

Project: **1022**

Project title: **The middle atmosphere in a changing climate - MACClim**

Principal investigator: **Hella Garny**

Report period: **2023-01-01 to 2023-12-31**

Im Projekt MACClim (bd1022) wurden bis Dato (23.10.2023) ca. 8000 node-h Rechenzeit von insgesamt bewilligten 9374 node-h des Jahres 2023 verbraucht (bewilligt inkl. Nachantrag und allgemeiner Aufstockung zum 1.7.2023). Neben Auswertungen bestehender Simulationen (Punkt 4 im Antrag 2022; erschienene Publikationen Walz et al., 2023 und Hufnagel et al., 2023) wurde die Rechenzeit für idealisierte Simulationen der Zirkulation verwendet (Punkt 1), für Simulationen zur Neuentwicklung einer Schwerewellenparameterisierung mit horizontaler Umverteilung (Punkt 2&3), und für Simulationen der Zirkulation der Mesosphäre und unteren Thermosphäre mit UA-ICON (Punkt 5).

1 Idealisiertes Modell (Masterarbeiten)

Das trocken-dynamische Modell EMIL (ECHAM5/MESSy Idealized Model, Garny et al., 2020) wurde in den vergangenen Jahren eingesetzt für mechanistische Studien zur atmosphärischen Dynamik unter verschiedenen Rotationsraten. Diese Studien mündeten in zwei abgeschlossenen Masterarbeiten von Anna Götz (LMU, März 2022 – Mai 2023) und Martin Okanik (Uni Utrecht, März 2023- August 2023). In der Arbeit von Frau Götz wurden Zirkulationsregime für langsam rotierende Planeten untersucht (Zusammenfassung im Folgenden in Englischer Sprache):

„The regimes of atmospheric general circulation patterns in Earth-like atmospheres are investigated by varying the planetary rotation rate and radiative- equilibrium temperature profile using the dry dynamical core model setup EMIL, updated for terrestrial planets, containing a Newtonian cooling scheme. These regimes have been found to encompass: (1) a quasi-axisymmetric & barotropic cyclostrophic regime characterised by pronounced superrotation and strong, hemispheric Hadley cells that effectively transport heat poleward at rotation rates below the onset of dominant baroclinic instabilities and (2+3) two multi-cellular, geostrophic baroclinic flow regimes featuring regular or irregular waves with high eddy activity at higher rotation rates, as well as (4) a weak flow regime consisting of weak versions of the other three regimes with reduced eddy activity and weaker meridional cells at low-temperature gradients. These regimes are classified quantitatively by introducing several global indices validated by a k-means clustering approach via their characteristics derived from quantifications of the Lorenz Energy Cycle and wave characteristics (see Fig. 1).“

In der Arbeit von Martin Okanik wurde die Arbeit von Anna Götz erweitert um die Betrachtung der Zirkulation der Stratosphäre auf langsam rotierenden Planeten (Zusammenfassung in Englischer Sprache):

„This work aims to extend previous work by identifying circulation regimes for layers above the troposphere. The research question is what happens to a stratosphere with a constant radiative forcing similar to a solstice on Earth, when the relative planetary rotation rate is lowered. The results indicate a regime transition from a wave-driven circulation for the Earth-like rotation rate to a non-linear regime at rotation rates less than 1/10 of Earth's, with a stronger, radiatively driven Hadley-like cell in the stratosphere. This overturning is an inherently seasonal effect developing because of the downwelling present over the winter pole, and likely enhanced to some extent because of the warmth of the ozone layer in lower latitudes. It is centered around 30 hPa in winter mid-latitudes, and extends all the way to mid-latitudes of the summer hemisphere. A somewhat surprising result is the emergence of superrotation in the stratosphere, separate from the better-known superrotation region near tropopause. This result is less understood, it is hypothesised to be a result of gravity-wave breaking in the upper summer stratosphere, with angular momentum potentially advected across the equator by the Hadley-like cell.“

2 Einfluss sub-grid skaliger Orographie auf die Dynamik der Stratosphäre & 3 Einfluss von Schwerewellen auf die südhemisphärische Zirkulation (ROMIC-WASCLIM)

Die Arbeiten im Rahmen des BMBF Projekts ROMIC-WASCLIM wurden im Jahr 2023 fertig gestellt, und die Resultate sind in GMD als Highlight Artikel erschienen (Eichinger et al., 2023). Mit dieser Arbeit konnte erstmals mit einer vereinfachten Parameterisierung die laterale Propagation von Schwerewellen berücksichtigt werden. In diesem Projekt ist im Jahr 2023 ein geringerer Rechenzeit Aufwand als geplant angefallen, da ein Großteil der Simulationen bereits im Jahr 2022 fertig gestellt werden konnte, Die Rechenzeit wurde dafür für das im Halbjahr neu beantragte Themenfeld (siehe 5.) verwendet.

5 Simulation der Zirkulation der Mesosphären/unteren Thermosphäre mit UA-ICON

Im ersten Quartal des Jahres 2023 hat sich für die Arbeitsgruppe ein neues Themengebiet ergeben, die Simulation der Variabilität und Vorhersagbarkeit der Zirkulation der Mesosphäre. Dieses Themengebiet ist eine Kooperation zwischen dem DLR-Institut für Physik der Atmosphäre (Hella Garny, Matthias Nützel) und dem IAP in Kühlungsborn (Markus Kunze). Dazu werden derzeit Projektanträge vorbereitet, und erste vorbereitende Simulationen mit dem Mittel-Atmosphären Modell UA-ICON (Borchert et al., 2019) wurden im 2. Halbjahr 2023 durchgeführt. Erste Simulationen wurden für die südhemisphärischen Wintermonate (August - Oktober) durchgeführt. Diese Episode wurde ausgewählt wegen der geringeren Variabilität gegenüber dem Nordwinter. Der Fokus lag auf einem Vergleich von Simulationen mit einer groben Auflösung (R2B4, ca. 160 km Auflösung) und einer höheren Auflösung, die einen Teil des Spektrums von Schwerewellen explizit auflöst (R2B7, ca. 20 km). Dafür wurden Simulationen in beiden Auflösungen initialisiert mit IFS Daten am 13. August 2015, und bis Ende Oktober frei laufen gelassen. Das „Tuning“ der Schwerewellenparameterisierung wurde in Kooperation mit dem IAP Kühlungsborn getestet. Der mittlere Zonalwind um 60°S ist in Fig. 2 dargestellt für die zwei Modellversionen. Während der polare Vortex in der Stratosphäre sehr ähnlich ist in Simulationen der beiden Auflösungen, gibt es klare und signifikante Unterschiede in Höhen um 80-100km. Aus vorherigen Studien ist bekannt, dass grob aufgelöste Modelle mit parameterisierten Schwerewellen in dieser

Region Ostwind simulieren, während basierend auf Temperatur Beobachtungen in dieser Region Westwinde berechnet werden (z.B. Harvey et al, 2022). Die UA-ICON Simulationen zeigen, dass dieser Bias in der höher aufgelösten Simulationen (R2B7) behoben ist, und weitergehende Analysen zeigen dass aufgelöste Schwerewellen einen entscheidenden Beitrag zum Impulsbudget in dieser Region leisten. Dies kommt mutmaßlich durch im Model aufgelösten Prozesse zustande, in in den Paramterisierungen vernachlässigt werden, insbesondere Anregung von Schwerewellen in der Stratosphäre / Mesosphäre durch sekundäre Wellenanregung (Becker and Vadas, 2018) oder Anregung am Polarwirbel (Becker et al, 2022).

Neben den Simulationen zum mittleren Zustand der Mesosphäre/ unteren Thermosphäre wurden erste Simulationen durchgeführt um die Vorhersagbarkeit dieser Region zu untersuchen. Dazu wurden von einem initialen Tag im August gestörte Ensemble Simulationen gestartet (3 member für R2B7, 5 member für R2B4). Die Störung wurde mit der „random fiel perturbation“ Methode nach Magnusson et al (2009) jeweils aus Feldern der Referenzsimulation erzeugt. Der Wachstum in der totalen „perturbation Energy“ (siehe Magnusson et al, 2009) auf 80 km Höhe ist in Fig. 3 gezeigt: In diesen Höhen wächst die anfängliche Störung schnell an, und saturiert in der R2B7 Simulation nach bereits ca. 5- 10 Tagen. Die Fehlerwachstumsraten (rechte y-Achse) haben eine e-folding Zeitskala von nur etwas mehr als 1 Tag (zum Vergleich: in der Troposphäre etwas über 4 Tage). Eine Frage die mit den Simulationen getestet werden sollte war, inwiefern die explizite Simulation von Schwerewellen den Fehlerwachstum beeinflusst. In der Tat wächst die Störungs-energie in den Simulationen mit größerer Auflösung (R2B4) wesentlich langsamer und linearer an, mit einer über 3mal längeren e-folding Zeitskala von 3.6 Tagen.

Die ersten Ergebnisse mit UA-ICON unterstreichen somit, dass sowohl für die Simulation des mittleren Zustands der mittleren Atmosphäre, als auch deren Vorhersagbarkeit hoch-auflösende Simulationen essentiell sind. Die Arbeiten sollen im nächsten Jahr auf größere ensemble für verschiedene initial Bedingungen ausgeweitet werden (s. Antrag).

Abschlussarbeiten und in 2023 erschienene Publikationen

Masterarbeit von Anna Götz: “Quantitative Classification of Atmospheric Circulation Regimes of Terrestrial Planets”, Mai 2023 an der Ludwig-Maximilians Universität München (LMU).

Masterarbeit von Martin Okanik: “Stratospheric dynamics of slowly rotating terrestrial planets”, August 2023, Utrecht University

Eichinger, R., Rhode, S., Garny, H., Preusse, P., Pisoft, P., Kuchař, A., Jöckel, P., Kerkweg, A., and Kern, B.: Emulating lateral gravity wave propagation in a global chemistry–climate model (EMAC v2.55.2) through horizontal flux redistribution, *Geosci. Model Dev.*, 16, 5561–5583, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5561-2023>, 2023.

Hufnagl, L., R. Eichinger, H. Garny, T. Birner, A. Kuchař, P. Jöckel, P. Graf, 2023, Stratospheric Ozone Changes damp the CO₂-induced Acceleration of the Brewer-Dobson Circulation, *J. Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0512.1>, 1–36.

Walz, R., H. Garny, T. Birner, 2023, Stratospheric modulation of tropical upper-tropospheric warming-induced circulation changes in an idealized general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 80, 611–631, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0232.1>.

Sonstige Referenzen:

Garny, H., Walz, R., Nützel, M., and Birner, T.: Extending the Modular Earth Submodel System (MESSy v2.54) model hierarchy: the ECHAM/MESSy Idealized (EMIL) model setup, *Geosci. Model Dev.*, 13, 5229–5257, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5229-2020>, 2020.

Borchert, S., Zhou, G., Baldauf, M., Schmidt, H., Zängl, G., and Reinert, D.: The upper-atmosphere extension of the ICON general circulation model (version: ua-icon-1.0), *Geosci. Model Dev.*, 12, 3541–3569, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3541-2019>, 2019.

Harvey, V. L., Pedatella, N. M., Becker, E., and Randall, C. E. (2022). Evaluation of polar winter mesopause wind in WACCMX+DART. *J. Geophys. Res. Atmos.* 127, e2022JD037063. doi:10.1029/2022JD037063

Becker, E., and Vadas, S. L. (2018). Secondary gravity waves in the winter mesosphere: Results from a high-resolution global circulation model. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 2605–2627. doi:10.1002/2017JD027460

Becker, E., Vadas, S. L., Bossert, K., Harvey, V. L., Zülicke, C., & Hoffmann, L. (2022). A high-resolution whole-atmosphere model with resolved gravity waves and specified large-scale dynamics in the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(2).

Magnusson, L., Jonas Nycander & Erland Källén (2009) Flow-dependent versus flow-independent initial perturbations for ensemble prediction, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61:2, 194-209, DOI: [10.1111/j.1600-0870.2008.00385.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00385.x)

Zonal mean zonal wind (55–65°S)
Mean mid-August to late September

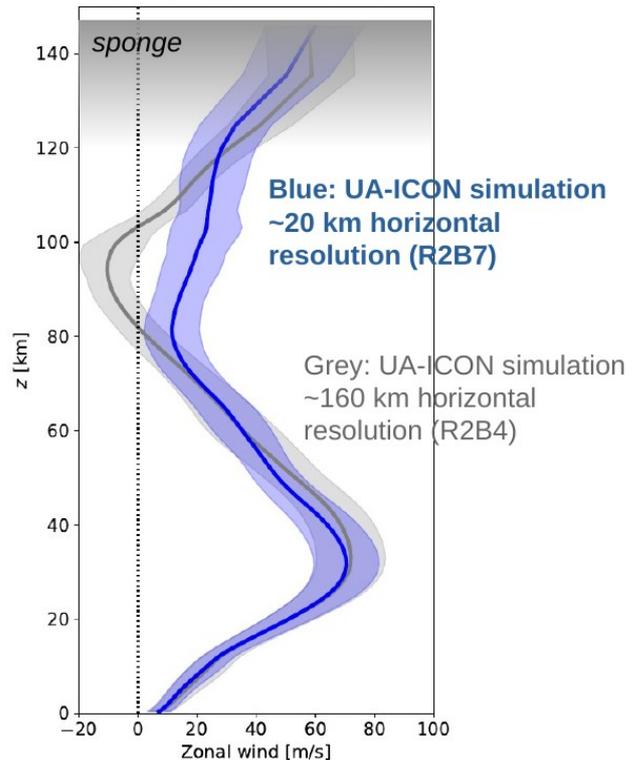


Figure 1: Zonal mean zonal wind averaged from mid-August to end of September 2015 for UA-ICON simulations with R2B7 resolution (blue) and R2B4 resolution (grey). Shading denotes standard deviations based on 6-hourly data.