werkzeugen zur Minderung der Non-CO_2-Klimaeffekte der Luftfahrt, insbesondere durch die Vermeidung langlebiger Kondensstreifen. Diese entstehen in Gebieten mit hoher atmosphärischer Feuchtigkeit, den sogenannten eisübersättigten Regionen, und können sich zu Zirruswolken ausbreiten, die das Klima beeinflussen.

Die DFS Deutsche Flugsicherung bewertet Verfahren zur Umgehung dieser Bereiche mithilfe einer Echtzeitsimulation, bevor ein möglicher Probebetrieb stattfindet. Dieser Beitrag beschreibt die Planung und die Ergebnisse dieser Echtzeitsimulation, um anschließend das Verfahren zur Bewertung der Klimawirkung vorzustellen. Dabei wird insbesondere auf die Klimawirkung zusätzlicher CO_2-Emissionen der Mitigationsrouten im Vergleich zu den potenziell vermiedenen Non-CO_2-Effekten eingegangen. Die Ergebnisse und Herausforderungen für eine fundierte Analyse des Mitigationpotenzials der Klimawirkung sowie die Auswirkungen auf eine zukünftige betriebliche Nutzung werden ausführlich diskutiert.

2. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE DER ECHTZEITSIMULATION

Eines der zentralen Ziele des DFS-Anteils im Projekt war die Entwicklung eines Betriebskonzepts sowie die Durchführung eines operationellen Versuchs, um die Machbarkeit der Vermeidung von Gebieten mit potenziell langlebigen Kondensstreifen (Potential Persistent Contrail Areas, PPCAs) nachzuweisen. Im Rahmen einer Reihe von Workshops mit operativen Experten der Betriebsstätte Karlsruhe (Oberer Luftraum, Upper Area Control Centre, UAC) wurde ein Betriebskonzept zur Vermeidung von PPCAs entwickelt. Zum Nachweis der betrieblichen Umsetzbarkeit wurde eine Echtzeitsimulationskampagne (Real-Time Simulation, RTS) durchgeführt. Die RTS war nicht nur darauf ausgelegt, die Machbarkeit der Vermeidung von PPCAs zu bewerten, sondern auch das in der Vorbereitungsphase entwickelte Betriebskonzept zu validieren. Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend genutzt, um das Konzept weiterzuentwickeln und zu optimieren. Ein wesentlicher Vorteil der RTS bestand darin, die operative Praktikabilität der Verfahren unter direkter Beteiligung von

©2026

doi: 10.25967/680319

Fluglotsen in einer sicheren und kontrollierten Umgebung untersuchen zu können, ohne den realen Flugbetrieb zu beeinträchtigen [8].

Im Rahmen der Simulationskampagne wurden PPCAs auf Basis realer meteorologischer Situationen ausgewählt und unter Berücksichtigung sowohl der Höheninformationen als auch ihrer zeitlichen Entwicklung in die operationelle ATM-Umgebung (Air Traffic Management) integriert. Zur Unterstützung der Bewertung der Beanspruchung der Fluglotsen wurden Einweisungsunterlagen sowie standardisierte Fragebögen für die Erhebung vor und nach den Simulationsläufen erstellt. Die Vermeidung von PPCAs mithilfe des vorgeschlagenen Betriebsverfahrens wurde unter verschiedenen betrieblichen Bedingungen untersucht. Dabei wurden sowohl Tag- als auch Nachtszenarien mit Verkehrsaufkommen simuliert, die aus einem der verkehrsreichsten Lufträume weltweit abgeleitet wurden.

Die Ergebnisse der Simulationskampagne ermöglichten eine weitere Verfeinerung des Betriebsverfahrens. Obwohl Übergaben an darunterliegende Kontrollzentralen während der gesamten Simulationskampagne erfolgreich vermieden werden konnten, zeigten die Ergebnisse, dass die Vermeidung von PPCAs insbesondere bei hohem Verkehrsaufkommen zu spürbaren Kapazitäts-einschränkungen führen kann. Die Ergebnisse deuten daher darauf hin, dass die Vermeidung von PPCAs sowohl im Tages- als auch im Nachtbetrieb Auswirkungen auf die Kapazität des Sektors haben kann. Ein Sektor in der Flugsicherung ist ein klar abgegrenzter Teil des Luftraums, für den zu einem bestimmten Zeitpunkt meist zwei Fluglotsen verantwortlich sind. Das Ausmaß dieser Auswirkungen hängt jedoch stark von der Luftverkehrsaufkommen, der Sektorkonfiguration sowie von Größe und Lage der betroffenen Gebiete ab. Die Größenordnung der Kapazitätsauswirkungen wurde auf etwa 20 % bis 60 % geschätzt.

Es besteht die Notwendigkeit einer detaillierteren Bewertung der Auswirkungen zusätzlicher betrieblicher Anforderungen auf die Arbeitsbelastung der Fluglotsen sowie auf die daraus resultierenden Effekte hinsichtlich der Sektorkapazität. Da die Simulationskampagne keine ausreichend belastbare Grundlage für eine quantitative Bestimmung der Kapazitätsreduzierungen lieferte, waren weiterführende Analysen erforderlich, um den Zusammenhang systematisch zu untersuchen. Zur Analyse von Kapazitätsfragestellungen hat die DFS bereits in der Vergangenheit eine Methodik entwickelt, die auf einem Arbeitslastmodell basiert, dass den Zeitverbrauch einzelner Tätigkeiten berücksichtigt und die Quantifizierung der Arbeitsbelastung von Fluglotsen sowie der daraus resultierenden Kapazitätseinbußen ermöglicht.

Im Rahmen einer Masterarbeit [9] wurde zur Bewertung der zusätzlichen Arbeitsbelastung infolge der PPCA-Vermeidung ein modellbasierter Kennwert mit der Bezeichnung „PPCA Zeitwert“ entwickelt. Als Erweiterung des bestehenden DFS-Arbeitsbelastungsmodells stellt dieser Kennwert einen zeitbasierten Indikator dar, der den zusätzlichen Aufwand für die Erkennung und Lösung PPCA-bedingter Konflikte abbildet. Dieser Zeitwert stellt keinen direkt gemessenen operationellen Wert dar, sondern dient vielmehr als Vergleichsgröße zur Abschätzung der durch eine PPCA verursachten zusätzlichen Arbeitsbelastung. Erste Anwendungen des Modells bestätigten die Größenordnung der in der Simulationskampagne beobachteten Kapazitäts-auswirkungen. Die Ergebnisse deuten auf potenzielle Kapazitätsreduzierungen in einer Größenordnung von etwa 20 bis 60 % hin. Das tatsächliche Ausmaß hängt dabei wesentlich vom Verkehrsaufkommen, den Eigenschaften des jeweiligen Sektors sowie von Konfiguration, Größe und Lage der PPCAs ab. Zur weiteren Präzisierung und Validierung dieser Ergebnisse müssen jedoch zusätzliche systematische Untersuchungen angewendet werden.

3. KLIMABEWERTUNG DER RTS-TRAJEKTORIEN

Die Klimawirkung der langlebigen Kondensstreifen und der daraus entstehenden Zirruswolken muss gegen die zusätzlichen CO_2-Emissionen abgewogen werden, die durch den erhöhten Treibstoffverbrauchs aufgrund von nicht optimalen Routen und Flughöhen der Vermeidungsstrecke entstehen können. Die Vermeidung von PPCA-Gebieten ist nur dann sinnvoll, wenn sich insgesamt eine positive Klimabilanz ergibt.

Die Betrachtung dieser gegenläufigen Klimaeffekte wurde teilweise bereits in den Simulationen von Teoh et al. [5] untersucht. Die dort gewonnenen Erkenntnisse müssen jedoch durch reale Flugversuche verifiziert werden. Dabei ist es entscheidend, nicht lediglich die Werte des Strahlungsantriebs (Radiative Forcing) miteinander zu vergleichen. Stattdessen sollte die tatsächliche Temperaturänderung mithilfe einer geeigneten Klimametrik berechnet werden, um die Klimabilanz korrekt zu bestimmen [10]. Dieser Aspekt wird in der aktuellen Klimadiskussion häufig vernachlässigt.

Im Rahmen der von der DFS durchgeführten Echtzeitsimulation wurde keine direkte Bewertung der Klimawirkungen vorgenommen. Die Klimawirkungen der in der Simulation erzeugten Flugtrajektorien wurden jedoch in Zusammenarbeit mit dem DLR-Institut für Luftverkehr (DLR-LV) untersucht, um das Minderungspotenzial der Kondensstreifenvermeidung im Rahmen der Echtzeitsimulation zu quantifizieren.

Die in der Simulation verwendeten Flugbeispiele basierten auf realen Verkehrsdaten über Deutschland. In der Echtzeitsimulation wurden jedoch lediglich die Flugabschnitte innerhalb des Untersuchungsgebiets im Nordosten Deutschlands betrachtet. Für die Bewertung der Klimabilanz ist hingegen eine vollständige Flugtrajektorie vom Start- bis zum Zielflughafen erforderlich, um Änderungen der Flugzeugmasse und des Treibstoffverbrauchs realistischer abzuschätzen. Dies ist notwendig, um die Flugleistung des Luftfahrzeugs sowie die daraus resultierenden Emissionen realitätsnah neu zu berechnen.

Erste Informationen zur Flugzeugmasse wurden aus der Echtzeitsimulation übernommen. Die Herausforderung bestand darin, die dort verwendeten Teiltrajektorien sinnvoll zu vollständigen Flugverläufen zu erweitern. Der hierfür eingesetzte Arbeitsablauf ist in BILD 1 im Anhang dargestellt. Auf Grundlage der Flugwegdaten wurde das Trajectory Calculation Module (TCM) des DLR-LV [11] eingesetzt. Dieses Modul berechnet vierdimensionale

©2026

Flugtrajektorien (4D-Trajektorien) auf Basis vordefinierter Flugzeugleistungsparameter. Die entsprechenden Emissionsmengen werden mithilfe von Korrelationsverfahren abgeschätzt, insbesondere mithilfe der BFFM2-Methode (Boeing Fuel Flow Method) [12], [13].

Die in der Echtzeitsimulation verwendeten PPCA-Gebiete basieren auf tatsächlichen Wetterlagen. Für die entsprechenden Tage wurden sowohl Vorhersagedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, WAWFOR ICON/EU) [14], [15] als auch rückwirkend berechnete Wetterdaten aus ECMWF-ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Reanalysis 5) verwendet. Mithilfe der algorithmic Climate Change Functions (aCCF) [16] wurde daraus die jeweilige Klimawirkung abgeschätzt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass während der Simulation neben den Szenarien mit PPCA-Vermeidung auch Referenzläufe mit demselben Verkehrsaufkommen durchgeführt wurden, jedoch ohne Berücksichtigung von PPCAs. Beide Szenariovarianten wurden anschließend getrennt für die Vergleichsanalyse ausgewertet. Für einen validen Vergleich mussten die Referenzverkehrsdaten unter denselben Wetterbedingungen ausgewertet werden wie die Vermeidungsszenarien. Nur so konnte sichergestellt werden, dass Unterschiede in den Ergebnissen tatsächlich auf die PPCA-Vermeidungsmaßnahmen und nicht auf unterschiedliche Ausgangsbedingungen zurückzuführen sind.

Die Klimawirkung der in der Echtzeitsimulation betrachteten Szenarien werden exemplarisch anhand eines Simulationslaufes analysiert. Zur Veranschaulichung des Szenarios zeigt die linke Seite von BILD 2 im Anhang den betrachteten Luftraum im Nordosten von Deutschland in Gelb sowie die zugehörigen Flugtrajektorien in Blau. Die rechte Darstellung zeigt das Ergebnis der Vermeidung von zwei PPCA-Gebieten in den Höhenbereichen FL330 bis FL370 sowie FL330 (FL steht für Flight Level und entspricht 100 ft). Die blauen Linien stellen die geplanten Flugtrajektorien dar. Flugabschnitte, die eines der PPCA-Gebiete durchqueren, sind rot hervorgehoben. Graue Linien kennzeichnen Flugwege, die erfolgreich oberhalb oder unterhalb der betroffenen Lufträume umgeleitet wurden.

In diesem Szenario konnte eine Vermeidungsrate von 85 % erreicht werden. Das bedeutet, dass 85 % der Flugbewegungen, die ursprünglich durch die betroffenen PPCA-Gebiete geführt worden wären, durch entsprechende Flugweg- oder Höhenanpassungen erfolgreich aus diesen Bereichen herausgeleitet werden konnten. Dadurch wurde der Durchflug von PPCA, in denen sich langlebige Kondensstreifen bilden, in erheblichem Umfang reduziert.

Zur Darstellung der Klimaeffekte zeigt BILD 3 im Anhang Balkendiagramme der berechneten Klimawirkungen der jeweiligen Emissionskomponente. Aufgetragen sind die Wirkungen bezogen auf das Referenzszenario und des PPCA-Vermeidungsszenario ermittelt mit der Klimametrik F-ATR100. Die x-Achse der Diagramme ist in Kelvin (K) skaliert und quantifiziert die durch die jeweiligen Emissionen verursachte Temperaturänderung. Auf der y-Achse sind die einzelnen berücksichtigten Emissionskomponenten aufgeführt.

Die Balkendiagramme ermöglichen somit eine direkte Gegenüberstellung der temperaturwirksamen Beiträge verschiedener Emissionen und Klimaeffekte in beiden Szenarien. Auf diese Weise kann beurteilt werden, ob die durch die Vermeidung langlebiger Kondensstreifen erzielten Klimavorteile die möglichen Nachteile, beispielsweise durch einen erhöhten Treibstoffverbrauch und zusätzliche CO_2-Emissionen infolge von Ausweichrouten, überwiegen. Die verwendete Klimametrik F-ATR100 (Future Average Temperature Response über einen Zeitraum von 100 Jahren) bildet dabei die langfristige mittlere Temperaturwirkung der einzelnen Emissionskomponenten ab und erlaubt eine integrierte Bewertung der gesamten Klimabilanz.

Das BILD 3 im Anhang zeigt, dass die NOx-Emission den dominierenden Beitrag zur gesamten Klimawirkung darstellt. Da NOx jedoch nicht im Mittelpunkt dieser Studie steht, wird der Schwerpunkt auf die kombinierte Betrachtung der Auswirkungen von CO_2 und Kondensstreifen-Zirren (Contrail Cirrus, CiC) gelegt. Die Gesamteffekte („Total“) zeigen hierbei lediglich geringe Unterschiede zwischen dem Referenzszenario und dem PPCA-Vermeidungsszenario. Die fast gleiche Länge der Balken stellen grafisch die Differenzen zwischen beiden Szenarien dar. Für CO_2 wurde ein höherer Temperaturanstieg von $1{,}35 \times 10^{-8}$ K ermittelt. Demgegenüber weisen die Kondensstreifen einen noch stärkeren negativen Beitrag von $-6{,}19 \times 10^{-8}$ K auf. Insgesamt ergibt sich daraus eine berechnete Temperaturänderung von $-4{,}84 \times 10^{-8}$ K.

Der Vergleich zwischen CO_2- und Kondensstreifeneffekten zeigt, dass ein möglicher temperaturerhöhender Effekt infolge zusätzlicher CO_2-Emissionen durch geänderte Flugrouten hier deutlich überkompensiert wird. Die gleichzeitige Vermeidung von Gebieten mit hohem Kondensstreifenbildungspotenzial führt zu einer stärkeren Verringerung der Klimaerwärmung, sodass sich insgesamt ein positiver Klimaeffekt, also ein kühlender Einfluss, ergibt. Im betrachteten Beispiel wurde durch die Vermeidung der PPCA-Gebiete eine Verbesserung der gesamten Klimabilanz von rund 8 % erreicht.

Während der Analyse der Klimawirkungen der untersuchten Szenarien stellte sich jedoch die Frage, warum die absolute Klimawirkung von Kondensstreifen-Zirren trotz hoher PPCA-Vermeidungsraten von bis zu 85 % im dargestellten Szenario nur vergleichsweise gering reduziert wurde. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden die Berechnung und Visualisierung der PPCAs, die eine wesentliche Grundlage für die Bewertung der Klimawirkung von Kondensstreifen-Zirren darstellen, näher untersucht.

Dabei wurden deutliche Unterschiede zwischen den beiden verwendeten meteorologischen Modellen ICON-EU des DWD und ERA5/Reanalysis des ECMWF festgestellt, die nicht allein durch deren unterschiedliche räumliche Auflösung erklärt werden konnten. Ein Vergleich beider Modelle zeigte erhebliche Abweichungen sowohl hinsichtlich der Lage als auch der räumlichen Ausdehnung der PPCAs (BILD 4 im Anhang). Nähere Betrachtungen zeigten Unterschiede in der Berechnungsmethodik von

©2026

PPCAs zwischen dem von der DFS genutzten PPCA-Tool zur Vorhersage der Gebiete und der aCCF-Methodik bei der Klimawirkungsanalyse. Hinzu kommen auch Abweichungen in den zugrunde liegenden Eingangsdaten, insbesondere bei der relativen Luftfeuchtigkeit. Es ist bekannt, dass ERA5 die Luftfeuchtigkeit in der oberen Troposphäre systematisch unterschätzt [17]. Analysen im Projekt D-KULT zu den DWD-Daten zeigten eine sehr gute Übereinstimmung der Modellierung zu Messdaten bezogen auf die relative Luftfeuchte [18]. Dies verdeutlicht eine wichtige Unsicherheitsquelle bei der Bewertung der Klimawirkungen.

Um künftig eine höhere Konsistenz und Vergleichbarkeit der Bewertungen zu gewährleisten, sollten die verwendeten Methoden überprüft, harmonisiert und transparent dokumentiert werden. Dies ist insbesondere für eine verlässliche Bewertung der Klimawirkungen von Maßnahmen zur Vermeidung langlebiger Kondensstreifen von zentraler Bedeutung.

Bei den Klimabewertungen mit der aCCF-Methodik wird außerdem ein sogenannter Efficacy-Faktor berücksichtigt. Für die Wirkung von Kondensstreifen-Zirren wurde dabei der von Lee et al. [1] vorgeschlagene Wert von 0,42 verwendet. In der Studie von Bickel et al. [19], [20] wurde jedoch ein neuer Efficacy-Faktor bestimmt, dessen Wert mit 0,21 nur halb so groß ist wie bisher angenommen.

Wird die Klimawirkung der im Rahmen der Echtzeitsimulation betrachteten Szenarien unter Verwendung des von Bickel et al. vorgeschlagenen Faktors neu berechnet, ergeben sich für das dargestellte Beispiel innerhalb der Klimametrik F-ATR100 die in BILD 5 im Anhang gezeigten Ergebnisse.

Diese Abbildung zeigt in beiden Fällen einen kühlenden Effekt der durch Kondensstreifen induzierten Zirrusbewölkung (Contrail-Induced Cirrus, CiC), wobei dieser Effekt unter Verwendung des Efficacy-Faktors nach Lee etwa doppelt so stark ausfällt wie bei Anwendung des Faktors nach Bickel. Auch die kombinierte Kategorie „Total CO_2 und CiC“ spiegelt diesen Zusammenhang wider. Sie weist bei der Vermeidung der PPCA-Gebiete negative Differenzen auf, die einem positiven Klimaeffekt entsprechen.

Dabei ist zu beachten, dass das Zusammenspiel der beiden Emissionsarten bei Verwendung des Bickel-Faktors noch entscheidender wird. Abhängig von der Höhe der zusätzlichen CO_2-Emissionen kann die anfänglich klimawirksame Verringerung der Kondensstreifenwirkung schnell in einen insgesamt erwärmenden Klimaeffekt umschlagen. Die Unsicherheiten der Eingangsdaten wurden in dieser Untersuchung nicht weiter analysiert. Es ist jedoch anzunehmen, dass die entsprechenden Fehlerbalken die Nulllinie überschreiten würden, sodass ein insgesamt positiver Klimaeffekt nicht mehr mit ausreichender Sicherheit vorhergesagt werden kann.

Bei Betrachtung aller durchgeführten Simulationsläufe zeigt sich insgesamt, dass die Vermeidung von PPCA-Gebieten grundsätzlich einen positiven Einfluss auf das Klima haben kann. In den meisten Fällen führte die Umgehung der PPCAs zu einer Verbesserung der Klimabilanz. Allerdings bestehen derzeit noch erhebliche Unsicherheiten in der Modellierung und Bewertung, sodass gegenwärtig keine abschließende Aussage über die tatsächliche Klimawirkung getroffen werden kann. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Analysen lediglich auf einem Klimawirkungsmodell basieren und somit keine Betrachtung der Modellvarianz erfolgt ist.

Für eine belastbare Bewertung müssen jedoch mehrere Einflussfaktoren weiter untersucht werden. Insbesondere die kumulierten Unsicherheiten der verwendeten Methoden und Modelle bedürfen einer vertieften Analyse. Dazu zählen unter anderem Unsicherheiten in den meteorologischen Eingangsdaten, den Verfahren zur Bestimmung von PPCAs, den verwendeten Klimametriken sowie den zugrunde gelegten Efficacy-Faktoren.

Das vorliegende, verwendete Analysekonzept bildet eine Grundlage, sollte aber für zukünftige Untersuchungen weiterentwickelt und methodisch verbessert werden, um eine robustere und wissenschaftlich belastbarere Bewertung der tatsächlichen Klimawirkungen von Maßnahmen zur Vermeidung langlebiger Kondensstreifen zu ermöglichen. Hierfür sind weitere Studien mit fundierten Untersuchungsansätzen erforderlich.

4. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die im Rahmen von D-KULT durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die operationelle Vermeidung von Gebieten mit potenziell langlebiger Kondensstreifenbildung (Persistent Contrail Formation Areas, PPCAs) technisch grundsätzlich machbar ist und unter bestimmten Bedingungen zu einer Verringerung der durch die Luftfahrt verursachten Klimawirkungen beitragen kann. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Klimawirksamkeit der Kondensstreifenvermeidung stark von meteorologischen Bedingungen, methodischen Annahmen und betrieblichen Randbedingungen abhängt. Die vorliegenden Ergebnisse sollten daher eher als ein wichtiger Machbarkeitsnachweis („Proof of Concept“) und nicht als Beleg für allgemein gültige Klimavorteile interpretiert werden.

Ein zentrales Ergebnis der Klimabewertung ist die Bestätigung des grundlegenden Zielkonflikts zwischen der Reduktion von Non-CO_2-Klimaeffekten und dem Anstieg von CO_2-Emissionen infolge geänderter Flugrouten. Gemeinsam mit dem DLR wurde hierzu eine detaillierte und aufwändige Analyse durchgeführt. Ausweichmanöver führen in der Regel zu längeren Flugstrecken, Höhenänderungen oder einer Kombination aus beidem, was einen höheren Treibstoffverbrauch und damit zusätzliche CO_2-Emissionen zur Folge hat. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass die zusätzliche Erwärmung durch CO_2 unter bestimmten Voraussetzungen durch eine Verringerung der Klimawirkung von Kondensstreifen-Zirren mehr als ausgeglichen werden kann.

Im Beispiel eines Simulationslaufs konnten etwa 85 % der identifizierten PPCA-Gebiete vermieden werden. Trotz eines messbaren Anstiegs der CO_2-bedingten Temperaturwirkung ergab sich eine geschätzte Verbesserung der gesamten Klimabilanz von rund 8 %. Dieses Ergebnis stimmt grundsätzlich mit früheren Studien überein [4], [5], die darauf hinweisen, dass eine gezielte

©2026

Vermeidung von Kondensstreifen einen überproportional hohen Klimanutzen im Verhältnis zum erforderlichen betrieblichen Eingriff liefern kann.

Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass hohe PPCA-Vermeidungsraten nicht zwangsläufig zu entsprechend großen Verringerungen der gesamten Klimawirkung führen. Obwohl operationell Vermeidungsraten von bis zu 85 % erreicht wurden, fiel die resultierende Verringerung der Klimawirkung von Kondensstreifen-Zirren deutlich geringer aus als erwartet. Eine detaillierte Untersuchung identifizierte erhebliche Unterschiede zwischen den für die operationelle Planung und die Klimabewertung verwendeten meteorologischen Datensätzen. Der Vergleich der Vorhersagedaten des DWD-Modells ICON-EU mit den Reanalysedaten ECMWF ERA5 zeigte deutliche Abweichungen sowohl hinsichtlich der Lage als auch der räumlichen Ausdehnung vorhergesagter PPCA-Gebiete. Diese Unterschiede lassen sich nicht allein durch die verschiedenen Modellauflösungen oder durch Unterschiede in den meteorologischen Datenfeldern erklären. Zusätzliche Inkonsistenzen ergeben sich aus den unterschiedlichen Berechnungsverfahren des im Projekt D-KULT eingesetzten PPC-Tools und des auf aCCF basierenden Klimabewertungsansatzes. Die geschätzten Klimavorteile hängen daher nicht nur von den geänderten Flugtrajektorien ab, sondern in erheblichem Maße auch von den zugrunde liegenden meteorologischen und methodischen Annahmen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Gesamtklimawirkung nicht allein anhand des Treibstoffverbrauchs oder der Vermeidungsrate von Kondensstreifen bewertet werden kann. Vielmehr ist eine ganzheitliche Betrachtung aller relevanten Klimawirkungen erforderlich. Im Gegensatz zu Ansätzen, die ausschließlich auf dem Strahlungsantrieb beruhen, wurde in dieser Studie die temperaturbasierte Klimametrik F-ATR100 verwendet. Dadurch können kurzlebige und langlebige Klimaeffekte innerhalb eines gemeinsamen Bewertungsrahmens direkt miteinander verglichen werden. Dies ist insbesondere bei Maßnahmen relevant, die gleichzeitig CO_2-Emissionen und Non-CO_2-Klimaeffekte beeinflussen.

Eine besonders wichtige Unsicherheitsquelle betrifft die Klimawirksamkeit („Efficacy“) von Kondensstreifen-Zirren. Sensitivitätsanalysen mit den von Lee beziehungsweise Bickel vorgeschlagenen Efficacy-Faktoren [19] zeigten, dass die geschätzten Klimavorteile der Kondensstreifenvermeidung stark von dieser Annahme abhängen. Die Verwendung des von Bickel vorgeschlagenen Faktors reduziert die berechnete Temperaturwirkung von Kondensstreifen-Zirren gegenüber dem Ansatz von Lee um etwa 50 %. Dadurch nimmt die relative Bedeutung zusätzlicher CO_2-Emissionen erheblich zu. Unter diesen Annahmen können Szenarien, die mit dem Lee-Faktor noch als klimatisch vorteilhaft erscheinen, nahezu klimaneutral oder sogar klimanachteilig werden. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass hinsichtlich der tatsächlichen Klimawirkung von Kondensstreifen weiterhin erhebliche wissenschaftliche Unsicherheiten bestehen und die daraus abgeleiteten Klimanutzen mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden müssen.

Neben den wissenschaftlichen Erkenntnissen identifizierte das Projekt auch bedeutende operationelle Herausforderungen. Im Rahmen einer umfangreichen Echtzeitsimulation bei der DFS mit mehreren Fluglotsen konnten über fünf Simulationstage hinweg fundierte Aussagen zur Umsetzbarkeit der PPCA-Vermeidung getroffen werden. Die geplanten Simulationsziele wurden erreicht und das entwickelte Betriebsverfahren umfassend abgesichert und bestätigt. Dazu gehört auch die Bewertung der Machbarkeit der PPCA-Vermeidung. Die Simulation zeigte, dass das neu entwickelte Betriebsverfahren grundsätzlich anwendbar ist und einen wichtigen Schritt in Richtung einer möglichen operationellen Umsetzung darstellt.

Die Simulationen zeigten, dass taktische Kondens-streifenvermeidung die Arbeitsbelastung der Fluglotsen erhöhen und die Luftraumkapazität negativ beeinflussen kann. Diese Auswirkungen sind besonders im stark ausgelasteten europäischen Luftraum relevant, in dem Kapazitätsengpässe bereits heute eine zentrale betriebliche Herausforderung darstellen.

Da die Simulationskampagne keine ausreichend belastbare Grundlage für eine quantitative Bestimmung der Kapazitätsverluste lieferte, wurden ergänzende Analysen durchgeführt. Hierzu konnte auf ein bestehendes DFS-Verfahren zur Bewertung von Kapazitäts-auswirkungen zurückgegriffen werden, das auf einem zeitbasierten Modell zur Lotsenarbeitsbelastung basiert und die Arbeitsbelastung von Fluglotsen sowie die daraus resultierende Kapazitätseinbußen quantifiziert. Dieses Modell wurde um einen zusätzlichen Zeitaufwand für die Bearbeitung von PPCA-relevanten Situationen erweitert. Erste Anwendungen bestätigten die Größenordnung der in der Simulation beobachteten Auswirkungen und deuteten auf mögliche Kapazitätsverluste von etwa 20 bis 60 % hin. Zur weiteren Verifizierung und Präzisierung dieser Ergebnisse sind jedoch zusätzliche systematische Untersuchungen erforderlich, die Faktoren wie Verkehrsaufkommen, Sektoreigenschaften und PPCA-Konfigurationen berücksichtigen.

Eine wesentliche Schlussfolgerung aus der Echtzeitsimulation lautet, dass die Hypothese „Die Arbeitsbelastung der Fluglotsen steigt nur geringfügig oder überhaupt nicht an“ nicht bestätigt werden konnte. Damit ist eine entscheidende Voraussetzung für zukünftige operationelle Erprobungen derzeit noch nicht erfüllt. Zusammen mit identifizierten sicherheitsrelevanten Fragestellungen besteht weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Klimaoptimierung im Luftverkehr nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern stets gegen die Ziele Sicherheit, Effizienz, Vorhersagbarkeit und Netzwerkleistung abgewogen werden muss. Eine zukünftige operationelle Einführung klimasensitiver Flugtrajektorien erfordert daher integrierte Entscheidungsprozesse, die diese teilweise konkurrierenden Anforderungen berücksichtigen. Ein weiterer entscheidender Erfolgsfaktor für die Einführung von Verfahren zur Kondensstreifenvermeidung ist die Entwicklung einer klaren, europaweit abgestimmten Strategie zum Umgang mit dem Thema „Contrail Prevention“. Dies setzt eine enge und koordinierte Zusammenarbeit aller relevanten Akteure des Luftverkehrssystems voraus.

©2026

Insgesamt stellt D-KULT einen bedeutenden Schritt hin zur praktischen Umsetzung ökoeffizienter Luftverkehrsoperationen dar. Erstmals konnte unter realistischen Bedingungen und unter Einbindung aller relevanten Stakeholder eine durchgängige Informationskette von der meteorologischen Vorhersage über die Klimawirkungsmodellierung und Flugplanung bis hin zur operationellen Durchführung erfolgreich demonstriert werden. Dieser Erfolg bestätigt die grundsätzliche technische Machbarkeit gemeinschaftlich umgesetzter klimawirkungsoptimierter Flugoperationen und liefert wertvolle Erkenntnisse für eine zukünftige operationelle Anwendung.

Gleichzeitig zeigt die vorliegende Studie, dass weder die wissenschaftlichen Grundlagen noch die operationellen Rahmenbedingungen für eine großflächige Einführung derzeit ausreichend belastbar sind. Wesentliche Unsicherheiten bestehen weiterhin bei der Vorhersage von klimasensitiven Gebieten (PPCA), der Quantifizierung von Klimawirkungen, der Bewertung von Efficacy-Faktoren sowie der Integration klimarelevanter Informationen in operationelle ATM-Verfahren.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich daher auf die Verbesserung der meteorologischen Vorhersagbarkeit, die Harmonisierung von Klimabewertungsmethoden, die systematische Quantifizierung von Unsicherheiten sowie die Entwicklung robuster Entscheidungshilfen konzentrieren, die sowohl den Klimanutzen als auch die operationellen Auswirkungen berücksichtigen. Erst durch solche Weiterentwicklungen kann sich die klimaoptimierte Flugtrajektorienplanung von einem vielversprechenden Forschungskonzept zu einem verlässlichen und operationell tragfähigen Bestandteil des zukünftigen Luftverkehrsbetriebs entwickeln.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Studie präsentiert eine operationelle Validierung taktischer Vermeidungsverfahren für Gebiete mit potenziell langlebiger Kondensstreifenbildung (Potential Persistent Contrail Areas, PPCAs) unter realistischen Bedingungen der Flugverkehrskontrolle. Im Rahmen des Projekts D-KULT wurden meteorologische Vorhersagen, Klimawirkungsmodellierung, Verfahren der Flugsicherung sowie Klimabewertungen zu einem integrierten Gesamtkonzept zusammengeführt und mit Hilfe einer Echtzeitsimulation unter aktiver Beteiligung von Fluglotsen (Human-in-the-Loop Simulation) untersucht. Damit ging das Projekt deutlich über reine Modellierungs- und Simulationsstudien hinaus und erbrachte erstmals einen operationellen Machbarkeitsnachweis für die taktische Vermeidung von Kondensstreifen.

Die Ergebnisse der Echtzeitsimulation zeigten, dass eine taktische PPCA-Vermeidung grundsätzlich operationell umsetzbar ist. Fluglotsen waren in der Lage, klimarelevante Luftraumbeschränkungen in ihre Entscheidungsprozesse einzubeziehen und entsprechende Vermeidungsmaßnahmen auch unter realistischen Verkehrsbedingungen erfolgreich anzuwenden. Gleichzeitig wurde jedoch deutlich, dass mehrere Annahmen des ursprünglich entwickelten Betriebskonzepts angepasst werden mussten. Insbesondere erwies sich die ausschließliche Nutzung vertikaler Ausweichmanöver als nicht ausreichend, wodurch die Einführung zusätzlicher lateraler Umleitungsoptionen erforderlich wurde. Darüber hinaus unterstrichen die Ergebnisse die zentrale Bedeutung der sektorübergreifenden Koordination und machten verschiedene Verfahrens- und Systemprobleme sichtbar, die vor einer operationellen Einführung behoben werden müssen.

Ein wesentliches Ergebnis der Studie ist die Identifikation der operationellen Auswirkungen taktischer Kondensstreifenvermeidung. In den von PPCAs betroffenen Sektoren erhöhte sich die Arbeitsbelastung der Fluglotsen teilweise deutlich, insbesondere bei hohem Verkehrsaufkommen. Die ergänzenden Kapazitätsanalysen deuten darauf hin, dass entsprechende Vermeidungsmaßnahmen die Sektorkapazität je nach Verkehrsnachfrage, Luftraumstruktur sowie Größe und Lage der betroffenen Gebiete um etwa 20 bis 60 % reduzieren können. Die Auswirkungen auf die Kapazität stellen damit eine der größten Herausforderungen für eine zukünftige operationelle Anwendung dar.

Die Klimabewertung zeigte gleichzeitig, dass die Vermeidung von PPCA grundsätzlich das Potenzial besitzt, die Klimawirkungen des Luftverkehrs zu reduzieren. In mehreren untersuchten Szenarien überwog die Verringerung der Klimawirkung von Kondensstreifen-Zirren den zusätzlichen Klimaeffekt der durch Umwege verursachten CO_2-Emissionen. Dies führte innerhalb der verwendeten Klimametrik F-ATR100 zu einer positiven Gesamtbilanz und damit zu einer Verringerung der Klimawirkung. Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass die Größenordnung dieser Vorteile äußerst empfindlich auf die zugrunde liegenden meteorologischen Daten, Klimamodelle, Efficacy-Faktoren und methodischen Annahmen reagiert. Die festgestellten Unterschiede zwischen verschiedenen Wetterdatensätzen und Klimabewertungsverfahren verdeutlichen den Bedarf einer höheren Konsistenz und Transparenz entlang der gesamten Bewertungskette.

Die Ergebnisse legen daher nahe, dass die taktische Vermeidung von Kondensstreifen derzeit als ein vielversprechendes Klimaschutzkonzept, jedoch noch nicht als ausgereiftes operationelles Verfahren betrachtet werden sollte. Für weitere Fortschritte sind Verbesserungen bei der Vorhersage und Validierung eisübersättigter Regionen erforderlich. Ebenso notwendig sind die operationelle Einführung leistungsfähigerer meteorologischer Vorhersagesysteme, beispielsweise durch fortschrittliche Wolkenmikrophysik-Modelle, die Weiterentwicklung und Validierung von Klimawirkungsfunktionen, die Harmonisierung von Bewertungsmethoden sowie die systematische Quantifizierung der bestehenden Unsicherheiten.

Das Projekt D-KULT hat einen durchgängigen, kooperativen Prozess für einen klimaoptimierten Luftverkehr entwickelt und erfolgreich getestet. Dieser Ansatz verbindet Wetterdienste, Forschungseinrichtungen, Fluggesellschaften und Flugsicherungsorganisationen in einer gemeinsamen End-to-End-Informationskette, die von der meteorologischen Vorhersage über die Klimawirkungsbewertung und Flugplanung bis hin zur operationellen Durchführung reicht. Das Projekt stellt damit einen bedeutenden Meilenstein auf dem Weg zu klimawirkungsoptimierten Luftverkehrsoperationen dar.

©2026

Erstmals konnte unter realitätsnahen Bedingungen nachgewiesen werden, dass die Integration klimatologischer Informationen in operative Entscheidungsprozesse grundsätzlich möglich ist und dass entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung langlebiger Kondensstreifen praktisch umgesetzt werden können. Insgesamt zeigt D-KULT, dass klimawirkungsoptimierte Flugführung technisch möglich ist und einen wichtigen Schritt hin zu einem nachhaltigeren Luftverkehr darstellt.

Gleichzeitig verbleiben jedoch erhebliche wissenschaftliche und operationelle Herausforderungen, die durch zukünftige Forschungsarbeiten auf mehrere zentralen Handlungsfeldern aufgelöst werden sollten. Erst durch diese Weiterentwicklungen kann sich das klimaoptimierte Trajektorienmanagement von einer experimentellen Forschungsanwendung zu einem sicheren, wirksamen und operationell tragfähigen Bestandteil des regulären Flugverkehrsmanagements entwickeln. D-KULT hat hierfür die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen und wichtige Erkenntnisse geliefert, die als Ausgangspunkt für die nächste Entwicklungsstufe einer klimaschonenden Luftfahrt dienen können. Nur durch ein koordiniertes Zusammenspiel von Forschung, Meteorologie, Flugsicherung, Airlines und europäischer Verkehrsflusssteuerung kann die Vermeidung langlebiger Kondensstreifen künftig zu einem verlässlichen Bestandteil des europäischen Luftverkehrssystems werden.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S. J., Freeman S., Forster P. M., Fuglestvedt 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. & Wilcox L. J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing in 2018. Atmospheric Environment.

[2] Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Middel, J., Ohlenforst, B., Blakey, S., Christie, S., Matthes, S., and Dahlmann, K.: Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects, Nat. Commun., 12, 3841, https://doi.org/10.1038/s41467-021-24091-y, 2021.

[3] Klöwer, M., Allen, M. R., Lee, D. S., Proud, S. R., Gallagher, L., and Skowron, A.: Quantifying aviation's contribution to global warming, Environ. Res. Lett., 16, 104027, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac286e, 2021.

[4] Grewe V., Matthes S., Frömming C., Brinkop S., Jöckel P., Gierens K., Champougny T., Fuglestvedt J., Haslerud A., Irvine E. & 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

[5] 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.

[6] Niklaß M. et al., Umweltbundesamt „Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA", Climate Change 20/2020

[7] Matthes, S., Gierens, K., Beckmann, B., Bugliaro, Dietmüller, S., Frömming, C., Hanst, M., Hofer, S., Jene J., Kirschler, S., Köhler, C. G., Lau. A., Leemüller, R., Liedtke, A., Mendiguchia Meuser, M., Peter, P., Santos Gabriel, V., Köhler, I., Saueressig, G., Schlemmer, L., Sperling, J., Schlobach, S., Schultz, R., von Sack, K., Waltenberg, N: D-KULT: data and tools for routine eco-efficient flight operations, JECATS, https://doi.org/10.5194/jecats-2026-3, 2026, Preprint

[8] Leemüller, R.; von Sack, K.; Waltenberg, N. (2024): Ein Betriebsverfahren zur Vermeidung des Entstehens persistenter Kondensstreifen. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.. (Text). https://doi.org/10.25967/630162. urn:nbn:de:101:1-2410181257290.107639197653.

[9] Baral, M.: Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Abschätzung von Kapazitätseinbußen durch die Umfliegung potenziell persistenter Kondensstreifengebiete im oberen Luftraum – Eine Analyse am Beispiel Karlsruhe. Masterarbeit Hochschule Worms, 2026

[10] 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.

[11] Linke, F. (2016). Ökologische Analyse operationeller Lufttransportkonzepte. DLR-Forschungsbericht. DLR-FB-2016-10. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg.

[12] DuBois, D. and Paynter, G. C.: 'Fuel Flow Method2' for Estimating Aircraft Emissions, SAE Trans., 115, 1–14, https://www.jstor.org/stable/44657657, 2006.

[13] Zengerling, Z., Linke, F., Weder, C. & Dahlmann, K. (2022). Climate-Optimised Intermediate Stop Operations: Mitigation Potential and Differences from Fuel-Optimised Configuration. Applied Sciences, 12 (23) https://doi.org/10.3390/app122312499.

[14] WAWFOR Datensatz für die Luftfahrt, World Aviation Weather FORecast. Flyer Deutscher Wetterdienst DWD

[15] WAWFOR World Aviation Weather Forecast, GRIB2 Data Set Guide, Version 3.7; Offenbach am Main 2024

[16] Matthes, S., Dietmüller, S., Dahlmann, K., Frömming, C., Peter, P., Yamashita, H., Grewe, V., Yin, F., and Castino, F.: Updated algorithmic climate change functions (aCCF) V1.0A: Evaluation with the climate-response model AirClim V2.0, Geosci. Model Dev. Discuss., https://doi.org/10.5194/gmd-2023-92, 2023.

[17] Wolf, K., Bellouin, N., Boucher, O., Rohs, S., & Li, Y. (2025). Correction of ERA5 temperature and relative 1123 humidity biases by bivariate quantile mapping for contrail formation analysis. Atmos. Chem. Phys., 1124 25, 157–181. DOI: 10.5194/acp-25-157-2025.

[18] Hanst, M., Köhler, C. G., Seifert, A., and Schlemmer, L. (2025). Predicting Ice Supersaturation for Contrail Avoidance: Ensemble Forecasting using ICON with Two-Moment Ice Microphysics, EGUsphere https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3312, 2025.

[19] Bickel, M.: Climate Impact of Contrail Cirrus, DLR-Forschungsbericht, DLR-FB-2023-14, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, https://doi.org/10.57676/mzmg-r403, 2023.

[20] Bickel, M., Ponater, M., Burkhardt, U., Righi, M., Hendricks, J., and Jöckel, P.: Estimating the Climate Efficacy of Contrail Cirrus on Surface Temperature, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-18183,

©2026

https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-18183,
2024.

Anhang: Abbildungen

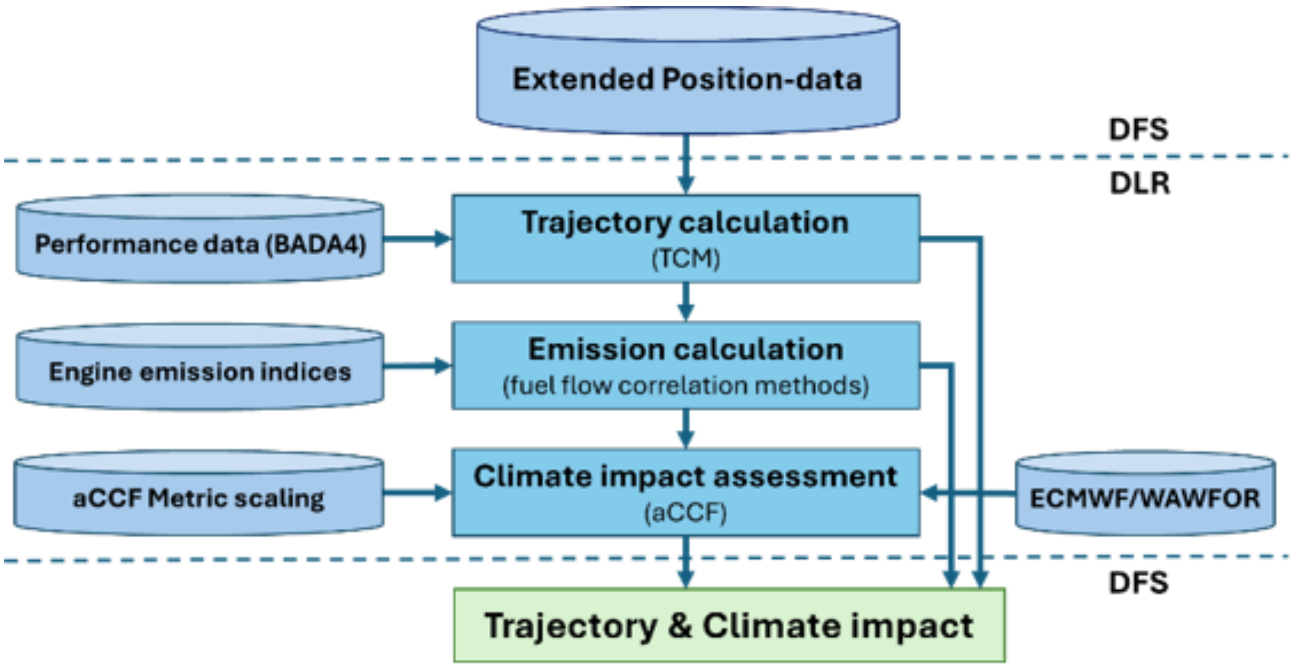


BILD 1. Blockdiagramm des Verfahrens zur Berechnung von Flugtrajektorien unter Berücksichtigung der Flugzeugleistung sowie der Abschätzung der Klimawirkungen.

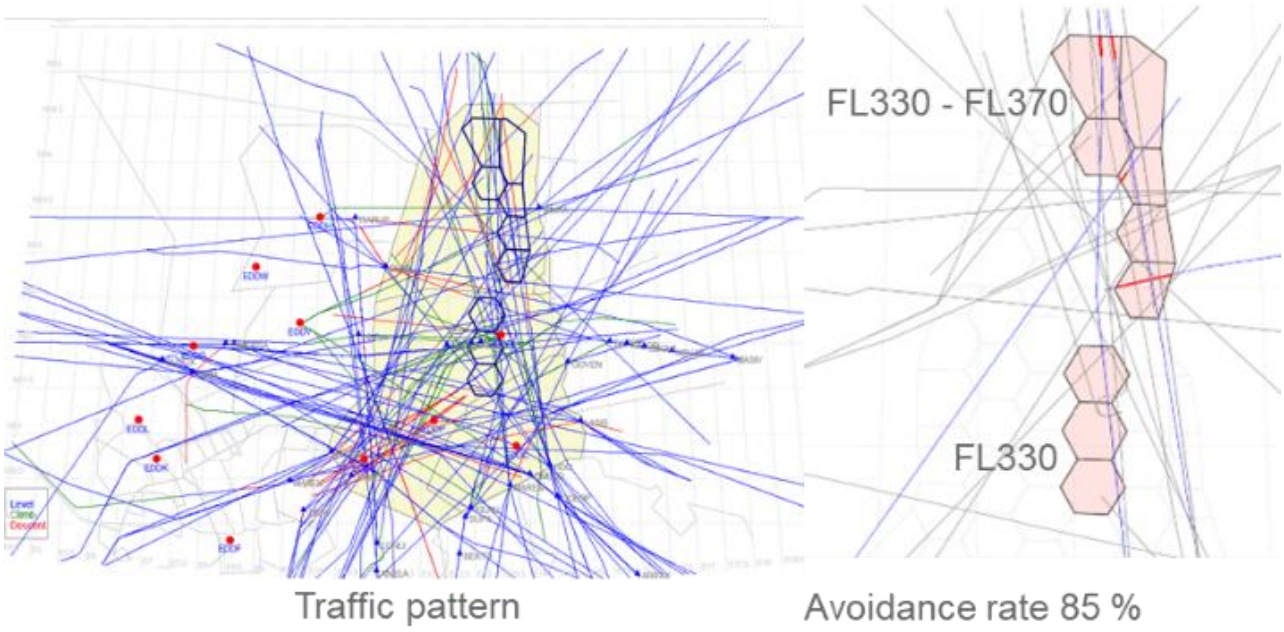


BILD 2. Verkehrsbild (links) und erreichte Vermeidung in dem Szenario (rechts).

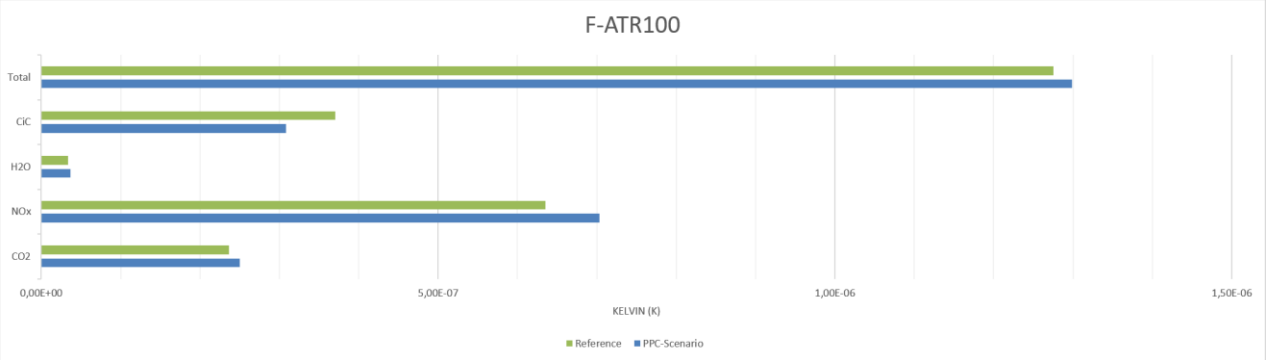


BILD 3. Vergleich der Klimaeffekte von Referenz- und PPCA-Szenario für die Klimametrik F-ATR100.

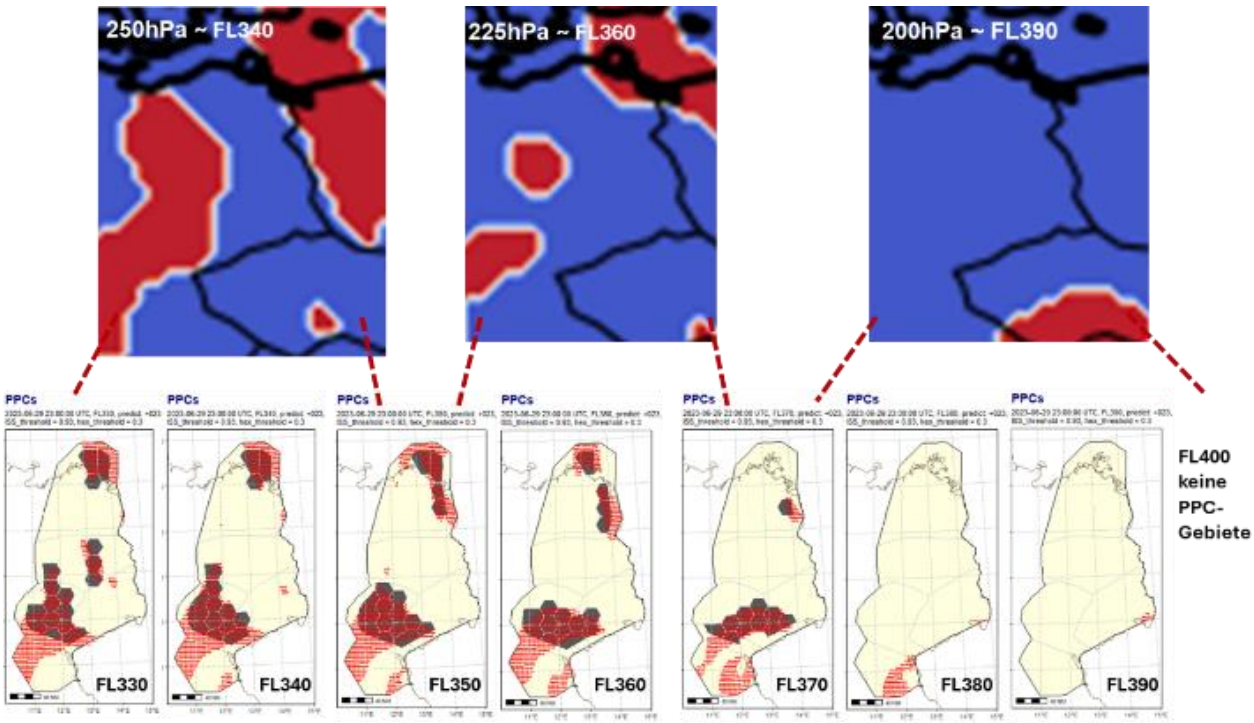


BILD 4. Gegenüberstellung der mit ECMWF-ERA5 (oben) und DWD ICON-EU (unten) berechneten PPCA-Gebiete im untersuchten Luftraum der DFS. Die DWD-Vorhersagen haben eine höhere räumliche und vertikale Auflösung. Mehrere Bilder (unten) müssen zu einer ERA5-Grafik zusammengefasst werden.

©2026

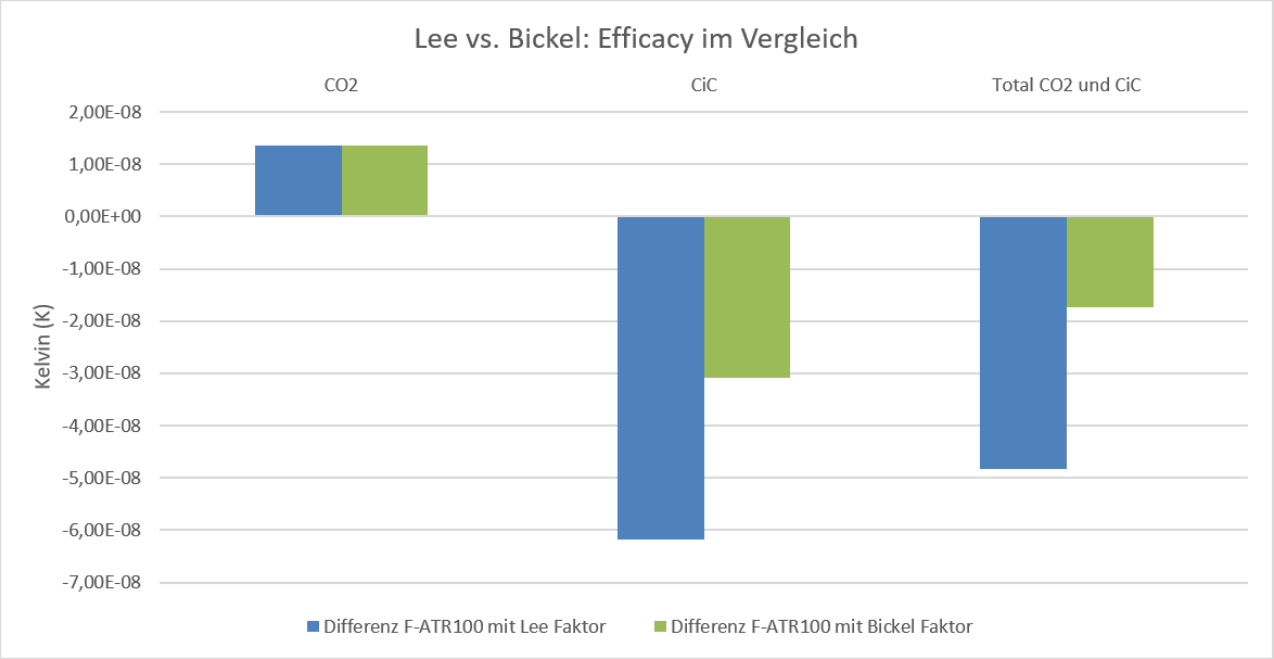


BILD 5. Vergleich der Temperaturdifferenzen für CO_2 und Kondensstreifen-Zirren (CiC) auf Basis der Efficacy-Faktoren nach Lee und Bickel.