

Project: **1062**

Project title: **ÖkoLuft**

Principal investigator: **Volker Grewe**

Report period: **2020-11-01 to 2021-08-31**

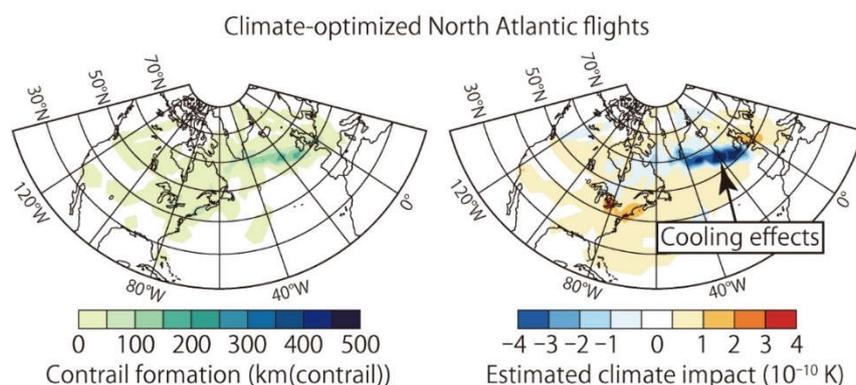
**Projektübersicht:** Der Fokus des Projekts ist die Anwendung, Entwicklung und Verifikation eines Klima-Chemie-Modells auf regionaler und globaler Skala um die Wirkung von Luftverkehrsemissionen und die Ökoeffizienz möglicher Mitigationsmaßnahmen im Luftverkehr untersuchen zu können. Im Antragszeitraum wurden Arbeiten durchgeführt zur Modellevaluation von EMAC/MECO(n) durch Flugzeugmessungen, zur Berechnung und Analyse sogenannter Klimawirkungsfunktionen (Climate Change Functions, CCF, Frömming et al. 2020, Rosanka et al. 2020), zu klima-optimalen Routen im globalen Klima-Chemie-Modell EMAC (Yamashita et al. 2020), zum Mitigationpotential durch Formationsflug (Dahlmann et al. 2020, Marks et al. 2020), sowie zur Klimawirkung einer potentiellen Überschallflotte. Im Folgenden sind Ergebnisse von 2 dieser Themen genauer beschrieben.

## Verifizierung und Robustheit von (algorithmischen) Klimawirkungsfunktionen

Die nordatlantischen Wettermuster wurden aus der zehnjährigen EMAC-Modellsimulation (v2.53) für Dezember 2008 – August 2018 analysiert. Jeder einzelne Tag der zehn vollständigen Winter und Sommer dieser Simulationen wurde in fünf Wettertypen für den Winter bzw. in drei Typen für Sommer klassifiziert. Darüber hinaus wurden die Nordatlantik-Flugverkehrssimulationen mit fünf Flugroutenstrategien für repräsentative Tage für jeden Wettertyp unter Verwendung des EMAC-Modells mit den Modulen AirTraf (Luftverkehr, Version 2.0, Yamashita et al., 2016, 2020), ACCF (algorithmische Klimafolgenfunktionen, Version 1.0, Yin, et al. 2021) und CONTRAIL (Kondensstreifen, Version 1.0, Frömming, et al. 2014) durchgeführt. Eigenschaften der Flugroutenstrategien wurden verglichen.

Die Ergebnisse zeigen (siehe Abbildung 1), dass das klimaoptimierte Routing die Klimawirkungen (ATR20) erfolgreich reduziert. Darüber hinaus wird der Kompromiss zwischen Klimawirkungen und Kostenanstieg bestätigt. Diese Eigenschaften sind den repräsentativen Tagen jedes Wettertyps über dem Nordatlantik gemeinsam.

Der Anwendungszeitraum wurde verwendet, um verschiedene Optimierungskriterien zu implementieren. Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und erfolgreich veröffentlicht (Yamashita, et al. 2021). Unsere Methodik wird auf Langzeitanalysen basierend auf EMAC-Simulationen erweitert, um die Robustheit der Klimawirkungsfunktionen zu verifizieren. Darüber hinaus wird die vorliegende Optimierungsmethode für Optimierungen nach verschiedenen Kriterien erweitert.



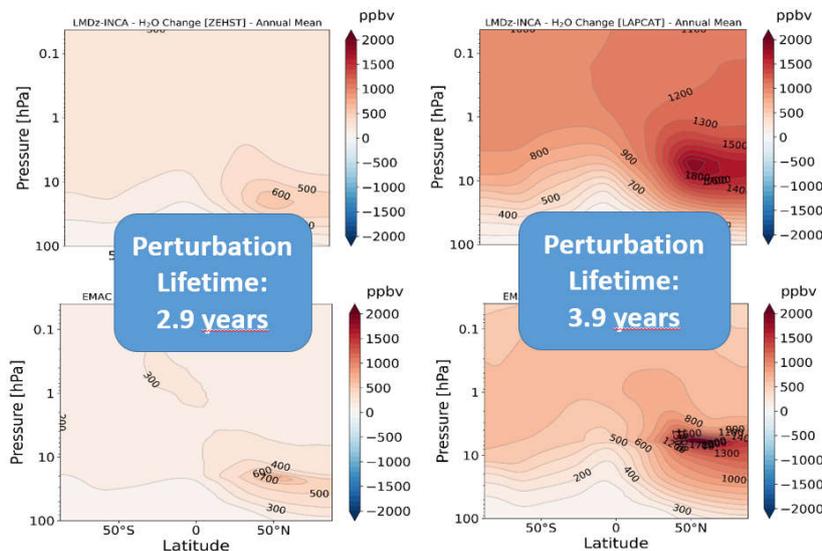
**Abb. 1:** Vergleich von Kondensstreifenbildung (links) und Klimawirkungen (ATR20) (rechts) des nordatlantischen Luftverkehrs für einen Wintertag. Die klimaoptimierten Flüge erzeugen regional kühlende Effekte.

## Emissionen einer potentiellen Überschallflotte und deren Wirkung auf die Ozonschicht und das Klima

Die STRATOFLY Projekt-Ergebnisse zur Klimawirkung beinhalten neue Erkenntnisse zur Änderung der atmosphärischen Zusammensetzung durch potentielle Hyperschall-Luftverkehrs-Emissionen und eine Einschätzung der Strahlungswirkung und Sensitivitäten von Hyperschall-Luftverkehr in einer Flughöhe von etwa 25 – 40 km. Bestehende Literatur wird damit um diesen Bereich erweitert.

Im Laufe des Projekts wurden zwei Wasserstoff betriebene Flugzeugflotten mit unterschiedlichen Flughöhen

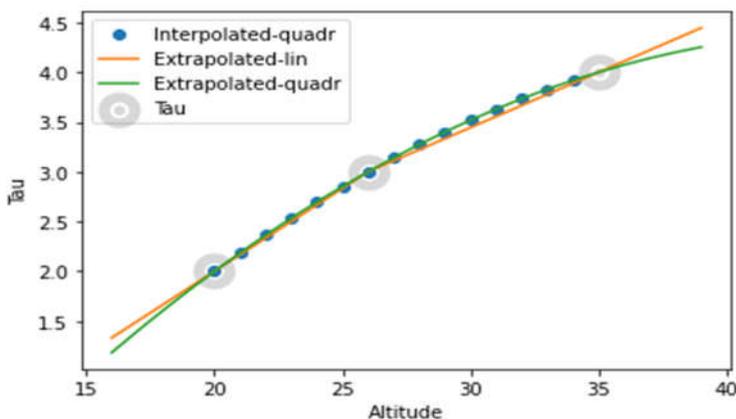
untersucht. Die dadurch entstehende Störung des stratosphärischen Wasserdampfs ist in Abbildung 2 gezeigt. Entgegen der Erwartung in der Hyperschall-Forschung war eine Abnahme der Störung mit zunehmender Flughöhe nicht zu sehen. Ein Großteil des emittierten Wasserdampfs wird wie erwartet photochemisch umgewandelt, allerdings sorgt eine Rekombination der Moleküle zurück zu Wasserdampf für eine höhere Lebenszeit von Wasserdampf mit steigender Flughöhe. Andere Effekte wie Methan-Oxidation werden durch die erhöhte OH-Konzentration ebenfalls verstärkt.



**Abb. 2:** Änderung von atmosphärischem Wasserdampf durch Hyperschall-Flugzeugflotten. Ergebnisse vom Model LMDz-INCA (obere Zeile) und vom Model EMAC (untere Zeile, berechnet am DKRZ). Linke Spalte zeigt Ergebnisse für den Flugzeugtyp ZEHST (Flughöhe 26 km) und die rechte Spalte für den Flugzeugtyp LAPCAT (Flughöhe 35 km).

Im zweiten Teil des Projekts wurden Flugzeugtyp-unabhängige Sensitivitätsstudien durchgeführt. Das heißt in unterschiedlichen Flughöhen (30 km und 38 km) und unterschiedlichen Breitengraden (60–30°S, 0–30°N, 30–60°N, 60–90°N) wurde die Auswirkung der drei entstehenden Emissionen (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) bei Verbrennung von Wasserstoff untersucht. Mit den Ergebnissen der Sensitivitätsstudien lassen sich in Zukunft Schlüsse auf klimaoptimierte Flugrouten und Flughöhen ziehen. Die Ergebnisse sollen in 2 Publikationen (Pletzer et al.) veröffentlicht werden.

Insgesamt wurden dafür 24 Simulationen durchgeführt. Wie im Antrag erwähnt, wurde zur Reduzierung der Rechenzeit ein „Cold-Start“ durchgeführt. Das heißt es wurde höhenabhängig eine 1D-Differentialgleichung gelöst, um den Gleichgewichtszustand der atmosphärischen Spurenstoffe nach der Störung durch Emissionen schneller zu erreichen (Siehe Abb. 3).



**Abb. 3:** Höhenabhängige Korrektur der Initialemissionen mit Tau+0.5 basierend auf einer 1D-Differentialgleichung zum Emissionsabbau. Das als „Cold-Start“ bezeichnete Vorgehen, ermöglicht es die Rechenzeit deutlich zu reduzieren.

Simultan zu den Simulationen wurden die Monatsmittel berechnet, um die Datenmenge auf /scratch minimal zu halten und zeitgleich archiviert. Fortlaufend wurden so nur 60 TB belegt. Die wichtigsten Indizes für die 24 Simulationen sind in Tabelle 1 festgehalten. Hier zeigt sich ebenfalls, dass der Transport in die Troposphäre der dominante Faktor zum Abbau der Emissionen ist. Z.B. ist die Wasserdampf-Lebensdauer für Emissionen in den Tropen deutlich größer als für Emissionen in der nördlichen Polarregion.

Die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für weitere Forschung im Über- und Hyperschall-Bereich. Die aktuellen Konzepte zum Hyperschall-Luftverkehr müssen somit neu bewertet werden und den Ergebnissen angepasst werden. Folgeprojekte wie MOREandLESS und SENECA werden an den Ergebnissen von Stratofly anknüpfen und das Wissen über Emissionen von potentiellen Flugzeugflotten und deren Wirkung auf die Ozonschicht und das Klima vertiefen. Die Cold-Start Methode wird in zukünftigen Projekten zur Reduktion der Rechenzeit angewendet werden.

## Referenzen (publiziert und in Planung)

- Dahlmann, K., Matthes, S., Yamashita, H., Unterstrasser, S., Grewe, V., Marks, T., Assessing the climate impact of formation flights, *Aerospace* 7, 172, doi:10.3390/aerospace7120172, 2020.
- Frömming, C., Grewe, V., Brinkop, S., Jöckel, P., Haslerud, A.S., Rosanka, S., van Manen, J., and Matthes, S., Influence of the actual weather situation on non-CO2 aviation climate effects: The REACT4C Climate Change Functions, *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-21-9151-2021>, 2021.
- Marks T, Dahlmann K, Grewe V, Gollnick V, Linke F, Matthes S, Stumpf E, Swaid M, Unterstrasser S, Yamashita H, Zumegen C. Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight. *Aerospace*. 2021; 8(1):14. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010014>.
- Rosanka, S., Frömming, C, and Grewe, V., The impact of weather pattern and related transport processes on aviation's contribution to ozone and methane concentrations from NOx emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-46>, 2020.
- Yamashita, H., Grewe, V., Jöckel, P., Linke, F., Schaefer, M., and Sasaki, D.: Air traffic simulation in chemistry-climate model EMAC 2.41: AirTraf 1.0, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3363–3392, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3363-2016>, 2016.
- Yamashita, H., Yin, F., Grewe, V., Jöckel, P., Matthes, S., Kern, B., Dahlmann, K., and Frömming, C., Newly developed aircraft routing options for air traffic simulation in the chemistry–climate model EMAC 2.53: AirTraf 2.0, *Geosci. Model Dev.*, 13, 4869–4890, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4869-2020>, 2020.
- Yamashita, H., Yin, F., Grewe, V., Jöckel, P., Matthes, S., Kern, B., Dahlmann, K., and Frömming, C., Analysis of Aircraft Routing Strategies for North Atlantic Flights by Using AirTraf 2.0, *Aerospace*, 8, 33. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020033>, 2021.
- Frömming, C., Grewe, V., Brinkop, S., and Jöckel, P.: Documentation of the EMAC submodels AIRTRAC 1.0 and CONTRAIL 1.0, supplementary material of Grewe et al., 2014b, *Geoscientific Model Development*, 7, 175–201, <https://doi.org/10.5194/gmd7-175-2014>, 2014.
- Yin, F., Grewe, V., Matthes, S., Yamashita, H., Dahlmann K., Klingaman, E., Shine, K., Lührs, B., Linke, F., “Predicting the climate impact of aviation for en-route emissions: The algorithmic climate change function sub model ACCF 1.0 of EMAC 2.53,” *Geosci. Model Dev.*, in preparation, 2021.
- Pletzer J. Hauglustaine D., Jöckel P., Cohen Y., Grewe V., The Climate Impact of Hypersonic Transport, in preparation, 2021.
- Pletzer J. Grewe V., Sensitivities in Latitude and Altitude of Hypersonic Emissions, in preparation, 2021.