Project: **1062**

Project title: **ÖkoLuft**

Principal investigator: **Volker Grewe**

Report period: **01.01.2024 - 31.12.2024**

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. Für den Berichtszeitraum wurde für vier Themen Rechenzeit beantragt. Im Detail:

2.1. Entwicklung von OpenAirClim: Mit dem EMAC-Modell wurden viele globale Simulationen durchgeführt, um die atmosphärische Reaktion in Bezug auf NO_x-Emissionen an verschiedenen Orten zu untersuchen. OpenAirClim Version 2.8.3 wurde im Jahr 2024 erfolgreich veröffentlicht (s.u.).

2.2. Atmosphären-chemische und mikrophysikalische Prozesse und ihre Rolle für den Luftverkehr

2.2.1. Vergleich EMAC Simulationsdaten mit flugzeuggetragenen Messungen (CARIBIC/IAGOS). Erste Ergebnisse bei wissenschaftlicher Konferenz vorgestellt werden (Matthes et al., 2023) und im Rahmen einer Multi-Modell-Studie zur Diskussion in ACPD eingereicht (Cohen et al. 2024).

2.2.2. Algorithmische Funktionen zum Klimawandel (aCCFs): Die Python-Bibliothek wurde veröffentlicht und ständig aktualisiert (Dietmüller et al. 2023, Yin et al. 2023, Matthes et al. 2023).

2.3. Robustheit der aCCFs wurde anhand von Langzeitsimulationen mit EMAC/AirTraf untersucht. Das Entscheidungsfindungsmodul der multikriteriellen Optimierung ist erfolgreich entwickelt worden (Castino et al., 2024).

2.4. Überschall-Luftverkehr: Die Sensitivitäten im Hyperschallbereich wurden untersucht (s.u.). Mit der Analyse der atmosphärischen Sensitivität im Überschallbereich wurde unter Verwendung der Cold-Start Prozedur begonnen.

Entwicklung eines Klima-Chemie Responsemodells für den Luftverkehr OpenAirClim 3.0

Eine neue Software OpenAirClim (Völk et al., 2023) wird derzeit auf der Grundlage steigender Anforderungen an die erforderlichen Funktionalitäten und die Benutzerfreundlichkeit des nichtlinearen Klimareaktionsmodells AirClim (Grewe und Stenke, 2008, Dahlmann et al. 2016) entwickelt. Mit dem Chemie-Klimamodell EMAC wurden zahlreiche Chemie-Klimamodell-Simulationen durchgeführt, um Ozon- und CH_4-Reaktionen für etwa 300 Emissionsorte zu erhalten. Die Abbildung auf der rechten Seite zeigt die jährlichen zonalen mittleren Ozonveränderungen für die verschiedenen Emissionsorte. Wir können deutlich sehen, dass sich die Ozonreaktionen je nach Emissionsort ändern. Diese Ergebnisse werden kombiniert und in das OpenAirClim-Modell als neue Reaktionsfunktion integriert. Die OpenAirClim Version 2.8.3 wurde 2024 erfolgreich als Open Source Software Framework veröffentlicht (Völk et al., 2024).

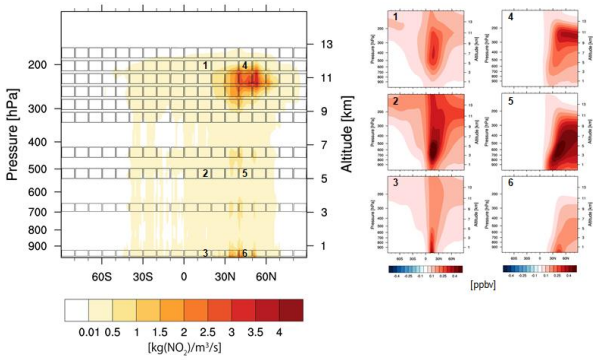


Abbildung 1 (links) Lage der idealisierten Emissionsregionen, in die vereinheitlichte NO_x-Emissionen importiert werden. Die NO_x-Emissionen des Luftverkehrs des CCMI2 (2014) sind unterlegt (Konturen). (rechts) Jährlich-zonale mittlere Ozonveränderungen, die durch bestimmte Emissionsregionen verursacht werden.

Emissionen einer potentiellen Hyperschallflotte und deren Wirkung auf die Ozonschicht und das Klima

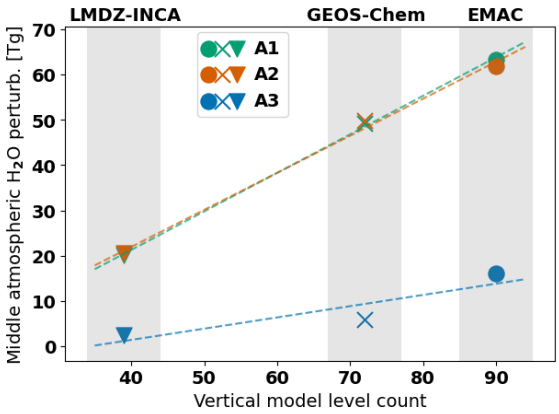
In Pletzer und Grewe (2024, publiziert) werden eine Vielzahl von Sensitivitäten bezüglich des Emissionsortes (geografische Breite und Höhe) analysiert. Folgesimulationen, die die inter-annuale Variabilität und den Spurengas-Transport genauer analysieren werden jetzt zum Ende des Jahres durchgeführt. Damit und mit Pletzer et al., (2022) und Pletzer und Grewe (2024) werden drei wichtige Fragestellungen der Klimawirkung des Hyperschall-Luftverkehrs abgedeckt sein.

Zusätzlich wurde ein vereinfachtes Tool auf Basis der Sensitivitäten entwickelt um eine Klimawirkungsanalyse im Flugzeugdesign integrieren zu können und damit dessen Optimierung zu ermöglichen. Dieses Tool steht

mittlerweile auf ZENODO unter der Apache2.0 Lizenz zur Verfügung. Das Tool wurde von einer Evaluation auf Trajektorien-Ebene mit der Option Flotten-Ebene erweitert.

Modelvergleich zu den atmosphärischen Zustandsänderungen von zukünftigen Überschallflugzeugen

Der größte Modelvergleich zum Thema Überschallemissionen seit 2007 zielt darauf ab Unsicherheiten von Treibhausgaus-Änderungen zu reduzieren. Zum Einen wird in der eingereichten Publikation gezeigt, dass die Ozon-Änderung in den Modellen deutlich konsistenter ist und die Unsicherheiten reduziert werden konnten. Zum Anderen werden für Wasserdampf-Änderungen die Ursachen der Unsicherheiten identifiziert, i.e. die



starke Abhängigkeit von der vertikalen Auflösung als auch der Umgang mit Wasserdampf-Änderungen in der Troposphäre. Um letzteres zu adressieren finden aktuell eine Fortentwicklung der H2OEMIS Submodels statt, um troposphärische Wasserdampf-Verlustprozesse mit minimalem Rauschen mit Überschall-Emissionen zu

Abbildung 1 Stratosphärische Wasserdampf-Störung aufgetragen gegen die vertikale Anzahl der jeweiligen Model-Level der Modelle LMDZ-INCA, GEOs-Chem und EMAC. Der lineare Zusammenhang innerhalb der Szenarien A1, A2 und A3 ist klar erkennbar.

kombinieren. Am DKRZ wurden die EMAC-Simulationsläufe für den Modelvergleich und die zugehörige Analyse durchgeführt. Diese wurden um einige Jahre verlängert, um die statistische Signifikanz, speziell in der oberen Modeldomäne, zu erhöhen, die aufgrund einer realistischeren („freie“ Meteorologie) inklusive einer erhöhten atmosphärischen Variabilität zu gering war. Auch diese Erkenntnisse, dass eine „freie“ Meteorologie Effekte zweiter Ordnung verursacht, sind in die Publikation Van `t Hoff (2024) eingeflossen und wird auf europäischer Ebene weitere Model-Entwicklungen anstoßen. Eine der klimatechnisch wichtigsten Ergebnisse der Publikation ist, dass eine Reduktion der Reiseflughöhe das mit großer Wahrscheinlichkeit größte Potential hat die Klimawirkung von Überschall-Luftverkehr zu reduzieren.

Referenzen (publiziert und in Planung)

Castino, F., Yin, F., Grewe, V., Yamashita, H., Matthes, et al..: Decision-making strategies implemented in SolFinder 1.0 to identify eco-efficient aircraft trajectories: application study in AirTraf 3.0, Geosci. Model Dev., 17, 4031–4052, https://doi.org/10.5194/gmd-17-4031-2024, 2024.

Cohen, Y., Hauglustaine, D., Bellouin, N., Lund, M. T., Matthes, S., Skowron, A., Thor, R., et al.: Multi-model assessment of climatologies in the upper troposphere–lower stratosphere using the IAGOS data, EGUsphere [preprint], https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2208, 2024.

Dahlmann, K., Grewe, V., Frömming, C., Burkhardt, U., Can we reliably assess climate mitigation options for air traffic scenarios despite large uncertainties in atmospheric processes?, Trans. Res. Part D, 46, 40-55, doi:10.1016/j.trd.2016.03.006, 2016.

Dietmüller, S., Matthes, S., Dahlmann, K., Yamashita, H., Simorgh, A, Soler, M., Linke, F., Lührs, B., Meuser M.M. Weder, C., Grewe, V., et al., A python library for computing individual and merged non-CO_2 algorithmic climate change functions: CLIMaCCF V1.0, Geosci. Model Dev., 2023.

Grewe, V. and A. Stenke, AirClim: an efficient climate impact assessment tool, Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 4621 - 4639, 2008.

Matthes, S., Nickl, A., Peter, P., Mertens, M., Jöckel, P., Ziereis, H., Harlaß, T. and Zahn, A., Aviation-induced changes of atmospheric composition in the UTLS in the multi-scale Earth system model MECO(1), EGU, Wien, 23-28 Apr 2023, 15843, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15843.

Pletzer, J., Hauglustaine, D., Cohen, Y., Jöckel, P., and Grewe, V., The Climate Impact of Hydrogen Powered Hypersonic Transport, ACP, https://doi.org/10.5194/acp-22-14323-2022, 2022.

Pletzer, J. and Grewe, V.: Sensitivities of atmospheric composition and climate to altitude and latitude of hypersonic aircraft emissions, Atmos. Chem. Phys., 24, 1743–1775, https://doi.org/10.5194/acp-24-1743-2024, 2024.

Pletzer, J. and Grewe, V. rf-of-hypersonic-trajectories, https://zenodo.org/records/8422189, GitHub repo, 2023.

van 't Hoff, J. A., Hauglustaine, D., Pletzer, J., Skowron, A., Grewe, V., Matthes, S., Meuser, M. M., Thor, R. N., and Dedoussi, I. C.: Intermodel comparison of the atmospheric composition changes due to emissions from a future supersonic aircraft fleet, EGUsphere [preprint], https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2866, 2024.

Völk, S., Yamashita, H., Megill, L., Dahlmann, K., & Grewe, V. (2024). OpenAirClim (v2.8.3). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13682729; on Github https://github.com/dlr-pa/oac

Völk, S., Yamashita, H., Megill, L., Matthes, S., Dahlmann, K., Grewe, V., OpenAirClim - A framework for the computation of air traffic climate impact based on response modeling, The 4th ECATS International Conference, 2023.

Yin, F., Grewe, V., Castino, F., Rao, P., Matthes, S., Dahlmann, K., Dietmüller, S., Frömming, C., Yamashita, H., Peter, P., Klingaman, E., Shine, K. P., Lührs, B., and Linke, F.: Predicting the climate impact of aviation for en-route emissions: the algorithmic climate change function submodel ACCF 1.0 of EMAC 2.53, Geosci. Model Dev., 16, 3313–3334, https://doi.org/10.5194/gmd-16-3313-2023, 2023.