

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der niederfrequenten Variabilität in der Atmosphäre im Bereich von Jahrzehnten und Jahrhunderten, welche durch nichtlineares atmosphärisches chaotisches Verhalten erzeugt wird. Sie liefert damit einen Beitrag zum Verständnis des gegenwärtigen Problems natürlicher Klimavariabilität auf dekadischen und längeren Zeitskalen.

Es wurden die Ergebnisse von Langzeitintegrationen über 1 000 bis 10 000 Jahre mit zwei quasi-geostrophischen atmosphärischen Spektralmodellen niederer Ordnung verschiedener vertikaler und horizontaler Auflösung und einem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodell analysiert. Die Studien mit dem troposphärischen 2-Schichten-Modell zeigen, daß das atmosphärische Verhalten durch persistente Zirkulationsanomalien und stark chaotische Phasen gekennzeichnet ist, welche mit den charakteristischen Strömungszuständen des Index-Zyklus nach Rossby [1939] in Zusammenhang stehen. Die Analyse der raum-zeitlichen Variabilität mit Hilfe der Empirischen Orthogonalen Funktionen (EOF) sowie der Berechnungen der Fourier- und Waveletspektren weist nach, daß die vereinfachte nichtlineare Modellzirkulation der Atmosphäre intermittierende Signale auf den Zeitskalen von Jahren, Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten erzeugt. Die dominanten räumlichen Muster sind durch großskalige atmosphärische Zirkulationsstrukturen gekennzeichnet. Die Analysen einer Integration mit Jahresgang der thermischen Anregung über 10 000 Jahre ergeben, daß die periodische externe Anregung zu einem deutlichen Anstieg der niederfrequenten Variabilität führt. Es sind Signale bei etwa 200 - 300 Jahren statistisch gesichert nachgewiesen worden, welche bei zeitlich konstanter Anregung nicht auftreten.

Das in dieser Arbeit neu entwickelte 3-Schichten-Modell ist so konzipiert, daß es zwei troposphärische und eine stratosphärische Modellschicht simuliert. Es erfolgten Modellintegrationen für Winterbedingungen über 1 000 Jahre bei den horizontalen Auflösungen T5, T10 und T15. Die Variabilität in der stratosphärischen Modellschicht wird durch den deformierten Polarwirbel sowie die langen planetaren Wellen mit den Wellenzahlen eins bis zwei bestimmt. In der mittleren Troposphäre stellen die Wellenzüge das Muster der größten Varianz dar. Signifikante Maxima der spektralen Energieverteilungen auf der dekadischen Zeitskala werden in allen Modellhöhen und für alle drei Auflösungen gefunden. Stratosphärische Signale treten vor allem auf der sehr langen Zeitskala von 100 - 150 Jahren aus dem Rauschen heraus und stehen in Zusammenhang mit der Variabilität des Polarwirbels. Die von Wellenzügen dominierte mittlere Troposphäre besitzt auf der interdekadischen Zeitskala viel Varianz, bei längeren Perioden hingegen nicht. Die Zunahme der horizontalen Auflösung hat einen deutlichen Anstieg der intra- und interannuellen Variabilität zur Folge.

Als "Ersatz" für fehlende lange Beobachtungsdatenreihen wurde eine 1 000 Modelljahre umfas-

sende Simulation mit dem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-GCM ECHAM3/LSG analysiert. Das Modell beinhaltet komplexe physikalische Parametrisierungen und repräsentiert den aktuellen Wissensstand der Modellierung des gegenwärtigen Klimas. In der unteren Stratosphäre sind der kalte Polarwirbel und die lange planetare Welle der Wellenzahl eins die Muster der größten Varianz. Sie besitzen eine charakteristische langperiodische Zeitskala von ca. 100 Jahren. Die Variabilität der mittleren Troposphäre ist durch großskalige Wellenanomalien der Temperatur, durch das Telekonnektionsmuster der NAO in der geopotentiellen Höhenverteilung sowie daraus folgend durch die Fluktuationen des Zonalwindes im Bereich des Nordatlantik gekennzeichnet. Die dominanten räumlichen Muster der mittleren Troposphäre besitzen die stärkste zeitliche Varianz im interannuellen Skalenbereich. Die Temperatur in 2 m Höhe sowie der Bodenluftdruck zeichnen sich durch geringe niederfrequente Variabilität aus. Untersuchungen zur Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der geopotentiellen Höhe in 500 hPa ergeben, daß das Modell die aus atmosphärischen Daten bekannte multimodale Struktur nicht reproduziert.

Es wurde gezeigt, daß vereinfachte dynamische Modelle der Atmosphäre signifikante niederfrequente Variabilität produzieren, ohne daß externe Faktoren wie z.B. der ozeanische, solare oder anthropogene Einfluß berücksichtigt werden. Die Ursachen der langperiodischen Schwankungen in den spektralen Modellen niederer Ordnung sind orographisch und thermisch bedingte Instabilitäten, die interne dynamische Kopplung der Wellen mit der zonalen Grundströmung und der Wellen verschiedener räumlicher Skalen untereinander sowie nichtlineare chaotische Übergänge zwischen persistenten Zirkulationsanomalien. Die potentielle Möglichkeit der Atmosphäre, eigene signifikante niederfrequente Fluktuationen zu erzeugen, wurde bisher bei der Erklärung und Diskussion langperiodischer Trends und Oszillationen im Klimasystem nicht hinreichend berücksichtigt. Aus den hier dargelegten Untersuchungen ergibt sich, daß bei der Bewertung gegenwärtiger Klimaänderungen (z.B. der erwarteten Zunahme des Treibhauseffekts) sowie der Wichtung anthropogener und natürlicher Einflußfaktoren die internen Schwankungen mit Perioden von Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten, welche durch dynamische Prozesse in der Atmosphäre entstehen, eine stärkere Beachtung finden müssen.

Abstract

The presented paper deals with low-frequency variability of the atmosphere in the range of decades and centuries generated by nonlinear atmospheric chaotic behaviour. Thus it contributes to better understand the current problem of natural climate variability on decadal and longer time scales.

Results of long-term integrations over 1, 000 to 10, 000 years of two quasi-geostrophic atmospheric spectral low-order models with varying vertical and horizontal resolution and of a coupled atmosphere-ocean-circulation model have been analysed. The investigations of the tropospheric 2-layer model show that atmospheric behaviour is characterized by persistent circulation anomalies and strong chaotic phases, which are related to the index-cycles by Rossby [1939]. The analysis of the spatial and temporal variability by means of Empirical Orthogonal Functions (EOF) as well as by Fourier and wavelet spectra demonstrates that the simplified nonlinear model circulation of the atmosphere generates intermittent signals on time scale of years, decades and even cen-

turies. Dominant spatial patterns are characterized by large-scale atmospheric circulation structures. The analyses of an integration with an annual cycle of thermal forcing in the course of 10, 000 years reveal a noticeable increase of the low-frequency variability due to periodic external forcing. Signals around 200 - 300 years have been found to be statistically significant, which did not appear at constant forcing.

The newly developed 3-layer model simulates two tropospheric and one stratospheric model layer. Integrations over 1 000 years for winter conditions have been performed at horizontal resolutions T5, T10, and T15. The variability in the stratospheric layer is determined by the deformed polar vortex and the planetary waves with wave numbers one and two. In the middle troposphere, the wave trains represent the pattern of largest variability. Significant peaks of the spectral energy distribution on decadal time scale have been detected at all model heights and for all three resolutions. Stratospheric signals on the very long time scale of 100 - 150 years are connected with the variability of the polar vortex. The middle troposphere, dominated by wave trains, has a large variance on interdecadal time scale, though not on longer periods. The rise of the horizontal resolution resulted in a distinct increase of the intra- and interannual variability.

As 'surrogate' of missing long observational data series, a 1 000 model years embracing simulation with the coupled atmosphere-ocean GCM ECHAM3/LSG has been analysed. This model contains complex physical parameterizations and represents the state-of-the-art of climate modeling. In the lower stratosphere, the cold polar vortex and the long wave of wave number one explain most of the variance. They have a characteristic long-period time scale of ~100 years. The variability in the middle troposphere is characterized by large-scale temperature wave anomalies, by the teleconnection pattern of NAO for the geopotential height and, subsequently, by fluctuations of the zonal wind over the North Atlantic. The dominant patterns of the middle troposphere show the strongest temporal variance on interannual time scales. The near-surface temperature and the sea level pressure possess only a small low-frequency variability. Studies on the probability density function of the geopotential height in 500 hPa yield that the model does not reproduce the multimodal structure known from atmospheric data.

It has been shown that simplified dynamical models of the atmosphere generate a significant low-frequency variability without taking into account external factors as the ocean or solar and anthropogenic influences. The reason for the long-period fluctuations in spectral low-order models are orographically and thermally induced instabilities, the internal dynamical coupling between waves of different spatial scales and the zonal mean flow, as well as nonlinear chaotic transitions between persistent circulation anomalies. The potential ability of the atmosphere to produce inherent significant low-frequency fluctuations has not yet been sufficiently considered for the explanation and the discussion of long-period trends and oscillations in the climate system. Thus, for the evaluation of current climate changes (e.g. the expected increasing greenhouse effect) and the estimation of anthropogenic and natural influences a stronger attention has to be paid to the internal fluctuations with periods of decades up to centuries, which due to dynamical processes develop in the atmosphere.

