

C3-Mitarbeiter: Dr. Mojib Latif, Dr. Ben-
nert Machenhauer

Emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied:
Prof. Dr. Hans G. T. Hinzpeter

Fachbeirat: Prof. Dr. W.S. Broecker, New
York/USA · Prof. Dr. A. Chedin, Palaiseau ·
Prof. Dr. J. Egger, München · Prof. Dr.
W.L. Gates, Livermore, Californien/USA ·
Prof. Dr. B.J. Hoskins, Reading/UK · Prof.
Dr. R. Sadourny, Paris · Prof. Dr.
G. Schmitz, Kühlungsborn

Kuratorium: Prof. Dr. P.J. Crutzen, Mainz ·
Prof. Dr. L. Hajen, Hamburg · Dr. E. Lüb-
bert, Bonn · Dr. J. Lüthje, Hamburg · Dr. J.-
B. Mennicken, Meckenheim · Dr. G. von
Sengbusch, Geesthacht

Institutsgeschichte

Gegründet 1975 zur Erforschung der physi-
kalischen Grundlagen des Klimas. Das In-
stitut besteht aus drei unselbständigen Ab-
teilungen. Eine Abteilung (Hasselmann) be-
faßt sich mit allgemeinen Fragen der Klima-
dynamik, unter Berücksichtigung der We-
chselwirkungen im System Atmosphäre-
Ozean-Eis; die zweite (Graßl) untersucht
vorwiegend Prozesse in der Atmosphäre
und beim Austausch Ozean-Atmosphäre
mit Schwergewicht bei der Fernerkundung
mit Satelliten; die dritte (Bengtsson) widmet
sich überwiegend der verbesserten Model-
lierung der allgemeinen Zirkulation der At-
mosphäre mit Schwerpunkten bei der Wech-
selwirkung Biosphäre-Atmosphäre und der
Darstellung von Wolkenprozessen.

Aktueller Forschungsschwerpunkt

El Niño/Southern Oscillation

Die stärkste natürliche Klimaschwankung
auf Zeitskalen von einigen Monaten bis zu
mehreren Jahren ist das El Niño/Southern
Oscillation-Phänomen (ENSO). Obwohl
ENSO seinen Ursprung im tropischen Pazi-
fik hat, beeinflusst es nicht nur das tropische
Klima, sondern auch das Weltklima. Außer-

dem besitzt ENSO weitreichende Auswir-
kungen auf die tropischen Ökosysteme und
auf die Volkswirtschaft verschiedener Staa-
ten, vor allem in den Tropen. ENSO ist da-
her nicht nur von grundlegendem wissen-
schaftlichen, sondern auch von großem öf-
fentlichen Interesse.

Mit El Niño bezeichnet man eine großskali-
ge Erwärmung der Deckschicht des gesam-
ten 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 peruani-
schen Küstenfischern bereits im letzten
Jahrhundert geprägt. Diese beobachteten,
daß alljährlich zur Weihnachtszeit die Meer-
soberflächentemperatur anstieg, was das
Ende der Fischfangsaison anzeigte. Die Fi-
scher belegten daher zunächst dieses jahres-
zeitliche Signal mit dem Wort El Niño. In
einigen Jahren allerdings war die Erwärmung
besonders stark, und die Fische kamen
nicht wie sonst üblich am Ende des
Frühjahrs wieder. Diese besonders starken
Erwärmungen dauern typischerweise etwa
ein Jahr an und wiederholen sich in unregel-
mäßigen Abständen von einigen Jahren, im
Mittel etwa alle vier Jahre. Heute werden
nur noch diese außergewöhnlichen Erwärmun-
gen mit El Niño bezeichnet. Eine aus-
führliche phänomenologische und theoretische
Beschreibung des El Niño findet man
in dem 1990 erschienenen Buch von S. G. H.
Philander.

Abbildung 1 zeigt die anomale Meeresober-
flächentemperatur, die im Dezember 1997
während des letzten El Niños beobachtet
wurde. Der großskalige Charakter der Erwärmung
ist auffällig: Die Erwärmung erstreckt sich
über etwa ein Viertel des Erd-
umfangs in Äquatornähe. Das für El Niño
typische Erwärmungsmuster weist die stärk-
sten Temperaturerhöhungen im äquatorialen
Ostpazifik auf: Die Temperaturanoma-
lien vor der Küste Südamerikas betragen
über 5°C. Man findet aber auch Verände-
rungen in der Meeresoberflächentemperatur
in anderen Regionen, z. B. eine Erwärmung
des tropischen Indischen Ozeans oder eine
Abkühlung des Nordpazifiks. Letztere sind
eine Folge der veränderten atmosphärischen

Anomalie der Meeresoberflächentemperatur Dezember 1997

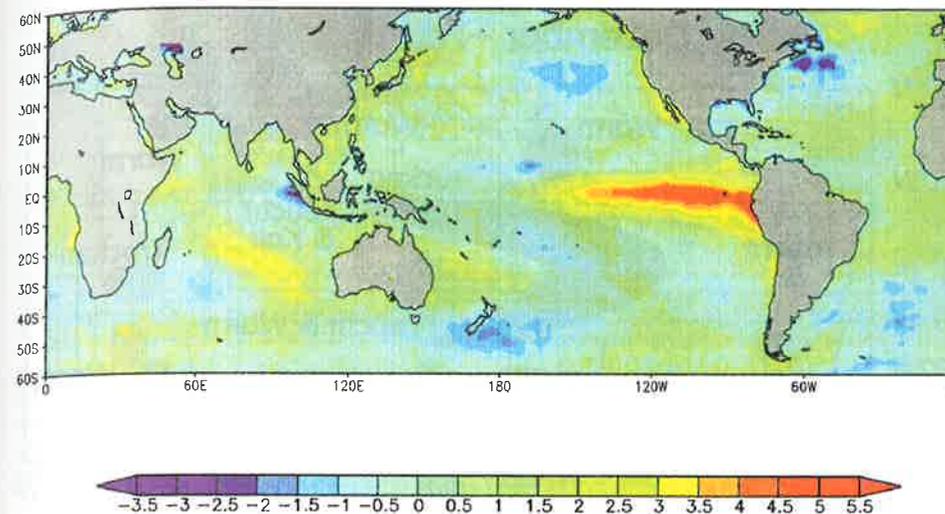


Abb. 1: Anomale Meeresoberflächentemperatur (in °C),
beobachtet im Dezember 1997 während des letzten El
Niños.

Zirkulation, die durch die Erwärmung im
tropischen Pazifik verursacht wird.

El Niño zeigt vielfältige klimatische Auswir-
kungen (Abb. 2). Südostasien und Nord-
ostaustralien leiden unter starken Dürren,
während es auf der anderen Seite des Pazi-
fiks über dem westlichen Südamerika zu
sintflutartigen Regenfällen kommt. Auswir-
kungen des El Niño findet man auch über
Indien, dem östlichen Äquatorialafrika,
dem südlichen Afrika und über Nord- bzw.
Südamerika; in Europa sind sie dagegen
schwach und im allgemeinen statistisch
nicht signifikant.

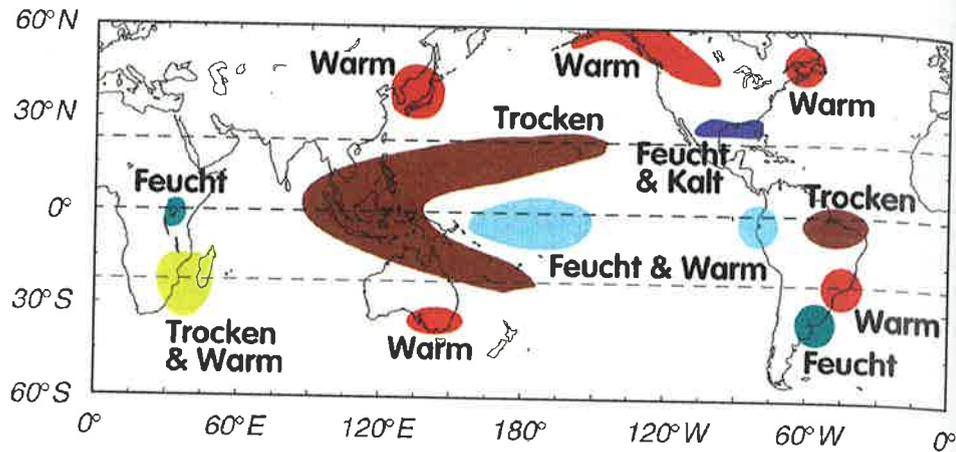
El Niño wirkt sich auf die Volkswirtschaften,
Gesundheitsbedingungen und die allge-
meinen Lebensumstände vieler Staaten aus.
Zum Beispiel zeigt der Kokosölpreis eine
ausgeprägte Korrelation mit dem Auftreten
von El Niño. Etwa ein Jahr nach einem El
Niño schnell er wegen extremer Dürre in
den Anbaugeländen Südostasiens in die Hö-
he. Durch El Niño bedingte Mißernten in
Südostasien führen also zum Anstieg des
Weltmarktpreises. Es existieren aber auch

zahlreiche andere gesellschaftlich relevante
Auswirkungen des El Niño. So steht z. B.
die Häufigkeit von Malaria in Kolumbien
ebenfalls mit dem Auftreten von El Niño in
enger Beziehung, anormal warmes Klima
während El Niño-Episoden begünstigt die
Vermehrung der malariaübertragenden
Mückenarten.

El Niño ist eng mit der Southern Oscillation
verknüpft, einem atmosphärischen Phäno-
men, das bereits in den zwanziger Jahren
von Sir Gilbert Walker beschrieben wurde.
Die Southern Oscillation kann man als eine
Art Luftdruckschaukel verstehen, mit ent-
gegengesetzten Bodendruckvariationen in der
westlichen und in der östlichen Hemisphäre.
Abbildung 3 verdeutlicht diesen Sachver-
halt. Dargestellt ist die Korrelation der
jährlichen Druckanomalien an allen Puncten
der Erde mit der Druckanomalie in Dja-
karta (Indonesien). Signifikante Korrelatio-
nen existieren nicht nur in der Nähe der Re-
ferenzstation Djakarta, sondern auch an
weit entfernten Lokalitäten, ein Ausdruck
des globalen Charakters der Southern Os-
cillation. Während eines El Niños kommt es
beispielsweise zu einer Erhöhung des
Drucks über Südostasien und dem westli-
chen Pazifik, während er im östlichen Pazi-

El Niño Auswirkungen

Dezember - Februar



Juni - August

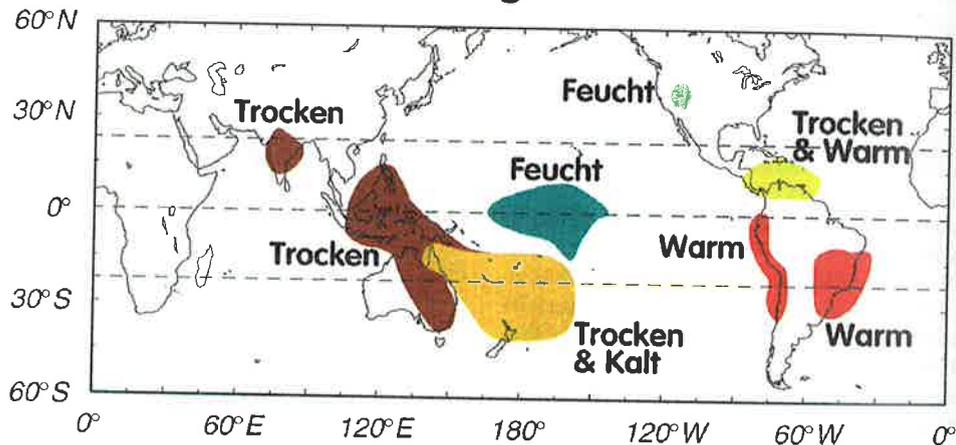


Abb. 2: Globale klimatische Auswirkungen eines El Niños.

fik sinkt. Dadurch werden der Druckgegensatz über dem Pazifik geringer und die Passatwinde schwächer.

Die enge Verbindung zwischen El Niño und der Southern Oscillation hat 1969 als erster Bjerknes erkannt und die Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre für die Klimavariabilität

im pazifischen Raum hervorgehoben. Abbildung 4 zeigt dies anhand von zwei einfachen Indizes: der Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik und dem sogenannten Southern Oscillation Index (SOI), der Druckdifferenz zwischen den beiden Zentren der Southern Oscillation (Darwin/Australien and Tahiti). Die beiden Zeitreihen variieren außer Phase: Positive Anomalien der Meeresoberflächentemperatur (El Niño-Phasen) fallen mit ne-

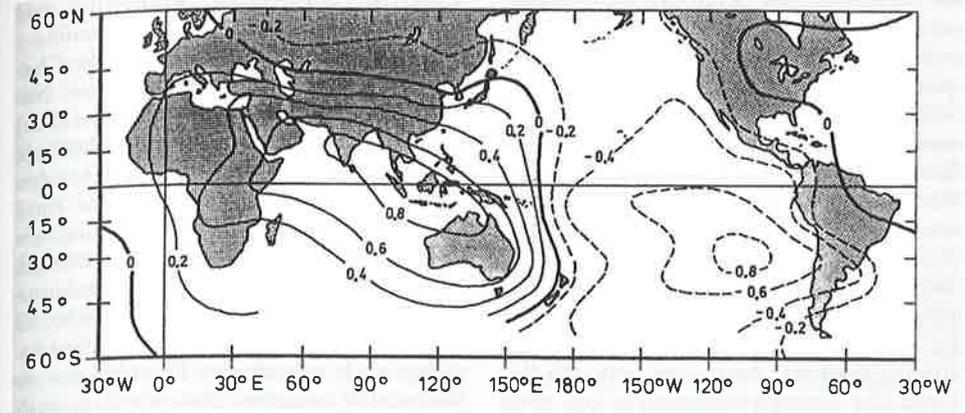
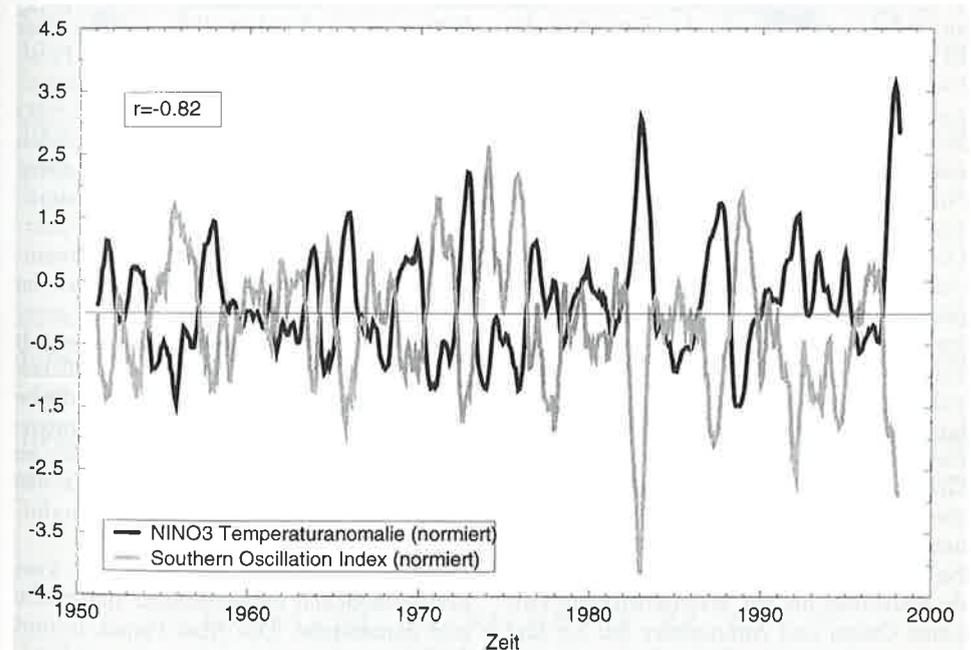


Abb. 3: Die Southern Oscillation. Dargestellt ist die Korrelation jährlicher Oberflächendruckanomalien mit denen in Djakarta (Indonesien). Gestrichelte Linien deuten negative Korrelationen an.

gativen Anomalien im SOI zusammen. Da der SOI ein Maß für die Stärke der Passatwinde über dem Pazifik ist, sind El Niño-Ereignisse mit abgeschwächten Passatwinden gekoppelt. Bjerknes erkannte dies und führte die Variationen in der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ostpazifik auf windinduzierte Veränderungen in der Ozeandynamik zurück. Variationen im Wärmeaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre hingegen wirken dämpfend auf

Abb. 4: Zeitreihen der anomalen ostpazifischen Meeresoberflächentemperatur (Niño-3-Index) und des Southern Oscillation Index (SOI). Beide Zeitreihen sind mit einem 5-Monats-Gleitmittel gefiltert.



die Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen. Wegen der engen Verbindung zwischen El Niño und Southern Oscillation spricht man heute im allgemeinen vom El Niño/Southern Oscillation (ENSO-)Phänomen.

Bjerknes erkannte außerdem, daß die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre im Bereich des tropischen Pazifiks instabil sind, d. h., daß anfängliche Störungen des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre verstärkt werden. Nehmen wir an, daß sich der Ostpazifik infolge einer Störung erwärmt, dann verringert sich dadurch der Temperaturgegensatz von etwa 10°C zwischen dem West- und Ostpazifik. Der Westpazifik ist mit etwa 30°C Meeresoberflächentemperatur deutlich wärmer als der Ostpazifik bei etwa 20°C . Die Störung führt zu einer Reduktion des Druckgradienten in der Atmosphäre, was eine Abschwächung der Passatwinde und damit einen reduzierten Auftrieb des kalten Wassers im Ostpazifik nach sich zieht. Hierdurch steigt die Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik weiter an, und die Passatwinde werden weiter abgeschwächt. Es ist diese Art von positiver Rückkopplung zwischen Ozean und Atmosphäre, die das Entstehen der El Niños erst ermöglicht.

Ein weiterer wichtiger Faktor sind äquatoriale Wellen, deren Bedeutung für El Niño bereits 1975 von Wyrtki hervorgehoben wurde. Er zeigte, daß das Auftreten von El Niño mit der Wanderung von sogenannten äquatorialen Kelvinwellen eng verknüpft ist. Die Wellen werden durch die Abschwächung der Passatwinde über dem Westpazifik ausgelöst und wandern dann ostwärts. Im Ostpazifik reduzieren sie den Auftrieb kalten Wassers an die Oberfläche, wodurch sich die Oberfläche erwärmt. Diese Wirkung haben die äquatorialen Wellen nur im Ostpazifik, da dort die Thermokline (die Grenzfläche zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser) dicht unterhalb der Meeresoberfläche liegt. Den Kelvinwellen kommt also eine entscheidende Bedeutung bei der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre zu: Sie sind das entscheidende Bindeglied zwischen

Windveränderungen im Westpazifik und Temperaturveränderungen im Ostpazifik.

In Abbildung 4 ist der oszillatorische Charakter von ENSO deutlich zu erkennen. Neben den El Niño-Warmphasen treten ebenso häufig sogenannte La Niña-Kaltphasen auf. ENSO stellt somit einen Zyklus dar. Schopf und Suarez (1988) leiteten einen derartigen Zyklus aus der Wanderung verschiedener äquatorialer Wellen ab. Danach werden infolge von Windschubveränderungen während ENSO-Extremen (El Niño, La Niña) neben den oben genannten Kelvinwellen auch sogenannte Rossbywellen im Westpazifik ausgelöst. Diese wandern westwärts, werden am Westrand als Kelvinwellen reflektiert und erreichen dann mit einer entsprechenden Zeitverzögerung den äquatorialen Ostpazifik. Dort verändern sie die Meeresoberflächentemperatur in dem Sinne, daß die anfängliche Anomalie geschwächt und schließlich im Vorzeichen umgekehrt wird. Instabile Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre führen zu einem Anwachsen dieses Signals. Die Phasenumkehr wird schon während eines Extremzustandes eingeleitet. So lösen die Windschubveränderungen während eines El Niños bereits Rossbywellen aus, die über die genannten Wellenvorgänge später zu einer Abkühlung im östlichen Äquatorialpazifik führen. Die mittlere Periode von ENSO wird nach diesem einfachen konzeptuellen Modell im wesentlichen von der Beckenbreite des Pazifiks bestimmt. Dieser natürliche Wellenzyklus wird durch das „Wetter-Rauschen“ im gekoppelten System Ozean-Atmosphäre (ähnlich einer Schaukel im Wind) ständig angefacht.

Dieser einfache Oszillator stellt sicherlich eine grobe Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar, erfaßt aber die wesentliche ENSO-Dynamik. Durch dieses Prototypmodell wird ersichtlich, daß ENSO bis zu einem bestimmten Grad vorhersagbar sein sollte – ein Ergebnis von enormer praktischer Bedeutung.

Prinzipiell kann man zwei Arten von Vorhersagemodellen unterscheiden: statistische und dynamische. Das Max-Planck-Institut für Meteorologie hat sich an der erfolgrei-

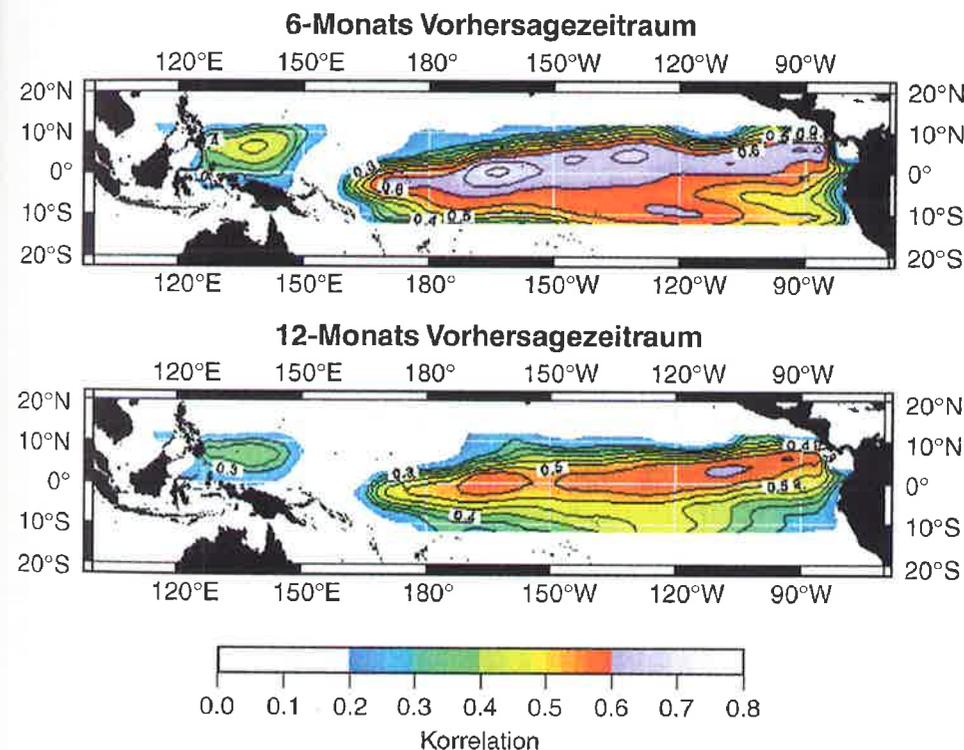
chen Entwicklung beider Arten von Modellen beteiligt. Hier soll im weiteren nur auf die dynamischen Modelle eingegangen werden.

ENSO- und Wettervorhersagen werden ähnlich durchgeführt, d. h., sie stellen ein sogenanntes Anfangswertproblem dar. Für ENSO Vorhersagen genügt allerdings nicht ein übliches atmosphärisches Wettervorhersagenmodell, es müssen gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle verwendet werden. Der ozeanische Anfangszustand kann auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt werden. Man kann z. B. den vergangenen Zeitverlauf der beobachteten Windschubspannungen heranziehen, um den Ozean anzutreiben und die Vorhersagen zu initiali-

sieren. Diese Methode liefert eine gute Präkonditionierung des Ozeans, da Veränderungen seiner Dichtestruktur sich vor allem auf Windschubveränderungen zurückführen lassen. Andere Verfahren benutzen den Verlauf der beobachteten Meeresoberflächentemperaturen, und wiederum andere Methoden assimilieren die aktuell beobachtete

Abb. 5: Vorhersagegüte des SIO/MPI-gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modells. Dargestellt sind die Korrelationen der vorhergesagten mit den beobachteten Meeresoberflächentemperaturanomalien. Das obere Bild zeigt die Korrelationen für einen Vorhersagezeitraum von sechs Monaten, während das untere Bild die Korrelationen für einen Vorhersagezeitraum von zwölf Monaten zeigt.

Korrelation der vorhergesagten Meeresoberflächentemperaturanomalien mit den entsprechenden Beobachtungen von 1981 bis Mitte 1996



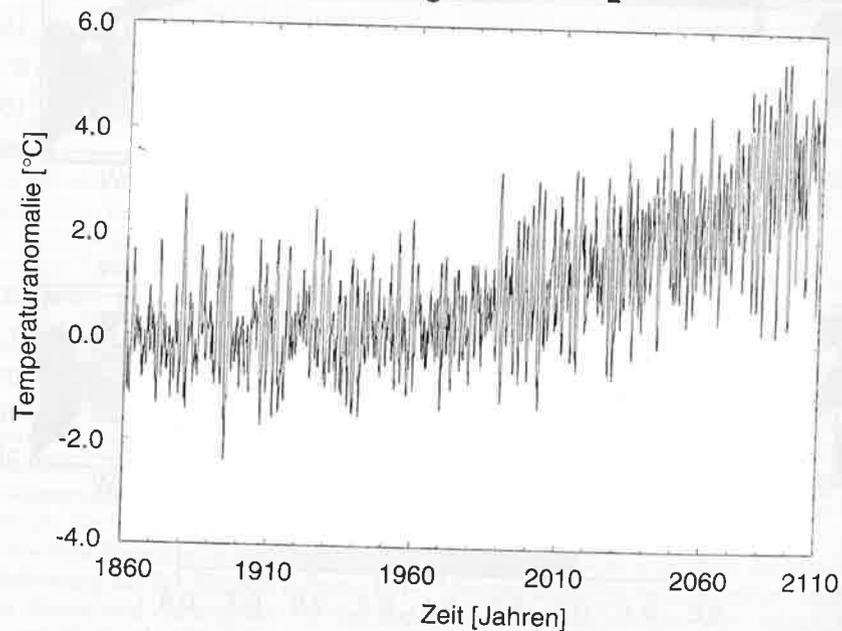
dreidimensionale ozeanische Dichtestruktur ins Ozeanmodell. Die erforderlichen Daten liefert ein Netz von fest verankerten Bojen im Äquatorialpazifik (das sog. TAO-array), welches Temperaturen bis zu Tiefen von bis 500m mißt.

Der wichtigste ENSO-Parameter, die Anomalie der Oberflächentemperatur des Meeres im Ostpazifik, kann mit Modellen, die am MPI für Meteorologie und anderen Einrichtungen entwickelt wurden, etwa für ein Jahr im voraus mit zufriedenstellender Genauigkeit vorhergesagt werden. Inzwischen werden ENSO-Vorhersagen routinemäßig von Regierungen benutzt, um beispielsweise Entscheidungen für den Anbau landwirtschaftlicher Produkte zu treffen. Die Güte von ENSO-Vorhersagen ist in der Abbildung 5 dargestellt durch die Korrelation zwischen der Vorhersage eines vereinfachten Ozean-Atmosphäre-Modells und den beobachteten Anomalien der Meeresober-

flächentemperatur im Äquatorialpazifik. Die Ergebnisse sind aus einem Vorhersageensemble berechnet, das den Zeitraum 1981–1996 umfaßt, wobei in jedem Monat eine Vorhersage initialisiert wurde. Bei einem Vorhersagezeitraum von zwölf Monaten liegen die Korrelationen fast im gesamten Äquatorialpazifik oberhalb von 0,5, bei einem von sechs Monaten sogar über 0,6. Da Veränderungen in der Meeresoberflächentemperatur im Äquatorialpazifik eng mit Veränderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags über vielen Landregionen verbunden sind (siehe Abb. 2), sind erfolgreiche Vorhersagen gleichbedeutend mit der Fähigkeit, dies auch für klimatische Veränderungen über vielen Regionen der Erde tun

Abb. 6: Zeitreihe der Meeresoberflächentemperaturanomalie (in °C) im äquatorialen Ostpazifik (Niño-3-Index) in der Treibhaussimulation.

Entwicklung der Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell ECHAM4/OPYC bei ansteigendem CO₂



zu können. Allerdings ist die Güte der Vorhersage nicht immer gleich. So waren z.B. die Bedingungen der achtziger Jahre deutlich besser vorhersagbar als die der neunziger Jahre. Man vermutet, daß dekadische Schwankungen (d.h. Änderungen auf der Zeitskala von Jahrzehnten) der großskaligen Ozeanzirkulation zu der dekadischen Modulation der Vorhersagegüte führen. Beobachtungen der Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik über die letzten 100 Jahre zeigen eine Verstärkung der sogenannten interannualen Variabilität, d.h. der Schwankungen von Jahr zu Jahr. So wurde z.B. das „Jahrhundert-El Niño-Ereignis“ der Jahre 1982/1983 noch vom „El Niño grande“ 1997/1998 übertroffen. Ferner wird eine Häufung von El Niño-ähnlichen Anomalien in den neunziger Jahren beobachtet. Es stellt sich dann die Frage, ob der anthropogene Treibhauseffekt Änderungen des El Niño verursacht haben könnte. Um diese Frage näher zu untersuchen, haben Timmermann und Mitarbeiter 1998 eine Treibhaussimulation mit einem globalen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modell, das ENSO realistisch simuliert und z.B. den El Niño grande erfolgreich vorher-

gesagt hat, näher analysiert. Das Modell wurde im Jahre 1860 initialisiert und bis zum Jahr 2100 integriert. Bis 1990 wurde es mit beobachteten Treibhausgaskonzentrationen, danach mit den dem Szenarium A des IPCC entsprechenden Konzentrationen angetrieben.

Die Veränderungen in der Jahresmittel-Meeresoberflächentemperatur des tropischen Pazifiks infolge des anthropogenen Treibhauseffekts sind dem El Niño-Anomalienmuster sehr ähnlich: Der Ostpazifik erwärmt sich bis zum Jahr 2100 um etwa 3°C wesentlich stärker als der Westpazifik, dessen Temperatur nur um etwa 1°C steigt (Abb. 6). Somit würden El Niño-ähnliche Zustände bei weiterhin ungebremstem CO₂-Anstieg künftig die Norm statt einer Ausnahme bilden. Weiter erkennt man, daß den langfristigen Erwärmungstrend im Ostpazifik eine zunehmende interannuale Variabilität überlagert ist, wobei sich vor allem die kalten Ereignisse (La Niñas) verstärken. Die Veränderungen in der Statistik der interannualen Variabilität sind nach ersten Untersuchungen auf Veränderungen in der Ozeanzirkulation zurückzuführen (M. Latif, J. Oberhuber, A. Timmermann).