

M. LATIF

3

Das El Niño/Southern Oscillation-Phänomen

The El Niño/Southern Oscillation Phenomenon

Zusammenfassung

Das El Niño/Southern Oscillation (ENSO)-Phänomen ist die stärkste kurzfristige natürliche Klimaschwankung auf Zeitskalen von einigen Monaten bis zu mehreren Jahren. Obwohl ENSO seinen Ursprung im äquatorialen Pazifik hat, wirkt es sich dennoch auf das globale Klima aus. ENSO resultiert aus der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und ist einige Monate im voraus vorhersagbar. Es besteht die Möglichkeit, dass der anthropogene Klimawandel die ENSO-Statistik beeinflusst.

Abstract

The El Niño/Southern Oscillation (ENSO) phenomenon is the strongest natural climate fluctuation on time-scales from a few months to several years. Although ENSO originates in the tropical Pacific it affects global climate. ENSO results from ocean-atmosphere interactions and is predictable several months in advance. Anthropogenic climate change may change the ENSO statistics.

1 Einleitung

Normalerweise herrscht im tropischen Pazifik ein markantes Gefälle der Meeresoberflächentemperatur längs des Äquators: Der Ostpazifik ist mit etwa 20 °C relativ kalt, im Westpazifik misst man recht hohe Temperaturen bis zu 30 °C (Abb. 3-1, mittleres Bild). Diese Differenz spiegelt sich in den Klimadaten beiderseits des äquatorialen Pazifiks wider (Abb. 3-2, mittleres Bild). Im Westen steigt die Luft über dem sehr warmen Wasser auf, was starke Wolkenbildung und ergiebige Niederschläge auslöst, denen die tropischen Regenwälder Indonesiens ihre Existenz verdanken. Auf der anderen Seite, über dem kalten östlichen Pazifik, sinken großräumig Luftmassen ab und schaffen trockene Bedingungen – Voraussetzung für die küstennahen Wüsten des westlichen Südamerikas.

Der äquatoriale Pazifik ist aber auch eine der Regionen des Weltozeans, die durch relativ starke Variabilität der Meeresoberflächentemperatur gekennzeichnet ist. Dabei bezeichnet man anomal warme Bedingungen im äquatorialen Ostpazifik als El Niño und die anomal kalten Phasen als La Niña. Sowohl El Niño als auch seine „kalte Schwester“ La Niña beeinflussen das Klima weit über den äquatorialen Pazifik hinaus. Fernwirkungen sind bis ins äquatoriale und südliche Afrika (siehe A. H. FINK, S. 121, dieses Heft) sowie über dem östlichen Südamerika und Nordamerika nachweisbar. In Europa sind die Auswirkungen hingegen nur schwach ausgeprägt, aber statistisch signifikant. Veränderungen in der Variabilität der Meeresoberflächentemperatur des äquatorialen Pazifik infolge des anthropogenen (durch den Menschen verursachten) Treibhauseffekts wären daher von globaler Reichweite.

2 El Niño

Mit El Niño bezeichnet man eine Erwärmung großer Teile des oberen tropischen Pazifiks, die im Mittel etwa alle vier Jahre auftritt. Das Wort „El Niño“ stammt aus dem Spanischen (El Niño: Das Christkind) und wurde von den peruanischen Küstenfischern bereits im vorletzten Jahrhundert geprägt. Diese beobachteten, dass alljährlich zur Weihnachtszeit die Meeresoberflächentemperatur anstieg, was das Ende der Fischfangsaison markierte, und die Fischer belegten zunächst dieses jahreszeitliche Signal mit dem Wort El Niño. In einigen Jahren allerdings war die Erwärmung besonders stark, und die Fische kehrten auch nicht wie sonst üblich am Ende des Frühjahrs wieder. Diese besonders starken Erwärmungen dauern typischerweise etwa ein Jahr lang an. Sie sind u. a. mit Veränderungen der tropischen Niederschlagsmuster verbunden, wie etwa Dürren in Südostasien und sintflutartigen Niederschlägen über dem westlichen Südamerika. Heute werden nur noch diese außergewöhnlichen Erwärmungen mit El Niño bezeichnet, welche in unregelmäßigen Abständen von einigen Jahren (im Mittel etwa alle vier Jahre) wiederkehren.

Die Abb. 3-1 (unteres Bild) zeigt die Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik, wie sie im Dezember 1997 während des letzten sehr starken El Niños beobachtet wurde. Der großskalige Charakter der Erwärmung ist deutlich ersichtlich: Sie erstreckt sich etwa über ein Viertel des Erdumfangs in Äquatornähe. Das für El Niño typische Erwärmungsmuster besitzt die stärksten Temperaturerhöhungen im äquatorialen Ostpazifik, mit Anomalien von über 5 °C vor der Küste Südamerikas, so dass sich der Temperaturgegen-

satz längs des Äquators deutlich abschwächt. Mit El Niño gehen auch Veränderungen in der Meeresoberflächentemperatur in anderen Regionen einher, wie beispielsweise eine Erwärmung des tropischen Indischen Ozeans oder eine Abkühlung des Nordpazifiks. Letztere werden durch eine veränderte atmosphärische Zirkulation in diesen Gebieten als Folge der El Niño Erwärmung im tropischen Pazifik hervorgerufen.

3 La Niña

Unter La Niña-Bedingungen (der Begriff La Niña wurde in Analogie zum Begriff El Niño gewählt) verschärft sich der Temperaturkontrast längs des äquatorialen Pazifik (Abb. 3-1, oberes Bild), und es bildet sich

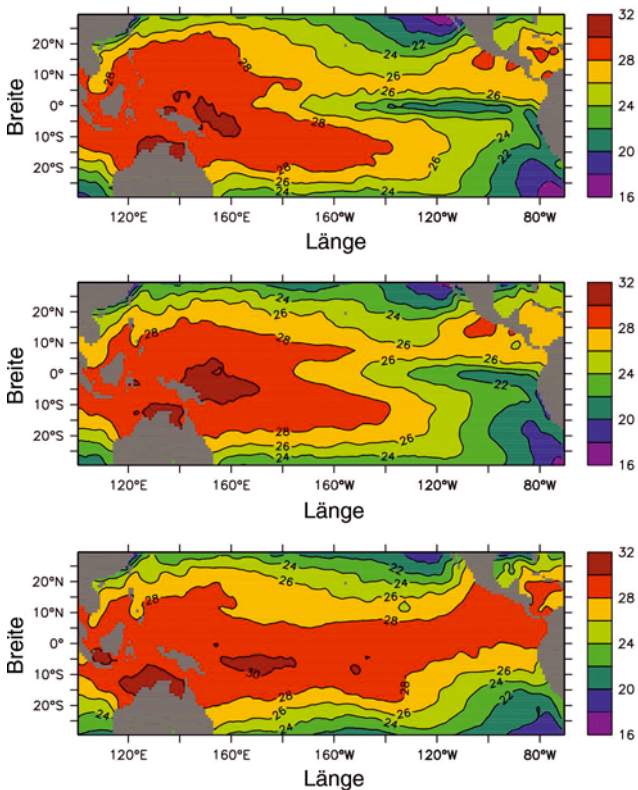


Abb. 3-1: Die Meeresoberflächentemperatur des tropischen Pazifik im Dezember. (a) La Niña-Bedingungen: 1998, (b) normale Bedingungen: 1996 und (c) El Niño-Bedingungen: 1997.

eine weit nach Westen reichende Kaltwasserzunge aus, mit relativ niedrigen Temperaturen im äquatorialen Ost- und Zentralpazifik. Das bedeutet erhöhte Niederschläge über dem westlichen Pazifik und Teilen Südostasiens, für das westliche Südamerika hingegen ungewöhnlich trockene Verhältnisse. Ein La Niña-Ereignis ist in erster Näherung als ein El Niño-Ereignis mit umgekehrtem Vorzeichen zu verstehen. Beide Phänomene sind Teil einer Oszillation, wobei El Niño die Warmphase und La Niña die Kaltphase der Oszillation beschreiben.

4 Wechselwirkung Ozean-Atmosphäre

Die „Southern Oscillation“ (Südliche Oszillation) stellt eine Art Druckschaukel zwischen dem südostasiatischen Tiefdruckgebiet und dem südostpazifischen Hochdruckgebiet dar und bestimmt die Stärke der Passatwinde längs des Äquators im Pazifik. Man weiß inzwischen, dass und wie sich die Oberflächentemperatur des äquatorialen Pazifik mit der Stärke der Passatwinde ändert. Unter dem Einfluss der Passatwinde quillt vor der Küste Südamerikas und längs des Äquators im östlichen Pazifik kaltes Wasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche, wodurch sich die relativ niedrigen Meeresoberflächentemperaturen in dieser Region erklären (Abb. 3-1). Umgekehrt treibt der Ost-West-Gegensatz der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Pazifik auch eine zusätzliche Komponente der Passatwinde an, die man als „Walker-Zirkulation“ bezeichnet (Abb. 3-2, mittleres Bild).

Eine anfängliche Erwärmung des Ostpazifiks und, damit verbunden, ein verminderter Ost-West-Gegensatz der Temperatur dämpfen die Southern Oscillation: Der Luftdruck über dem westlichen Pazifik steigt, während er über dem östlichen Pazifik sinkt – was die Walker-Zirkulation und damit die Passatwinde und schließlich den Auftrieb kalten Wassers im östlichen Pazifik abschwächt (Abb. 3-2, rechtes Bild). Dadurch steigt die Oberflächentemperatur in dieser Meeresregion noch weiter an. Schließlich gipfelt diese Art von instabiler Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre in einem El Niño-Ereignis mit ungewöhnlich hohen Temperaturen im Ostpazifik, einem stark reduzierten Tem-

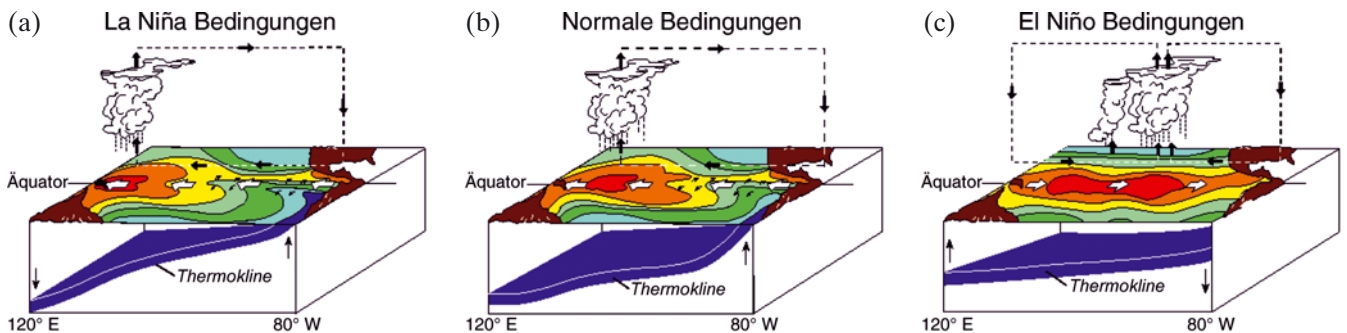


Abb. 3-2: Ozean-Atmosphäre-Wechselwirkungen während (a) La Niña, (b) im Normalzustand und (c) während El Niño. Thermokline: Grenzfläche zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser.

peraturgegensatz längs des Äquators (Abb. 3-1, unteres Bild) und einem „Einschlafen der Passatwinde“ längs des Äquators. Analog dazu entwickelt sich ein La Niña-Ereignis, wobei die Prozesse jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen ablaufen. La Niñas sind demnach durch einen verstärkten Temperaturgegensatz und anomal starke Passatwinde entlang des Äquators gekennzeichnet (Abb. 3-2, linkes Bild). Im Zusammenhang mit den Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur verschieben sich auch die großen Niederschlagsgebiete, was u. a. die Dürre in Südostasien und die sintflutartigen Niederschläge über dem westlichen Südamerika während eines El Niño-Ereignisses erklärt.

5 Wellenmechanismus

Nun erklärt diese „positive Rückkopplung“ zwischen Ozean und Atmosphäre, d. h. zwischen Temperaturgradient und Walker-Zirkulation, zwar das Wachstum und damit die Verstärkung einer anfänglichen Störung, nicht aber die oszillatorische Natur der Schwankungen der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Pazifik. Der Grund für die Phasenumkehr, also beispielsweise für das Umschwingen von einem El Niño- in einen La Niña-Zustand, liegt in der Wanderung langer ozeanischer Wellen längs des Äquators (Abb. 3-3). Flauen die Passatwinde während eines El Niño-Ereignisses ab, hat das zunächst direkte Folgen für den Ostpazifik: der Auftrieb kalten Wassers wird (durch „Kelvin-Wellen“) gedämpft und dadurch eine weitere Erwärmung gefördert. Hinzu kommt aber noch ein indirekter und zeitlich verzögerter Effekt:

Durch die abgeschwächten Passatwinde entstehen im Westpazifik „Rossby-Wellen“, die mit verstärktem Auftrieb von kaltem Wasser an die Oberfläche einhergehen und ihre maximale Amplitude einige Grad jenseits des Äquators besitzen. Die Rossby-Wellen wandern zunächst nach Westen und werden am Westrand des Pazifik in Kelvin-Wellen reflektiert, die das Signal längs des Äquators nach Osten tragen. Die äquatorialen Wellen sind mit vertikalen Bewegungen der Thermokline (Sprungschicht: diese ist die Grenzfläche zwischen warmen Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser) verbunden, die wiederum die Meeresoberflächentemperatur beeinflussen. Die äquatorialen Wellen beeinflussen aber die Meeresoberflächentemperatur nur im Ostpazifik, weil dort die Thermokline dicht unterhalb der Oberfläche liegt. Im Ostpazifik angekommen, kühlen die Kelvin-Wellen die Wassermassen ab und leiten den Umschwung zu einem La Niña-Ereignis ein.

Die Periode von etwa 4 Jahren, mit der die Meeresoberflächentemperatur oszilliert, ist daher maßgeblich durch die Beckenbreite des Pazifiks gegeben, welche die Laufzeit der äquatorialen Wellen bestimmt. Allerdings muss man die Überlagerung vieler Wellen betrachten, um die Periode zu erklären. Der Einfluss der Beckenbreite erklärt auch die im Vergleich recht kleine Oszillationsperiode von etwa 2 Jahren des nur etwa halb so großen äquatorialen Atlantiks. Der Indische Ozean besitzt keine El Niño-artige Oszillation, da er praktisch keine Ost-West-Asymmetrien längs des Äquators aufweist und infolge der Land-Meer Verteilung durch die Monsunwinde dominiert wird.

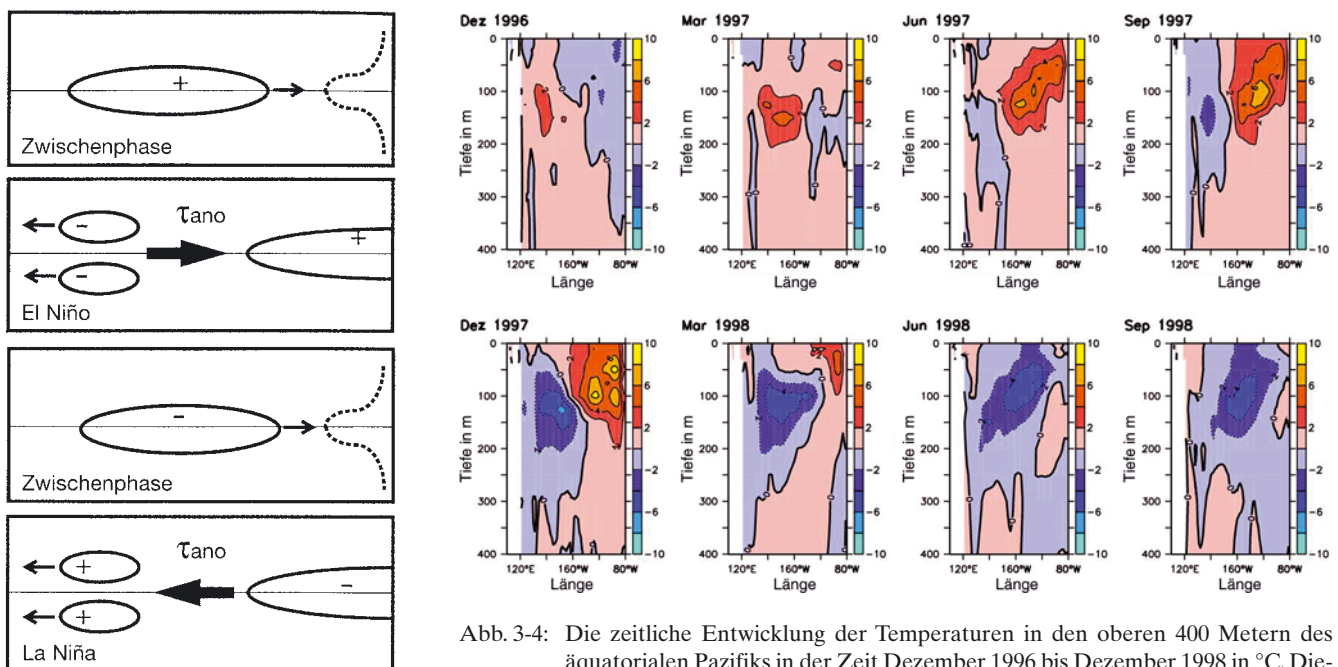


Abb. 3-3: Schematische Darstellung des Wellenmechanismus zur Erklärung der oszillatorischen Natur von ENSO.

Abb. 3-4: Die zeitliche Entwicklung der Temperaturen in den oberen 400 Metern des äquatorialen Pazifiks in der Zeit Dezember 1996 bis Dezember 1998 in °C. Diese Periode ist durch die Entwicklung eines starken El Niños und eines starken La Niñas gekennzeichnet. Die Temperaturanomalien sind in Abständen von 3 Monaten gezeigt. Man erkennt deutlich zunächst die ostwärtige Wanderung einer warmen Anomalie, gefolgt von der Wanderung einer kalten Anomalie. Es sind diese Anomalien, auf denen das Vorhersagepotenzial ENSOs basiert.

Die Wanderung ozeanischer Wellen lässt sich anhand von Temperaturmessungen der oberen 400-Meter-Schicht des äquatorialen Pazifik verfolgen (Abb. 3-4). Derartige Messungen werden inzwischen mit einem Netz von fest verankerten Bojen, dem sog. „TOGA-TAO Array“, routinemäßig gewonnen. So konnte man bereits im Dezember 1996, ein halbes Jahr vor dem Einsetzen des letzten großen El Niños, in etwa 100 bis 200 Metern Tiefe im äquatorialen Westpazifik eine warme Anomalie ausmachen, die langsam ostwärts wanderte. Diese Anomalie kann man mit einem Kelvin-Wellen-Paket identifizieren. Interessant ist auch die Tatsache, dass diese Wellen ihre stärkste Ausprägung in der Tiefe haben; man spricht daher auch von „internen“ oder „baroklinen“ Wellen. Das Wellenpaket erreichte im April 1997 den Ostpazifik; vier Monate später hatte sich dort die Meeresoberfläche infolge der Wechselwirkung mit der Atmosphäre bereits stark erwärmt und El Niño war in vollem Gang.

Die dadurch abflauenden Passatwinde verursachten ihrerseits Störungen im Westpazifik, verbunden mit ungewöhnlich niedrigen Temperaturen in der Tiefe. Diese kalten Temperaturanomalien, die man mit einem Rossby-Wellen-Paket identifizieren kann, bewegten sich nach der Reflektion am Westrand als Kelvin-Wellen-Paket nach Osten und lösten hier im Jahr 1998 eine La Niña-Phase aus. Wegen der herausragenden Rolle der Wechselwirkung Ozean-Atmosphäre und der damit engen Verbindung zwischen dem El Niño-Phänomen und der Southern Oscillation spricht man heute im allgemeinen vom **El Niño/Southern Oscillation (ENSO)-Phänomen**. Diese Bezeichnung deutet an, dass ENSO als eine Eigenschwingung des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre zu verstehen ist. Es ist gerade die Wechselwirkung von Ozean und Atmosphäre, welche die Entstehung des ENSO-Phänomen erst ermöglicht: Würden sich beispielsweise die Passatwinde während eines El Niño nicht abschwächen, gäbe es keine Rossby-Wellen-Pakete, die den Umschwung in die La Niña-Phase bewerkstelligen könnten.

6 Ökologische, volkswirtschaftliche, gesundheitliche Auswirkungen

Die regionalen und globalen Klimaschwankungen, die vom El Niño/Southern Oscillation Phänomen hervorgerufen werden, wirken sich auf Ökosysteme und auch auf die Wirtschaft vieler Staaten aus. Es ist deshalb nicht nur vom rein wissenschaftlichen, sondern auch vom wirtschaftlichen Standpunkt aus wichtig, Einblick in die Physik des Systems Ozean-Atmosphäre im äquatorialen Pazifik zu gewinnen und davon weiter zu längerfristigen Vorhersagen zu kommen. So hängen etwa der Fischfang vor der Küste Perus, die Maisernte in Zimbabwe oder das Auftreten bestimmter Krankheiten in verschiedenen Regionen der Erde von ENSO ab. Die Häufigkeit von Malaria in Kolumbien bei-

spielsweise ist mit dem Auftreten von El Niño verknüpft: Eine Häufung von Malariafällen geht deutlich mit El Niño-Ereignissen einher. Das anomal warme Klima in Kolumbien während El Niño-Episoden begünstigt die Vermehrung der entsprechenden Mückenarten, welche die Malaria übertragen, wodurch es zu mehr Malariainfektionen kommt. Der Kokosölpreis zeigt ebenfalls eine erstaunliche Korrelation mit dem Auftreten von El Niño: Etwa ein Jahr nach El Niño-Ereignissen schnellt der Kokosölpreis in die Höhe. Die Ursache für die Schwankungen im Kokosölpreis liegt in der extremen Dürre in Südostasien, wo Kokos vor allem angebaut wird. Die El Niño bedingten Missernten in Südostasien führen zu einer Verknappung von Kokosöl, wodurch sein Weltmarktpreis ansteigt. Es existieren zahlreiche andere gesellschaftlich relevante Auswirkungen von ENSO, die hier nicht weiter beschrieben werden können.

7 Vorhersagbarkeit von ENSO

Wie in Abschnitt 5 beschrieben, kann man die mit El Niño und La Niña einhergehenden Schwankungen der Oberflächentemperatur des tropischen Pazifiks als einen quasiperiodischen Zyklus verstehen, der im Prinzip vorhersagbar ist. Allerdings, bedingt durch die chaotische Natur des Klimasystems, verläuft dieser Zyklus nicht streng periodisch und kann deshalb nicht perfekt prognostiziert werden. Für einen Zeitraum von einigen Monaten bis zu einem Jahr jedoch lassen sich die Oberflächentemperaturen im äquatorialen Pazifik recht zuverlässig vorhersagen, und damit die mit ENSO verbundenen weltweiten klimatischen, ökologischen und ökonomischen Folgen.

Die Vorhersagen basieren auf statistischen und physikalischen Modellen. Letztere sind i. a. gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modelle. Da, wie auch die Wettervorhersage, die Kurzfristklimavorhersage, im mathematischen Sinne, ein Anfangswertproblem ist, muss der Zustand des Systems zu Beginn der Vorhersage bekannt sein. Mit Hilfe des TOGA-TAO-Arrays (http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_ds256.1.html) stehen wertvolle Informationen aus verschiedenen Tiefen des äquatorialen Pazifik zur Verfügung. Diese werden in die gekoppelten Modelle „assimiliert“, um einen möglichst dynamisch balancierten Anfangszustand für die Vorhersage zu erhalten.

Prognosen jahreszeitlicher Anomalien der Temperatur und der Niederschläge lassen sich grundsätzlich nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erstellen, wobei diese Wahrscheinlichkeit jeweils aus einem Ensemble von Vorhersagen abgeleitet wird (siehe PAETH, S. 107, dieses Heft). Dabei werden heute nicht nur die Anfangsbedingungen variiert, um ein Ensemble zu erstellen, sondern auch verschiedene Klimamodelle parallel eingesetzt. Dies geschieht, um auch den Einfluss von Modellfehlern zu erfassen. Interessanter-

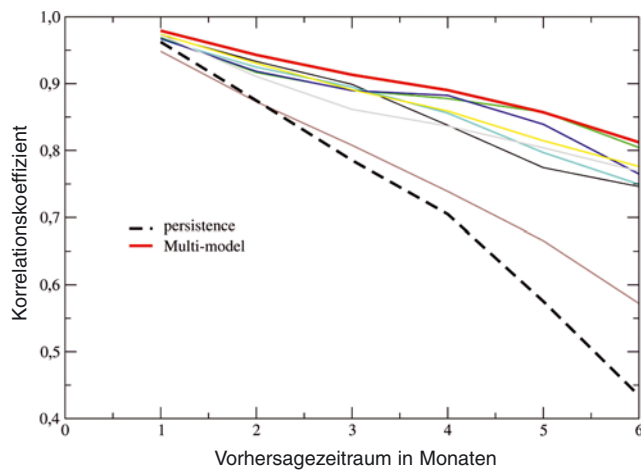


Abb. 3-5: Korrelationen der vorhergesagten und beobachteten Anomalien der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ostpazifik für einzelne Modelle und für das Ensemble-Mittel (rot) als Funktion des Vorhersagezeitraums (Monat), Mittel der Jahre 1980–2001.

weise zeigt sich, dass derartige Multi-Modell-Vorhersagen denen, die mit nur einem Modell durchgeführt werden, überlegen sind (Abb. 3-5).

Prognosen des Kurzfrisklimas unterscheiden sich von Wettervorhersagen dadurch, dass sie sich nicht auf detaillierte Wetterphänomene, wie etwa einzelne Hoch- oder Tiefdruckgebiete beziehen. Im Gegensatz hierzu beinhalten Klimaprognosen die Vorhersage der statistischen Momente, wie etwa die Mittelwerte beispielsweise der Temperatur oder des Niederschlags über eine Jahreszeit hinweg. Dennoch bedeuten Kurzfrisklimavorhersagen eine wesentliche Erweiterung der Wettervorhersage, weil der Einfluss der langperiodischen ozeanischen Schwankungen Vorhersagen über die Zeitskala der „internen Vorhersagbarkeit“ der Atmosphäre hinaus, die bei etwa zwei Wochen liegt, ermöglicht. Es werden seit einigen Jahren an mehreren Instituten routinemäßig ENSO-Vorhersagen durchgeführt. Dabei haben sich die Vorhersagen als sehr erfolgreich herausgestellt, so dass die durch ENSO bedingten Schadenssummen deutlich gesenkt werden konnten.

8 Hat ENSO einen Einfluss auf das Klima in Europa?

Während der Einfluss von ENSO auf zahlreiche Regionen der Erde, insbesondere in tropischen Breiten nachgewiesen ist (z. B. verstärkter Niederschlag in Teilen Südamerikas, Dürre in Südostasien, usw. während El Niño-Episoden), gibt es noch Unsicherheiten in der Bestimmung der Fernwirkung ENSOs auf Europa. Aus einer Studie von atmosphärischen Großwetterlagen ergibt sich, dass im Winter (Dezember, Januar, Februar) ein El Niño-Ereignis mit einer verstärkten Anzahl von Tagen mit zyklonalem Strömungsmuster über Mitteleuropa einhergeht, d. h. vermehrt Tiefdrucksysteme mit ihren typischen Wettererscheinungen das me-

teorologische Bild prägen. Dies äußert sich in kälteren Wintertemperaturen über Nordeuropa sowie verstärktem Winterniederschlag in einem Band von den Britischen Inseln bis zum Schwarzen Meer. Damit konsistent sind Ergebnisse aus einer Studie, die zeigt, dass insbesondere im Februar eines El Niño-Jahres auf den Britischen Inseln signifikant mehr Niederschlag fällt als im langzeitlichen Mittel. Allerdings muss dies nicht uneingeschränkt für alle El Niño-Ereignisse gelten, wie das Beispiel Winter 1997/98 gezeigt hat.

Hingegen kommt es laut dieser Studien bei La Niña-Ereignissen im Westen und Südwesten Europas zu geringerem Niederschlag, da sie eine gegenüber dem Wintermittelwert reduzierte Anzahl von zyklonalen Strömungstypen aufweisen. Aufgrund von Anomalien im Druckfeld, die durch El Niño (La Niña) hervorgerufen sind, wird ferner die Position des über Europa liegenden Endes der nordatlantischen Zyklonenzugbahn („jetstream“) beeinflusst, so dass die nordatlantischen Tiefs im Falle eines El Niño (La Niña)-Ereignisses einer nach Süden (Norden) verschobenen Route folgen. Modellsimulationen unterstützen diese Sichtweise.

Die mittleren Breiten sind durch eine hohe interne Variabilität gekennzeichnet, die sich aus der chaotischen Natur der Atmosphäre ableitet. Der Einfluss ENSOs auf Europa lässt sich daher nur anhand sehr langer Beobachtungsreihen nachweisen. Da solche Zeitreihen nur an einigen wenigen Stationen vorliegen, wird der Zusammenhang zwischen Tropen und mittleren Breiten zunehmend auch anhand von Klimamodellrechnungen untersucht. Mehrere Studien zeigen zwar, dass ENSO-Extreme das Strömungsfeld im atlantisch-europäischen Raum verändern können, diese aber verglichen mit den Änderungen im nordpazifischen Sektor wesentlich schwächer sind. Insbesondere reagiert die Modellatmosphäre über Europa nicht immer mit dem gleichen Antwortmuster auf El Niño- oder La Niña-Ereignisse. Unklar ist gegenwärtig ferner, welchen relativen Einfluss extratropische gegenüber tropischen Meeresoberflächentemperaturanomalien auf die atmosphärische Zirkulation in den mittleren Breiten haben und inwieweit dadurch möglicherweise der ENSO-Einfluss überdeckt wird. Darüber hinaus kann es auch einen indirekten ENSO-Effekt derart geben, dass ENSO zunächst über eine „atmosphärische Brücke“ Anomalien der Meeresoberflächentemperatur beispielsweise im Nordatlantik erzeugt, die dann ihrerseits die atmosphärische Zirkulation über Europa beeinflussen.

9 Beeinflussung ENSOs durch den anthropogenen Treibhauseffekt

Beobachtungen der Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik für die letzten 140 Jahre zeigen eine Verstärkung der interannualen (Jahr-zu-Jahr) Variabilität. So wurde beispielsweise das „Jahrhundert-El

Niño-Ereignis" der Jahre 1982/1983 noch vom El Niño der Jahre 1997/1998 übertroffen. Ferner ist eine Häufung von El Niño-artigen Situationen in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen gewesen. Es drängt sich daher die Frage auf, in wie weit der anthropogene Treibhauseffekt ENSO beeinflussen kann. Um diese Frage näher zu untersuchen, haben Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg eine Treibhaussimulation mit einem globalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell, das ENSO realistisch simuliert, analysiert. Dabei wurde das Modell im Jahre 1860 initialisiert und mit beobachteten Treibhausgaskonzentrationen angetrieben. Zukünftige Konzentrationen wurden bis zum Jahr 2100 nach einem BAU (**business as usual**)-Szenarium des IPCC (**I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange) vorgeschrieben.

Die Veränderungen in der Meeresoberflächentemperatur des tropischen Pazifiks infolge des anthropogenen Treibhauseffekts sind denen während El Niño-Ereignissen beobachteten sehr ähnlich: Der Ostpazifik erwärmt sich mit etwa 3 °C bis zum Jahr 2100 (Abb. 3-6) sehr viel stärker als der Westpazifik, dessen Temperatur sich nur um etwa 1 °C erhöht. Dies bedeutet, dass El Niño-ähnliche Situationen, also Situationen bei denen sich der Temperaturgegensatz zwischen West- und Ostpazifik deutlich abschwächt, künftig sehr viel häufiger auftreten werden, falls der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen, vor allem des CO₂, nicht drastisch gesenkt wird.

Dem langfristigen Erwärmungstrend im Ostpazifik überlagert ist eine zunehmende interannuale Variabilität, wobei sich vor allem die kalten Ereignisse (La Niñas) gegen Ende der Simulation verstärken, was deutlich anhand der Abb. 3-6 zu erkennen ist. Vorläufige Ergebnisse deuten an, dass Veränderungen in der Ozeanzirkulation die Veränderungen in der Statistik der interannualen Variabilität hervorrufen. Dabei spielt vor allem die schärfer werdende Thermokline eine wichtige Rolle. Die Intensivierung des vertikalen Temperaturgradienten innerhalb der Thermokline entsteht dadurch, dass sich infolge des anthropogenen Treibhauseffekts einerseits die Oberfläche stark erwärmt und sich aber andererseits die Wassermassen in etwa 200 m Tiefe infolge einer verstärkten meridionalen (Nord-Süd)-Zirkulation abkühlen. Die durch die äquatorialen Wellen erzeugten vertikalen Auslenkungen der Thermokline haben daher einen stärkeren Effekt auf die Meeresoberflächentemperatur, so dass die Variabilität der Meeresoberflächentemperatur in der Treibhaussimulation zunimmt. Allerdings ist die Stärke von El Niño-Ereignissen infolge bestimmter negativer atmosphärischer Rückkopplungen (vor allem der Wolkenbildung) begrenzt, so dass sich durch die schärfere Thermokline vor allem die La Niñas verstärken. Die Änderung der klimatischen Verhältnisse im äquatorialen Pazifik als Folge des anthropogenen Treibhauseffekts ist demnach in der Simulation mit dem Max-

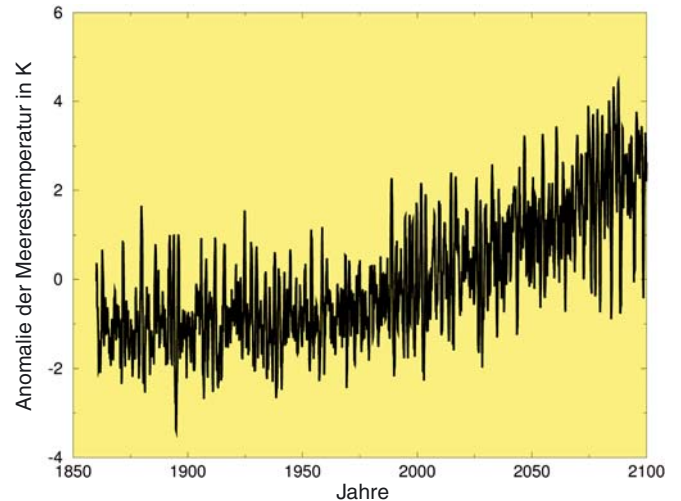


Abb. 3-6: Die Entwicklung der Abweichung der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ostpazifik vom langjährigen Mittel in einer Simulation mit dem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell des Max-Planck-Institut für Meteorologie unter Annahme eines „business as usual“ (BAU)-Szenariums.

Planck Modell durch signifikante Änderungen in den ersten drei statistischen Momenten (Mittelwert, Varianz, Schiefe) der Meeresoberflächentemperatur des äquatorialen Ostpazifik charakterisiert.

Mit den Veränderungen der Variabilität im tropischen Pazifik gehen auch Veränderungen in anderen Gebieten einher, wie beispielsweise eine Verstärkung der Variabilität des indischen Sommermonsuns. Es sollte aber betont werden, dass andere Modelle zu durchaus anderen Ergebnissen kommen, so dass es noch keinen Konsens bzgl. des Einflusses des Menschen auf ENSO gibt. So simuliert beispielsweise das gekoppelte Modell des Lamont-Doherty Observatory (USA) einen sich verstärkenden Ost-West Gegensatz der Oberflächentemperatur längs des Äquators, d. h. eine La Niña-artige Änderung infolge des anthropogenen Treibhauseffekts. Während im Max-Planck Modell der sog. „cloud-albedo feedback“ dafür sorgt, dass sich der Ostpazifik stärker erwärmt als der Westpazifik, ist im Lamont-Modell die negative Rückkopplung durch das Aufquellen kalten Wassers an die Meeresoberfläche dafür verantwortlich, dass sich der Ostpazifik im Vergleich zum Westpazifik abkühlt. Die meisten Modelle simulieren jedoch eine El Niño-artige Veränderung im tropischen Pazifik, wobei aber die Veränderungen in der Variabilität der Meeresoberflächentemperatur des Ostpazifiks recht uneinheitlich simuliert werden.

10 Der Treibhauseffekt, El Niño und die thermohaline Zirkulation

Wie wichtig Veränderungen in der Statistik des El Niño-Phänomens als Folge des anthropogenen Treibhauseffekts sein können, auch weit über die Grenzen des pazifischen Raums hinweg, hat die Studie des Max-

Planck-Instituts darüber hinaus gezeigt. Der Atlantik besitzt neben einer windgetriebenen Ozeanzirkulation auch eine dichtegetriebene sog. „thermohaline Zirkulation“. Diese ist eine vertikale Umwälzbewegung, mit der warmes Wasser an der Oberfläche nach Norden und kaltes Tiefenwasser nach Süden transportiert wird. Mit ihr verbunden ist ein nordwärtiger Wärmetransport von etwa 1 PW (10^{15} Watt), wodurch sich u. a. das recht milde winterliche Klima Nordeuropas erklärt. Der Antrieb der thermohalinen Zirkulation ist das Absinken sehr dichter Wassermassen in den hohen Breiten der Nordhalbkugel. Die Dichte des Meerwassers hängt von der Temperatur und dem Salzgehalt ab, so dass viele verschiedene Prozesse in der Atmosphäre, im Ozean und in der Eissphäre Einfluss auf die thermohaline Zirkulation nehmen können.

Die El Niño-artigen Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Pazifik führen über die Atmosphäre zu einem verstärkten Export von Frischwasser vom Atlantik zum Pazifik. Dadurch erhöht sich allmählich, im Laufe von einigen Jahrzehnten, der Salzgehalt des tropischen Atlantik. Diese Salzgehaltsanomalie wird mit der mittleren Ozeanzirkulation nach Norden transportiert, wodurch schließlich die Oberflächendichte in den hohen Breiten der Nordhemisphäre erhöht wird. Dies führt zu einer Stabilisierung der thermohalinen Zirkulation und wirkt somit

den lokalen destabilisierenden Prozessen (erhöhter Niederschlag, Eisschmelze), welche die Oberflächendichte reduzieren, entgegen. Daher ist in dem Max-Planck-Modell keine nennenswerte Abschwächung der thermohalinen Zirkulation selbst bei recht hohen Treibhausgas-Konzentrationen zu finden. Dieser Prozess der tropischen Stabilisierung der thermohalinen Zirkulation wird auch in anderen Modellen gefunden, so dass er als Prozess erster Ordnung zu betrachten ist. In den meisten Modellen jedoch dominieren die die thermohaline Zirkulation destabilisierenden Prozesse, wodurch sich in diesen Modellen die thermohaline Zirkulation als Folge der globalen Erwärmung abschwächt.

Literatur

- CAVIEDES, C. N., 2005: El Niño, Klima macht Geschichte. *Primus Verlag*, Darmstadt, 167 S, ISBN 3-89678-528-1.
- GEOMAX, 2002: El Niño und La Niña. Forschen an der Klimaschaukel. Sommerausgabe, Hrsg: Max-Planck-Gesellschaft, München,
- http://lernarchiv.bildung.hessen.de/archiv/mpg/geo_max/gmax04/GEOMAX4.pdf
- LATIF, M., 2004: Klima. *S. Fischer Verlag*, Frankfurt/Main, 127 S.
- PHILANDER, S. G. H., 1990: El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press*, San Diego, 293 S.