Project: **1062**

Project title: **ÖkoLuft**

Principal investigator: **Volker Grewe**

Report period: **01.01.2026 - 31.12.2026**

Projektübersicht

Der Fokus des Projekts ist die Anwendung, Entwicklung und Verifikation eines Klima- Chemie-Modells auf regionaler und globaler Skala um die Wirkung von Luftverkehrsemissionen und die Ökoeffizienz möglicher Mitigationsmaßnahmen im Luftverkehr untersuchen zu können.

Entwicklungen für OpenAirClim

Das Open-Source-Antwortmodell OpenAirClim wird zur Bewertung der Klimaauswirkungen von Luftverkehrsemissionen eingesetzt. Zu den wesentlichen Vorteilen für Anwender zählen die einfache Handhabung, die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten sowie die hohe Geschwindigkeit, mit der Simulationsläufe durchgeführt werden können (Völk et al., 2023; Völk et al., in prep.). Die zugrunde liegenden Response Surfaces – die mithilfe des Klima-Chemie-Modells EMAC für emittiertes NOx erstellt wurden – sind entscheidend für die Ableitung aussagekräftiger und robuster Schätzungen von Ozon- und Methanresponses. Es wurden EMAC-Modellsimulationen für 288 Emissionsregionen durchgeführt, um eine ausreichend hohe Ortsauflösung für das Response Modell zu erzielen. Diese Ergebnisse wurden 2026 weiter analysiert. Ergebnisse aus exemplarischen Szenarien-Berechnungen zeigen einen Unterschied von etwa 20 % in der Ozonresponse zwischen OpenAirClim- und EMAC-Simulationen (Abb. 1, links). Die großen Unterschiede zwischen den Ergebnissen des Response Modells und des Klima-Chemie Modells lasen sich auf künstliches Rauschen bzw. ein niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis zurückführen, welches an Emissionsorten mit niedrigeren importierten NOx-Massen auftritt. Davon betroffen sind insbesondere die Simulationen in den Polarregionen. Es wurde ein geeignetes Modell-Setup entwickelt, das ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit eine aussagekräftige Ozonresponse liefert (Abb. 1, rechts). Der Datensatz für die Entwicklung der Response Surfaces wird derzeit aktualisiert (laufende Arbeiten).

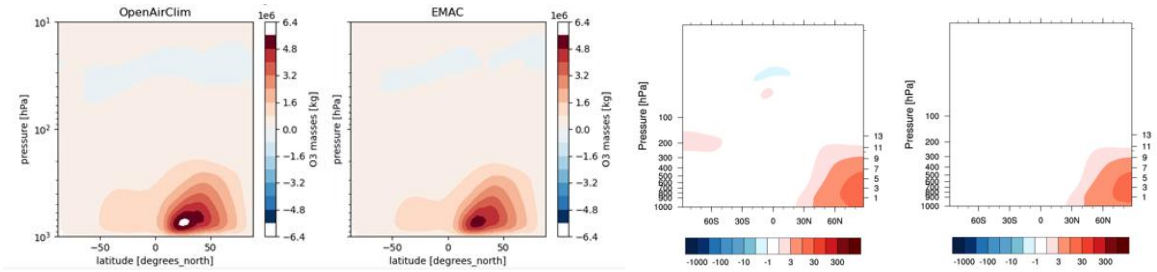


Abbildung 1 (links): Vergleich der Ozonresponse zwischen den Modellen OpenAirClim und EMAC für ein NOx-Emissionsszenario. (rechts): Ozonresponse (in [ppbv/Tg(N)/Jahr]), berechnet mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren. Das künstliche Rauschen ist im Falle der Simulation mit hohem Emissionsfaktor reduziert (rechter Plot).

Klimawirkungsfunktionen und algorithmische Klimawirkungsfunktionen

Ein wesentlicher Teil der Klimawirkung des Luftverkehrs entsteht durch Nicht-CO_2-Effekte wie Kondensstreifen und Ozon. Da diese Effekte stark von Ort, Zeit und atmosphärischen Bedingungen abhängen, können Klimawirkungsfunktionen (CCFs) und ihre vereinfachten algorithmischen Darstellungen (aCCFs) zur Planung klimaoptimierter Flugrouten eingesetzt werden.

Im Rahmen des WeCare-Projekts wurden bestehende CCFs räumlich und saisonal erweitert und mit bisherigen CCFs sowie aCCFs verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass aCCFs die grundlegenden Größenordnungen und die Variabilität der Klimawirkung erfassen, im Detail jedoch teilweise deutliche Abweichungen auftreten. Die neuen CCF-Datensätze liefern damit eine wichtige Grundlage für die Bewertung und Weiterentwicklung von aCCFs.

Darüber hinaus wurde das Kondensstreifenmodell CONTRAIL innerhalb des globalen Modells EMAC weiterentwickelt. Verbesserungen bei der Beschreibung der atmosphärischen Feuchte und der räumlichen Interpolation meteorologischer Daten ermöglichen eine überarbeitete Berechnung der Kondensstreifenentwicklung und ihrer Klimawirkung. Sensitivitätsstudien zeigen einen erheblichen Einfluss dieser Modellanpassungen auf die berechnete Lebensdauer und optische Dicke von Kondensstreifen. Auf dieser Grundlage wurden neue Kondensstreifen-CCFs für verschiedene Regionen der Nordhemisphäre berechnet, um deren räumliche und zeitliche Variabilität sowie modellbedingte Unsicherheiten zu untersuchen.

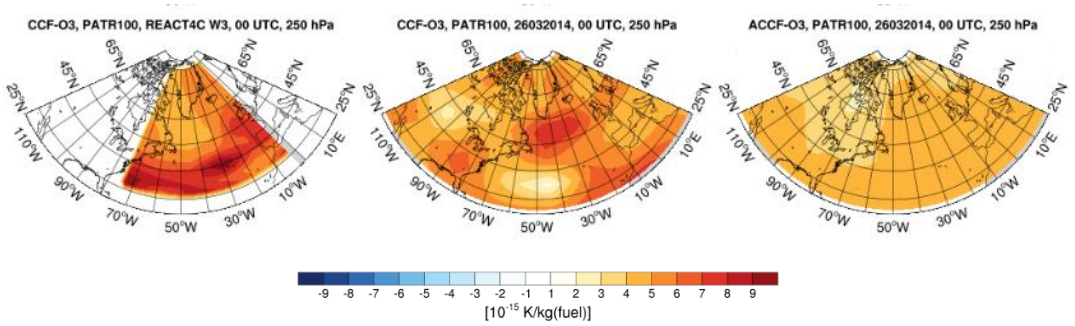


Abbildung 2 Simulierte Ozon-Klimawirkungsfunktionen (P-ATR100 [K/kg(fuel)]) von REACT4C (linke Spalte) und WeCare (mittlere Spalte) und vereinfachte algorithmische Klimawirkungsfunktionen (rechte Spalte) für eine Winter-Wettersituation (REACT4C) bzw. 26. März 2014 (WeCare und aCCFs) für ein exemplarisches Druckniveau.

Emissionen in der mittleren Atmosphäre (Übeschallverkehr)

Verweilzeiten von Spurenstoffen sind nicht nur relevant im Kontext von Flugverkehr-Emissionen, sondern auch für Raumtransport und Forschung zur allgemeinen Dynamik der mittleren Atmosphäre. Erste Arbeiten, die das Alter der Luft und Verweilzeiten in der Stratosphäre vergleichen, haben gezeigt, dass Verweilzeiten durch Alter-der-Luft Beobachtungsdaten abgeschätzt werden können. Das ist hochrelevant, da Verweilzeiten bisher ausschließlich durch seltene Ereignisse, wie die 2022 Hunga Tonga Vulkaneruption abgeschätzt werden konnten. Der gefundene Zusammenhang ermöglicht Verweilzeiten auch für andere Jahre abzuschätzen, mit der Bedingung, dass Alter-der-Luft Beobachtungsdaten vorhanden ist. Das öffnet einen Weg die Verweilzeiten in einem sich ändernden Klima zu beobachten und Unsicherheiten abzuschätzen (Pletzer et al. 2026, für die Publikation in Nature Communications aktzeptiert). Die beantragte Rechenzeit konnte wegen diverser Probleme nicht vollständig abgerufen werden. Obwohl das Setup bereits erfolgreich für mehrere Projekte gerechnet wurde, skalierten die geplanten Simulationen mit voller Chemie entlang verschiedener Emissionspfadwege nicht wie erwartet. Der Grund konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Fährten wie UCX-Fehlermeldungen und YAXT-Kompatibilitätsprobleme haben bisher nicht zur Lösung des Problems geführt. Die erhöhte Anzahl der Tracer war wider Erwarten wie im Folgeantrag für 2026 erwähnt ebenfalls nicht dafür verantwortlich. Der Kernel-Patch der DKRZ-Beratung im Mai bzw. Juni war leider keine Lösung. In Anbetracht der fortschreitenden Zeit wurde umgeplant und anstatt Simulationen mit voller Chemie entlang der Emissionspfade wurden GCM-Simulationen gestartet. Deren Dynamik wird durch Strahlungs-„Forcings“ aus vorherigen Simulationen definiert. Diese sind zum aktuellen Zeitpunkt nur für das Emissionsszenario SSP2-4.5 vorhanden. Es werden deshalb aktuell zwei Hindcast (freilaufend und genudged“) und ein Projektions-Ensemble (drei Simulationen) darauf basierend bis 2100 gerechnet.

Das EU Horizon Projekt SENECA wurde mittlerweile abgeschlossen. Die Emissionsinventare von Partnern wurden nicht bereitgestellt, weswegen die Rechenzeit nicht abgerufen wurde.

Referenzen (publiziert und in Planung)

Völk, S., Yamashita, H., Megill, L., Dahlmann, K., Grewe, V.: OpenAirClim: A framework for assessing the climate impact of aviation emissions, in prep.

Stefan Völk, Liam Megill, Hiroshi Yamashita, Katrin Dahlmann, Volker Grewe, OpenAirClim - an open-source climate response model for the aviation sector, 5th ECATS Conference January 27–29, 2026, Brussels, Belgium

Pletzer, J; Grewe, V.; Garny, H.; Nützel, M.; Schmidt, A. (2026): Observing stratospheric residence time from opposing transport timescales. DOI: 10.21203/rs.3.rs-9087641/v2. Accepted for publication in Nature Communications.

Peter, P.; Matthes, S.; Frömming, C.; Jöckel, P.; Grewe, V. (2026): Revision of the Lagrangian CONTRAIL submodel (v2.0) in EMAC (v2.55.2): implications for contrail climate change functions. Manuscript in preparation for Geoscientific Model Development (GMD).