

Der Puls der Atmosphäre – Dekadisches Auf und Ab

Klaus Dethloff, Handorf, D., Brand, S., Läuter, M.

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Sekt. Atmosphärische Zirkulationen, Klaus.Dethloff@awi.de, Doerthe.Handorf@awi.de

Polare Kältepole

Arktis und Antarktis stellen die Kältepole der atmosphärischen Zirkulation dar und beeinflussen die globale Zirkulation durch den meridionalen Gradienten der Strahlungsenergie zwischen den Polen und den Tropen. Der meereisbedeckte, arktische Ozean wird zu großen Teilen durch Landmassen eingeschlossen und ist durch eine jahreszeitlich variierende Eisdecke von 1–5 m Dicke mit der polaren Atmosphäre gekoppelt. Die arktischen Landflächen sind von Oktober bis Mai mit Schnee bedeckt. Große Landteile der Arktis entsprechen polaren Wüsten mit wenig Vegetation und sind dauerhaft gefroren. Dieser Permafrost taut nur im Sommer in einer dünnen oberen, der aktiven Schicht auf. Atmosphärische Beobachtungsdaten für die Polarregionen in der Arktis und Antarktis sind nur spärlich vorhanden, da nur einige wenige Beobachtungsstationen existieren, die mit langfristigen Daten dienen können. Deshalb stellen neben Satellitendaten u. a. die Reanalysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage brauchbare Datensätze für die Polarregionen dar, die durch die Assimilation von existierenden Beobachtungs- und Satellitendaten in ein Wettervorhersagemodell erzeugt wurden. Die arktische Winterzirkulation wird in der mittleren Troposphäre durch einen polaren Wirbel bestimmt, der mit seinem Druckminimum über Nordamerika liegt und sich bis nach Westeuropa erstreckt. Diese Druckverteilung wird durch die Topographie der Erdoberfläche, die Land-Meerverteilung und die Abstrahlung von Wärme in den Weltraum während der Polarnacht bestimmt. Der Polarwirbel schwächt sich im Sommer ab und wird stärker symmetrisch. Im Winter dominieren im Bodenluftdruck das Islandtief, das Aleutentief im nordpa-

zifischen Becken und das Sibirienhoch. Das isländische Tief und das Aleutentief werden durch den relativ warmen Ozean im Umfeld kalter Luftmassen bestimmt. Das sibirische Hoch wird im Wesentlichen durch langwellige Strahlungsabkühlung verursacht. Das Islandtief ist im Sommer deutlich schwächer als im Winter. Die auf den Meeresspiegel reduzierte Druckverteilung des Sommers zeigt den höchsten Luftdruck über Grönland, der Barents- und der Beaufortsee. Niedriger Luftdruck herrscht wieder im Islandtief, aber auch über Sibirien. Die mittlere Zirkulation des Winters wird durch großskalige planetare Wellenmuster bestimmt, die im Sommer wesentlich geringer ausgeprägt sind.

Fernverbindungsmuster

Diese globalen Muster der Luftdruck- und Temperaturverteilung haben sich in den Jahren von 1948–2009 deutlich verändert. In den Wintern trat eine signifikante Erwärmung und in den Sommern eine leichte Abkühlung auf. Die beobachtete Wintererwärmung steht im Zusammenhang mit den Änderungen der nordhemisphärischen Zirkulation und des Fernverbindungsmusters der Nordatlantischen Oszillation (NAO) oder der Arktischen Oszillation (AO). Dieses natürliche Variabilitätsmuster zeichnet sich durch großräumige Schwankungen des Luftdrucks im Bereich des Islandtiefs und des Azorenhochs aus. Eine negative Luftdruckanomalie im isländischen Raum und eine positive Luftdruckanomalie im Bereich der Azoren kennzeichnen die positive Phase der NAO, wogegen eine positive Luftdruckanomalie im Islandraum und eine negative Luftdruckanomalie im Azorenbereich für die negative Phase typisch sind. Diese Luftdruckanomalien gehen einher mit einer verstärkten zonalen Strömung über dem Nordatlantik in der positiven Phase und einer schwächeren zonalen Strömung und damit stärkeren planetaren Wellenmustern in der negativen Phase. Diese Schwankungen üben einen starken Einfluss auf das Klima Europas aus. In der positiven NAO-Phase gelangt vermehrt warme und feuchte Meeresluft nach Nord- und Mitteleuropa, während in der negativen Phase verstärkt großskalige Wellenmuster kalte Polarluft nach Europa transportieren. Die AO ist mit



der NAO eng verbunden und verdankt ihre Existenz der Orographie der Erdoberfläche, den Land-See Kontrasten und der Zyklonenaktivität [1]. Dabei wird ein symmetrisches AO-Muster bereits in einer Modellatmosphäre ohne Kontinente und Ozeane erzeugt. Mit eingeschalteter Orographie der Erdoberfläche werden die beobachteten zonalen Asymmetrien der AO-Verteilung und die Zugbahnen der synoptischen Zyklonen über den Ozeanen reproduziert. Mit einem zusätzlichen längenabhängigen thermischen Antrieb durch Ozeantemperaturanomalien breitet sich das AO-Muster in die Stratosphäre aus. Daraus ergibt sich, dass dieses Fernverbindungsmuster mit Rückkopplungen innerhalb des Atmosphäre-Ozean-Meereissystems verbunden ist und durch Tropo-Stratosphären-Rückkopplung und die stratosphärische Ozonschicht beeinflusst wird. Neben diesen natürlichen Prozessen werden die atmosphärischen Fernverbindungsmuster auch durch anthropogene Einflussfaktoren, wie Treibhausgaskonzentrationen und Aerosolbelastung beeinflusst.

Zirkulationsregime

Das Grundkonzept für das Verständnis von dekadischer Klimavariabilität auf der globalen und regionalen Skala ist das Konzept der atmosphärischen Zirkulationsregime. Es ist bekannt, dass atmosphärische Variabilität mit Schwankungen einiger weniger bevorzugter großräumiger Strömungsmuster in Verbindung steht, die in bestimmten geografischen Regionen auftreten. Das Konzept der atmosphärischen Zirkulationsregime verbindet diese beobachteten Klimaschwankungen mit der atmosphärischen Dynamik unter der Annahme, dass niederfrequente Klimavariabilität durch Übergänge zwischen den bevorzugten atmosphärischen Regimen und Änderungen in der Häufigkeit des Auftretens der Regime entsteht. Vergleichsstudien mit atmosphärischen Modellen, Datenanalysen, Analysen von Modellläufen mit erhöhten Treibhausgasen und Paläoklima-Simulationen zeigen, dass sich eine Änderung im externen Antrieb auf natürliche Variabilitätsmuster projizieren kann, aber die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in den einzelnen Zirkulationsregimen ändert. Die Zirkulationsregime können mit Hilfe anspruchsvoller statistischer

Verfahren detektiert werden. Die gefundenen Regime projizieren sich auf die verschiedenen Phasen der bekannten Fernverbindungsmuster, z. B. auf die positive und negative Phase der AO bzw. NAO, den dominierenden Variabilitätsmustern im atlantisch-europäischen Raum. Diese Muster variieren auf Zeitskalen von Jahren bis zu Jahrzehnten und ihre stärkere/schwächere Ausprägung in negativen/positiven Phasen verursacht ein Auf und Ab dekadischer Zirkulationsanomalien der Atmosphäre. Der Einfluss der führenden Variabilitätsmuster reicht bis in die Stratosphäre. Die positive Phase der AO steht demzufolge mit einem stärkeren und kälteren Polarwirbel in Verbindung. Die Stärke des Polarwirbels beeinflusst die Ausbreitung planetarer Wellen von der Troposphäre in die Stratosphäre und ebenso die Übertragung extremer Anomalien von der Stratosphäre hinab in die Troposphäre.

Erdsystemmodelle

Modellexperimente [2] haben gezeigt, dass Änderungen in arktischen Prozessbeschreibungen, wie z. B. der Schnee- und Eisalbedoparametrisierung, AO-ähnliche Anomalien zur Folge haben und ebenfalls Einfluss auf die planetaren Wellenzüge und die Zyklonenzugbahnen haben können. Dies impliziert einen Einfluss auf die meridionale Kopplung zwischen der Energiequelle in den Tropen und der Energiesenke in der Arktis, so dass arktischen Klimaprozessen globale Auswirkungen zugeordnet werden können. Anthropogen bedingte Klimaänderungen und Phasenänderungen der AO/NAO überlagern einander, so dass die Kenntnis der zukünftig vorherrschenden atmosphärischen Zirkulationsregime und der sie steuernden Prozesse für glaubhafte regionale Klimaprojektionen unerlässlich ist. Ein gekoppeltes Erdsystemmodell mit integrierter Stratosphären-Chemie ist in [3] beschrieben worden, um Wechselwirkungen zwischen der atmosphärischen Modelldynamik und der Verteilung und Konzentration von stratosphärischen Spurengasen zu untersuchen und Rückkopplungen zwischen Chemie und Dynamik zu verstehen. Ergebnisse dieser Modellsimulationen zeigen stärkere troposphärische Strahlströme durch die Rückkopplung zwischen Chemie und Dynamik. Dadurch erge-

ben sich veränderte zonale Windverteilungen und globale atmosphärische Wellenmuster, die die Struktur der Arktischen Oszillation beeinflussen. Die Ergebnisse heben die Bedeutung von dynamisch-chemischen Rückkopplungen zwischen Tropo- und Stratosphäre hervor.

Ausblick

Um das gegenwärtige und zukünftige arktische Klima zuverlässig zu beschreiben, ist es notwendig, Klimamodelle zu entwickeln, die in der Lage sind, Zirkulationsregime und deren Variabilität hinreichend realistisch zu simulieren. In [4, 5] wurde gezeigt, dass gegenwärtige Klimamodelle die räumlichen Zirkulationsmuster wiedergeben, aber nicht deren zeitliches Auf und Ab. Dazu ist ein verbessertes physikalisches Verständnis der Ursachen von Klimaregimen und ihrer räumlichen und zeitlichen Änderungen unter den sich ändernden äußeren Randbedingungen erforderlich. Neben der Entwicklung verbesserter arktischer Prozessbeschreibungen werden auch neue Modellansätze verfolgt, wie die Entwicklung eines adaptiven Atmosphärenmodells [6], das zu einer verbesserten Multiskalen-Modellierung führen kann, da es die Auflösung von Wechselwirkungen zwischen planetaren und synoptischen Wellen mit mesoskaligen Zirkulationsstrukturen ermöglicht.

Literatur

- [1] Sempf, M., Dethloff, K., Handorf, D., Kurgansky, M. V., (2007), Towards Understanding the Dynamical Origin of Atmospheric Regime Behavior in a Baroclinic Model, *J. Atmos. Sci.*, 64, 887–904.
- [2] Dethloff, K., Rinke, A., Benkel, A., Koltzow, M., Sokolova, E., Saha, S. K., Handorf, D., Dorn, W., Rockel, B., von Storch, H., Haugen, J. E., Roed, L. P., Roeckner, E., Christensen, J. H., Stendel, M., (2006), A dynamical link between the Arctic and the global climate system, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03703, doi:10.1029/2005GL025245.
- [3] Brand, S., Dethloff, K., Handorf, D., (2008), Tropospheric circulation sensitivity to an interactive stratospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05809, doi:10.1029/2007GL032312.
- [4] Handorf, D., and K. Dethloff, (2009), Atmospheric teleconnections and flow regimes under future climate projections, *Europ. Phys. J.*, 174, 237–255, DOI:10.1140/epjst/e2009-01104-9.
- [5] Handorf, D., Dethloff, K., Marshall, A.G., Lynch, A., (2009). Climate regime variability for past and present time slices simulated by the Fast Ocean Atmosphere Model, *J. Climate*, 22(1), 58–70., doi:10.1175/2008JCLI2258.1.
- [6] Läuter, M., Giraldo, F.X., Handorf, D., Dethloff, K., (2008). A Discontinuous Galerkin Method for the Shallow Water Equations in Spherical Triangular Coordinates, *J. Comp. Phys.*, 227(24), 10226–10242., doi:10.1016/j.jcp.2008.08.019.