

Diss. ETH No. 23237

Dimming Over the Oceans: Modeling Studies of the Role of Anthropogenic Aerosols in the Climate System

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
TANJA NINA DALLAFIOR
MSc Environmental Sciences, ETH Zurich
born on 29th May 1987
citizen of Switzerland and Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. M. Wild, examiner
Prof. Dr. R. Knutti, co-examiner
Dr. D. Folini, co-examiner
Prof. Dr. A. Ekman, co-examiner

2016

Abstract

Anthropogenic aerosols have compensated some of the warming induced by well-mixed greenhouse gases (WMGHG), a situation, which has coined the term "Faustian Aerosol Bargain". There are, however, still large uncertainties concerning the magnitude of the anthropogenic aerosol forcing within the climate system and the responses thereof. Thus, the consequences of reduced aerosol emissions for future climate projections are uncertain. The present PhD thesis aims at quantifying modeled changes in surface solar radiation (SSR) over oceans due to anthropogenic aerosols during the 20th century and analyses surface temperature responses towards anthropogenic aerosol dimming with emphasis on sea surface temperatures (SSTs).

We conduct single and multiple forcing experiments with general circulation models of the ECHAM family - atmosphere only, mixed-layer ocean (MLO) equilibria, fully couple transient experiments - with different complexity of aerosol treatment, either prescribed time-varying aerosol optical depth (AOD) or the fully interactive Hamburg Aerosol Module, HAM. The atmosphere only and MLO experiments include HAM, while the fully coupled experiments were conducted with prescribed time-varying AOD.

As derived from atmosphere only experiments with prescribed SSTs and HAM, anthropogenic aerosol dimming averaged over oceans for the 1990s relative to the control run without anthropogenic aerosols is weaker for clear-sky SSR (-2.3 W m^{-2}) than for all-sky SSR (4.5 W m^{-2}). The fraction of ocean surfaces experiencing a dimming larger than -4 W m^{-2} is 9.4% and 15.4% for clear-sky and all-sky SSR, respectively. Clear-sky anthropogenic aerosols dimming occurs in plumes extending from their continental source regions and shows seasonality. All-sky SSR dimming can also occur in regions far from the anthropogenic aerosol plumes, e.g., the North Pacific.

The basic hypothesis is that regions, which experience strong anthropogenic aerosol dimming, also show strong SST cooling if no other forcings are applied. This hypothesis generally holds true for the low-latitude plume regions, for instance over the Indian Ocean or the Tropical Atlantic. However, even there, much of the dimming signal is masked by various

feedback mechanisms. The most prominent feedback mechanisms in our modeling framework include the water vapor feedback and polar amplification, which are seen in all experiments (aerosol only, greenhouse gas only, and all forcings). Water vapor feedback is evident in clear-sky SSR changes, which show dimming if surface temperatures warm and consequently column water vapor increases. In higher latitudes, all-sky SSR shows strong dimming also in the greenhouse gas only experiments so that high-latitude dimming is unlikely related to anthropogenic aerosols, but rather to polar amplification.

Linear additivity with respect to the surface temperature response of single forcing experiments is contradictory for the MLO and fully coupled experiments: Global mean (land and ocean) surface temperature responses are additive in the fully coupled experiments, but not in the MLO experiments. Furthermore, surface temperature response patterns of the all forcing experiments are more strongly correlated with the aerosol only case than with the greenhouse gas only case for the MLO set-up. The opposite is the case for the fully coupled set-up. Note however that the global mean temperature response towards anthropogenic aerosols in the transient case are rather low, which favors additivity.

In the MLO experiments, the year 2000 equilibrium is 0.6 K warmer than the year 1870 equilibrium. The corresponding warming in the fully coupled experiments amounts to 0.9 K (year 1996-2005 mean vs. 1850s mean), which is reasonable compared to observed warming over the 20th century. Comparison of the surface temperature responses in the MLO and fully coupled experiments yields roughly similar responses for the greenhouse gas only case (1.4 K and 1.2 K for the transient case), while the aerosol only case experiences a much stronger reduction in temperature response (from -1.4 K to -0.2 K).

The different surface temperature responses in the MLO and fully coupled set-up imply that beyond going from equilibrium to transient experiments, aerosol representation is likely particularly relevant for surface temperature responses in the present modeling framework. Furthermore, using single forcing experiments for detection and attribution studies has to be done with caution. Also note that outside anthropogenic aerosol plume regions, clear-sky SSR changes appear to be more affected by changes in column water vapor due to surface temperature changes than AOD changes due to anthropogenic aerosols.

Zusammenfassung

Anthropogene Aerosole spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem. Es ist bekannt, dass diese Aerosole einen Teil der durch den vermehrten Ausstoss von Treibhausgasen verursachten Klimaerwärmung kompensiert haben. Aus diesem Sachverhalt ist der Begriff "Faust'scher Aerosol-Pakt" entstanden. Es bestehen allerdings immer noch grosse Unsicherheiten bezüglich der Auswirkungen von anthropogenen Aerosolen auf das Klimasystem und dessen Reaktion darauf. Deshalb sind auch die Folgen einer Reduktion der Aerosolemissionen in der Zukunft ungewiss. Die vorliegende Dissertation hat zum Ziel, modellierte aerosolbedingte Veränderungen in der Sonneneinstrahlung über Ozeanoberflächen im Verlaufe des 20. Jahrhunderts zu quantifizieren und zu analysieren, wie Oberflächentemperaturen und insbesondere Meerestemperaturen darauf reagiert haben.

Wir führen verschiedene Simulationen durch, in welchen entweder nur anthropogene Aerosole oder nur Treibhausgase ("single forcing") oder beide Klimaantriebe variieren. Dazu verwenden wir die Klimamodellfamilie ECHAM in unterschiedlichen Konfigurationen: Nur die Atmosphärenkomponente mit vorgeschriebenen Meeresoberflächentemperaturen, die Atmosphärenkomponente mit einem Mischungsschichtozean (Mixed-layer ocean) oder das gekoppelte Modell mit einem voll aufgelösten Ozean. Diese Modellkonfigurationen sind mit unterschiedlichen Aerosolrepräsentationen kombiniert, entweder mit dem interaktiven Hamburg Aerosol Modul (HAM) oder mit vorgeschriebenen zeit- und raumvariierenden optischen Dichten. Die Konfigurationen, welche nur die Atmosphärenkomponente und entweder vorgeschriebene Meeresoberflächentemperaturen oder einen Mixed-layer ocean enthalten, werden mit HAM integriert, während beim voll aufgelösten Ozean optische Dichten für Aerosole vorgeschrieben sind.

Wenn Wolken nicht mit einbezogen werden (clear-sky Bedingungen), weisen die Experimente mit HAM und vorgeschriebenen Meeresoberflächentemperaturen eine Reduktion der Sonneneinstrahlung über Meeresoberflächen (1990er Jahre Mittel relativ zu 1870er Jahre) von -2.3 W m^{-2} auf. Werden Wolken auch mit einbezogen (all-sky Bedingungen), beträgt diese Reduktion -4.5 W m^{-2} . Unter clear-sky Bedingungen sind in den 1990er Jahren im Schnitt 9.4% der Meeresoberflächen von einer Reduktion der Sonneneinstrahlung von über

-4 W m^{-2} im Vergleich zum Mittel der 1870er Jahre betroffen. Unter all-sky Bedingungen wächst dieser Anteil auf 15.4% an. Anthropogene Aerosole breiten sich in Schadstoffwolken von ihrem Ursprung aus, welche auch in den Änderungsmustern der clear-sky Sonneneinstrahlung erkennbar sind. Diese Aerosolsignale in der Sonneneinstrahlung weisen klare Saisonalität auf. Unter all-sky Bedingungen sind Änderungen der Sonneneinstrahlung auch ausserhalb dieser Schadstoffwolken erkennbar, zum Beispiel über dem Nordpazifik.

Eine Hypothese dieser Arbeit ist, dass Regionen, welche starke Reduktion der Sonneneinstrahlung durch anthropogene Aerosole erfahren, reduzierte Meeresoberflächentemperaturen aufweisen, wenn keine anderen Klimaantriebe vorhanden sind. Diese Hypothese wird generell in denjenigen Regionen der tieferen Breiten bestätigt, wo sich Aerosolwolken ausbreiten, zum Beispiel über dem indischen Ozean oder dem tropischen Atlantik. Trotzdem ist die Temperaturreduktion nicht so stark, wie sie sein könnte, wenn kein Energietransport in Atmosphäre und Ozean geschehen würde. Das heisst, ein Teil dieses Effekts wird durch verschiedene Rückkopplungseffekte (Feedbacks) verdeckt. Der Wasserdampfeffekt und polare Amplifikation sind die am deutlichsten erkennbaren Rückkopplungseffekte in allen Experimenten (nur Aerosole, nur Treibhausgase oder beide Antriebe). Der Wasserdampfeffekt ist auch in den Veränderungen der clear-sky Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche erkennbar: Es lässt sich eine Reduktion erkennen, wenn der atmosphärische Wasserdampfgehalt durch wärmere Oberflächentemperaturen ansteigt. Bei all-sky Bedingungen sind in der Arktis hohe Reduktionen der Sonneneinstrahlung erkennbar, auch wenn anthropogene Aerosole konstant auf dem Niveau von 1850 gehalten werden. Diese Effekte sind daher eher auf polare Amplifikation zurückzuführen.

Wenn man Resultate von Experimenten mit Mixed-layer Ocean und voll aufgelöstem Ozean vergleicht, so ergeben sich widersprüchliche Resultate: In ersteren Experimenten ist die Summe aus der Änderung der globalen Durchschnittstemperaturen in den "single forcing" Experimenten nicht gleich der Temperaturänderung im Experiment mit allen Klimaantrieben. Das Gegenteil ist der Fall für das Modell mit voll aufgelöstem Ozean. Weitere Unterschiede betreffen die räumliche Verteilung der Temperaturänderungen: Im Mixed-layer Ocean Experiment korreliert die räumliche Verteilung der Temperaturveränderung besonders stark zwischen dem Experiment mit beiden Antrieben und dem Experiment, welches nur die anthropogenen Aerosole enthält. Für die Experimente mit voll aufgelöstem Ozean gilt das nicht. Hier ist die Korrelation am höchsten mit dem Experiment, das nur Treibhausgase enthält. Es ist allerdings anzumerken, dass die Temperaturänderung aufgrund von anthropogenen Aerosolen im voll aufgelösten Experiment sehr klein ist, was die Erfüllung der Additivität begünstigt.

In den Mixed-layer Ocean Experimenten ist die Gleichgewichtstemperatur im Jahr 2000

um 0.6 K wärmer als diejenige des Jahres 1870. Beim Experiment mit voll aufgelöstem Ozean steigt die globale Temperatur um 0.9 K an (Mittel über die Jahre 1996-2005 verglichen mit dem 1850er Jahre Mittel). Diese Erwärmung scheint angemessen angesichts der beobachteten Erderwärmung über das 20. Jahrhundert. Der Vergleich zwischen den Temperaturänderungen in den Experimenten, wo nur Treibhausgase variieren zeigt, dass die Erwärmung im Mixed-layer Ocean Experiment (1.4 K) vergleichbar ist mit derjenigen im voll aufgelösten Experiment (1.2 K), während der Unterschied für die Experimente, wo nur anthropogene Aerosole variieren, wesentlich grösser ist (-1.4 K für den Mixed-layer Ocean und -0.4 K für den voll aufgelösten Ozean).

Die unterschiedlichen Temperaturänderungen im Mixed-layer Ocean und im voll aufgelösten Experiment implizieren, dass abgesehen davon, dass hier Gleichgewichtsklimata mit transienten Klimata verglichen werden, die Aerosolrepräsentation in der verwendeten Modellfamilie wahrscheinlich wichtiger ist als die Ozeanrepräsentation. Ausserdem zeigt sich, dass so-genannte "single forcing" Experimente, wie sie hier durchgeführt wurden, für die Identifikation und Zuteilung von Klimareaktionen auf bestimmte Klimaantriebe mit Vorsicht anzuwenden sind. Zusätzlich ist es bemerkenswert, dass, die clear-sky Sonneneinstrahlung an der Oberfläche ausserhalb der anthropogenen Schadstoffwolken stärker vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bestimmt scheint als von Veränderungen in der optischen Dichte der Atmosphäre durch anthropogene Aerosole.