



# Towards Modeling Climate Effects of Energetic Particle Precipitation



Katharina Meraner

Hamburg 2017

## Hinweis

Die Berichte zur Erdsystemforschung werden vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg in unregelmäßiger Abfolge herausgegeben.

Sie enthalten wissenschaftliche und technische Beiträge, inklusive Dissertationen.

Die Beiträge geben nicht notwendigerweise die Auffassung des Instituts wieder.

Die "Berichte zur Erdsystemforschung" führen die vorherigen Reihen "Reports" und "Examensarbeiten" weiter.

## Anschrift / Address

Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Bundesstrasse 53  
20146 Hamburg  
Deutschland

Tel./Phone: +49 (0)40 4 11 73 - 0

Fax: +49 (0)40 4 11 73 - 298

name.surname@mpimet.mpg.de

www.mpimet.mpg.de

## Notice

The Reports on Earth System Science are published by the Max Planck Institute for Meteorology in Hamburg. They appear in irregular intervals.

They contain scientific and technical contributions, including Ph. D. theses.

The Reports do not necessarily reflect the opinion of the Institute.

The "Reports on Earth System Science" continue the former "Reports" and "Examensarbeiten" of the Max Planck Institute.

## Layout

Bettina Diallo and Norbert P. Noreiks  
Communication

## Copyright

Photos below: ©MPI-M

Photos on the back from left to right:  
Christian Klepp, Jochem Marotzke,  
Christian Klepp, Clotilde Dubois,  
Christian Klepp, Katsumasa Tanaka



# Towards Modeling Climate Effects of Energetic Particle Precipitation



Dissertation with the aim of achieving a doctoral degree  
at the Faculty of Mathematics, Informatics and Natural Sciences  
Department of Earth Sciences of Universität Hamburg  
submitted by

Katharina Meraner

Hamburg 2017

Katharina Meraner

Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Bundesstrasse 53  
20146 Hamburg

Tag der Disputation: 30.01.2017

Folgende Gutachter empfehlen die Annahme der Dissertation:

Prof. Dr. Stefan Bühler  
Dr. Hauke Schmidt





## Abstract

Energetic particles enter Earth's atmosphere at the poles. The charged particles are either from solar or magnetospheric origin and alter the chemistry of the middle and upper atmosphere. Most importantly, they enhance the production of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) and hydrogen oxides ( $\text{HO}_x$ ) in the winter mesosphere and lower thermosphere. Both components are powerful ozone destroyers. The impact of  $\text{HO}_x$  on ozone is limited to the mesosphere, because  $\text{HO}_x$  has a short chemical lifetime (up to hours). In contrast,  $\text{NO}_x$  can persist up to several months in the winter polar middle atmosphere and can be transported downward to the stratosphere. Models covering the middle and upper atmosphere underestimate this downward transport. This may lead to an underestimation of potential climate effects from energetic particle precipitation.

This thesis investigates the polar winter transport from the lower thermosphere to the stratosphere. Several observational studies confirmed the downward transport (e.g., Randall et al. 2009; Semeniuk et al. 2005). However, it remains unclear which processes cause the transport from the lower thermosphere to the mesosphere. This thesis quantifies, for the first time, the contribution of advection, eddy diffusion and molecular diffusion for the transport through the mesopause. Advection and molecular diffusion dominate the transport through the mesopause. Eddy diffusion has a negligible impact on the transport. However, if eddy diffusion is enhanced as suggested by observations, it can significantly contribute to the transport. This leaves advection being responsible for the underestimation of the downward transport. Gravity waves are the key driver for the advective downwelling in the polar winter mesosphere. This thesis shows that weakening gravity waves enhances the mesospheric transport bringing it close to satellite observations. The altitude of the mesospheric momentum deposition is identified to be key for the polar downwelling.

In addition to the analysis of the winter polar downward transport, climate effects of energetic particles are studied. Energetic particle precipitation reduces significantly ozone in the mesosphere and stratosphere. An ozone loss potentially influences the atmospheric temperature and the strength of the polar vortex. It has been shown that large variations in the polar vortex strength can propagate from the stratosphere down to the surface and force the surface temperature (Baldwin and Dunkerton 2001). This thesis presents the climate impact of a mesospheric and of a stratospheric ozone loss. No statistically significant changes in atmospheric winds are found neither for a mesospheric ozone loss nor for a stratospheric ozone loss. Hence, the influence of energetic particles is too weak to force significant changes in the surface temperature.

---

In summary, this thesis advances the understanding of energetic particle precipitation. Processes relevant for the winter polar downward transport from the lower thermosphere to the stratosphere are identified. Two novel findings are the importance of advection in the thermosphere and the impact of weaker gravity waves on the dynamics of the middle and upper atmosphere. Based on this thesis, large climate effects of energetic particles seem unlikely.



## Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht in den ersten beiden Kapiteln den Transport von Stickstoffoxiden, die durch energetische Partikel gebildet werden. Im dritten Teil wird auf ihre Auswirkungen auf das Klima eingegangen.

Energetische Partikel, welche entweder von der Sonne oder von der Magnetosphäre der Erde kommen und über den Polen in die Erdatmosphäre eindringen, verändern die Chemie der mittleren und oberen Atmosphäre. Eine bekannte Folge davon sind die Polarlichter. Außerdem steigern sie die Produktion von Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und Wasserstoffoxiden ( $\text{HO}_x$ ) in der polaren Wintermesosphäre und -thermosphäre. Beide Gasverbindungen sind wirksame Faktoren für den Ozonabbau. Der Einfluss von  $\text{HO}_x$  auf Ozon ist auf die Mesosphäre beschränkt, da seine Lebensdauer nur wenige Stunden beträgt,  $\text{NO}_x$  hingegen kann sich auch mehrere Monate halten. Während der Polarnacht kann  $\text{NO}_x$  daher von der unteren Thermosphäre in die Stratosphäre transportiert werden. Dieser Transport ist jedoch in den globalen Zirkulationsmodellen zu schwach.

In dieser Dissertation wird der Transport von Stickstoffoxiden, ausgelöst von energetischen Partikeln, von der polaren, unteren Thermosphäre in die polare Stratosphäre untersucht, der schon in mehreren früheren Beobachtungen festgestellt wurde (Randall u. a. 2009; Semeniuk u. a. 2005). Bisher noch nicht gelöst waren jene Prozesse, die den Transport von der unteren Thermosphäre in die Mesosphäre bewirken. In dieser Dissertation konnte quantifiziert werden, welchen Beitrag Advektion, molekulare Diffusion und turbulente Diffusion zum Transport beitragen. Advektion und molekulare Diffusion dominieren den Transport durch die Mesopause. Der Einfluss der turbulenten Diffusion ist meist vernachlässigbar. Wenn jedoch die turbulente Diffusion, wie von Beobachtungen angedeutet, stärker ist, dann kann diese den Transport durch die Mesopause erheblich beeinflussen.

In dieser Dissertation wird gezeigt, dass die Defizite bezüglich des Abwärtstransportes in den Modellen vor allem auf einen zu geringen advektiven Transport zurückzuführen sind. Der advektive Transport in der Mesosphäre wird von Schwerewellen gesteuert, geringere Schwerewellen verstärken den Transport, so dass dieser mit den Beobachtungen stärker übereinstimmt. Die Ergebnisse belegen außerdem, dass es für den polaren Abwärtstransport entscheidend ist, in welcher Höhe in der Mesosphäre die Impulsdeposition erfolgt.

Im dritten Teil wurden die Auswirkungen der energetischen Partikel auf das Klima untersucht. Diese können signifikant zum Ozonabbau in der Mesosphäre und in der

---

Stratosphäre beitragen. Ein Ozonabbau wiederum verändert die stratosphärische Temperatur und die Stärke des Polarwirbels. Verschiedene Studien zeigten, dass große Veränderungen in der Stärke des Polarwirbels sich bis in die Troposphäre auswirken und dort die Oberflächentemperatur beeinflussen (Baldwin und Dunkerton 2001). Bei der Untersuchung des mesosphärischen und des stratosphärischen Ozonverlusts wurden keine statistisch signifikanten Veränderungen bezüglich der Stärke des Polarwirbels gefunden, weder für einen mesosphärischen noch für einen stratosphärischen Ozonverlust. Daher lässt sich folgern, dass der Einfluss der energetischen Partikel zu schwach ist, um die Oberflächentemperatur entscheidend zu beeinflussen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die vorliegende Dissertation neue Erkenntnisse über die Bedeutung von energetischen Partikeln vorlegt, indem sie relevante Prozesse für den polaren Abwärtstransport von der unteren Thermosphäre in die Stratosphäre beschreibt. Dabei sind vor allem die Bedeutung der Advektion für den Transport in der unteren Thermosphäre und der Einfluss von geringeren Schwerewellen auf die Dynamik der mittleren und oberen Atmosphäre herausgearbeitet worden. Die Ergebnisse dieser Dissertation lassen erhebliche Auswirkungen von energetischen Partikeln auf das Klima als unwahrscheinlich erscheinen.