# UNTERSUCHUNGEN ZUM ANSATZ DER VERMEIDUNG NÄCHTLICHER KONDENSSTREIFEN ZUR REDUKTION DER KLIMAWIRKUNG DES LUFTVERKEHRS

M. Becker\*, F. Linke<sup>†</sup>, V. Gollnick\*

\* Technische Universität Hamburg, Institut für Lufttransportsysteme, Hamburg, Deutschland † Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Lufttransportsysteme, Hamburg, Deutschland

#### Zusammenfassung

Neben den Kohlenstoffdioxid-Emissionen tragen sogenannte Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte erheblich zur anthropogenen Gesamtklimawirkung der Luftfahrt bei. Zu diesen Effekten zählt unter anderem die Bildung von Kondensstreifen, die sich zu Kondensstreifen-Zirren entwickeln können, die die lokale Strahlungsbilanz unter anderem durch Albedo-Effekte beeinflussen. Da technologische Adaptionen zur Reduktion der Klimawirkung nicht kurzfristig implementierbar sind, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit betriebliche Ansätze und deren Umsetzbarkeit untersucht.

Mithilfe bereits publizierter Studien zum Thema operationeller Mitigation werden weitere Anforderungen und Ansätze abgeleitet, wodurch Strategien mit gezielten Adaptionen der vierdimensionalen Trajektorien einer Flugmission erarbeitet werden. Hierfür wird der primäre Fokus auf eine vertikale Flughöhenadaption und eine zeitliche Verschiebung der Flugtrajektorie gesetzt. Um die Wirkung der Strategien zu quantifizieren, folgt die Bildung einer Flugverkehrssimulation mit Bezugnahme von meteorologischen Bedingungen und Trajektoriendaten, welches eine Approximation hinsichtlich der Klimawirkung unter Beachtung der Lebensdauer erzeugt. Die Strategien und das zugehörige Reduktionspotenzial werden abschließend im Rahmen einer Verkehrssimulation über dem Nordatlantik untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass wenige Flüge den Großteil der anthropogenen Klimawirkung erzeugen, wodurch mit gezielten Adaptionen weniger Flüge klimawärmende Segmente explizit vermieden werden kann.

#### **Keywords**

Kondensstreifen; Klimawirkung; operationelle Mitigation; Strahlungsbilanz

NOMENKLATUR			w	Mitigationseffizienz -
$\begin{array}{l} \textbf{Formelzeich} \\ \textbf{A}_{\text{Erde}} \\ \textbf{AGWP} \\ \alpha \\ \textbf{C}_{\text{KS}} \\ c_p \\ \textbf{C}_{\text{SOC}} \\ \textbf{C}_{\text{TD}} \\ \textbf{D} \\ \textbf{EF} \\ \textbf{El}_{H2O} \end{array}$	Erdoberfläche Absolute Global Warming Potential Sensitivitätsparameter Kraftstoffkosten spezifische Wärmekapazität Gesamtkostenindex Verschiebungskosten Widerstandskraft Energiepotenzial Emissionsindex	m <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup> yr	Indizes CO2 I Kon LC LM LW Net SW W	Kohlenstoffdioxid Eis Kondensstreifen vorliegende Feuchtigkeit maximaler Feuchtigkeit langwellig Netto kurzwellig Wasser
$\begin{array}{l} \varepsilon \\ \\ \mathbf{e_{sat}} \\ \\ \eta \\ f \\ \\ F \\ G \\ g \\ \\ \mathbf{h} \\ \\ \mathbf{k} \\ \\ \lambda \\ \\ \dot{m}_f \\ \\ \mathbf{m} \\ p \\ \\ \phi \\ Q \\ \\ \mathbf{RF} \\ \\ \mathbf{RH} \\ \\ T \\ \\ \mathbf{t} \\ \\ V_{GS} \\ \\ V_{TAS} \end{array}$	molekulares Verhältnis Sättigungsdampfdruck Antriebseffizienz Adaptionskosten Schubkraft Steigung kritische Mischlinie Erdbeschleunigung Höhe Reduktionsparameter Längengrade Kraftstofffluss Masse Druck Breitengrade spezifische Verbrennungswärme Strahlungsantrieb relative Feuchtigkeit Temperatur Zeit Geschwindigkeit über Grund Geschwindigkeit gegenüber Luft	Pa - \$ N Pa/K m/s² m % % kg/s kg Pa	Abkürzunge BADA CoCiP DJF ECMWF ISA ISSR JJA MAM MOZAIC NAT SAC SON UTC ZH	Base of aircraft data Contrail Cirrus Prediction Tool Dec-Jan-Feb European Cente for Medium-Range Weather Forecasts Standardatmosphäre eisübersättigte Region Jun-Jul-Aug Mar-Apr-May measurement of ozone on airbus in-service aircraft North-Atlantic-Tracks Schmidt-Appleman-Kriterium Sep-Oct-Nov koordinierte Weltzeit Zeithorizont

#### 1. EINLEITUNG

Mit einer wachsenden Luftfahrtindustrie stieg die Verkehrsdichte kommerzieller Luftfahrzeuge, welche mit einem Strahltriebwerk ausgestattet und angetrieben werden. Diese verbrennen entlang ihrer Flugmission Kraftstoff in der Brennkammer und emittieren in diesem Zuge schädliche Abgase. In diesen Abgasen liegen hauptsächlich Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Stickoxide sowie Rußpartikel vor. Obwohl die resultierende Abgaswolke in der Regel unsichtbar erscheint, sind häufig weiße Spuren hinter dem Triebwerkslauf der Flugzeuge zu beobachten. In manchen Fällen können diese Spuren sogar über mehrere Stunden persistieren und sich zu Wolken-ähnlichen Gebilden entwickeln. In Gebieten mit einer hohen Verkehrsdichte können sogar mehrere und sich überkreuzende Spuren beobachtet werden.

Bei diesen linienförmigen Wolken handelt es sich um sogenannte Kondensstreifen. Diese für das menschliche Auge sichtbaren Eiswolken werden generell aufgrund von heißen Wasserdampfemissionen und Rußpartikel aus den Triebwerken in Reiseflughöhe erzeugt. Die Bildung unterliegt dabei Bedingungen aus der Thermodynamik, welche eine ausreichend kalte Umgebungstemperatur in der Atmosphäre voraussetzt. Mit der Bildung und Persistenz über mehrere Stunden wird ein Einfluss auf die lokale Energiebilanz der Atmosphäre ausgeübt. Dies kann je nach Sonnenstand einen kühlenden, aber auch wärmenden Nettoeffekt ausüben. Die Klimawirkung verschiedener Schadstoffe wird typischerweise mit der Metrik des Strahlungsantriebes (RF) quantifiziert. Nach RAMASWAMY et al. [1] wird das RF als "eine von außen auferlegte Störung des Energiehaushaltes des Klimasystemes der Erde" definiert.

Die Bildung von persistenten Kondensstreifen, welche einen verstärkten Klimaeffekt aufzeigen, kann durch die Reduktion von Flugzeit in eisübersättigten Luftmassen limitiert werden. Da atmosphärische Regionen mit einer Eisübersättigung tendenziell schmal sind (typischerweise 500 m mit einer großen Varianz) [2] würde ein Unterbeziehungsweise Überfliegen der kritischen Bereiche möglich sein. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Simulationsmodell entwickelt, welche durch Inklusion der Klimawirkung eine Quantifizierung von operationellen Strategien ermöglicht.

## 2. KONDENSSTREIFEN

Kondensstreifen sind dünne Eiswolken, welche im Nachlauf von Luftfahrzeugen gebildet werden können, sofern die umgebende Luft ausreichend kalt ist. In dem Fall wird im Abgasstrahl des Triebwerks eine Wasserübersättigung erzeugt, wenn die heiße und feuchte Triebwerksluft isobar mit der umgebenden Luft gemischt wird. Somit können unter anderem Rußpartikel des Abgasstrahls, welche aus einer unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen im Kerosin resultieren, als Kondensationskerne

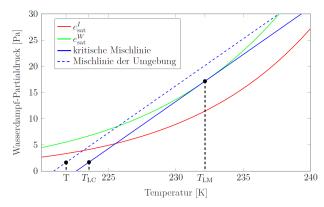


BILD 1. Wasserdampf-Partialdruck als Funktion der Temperatur mit den Sättigungsdampfdruckkurven bezüglich flüssigen Wassers und Eis nach Sonntag [7] sowie thermodynamische Grundlagen des Schmidt-Appleman-Kriteriums.

wirken und eine Eiskristallisation erfahren.

Dementsprechend sind die Kerncharakteristika der Kondensstreifen primär abhängig von der umgebenden Atmosphäre und den Eigenschaften des Kraftstoffverbrennungsprozesses im Triebwerk [3]. Daran anknüpfend lassen sich Kondensstreifen in drei Gruppen differenzieren: (i) Kurzlebige Kondensstreifen, (ii) persistente Kondensstreifen und (iii) Kondensstreifen-Zirruswolken.

#### 2.1. Schmidt-Appleman-Kriterium

Die Bildung von Kondensstreifen kann mithilfe von thermodynamischen Theorien mit einem hohen Konfidenzniveau bestimmt werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Theorien basieren auf der Arbeit von SCHUMANN [4], welcher sich auf die thermodynamischen Ausführungen von Schmidt [5] und Appleman [6] stützt und erweitert. Die daraus abgeleitete Theorie wird als Schmidt-Appleman-Kriterium (SAC) bezeichnet. Demnach sagt die SAC-Theorie aus, dass eine Kondensstreifenbildung nur bei Unterschreitung einer kritischen Temperatur  $T_{\mathsf{LC}}$  und gleichzeitiger Überschreitung einer Schwellenfeuchtigkeit RH<sub>LC</sub> möglich ist. Die Bestimmung der kritischen Parameter ist dabei meteorologisch abhängig von dem Luftdruck p, der relativen Luftfeuchtigkeit RHw und der Umgebungstemperatur T. Dieser thermodynamische Prozess ist geometrisch in Abbildung 1 visualisiert. Hierbei wird eine isobare Mischung der heißen Flugzeugabgase mit der umgebenden Luftmasse vorausgesetzt. Die dargestellten Sättigungsdampfdrucklinien beschreiben dabei den Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur und entspricht der Phasengrenzlinie der gasförmigen Phase.

Damit die kritische Temperatur  $T_{\mathsf{LC}}$  bestimmt werden kann, wird zunächst die Steigung G der kritischen Mischlinie in Abhängigkeit von meteorologischen und Flugzu-

©2022

2

standsspezifischen Parametern bestimmt:

(1) 
$$G = \frac{\mathsf{El}_{\mathsf{H2O}} \cdot c_p \cdot p}{\varepsilon \cdot Q \cdot (1 - \eta)}$$

Für Kerosin betriebene Luftfahrzeuge variiert G je nach Flughöhe in dem Bereich zwischen  $0,6 \le G \le 4\,{\rm Pa/K}$ .

Der Schnittpunkt der kritischen Mischlinie mit der Sättigungsdampfdruckkurve bezüglich flüssigen Wassers beschreibt die kritische Temperatur bei einer relativen Feuchtigkeit von RHw =1 und wird als  $T_{LM}$  definiert:

(2) 
$$\frac{e_{\mathsf{sat}}^W(T_{\mathsf{LM}})}{dT} = G$$

In der Literatur wird von  $\rm Schumann[4]$  auf eine erste Approximation für  $T_{\rm LM_0}$  hingewiesen, welche mit einigen Newton-Iteration Schritten den Fehler auf  $\leq 10^{-3}$  reduziert.

Für den finalen Zusammenhang und der Bestimmung der kritischen Temperatur  $T_{LC}$  wird die umgebende relative Feuchtigkeit bezüglich Wasser RHw einbezogen. Sofern RHw entweder 0 oder 1 gilt, folgt für die kritische Temperatur die Gleichung 3.

$$(3) \quad T_{\text{LC}} = \begin{cases} T_{\text{LM}} - \frac{e_{\text{sat}}^W(T_{\text{LM}})}{G} & \text{, falls RHw} = 0 \\ T_{\text{LM}} & \text{, falls RHw} = 1 \end{cases}$$

Wenn RHw diese Bedingungen jedoch nicht erfüllt, ist eine Taylor-Reihen-Entwicklung[4] entlang  $T_{\rm LM}$  notwendig.

Liegt die Umgebungstemperatur T unterhalb der kritischen Temperatur  $T_{\rm LC}$ , so gilt die SAC-Theorie als erfüllt. Hierbei wird die Mischung der Luftmassen die Sättigungsdampfdruckkurve bezüglich flüssigen Wassers schneiden. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt, da an dem Punkt T die blau gestrichelte Gerade mit der Steigung G eingeführt wird.

#### 2.2. Persistenz

Nach der Bildung können diese Eiswolken bereits nach wenigen Sekunden bis Minuten vollständig verdampfen [3]. Kondensstreifen überdauern, sofern die atmosphärische relative Feuchtigkeit bezüglich Eis RHi übersättigt ist und dementsprechend RHi  $\geq 100\%$  gilt. In diesen eisübersättigten Luftmassen können die Eispartikel in den Kondensstreifenwolken durch resublimieren der Wasserdampfmoleküle der umgebenden Luft wachsen. Kondensstreifen überdauern, solange die umgebende Luft eisübersättigt ist [8]. Die Regionen, die dieses Kriterium erfüllen, werden folgend mit ISSR (engl. Ice supersaturated regions) abgekürzt. GIERENS et al. [9] haben die Datensätze der MOZAIC (engl. measurement of ozone on airbus in-service aircraft) Kampagne ausgewertet und bestimmten einen durchschnittlichen Aufenthalt von Luftfahrzeugen in solchen ISSR-Gebieten

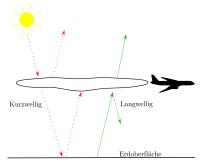


BILD 2. Qualitativer Einfluss von Kondensstreifen auf die Strahlungsbilanz der Erde.

von etwa 10% bis 15% während einer Flugmission.

Die Faktoren für die Limitierung der Lebensdauer eines Kondensstreifens können generell in zwei Kategorien klassifiziert werden: Zum einen die externe Limitierung, welche die Lebensdauer aufgrund der vorliegenden meteorologischen Bedingungen bestimmt. Wenn beispielsweise eine Verminderung der ISSR zu erkennen ist, kann es zu einer Sublimierung und Reduzierung der Eispartikel kommen.

Zum anderen die interne Limitierung, wodurch die geformten Eispartikel in trockenere Ebenen der Atmosphäre sedimentieren und anschließend sublimieren. Aus dem zweiten Faktor lässt sich schließen, dass bei einer sehr hohen Eisübersättigung größere Eispartikel geformt werden. Diese erfahren infolgedessen eine höhere Sedimentationsrate und weisen so eine geringere Persistenz[10]. Dementsprechend sind Kondensstreifen besonders langlebig, wenn eine persistente, geringe Eisübersättigung im Bereich  $1 \le RHi \le 1,1$  vorliegt.

#### 2.3. Klimawirkung

Die Gesamtklimawirkung von Kondensstreifen setzt sich aus kurzwelligen und langwelligen Effekten zusammen, wobei der Effekt bei Nacht ausschließlich wärmend ist[11]. Dabei wird auf der Oberfläche der Kondensstreifen ein Albedo-Effekt erzeugt, indem ein Anteil der ankommenden Sonnenstrahlen wieder reflektiert wird. Analog dazu wird ein Treibhauseffekt bei der Reflexion von terrestrischen Strahlen gebildet [2]. Der zugrunde liegende Effekt ist in Abbildung 2 skizziert. Zunächst müssen Metriken für die Beschreibung der beiden Effekte eingeführt werden, um den Klimaeffekt quantifizieren zu können.

#### 2.3.1. Strahlungsantrieb

3

In der Klimaforschung hat sich die physikalische Größe des Strahlungsantriebs (engl. Radiative Forcing), folgend mit RF abgekürzt, als ein einfaches Maß für die Wirkung einer anthropogenen Störung erwiesen [12]. Der Strahlungsantrieb wird ebenfalls in der Form von dem Klimarat der Vereinten Nationen (IPCC) als Metrik für die Quantifizierung des Klimawandels verwendet [13]. Bei dem Strahlungsantrieb wird die Erwärmungsrate des Erdatmosphärensystems in Watt je Quadratmeter

gemessen, wobei nicht die komplexe Rückwirkung des Klimasystems berücksichtigt werden kann.

Eine Motivation für die Verwendung des Strahlungsantriebs als quantitatives Maß besteht darin, dass diese auch im Rahmen von Kondensstreifen eine relativ einfach zu berechnende Größe im Vergleich zu aufwendigen 3D-Klimasimulationen darstellt. Der für die Klimabetrachtung relevante Nettostrahlungsantrieb RF<sub>Net</sub> wird aus den lang- und kurzwelligen Strahlungsantrieben aufsummiert.

#### 2.3.2. Energiepotenzial

Das Kondensstreifen-Energiepotenzial (engl. Energy Forcing) ist definiert als die totale Energie eines Kondensstreifens innerhalb eines atmosphärischen Systems und wird mit EF abgekürzt. Die Berechnung in Gleichung 4 basiert auf dem Strahlungsantrieb, der Länge L und der Breite B des Kondensstreifens, welche entlang der Kondensstreifenlebensdauer integriert werden.

(4) 
$$\mathsf{EF}\left[\mathsf{J}\right] = \int_0^t \mathsf{RF}_{\mathsf{Net}}(t) L(t) B(t) \, \mathsf{d}t$$

Die Inklusion der morphologischen Kondensstreifenparameter kann zu Diskrepanzen bei einem direkten Vergleich zwischen RF und EF führen. Junge Kondensstreifen tendieren zu einem relativ hohen Nettostrahlungsantrieb, resultieren jedoch aufgrund der kleinen Abdeckungsfläche zu einem vergleichsweise geringen Energiepotenzial. Die Abdeckungsfläche wäre nach einigen Stunden Lebensdauer weitaus größer, sobald sich die linienförmigen Eiswolken zu Kondensstreifen-Zirruswolken entwickeln, was zu einem signifikanten Anstieg der kumulierten EF führt[14].

#### 2.3.3. Globale Klimapotenziale

Bei dem globalen Erwärmungspotenzial (engl. Global Warming Potential), folgend GWP abgekürzt, handelt es sich um eine von der IPCC eingeführte Metrik, um den Klimaeffekt verschiedener Gase miteinander vergleichen zu können[15]. Formal handelt es sich bei der GWP um das zeitlich integrierte RF innerhalb eines spezifizierten Zeithorizontes ZH, wobei die Emissionen des zu untersuchenden Gases mit einem Referenzgas (z.B. CO2) verglichen werden. In der Regel wird ein Zeithorizont von 20,50 oder 100 Jahren gewählt. Das absolute globale Erwärmungspotenzial für gebildete Kondensstreifen ist unabhängig von dem gewählten zeitlichen Horizont, da ein Kondensstreifen bis dahin bereits vollständig verdampfen wird.

Es sei anzumerken, dass das AGWP nach IRVINE et al. [16] äquivalent zu dem bereits eingeführten Energiepotenzial ist, wobei unterschiedliche Einheiten verwendet werden. Dies liegt unter anderem an der Lebensdauer von Kondensstreifen, da diese zum einen im Vergleich zu dem gewählten Zeithorizont vernachlässigbar klein ist und zum anderen nach dem Verdampfen aller Eispartikel keinen nachhaltigen Einfluss auf den Energiehaushalt der Erdatmosphäre hat. Da das AGWP in der Wissenschaft eine etablierte Metrik zur Bestimmung der emissionsba-

sierten Klimawirkung ist, wird diese primär im Rahmen dieser Arbeit zur Quantifizierung verwendet.

## 2.4. Operationelle Mitigation

Die Bildung von persistenten Kondensstreifen, welche einen verstärkten Klimaeffekt aufzeigen, kann durch die Reduktion von Flugzeit in eisübersättigten Luftmassen limitiert werden. Da atmosphärische Regionen mit einer Eisübersättigung tendenziell schmal sind[2], ist ein Unter- beziehungsweise Überfliegen der kritischen Bereiche möglich.

Die Flughöhenanpassung kann in zwei Varianten ausgeführt werden: Zum einen kann eine flottenweite Reiseflughöhen-Variation eingesetzt werden, wodurch alle Flüge in ineffizienteren Bedingungen bezüglich des Kraftstoffverbrauches geplant werden. Daraus folgt zwangsläufig ebenfalls eine erhöhte Schadstoffemission. Zum anderen ist eine punktuelle Höhenänderung um identifizierbare Regionen denkbar, die eine persistente Kondensstreifenbildung erlauben. Um solche kleinskaligen Anpassungen des Höhenprofils zu ermöglichen, ist vor Flugbeginn ein hinreichend genaues Wettervorhersagemodell für die Identifikation nötig.

Da sich die Klimawirkung von Kondensstreifen aus kurzwelligen und langwelligen Strahlungseffekten zusammensetzt, gilt es den wärmenden Effekt zu minimieren. Nach MEERKÖTTER et al. kann der Nettoklimaeffekt der Kondensstreifen die Erdoberfläche während eines Tages kühlen, wobei der resultierende Effekt stark von äußeren Einflüssen wie der Sonnenposition abhängt. In der Nacht erwärmen diese ausschließlich [17]. Daraus ableitend bietet es sich an, den Flugverkehr zeitlich zu regulieren, sodass der Großteil der Lebensdauer in für das Klima günstigen Zeiten vorliegt.

Insgesamt zeigen operationelle Mitigationsstrategien ein signifikantes Potenzial zur Reduzierung des Klimaeinflusses von Kondensstreifen, welche kurzfristig ohne technologischen Fortschritt implementierbar wären. Harte Optionen, welche eine fixierte flottenweite Beschränkung einführen, erscheinen unpraktisch, weil der erlaubte Luftraum teilweise erheblich reduziert werden muss, wodurch eine zusätzliche Belastung des Luftverkehrsmanagements zu erwarten ist. Stattdessen werden flexible Adaptionen, welche die vorliegenden atmosphärischen Bedingungen zugrunde legen, bevorzugt [18].

 $\rm TEOH$  et al. [19] untersuchte in seiner Studie eine gezielte Anpassung ( $\pm 2.000\,\rm ft$ ) der Reiseflughöhe von Flügen mit dem größten Nettoklimaeffekt. Der untersuchte Datensatz zeigte auf, dass etwa  $80\,\%$  des kumulierten Energiepotenzials auf  $2,2\,\%$  der Flüge zurückzuführen ist. Eine Anpassung der Reiseflughöhe dieser Hauptbeiträger führten zu einer Reduktion von  $59,3\,\%$  des durch Kondensstreifen erzeugten Energiepotenzials. In Bezug zur Gesamtflotte bedeutet diese selektive Adaption eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauches und der

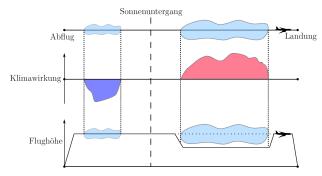


BILD 3. Qualitatives Konzept der Flughöhenadaption.

 $CO_2$ -Emissionen von 0,014%.

In der vorliegenden Arbeit wird sich auf die zeitliche Verschiebung von Abflugzeitpunkten, auf die gezielte vertikale Flughöhenadaption und einen Hybridansatz konzentriert. Bei der zeitlichen Verschiebung erfolgt eine iterative Optimierung in 15 Minuten Schritten, wobei die Konfigurationswahl in drei Formen durchgeführt werden kann. Hierbei wird unter einer (i) aggressiven, (ii) moderat-aggressiven und (iii) moderaten Optimierung unterschieden, welche divergierende Ansätze hinsichtlich Kosten-Nutzen aufweisen.

Die Flughöhenadaption zielt darauf ab, identifizierte klimawärmende Segmente zu Über- oder Unterfliegen. Das qualitative Konzept des Ausweichmanövers ist in Abbildung 3 illustriert. In diesem qualitativen Beispiel liegt sowohl die Bildung als auch die gesamte Lebensdauer vor Einbruch der Dämmerung vor, sodass der resultierende Netto-Strahlungsantrieb und damit die Klimawirkung negativ (kühlend) ausfällt. Diese Segmente werden nicht adaptiert. Anschließend erfolgt der Sonnenuntergang, wodurch der darauf anknüpfende identifizierte Kondensstreifen eine positive Klimawirkung (wärmend) erzielt. Ziel ist es, genau solche Segmente durch eine punktuelle Adaption der Flughöhe durch die Integration von einem Sink-, Reise- und Steigsegment zu umfliegen. Da hierdurch eine Abweichung von dem optimierten Emissionsprofil erzielt wird, kommt es zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch während der Mission.

Bei dem Hybridkonzept werden beide vorgestellten Adaptionsmöglichkeiten für die ausgewählten Flugmissionen angewandt und hinsichtlich der Klimawirkung geprüft. Das Ziel des Konzeptes ist es, durch die zeitliche Verschiebung entweder günstigere Atmosphärenbedingungen für die Mitigation von persistenten Kondensstreifen zu erzielen oder mithilfe der Flughöhenadaption eine geringere Klimawirkung der Kondensstreifen unter erhöhten Kohlenstoffdioxid-Emissionen zu erreichen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass eine Kosten-Nutzen-Analyse beider Methoden durchzuführen ist, wodurch je nach Anwendungsszenario eine optimale Konfiguration zu bestimmen ist. Hierfür wird ein Kosten-Modell implementiert, welches unter anderem das Verhältnis der Methoden zur Reduktion der Klimawirkung sowie den dafür aufzuwendenden Kosten inkludiert.

Für die Flughöhenadaption werden die Kosten nach

(5) 
$$f_{\Delta H} = \frac{1}{\alpha} \cdot C_{\mathsf{KS}} \cdot w_2 \cdot \Delta m$$

bestimmt, wobei  $\alpha$  ein frei wählbarer Sensitivitätsparameter darstellt, welche eine Gewichtung innerhalb der beiden Methoden installiert. Dies kann beispielsweise von einer Airline angewandt werden, für die eine zeitliche Adaption aufgrund freier Slots und zeitlicher Unkritikalität favorisiert wird.

Die zeitliche Adaption und die damit verbundenen Kosten ergeben sich nach

(6) 
$$f_{\Delta T,i} = \frac{1}{1-\alpha} \cdot C_{\mathsf{TD}} \cdot w_{1,i} \cdot \Delta t_d.$$

Zusätzlich wird für jeden Flug ein Gesamtkostenindex  $C_{\mathsf{SOC}}$  errechnet, welcher sich aus dem Kraftstoffverbrauch  $m_{\mathsf{KS}}$ , der Gesamtflugzeit  $t_{\mathsf{ft}}$  und der zeitlichen Verschiebung  $\Delta t_d$  zusammensetzt:

(7) 
$$C_{SOC} = C_{KS} \cdot m_{KS} + C_{ft} \cdot t_{ft} + C_{TD} \cdot \Delta t_d$$
.

#### 3. SIMULATIONSARCHITEKTUR

In diesem Abschnitt soll anhand der thermodynamischen Grundlagen, meteorologischen Datensätzen der European Cente for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) und Flugprofildaten das entwickelte Simulationsmodell eingeführt werden. Die einzelnen Flugprofile beinhalten vierdimensionale Daten, die die gesamte Flugmission beschreiben und sich in eine dreidimensionale Position sowie einer eindimensionalen Zeit aufteilen. Da der Aufbau der Atmosphärendaten äquivalent dazu ist, lässt sich ein eindeutiger Atmosphärenzustand zu jedem Wegpunkt einer Flugmission zuordnen. Hierdurch ist es möglich, explizite Aussagen durch eine parametrisierte Kondensstreifenmodellierung aufzubauen, welche auf den Ansätzen nach dem von Schumann entwickelten Tool "Contrail Cirrus Prediction Tool" (CoCiP)[20] aufbaut.

#### 3.1. Modellaufbau

Grundlegend wird die Simulationsarchitektur in fünf Schritte gegliedert, welche inklusive der jeweils zugehörigen Wechselbeziehungen in einem Blockbild in Abbildung 4 dargestellt ist.

## 3.1.1. Initiales Flugprofil

5

Im ersten Schritt werden zweidimensionale Flugtrajektorien für jeden Flug eines Flugverkehrsszenarios erzeugt. Im Rahmen dieser Arbeit werden synthetische Flugtrajektorien generiert, welche auf Flugpläne der Datenbank Market Intelligence [21] der Firma SABRE aufbauen. Diese beinhaltet weltweite Marktinformationen für Airlines, welche unter anderem Start- und Zielflughäfen inkludiert. Die aufbereiteten Daten basieren dabei auf validierten Rohdaten für Flugbuchungen, welche von externen Quellen zugeführt werden.

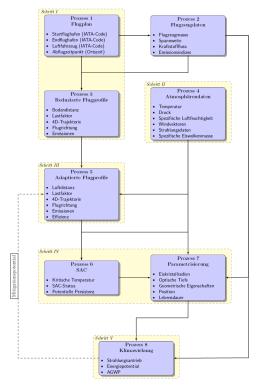


BILD 4. Blockbild über den gesamten Aufbau der vorgestellten Simulationsarchitektur.

Um aus den Informationen aus dem Flugplan Trajektorien zu erzeugen, wird eine vorkompilierte Flugprofildatenbank mit insgesamt 92 unterschiedlichen Flugzeugtypen aus *BADA4*, welche hinsichtlich ihres Kraftstoffverbrauches in einer idealisierten ISA-Umgebung optimiert wurden, verwendet. Die Optimierung erfolgt mithilfe eines in der Einrichtung Lufttransportsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (*DLR*) entwickelten Trajektorienrechners "*Trajectory Calculation Module*" (TCM) [22], welches die Flugbewegung vom Take-off bis zum Landeanflug nach Vorgabe von Flugprofilrandbedingungen simuliert und Missionsparameter wie beispielsweise Treibstoffverbrauch und Flugzeit ausgibt.

## 3.1.2. Atmosphäre

Im zweiten Prozessschritt werden die HRES Atmosphärendaten der fünften Generation der Re-Analyse Daten der ECMWF-ERA5 initialisiert. Innerhalb der Initialisierung in der Simulationsumgebung wird eine Atmosphären-Interpolationsmatrix <u>Atmo</u> für die Atmosphäre gespeichert. Um atmosphärische Bedingungen für jeden Wegpunkt einer Flugmission anzunähern, wird innerhalb des Datensatzes quadrilinear interpoliert.

# 3.1.3. Flugverkehrsbildung

Nachdem mit dem Flugplan und der *BADA4-*Flugzeugdatenbank ein vereinfachtes, zweidimensionales Flugprofil erzeugt wurde, ist die laterale Positionsbestimmung unter Einbezug der atmosphärischen Windbedingungen notwendig. Die Bestimmung der Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft V<sub>TAS</sub> und Grund

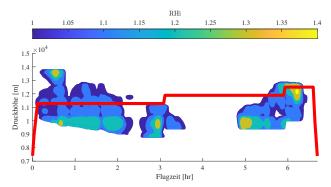


BILD 5. Höhenprofil einer Flugmission mit potenziellen persistenten vertikalen Kondensstreifengebieten.

V<sub>GS</sub> erfolgt gemäß der Winddreieck-Theorie[23].

Für die Bildung von Kondensstreifen gemäß dem SAC nach Gleichung 1 wird die Antriebseffizienz des Luftfahrzeuges zu jedem Wegpunkt benötigt. Generell wird dieses mithilfe von

(8) 
$$\eta = \frac{F \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{TAS}}}{\dot{m}_f \cdot Q}$$

bestimmt, wobei die Schubkraft F gemäß dem absoluten Energie-Modell der BADA4 verwendet wird. Das Modell setzt die Arbeit, die durch Schub- (F) und Widerstandskräfte (D) auf das Luftfahrzeug wirken, mit der Änderung der kinetischen und potenziellen Energie gleich:

(9) 
$$(F-D)V_{TAS} = mg\frac{dh}{dt} + mV_{TAS}\frac{dV_{TAS}}{dt}$$

#### 3.1.4. Kondensstreifenmodellierung

Das Modell zur Bildung von Kondensstreifengebieten hängt an zwei binären Ergebnissen: Zunächst wird bestimmt, ob das Kriterium für die Bildung SAC erfüllt wird. Anschließend wird an diesen Wegpunkten die relative Feuchtigkeit bezüglich Eis RHi auf eine Eisübersättigung geprüft. Nur wenn diese beiden Kriterien erfüllt sind, gibt das Modell eine potenziell persistente Kondensstreifenbildung für den betrachteten Wegpunkt aus.

Bei jedem Wegpunkt eines Fluges werden die atmosphärischen Bedingungen für einen Höhenvektor  $\vec{h}_{\mathsf{SAC}} = [h-80\mathrm{FL},h+80\mathrm{FL}] \in \mathbb{R}^{160}$  mit einer Auflösung von  $1\mathrm{FL}$  bestimmt. Hierzu wird eine Abfragematrix für den Wegpunkt i

(10) 
$$\underline{X}_{\mathsf{QP},\mathsf{SAC}}(i) = [\vec{\lambda}(i), \vec{\phi}(i), \vec{h}_{\mathsf{SAC}}(i), \vec{t}(i)]$$

als Eingang für <u>Atmo</u> definiert. Dies ermöglicht eine zweidimensionale Evaluierung einer Flugmission gemäß Abbildung 5 hinsichtlich kritischer Flughöhen.

#### Lebensdauersimulation

6

Die Bestimmung der Lebensdauer und Ausbreitung der identifizierten Kondensstreifen wird durch eine

Parametrisierung analog zu den Ansätzen der mikrophysikalischen Prozessen des Tools CoCiP [20] durchgeführt, welches die Lebenszyklus-Phasen von Kondensstreifen modelliert. Die auftretenden Schereffekte der vorliegenden Winde werden nach den Ausführungen von TEOH [19] berechnet und im Modell berücksichtigt. Die anschließende Dispersion wird mit einem zweidimensionalen Gaußschen-Abgasfahnenmodell bis zum Erfüllen mehrerer Abbruchkriterien simuliert.

## Klimawirkung

Die Kerneigenschaften von Kondensstreifen, die während der Integration entlang der Lebensdauer approximiert werden, werden zur Bestimmung der Klimawirkung verwendet. Hierdurch ergibt sich der langwellige  $RF_{LW}$  sowie kurzwellige Strahlungsantrieb  $RF_{SW}$  analog zu der Vorgehensweise von CoCiP[20]. Anschließend werden die positiven  $RF_{LW}$  mit den negativen  $RF_{SW}$  für jeden Eispartikel-Typen aufsummiert und mit der Gewichtung  $G_{Partikel}[24]$  gemäß

(11) 
$$\mathsf{RF}_{\mathsf{Net}} = \sum_{i=1}^{7} G_{\mathsf{Partikel}}(i) \cdot (\mathsf{RF}_{\mathsf{LW}}(i) + \mathsf{RF}_{\mathsf{SW}}(i))$$

verrechnet. Final wird der Strahlungsantrieb verwendet, um die Klimametrik AGWP<sub>Kon</sub> pro geflogenen Kilometer der einzelnen Kondensstreifensegmente zu ermitteln

(12) 
$$\mathsf{AGWP}_{\mathsf{Kon}} \ = \frac{\int_0^{ZH} \mathsf{RF}_{\mathsf{Net}}(t) B(t) L(t) \, \mathrm{d}t}{A_{\mathsf{Erde}} \cdot t_{\mathsf{Jahr}}}.$$

# 4. MITIGATIONSSZENARIEN

Zu Beginn dieses Abschnitts wird das Simulationsmodell sowie die Effizienz der operationellen Mitigation anhand eines Flugbeispiels über dem Nord-Atlantik aufgezeigt (dazu Unterabschnitt 4.1). Daraufhin wird ein synthetisches Flugverkehrsszenario über ein Jahr betrachtet. Im Rahmen der Analyse wird das flottenweite Energiepotenzial bewertet, wobei die mögliche Reduktion durch gezielte Adaptionen diskutiert wird (dazu Unterabschnitt 4.2).

## 4.1. Fallbeispiel LGW MCO

Für das Einzelflugszenario wird eine Verbindung von London-Gatwick (LGW) nach Orlando (MCO) mit einer Boeing B747-400 simuliert, wobei der Flug am 09. Dezember 2019 um 13:00 UTC startet. Die laterale Position entlang der North-Atlantic-Tracks werden mit potenziellen eisübersättigten Kondensstreifengebieten in Abbildung 6 dargestellt. Dieses Original Flugprofil erzielt dabei eine Kondensstreifen-Klimawirkung von AGWP\_{Kon}=  $2,17 \times 10^{-7} \, \mathrm{W/m^2 \, Jahr}$ . Die von dem emittierten Kohlenstoffdioxid ausgehende Klimawirkung ergibt sich zu AGWP\_{CO\_2,100}=0,231  $\times 10^{-7} \, \mathrm{W/m^2 \, Jahr}$ .

#### Mitigation

Zunächst wird das Potenzial einer zeitlichen Verschiebung der Flugmission betrachtet. Hierfür wird der Abflugzeitpunkt inkrementell um  $\Delta t=15\,\mathrm{min}$  verscho-

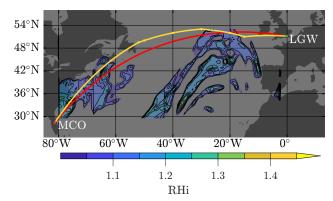


BILD 6. Vergleich der Spurdaten zwischen der Großkreisannahme (rot) und den identifizierten North-Atlantic-Tracks für den 09. Dezember 2019 (gelb) mit hervorgehobenen lateralen potenziellen persistenten Kondensstreifengebieten.

ben und simuliert. Die durch die zeitliche Adaption resultierende Klimawirkung wird durch das identifizierte AGWP quantifiziert und ist in Abbildung 7 für den jeweiligen Abflugzeitpunkt in UTC dargestellt. Wie zu erwarten, hat die zeitliche Adaption einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Klimawirkung des emittierten Kohlenstoffdioxids AGWP $_{\rm CO_{2,100}}$  (0,48~%). Jedoch ermöglicht beispielsweise eine Adaption um  $\Delta t=3~{\rm hr}$  eine Reduktion der Klimawirkung von Kondensstreifen AGWP $_{\rm Kon}$  um 25,28~%, da in dem adaptierten Flugzeitraum veränderte meteorologische Bedingungen vorliegen, welche unter anderem die durchschnittliche identifizierte Lebensdauer der Kondensstreifen reduziert (-63,42~%).

In der Trajektorie wurden drei Segmente im Höhenprofil identifiziert, welche für eine Flughöhenadaption evaluiert werden. Da jedoch der Abstand zwischen den letzten beiden Segmenten sehr gering ist ( $< 20 \,\mathrm{min}$  Flugzeit), werden diese bei der Adaption zusammengefasst. In der Darstellung werden zusätzlich die beiden Adaptionspunkte hervorgehoben, welche als Referenz zur Konstruktion des neuen Flugprofils verwendet werden. Durch die gezeigten Adaptionen entwickelt sich ein Mehraufwand an Kraftstoff von  $\Delta m = 11.111 \,\mathrm{kg}$ , da große Distanzen auf nicht optimalen Flughöhen absolviert werden müssen. Dies erfordert aufgrund des erhöhten Luftwiderstands zusätzlichen Schubbedarf. Insgesamt reduziert sich dennoch das Gesamt-AGWP durch die Adaption um -89,11% gegenüber dem originalen Flugprofil. Die angepasste Trajektorie sowie Klimawirkung sind in Abbildung 8 zusammengefasst.

#### 4.2. Flugverkehrsszenario

7

Für das zweite Szenario wird eine Flugverkehrsflotte über dem Nordatlantik modelliert: Dafür werden die atmosphärischen Bedingungen des jeweils neunten Kalendertages eines Monats im Zeitraum Mai 2019 bis April 2020 bezüglich der Bildung und Persistenz von Kondensstreifen simuliert. Als Basis für die Generierung des Verkehrsszenarios und der Verbindung der Flughafenpaarungen dient der 09. August 2019, wobei alle weiteren betrachteten Monate mit demselben

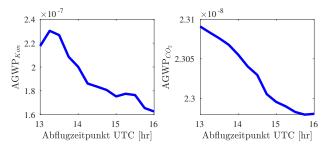


BILD 7. Einfluss des Abflugzeitpunktes auf die Klimawirkung von Kondensstreifen (links) und dem emittierten Kohlenstoffdioxid (rechts).

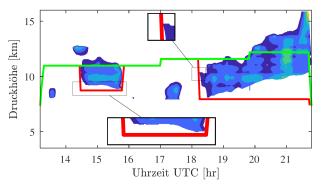


BILD 8. Einfluss der Flughöhenadaption auf den Einzelflug von LGW nach MCO.

Verkehrsdatensatz simuliert werden. Hierdurch lässt sich der Einfluss der jahreszeitlichen Variation und der North-Atlantic-Tracks unabhängig vom geltenden Flugplan aufzeigen und miteinander vergleichen. Insgesamt beinhaltet das betrachtete Flottenprofil ein Volumen von 878 relevanten Flügen, welche am Simulationstag eine vollständige Trajektorie abbilden und der jeweilige Flugzeugtyp Teil der vorkompilierten Profildatenbank ist. Damit ergibt sich für die Gesamtjahresbetrachtung eine Flotte von insgesamt 10.536 Flügen. Die Trajektorien der gesamten Flotte werden exemplarisch in Abbildung 9 für den 09. Juli dargestellt, wobei Wegpunkte, die das Schmidt-Appleman-Kriterium erfüllen,

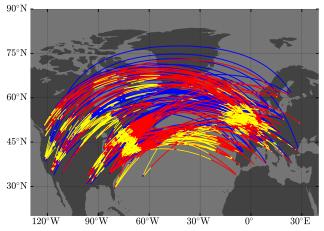


BILD 9. Darstellung der Trajektorien für westgebundenen (rot) und ostgebundenen (blau) Flüge. Die gelb markierten Wegpunkte erfüllen das SAC-Kriterium.

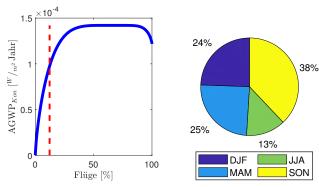


BILD 10. Links ist die kumulierte Klimawirkung des Flottenszenarios, wobei 16,9~% der Flüge 80~% des kumulierten AGWP<sub>Kon</sub> erzielen. Rechts zeigt die Verteilung der zu adaptierenden Flüge auf die Gruppierung der Jahreszeiten.

gelb hervorgehoben werden. Für diesen Tag formen 737 der betrachteten 878 Flüge (83, 94 %) einen Kondensstreifen, wobei die Bildung auf durchschnittlich 10,42 % der Flugdistanz verteilt ist. Der Anteil der kondensstreifenbildenden Flüge ist hierbei so hoch, da die tagesgültigen North-Atlantic-Tracks unter anderem durch Gebiete mit einer Eisübersättigung führen. Die hierdurch kumulierte Klimawirkung beläuft sich auf insgesamt AGWP $_{\rm Kon}=4,16\times10^{-6}\,{\rm W/m^2\,Jahr}$  für Kondensstreifen und AGWP $_{\rm CO_2}=1,0724\times10^{-5}\,{\rm W/m^2\,Jahr}$  für Kohlenstoffdioxid-Emissionen.

## 4.2.1. Mitigation

Um die zu adaptierenden Flüge zu identifizieren, wird die Gesamtklimawirkung des Flottenszenarios, wie in Abbildung 10 dargestellt, bestimmt. Hierbei erzeugen  $16,9\,\%$  aller simulierten Flüge insgesamt  $80\,\%$  des kondensstreifeninduzierten AGWP $_{\rm Kon}$ . Hieraus erschließt sich, dass durch gezielte effektive Adaptionen dieser Flüge ein großes Mitigationspotenzial besteht. Ebenfalls wird die Verteilung der identifizierten Flüge auf die Monate aufgezeigt, wobei die einzelnen Monate in ihre Jahreszeiten gruppiert werden. Dies zeigt vor allem, dass die Sommermonate JJA in diesem Versuchsszenario einen minimalen Einfluss auf die Gesamtklimawirkung ausüben, weshalb für diese eine geringe Mitigationsdichte vorgeschlagen wird.

#### **Zeitliche Adaption**

8

Die aggressive Optimierung der zeitlichen Verschiebung ermöglicht eine Reduktion der AGWP $_{\rm Kon}$  um 27,58~% gegenüber der originalen Konfiguration, wobei für einige Flüge kein alternativer Abflugzeitpunkt innerhalb der nächsten drei Stunden vorliegt. So wird mit der aggressiven zeitlichen Adaption 11,93~% der Flotte um durchschnittlich  $1,6~{\rm hr}$  angepasst.

Die moderat-aggressive Optimierung erstrebt eine geringere zeitliche Verschiebung als die aggressive Optimierung, da eine kühlende Konfiguration nicht explizit forciert wird. Diese erzielt eine Reduktion um  $27,07\ \%$  durch eine durchschnittliche Adaption um  $1,51\ \mathrm{hr}.$  Da

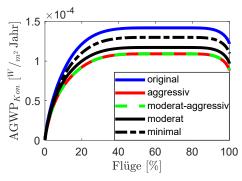


BILD 11. Vergleich der originalen flottenweite Klimawirkung mit den adaptierten zeitlichen Konfigurationen.

sich die beiden Optimierungsmethoden nur minimal unterscheiden, wird bei der moderaten Optimierung der Reduktionsparameter k=10~% gesetzt. Demnach wird die zeitlich nächste flugspezifische Konfiguration gewählt, die die kondensstreifeninduzierte Klimawirkung um mindestens k reduziert. Die daraus resultierende Konfiguration erzielt eine Gesamtreduktion von 20,46~%bei einer durchschnittlichen Verschiebung von  $1,24\,\mathrm{hr}$ . Neben den vorgestellten Optimierungsmethoden wird der Ansatz einer minimalen Verschiebung betrachtet, indem die günstigste Konfiguration für die Klimawirkung innerhalb einer Stunde gewählt wird. Durchschnittlich ergibt sich hierdurch für 9,51 % der Flotte eine Verschiebung um  $0.47 \, hr$  mit einer AGWP $_{Kon}$  Reduktion von 10,26 %. In Abbildung 11 wird die durch die Rekonfiguration erzielte Reduktion der Klimawirkung gegenübergestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass in diesem Szenario die aggressive und moderat-aggressive Optimierungsmethode nahezu identische Ergebnisse liefern, wohingegen die moderate Optimierung ein geringeres Reduktionspotenzial bei geringeren Adaptionskosten bietet.

# Flughöhenadaption

Die flottenweite Flughöhenadaption erzielt gegen zusätzlichen Kraftstoffaufwand eine Reduktion der kondensstreifeninduzierten Klimawirkung AGWP $_{\rm Kon}$ . In diesem Szenario werden die 16,9~% Flüge punktuell unter den spezifischen restringierten Gebieten geführt, sodass die erwärmenden Segmente reduziert werden. Insgesamt reduziert sich das AGWP $_{\rm Kon}$  um 89,16~%. Der damit verbundene Kraftstoffverbrauch beläuft sich in Summe für alle adaptierten Flüge auf  $\Delta m = 4.211~\rm t$ , wodurch eine Steigerung von 0,92~% bezüglich des Verbrauches der Gesamtjahresflotte resultiert. Insgesamt erzielt in diesem Szenario die Flughöhenadaption eine deutlich höhere Reduktion als die zeitliche Adaption.

Dieses Reduktionspotenzial ist jedoch in der Realität nicht möglich, da ein beliebig starkes vertikales Ausweichen unrealistisch für den kommerziellen Luftverkehr ist. Daher werden zusätzlich fünf verschiedene Fälle betrachtet, welche eine maximale Abweichung von der Reiseflughöhe in  $2.000\,\mathrm{ft}$  Schritten definiert. Sollte ein Ausweichmanöver eine größere vertikale Adaption

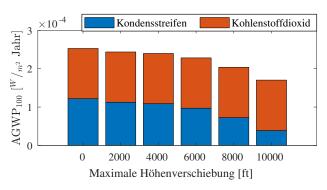


BILD 12. Klimawirkung für verschiedene maximale Höhenverschiebungen im Flottenszenario.

benötigen, wird für das betreffende Segment geprüft, ob eine Erhöhung der Flughöhe um 2.000 ft innerhalb der Flugleistungsgrenze liegt und eine Reduktion ermöglicht. Sollte eine Adaption in beide Richtungen nicht möglich sein, wird kein Manöver durchgeführt und das Kondensstreifensegment weiterhin gebildet. Der Verlauf der dadurch resultierenden Gesamtklimawirkung wird für alle Fälle in einem Balkendiagramm in Abbildung 12 gegenübergestellt. Hieraus lässt sich bereits erkennen, dass für eine geringe maximale Höhenverschiebung von  $2.000 - 4.000 \,\mathrm{ft}$  wenige Flüge Segmente besitzen, die für eine Adaption infrage kommen. Demnach ist entsprechend das Reduktionspotenzial für diese Fälle geringer. Bei einer maximalen erlaubten Höhenverschiebung von 10.000 ft werden weiterhin 1.507 Flüge identifiziert, für die eine Flughöhenadaption möglich ist. Hierdurch wird eine Reduktion der Klimawirkung um 32,61 % ermöglicht.

#### **Hybrid Ansatz**

9

Nachdem der Reduktionseffekt der beiden Adaptionsmöglichkeiten vorgestellt wurde, werden im Hybridansatz die mit der Adaption einhergehenden Kosten dem Nutzen gegenübergestellt. Eine Pareto-Front, die den normalisierten Gesamtkostenindex  $C_{\mathsf{SOC}}$  aller möglichen Konfigurationen mit dem jeweiligen Reduktionsverhältnis in einen Zusammenhang setzt, ist in Abbildung 13 für die Kostenterme  $C_{\rm KS}=0,62\,{\rm kg}$  und  $C_{\rm TD}=12\,{\rm kmin}$ dargestellt. Hierbei erzielt die Flughöhenadaption ein effektiveres Mitigationspotenzial bei geringeren Gesamtkosten, wobei die einhergehende Standardabweichung hinsichtlich der Kosten stärker ansteigt. Demnach ermöglicht beispielsweise die gemittelte zeitliche Adaption von einer Stunde ein Reduktionsverhältnis (80 %), welches ebenfalls mit einer maximalen Flughöhenadaption von  $6.000\,\mathrm{ft}$  erreicht wird. Jedoch führt die zeitliche Adaption im Vergleich zu einem Kostenzuwachs von 1, 4 %.

Neben den zufällig verteilten Sensitivitäten wird ebenfalls eine Parameterstudie zu dem Verlauf des Verhältnisses der Klimawirkung zu dem resultierenden Kostenterm aufgestellt. Der hierdurch erzeugte Graph wird in Abbildung 14 dargestellt und zeigt, wie das Verhältnis der Klimawirkung im Vergleich zum originalen Flottenprofil

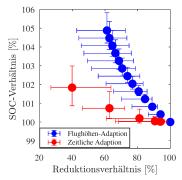


BILD 13. Pareto-Front der beiden Adaptionsdimensionen.

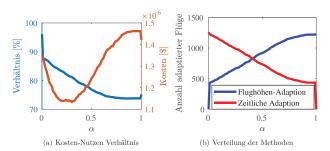


BILD 14. Parameterstude des Sensitivitätsparameters  $\alpha$ 

mit steigendem  $\alpha$  stetig reduziert wird. Jedoch erhöhen sich hierdurch die flottenweiten Kosten durch den steigenden Kraftstoffmehraufwand.

Ebenfalls wird hier nochmals verdeutlicht, dass durch eine priorisierte Flughöhenadaption die maximale Klimareduktion ermöglicht wird. Diese erreicht für ein  $\alpha = 0,99$ mit 1.219 im Höhenprofil und 434 zeitlich adaptierten Flügen eine Gesamtreduktion von 26,24 %. Jedoch wird für diese Konfiguration ein Kraftstoffmehraufwand von 1.770 t benötigt, welches die kraftstoffbezogenen Kosten ansteigen lässt. Zusätzlich ist ersichtlich, dass bei einem  $\alpha = 0.33$  eine gleichmäßige Verteilung beider Methoden erzeugt wird, welches eigentlich eine zeitliche Adaption favorisiert. Dies liegt neben den bereits erwähnten Kostenunterschieden unter anderem daran, dass unter Umständen eine zeitliche Adaption keine Reduktion der Klimawirkung mit sich zieht und so inhärent weniger Flüge für eine zeitliche Adaption infrage kommen. In diesem Szenario wird weiterhin eine Reduktion von 19,56~% erzielt. Zusätzlich lässt sich aus den Graphen ablesen, dass das Verhältnis der Klimawirkung zunächst linear mit  $\alpha$ sinkt und bei einem  $\alpha=0,65$  anfängt bei einem Verhältnis von 74,5 % zu konvergieren. Demnach wird mit einer weiteren Steigerung des Parameters und den zugehörigen Kosten keine größere Nettoreduktion der Klimawirkung erzielt.

# 4.2.2. Einfluss auf Airlines

Um den Einfluss der zeitlichen Adaption auf den Flugplan zu diskutieren, wird beispielhaft der Flug von Chicago (ORD) nach Brüssel (BRU) der *United Airlines, Inc.* im Detail betrachtet. Der Flug wird nach Flugplan mit einer *Boeing* 777 um 00:05 UTC starten und mit einer Flugzeit von sieben Stunden und einer Pufferzeit von

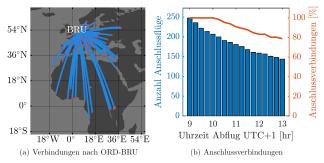


BILD 15. Anschlussverbindungen nach zeitlicher Adaptionen

etwa einer Stunde um 08:05 UTC planmäßig in Brüssel landen. Insgesamt starten anschließend 248 potenzielle Anschlussflüge dieser Fluglinie, wobei der Flughafen in Brüssel als Hub agiert und 66 unterschiedliche Flughäfen bedient. An dieser Stelle wird angemerkt, dass die anschließenden potenziellen Flugverbindungen nur monatsweise für alle Flüge dieser Linie aus einer Datenbank der *Market Intelligence* der Firma *SABRE* [21] entnommen werden kann. Demnach ist hierbei die Betrachtung des einzelnen Fluges nicht direkt möglich. Dennoch wird das sich aufspannende Verkehrsnetz in Abbildung 15 zur Visualisierung illustriert.

Konkret werden nach der vorgeschlagenen zeitlichen Adaption von drei Stunden unter Vernachlässigung der geplanten Pufferzeit nur noch  $159\ (64,11\ \%)$  Anschlussflüge vom Passagier erreichbar. Mit einer gegebenenfalls möglichen Umbuchung der Passagiere auf anschließend startende Flugverbindungen wäre weiterhin ein Weitertransport von  $83,33\ \%$  der Flughafenpaarungen möglich, wobei die daran anknüpfenden Anschlussverbindungen bei dieser Betrachtung nicht weiter verfolgt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt aus der Sicht einer Airline für die Profitabilität und Wettbewerbsfähigkeit ist die Turnaround-Zeit. Für die fokussierte Fluggesellschaft und Flug wird ein Rückflug von Brüssel nach Chicago um 10:00 UTC geplant, welcher nach der Adaption nicht erreicht wird. Hierbei ist im Vorfeld von der Airline zu prüfen, welche Priorität diese Verbindung hat und gegebenenfalls eine Korrektur des Sensitivitätsparameters  $\alpha$ notwendig, wodurch eine Flughöhenadaption in Betracht gezogen wird. Dieser Aspekt wird zusätzlich für alle weiteren 18 zeitlich adaptierten Flüge der United Airlines, Inc. betrachtet, wobei das Verhältnis zwischen der Ankunft und dem Rückflug nach der Turnaround-Zeit im Balkendiagramm in Abbildung 16(a) gegenübergestellt wird. Hierbei stellen die blauen Balken die planmäßigen Ankunftszeiten in der vorliegenden Ortszeit dar. Die zugehörigen roten Balken repräsentieren die Ankunftszeiten nach der zeitlichen Adaption durch den Hybridansatz. In Gelb sind die Uhrzeiten der Rückflüge dargestellt, sofern einer für den betrachteten Tag geplant ist. Insgesamt liegt die adaptierte Ankunftszeit bei 16 Flügen weiterhin vor dem geplanten nächsten Rückflug, wobei es jedoch durch die notwendigen Prozesse während des

©2022 10

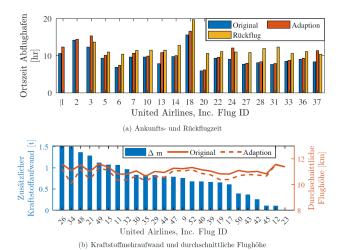


BILD 16. Anschlussverbindungen nach zeitlicher Adaptionen sowie Auswirkungen der Flughöhenadaption .

Turnarounds zwischen Landung und Start bei drei Flügen gegebenenfalls zu einer Verzögerung kommen kann. Bei drei der betrachteten Flüge der Fluggesellschaft kommt es zeitlich zu einer adaptierten Ankunft nach dem geplanten Rückflug, wodurch der weitere Flugplan der Gesellschaft nachhaltig beeinflusst wird. Unter diesem ist ebenfalls der betrachtete Flug von Chicago (ORD) nach Brüssel (BRU) unter der *United Airlines, Inc.* Flug ID 24 dargestellt.

Das originale Flottenprofil hat dabei eine durchschnittliche gemittelte Flughöhe von  $11,37\,\mathrm{km}$ , welches nach der Anwendung des Hybridansatzes auf eine gemittelte Flughöhe 11,30 km reduziert wird. Diese Adaptionen haben einen entsprechenden Einfluss auf den Kraftstoffmehraufwand. In Abbildung 16(b) zeigt die linke y-Achse und das zugehörige blaue Balkendiagramm den Kraftstoffaufwand und die rechte y-Achse die jeweilige Änderung der durchschnittlichen Flughöhe, wobei die durchgehende orange Linie das originale und die gestrichelte Linie das adaptierte Profil widerspiegelt. Hierbei weisen die Flüge einen erheblichen Mehraufwand auf, die den Großteil der Flugmission in ursprünglich ungeplanten Flughöhen absolvieren müssen und eine entsprechende Abweichung von dem originalen Höhenprofil aufweisen, was durch eine große Differenz der orangenen Linie illustriert wird.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde die Simulationsarchitektur hinsichtlich der Klimawirkung von Kondensstreifen unter Berücksichtigung von realen atmosphärischen Bedingungen erläutert. Vor diesem Hintergrund wurden vor allem thermodynamische Grundlagen zur Bildung sowie Persistenz implementiert, welche eine Quantifizierung verschiedener operationeller Mitigationsstrategien unter Hinzunahme realer Flugplandaten ermöglicht. Zur Einbeziehung von kritischen eisübersättigten Regionen werden diese in einem Mitigationsalgorithmus integriert, welcher zwischen einer Flughöhenadaption und einer zeitlichen

Verschiebung mit einem Kostenmodell unterscheidet.

Darüber hinaus wurden zwei Fallstudien vorgestellt, welche einerseits das ökologische Potenzial anhand eines Einzelfluges und andererseits die flottenweite kumulierte Klimawirkung aufzeigt. Hierbei ging unter anderem hervor, dass durch eine Verschiebung des Abfluges vom Einzelflug um drei Stunden eine Reduktion der Klimawirkung von Kondensstreifen um 25,28 % erzielt wird. In dem Flottenszenario wird ersichtlich, dass ein kleiner Anteil 16,90 % der Gesamtflotte für insgesamt 80 % der Klimawirkung verantwortlich sind. Hiervon sind vor allem Flüge betroffen, die nächtlich persistente Kondensstreifen verursachen. Mit gezielten Adaptionen dieser lässt sich bereits ein Großteil der flottenweiten Klimawirkung von Kondensstreifen reduzieren. Bei einer maximal erlaubten Flughöhenadaption ermöglicht dies eine Reduktion der Gesamtflotte um 89,16 %, wobei sich dies nicht in einem realen Flugszenario ohne erheblichen Mehraufwand der Luftsicherheit umsetzen lässt.

Die erzielten Ergebnisse zeigen ein erhebliches Mitigationspotenzial der schädlichen Kondensstreifensegmente auf. Die Strategie der vertikalen Adaption zeigt verglichen mit vorhergehenden Studien übereinstimmende Ergebnisse, sodass eine gezielte Höhenadaption als effiziente Methode zur Mitigation gilt. In den betrachteten Studien wurde ausschließlich auf eine positionelle dreidimensionale Adaption abgezielt, wobei die zeitliche Dimension noch nicht als explizite Mitigationsstrategie angewandt wurde. Die vorgestellten zeitlichen Adaptionsstrategien zeigen jedoch auf, dass die vierte Dimension als Alternative nicht zu vernachlässigen sind.

Das vorhandene Simulationsmodell lässt sich weiterhin mit zusätzlichen Flugzeugmodellen erweitern, um ein breiteres Flugverkehrsszenario aufbauen zu können. Weiterhin wurden bislang ausschließlich kerosinbetriebene Antriebstechnologien berücksichtigt. Zukünftig scheint der Einbezug von alternativen Antriebstechniken wie z.B. Wasserstoff sehr sinnvoll, wobei diese weniger Kondensationskerne zur Eiskristallbildung emittieren. Die vorgestellten Mitigationsstrategien lassen sich unter anderem um eine jahreszeitliche Variation erweitern, da die vorliegenden Daten für einen verminderte Klimawirkung von Kondensstreifen in den Sommermonaten sprechen, da die Atmosphärenbedingungen in diesen Monaten eine Bildung erschweren.

# Kontaktadresse:

michaelbecker123@hotmail.de

#### Literatur

[1] V. Ramaswamy, O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G. Y. Shi, and S. Solomon. Radiative forcing of climate change. In 'Climate change 2001: the scientific basis'. IPCC Working Group I, Third Assessment Report.pp. 349–416, 2001.

©2022 11

- [2] Ulrich Schumann. Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique*, 6(4-5):549–565, 2005.
- [3] Ulrich Schumann. Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique*, 6(4):549–565, 2005. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.05.002.
- [4] Ulrich Schumann. On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorologische Zeitschrift*, pages 4–23, 1996.
- [5] Ernst Schmidt. Die entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, Verlag R. Oldenbourg, München, Heft 44, 5(44):1–15, 1941.
- [6] Herbert Appleman. The formation of exhaust condensation trails by jet aircraft. Bulletin of the American Meteorological Society, 34(1):14–20, 1953.
- [7] Dietrich Sonntag. Advancements in the field of hygrometry. *Meteorologische Zeitschrift*, pages 51–66, 1994.
- [8] A. Detwiler and R. Pratt. Clear-air seeding: Opportunities and strategies. The Journal of Weather Modification, 16(1):46–59, 1984.
- [9] Klaus Gierens, Ulrich Schumann, Manfred Helten, Herman Smit, and Alain Marenco. A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements. In *Annales Geophysicae*, pages 1218–1226. Copernicus GmbH.
- [10] Ulrich Schumann and Andrew J. Heymsfield. On the life cycle of individual contrails and contrail cirrus. *Meteorological Monographs*, 58:3–1, 2017.
- [11] David S. Lee, D. W. Fahey, Agniezka Skowron, Allen, Ulrike Burkhardt, Q. Chen, S. J. Doherty, S. Freeman, P. M. Forster, and J. Fuglestvedt. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Envi*ronment, 244:117834, 2021.
- [12] Schumann, , Ulrich. Luftverkehr und Klima. Atmosphärenforschung. [Physik in unserer Zeit, 39(3):143–149, 2008.
- [13] Joyce E. Penner, D. Lister, D. Griggs, and D. Docken M. MacFarland. Aviation and the global atmosphere, intergovernmental panel on climate change special report, 1999.
- [14] Ulrike Burkhardt and Bernd Kärcher. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature climate change*, 1(1):54–58, 2011.
- [15] Jan S. Fuglestvedt, Keith P. Shine, Terje Berntsen, J. Cook, D. S. Lee, Andrea Stenke, Ragnhild Bieltvedt Skeie, G. J.M. Velders, and I. A. Waitz. Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. Atmospheric Environment, 44(37):4648–4677, 2010.

- [16] E. A. Irvine, B. J. Hoskins, and K. P. Shine. A simple framework for assessing the trade-off between the climate impact of aviation carbon dioxide emissions and contrails for a single flight. *Environmental Research Letters*, 9(6):064021, 2014.
- [17] Ralf Meerkötter, U. Schumann, Doelling, P. Minnis, T. Nakajima, and Y. Tsushima. Radiative forcing by contrails. In *Annales Geophysicae*, pages 1080– 1094. Springer.
- [18] Klaus Martin Gierens, Ling Lim, and Kostas Eleftheratos. A review of various strategies for contrail avoidance. Open Atmospheric Science Journal, 2:1– 7, 2008.
- [19] Roger Teoh. Climate forcing of aircraft contrails: uncertainty quantification and mitigation potential. DOI: 10.25560/82293.
- [20] Ulrich Schumann. A contrail cirrus prediction model. Geoscientific Model Development, 5(3):543– 580, 2012.
- [21] Sabre Airline Solutions. Sabre airvision market intelligence.
- [22] Benjamin Lührs, Florian Linke, and Volker Gollnick. Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien. 2014.
- [23] Wieland Richter. 3. Berechnung flugtaktischer Größen. In Wieland Richter, editor, Flugnavigation, pages 47–60. De Gruyter Oldenbourg, 2020. DOI: 10.1515/9783110676105-003.
- [24] Ulrich Schumann, Bernhardt Mayer, Klaus Gierens, Simin Unterstrasser, Philipp Jessberger, Andreas Petzold, Christiane Voigt, and Jena-Francois Gayet. Effective radius of ice particles in cirrus and contrails. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(2):300–321, 2011.

©2022 12