

2.4 Einfluss des Ozeans auf die Nordatlantische Oszillation und die Bedeutung für das Klima in Europa

FRANK LUNKEIT

Oceanic impact on the north atlantic oscillation and its relevance for the european climate: European weather and climate is, in particular during winter, to a large extent defined by the North Atlantic Oscillation (NAO). A positive NAO (i.e. a larger than normal pressure difference between the Azores high and the Icelandic low) is related to (i) colder and dryer winter in Greenland, (ii) a stronger North Atlantic jetstream which is displaced northward, (iii) more precipitation, more storms and higher temperatures in Northern Europe, and (iv) colder conditions for Southern Europe. For a negative NAO the opposite is true. While most of the NAO-fluctuations are related to internal atmospheric variability, a small portion can be attributed to an oceanic impact. For the North Atlantic, NAO-variability is connected to a tripole pattern of the sea surface temperature (SST). Although this pattern is mostly driven by the atmosphere, observations and model studies indicate that these SST-anomalies can force the NAO where different parts of the pattern are of different importance. In addition, impacts of the Pacific and the Indian Ocean on the NAO can be found.

Wetter und Klima des Nordatlantiks und Europas werden, besonders im Winter, zu einem wesentlichen Teil durch die Nordatlantische Oszillation (NAO) bestimmt, die den Luftdruckunterschied zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch widerspiegelt. Phasen positiver NAO sind durch ein verstärktes Islandtief und ein verstärktes Azorenhoch definiert. Bedingt durch seine Bedeutung, war und ist die NAO Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (siehe z.B. die Übersichtsartikel von HURRELL et al. 2003, MARSHALL et al. 2001 oder WANNER et al. 2001).

Die Stärke der NAO wird durch einen NAO-Index beschrieben. Für seine Definition gibt es verschiedene Ansätze, die aber zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen: Zum einen kann er durch die Luftdruckdifferenzen zwischen Stationen im Azorenhoch und im Islandtief definiert werden. Zum anderen kann ein Index aus der Stärke des mit der NAO verbundenen räumlichen Musters der Bodendruckverteilung (also im Wesentlichen Islandtief und Azorenhoch) mithilfe mathematischer Methoden ermittelt werden. Abb. 2.4-1 zeigt den winterlichen NAO-Index (Mittel über die Monate Dezember bis März) für die Jahre 1864 bis 2010 berechnet aus den Stationsdaten für Lissabon und Reykjavík (oben) sowie das räumliche Muster und die zugehörige Index-Zeitreihe gewonnen aus einer Analyse der winterlichen (Dezember bis März) Bodendruckverteilung der Jahre 1898 bis 2010.

Im Vergleich zum mittleren Klima können folgende Auswirkungen einer positiven bzw. negativen winterlichen NAO für Europa festgehalten werden (Abb. 2.4-2): Bei einer positiven NAO sorgt das verstärkte Islandtief für kalte und trockene Winter in Grönland. Der nordatlantische Jetstream (das Band starker westlicher Winde in der oberen Troposphäre) ist stärker und verläuft weiter im Norden. Dadurch ziehen synoptische Störungen in nördlicheren Zugbahnen über den Atlantik

und bringen so den Norden Europas mehr Niederschlag, stärkere Winde und höhere Temperaturen sowie mehr Extremereignisse (Stürme, Starkregenfälle). Der Süden Europas wird kühler, bedingt durch die Advektion kalter kontinentaler Luftmassen. Die atlantischen Passatwinde nehmen an Stärke zu. Während einer negativen NAO sind die Winter in Grönland wärmer und feuchter. Der nordatlantische Jetstream ist abgeschwächt und verläuft weiter südlich. Der Norden Europas wird von weniger synoptischen Störungen erreicht und steht vermehrt unter kontinentalem Hochdruckeinfluss. Weniger Niederschlag, weniger Stürme und niedrigere Temperaturen sind die Folge. Der Süden Europas wird häufiger von Regen bringenden atlantischen Tiefdruckgebieten erreicht. Die Passate sind abgeschwächt.

Die NAO zeigt Variabilität auf allen Zeitskalen. Auch wenn in vielen Fällen die NAO und ihre Fluktuationen auf Basis von Monats-, Saison- (Winter-) oder Jahresmittel diskutiert werden, so sollte doch festgehalten werden, dass sie deutliche Schwankungen auf täglicher Basis aufweist, wobei die typische Zeitskala eines NAO-Ereignisses (d.h. die Phase einer positiven bzw. negativen NAO) etwas unter 10 Tagen liegt (FELDSTEIN 2000).

Während die NAO, ihre Auswirkungen und ihre Wechselwirkungen phänomenologisch gut beschrieben sind, sind die ursächlichen Mechanismen weniger verstanden. Es besteht aber weitestgehender Konsens darüber, dass interne atmosphärische Prozesse Hauptantrieb der NAO sind (siehe z.B. den Übersichtsartikel von HURRELL et al. 2003), wobei die Wirkung der synoptischen Störungen ein Hauptmechanismus auf kurzer (täglicher) Zeitskala ist. Obwohl auch längerperiodische Schwankungen schon allein durch diesen kurzperiodischen Antrieb erklärt werden können, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass auch der Einfluss externer Parameter, wie solare Variabilität,

Vulkanausbrüche, die Änderung der Treibhausgaskonzentration oder der Einfluss des Meeresoberflächentemperaturen (sea surface temperatures; SST), einen Beitrag zum beobachteten Verhalten der NAO liefert. Letzterer soll Gegenstand dieser Arbeit sein.

Bedingt durch die größere Trägheit des Ozeans, sollte eine Interaktion mit der NAO auf längeren Zeitskalen sichtbar werden. Im Nordatlantik ist die mit der atmosphärischen NAO verbundene Variabilität eng verknüpft mit einem Tripol-Muster der SST-Anomalien, wie es bereits in *Abb. 2.4-2* skizziert ist: Bei positiver NAO zeigen sich positive SST-Anomalien an der Ostküste der USA verbunden mit nördlich davon gelegenen negativen Anomalien (nördlich 40°N) sowie negative SST-Anomalien im subtropischen Nordatlantik (südlich 25°N). Eine negative NAO korreliert mit dem gleichen Muster jedoch mit umgekehrten Vorzeichen. Ein ähnliches Muster (allerdings für den nordhemisphärischen Sommer) wird auch »Atlantisches Hufeisen« (Atlantic horseshoe) genannt und spielt für die mögliche Reaktion der winterlichen NAO auf sommerliche SST-Anomalien eine zentrale Rolle. In dieser Arbeit wird, vereinfacht, für beide Muster der Begriff »Tripol« verwendet.

Auch wenn vieles daraufhin deutet, dass der Einfluss des Ozeans auf die NAO verhältnismäßig gering ist, ist dessen genaue Kenntnis von besonderer Bedeutung, da sie, bedingt durch die Trägheit des Ozeans, ein Vorhersagepotential für die NAO liefert: Gelingt es sensitive Regionen, zugrundeliegende Mechanismen und involvierte Zeitskalen zu identifizieren, so lässt sich, potentiell, zumindest ein Teil der NAO-Fluktuationen durch den ozeanischen Zustands über längere als die typische atmosphärische Zeitskala von einigen Tagen vorhersagen. Darüber hinaus liefern diese Erkenntnisse Anhaltspunkte über mögliche Änderungen der NAO bedingt durch eine globale Klimaänderung.

In dieser Arbeit soll eine Übersicht über Hinweise auf einen Einfluss des Ozeans auf die Variabilität der NAO gegeben werden. Das Augenmerk liegt hierbei auf Untersuchungen, die auf Beobachtungsdaten oder Ergebnissen von realitätsnahen Modellen basieren. Neben diesen Studien existiert eine Vielzahl von theoretischen und konzeptionellen Arbeiten, die hier nicht eingehender behandelt werden sollen. Für tiefer gehende Abhandlungen sei, ergänzend zu den angeführten Artikeln, auf die Übersichtsartikel von KUSHNIR et al. (2002), CZAJA et al. (2003) und LATIF et al. (2006) verwiesen.

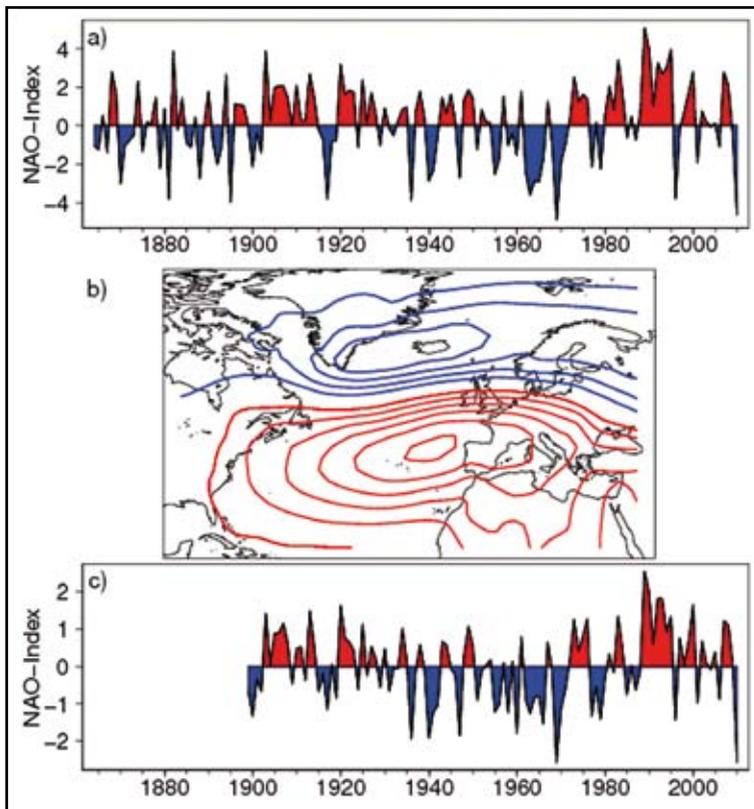


Abb. 2.4-1: a) Winterlicher NAO-Index (Mittel über die Monate Dezember bis März) für die Jahre 1864 bis 2010 ermittelt aus den Stationsdaten für Lissabon und Reykjavik. b) Muster und c) Zeitreihe der winterlichen (Dezember bis März) NAO für die Jahre 1898 bis 2010 ermittelt aus der räumlichen Verteilung des Bodendrucks.

Daten und Analysemethoden

Für ein derart komplexes Phänomen wie die Ozean-NAO Wechselwirkung ist es schwer, wenn nicht gar ausgeschlossen, eindeutige Erkenntnisse allein aus Beobachtungsdaten abzuleiten. Hier hindern besonders die relativ geringe Anzahl an Messungen und der gleichzeitig hohe Anteil an natürlicher Variabilität. Hinzu kommt, dass Beobachtungen aus unterschiedlichen Quellen häufig nicht konsistent zueinander sind. Um das Problem der Inkonsistenzen zu umgehen wird häufig auf sogenannte Re-Analysedaten zurückgegriffen. Diese Datensätze werden erzeugt, indem Beobachtungsdaten mithilfe komplexer Verfahren in Wetter-

vorhersagemodelle eingespeist (assimiliert), und so in Raum und Zeit konsistente Datensätze erstellt werden. Auch wenn die so entstandenen (Pseudo-) Beobachtungsdaten sehr nah an den wirklichen Messungen sind, so ist doch zu bedenken, dass sowohl Fehler des Assimilationsverfahrens als auch des verwendeten Modells in die Daten eingehen.

Simulationen mit numerischen Modellen der atmosphärischen Zirkulation oder gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen bieten eine Alternative zu den Beobachtungen. Durch stetige Verbesserung liefern diese Modelle mittlerweile ein in weiten Teilen vertrauenswürdigeres Abbild der Wirklichkeit. Die gewachsene Leistungsfähigkeit der Computer ermöglicht die Erzeugung von Datensätzen, die sowohl in der Auflösung als auch in der Anzahl und Länge den Erfordernissen der hier diskutierten Fragestellung genügen. Natürlich ist bei der Verwendung von Modellen immer zu beachten, dass sie nur ein unvollständiges und in einigen Teilen möglicherweise auch ungenügendes oder sogar unrichtiges Abbild der Wirklichkeit darstellen. Kritisches Hinterfragen der Ergebnisse und der identifizierten Mechanismen sowie ausgiebige Vergleiche der Modellergebnisse untereinander und mit vorhandenen Beobachtungen sind unabdingbar.

Ein wichtiger Vorteil von Modellsimulationen besteht darin, Sensitivitätsexperimente durchführen zu können. Während man mit den Beobachtungen nur eine Realisation des Systems mit allen vorhandenen Einflussfaktoren und Wechselwirkungen zur Verfügung hat, kann in Simulationen die Auswirkung einzelner Einflussfaktoren durch gezieltes Weglassen einzelner Faktoren untersucht werden. Die Konzeption dieser Sensitivitätsexperimente zur Untersuchung der gegebenen Fragestellung ist ein wesentlicher Bestandteil von Modellexperimenten.

Viele der hier vorgestellten Untersuchungen basieren auf der Analyse von sogenannten Ensemble Simulationen. Hierbei simulieren Zirkulationsmodelle mehrmals mit identischen Antriebsdaten den gleichen Zeitraum. Die einzelnen Simulationen werden jedoch mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestartet. Bedingt durch die internen Instabilitäten des Systems (dem internen Chaos) simuliert dann jede Integration ein eigenes »Wetter«, d.h. zu jedem Zeitpunkt sind die einzelnen Simulationen verschieden. Der zeitlich gemittelte Zustand ist aber in allen Simulationen (statistisch gesehen) gleich. Durch die Mittelung aller Ensemble Mitglieder kann dann die natürliche, durch interne Prozesse verursachte Variabilität herausgefiltert und so der Einfluss der Randbedingungen sichtbar gemacht werden, während er in den einzelnen Realisationen durch die natürliche (interne) Variabilität maskiert wird.

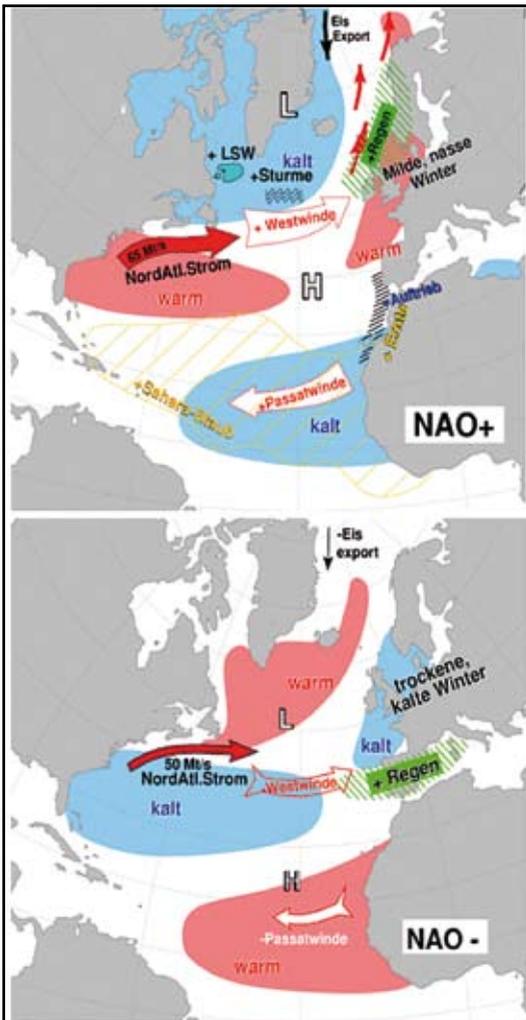


Abb. 2.4-2: Schema der Auswirkungen einer positiven (**oben**) und einer negativen (**unten**) NAO auf den atlantisch-europäischen Raum (Quelle: Kieke & Schott, IFM-GEOMAR, Kiel - mit freundlicher Genehmigung der Autoren).

Der ozeanische Einfluss auf die NAO

Anhand von Re-Analysedaten kann eine positive Rückkopplung zwischen stationären und transienten Störungen nachgewiesen werden (sog. Fraedrich Mechanismus, nach DRÉVILLON et al. 2001) und damit ein Zusammenhang zwischen der NAO und dem Tripolmuster der atlantischen SST-Anomalien (erweitert um den äquatorialen Südatlantik, siehe CZAJA & FRANKIGNOUL 2002, RODWELL & FOLLAND 2003). Auch wenn das dominantere Signal die Anregung der SST-Anomalien durch die Atmosphäre ist, so zeigt sich doch ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Störungen der NAO und vorausgehenden SST-Schwankungen: Winterliche NAO-Anomalien folgen SST-Störungen um bis zu sechs Monate nach.

Eine separate Untersuchung der tropischen und extratropischen SST-Anomalien deutet darauf hin, dass der wesentliche Beitrag vom extratropischen Teil stammt (RODWELL & FOLLAND 2003). Eine Erwärmung des tropischen Atlantiks scheint eine negative NAO Phase im frühen Winter hervorzurufen, wobei der tropische Antrieb wenig Zusammenhang mit dem extratropischen aufweist. In einer späteren Arbeit (FRANKIGNOUL & KESTENARE 2005), basierend auf einer etwas größeren Datenbasis und einer modifizierten Analysetechnik, werden die Aussagen leicht verändert: Als wesentliches Einflussgebiet wird nun der subtropische Atlantik genannt. Der nördliche Nordatlantik tritt in der Bedeutung zurück. Der Einfluss des tropischen Atlantiks wird als eine Fehldiagnose identifiziert.

Anhand von Simulationen mit einem atmosphärischen Zirkulationsmodell zeigen RODWELL et al. (1999), dass sich ein Großteil der interannualen und interdekadischen Variabilität der winterlichen NAO der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (1949–1993) rekonstruieren lässt, wenn die jeweiligen nordatlantischen Meeresoberflächentemperaturen vorgegeben werden. Für diese Untersuchungen wird ein Ensemble von sechs Simulationen ausgewertet. Für das Ensemble Mittel findet sich eine signifikant hohe Korrelation zwischen dem simulierten und dem beobachteten NAO Index (Abb. 2.4-3). Auch VENSKE et al. (1999) weisen den Zusammenhang zwischen atlantischer SST und der NAO nach, wobei dort allerdings nur der tropische/subtropische Teil der atmosphärischen Antwort bedeutend ist.

MEHTA et al. (2000) zeigen anhand eines größeren Ensembles (16 Mitglieder), dass die Korrelation zwischen dem SST-Antrieb und der NAO mit zunehmender Anzahl der Ensemblemitglieder deutlich stärker wird. Dies deutet auf eine mögliche langfristige Vorhersagbarkeit (2–3 Jahre) des europäischen Winterklimas mit

hilfe der nordatlantischen SST hin. Hier ist jedoch Vorsicht geboten, da, wie BRETHERTON & BATTISTI (2000) ausführen, die starke Filterung der internen atmosphärischen Variabilität durch die Ensemble Mittelung zu einer zu optimistischen Einschätzung führen kann.

Die Ergebnisse von RODWELL et al., VENSKE et al. und METHA et al. werden in vielen späteren Modell-Studien im Wesentlichen bestätigt. Auch wenn im Detail verschieden, so ist den meisten Studien gemein, dass (i) im Vergleich mit Beobachtungen die Antwort der Modell-Atmosphären auf die SST in den Extratropen zu schwach ist, während sie in den Subtropen/Tropen besser wiedergegeben wird und (ii) wie in den Beobachtungen eine deutliche Nichtlinearität der NAO auf SST-Anomalien zu verzeichnen ist, die dem Wirken der synoptischen Störungen zugeschrieben wird. Ferner zeigt sich, dass der sog. Re-emerging Mechanismus bedeutend für eine Vorhersagbarkeit der NAO durch

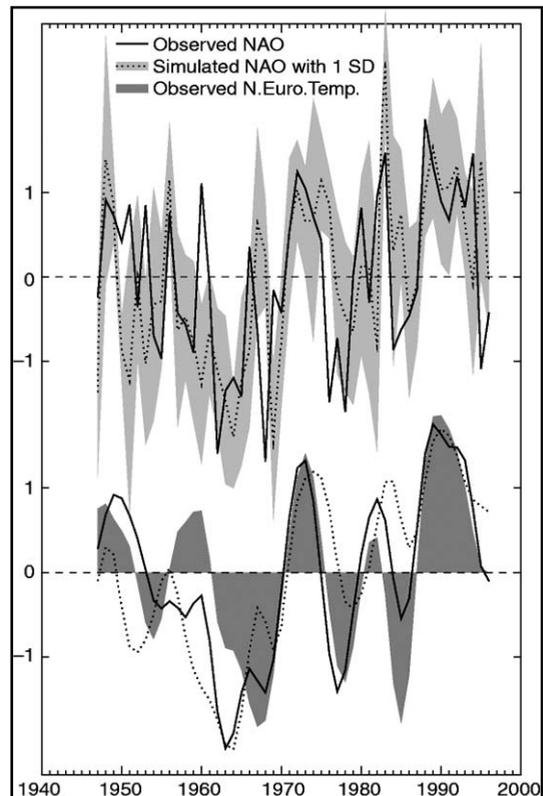


Abb. 2.4-3: Beobachteter (*durchgezogen*) und modellierter (*Ensemble Mittel; gepunktet*) NAO-Index (Dezember-Februar, 1947-97). **Oben:** Saisonmittel. Schattierung entspricht einer Standardabweichung. **Unten:** geglättete Zeitreihen (Tiefpass-gefiltert; Periode > 6,5 Jahre). Schattierung entspricht der beobachteten Bodentemperatur in Europa (Gebietsmittel) (aus RODWELL et al. 1999).

ozeanische Temperaturen sein kann (CASSOU et al. 2007). Bei diesem Mechanismus werden winterliche Störungen der Temperatur der obersten Ozean-Schicht durch eine Änderung der ozeanischen Schichtung im Sommer von atmosphärischen Einflüssen abgeschirmt und bleiben so bis zum kommenden Winter erhalten, in dem sie dann wieder auf die Atmosphäre wirken können.

SUTTON et al. (2000) untersuchen getrennt den Einfluss des subtropisch/tropischen und des extratropischen Teils des SST-Tripols auf die NAO, indem nur der entsprechende Teil der SST-Anomalien vorgeschrieben wird. Es zeigt sich, dass der subtropische SST-Antrieb einen Großteil der gesamten atmosphärischen Antwort erklären kann, während die extratropische SST keinen signifikanten Einfluss besitzt. Das tropische Signal kann verstärkt werden, wenn man der extratropischen Atmosphäre im Modell erlaubt, mit dem dortigen Ozean zu interagieren. Koppelt man im extratropischen Atlantik ein sog. mixed-layer Modell (Deckschichtmodell, d.h. ein Modell des oberen Ozeans ohne Advektion), so bildet sich ein auf die simulierte NAO abgestimmtes Tripolmuster des SST, das wiederum die NAO verstärken kann (z.B. OKUMURA et al. 2001, DRÉVILLON et al. 2003, CASSOU et al. 2004).

Einen deutlich längeren Zeitraum als andere Untersuchungen betrachten SUTTON & HODSON (2003), indem Ozeantemperaturen der Jahre 1871 bis 1999 als Randbedingung verwendet werden. Über den gesamten Simulationszeitraum zeigt sich ein Einfluss der SST auf die winterliche NAO. Sowohl die SST im Nordatlantik als auch diejenige im tropischen Pazifik (besonders El Niño) und im Indischen Ozean scheinen eine Rolle für das beobachtete Verhalten der NAO zu spielen. Jedoch ist die Bedeutung unterschiedlicher Regionen vom betrachteten Zeitraum und der betrachteten Zeitskala abhängig. Zum Teil kann es zu kompensierenden Effekten kommen: Auf sehr langer Zeitskala ist die NAO beeinflussende SST-Schwankung konsistent mit der Atlantischen Multi-dekadischen Oszillation, welche auf Veränderungen der Umwälzbewegung des Ozeans zurückgeführt wird. Im Zeitraum 1950-1999 scheinen SST-Trends im Indischen Ozean und im tropischen Pazifik wichtig. Auf interannueller Skala kann der Einfluss des ENSO Phänomens (El Niño-Southern Oszillation) (vgl. Kap. 2.3: Latif und 4.3: Bendix & Bendix) nachgewiesen werden. Allerdings scheint dieser nicht immer gleich stark zu sein. So erscheinen z.B. in den Jahren 1910–1960 die atlantischen Temperaturen deutlich wichtiger für die NAO. Einen Einfluss des Indischen Ozeans finden auch BADER & LATIF (2005) in einem gekoppelten Atmosphäre-Ozean Modell. Atmosphärische Wellenstörungen transportieren hier das Signal in den atlantischen Raum.

Schlussbetrachtung

Obwohl der Einfluss des Ozeans auf die NAO klein gegenüber anderen Mechanismen ist, lassen sich doch einige Hinweise darauf finden, dass ein solcher Einfluss existiert. Nach den hier vorgestellten Ergebnissen aus Analysen von Beobachtungs- und Modelldaten haben sowohl der Atlantik selbst als auch der Pazifik und der Indische Ozean einen Einfluss auf die NAO. Für den Atlantik scheinen die Extratropen und die Subtropen/Tropen unterschiedliche Auswirkungen zu haben. Unklarheit besteht allerdings bei der relativen Wichtigkeit der einzelnen Ozeanregionen sowie bei den physikalischen Mechanismen, die das ozeanische Signal an die NAO weitergeben.

Neben der bisher diskutierten einseitigen Wirkung des Ozeans auf die NAO und den damit verbundenen NAO-Schwankungen, kann der Einfluss des Ozeans auf die NAO auch dadurch begründet sein, dass beide Systeme in einem gekoppelten Phänomen zusammenwirken, das ohne eine der beiden Komponenten nicht bestehen würde. Ein solcher Mechanismus wird bereits von BJERKNES (1964) konzeptionell vorgeschlagen. GRÖTZNER et al. (1998) weisen, basierend auf Ergebnissen eines gekoppelten Atmosphäre-Ozean Modells, die mögliche Existenz einer derartigen gekoppelten quasi-periodischen Schwingung nach. Eine ähnliche Schwingung können auch BELLUCCI et al. (2008) in ihrem gekoppelten Modell nachweisen. Beide Fluktuationen unterscheiden sich aber zum einen in den unterschiedlichen Zeitskalen der Schwankungen (ca. 5 Jahre bei Bellucci et al. und ca. 12 Jahre bei GRÖTZNER et al.), zum anderen darin, dass das Phänomen bei GRÖTZNER et al. auf einer instabilen Wechselwirkung basiert und damit selbsterhaltend ist, während bei Bellucci et al. das System stark gedämpft wird und es deshalb durch andere Prozesse (z.B. durch zufällige Schwankungen) angeregt werden muss.

Basierend auf den hier vorgestellten Ergebnissen, scheint, über die Sensitivität der NAO auf SST-Schwankungen, Langfristprognose-Potential für Europa zu bestehen. Inwieweit man dieses Potential aber ausschöpfen kann und über welche Zeiträume eine erfolgreiche Vorhersage möglich ist, wird zu einem großen Teil auch davon abhängig, ob es gelingt, die zugrundeliegenden Mechanismen besser zu verstehen.

Literatur

- BADER J. & M. LATIF (2005): North Atlantic Oscillation Response to Anomalous Indian Ocean SST in a Coupled GCM. *J. Climate* 18, 5382–5389.
- BELLUCCI A., S. GUALDI, E. SCOCCIMARRO & A. NAVARRA (2008): NAO–ocean circulation interactions in a coupled general circulation model. *Clim. Dyn.*

- 31, 759–777.
- BJERKNES J. (1964): Atlantic air–sea interaction. *Adv. Geophys.* 10, 1–82.
- BRETHERTON, C. S. & D. S. BATTISTI (2000): An interpretation of the results from atmospheric general circulation models forced by the time history of the observed sea surface temperature distribution. *Geophys. Res. Lett.* 27, 767–770.
- CASSOU C., C. DESER, L. TERRAY, J. W. HURRELL & M. DRÉVILLON (2004): Summer sea surface temperature conditions in the North Atlantic and their impact upon the atmospheric circulation in early winter. *J. Climate* 17, 3349–3363.
- CASSOU C., C. DESER & M. A. ALEXANDER (2007): Investigating the impact of reemerging sea surface temperature anomalies on the winter atmospheric circulation over the North Atlantic. *J. Climate* 20, 3510–3526.
- CZAJA A. & C. FRANKIGNOUL (2002): Observed Impact of Atlantic SST Anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J. Climate* 15, 606–623.
- CZAJA A., A. W. ROBERTSON & T. HUCK (2003): The role of Atlantic ocean-atmosphere coupling in affecting North Atlantic Oscillation variability. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic significance and environmental impact*. Geophysical Monograph 134, 147–172.
- DRÉVILLON M., L. TERRAY, P. ROGEL & C. CASSOU (2001): Mid latitude Atlantic SST influence on European winter climate variability in the NCEP Reanalysis. *Clim. Dyn.* 18, 331–344.
- DRÉVILLON M., C. CASSOU & L. TERRAY (2003): Model study of the North Atlantic region atmospheric response to autumn tropical Atlantic sea-surface-temperature anomalies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 129, 2591–2611.
- FELDSTEIN S. B. (2000): The Timescale, Power Spectra, and Climate Noise Properties of Teleconnection Patterns. *J. Climate* 13, 4430–4440.
- FRANKIGNOUL C. & E. KESTENARE (2005): Observed Atlantic SST Anomaly Impact on the NAO: An Update. *J. Climate* 18, 4089–4094.
- GRÖTZNER A., M. LATIF & T. P. BARNETT (1998): A Decadal Climate Cycle in the North Atlantic Ocean as Simulated by the ECHO Coupled GCM. *J. Climate* 11, 831–847.
- KUSHNIR Y., W. A. ROBINSON, I. BLADÉ, N. M. J. HALL, S. PENG & R. SUTTON (2002): Atmospheric GCM Response to Extratropical SST Anomalies: Synthesis and Evaluation. *J. Climate* 15, 2233–2256.
- HURRELL J.W., Y. KUSHNIR, M. VISBECK & G. OTTERSEN (2003): An Overview of the North Atlantic Oscillation. In: HURRELL J.W., Y. KUSHNIR, G. OTTERSEN & M. VISBECK (Eds.) *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. Geophysical Monograph Series 134, pp. 1–35.
- LATIF M., M. COLLINS, H. POHLMANN & N. KEENLYSIDE (2006): A review of predictability studies of Atlantic sector climate on decadal time scales. *J. Climate* 19, 5971–5987.
- MEHTA, V. M., M. J. SUAREZ, J. V. MANGANELLO & T. L. DELWORTH (2000): Oceanic influence on the North Atlantic Oscillation and associated northern hemisphere climate variations: 1959–1993. *Geophys. Res. Lett.* 27, 121–124.
- MARSHALL J., Y. KUSHNIR, D. BATTISTI, P. CHANG, A. CZAJA, R. DICKSON, J. HURRELL, M. MCCARTNEY, R. SARAVANAN & M. VISBECK (2001): North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *Int. J. Clim.* 21, 1863–1898.
- OKUMURA Y., S. XIE, A. NUMAGUTI & Y. TANIMOTO (2001): Tropical Atlantic air sea interaction and its influence on the NAO. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1507–1510.
- ROWELL M. J., D. P. ROWELL & C. K. FOLLAND (1999): Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature* 398, 320–323.
- ROWELL M. J. & C. K. FOLLAND (2003): Atlantic air-sea interaction and model validation. *Ann. Geophys.* 46, 47–56.
- SUTTON R. T., W. A. NORTON & S. P. JEWSON (2000): The North Atlantic Oscillation—what role for the Ocean? *Atmospheric Science Letters* 1, 89–100.
- SUTTON R. T. & D. L. R. HODSON (2003): Influence of the Ocean on North Atlantic Climate Variability 1871–1999. *J. Climate* 16, 3296–3313.
- VENZKE R., M. ALLEN, R. SUTTON & D. ROWELL (1999): The atmospheric response over the North Atlantic to decadal changes in sea surface temperature. *J. Climate* 12, 2562–2584.
- WANNER H., S. BRÖNNIMANN, C. CASTY, D. GYALISTRAS, J. LUTERBACHER, C. SCHMUTZ, D. B. STEPHENSON & E. XOPLAKI (2001): North Atlantic Oscillation- concepts and studies. *Survey Geophys.* 22, 321–381.

Dr. Frank Lunkeit
Meteorologisches Institut - Universität Hamburg
Grindelberg 5 - 20144 Hamburg
frank.lunkeit@zmaw.de