

C. FRANZKE, R. BLENDER, K. FRAEDRICH, F. LUNKEIT

# 5

## Dynamische Antriebsmechanismen der NAO

### Dynamical Mechanisms of the NAO

#### Zusammenfassung

Die dynamischen Antriebsmechanismen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) werden mit Hilfe des Stromfunktionsbudgets in Reanalyse-Daten (NCAR-NCEP) bestimmt. Die NAO wird vor allem durch transiente Flüsse angetrieben, wobei Wachstum und Abklingen des NAO-Lebenszyklus durch synoptische Wellen hervorgerufen werden, die in der positiven Phase (negativen Anomalie über Island) antizyklonisch und in der negativen Phase zyklonisch brechen. Das Muster der NAO sowie weitere Telekonnektionen lassen sich mit Hilfe eines dynamischen Atmosphärenmodells simulieren. Reanalyse-Daten (ERA40) zeigen, dass die täglichen Variationen der NAO mit der stratosphärischen Zirkulation zusammenhängen.

#### Abstract

An analysis of the dynamic mechanisms relevant for the North Atlantic Oscillation (NAO) is performed based on the NCAR-NCEP Reanalysis data set. The NAO is mainly driven by transient fluxes, whereby growth and decay of the NAO-cycle are caused by synoptic waves, which break anticyclonically in the positive phase (negative anomaly at Iceland) and cyclonically in the negative phase. The NAO-pattern as well as further teleconnections can be simulated with a dynamic atmospheric model. Reanalysis data (ERA40) show that the daily NAO variability is related to the stratospheric circulation.

## 1 Einleitung

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) ist eines der dominierenden Variabilitätsmuster der Nordhemisphäre und hat einen großen Einfluss auf das europäische Wetter und Klima. Das typische NAO-Muster hat eine meridionale Dipolstruktur mit Zentren über Island und den Azoren. Obwohl die NAO eine große Variabilität auf interannualen und längeren Zeitskalen aufweist, beträgt ihre intrinsische Zeitskala (Lebensdauer) nur etwa 10 Tage (FELDSTEIN 2000, 2003; FRANZKE und FELDSTEIN 2005), das heißt, der Zyklus von Wachstum, Erhaltung und Abklingen von einzelnen NAO-Ereignissen läuft innerhalb eines Zeitraums von etwa 10 Tagen ab. Das Wachstum der typischen NAO Anomalie ist stark verknüpft mit Wellen auf der synoptischen Skala. Die folgenden Abschnitte zeigen Ergebnisse zur synoptischen Entwicklung der NAO, zu möglichen Antriebsmechanismen und zum Einfluss der Stratosphäre.

## 2 Synoptische Entwicklung der NAO

Die synoptischen Eigenschaften der NAO werden anhand der potenziellen Temperatur  $\theta$  auf einer Fläche konstanter potenzieller Vorticity (PV) untersucht (BENEDICT et al. 2004, FRANZKE et al. 2004; FELDSTEIN und FRANZKE 2006). In diesen Studien wer-

den die NCAR-NCEP Reanalyse-Daten während der Wintermonate Dezember, Januar und Februar für den Zeitraum von 1958 bis 1997 verwendet. Als Untersuchungshöhe wird die Fläche mit der konstanten PV von  $2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{K kg}^{-1}$  gewählt (auch mit 2-PVU bezeichnet), da diese sich in der Tropopause befindet und die dynamischen Prozesse klar abbildet. Die Untersuchungen von NAO-Ereignissen (BENEDICT et al. 2004, FELDSTEIN und FRANZKE 2006) und idealisierten Modellexperimenten (FRANZKE et al. 2004) zeigen, dass beide Phasen der NAO im potenziellen Temperaturfeld die typischen Muster von brechenden Wellen aufweisen (Abb. 5-1 (a) und 5-1 (b)) und damit auf ein rein atmosphärisches Phänomen hindeuten.

Die positive Phase der NAO (mit einer negativen Stromfunktionsanomalie über Island) ist das Resultat zweier antizyklonisch<sup>1</sup> brechender Wellen, einer über der Westküste der USA und einer zweiten über dem subtropischen Atlantik. Der Beginn eines NAO-Zyklus während der positiven Phase ist mit der Entwicklung eines pazifischen Rückens über der Westküste der USA verbunden. Zum gleichen Zeitpunkt befinden sich ein schwächerer Trog und ein Rücken über dem zentralen

1 Nach THORNCROFT et al. (1993) ist antizyklonisches (zyklonisches) Wellenbrechen durch eine südwestlich-nord-östliche (südöstlich-nordwestliche) Neigung des Trog-Rücken-Systems charakterisiert.

Nordatlantik. Wenn diese Wellen ostwärts wandern, brechen der pazifische Rücken und der nordamerikanische Trog antizyklonisch. Dabei werden kalte Luftmassen nach Kanada und Grönland advehiert. Im Anschluss daran bricht auch das Trog-Rücken-System über dem Nordatlantik antizyklonisch und transportiert warme Luftmassen von Florida in den zentralen Nordatlantik. Durch den Transport der kalten Luftmasse von Kanada in den Nordatlantik wird das „Kalt-über-Warm“-Muster der NAO gebildet (Abb. 5-1 (a) und 5-1 (e); FRANZKE et al. 2004).

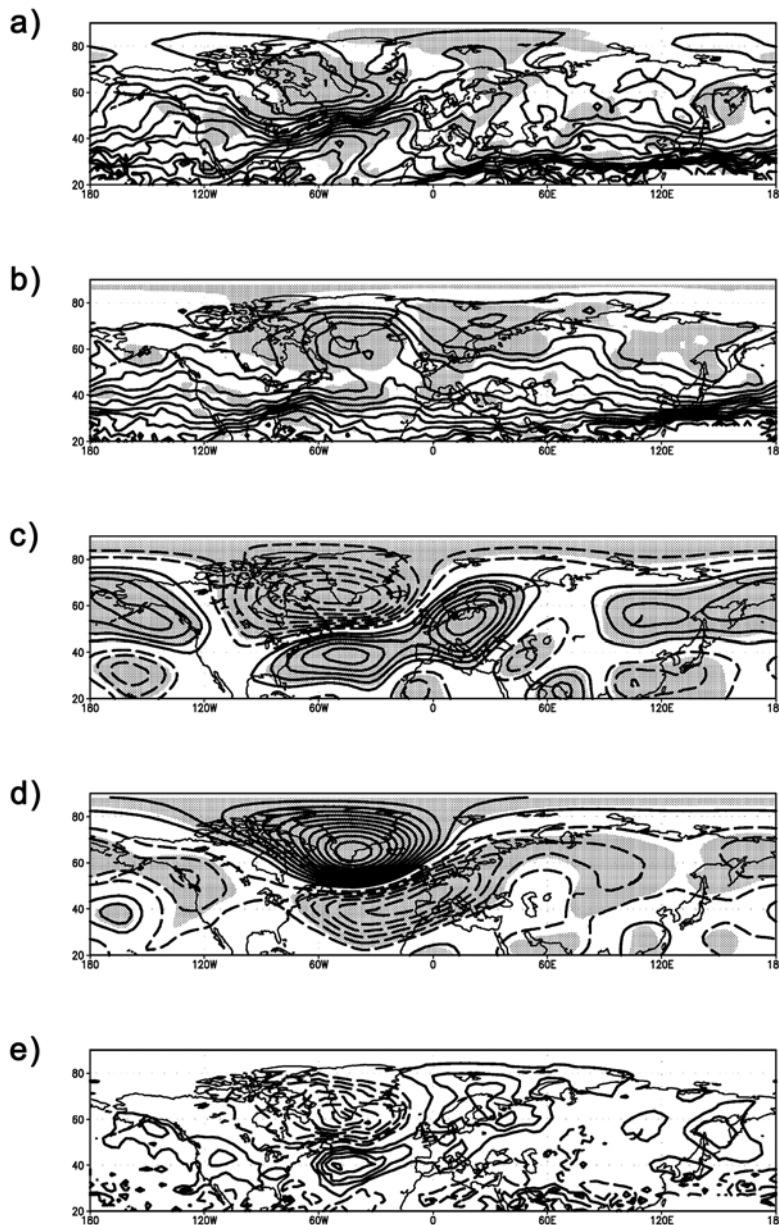


Abb. 5-1: NAO-„Komposites“: Potenzielle Temperatur der 2-PVU Fläche für (a) die positive Phase (25 Fälle) und (b) die negative Phase (26 Fälle), Anomalie der Stromfunktion in 300 hPa (abzüglich des klimatologischen Mittelwerts) der (c) positiven und (d) der negativen Phase, (e) Differenz der potentiellen Temperatur auf der 2-PVU Fläche in der positiven und der negativen NAO-Phase. Das Konturintervall ist 5 K für die potentielle Temperatur und  $2 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  für die Stromfunktion; die schattierten Flächen entsprechen Anomalien die das 5 %-Signifikanzniveau eines Student t-Testes überschreiten (aus FRANZKE et al. 2004).

Die negative Phase der NAO ist von einer einzelnen, zyklonal brechenden Welle geprägt, die mit einer starken SE-NW-Neigung über dem zentralen Nordatlantik verknüpft ist (Abb. 5-1 (b); FRANZKE et al. 2004). Dass die negative NAO nur durch eine einzelne brechende Welle hervorgerufen wird, ist nicht überraschend, da zur Bildung eines „Warm-über-Kalt“-Musters unabhängig von der Neigung nur eine einzelne brechende Welle notwendig ist.

Um zu prüfen, ob die Felder der potentiellen Temperatur auch mit den typischen obertroposphärischen NAO-Mustern zusammenhängen, ist in den Abbildungen 5-1 (c) und 5-1 (d) das 300 hPa-Stromfunktionsfeld abzüglich des klimatologischen Mittels dargestellt. Diese Abbildungen zeigen die typischen obertroposphärischen Dipolmuster der NAO mit Anomalien über Grönland und den Azoren. Das Dipolmuster ist auch in der Differenz der beiden Felder der potentiellen Temperatur in Abb. 5-1 (e) zu sehen. Ein interessantes Ergebnis dieser Studien ist, dass der Zyklus der NAO durch Anomalien in der pazifischen Region initiiert wird. Dies konnte durch eine Modellstudie bestätigt werden (FRANZKE et al. 2004), die zeigte, dass die Entwicklung der NAO von synoptischen Wellen pazifischen Ursprungs beeinflusst wird.

### 3 Dynamik der NAO

Die dynamischen Eigenschaften der NAO lassen sich durch eine Analyse der Tendenzen der Stromfunktionstendenz-Gleichung bestimmen. Die Betrachtung der synoptischen Wellen ergibt schließlich ein Bild der für den Ablauf eines NAO-Zyklus relevanten Prozesse.

#### 3.1 Analyse der Stromfunktions-Tendenz

Um die dynamischen Prozesse zu identifizieren die die NAO antreiben wird die Tendenz der Stromfunktion analysiert (FRANZKE et al. 2000). Hierzu werden hoch- und niedrigfrequente Störungen der Stromfunktion bei Perioden von 10 Tagen separiert.

FRANZKE und FELDSTEIN (2005) konnten zeigen, dass die NAO nur durch einen Teil der Mechanismen beeinflusst wird (Tabelle 5-1): Die nichtlinearen transienten Flüsse sowohl der niedrigfrequenten als auch der hochfrequenten Störungen (4, 5) treiben die NAO während ihres Wachstums an, wobei der Effekt der hochfrequenten transienten Flüsse (5) konsistent mit einem

Mechanismen in der Stromfunktionstendenz	
1	Planetarische Vorticity-Advektion durch niederfrequente Störungen $-\nabla^{-2}\{u^L \cdot \nabla f\}$
2	Wechselwirkung zonaler Grundstrom mit niederfrequenten Störungen $-\nabla^{-2}\{<[u]> \cdot \nabla \zeta^L - u^L \cdot \Delta <[\zeta]>\}, \quad -\nabla^{-2}\{<u^*> \cdot \Delta \zeta^L + u^L \cdot \nabla <\zeta^*>\}$
3	Niederfrequente Divergenz $-\nabla^{-2}\{(f + <\zeta>) \nabla \cdot u^L + \zeta^L \nabla \cdot <u>\}$
4	Transiente Flüsse von niedrigfrequenten Störungen $-\nabla^{-2}(\nabla \cdot (u^L \zeta^L))^f$
5	Transiente Flüsse von hochfrequenten Störungen $-\nabla^{-2}(\nabla \cdot (u^H \zeta^H))^f$
6	Wechselwirkungen von niedrigfrequenten und hochfrequenten Störungen $-\nabla^{-2}(\nabla \cdot (u^L \zeta^H + u^H \zeta^L))^f$
7	Vertikale Vorticity-Advektion und vertikale Neigung der Störungen $-\nabla^{-2}k \cdot (\nabla \times (\omega \partial u / \partial p))^f$

Tab. 5-1: Die meteorologischen Größen sind:  $u$  horizontaler Windvektor,  $\zeta$  vorticity,  $f$  Coriolisparameter,  $k$  vertikaler Einheitsvektor,  $p$  Druck und  $\omega$  Vertikalgeschwindigkeit. Die Mittelungen und Filter sind bezeichnet mit: [...] zonales Mittel, <...> zeitliches Mittel, (\*) Abweichung vom zonalen Mittel, (L) und (H) niedrig- und hochfrequente Abweichungen für eine Trennung bei 10 Tagen.

NAO-Dynamik	Mechanismen
Wachstum	Flüsse niedrig- und hochfrequenten Strömungen (4, 5)
Abklingen	Niederfrequente Divergenz und Flüsse von niedrigfrequenten Störungen (3, 4)

Tab. 5-2: Die für die NAO-Entwicklung relevanten Mechanismen.

positiven Feedback-Prozess ist sobald die NAO ihre maximale Amplitude erreicht. Das Abklingen der NAO wird durch die niedrigfrequenten transienten Flüsse und den Divergenzterm (3, 4) verursacht. Dabei sind die zeitlichen and räumlichen Charakteristika des Divergenzterms konsistent mit einer vertikalen Zirkulation die durch Ekman-Reibung verursacht wird. Die Tabelle 5-2 fasst diese Ergebnisse zusammen.

### 3.2 Synoptischer Aspekt

Diese Resultate zusammen mit den synoptischen Charakteristiken der NAO ergeben folgendes Bild der Entstehung einer niedrigfrequenten NAO-Anomalie:

- Transiente synoptisch-skalige Wellen erscheinen als hochfrequente Störungen westlich der NAO-Region. Wenn diese Wellen die NAO-Region erreichen reduziert sich ihre stromabwärts gerichtete Geschwindigkeit bevor sie brechen.
- Die Anomalien die durch den Brechungsvorgang entstehen sind quasi-stationär und treten dadurch immer stärker als niedrigfrequente Störungen im Stromfunktionsbudget hervor. Das weist darauf hin, dass durch den Brechungsvorgang hochfrequenter Wellen synoptischer Skala die niedrigfrequente Anomalien der NAO entstehen. Daraus lässt sich folgern, dass die Reste der gebrochenen Wellen die NAO charakterisieren.

- Die NAO-Anomalie wird durch das sukzessive Brechen weiterer synoptischer Wellen aufrecht erhalten.
- Die NAO-Anomalie klingt schließlich ab, zum einen wegen des Ausbleibens weiterer synoptischer Wellen und zum andern durch die Wirkung der Bodenreibung.

Die NAO hängt unmittelbar mit den nordatlantischen Zyklonen zusammen, insbesondere die Island passierenden Tiefdruckgebiet zeigen eine deutliche Korrelation mit der NAO (SCHNEIDER et al. 2007). Während auf großräumiger Skala der oben beschriebene Steuerungsmechanismus der NAO für die Zyklonen angenommen werden kann, ist auf der synoptischen Skala eine Beeinflussung der NAO durch Zyklonen um Island plausibel und damit hat die NAO auch einen direkten Einfluss auf den hydrologischen Zyklus (SIENZ et al. 2007).

### 4 Einfluss der Stratosphäre auf die Lebensdauer von NAO Ereignissen

Einen Zusammenhang zwischen den täglichen Variationen der NAO und der stratosphärischen Zirkulation zeigt eine Statistik des täglichen NAO-Index, die auf einem NAO-Muster beruht: Das NAO-Muster besteht aus der ersten Empirischen Orthogonalfunktion (EOF) der Winter-Monatsmittel (Dezember bis Februar) des reduzierten nordatlantischen (80° W-30° E, 20° N-80° N) Bodendrucks (BLESSING et al. 2005). Dieses Muster erklärt 40 % der monatlichen Varianz in ERA-40 Daten. Die Projektion auf tägliche Bodendruckfelder definiert den täglichen NAO-Index, der 15 % der täglichen Varianz erklärt. Die vorherrschende stratosphärische Zirkulation wird durch die saisonale Stärke des stratosphärischen Polarwirbels im Winter beschrieben, die durch die Zeitreihe der Principal Component der ersten EOF der 50 hPa-Geopotenzial-Anomalien gegeben ist.

Die Analyse beider Zeitreihen (NAO und stratosphärischer Wirbel) führt zu folgenden Aussagen:

- Eine Dekorrelationszeit (auch E-Folding-Zeit) von etwa vier Tagen wird als die charakteristische Zeitskala von NAO-Lebenszyklen durch das Leistungsspektrum ermittelt.
- Negative NAO-Lebenszyklen sind im Mittel seltener und länger als positive, wie die Verteilung der Dauer individueller NAO-Ereignisse zeigt.
- Die Unterschiede zwischen positiven und negativen NAO-Ereignissen sind in Phasen eines schwachen stratosphärischen Polarwirbels stärker ausgeprägt. In Übereinstimmung mit anderen Arbeiten

deuten die Ergebnisse hin auf

- Unterschiede in den Prozessen, die den positiven und negativen NAO-Ereignissen zugrunde liegen, und
- auf eine die individuellen NAO-Lebenszyklen beeinflussende Stratosphären-Troposphären Wechselwirkung.

Abbildung 5-2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Verweildauern von NAO-Lebenszyklen über bzw. unter den 15,9 %-Quantilen für positive und negative NAO-Ereignisse (entsprechend einer Standardabweichung für die Gaußverteilung). Es sind sowohl Ergebnisse für alle Daten als auch getrennt nach Saisons mit starkem und mit schwachem stratosphärischem Polarwirbel dargestellt. Sowohl für den Gesamtdatensatz als auch für den schwachen Polarwirbelfall ist die Verteilung für negative im Vergleich zu positiven NAO-Ereignissen zu längeren Verweildauern verschoben. So ergibt sich für den Gesamtdatensatz, dass 37 % der negativen Fälle, aber nur 19 % der positiven Fälle länger als vier Tage andauern. Für den Fall des gesamten Datensatzes sind zusätzlich die Verteilungen eingezeichnet, die einem angepassten autoregressiven Prozess erster Ordnung (AR(1)) und einer Markov-Kette erster Ordnung entsprechen. Im Vergleich zum AR(1)-Prozess sind die Verteilungen deutlich zu längeren Verweildauern hin verschoben, was darauf hindeutet, dass ein AR(1) den täglichen NAO-Index nur unzureichend repräsentiert. Die Markov-Kette liefert eine deutlich bessere Übereinstimmung.

### 5. Simulation der NAO mit einem dynamischen Atmosphärenmodell

Charakteristiken von Telekonnektionen lassen sich auch mit Hilfe von idealisieren Modellsimulationen untersuchen. Hier können gezielt Sensitivitätsstudien durchgeführt wurden. Derartige Untersuchungen wurden mit dem dynamischen Atmosphärenmodell PUMA (Portable University Model of the Atmosphere) unternommen (FRISIUS et al. 1998; FRAEDRICH et al. 2003; FRANZKE et al. 2001), wobei Telekonnektionen durch die Vorgabe von Inhomogenitäten im Temperaturantrieb erzeugt werden, die den Land-Meer-Kontrast der Oberflächentemperatur repräsentieren. Folgende Ergebnisse sollen hier zusammengefasst werden:

- Bei einem realistischen Abstand der beiden Inhomogenitäten, das heißt entsprechend dem zwischen östlichem Pazifik und östlichem Atlantik (etwa 150°), entstehen Telekonnektionsmuster, die große Ähnlichkeit mit Beobachtungen der NAO und der PNA (Pacific North American Pattern) aufweisen.
- Für diesen Abstand weist der NAO-Index eine Variabilität auf, die näherungsweise einem roten Rauschen entspricht. Für einen 180°-Abstand zeigt sich

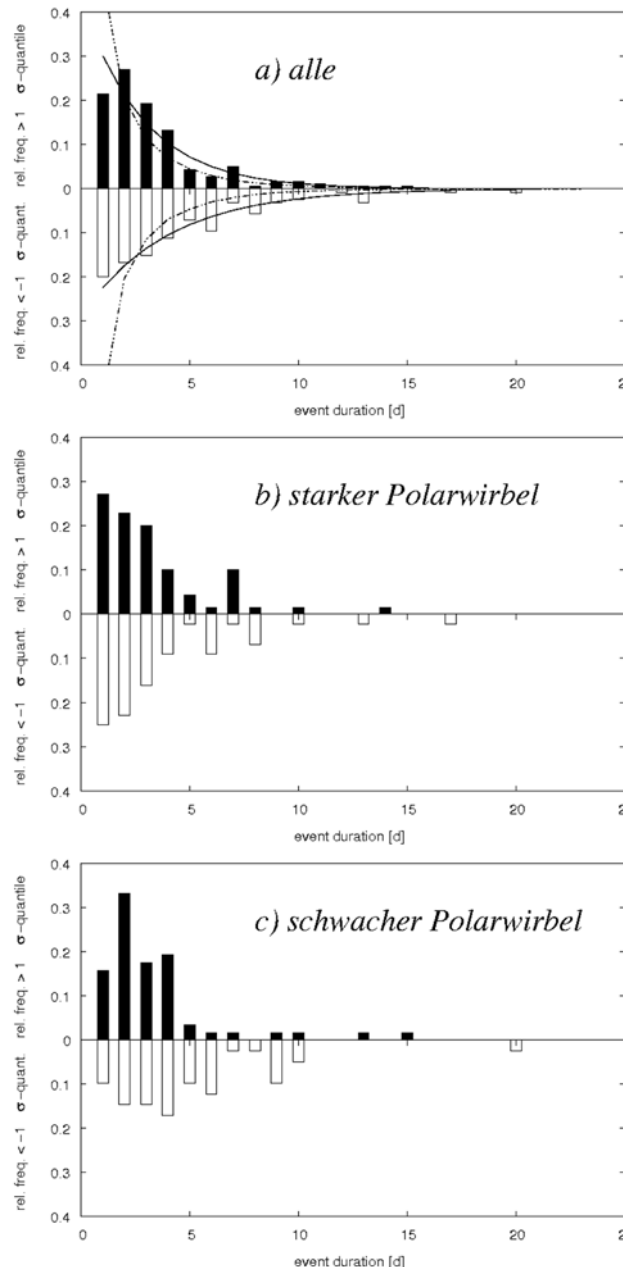


Abb. 5-2: Häufigkeitsverteilungen der Verweildauern oberhalb bzw. unterhalb der 15,9 %-Quantile für positive (gefüllt) und negative (offen) NAO-Ereignisse. In (a) sind alle Ereignisse, in (b) die Ereignisse bei starkem Polarwirbel und in (c) die Ereignisse bei schwachem Polarwirbel dargestellt. In (a) wird die Häufigkeitsverteilung eines an die Daten angepassten AR(1)-Prozesses (durchgezogen) mit einer an die Daten angepassten Markov-Kette erster Ordnung verglichen (gestrichelt).

- ein Spektrum mit einem Maximum bei 50 Tagen.
- Im Fall des NAO-ähnlichen Musters ist die Wechselwirkung zwischen stationären und wandernden Wellen oder barotrope Instabilität der dominierende Antriebsmechanismus.
- Die Spektren der NAO-Zeitreihen zeigen ein Skalierungsverhalten über mehrere Dekaden hinweg (MÜLLER et al. 2002). Es ist bemerkenswert, dass dieses Langzeitgedächtnis allein durch die atmosphärische Dynamik hervorgerufen wird.

## 6 Fazit

Die dynamischen Antriebsmechanismen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) werden auf der Basis des Stromfunktionsbudgets in Reanalyse-Daten (NCAR-NCEP) ermittelt. Es zeigt sich, dass nur ein kleiner Teil der Beiträge für das Wachstum und den Abfall der NAO relevant ist. Während der Wachstumsphase sind dies vor allem die nichtlinearen transienten Flüsse der niedrigfrequenten und der hochfrequenten Störungen. Für das Abklingen der NAO sind die niedrigfrequenten transienten Flüsse und die Divergenz entscheidend. Das sukzessive Brechen synop-

tischer Wellen ist für die Aufrechterhaltung der NAO-Anomalie entscheidend. Die NAO-Anomalie klingt ab wenn weitere synoptische Wellen ausbleiben und die Bodenreibung Oberhand gewinnt. Die NAO, die mit Hilfe eines vereinfachten dynamischen Atmosphärenmodells simuliert werden kann, zeigt einen Zusammenhang zwischen täglichen Variationen der NAO und der stratosphärischen Zirkulation. Die simulierte NAO weist ein Langzeitgedächtnis auf, das mit europäischen Temperaturbeobachtungen vergleichbar ist.