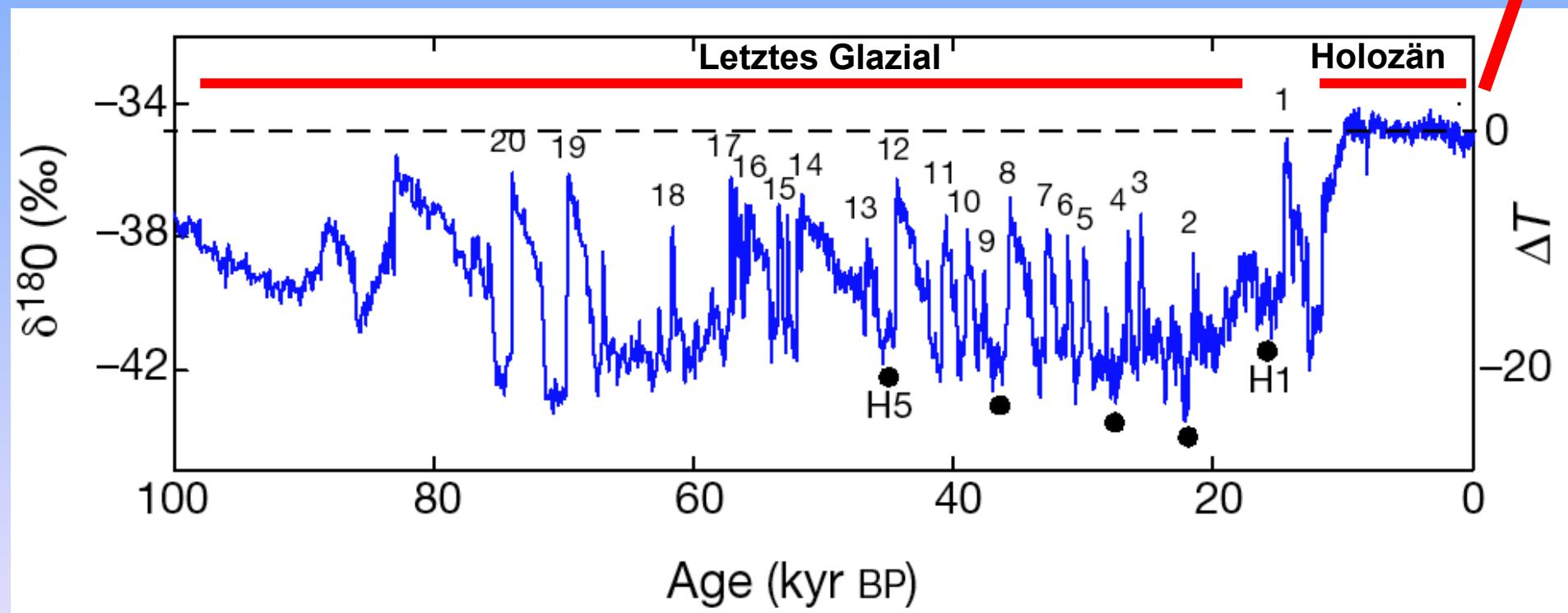


# 5. Interne Variabilität

- Allgemeine Bemerkungen
- Stochastisches Klimamodell
- Nordatlantische Oszillation
- Atlantische Multidekadische Oszillation
- El Niño/Southern Oscillation

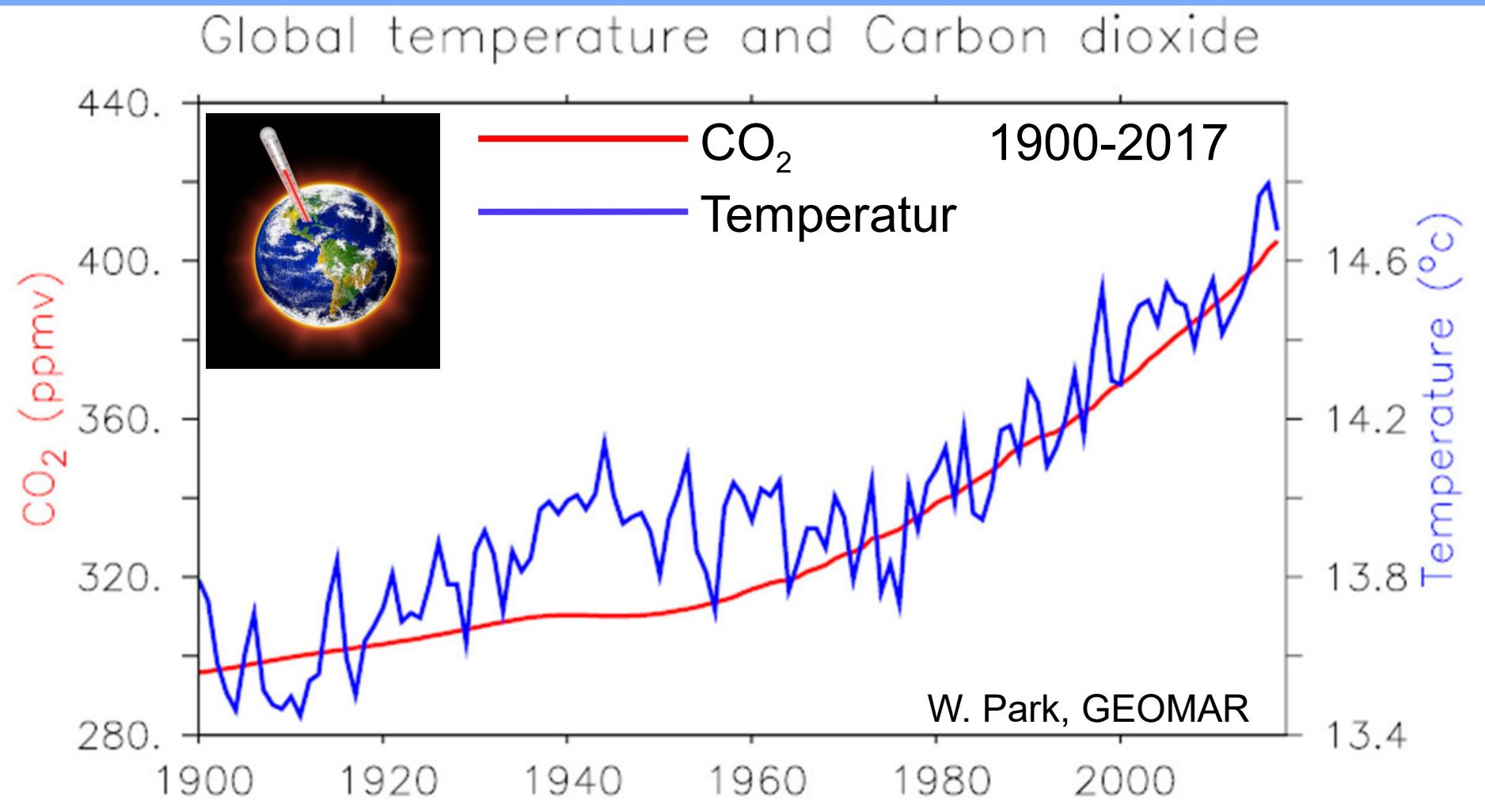
# Interne und externe Variabilität in den letzten 100.000 Jahren

Grönland-Temperatur während der letzten 100.000 Jahre

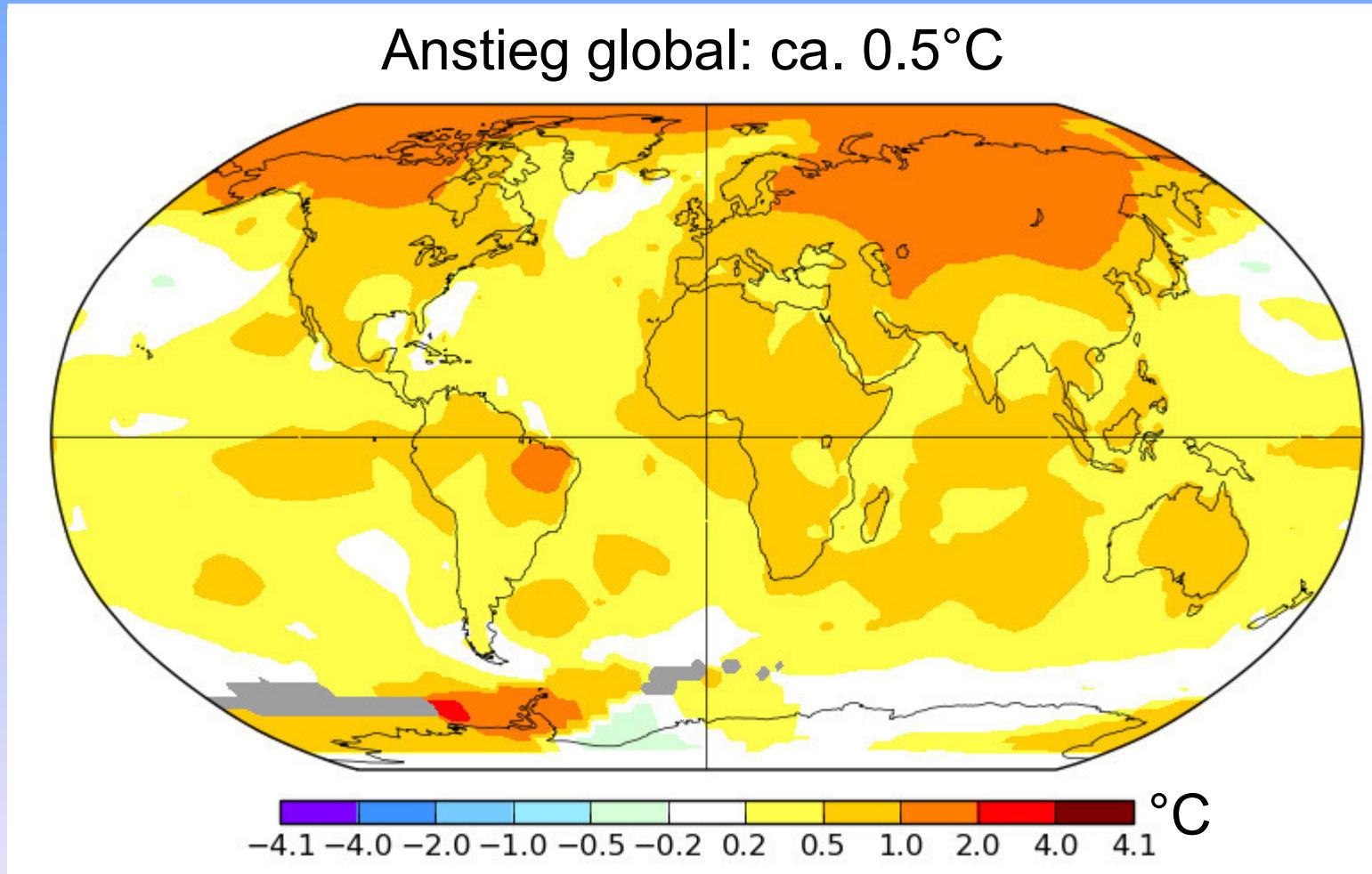


Wie sehen Variabilität auf einem breiten Spektrum von Zeitskalen, z. T. auch recht abrupte Änderungen

# Variabilität ist offensichtlich

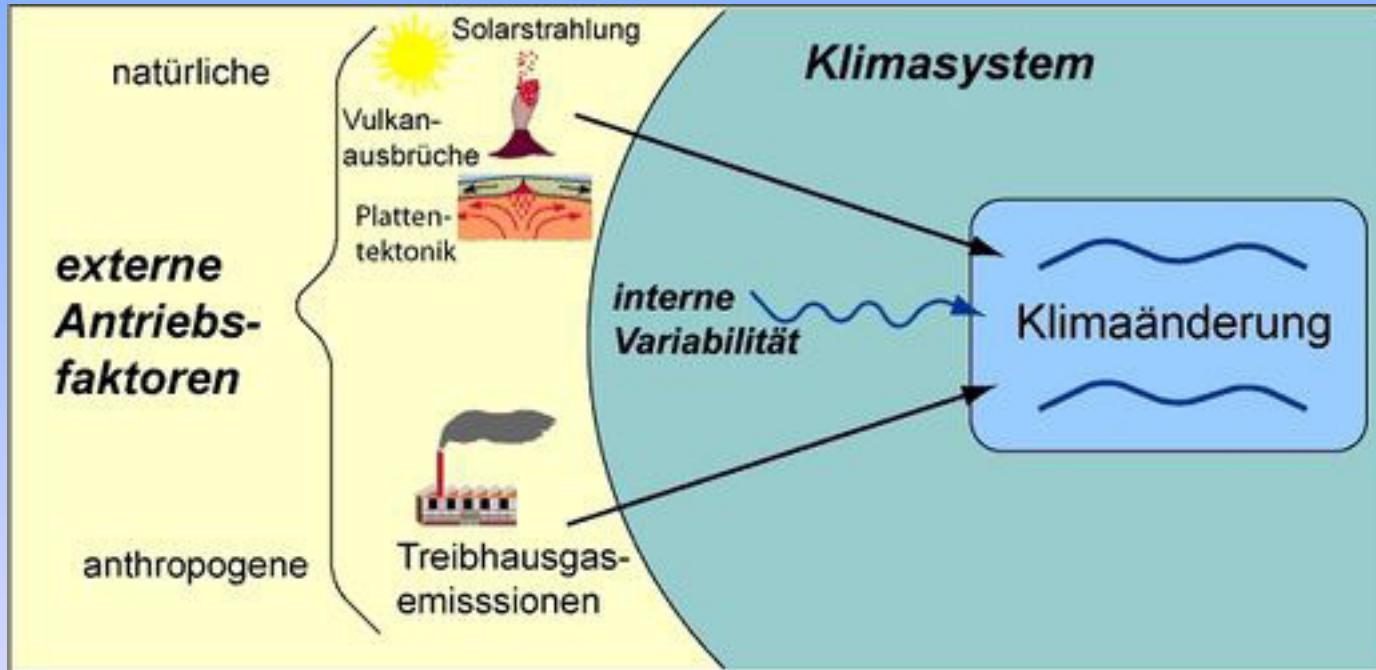


# Trends der Temperatur 1981-2017



regionale Unterschiede sind auch offensichtlich

# Ursachen von Klimaänderungen



Hamburger Bildungsserver

# Frühe Modellrechnungen

The screenshot shows a digital representation of a scientific publication. At the top, it displays the URL "nature.com" and the journal "nature climate change". Below this, there are two small icons: a square with a minus sign and a square with a question mark. In the middle section, there is a horizontal bar with colored squares (pink, blue, light blue, yellow, red) followed by the text "Altmetric: 199" and a link "More detail". The main title of the article is "Assessing temperature pattern projections made in 1989", written by "Ronald J. Stouffer<sup>1</sup> & Syukuro Manabe<sup>2</sup>". Below the title, there are two categories: "Climate and Earth system modelling" and "Projection and prediction". A summary of the research is provided at the bottom.

nature.com    nature climate change    commentary    article

Altmetric: 199    More detail

Commentary

## Assessing temperature pattern projections made in 1989

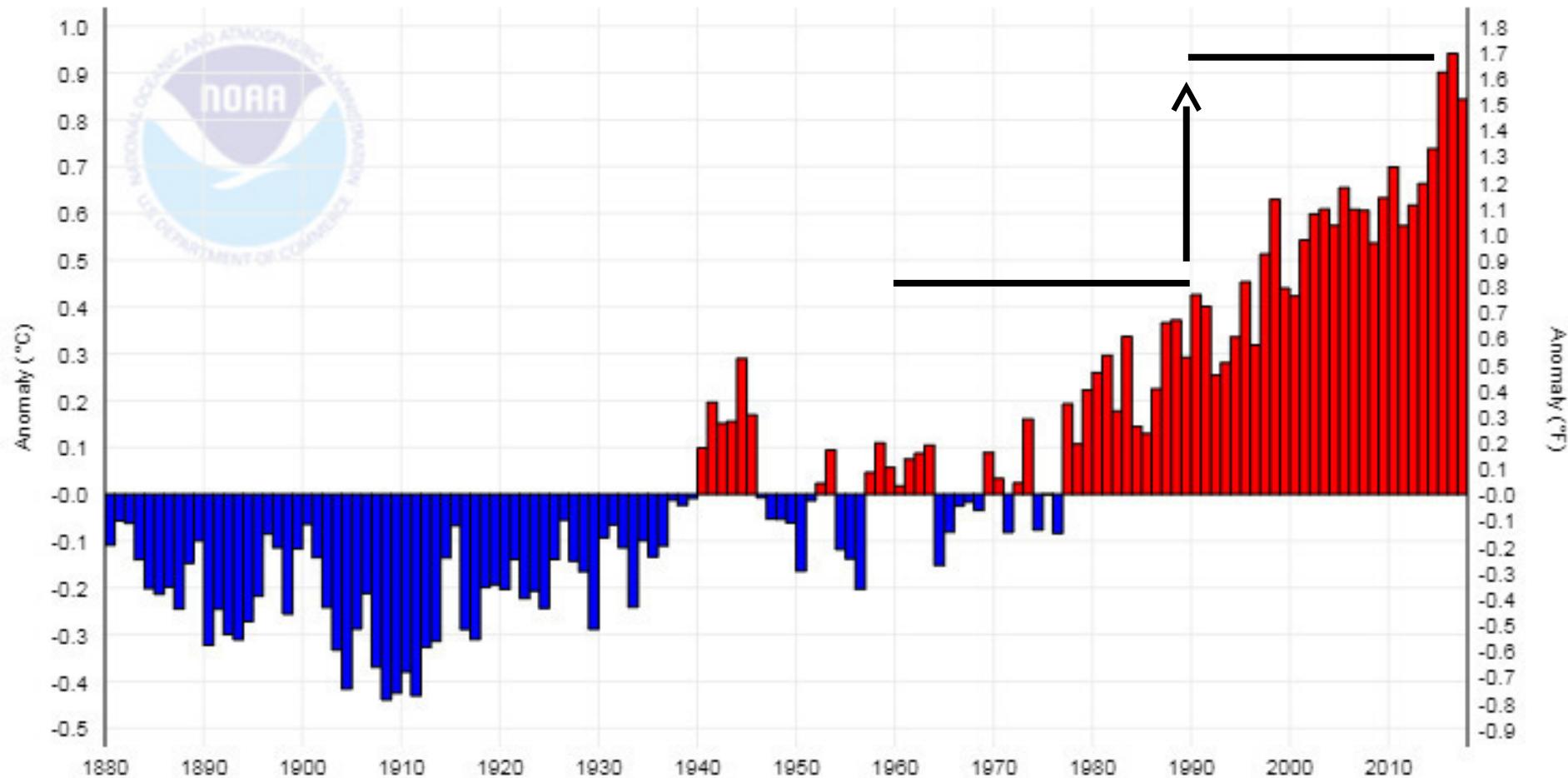
Ronald J. Stouffer<sup>1</sup> & Syukuro Manabe<sup>2</sup>

Climate and Earth system modelling    Projection and prediction

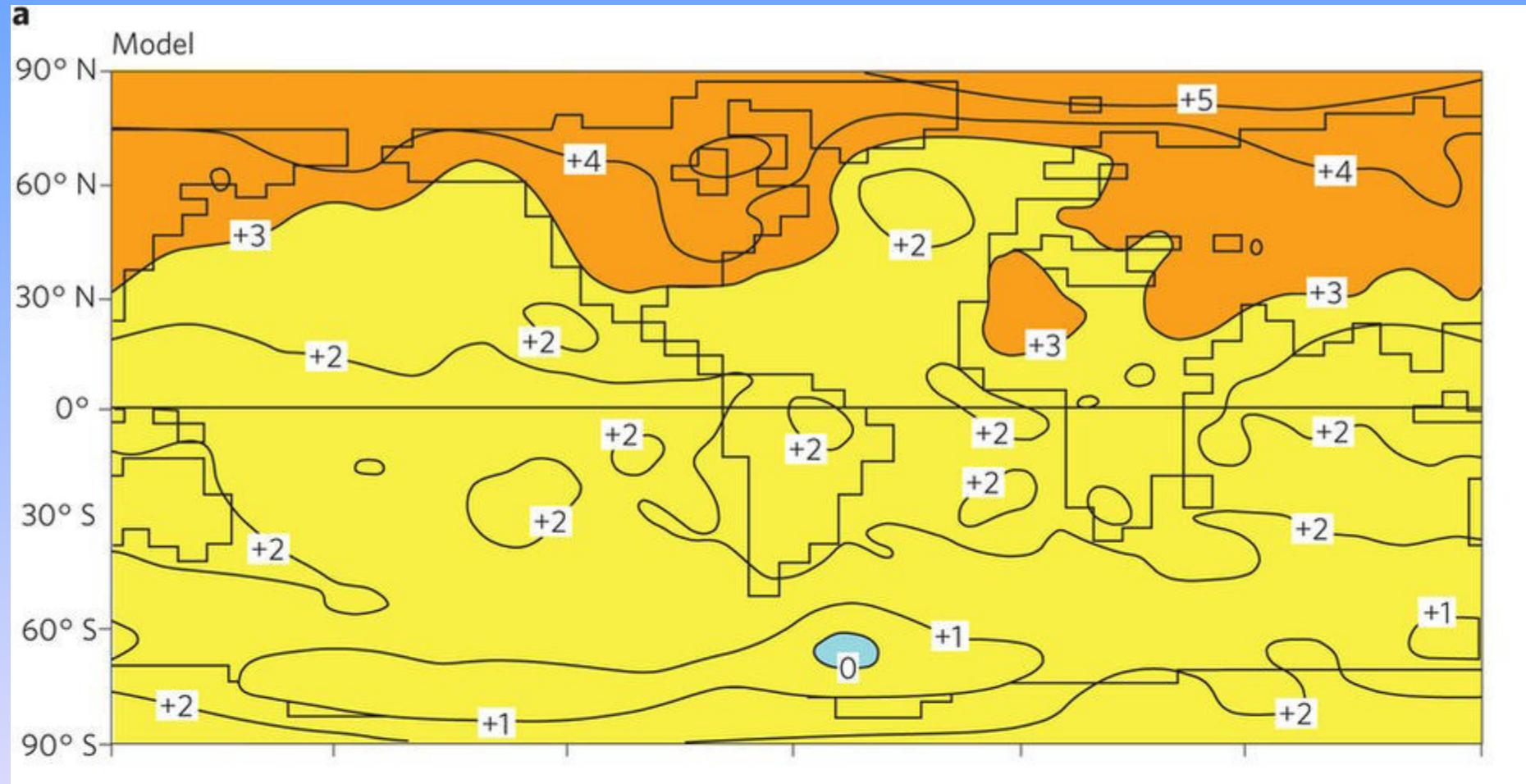
**Successful projection of the distribution of surface temperature change increases our confidence in climate models. Here we evaluate projections of global warming from almost 30 years ago using the observations made during the past half century.**

# Beobachtungen

Global Land and Ocean Temperature Anomalies, January-December

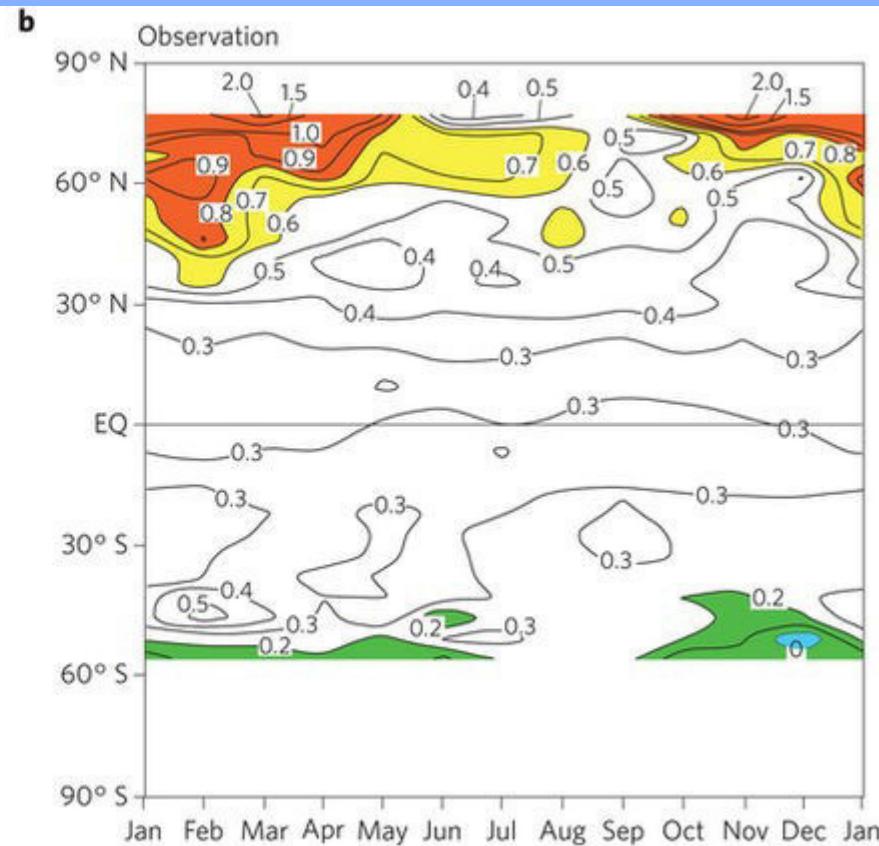
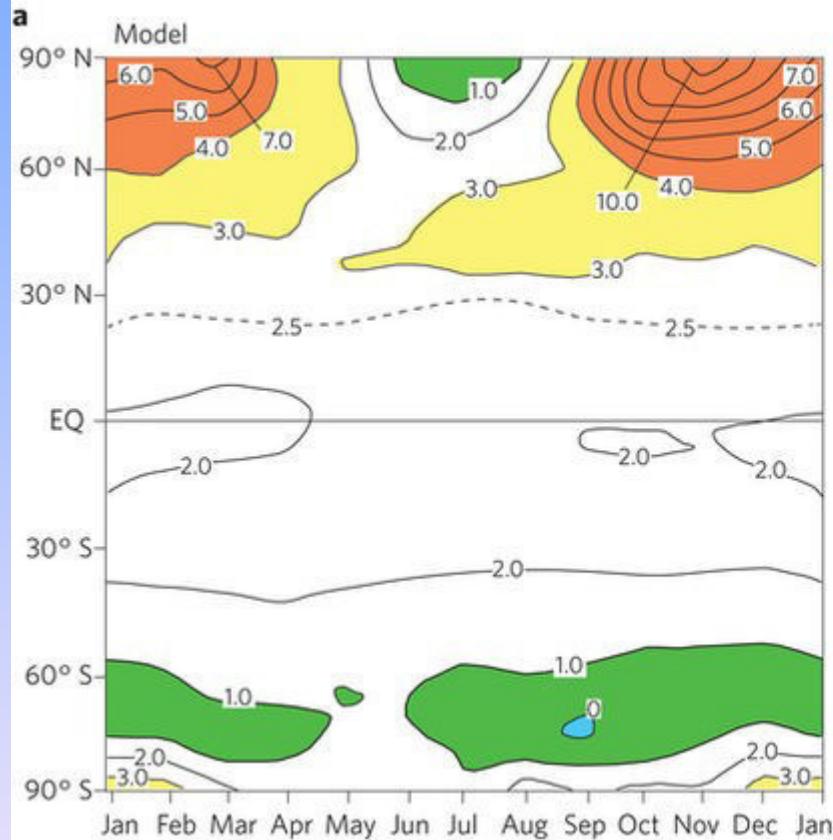


# Modell

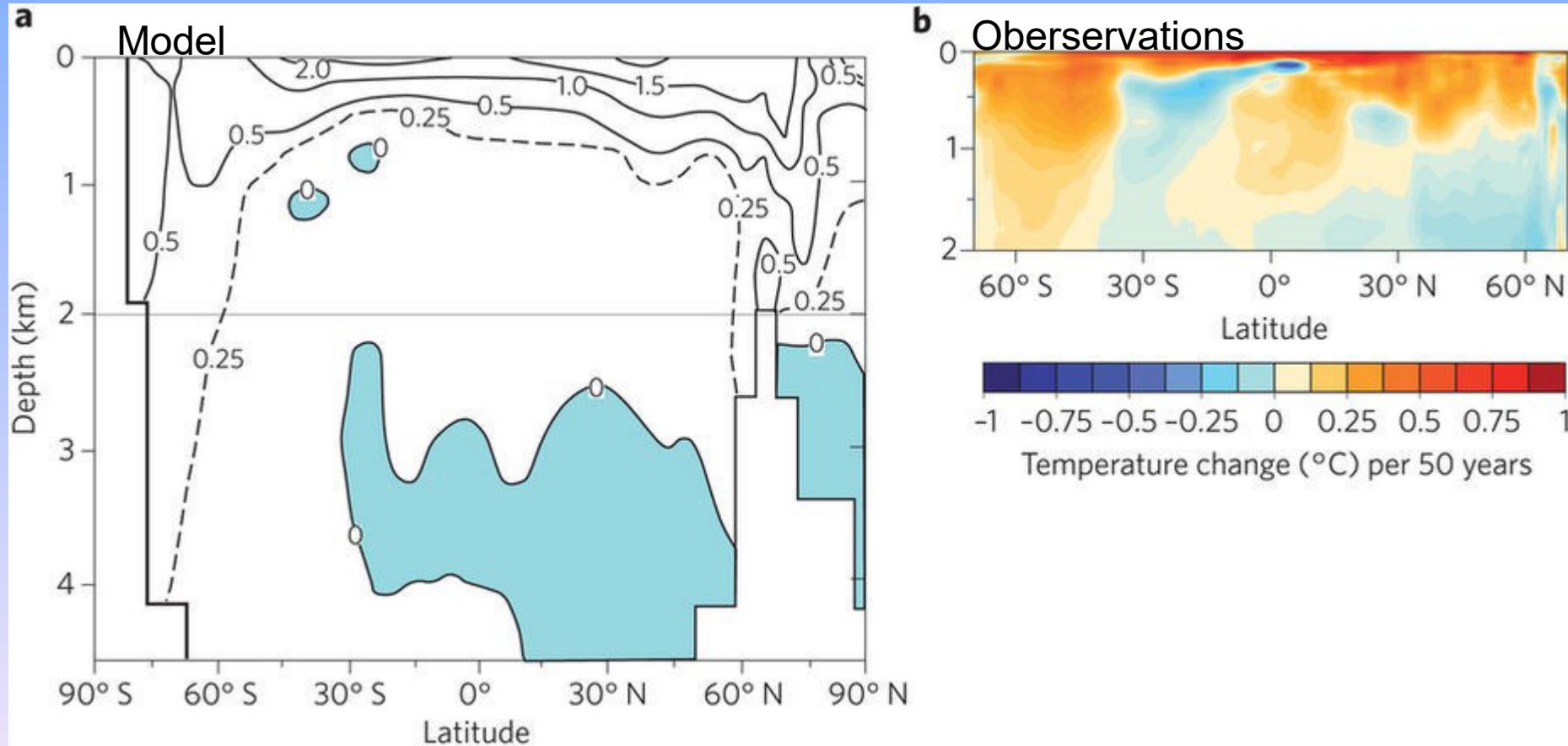


Change in coupled atmosphere–ocean model realized by the ~70th year (the average between the 60th to 80th year) of the global warming experiment, when the atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> doubles

# Die jahreszeitlichen Änderungen

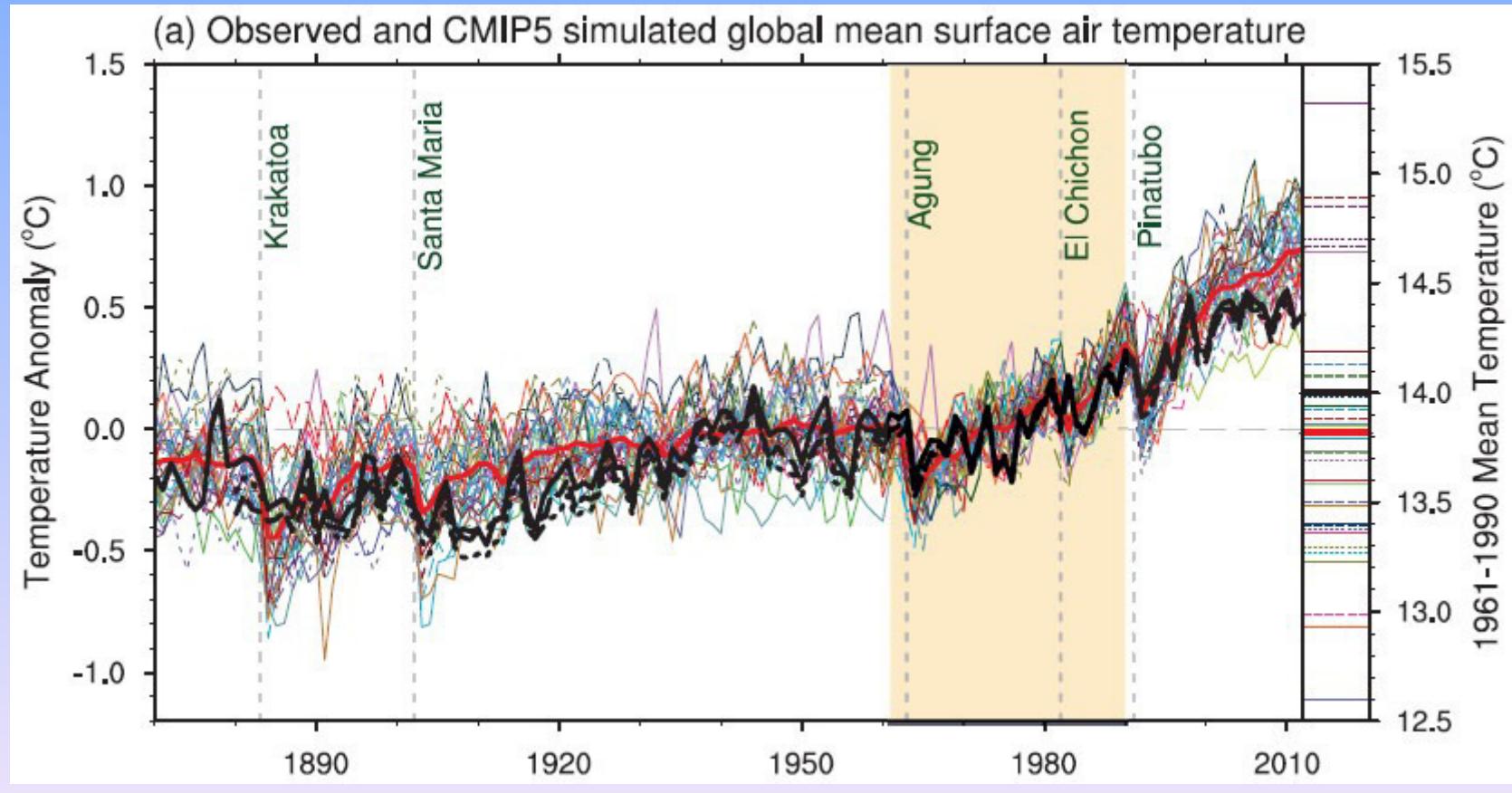


# Änderungen der Ozeantemperatur mit der Tiefe

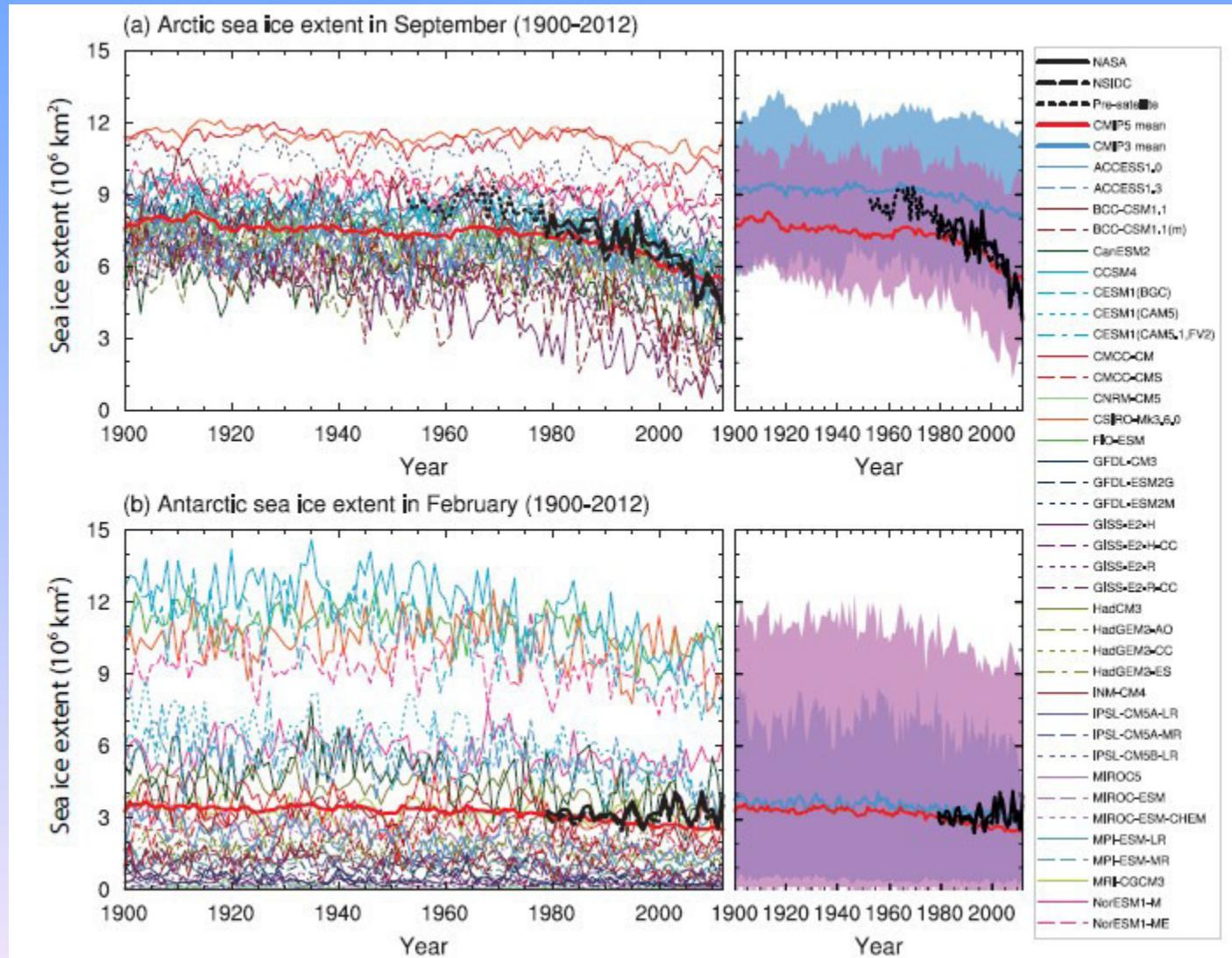


# Die Rolle externer Faktoren im 20. Jahrhundert (CMIP5)

Simulationen der globalen Durchschnittstemperatur mit externen Antrieben

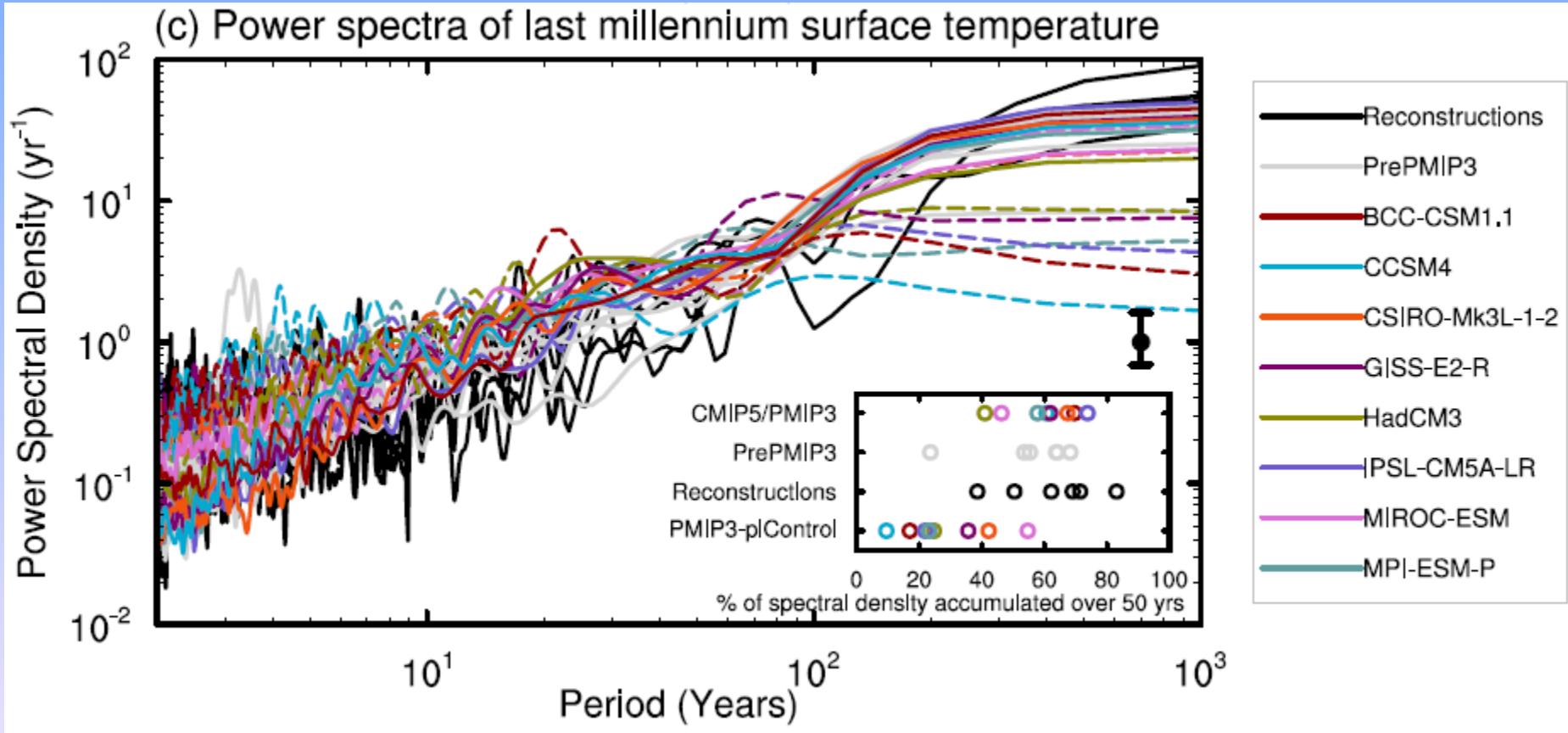


# Meereis der Arktis und Antarktis



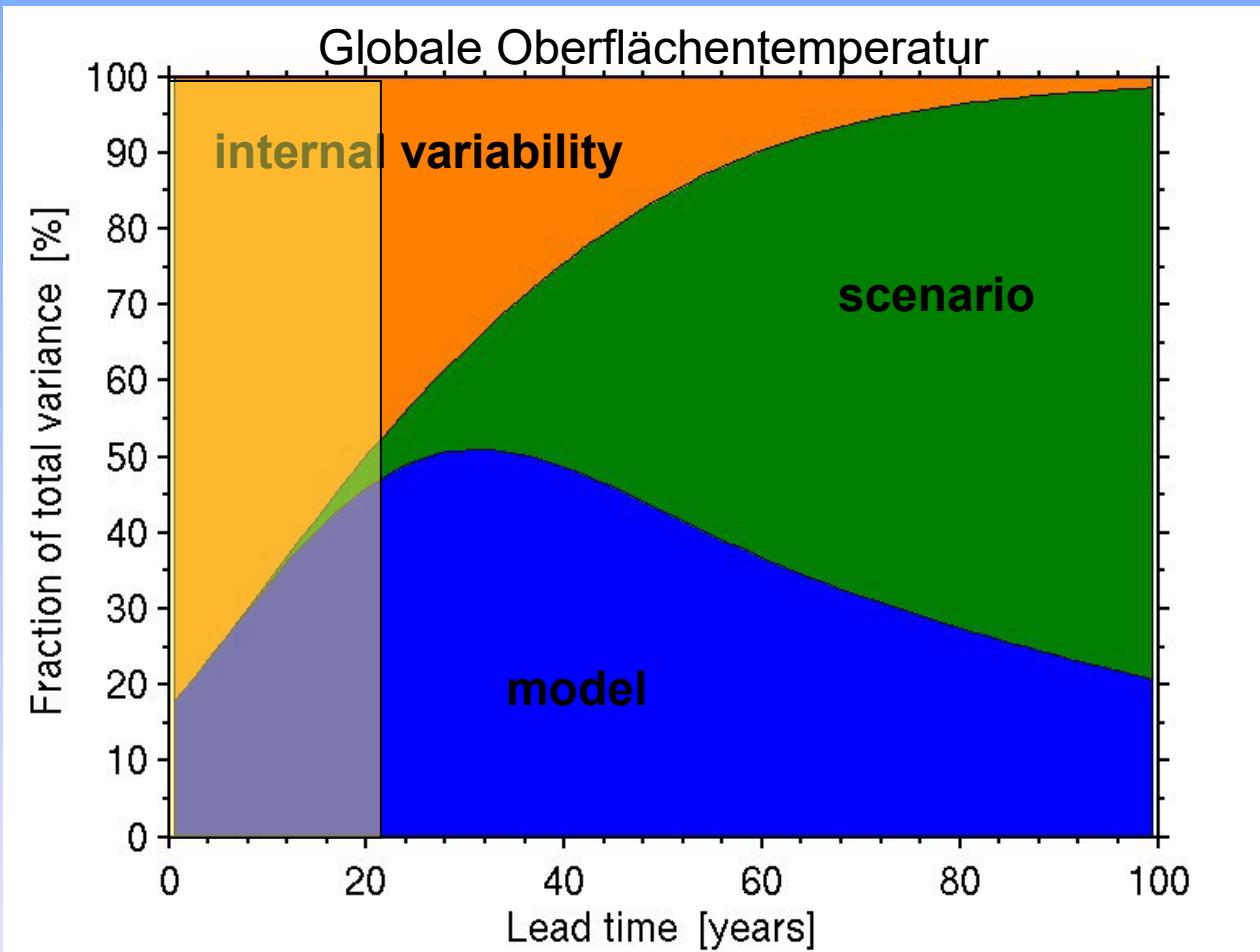
IPCC 2013

# Spektren der Mitteltemperatur der Nordhalbkugel



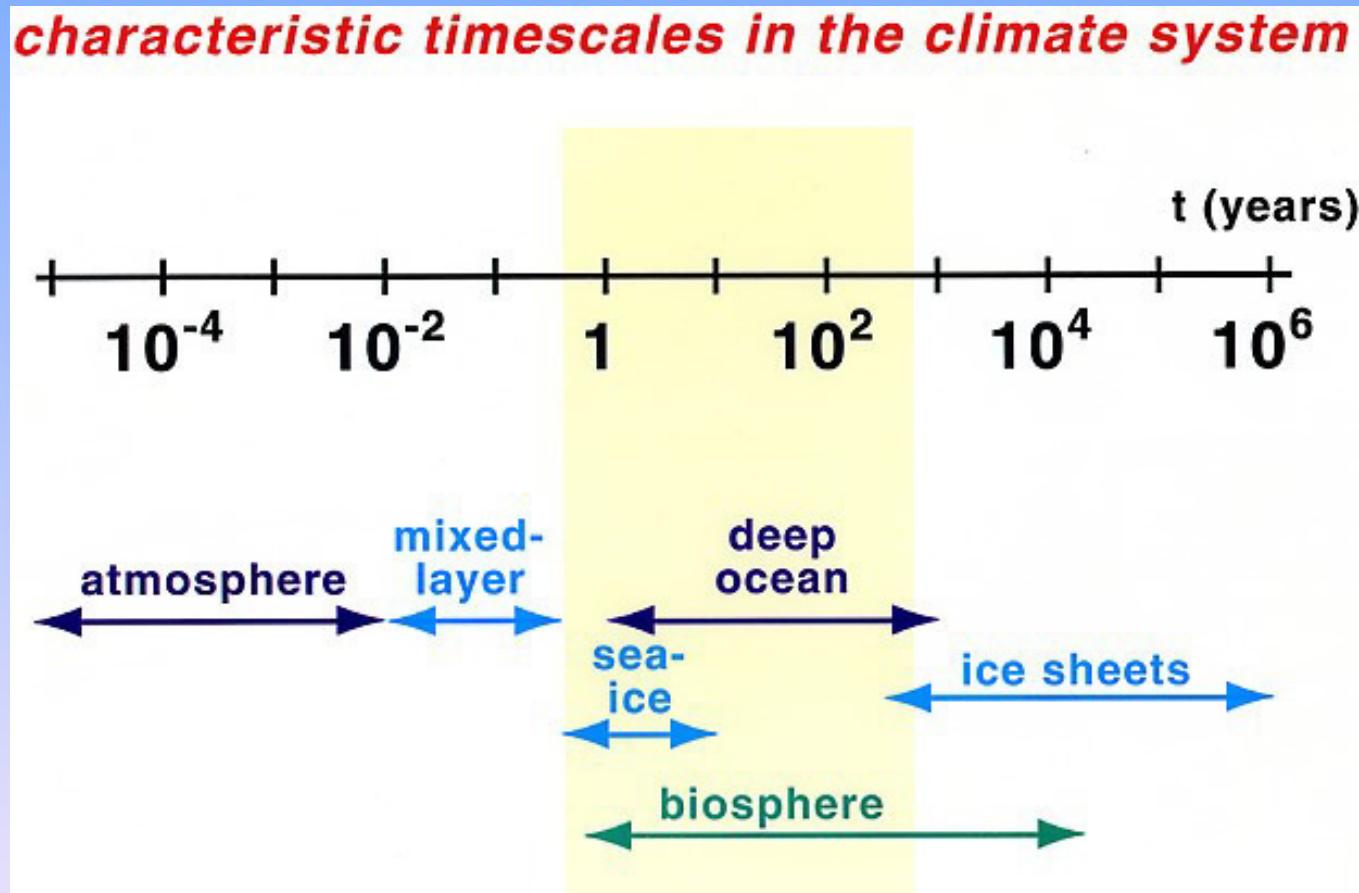
IPCC 2013

# Unsicherheiten in den Projektionen für die Zukunft



Hawkins and Sutton 2009

# Zeitskalen der Klimasubsysteme



# Stochastic climate models

## Part I. Theory

By K. HASSELMANN, *Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, FRG*

(Manuscript received January 19; in final form April 5, 1976)

### ABSTRACT

A stochastic model of climate variability is considered in which slow changes of climate are explained as the integral response to continuous random excitation by short period "weather" disturbances. The coupled ocean-atmosphere-cryosphere-land system is divided into a rapidly varying "weather" system (essentially the atmosphere) and a slowly responding "climate" system (the ocean, cryosphere, land vegetation, etc.). In the usual Statistical Dynamical Model (SDM) only the average transport effects of the rapidly varying weather components are parameterised in the climate system. The resultant prognostic equations are deterministic, and climate variability can normally arise only through variable external conditions. The essential feature of stochastic climate models is that the non-averaged "weather" components are also retained. They appear formally as random forcing terms. The climate system, acting as an integrator of this short-period excitation, exhibits the same random-walk response characteristics as large particles interacting with an ensemble of much smaller particles in the analogous Brownian motion problem. The model predicts "red" variance spectra, in qualitative agreement with observations. The evolution of the climate probability distribution is described by a Fokker-Planck equation, in which the effect of the random weather excitation is represented by diffusion terms. Without stabilising feedback, the model predicts a continuous increase in climate variability, in analogy with the continuous, unbounded dispersion of particles in Brownian motion (or in a homogeneous turbulent fluid). Stabilising feedback yields a statistically stationary climate probability distribution. Feedback also results in a finite degree of climate predictability, but for a stationary climate the predictability is limited to maximal skill parameters of order 0.5.



# Stochastisches Klimamodell Hasselmann 1976 (Tellus)

Zeitskalenseparation (in Analogie zur Brown'schen Bewegung),  
x: schnell variierendes System, y: langsam variierendes System

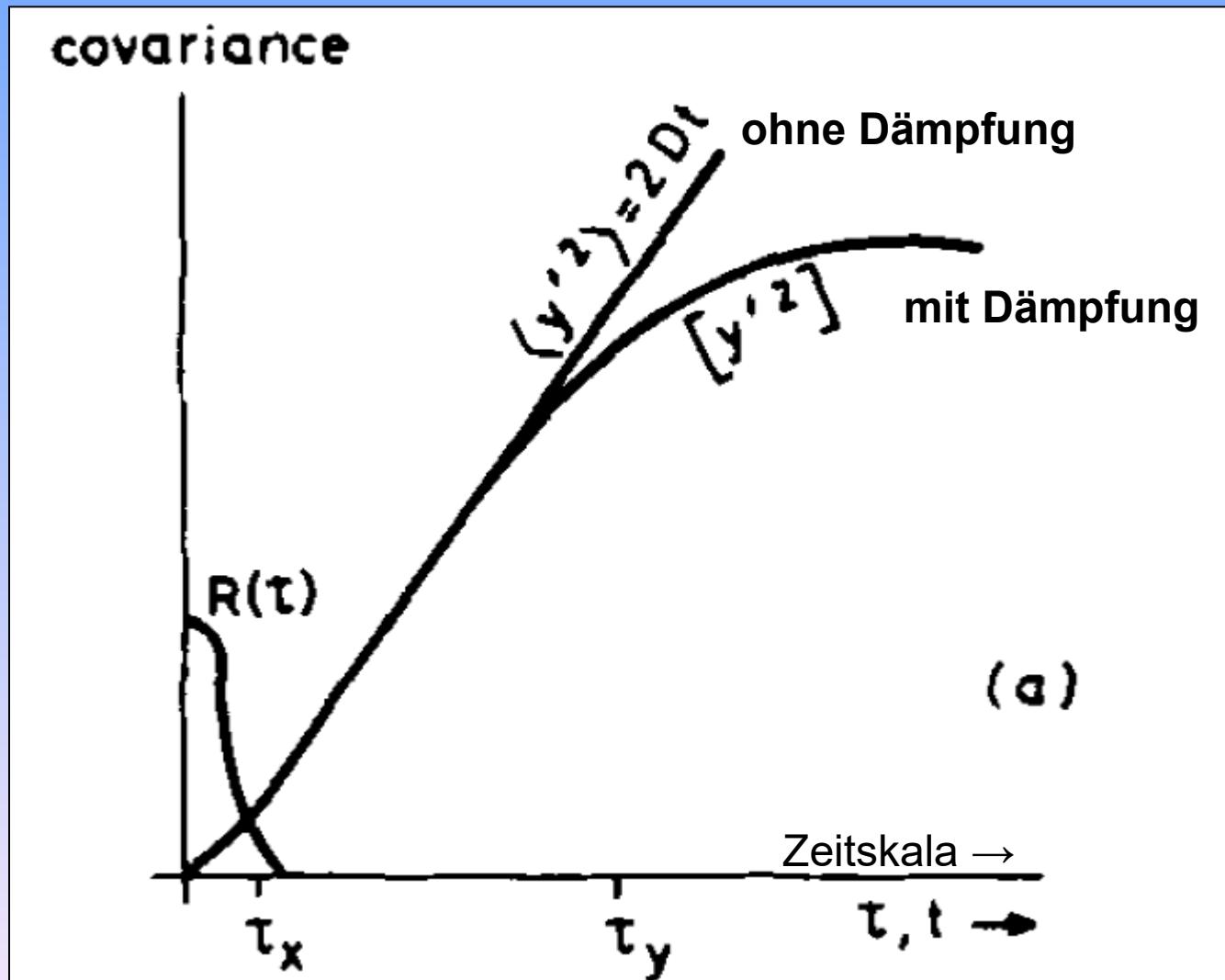
$$O\left(x_i \left(\frac{dx_i}{dt}\right)^{-1}\right) = \tau_x \ll \tau_y = O\left(y_i \left(\frac{dy_i}{dt}\right)^{-1}\right)$$

Einfaches Beispiel: Lokale Wechselwirkung von Ozean und Atmosphäre

$$\frac{dT}{dt} = -\lambda T + F$$

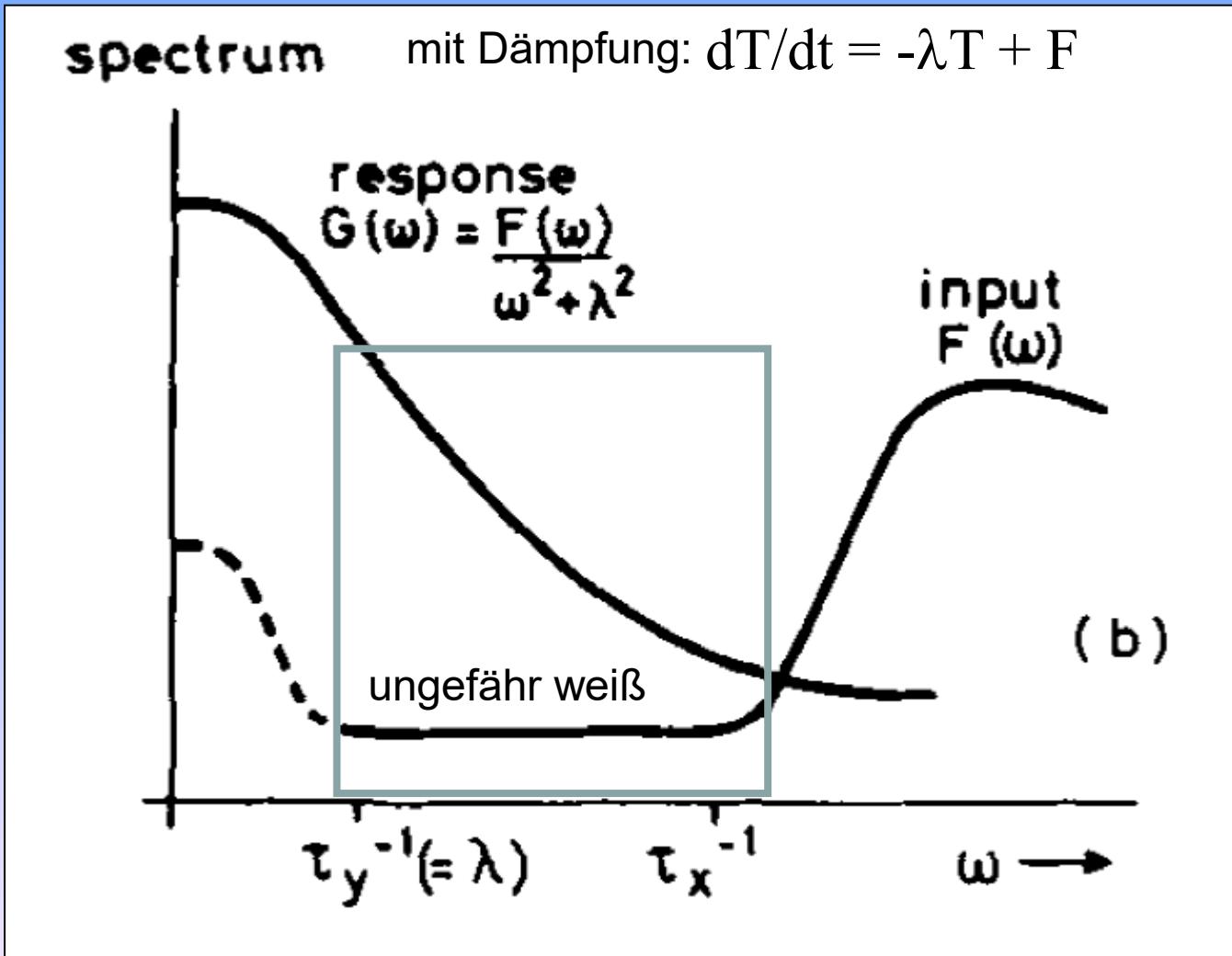
T in der obigen Gleichung ist die Temperatur-Abweichung der Deckschicht von der Klimatologie,  $\lambda$  eine Dämpfungskonstante und F sind die zufälligen Wärmefluss-Schwankungen. Der Ozean betont die niederfrequenten Schwankungen des stochastischen Antriebs.

# Stochastisches Klimamodell



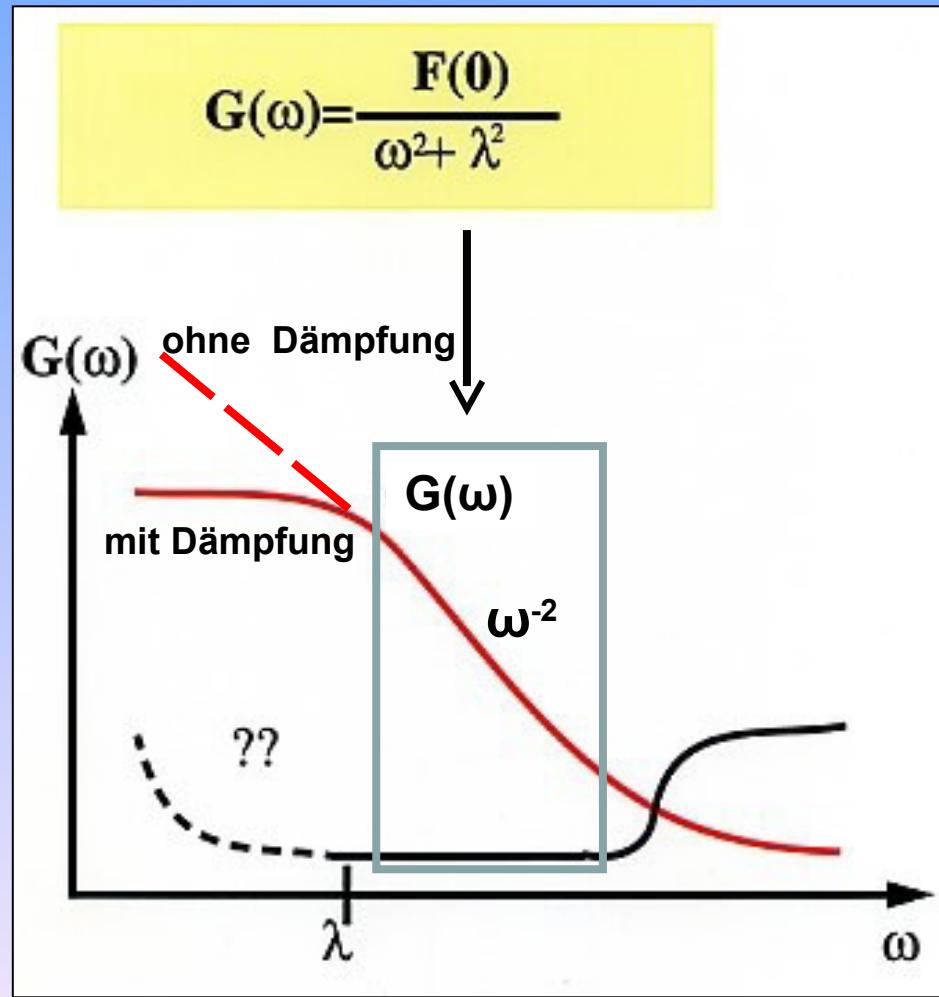
(Hasselmann 1976)

# Stochastisches Klimamodell



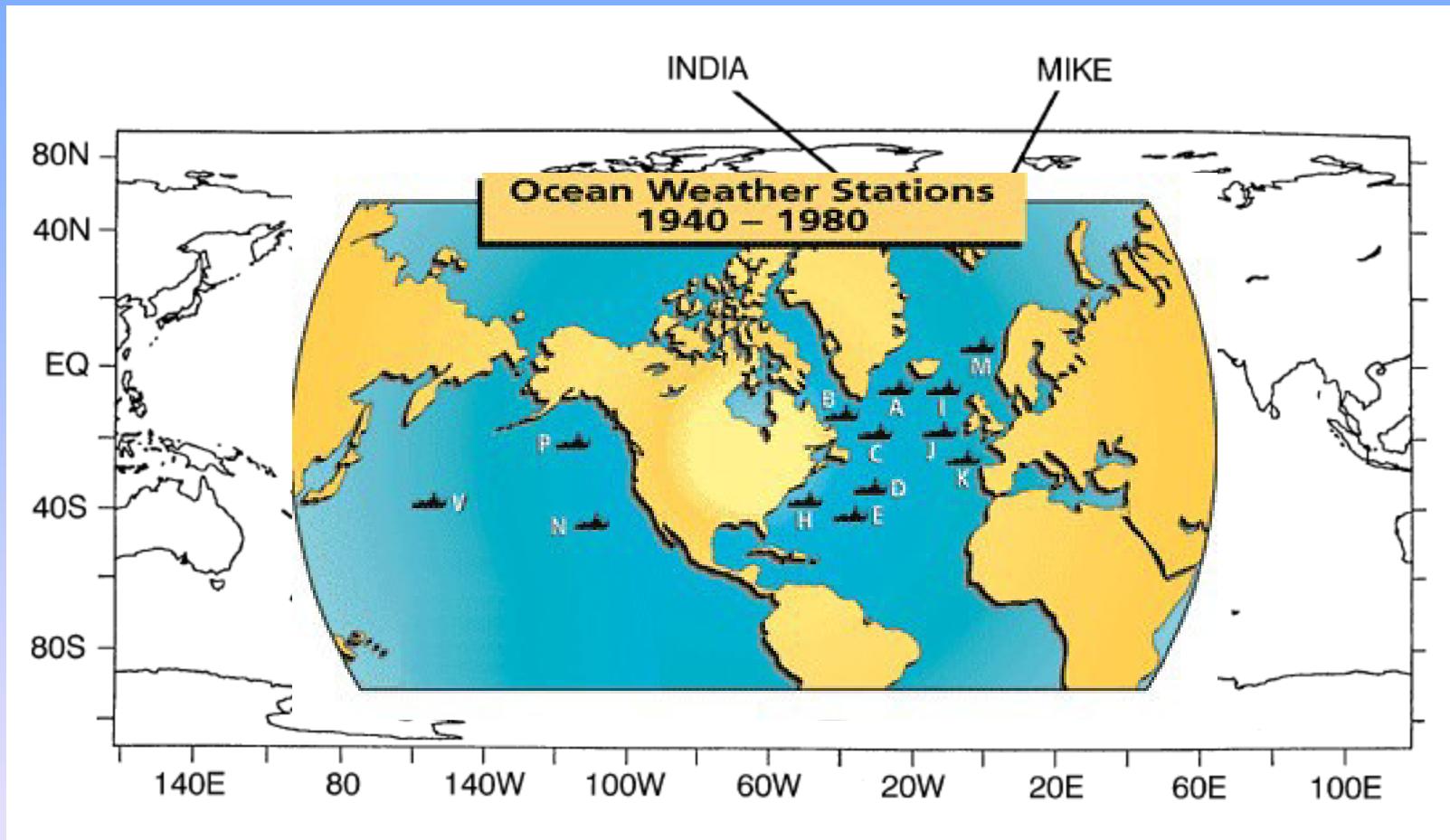
(Hasselmann 1976)

# Wenn man weißes Rauschen als Antrieb verwendet

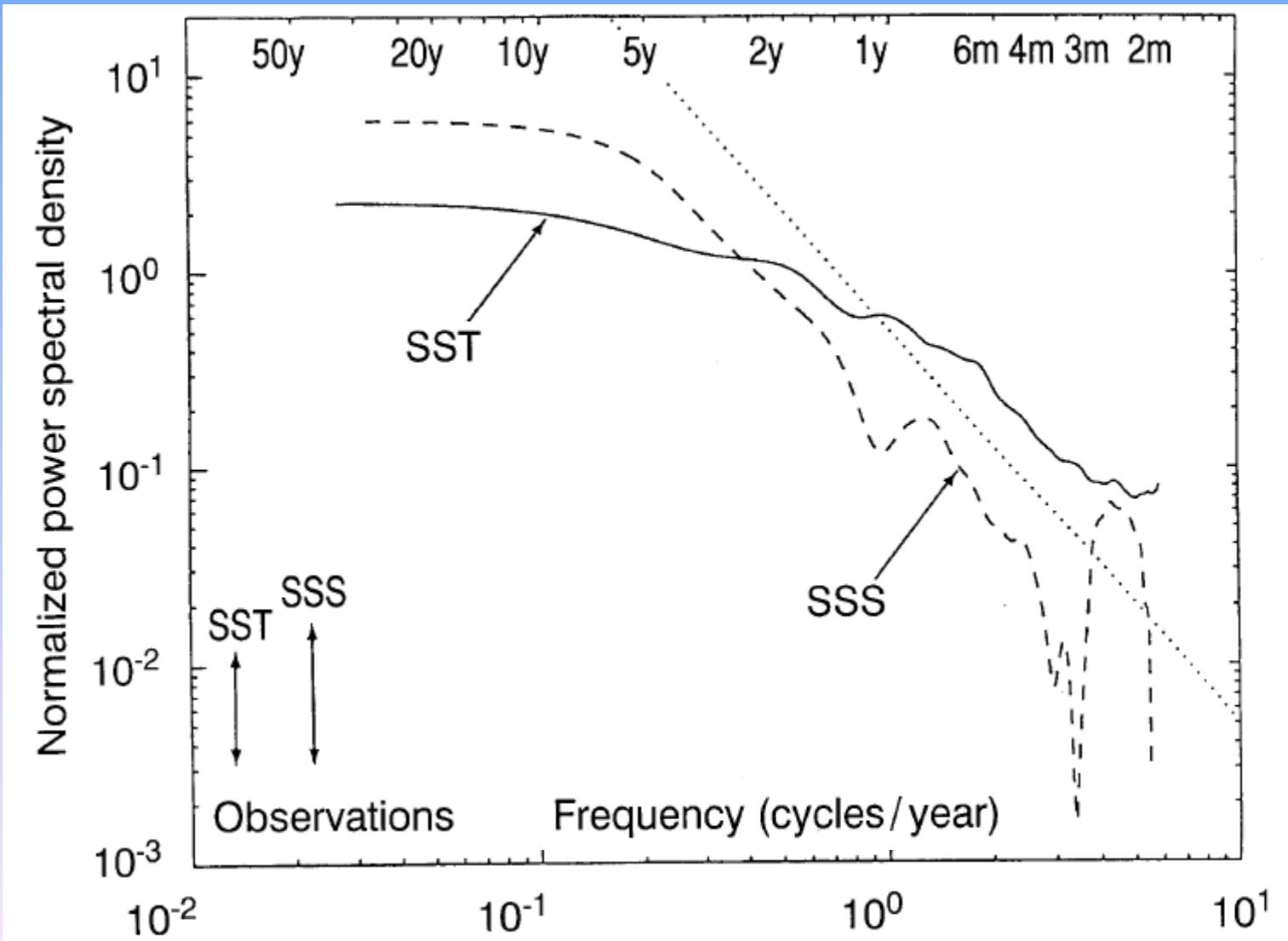


Anwendung: Deckschicht-Temperatur, Meereis

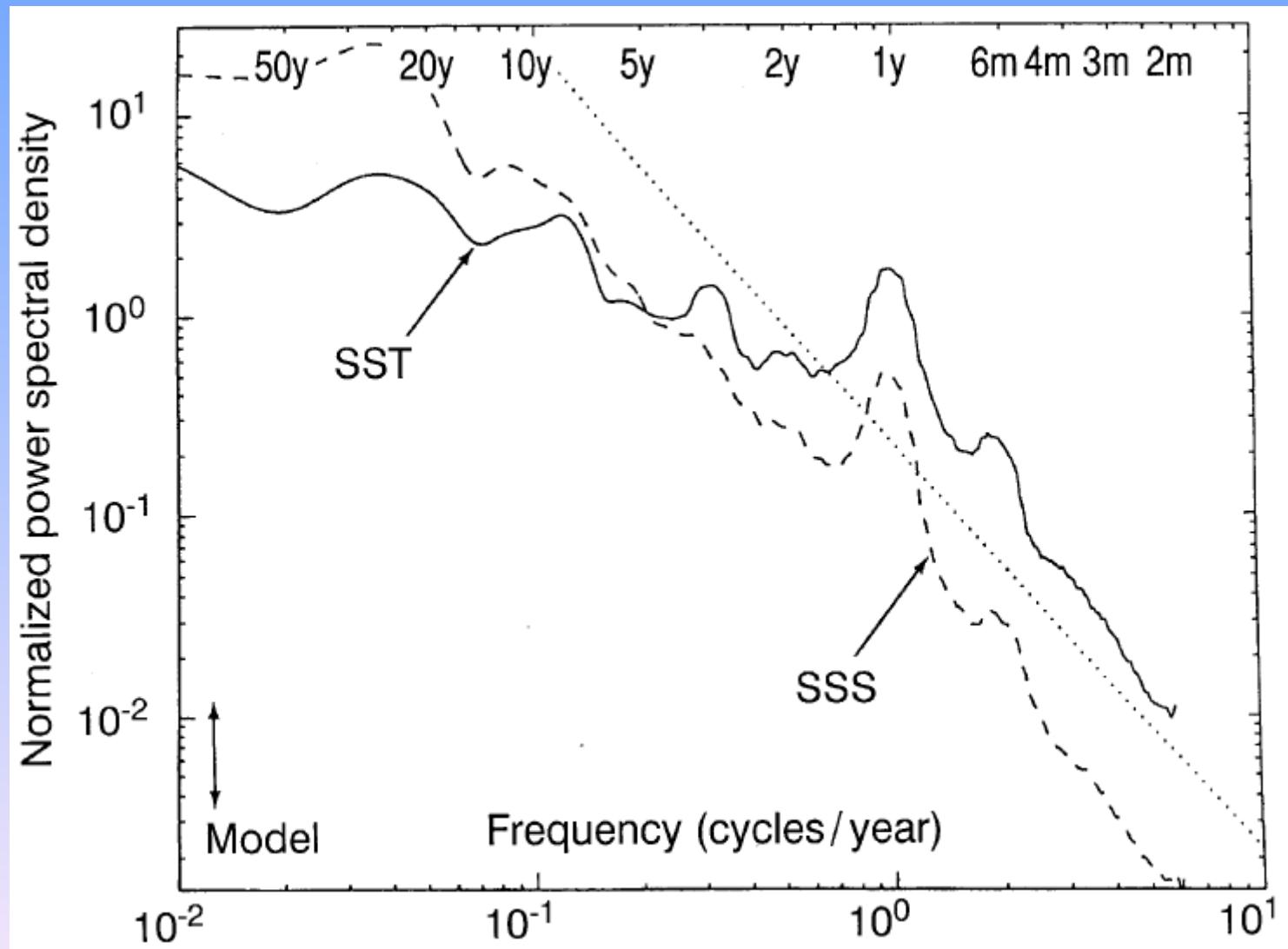
# Positionen der Weterschiffe



# Spektren bei Papa

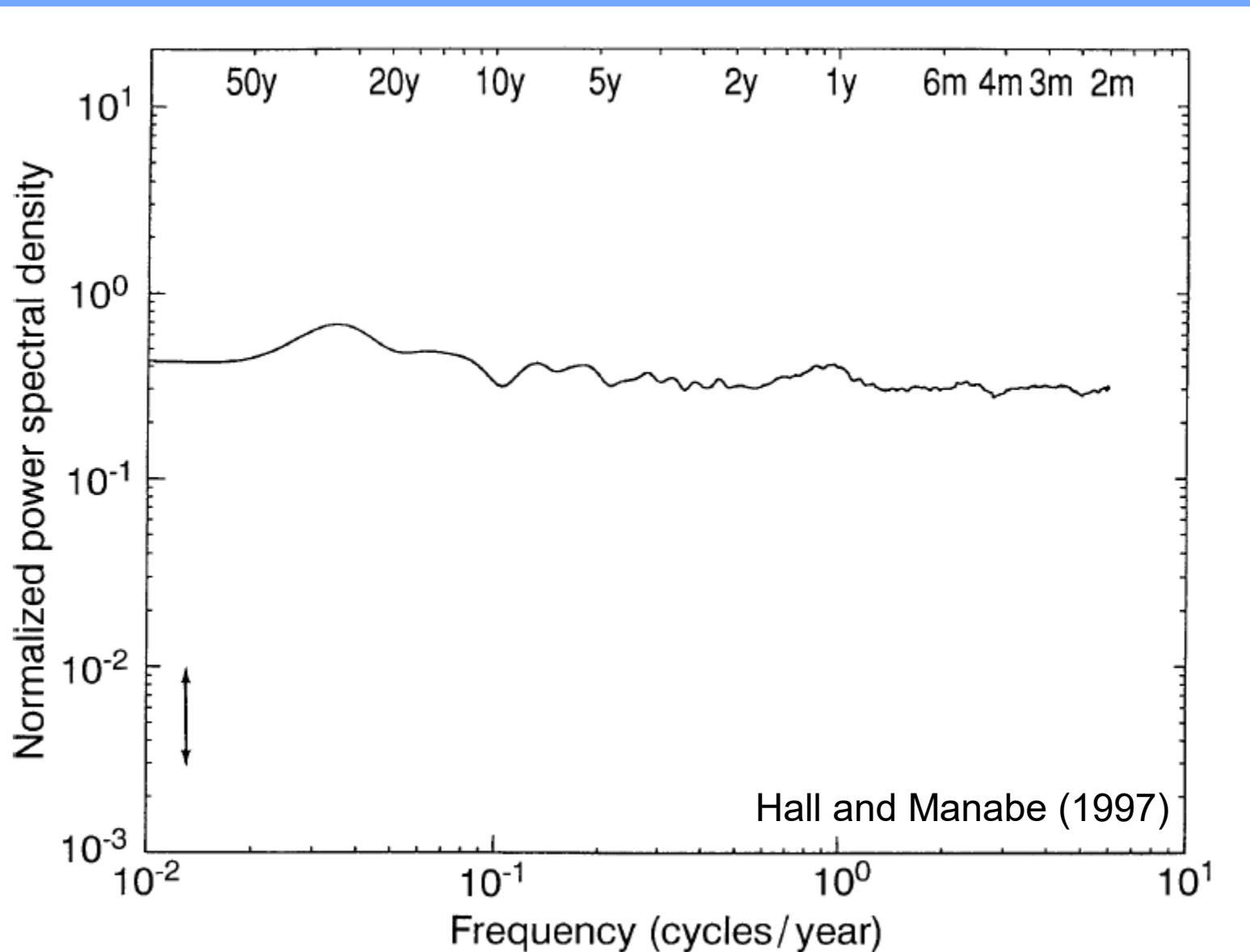


# Modellspektren

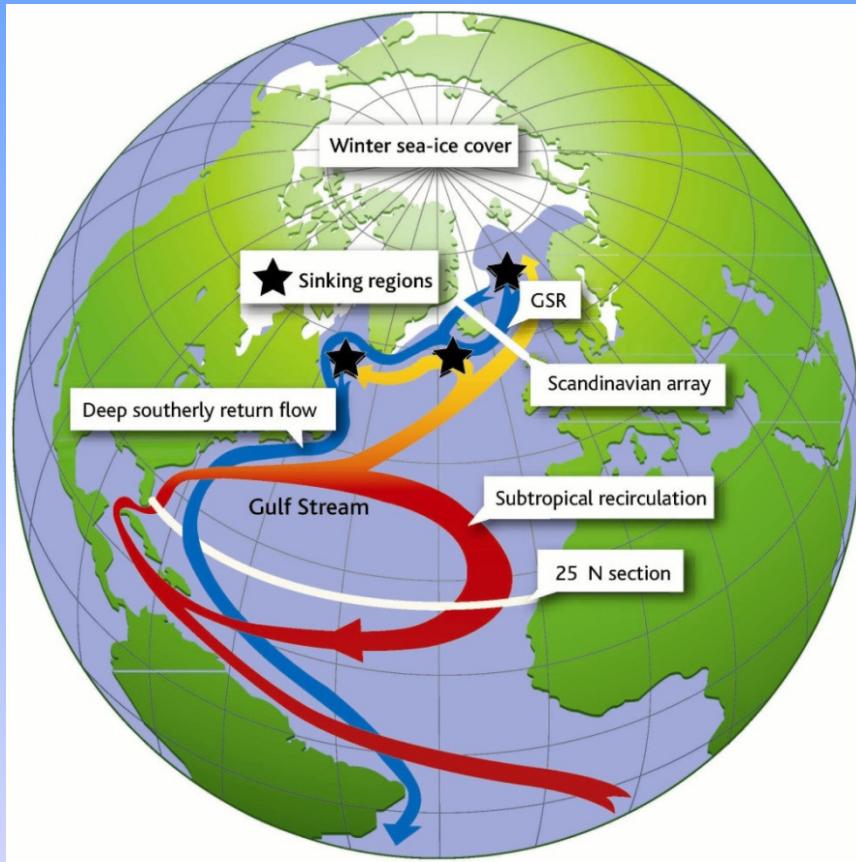


Hall and Manabe (1997)

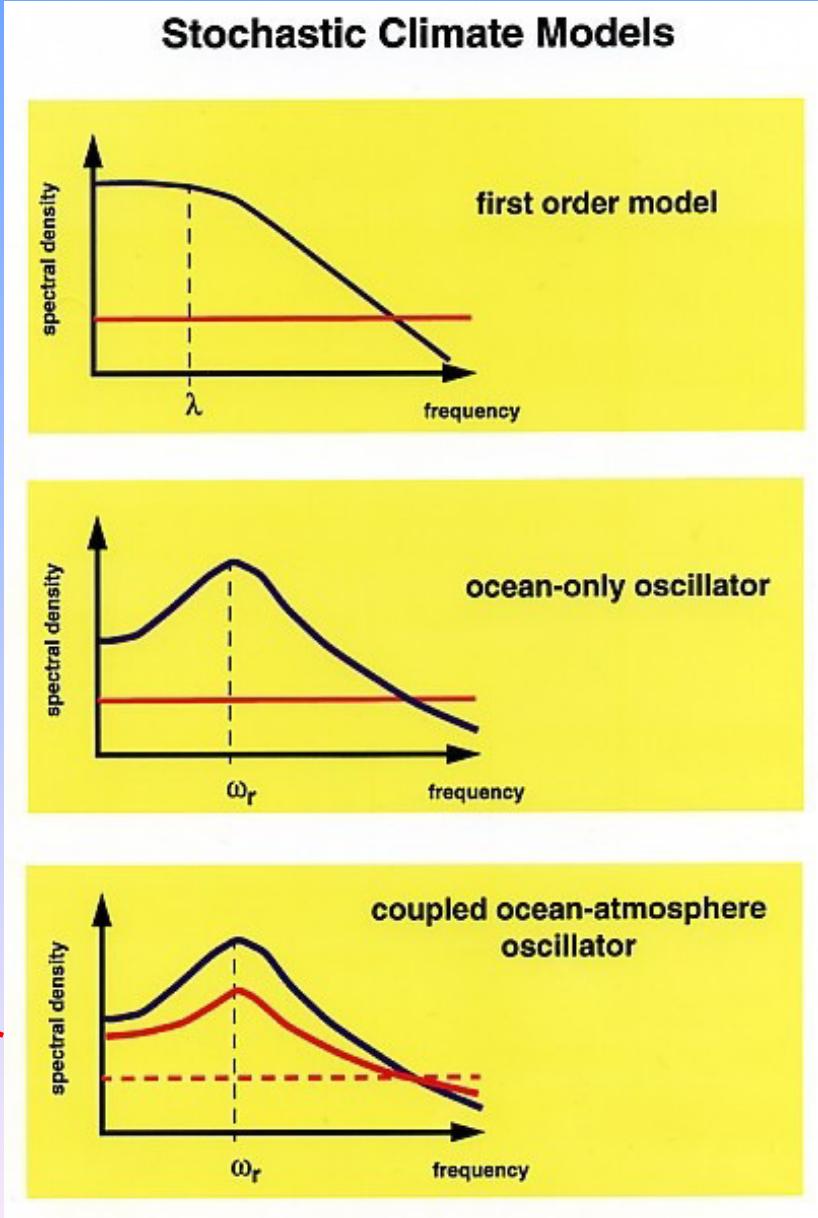
# Frischwasserfluss, Modell



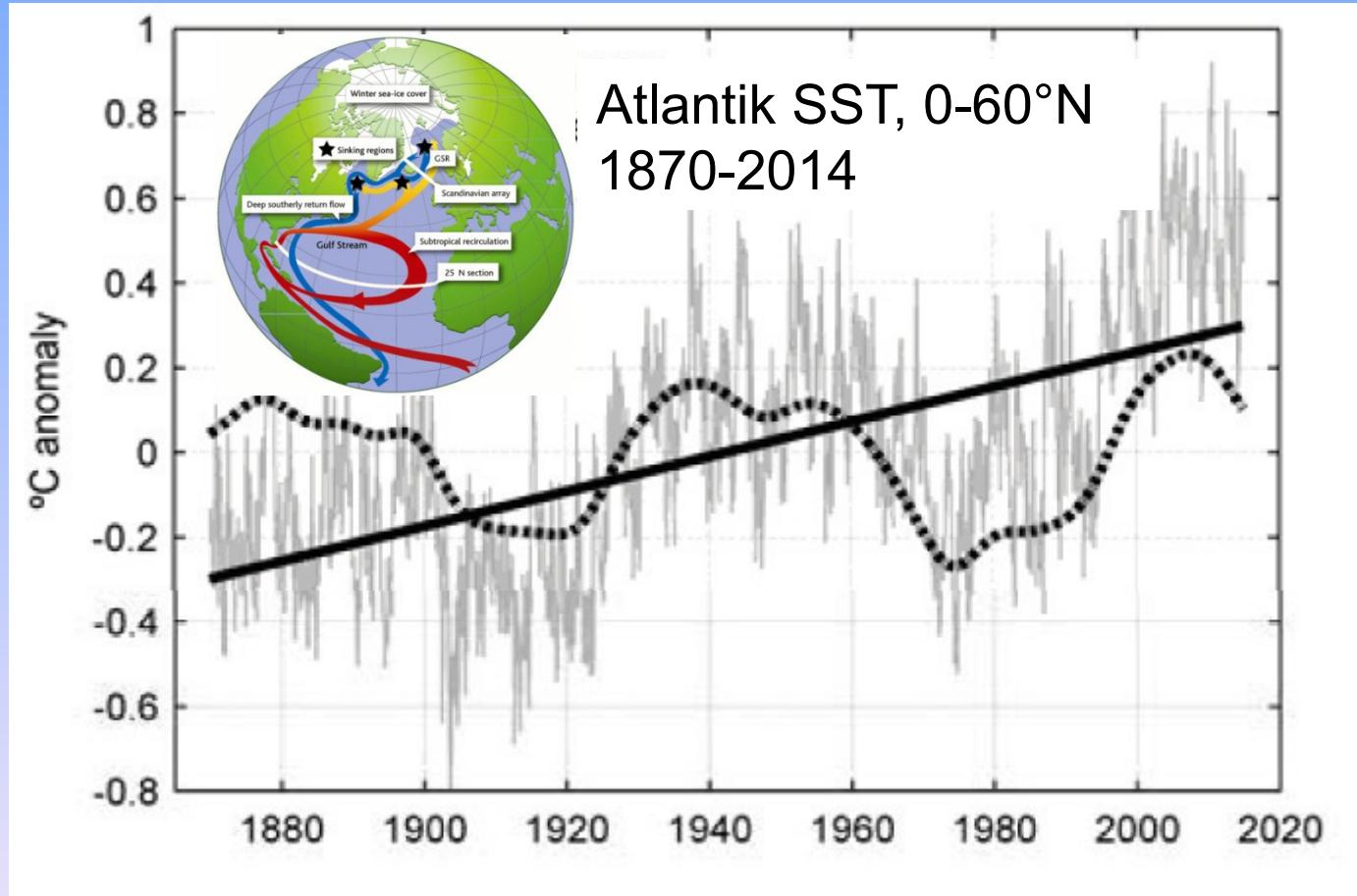
# Stochastische Klimamodelle



Die meisten Modelle legen den  
“ocean-only” Oszillator für die  
AMO/V, den gekoppelten Oszillator  
für ENSO nahe



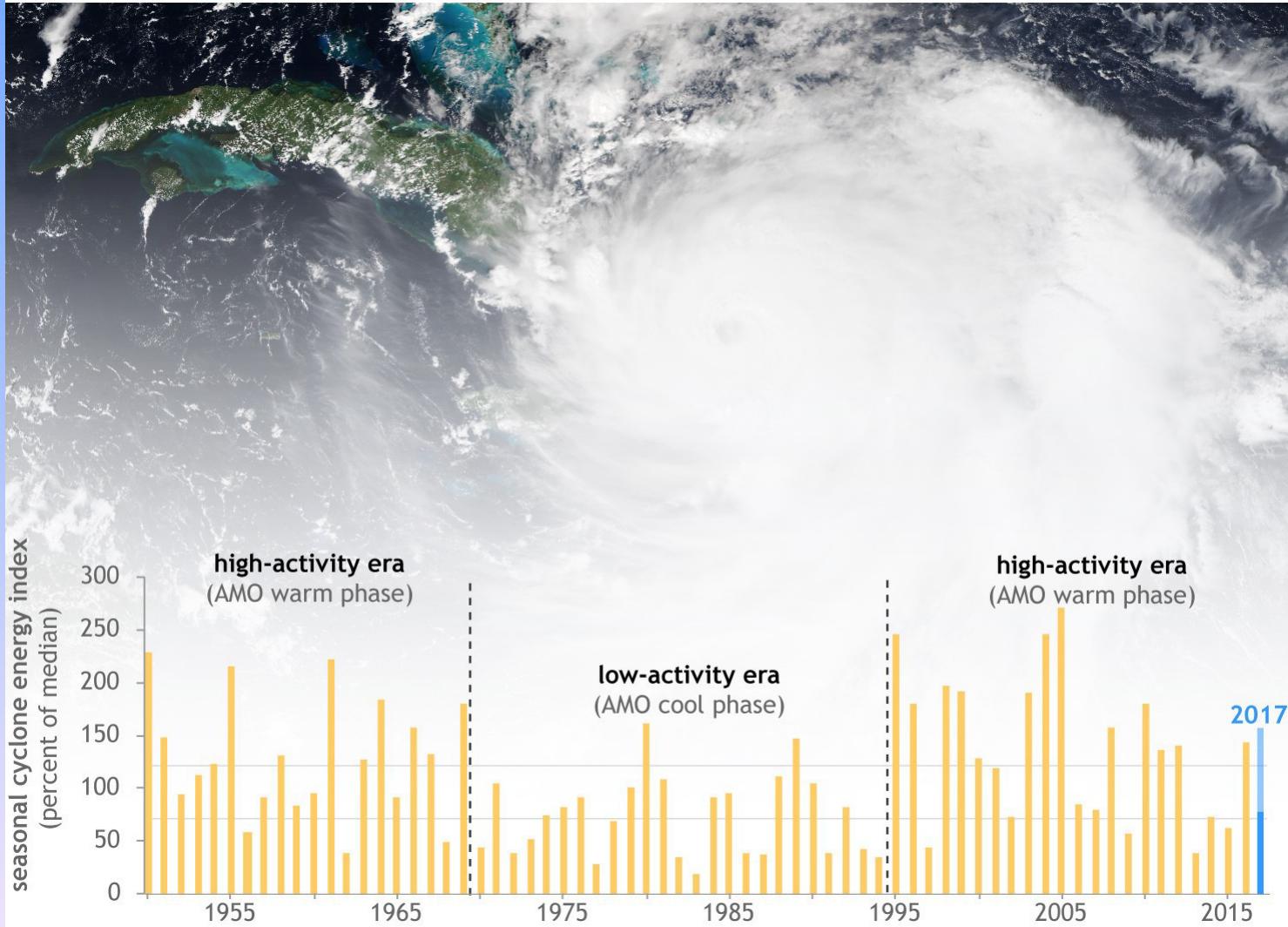
# Meeresoberflächentemperatur (SST) im Nordatlantik (AMO/AMV)



Die SST zeichnet wahrscheinlich u.a. auch die Schwankungen der Umwälzbewegung (AMOC) auf

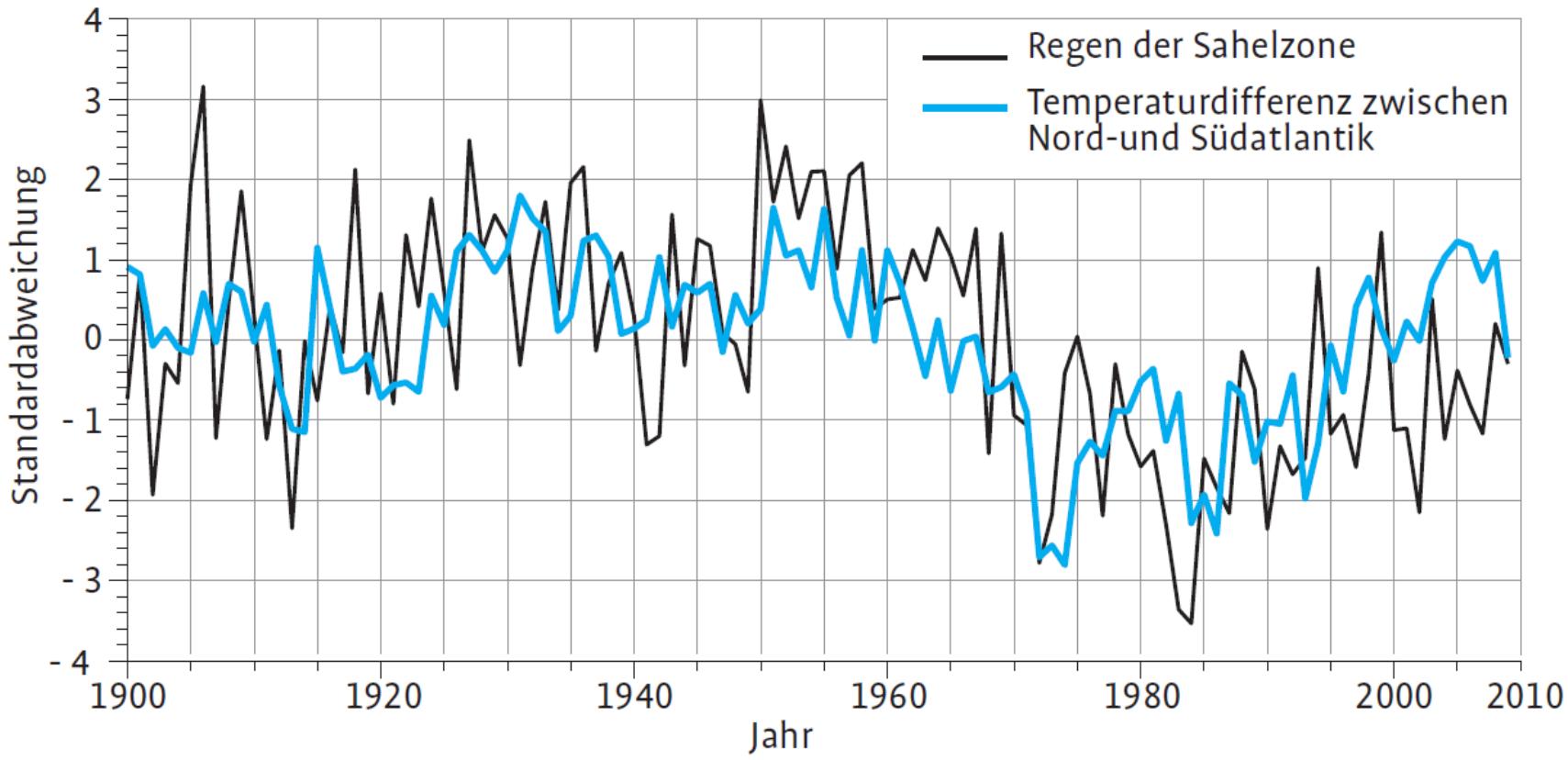
# Hurrikan-Aktivität seit 1950

Atlantic hurricane seasons since 1950

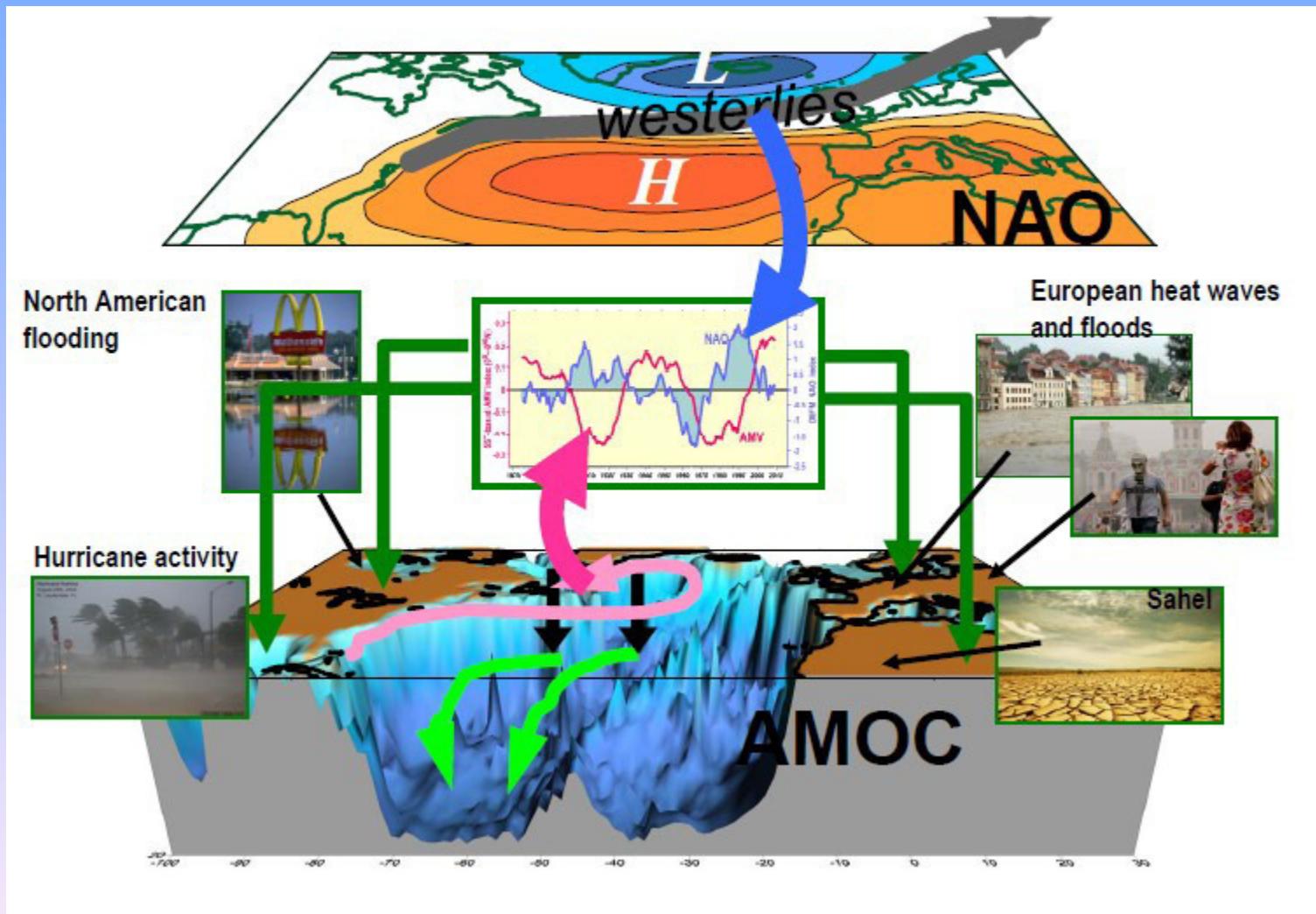


[https://www.climate.gov/sites/default/files/amo\\_hurricane\\_eras\\_1950-2016\\_lrg.jpg](https://www.climate.gov/sites/default/files/amo_hurricane_eras_1950-2016_lrg.jpg)

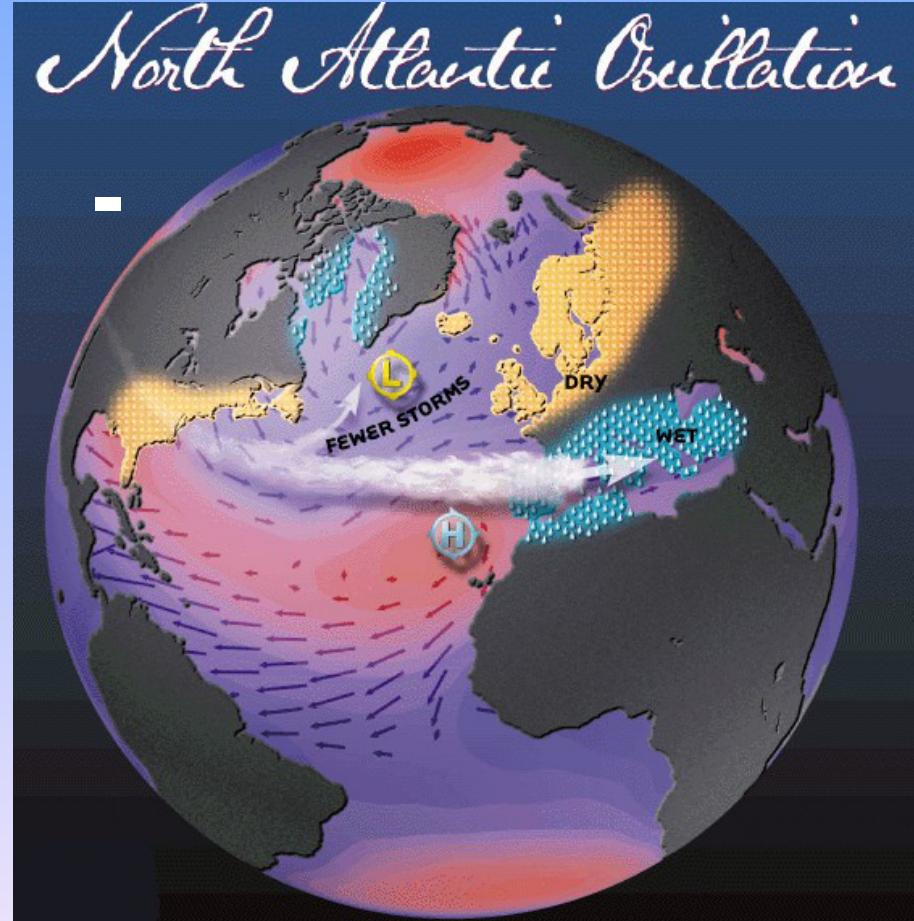
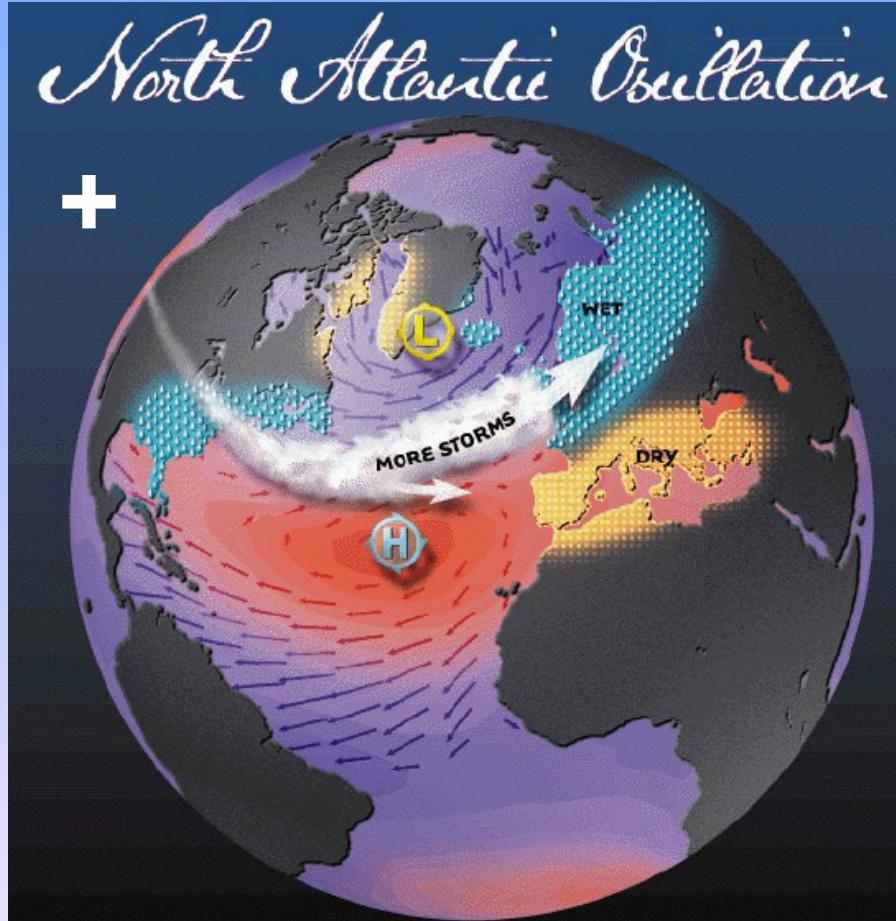
# Der Regen in der Sahelzone



# Ozean-Atmosphäre WW im Nordatlantik Sektor

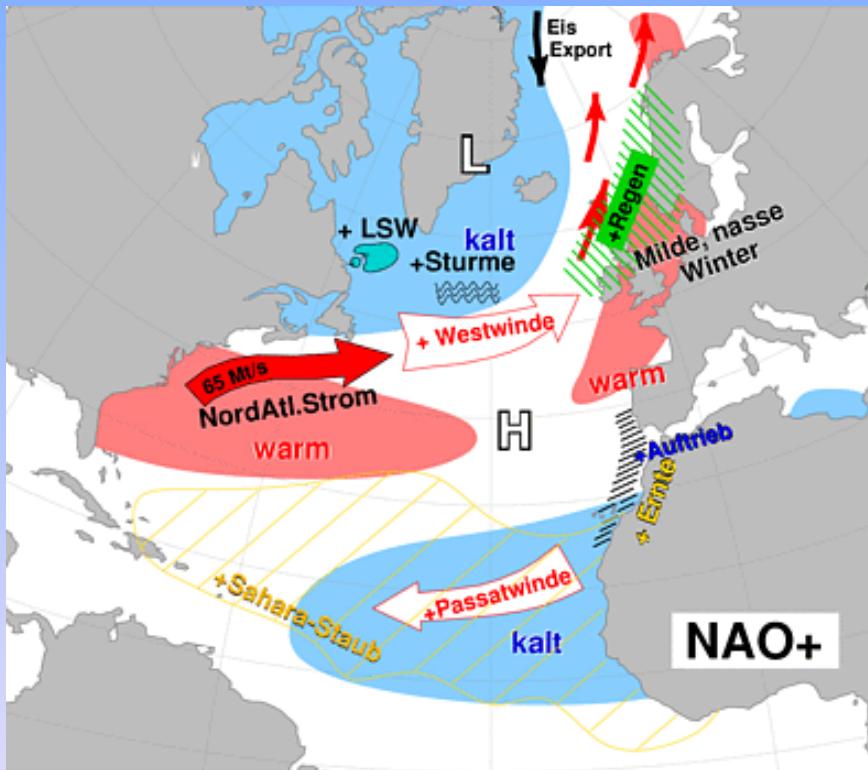


# Die Nordatlantische Oszillation

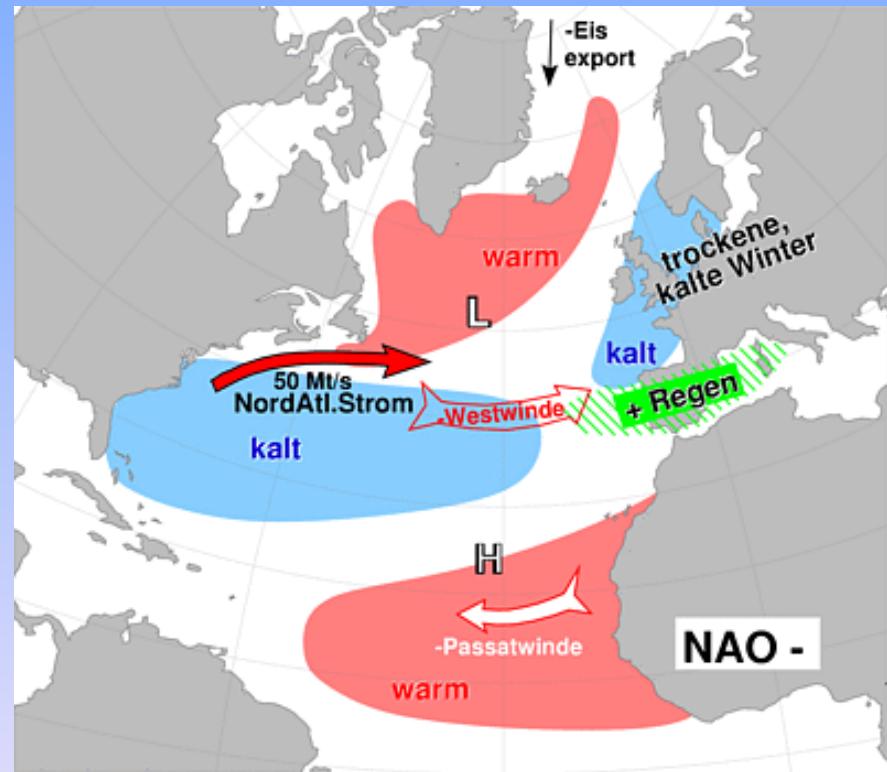


# Auswirkungen der Winter-NAO

## Positive Phase



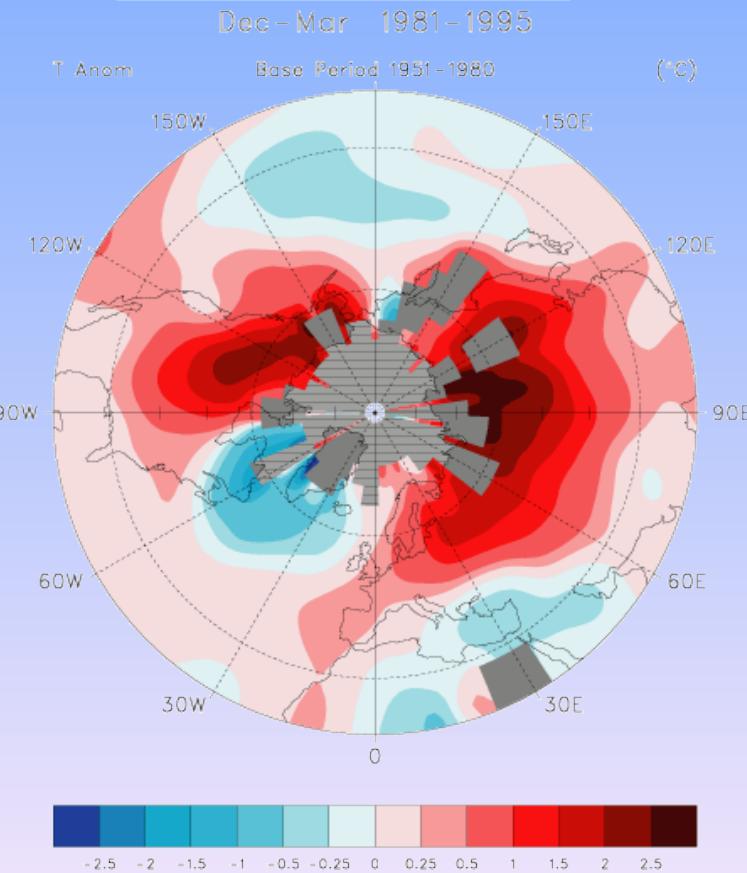
## Negative Phase



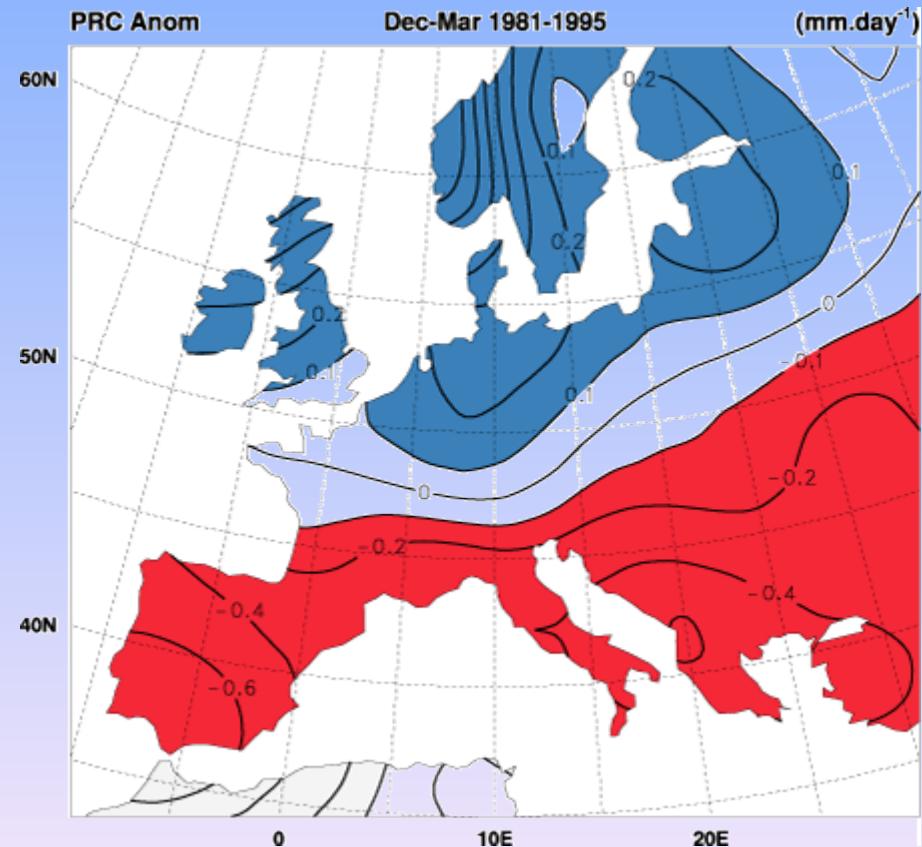
Die NAO beeinflusst das gesamte Klimasystem des atlantischen Raums von den hohen Breiten bis in die Subtropen hinein

# Die klimatischen Auswirkungen der positiven Winter-NAO Phase

## Temperatur

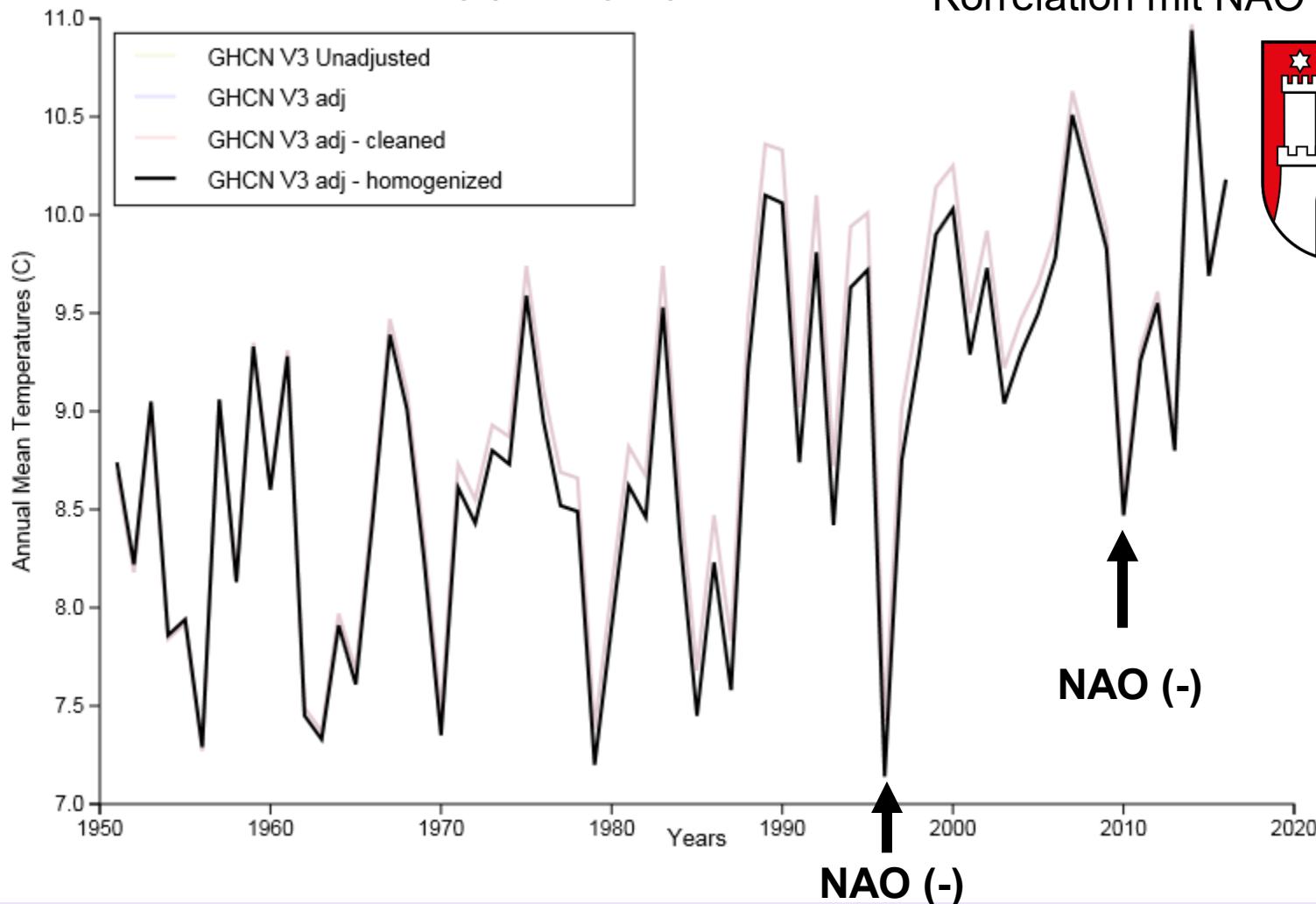


## Niederschlag

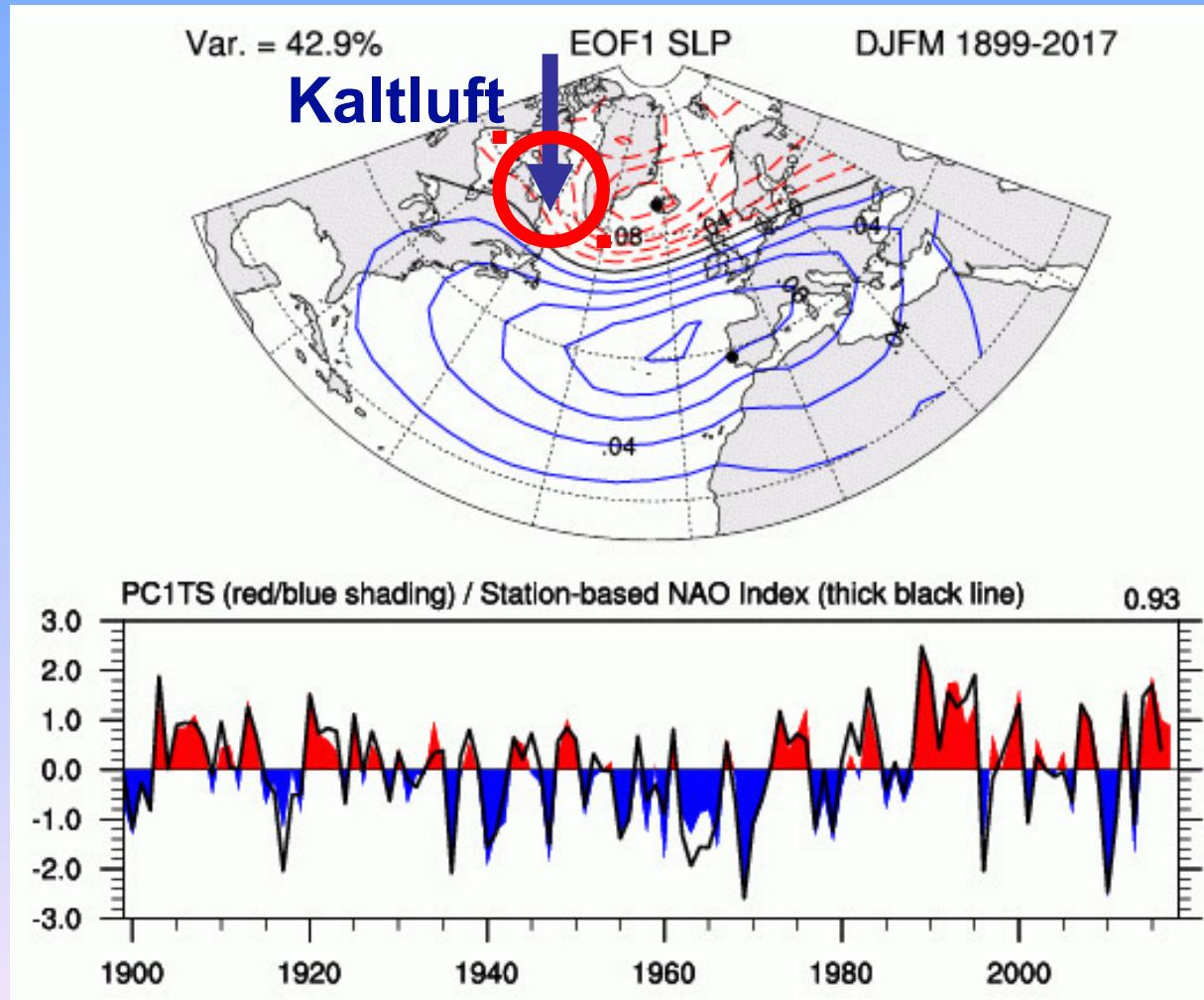


# Temperatur in Hamburg

1951-2016

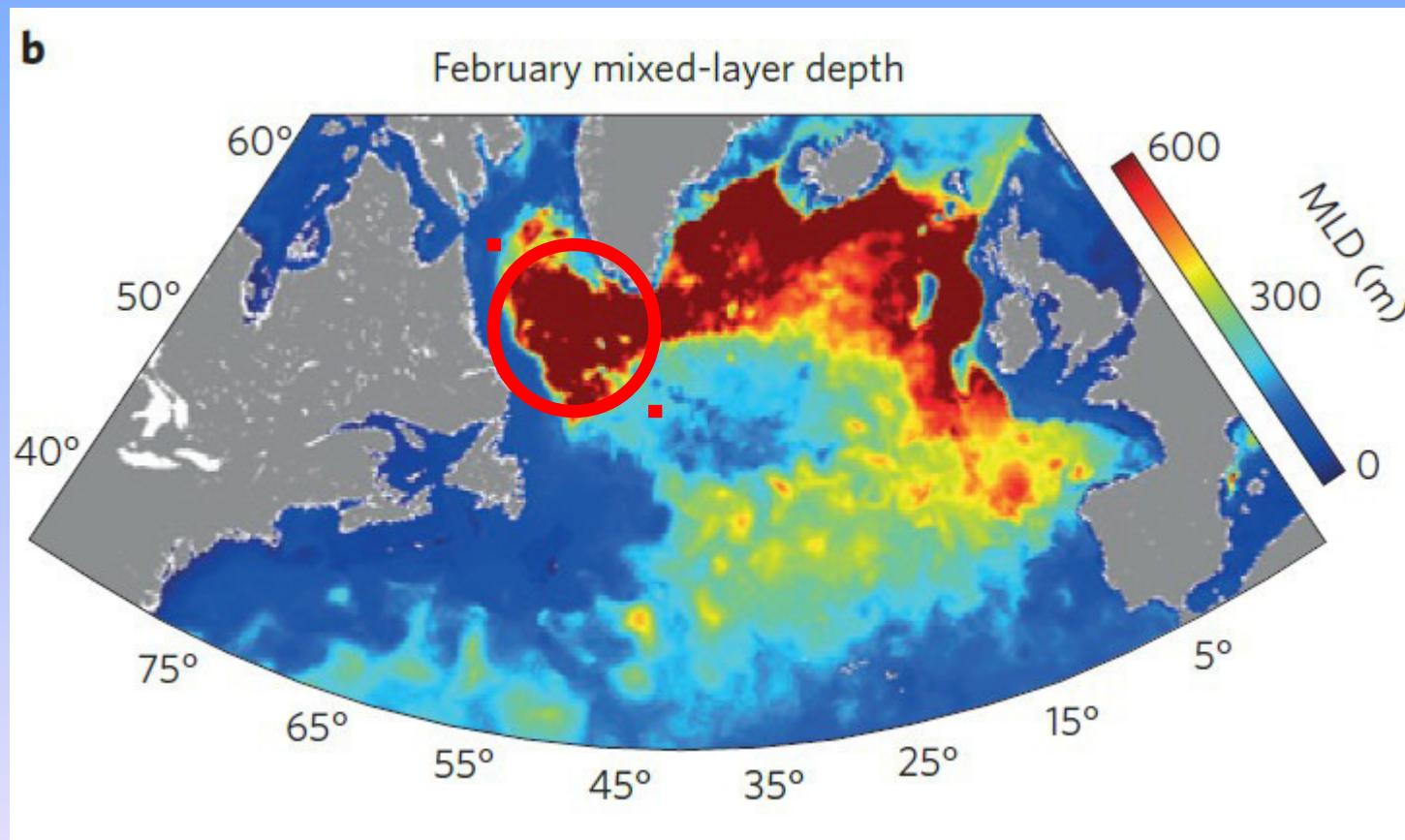


# Die Nordatlantische Oszillation (NAO), Winter (DJFM)



<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>

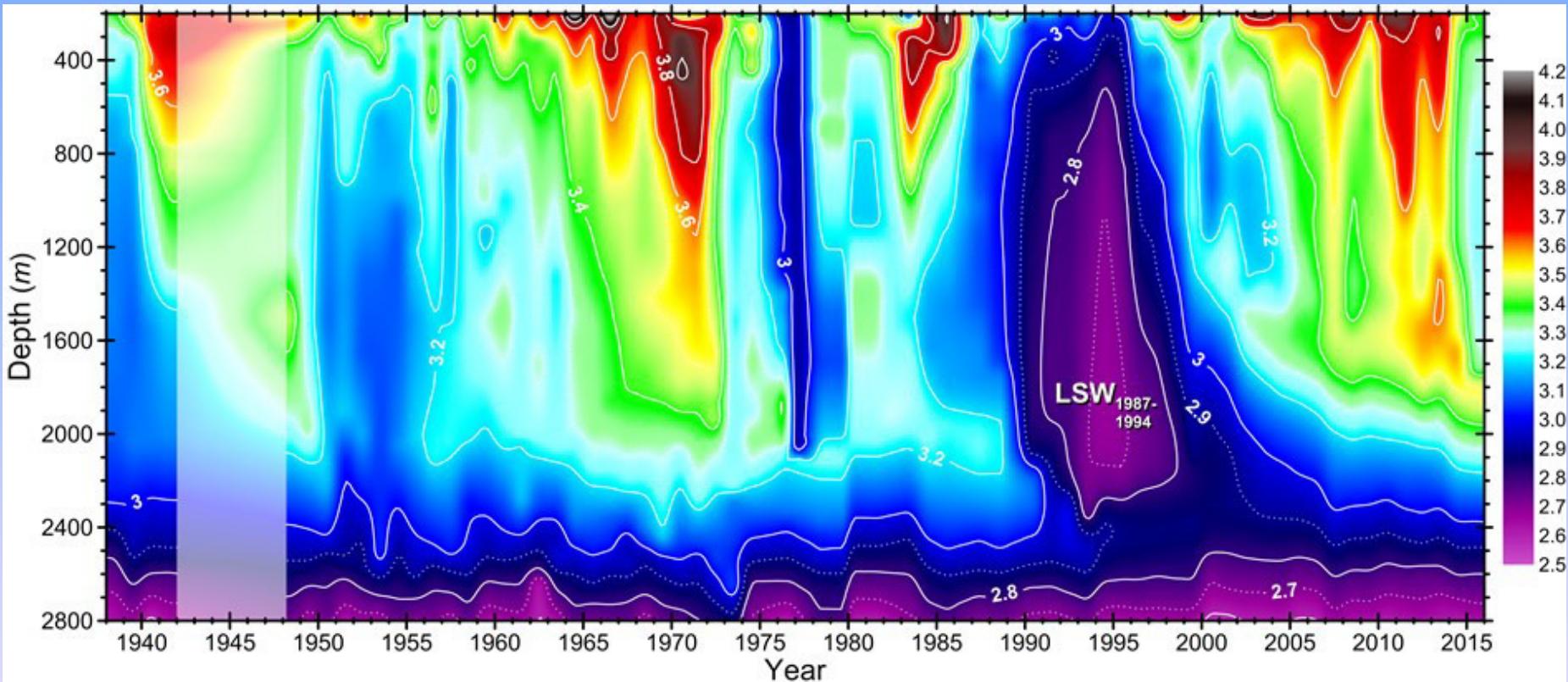
# Die Deckschichttiefe im Nordatlantik



Behrenfeld (2014), <http://www.nature.com/nclimate/journal/v4/n10/pdf/nclimate2349.pdf>

Die Labradorsee ist ein Gebiet mit Tiefenkonvektion

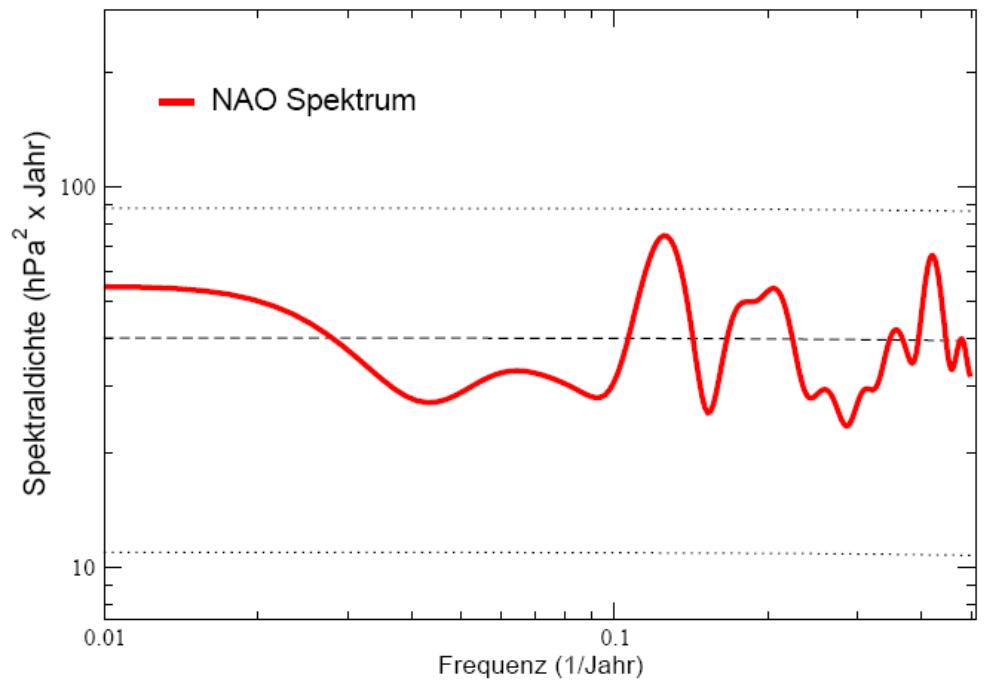
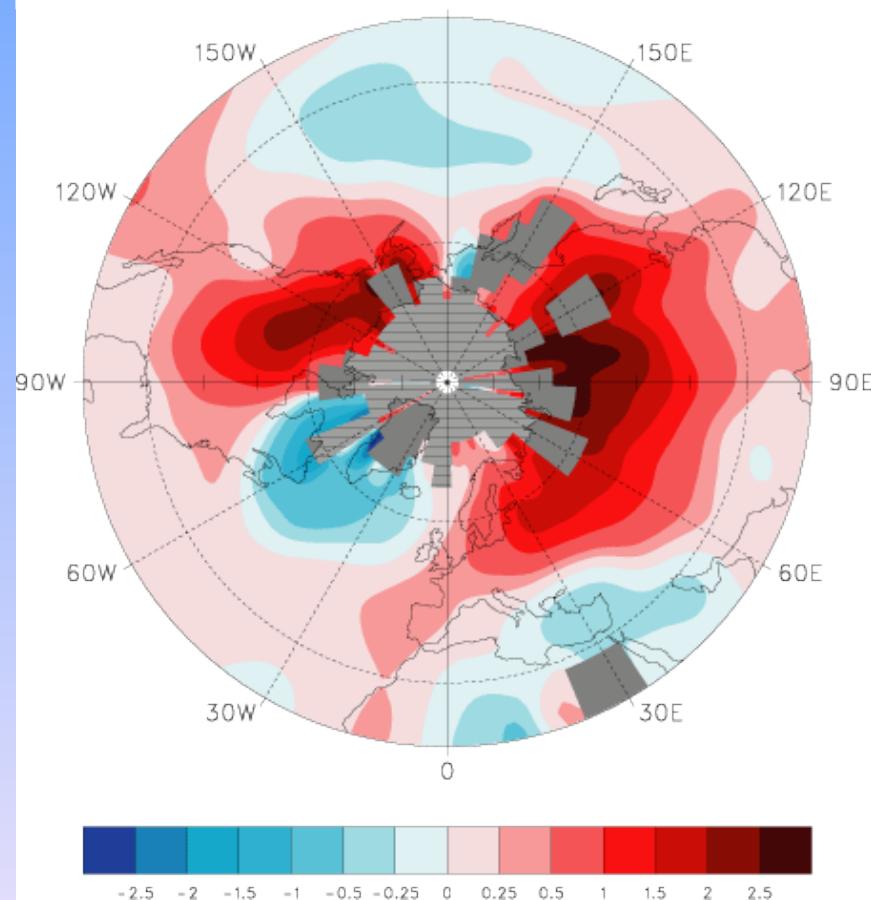
# Die Variabilität der potentiellen Temperatur in der Labradorsee



Yashayaev, I. & Loder, J.W. (2016). Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016. Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/2016GL071668.

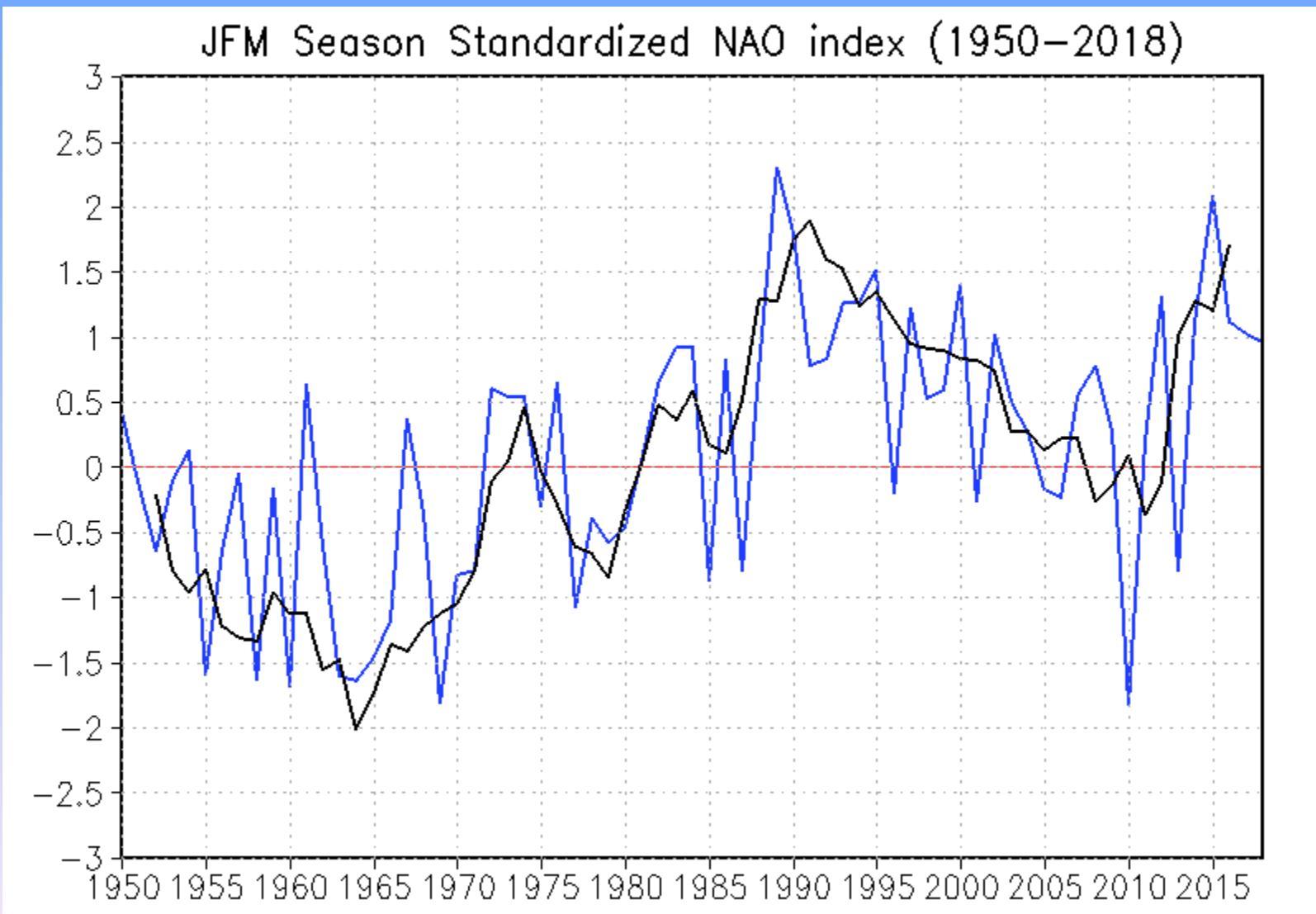
# Winter-NAO Spektrum

SAT Anomalien



Das NAO Spektrum ist nahezu „weiß“, sodass ein stochastisches Szenarium angebracht ist

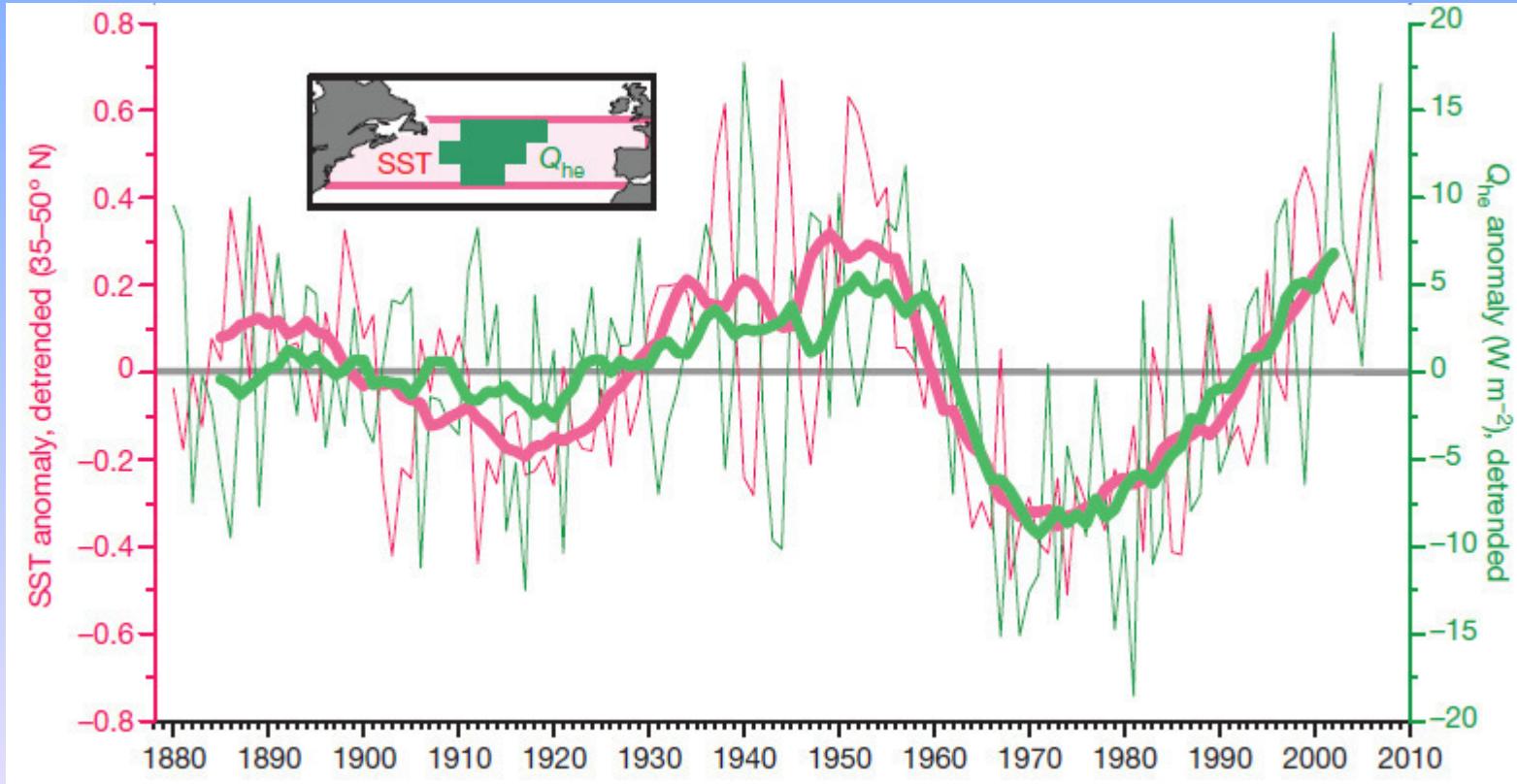
# Der NAO-Index im Spätwinter



<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/season.JFM.nao.gif>

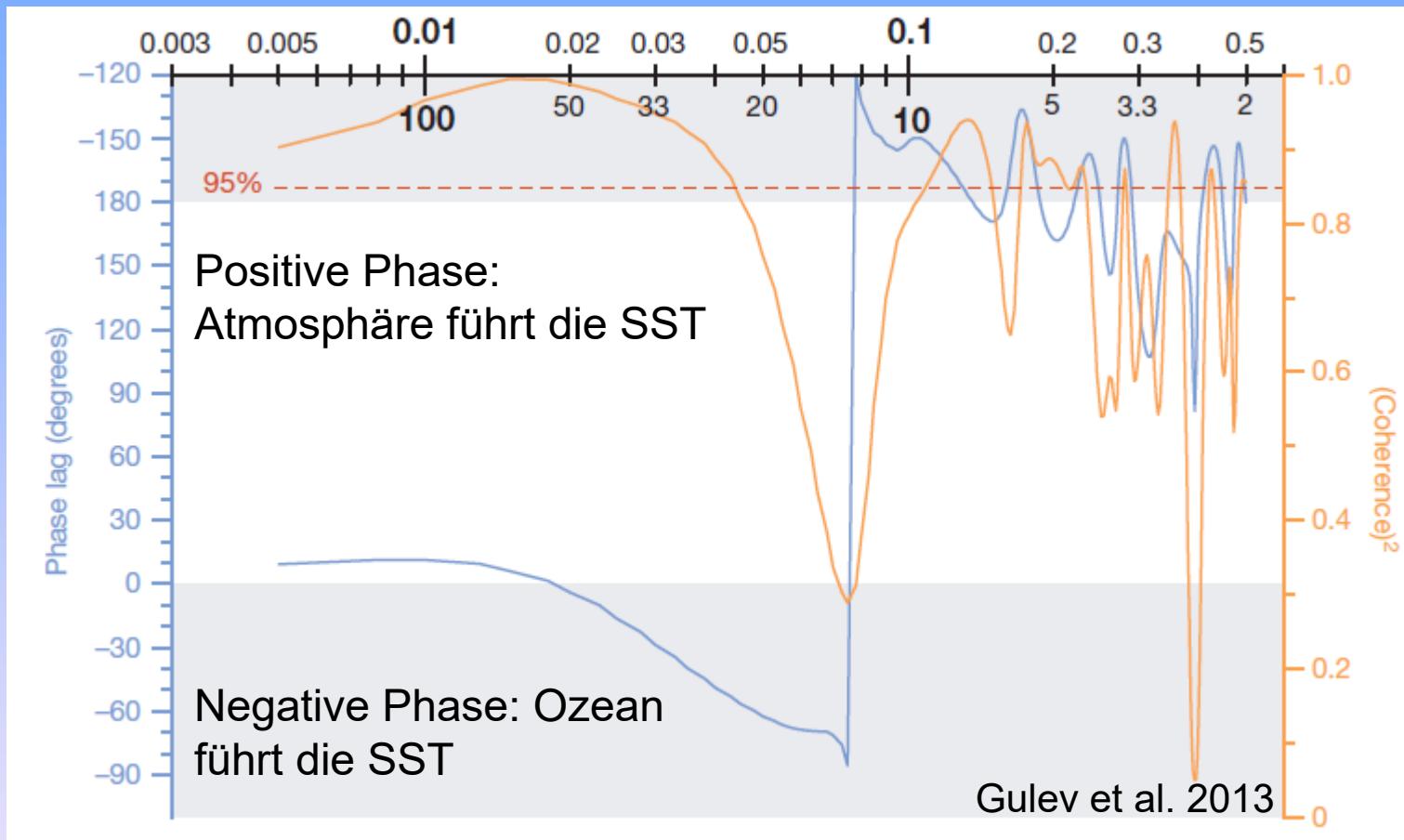


# Wärmeflüsse und SST im Nordatlantik (NA) Sektor



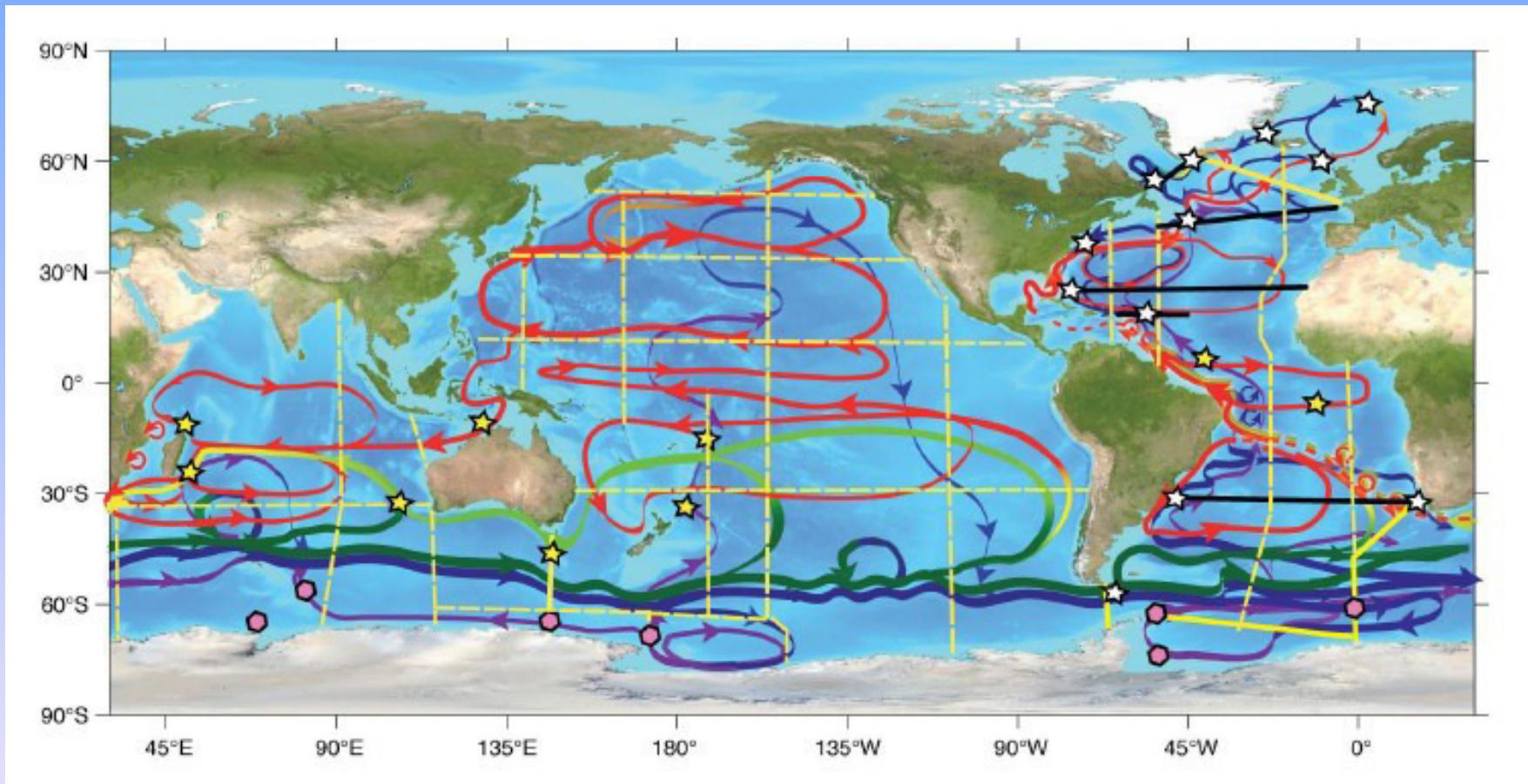
Gulev et al. 2013

# Kreuzspektralanalyse zwischen NA Wärmeflüssen und SST

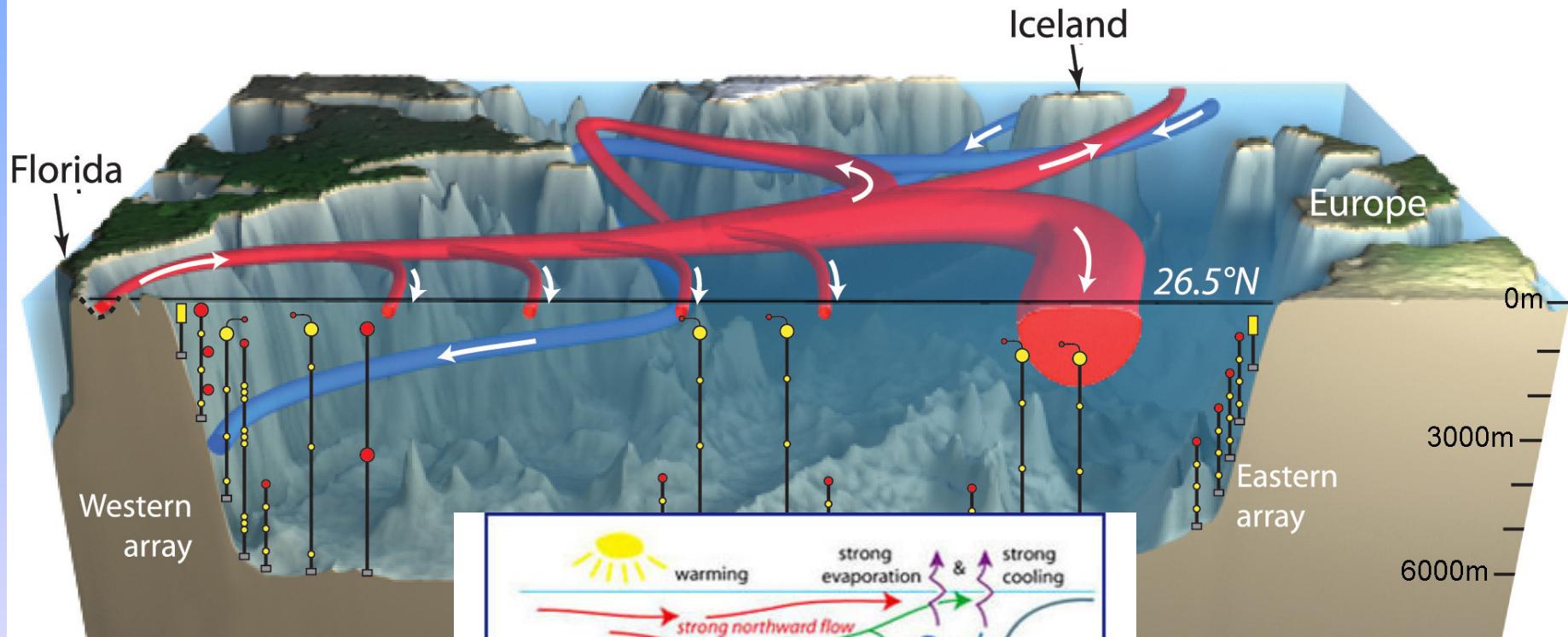


Die Phase ändert ihr Vorzeichen bei einer Periode von etwa 10 Jahren.  
Auf kürzeren Zeitskalen treibt die Atmosphäre die SST, auf längeren  
Zeitskalen treibt der Ozean die SST

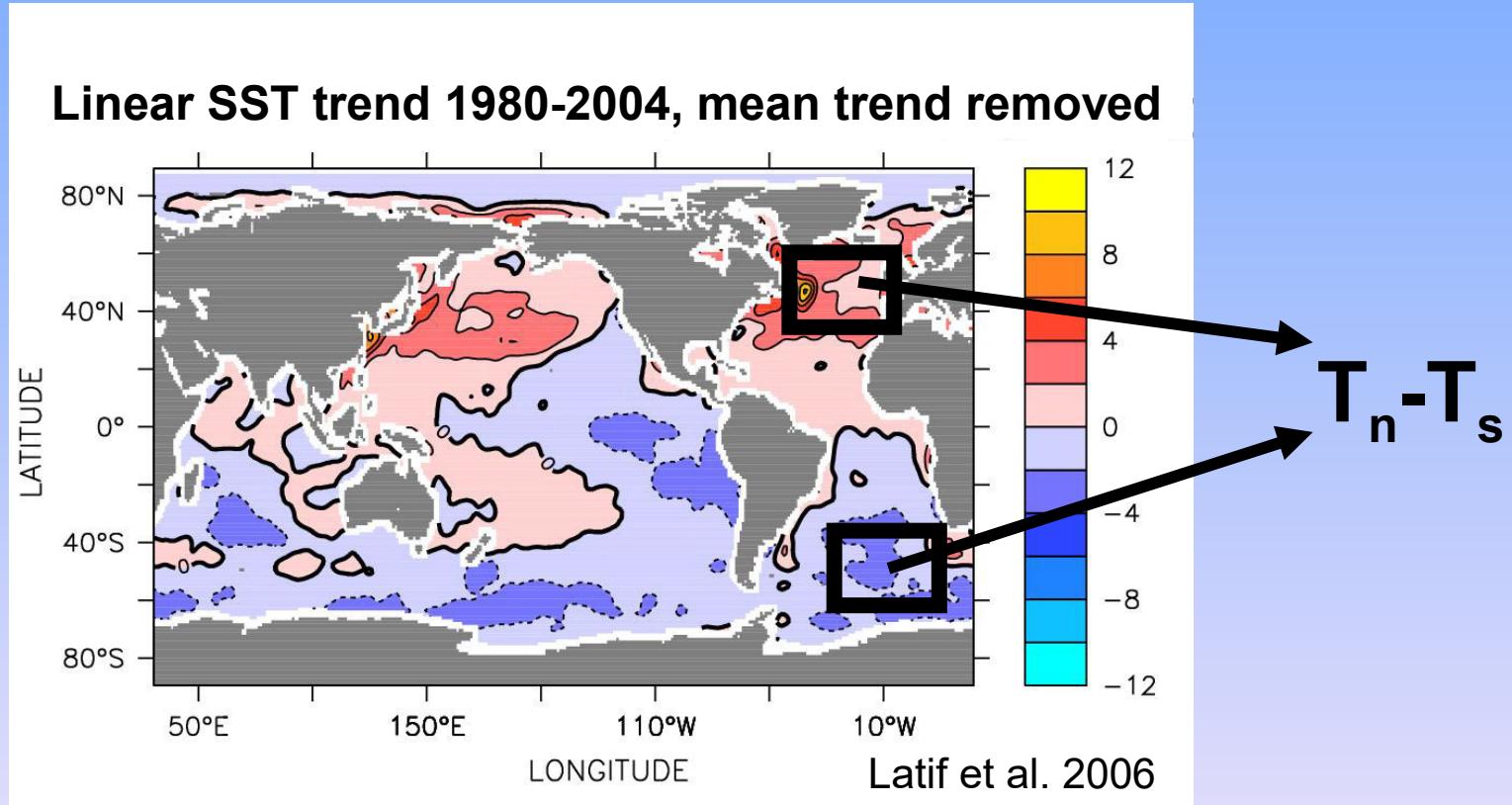
# Die globale Ozeanzirkulation



# The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)

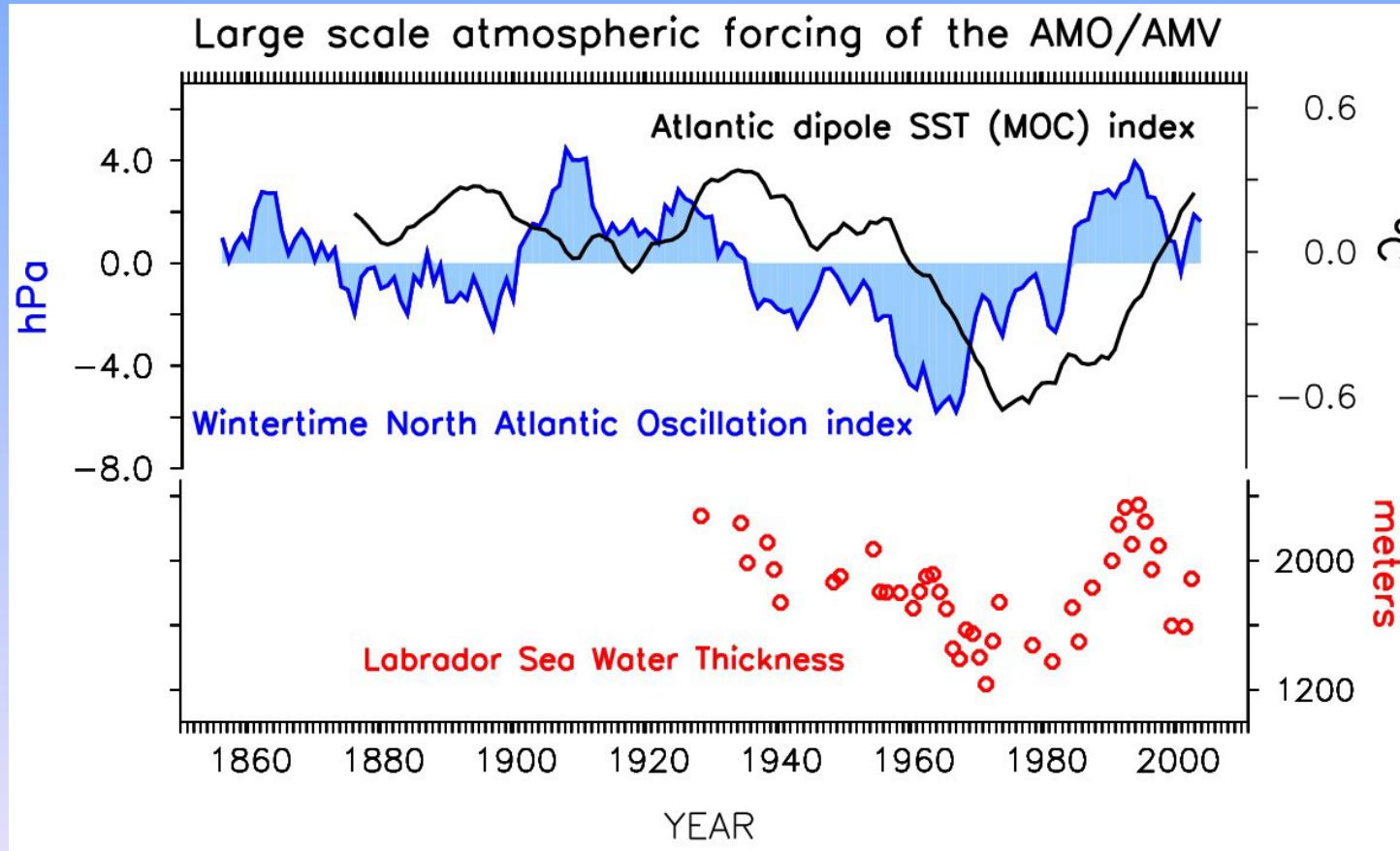


# Der atlantische SST Dipol, ein Index der relativen AMOC Stärke



Die Schwankungen werden auch als Atlantic Multidecadal Oscillation/Variability (AMO/V) bezeichnet

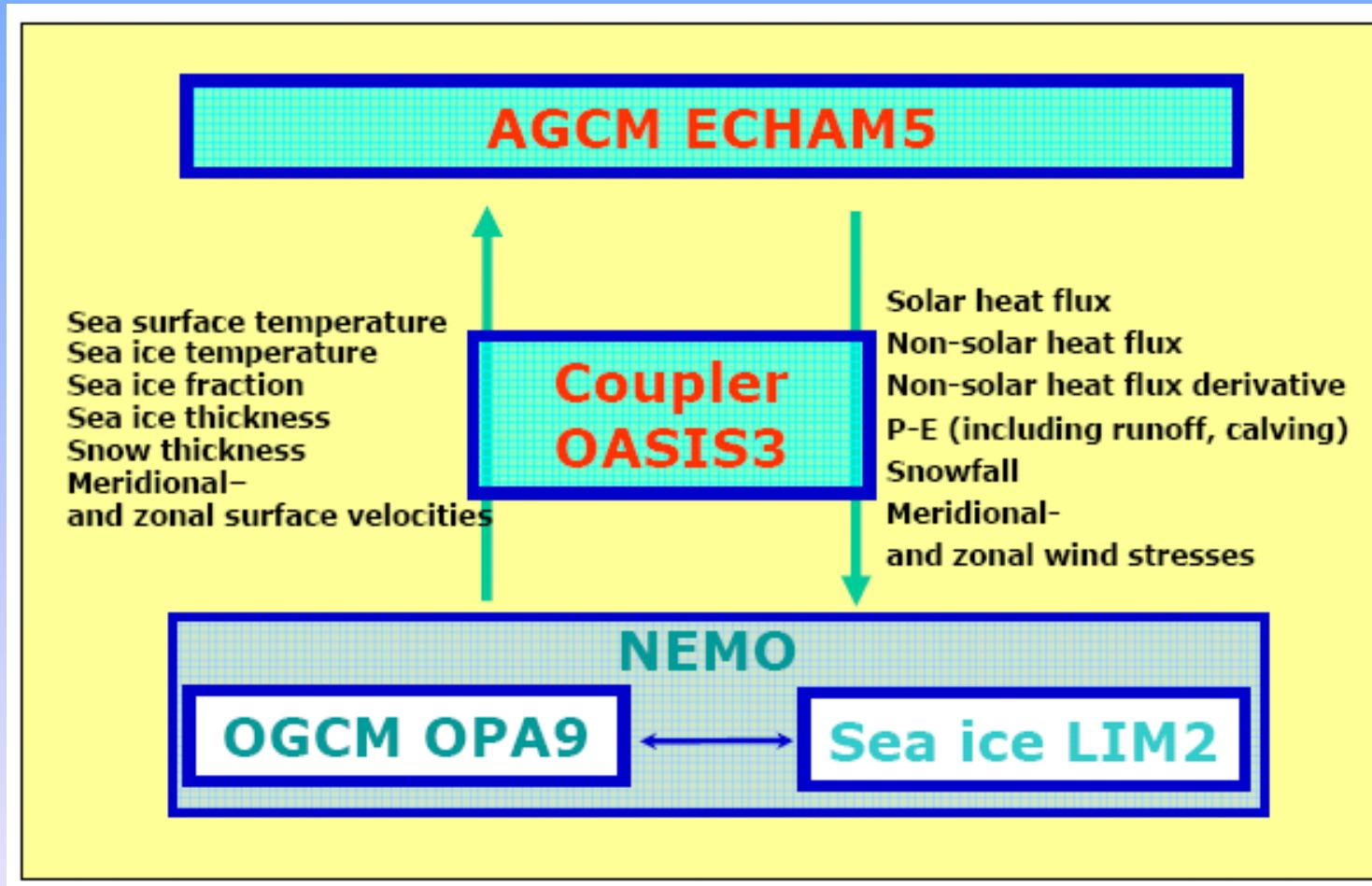
# NAO treibt AMO/V, Ozean-Atmosphäre Wechselwirkung



nach Latif et al. 2006

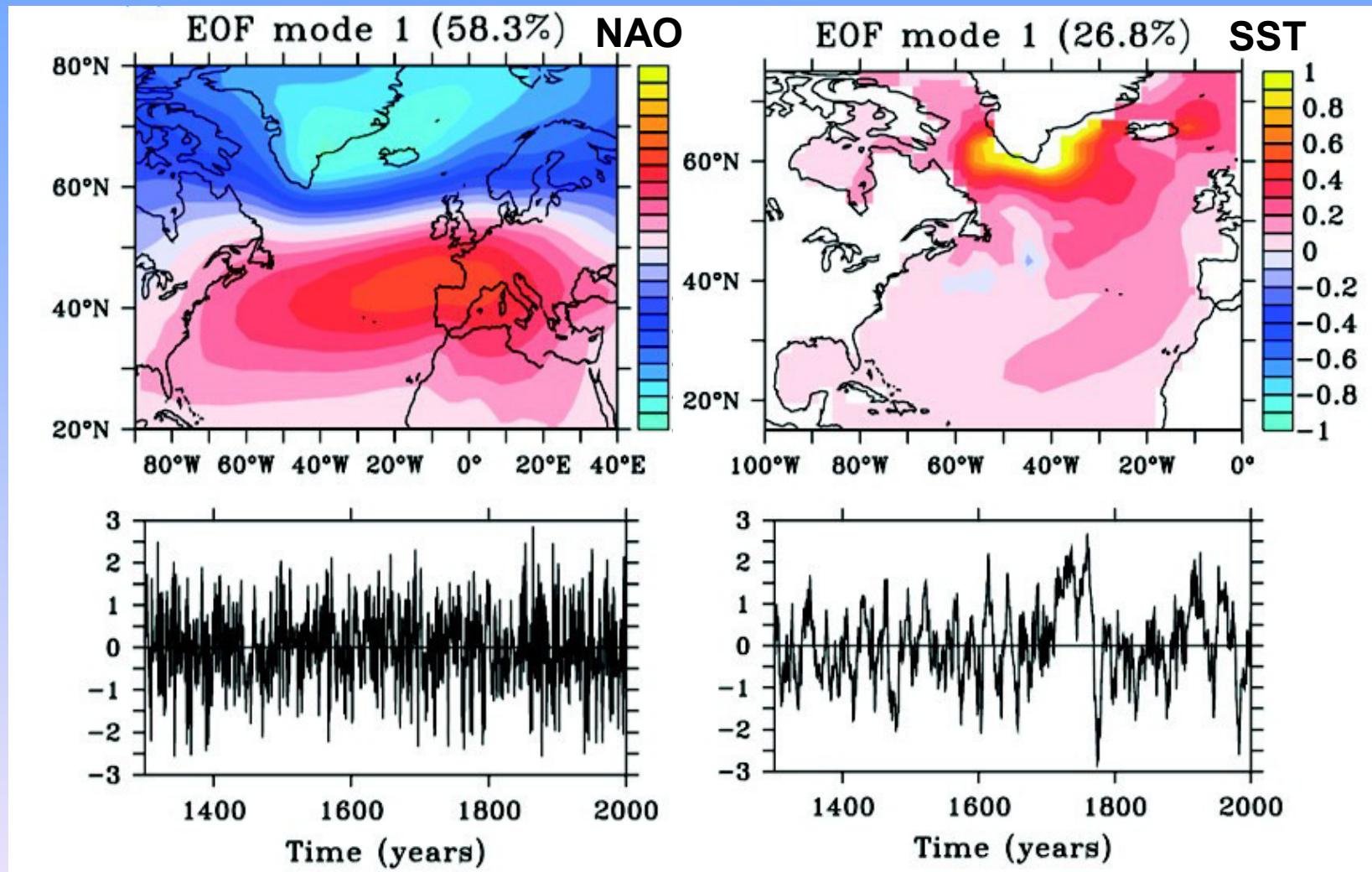
# Kiel Climate Model (KCM)

## atmosphere: T42, ocean: 2° (eq. higher)



version applied here is freshwater flux-corrected in the North Atlantic  
Park et al. 2016

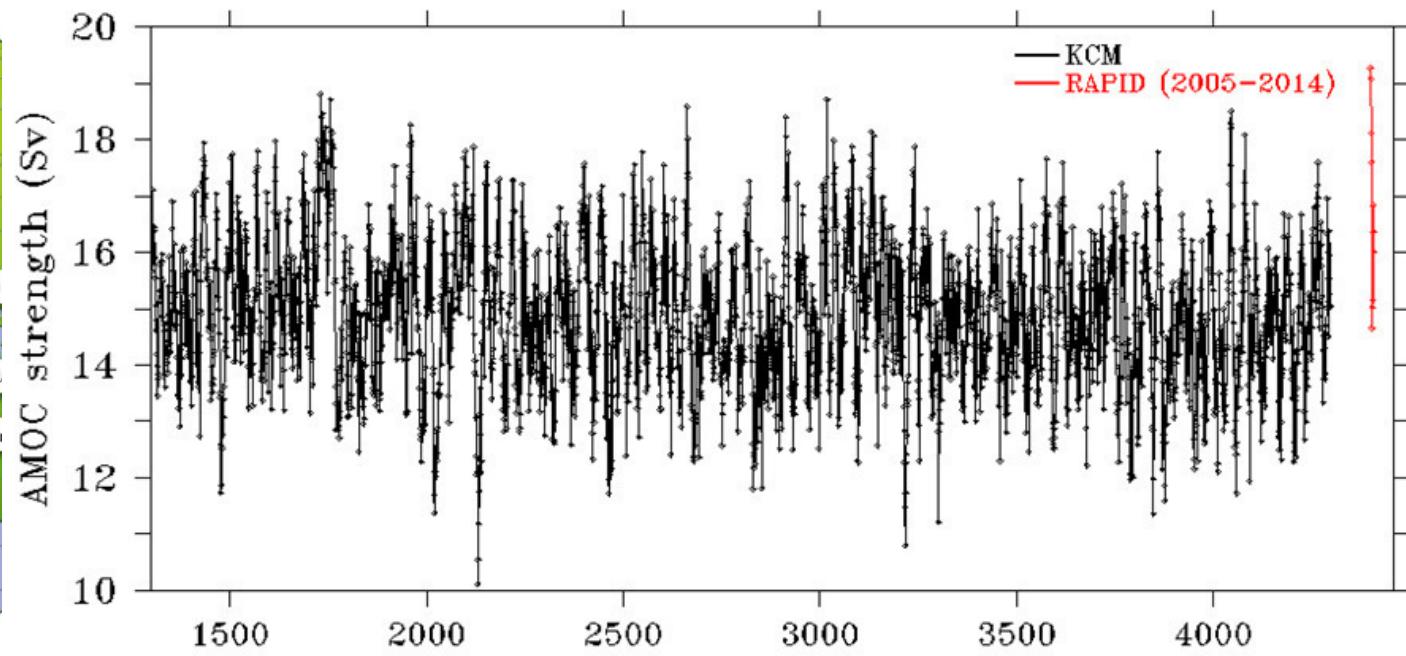
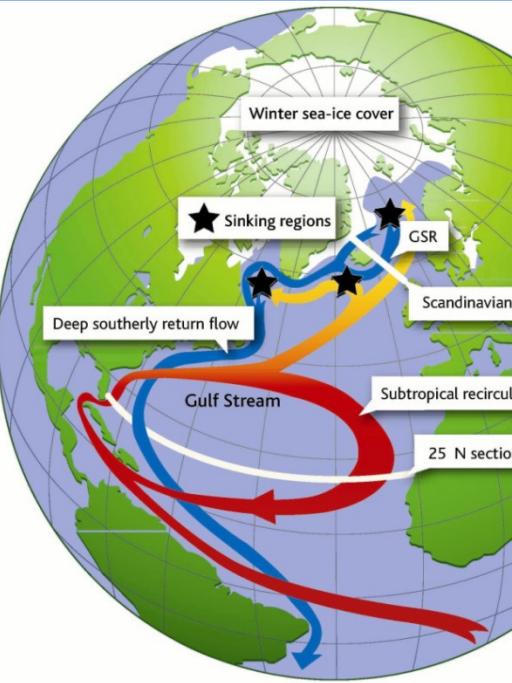
# NAO und SST Variabilität im KCM



Park et al. 2016

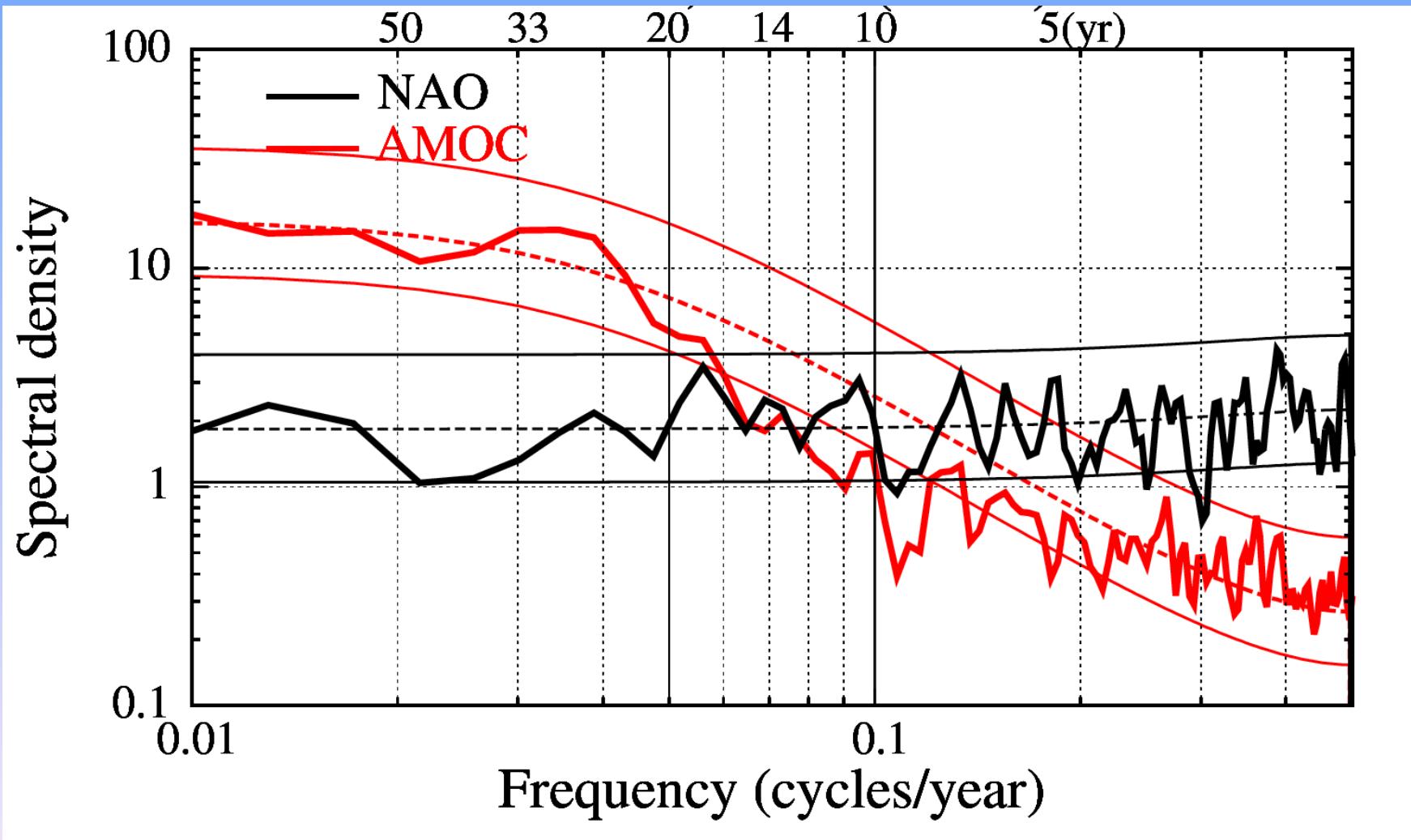


# AMOC Variabilität in einem Kontrolllauf mit dem KCM



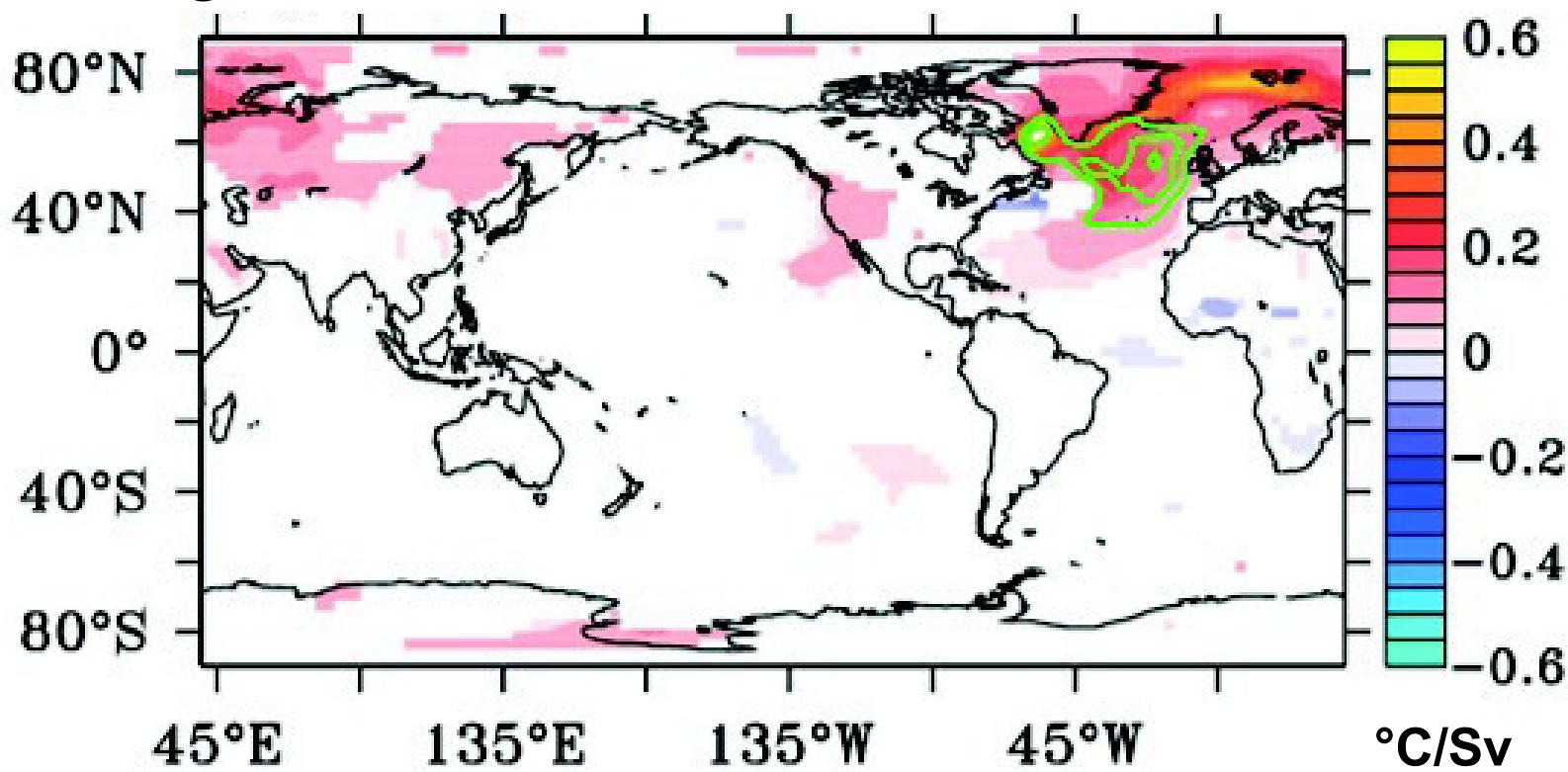
Park et al. 2016

# NAO und AMOC Spektren (KCM)



# Einfluss der AMOC auf die SAT

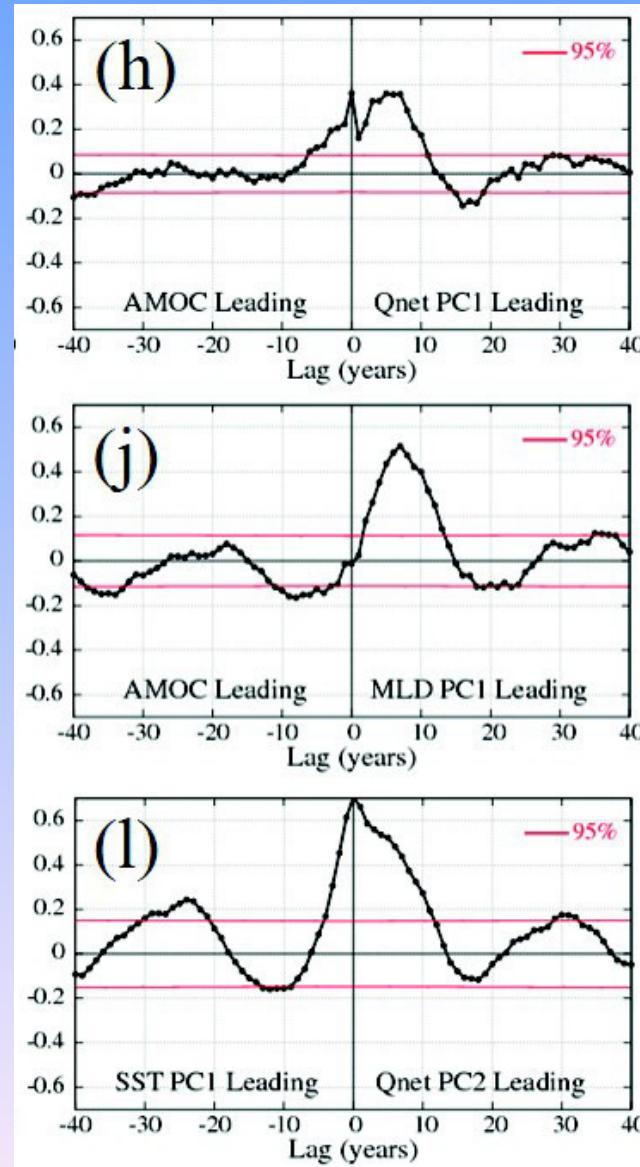
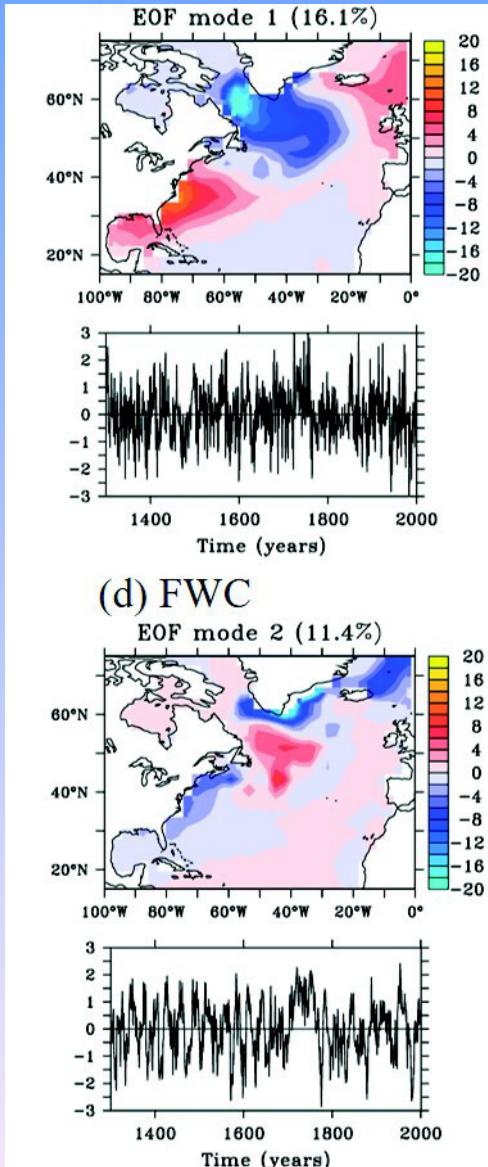
## Regression des AMOC Index auf die SAT



Die grünen Linien sind die erklärten Varianzen, Contour-Abstand 0,1 Park et al. 2016  
SAT: Surface Air Temperature

# Die Wärmeflüsse im KCM

NAO-  
getrieben



# Wie treibt die NAO die AMO an?

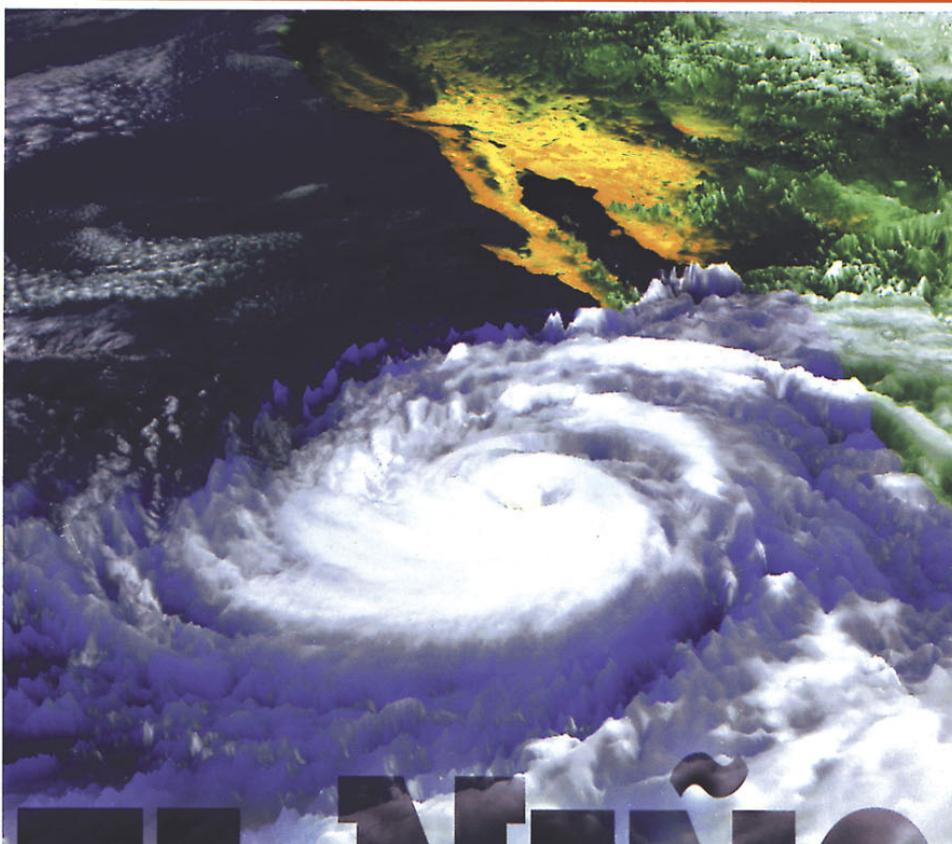
- Eine starke NAO führt mehr Kaltluft im Winter über die Labradorsee
- Gleichzeitig verstärken sich die Westwinde über dem Nordatlantik
- Beide Prozesse führen zu einem kalten Nordatlantik (Ekman-Transport, vertikale Vermischung)
- Außerdem verstärkt sich die Tiefenkonvektion in der Labradorsee (infolge eines höheren Wärmeverlusts des Meeres)
- Dies führt mit einer Zeitverzögerung zu einer stärkeren AMOC und der Ausprägung des interhemisphärischen SST Dipols
- Der nach Norden gerichtete Wärmetransport verstärkt sich, was eine verzögerte negative Rückkopplung darstellt
- Stochastisch (NAO, weißes Spektrum) angetriebener Ozean-Oszillator
- Im Prinzip ist die AMO vorhersagbar anhand der zurückliegenden Schwankungen der NAO, und damit z.B. auch dekadische Schwankungen der Hurrikan-Aktivität

# DER SPIEGEL

Nr. 42/13.10.97 · 5,00 DM



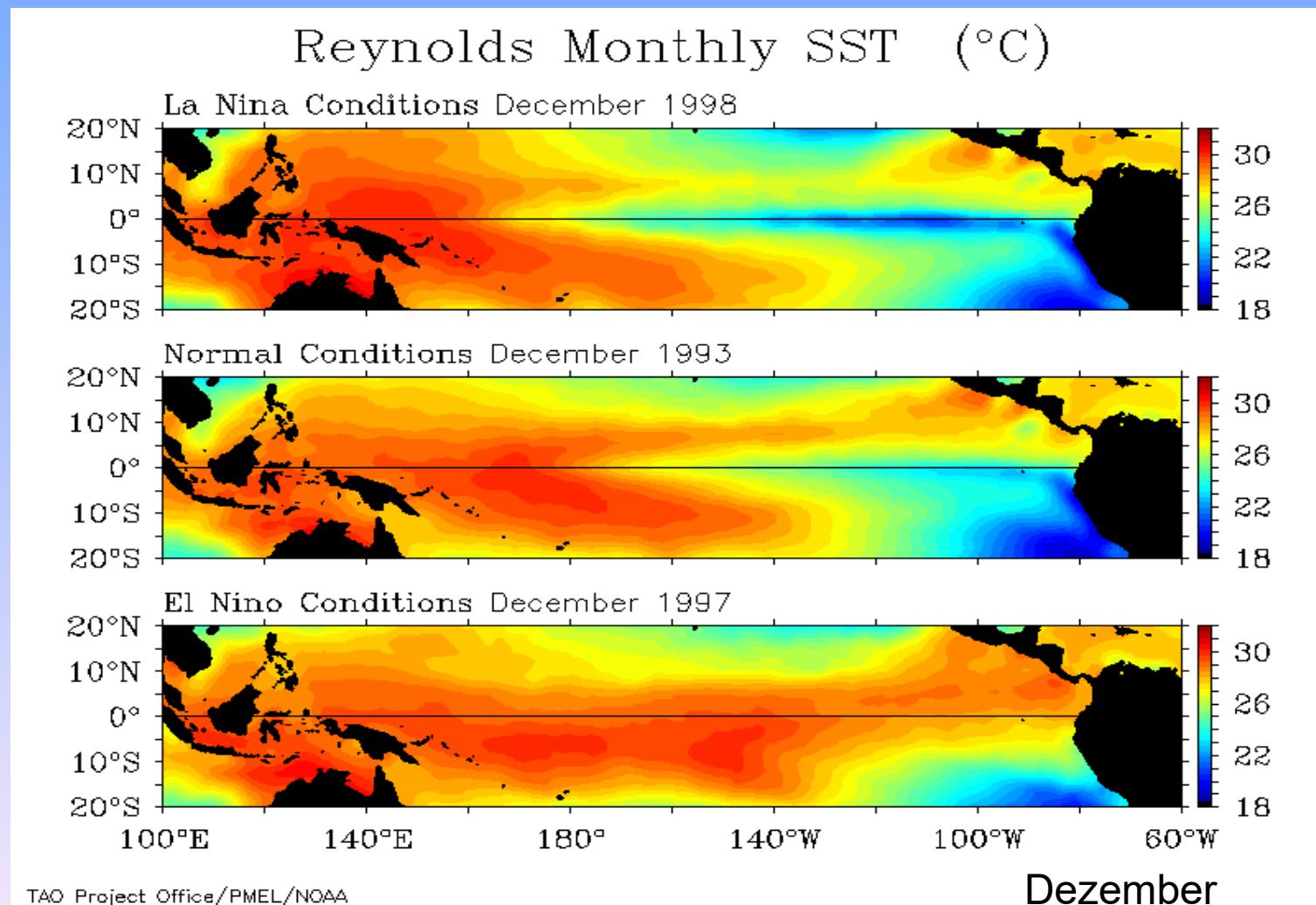
4 390700 705005 42



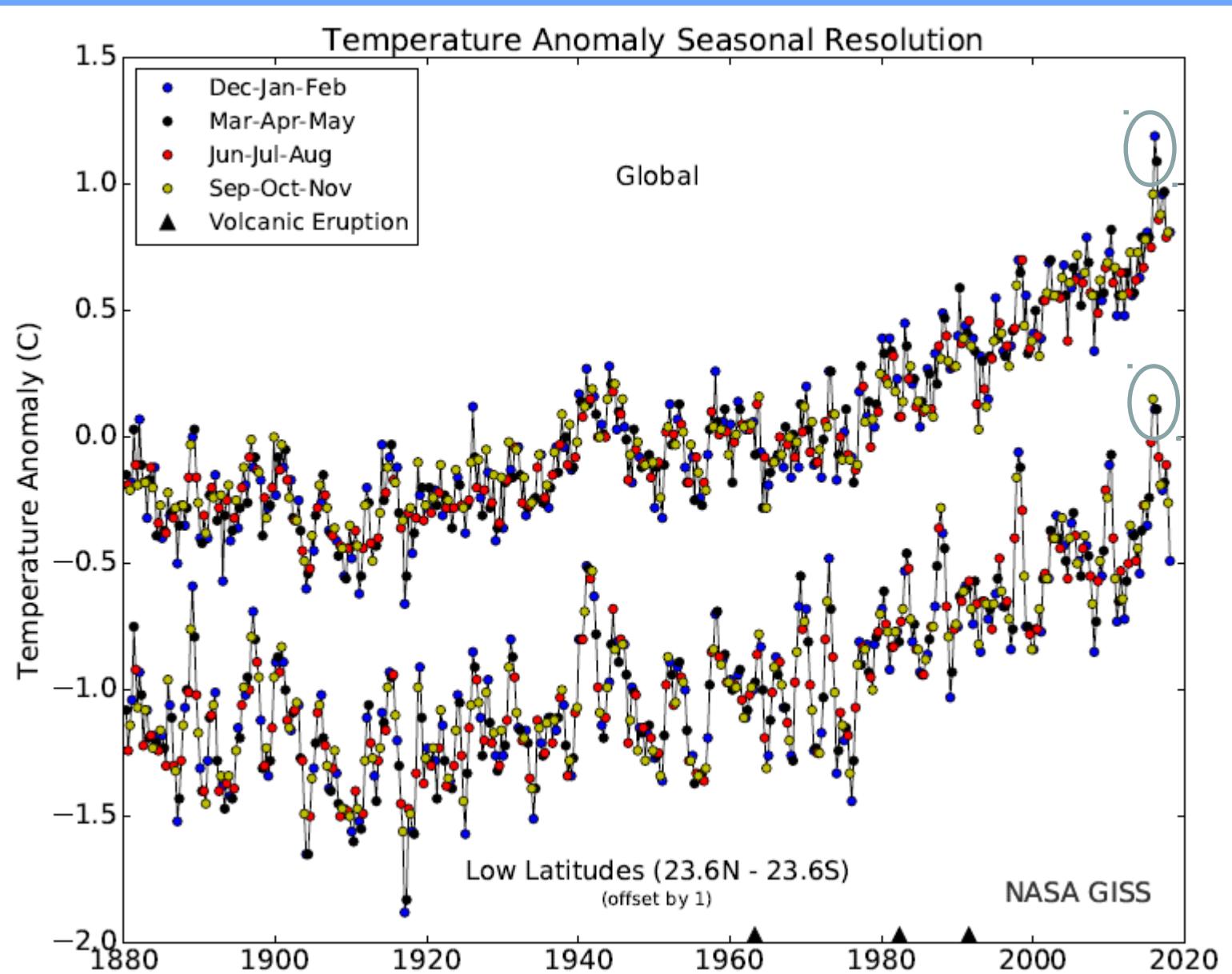
# EL NIÑO

# Wetter-Katastrophen werden vorhersehbar

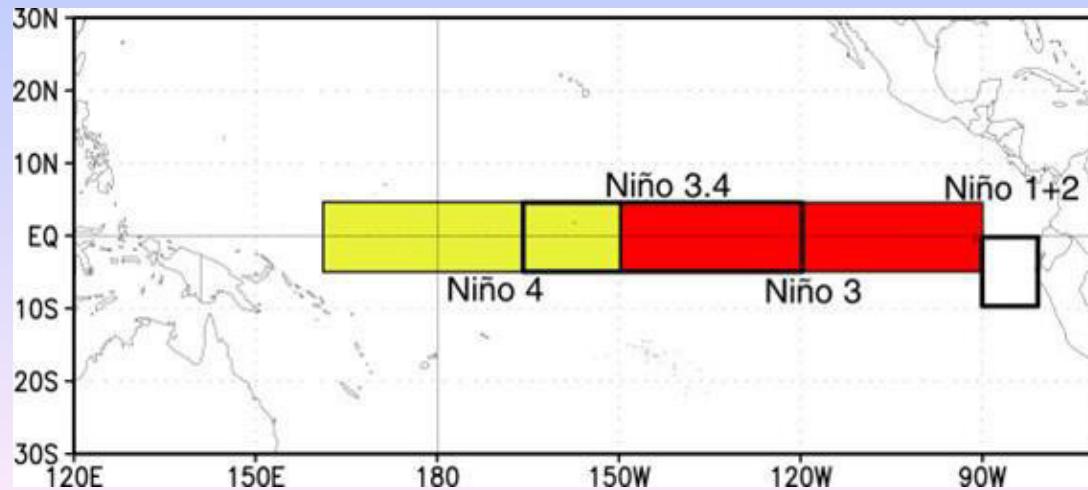
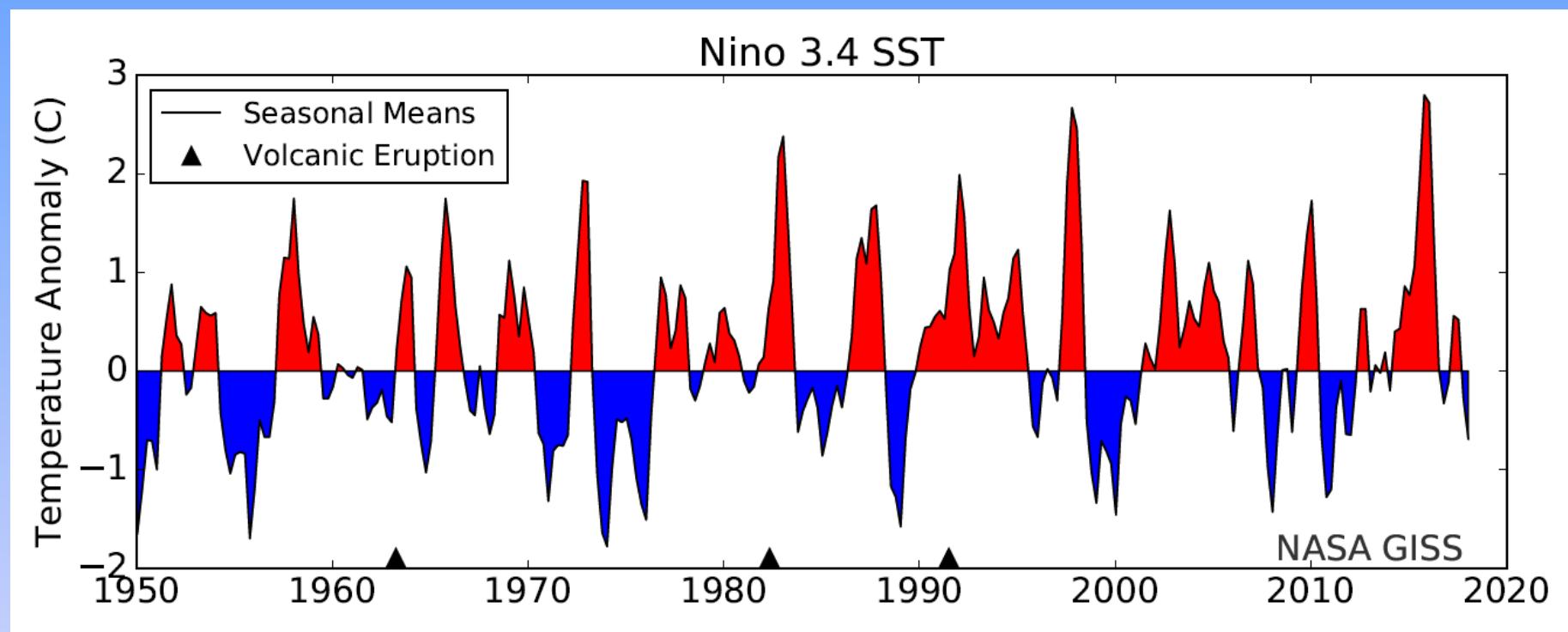
# Die Meeresoberflächentemperatur (SST) im Dezember dreier verschiedener Jahre



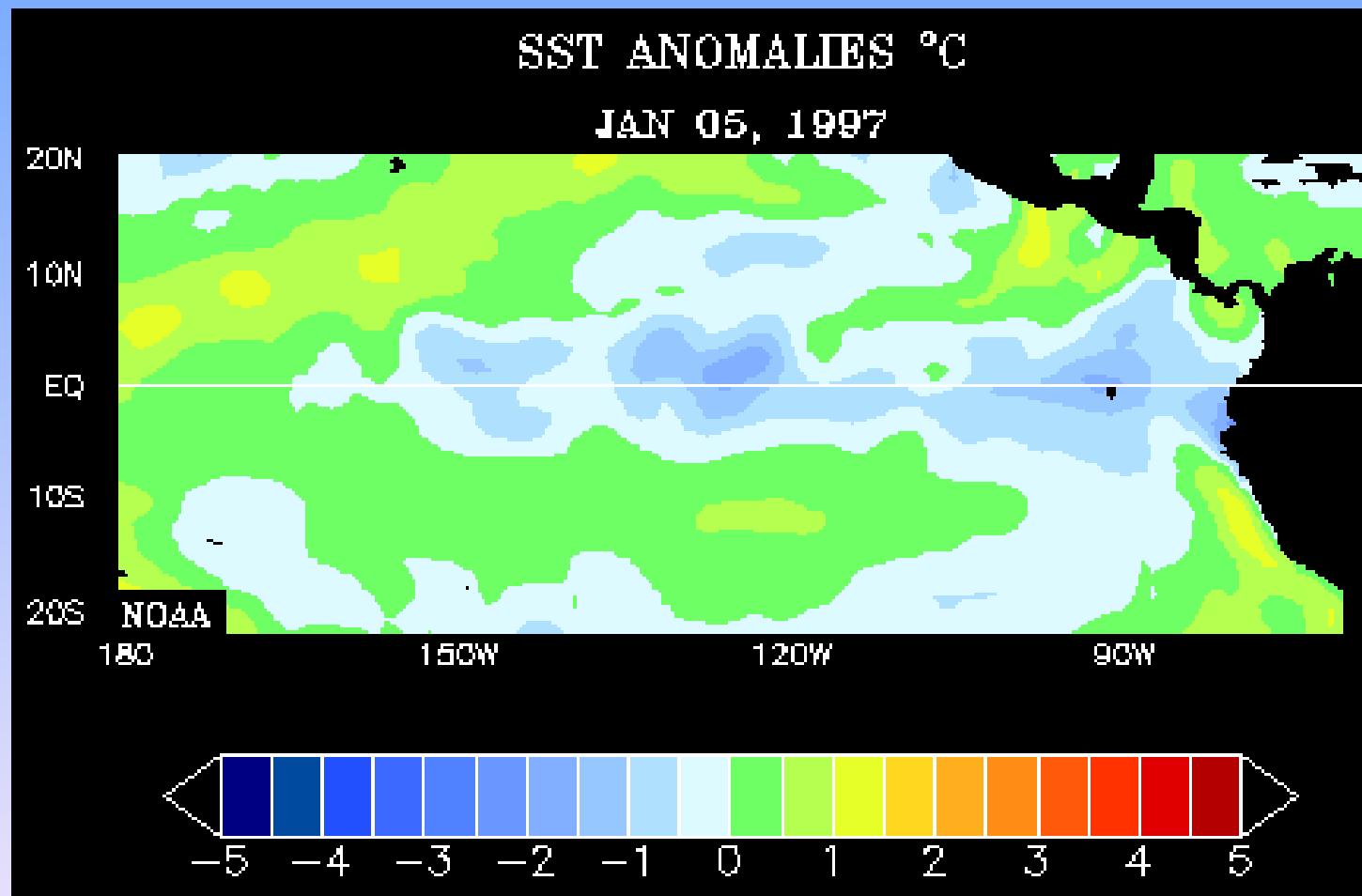
# Einfluss auf die Globaltemperatur (saisonal)



# El Niño/Southern Oscillation Indizes



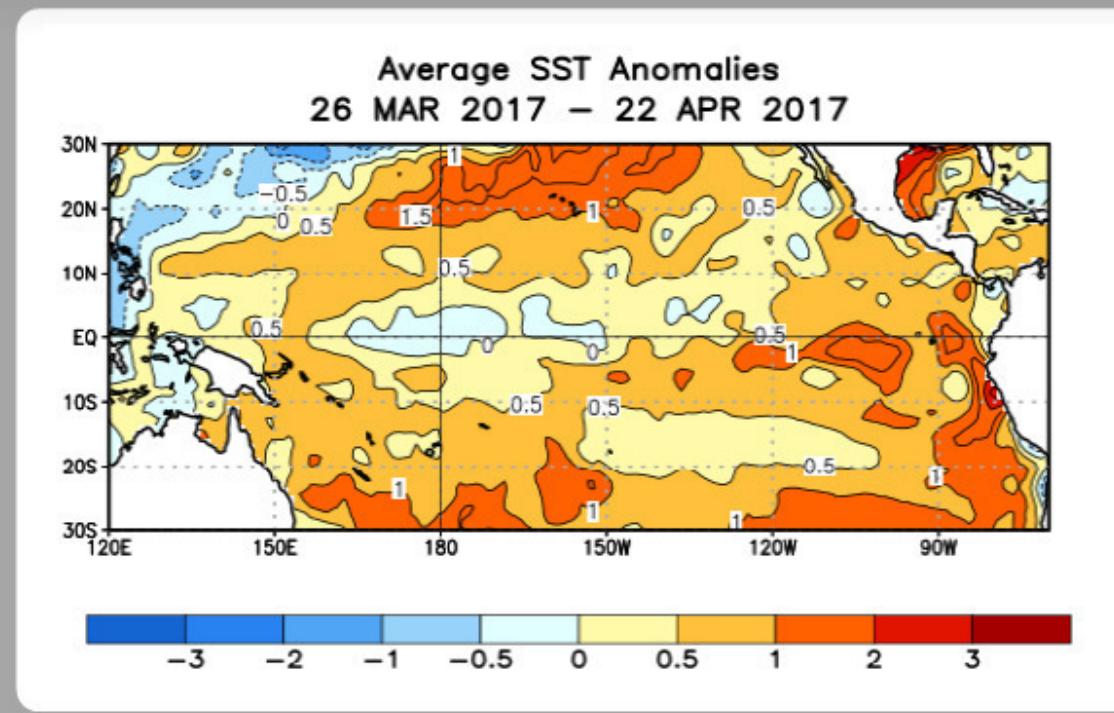
# Der „Super“ El Niño der Jahre 1997/1998 und das folgende La Niña Ereignis



# Temperaturabweichung im Frühjahr 2017

## SST Departures ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the Tropical Pacific During the Last Four Weeks

During the last four weeks, equatorial SSTs were near-average across the central Pacific Ocean, and above-average across the eastern Pacific.



Völlig aus der Art geschlagen!!!

# Weird Coastal El Nino Clobbers Peru: 80 Killed, \$1.4 Billion in Damage

By [admin](#) on March 28, 2017 • ( [Leave a comment](#) )

By: Bob Henson and Jeff Masters , 6:00 PM GMT on March 24, 2017



# Sintflutartige Niederschläge in Peru und Kolumbien

Küsten-El-Niño

Peru kämpft gegen sintflutartige Regenfälle

von Sven Titz 28.3.2017, 05:30 Uhr



Neue Zürcher Zeitung

# ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions

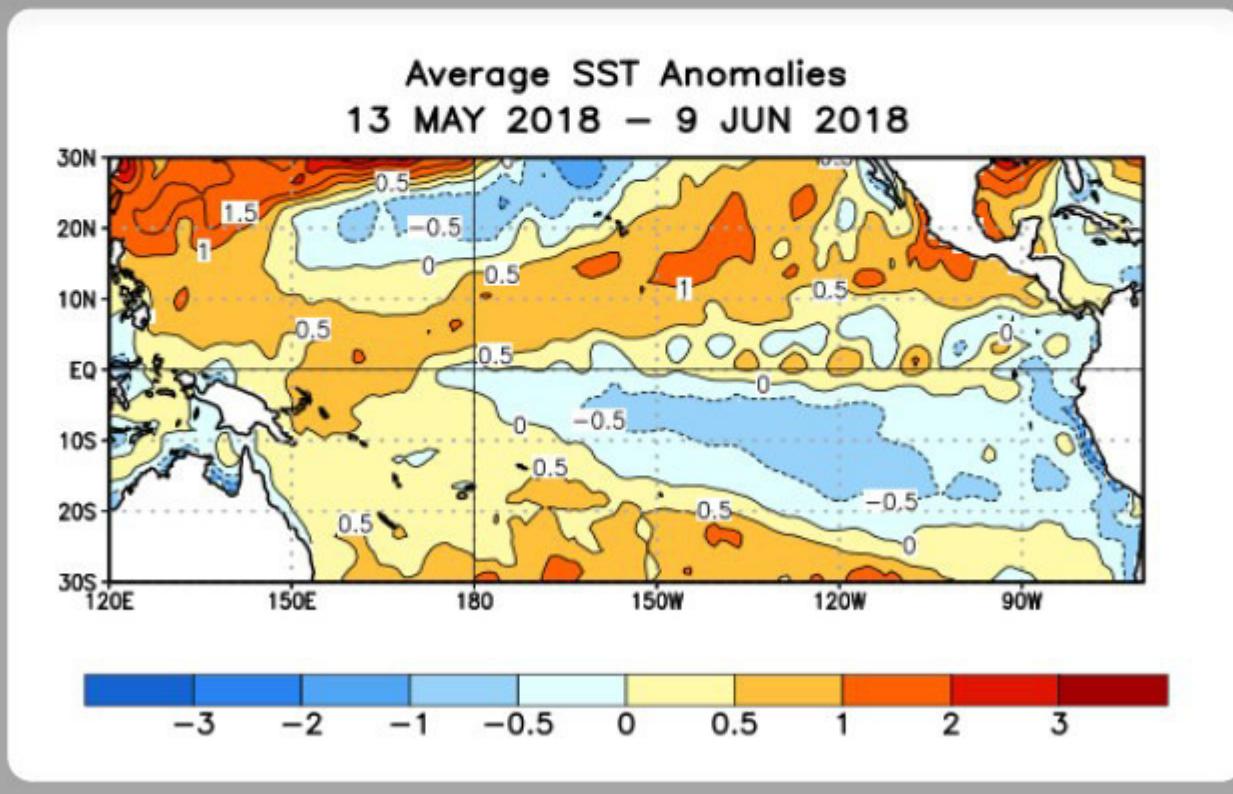


Update prepared by:  
Climate Prediction Center / NCEP  
11 June 2018

# Die aktuelle Situation

## SST Departures ( $^{\circ}$ C) in the Tropical Pacific During the Last Four Weeks

During the last four weeks, equatorial SSTs were near average across most of the Pacific Ocean, except remaining above average in the western Pacific.

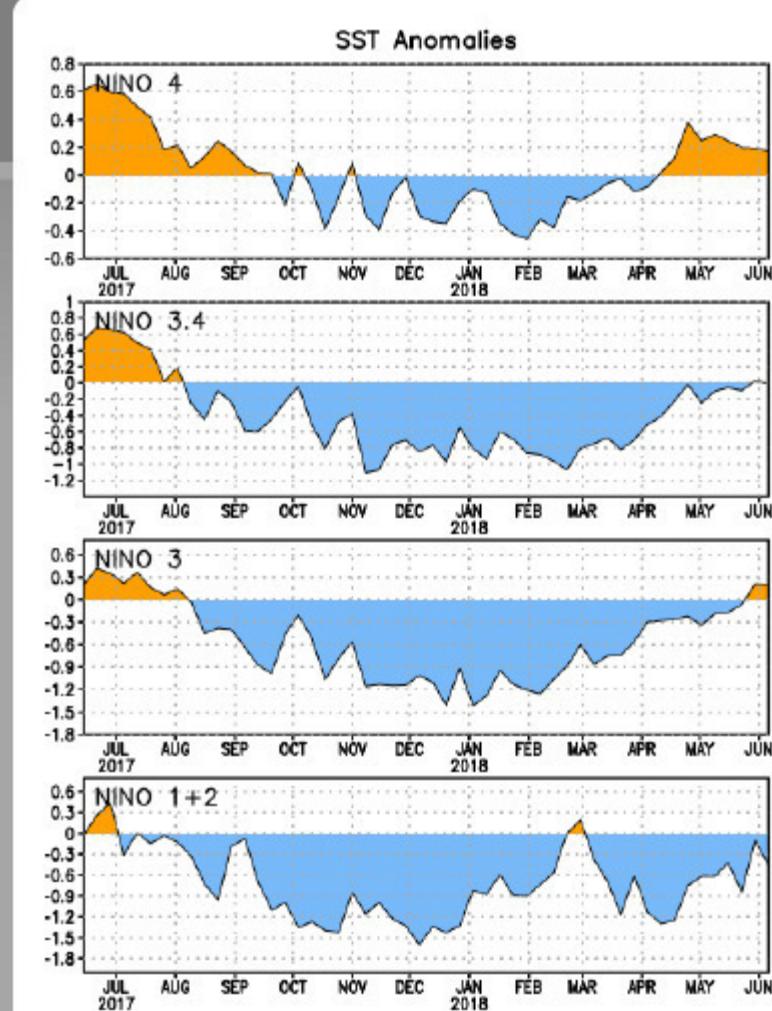
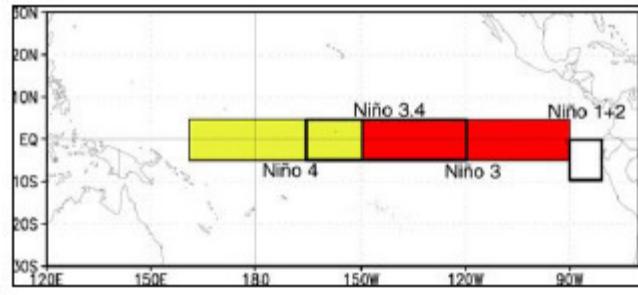


# Die Entwicklung im letzten Jahr

## Niño Region SST Departures ( $^{\circ}$ C) Recent Evolution

The latest weekly SST  
departures are:

Niño 4	0.2°C
Niño 3.4	0.0°C
Niño 3	0.2°C
Niño 1+2	-0.5°C



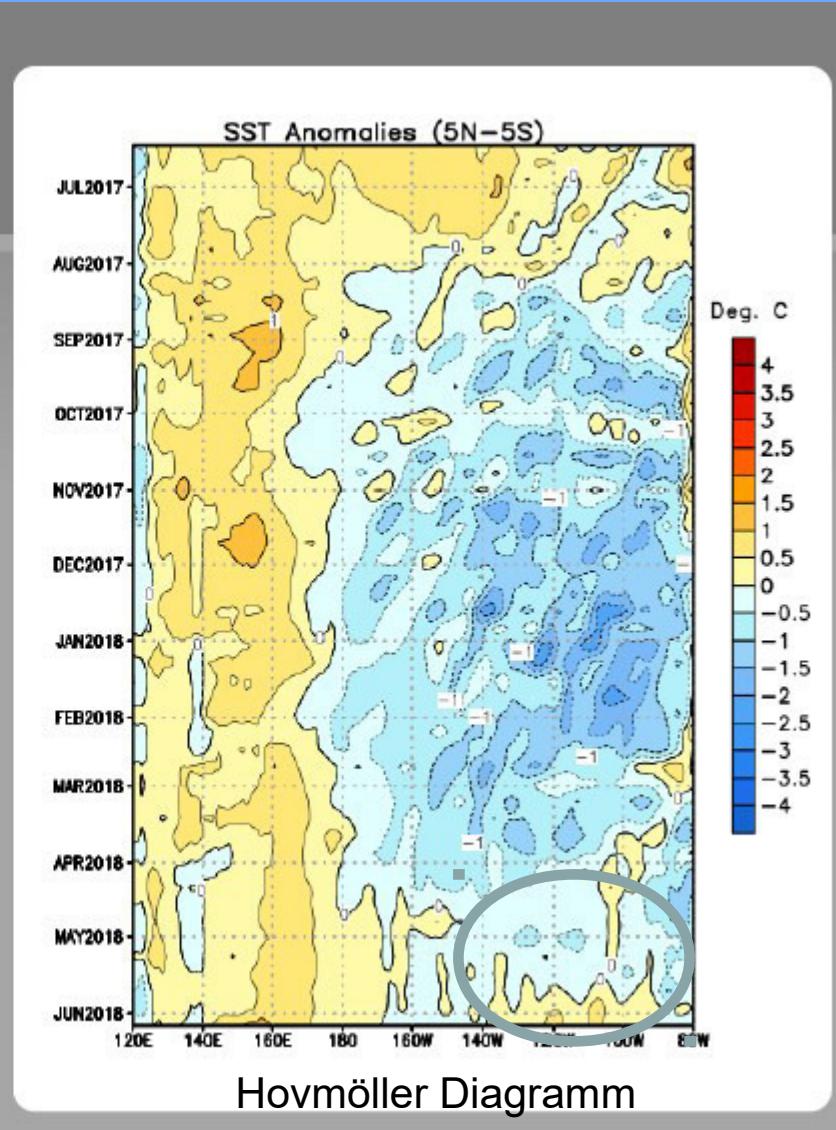
# Die äquatorialen SSTs der letzten 12 Monate

## Recent Evolution of Equatorial Pacific SST Departures ( $^{\circ}\text{C}$ )

During August 2017, above-average SSTs dissipated east of the Date Line.

Below-average SSTs across the central and eastern Pacific persisted from September 2017 to late March 2018.

Since early May 2018, SSTs have been near average across most of the equatorial Pacific Ocean.

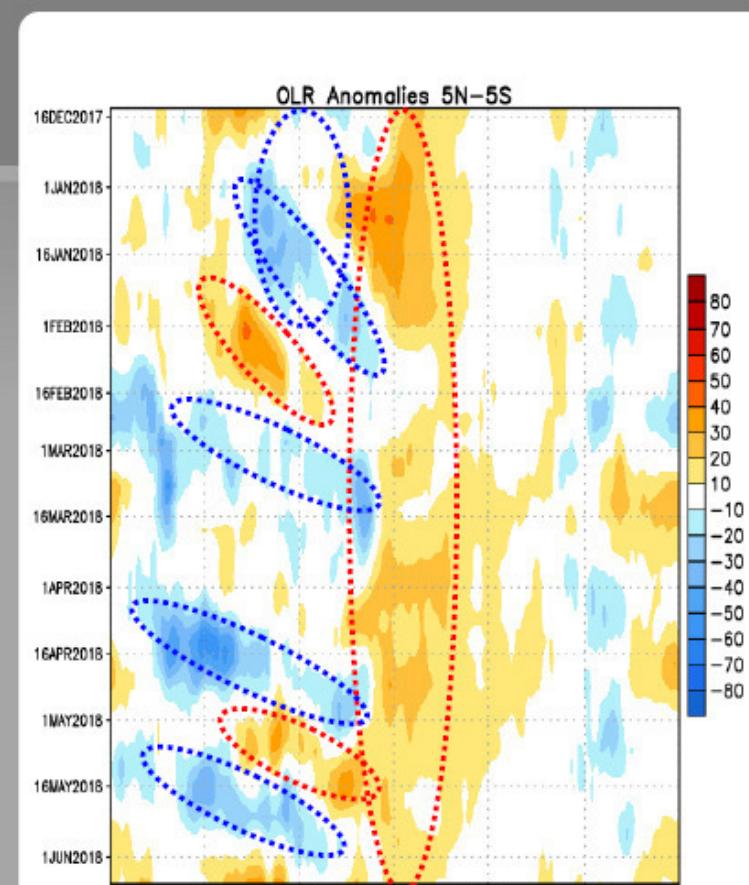


# Anomalien der langwelligen Ausstrahlung Outgoing Longwave Radiation (OLR)

## Outgoing Longwave Radiation (OLR) Anomalies

At least since October 2017, positive OLR anomalies persisted over the central Pacific Ocean.

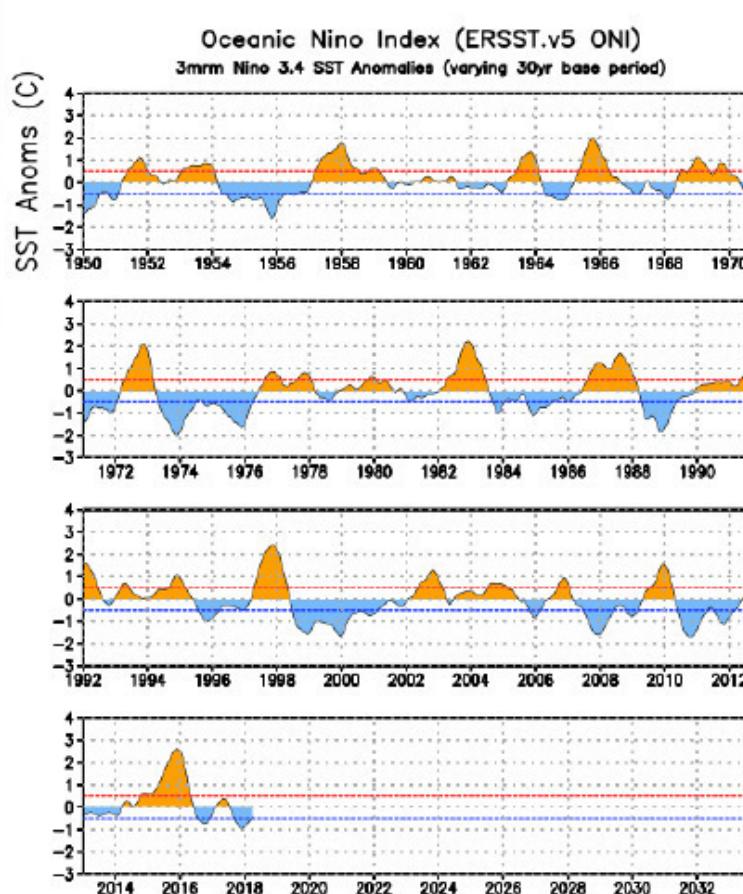
Drier-than-average Conditions (orange/red shading)  
Wetter-than-average Conditions (blue shading)



# Wie stark war der letzte El Niño (2015/2016) in der Rückschau?

## ONI ( $^{\circ}\text{C}$ ): Evolution since 1950

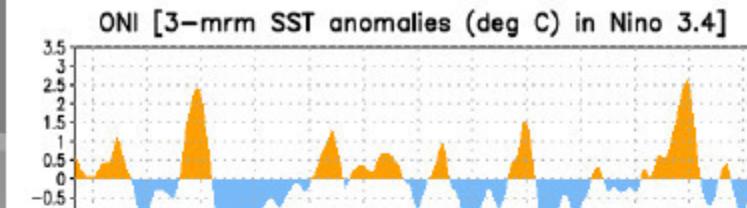
The most recent ONI value (March - May 2018) is  $-0.4^{\circ}\text{C}$ .



El Niño  
Neutral  
La Niña

# Drei El Niño Indizes

## Upper-Ocean Conditions in the Equatorial Pacific



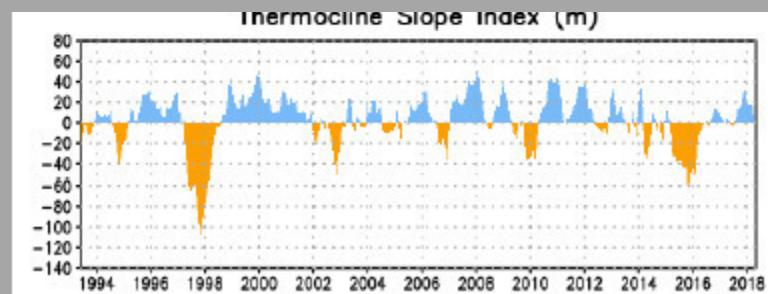
The ONI is based on SST departures from average in the Niño 3.4 region, and is a principal measure for monitoring, assessing, and predicting ENSO.

Defined as the three-month running-mean SST departures in the Niño 3.4 region. Departures are based on a set of improved homogeneous historical SST analyses (Extended Reconstructed SST - ERSST.v5). The SST reconstruction methodology is described in Huang et al., 2017, J. Climate, vol. 30, 8179-8205.)

It is one index that helps to place current events into a historical perspective

anomalies (above average) and thermocline slope index (near average) reflect ENSO-neutral conditions.

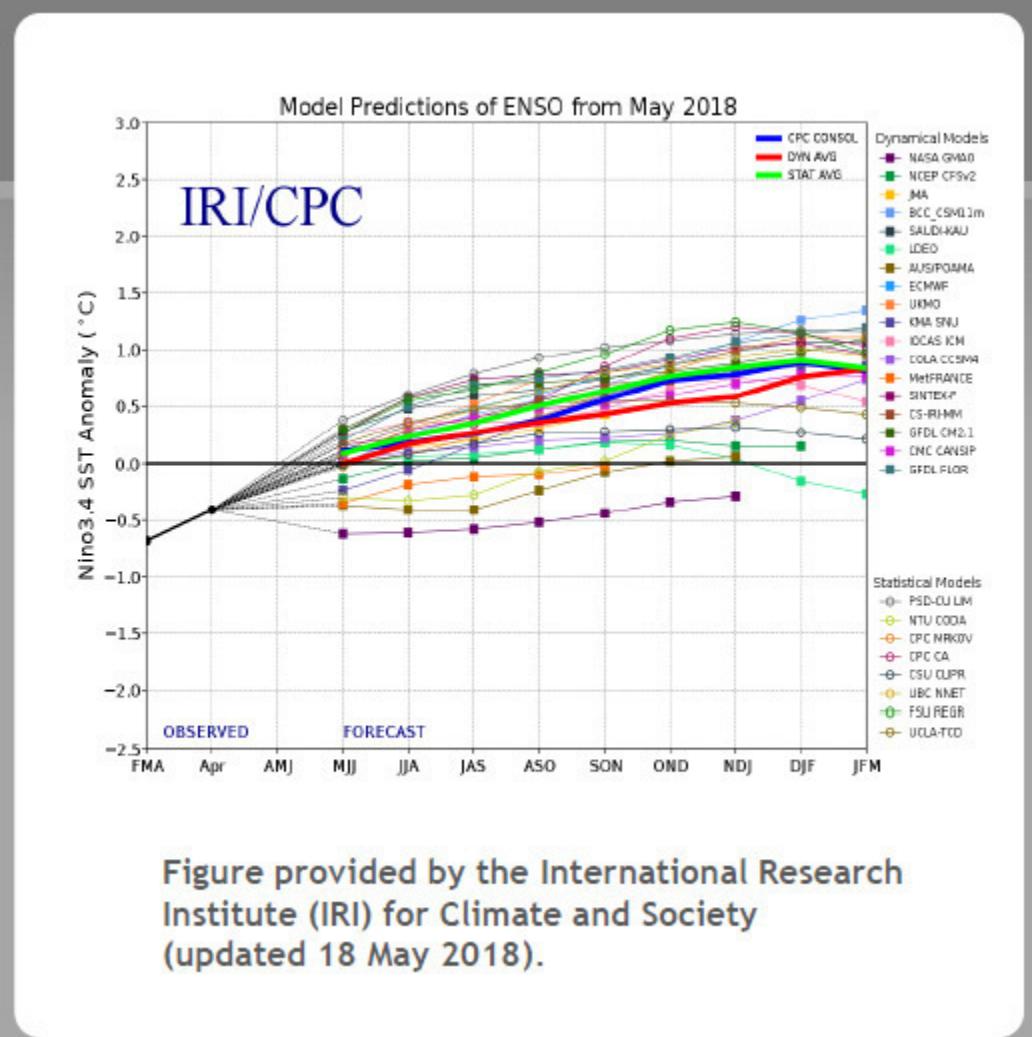
*The monthly thermocline slope index represents the difference in anomalous depth of the 20°C isotherm between the western Pacific (160°E-150°W) and the eastern Pacific (90°-140°W).*



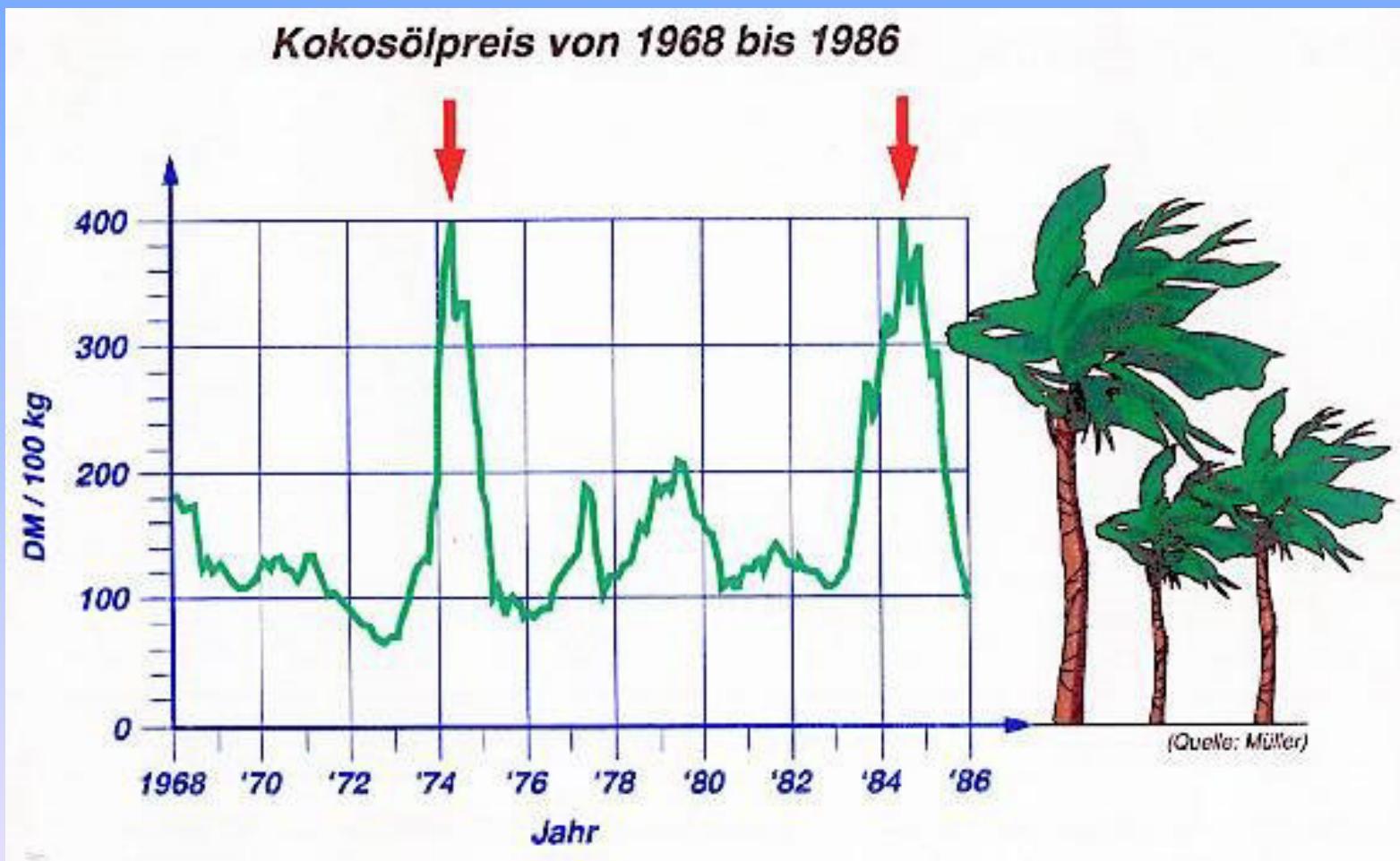
# Was sagen die aktuellen Vorhersagen?

## IRI/CPC Pacific Niño 3.4 SST Model Outlook

The majority of models predict ENSO-neutral through summer 2018, with an elevated chance of El Niño by fall/winter 2018.

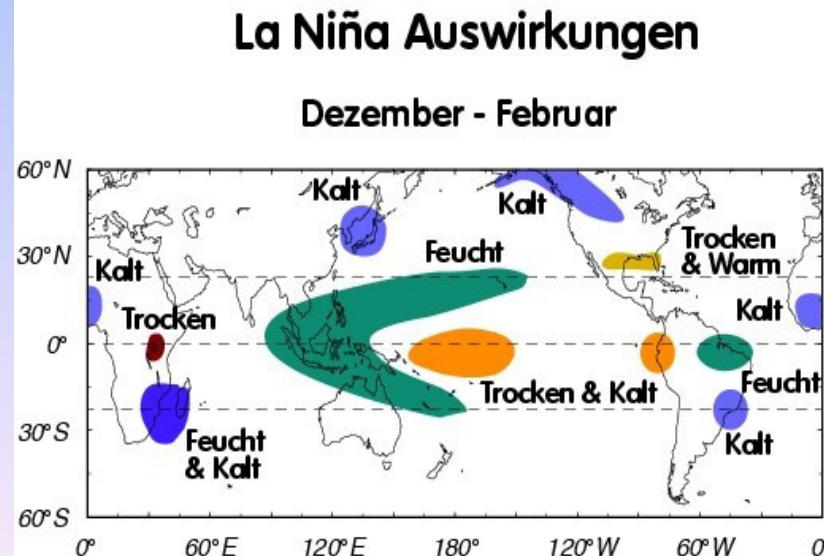
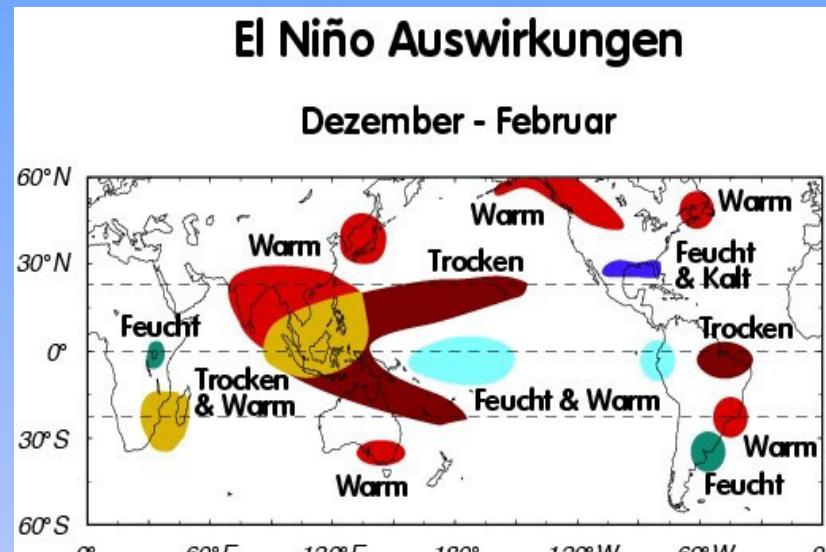


# Der Kokosölpreis und El Niño

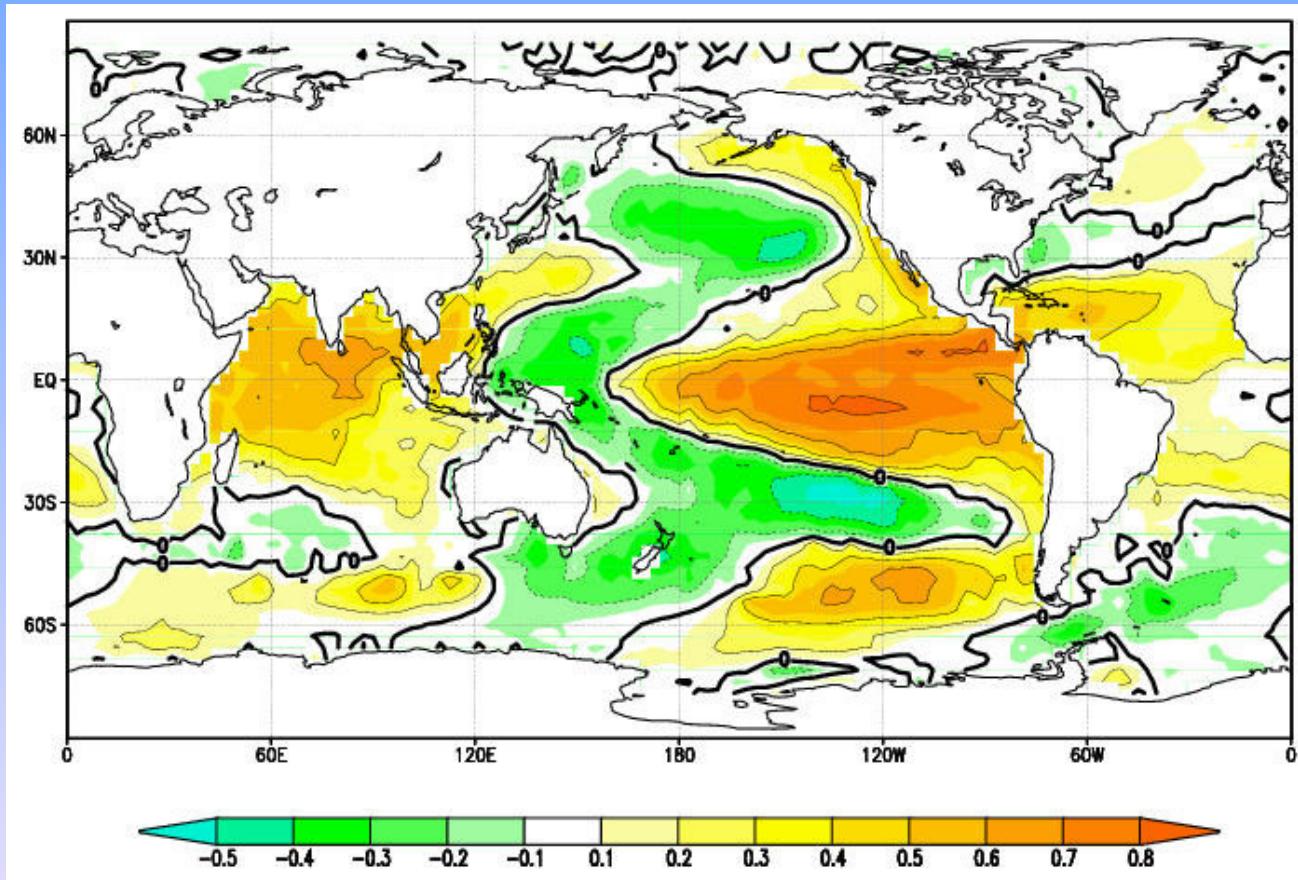


# Globale Auswirkungen

- Dürre in Südostasien
- Starkregen in Südamerika und Kalifornien
- Reduktion der Anzahl atlantischer Hurrikane
- ...



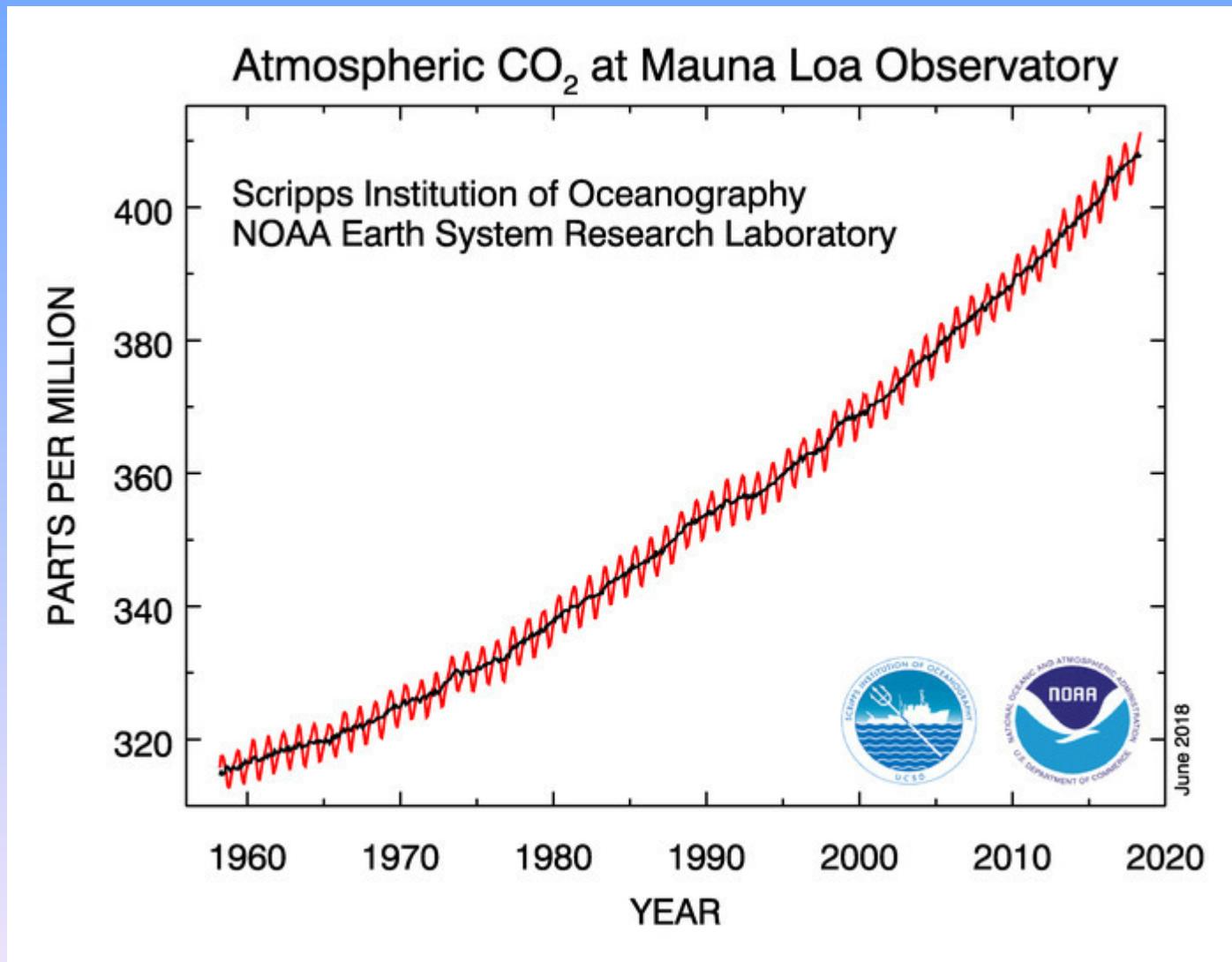
# ENSO und die Temperatur in den anderen Meeresregionen (verzögerte Reaktion)



Korrelation der Niño3 DJF-SSTA mit der MAM-SSTA

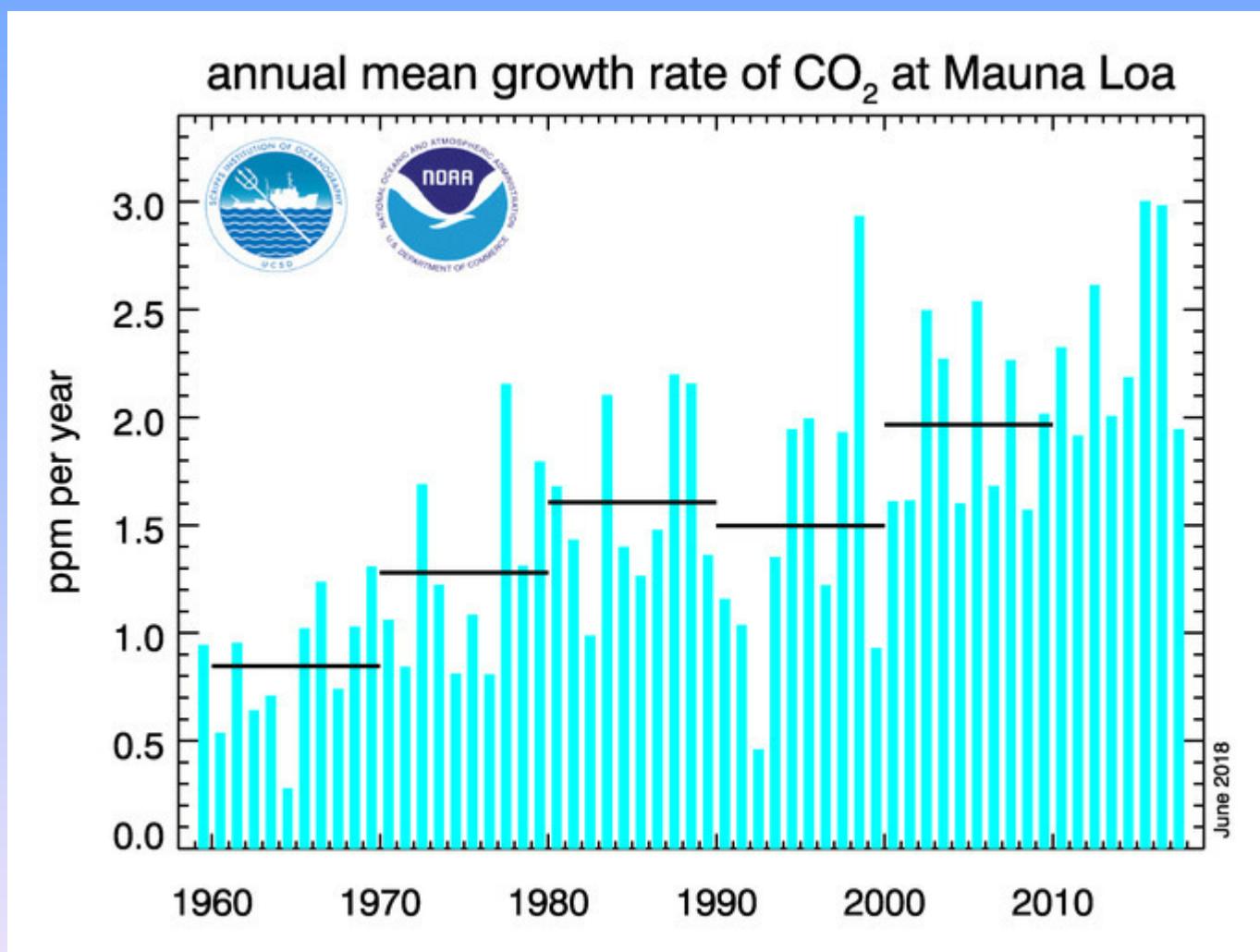
Die Verzögerung erklärt, warum die globale Temperatur oft erst im Jahr nach dem Winter-Extremum reagiert

# CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft



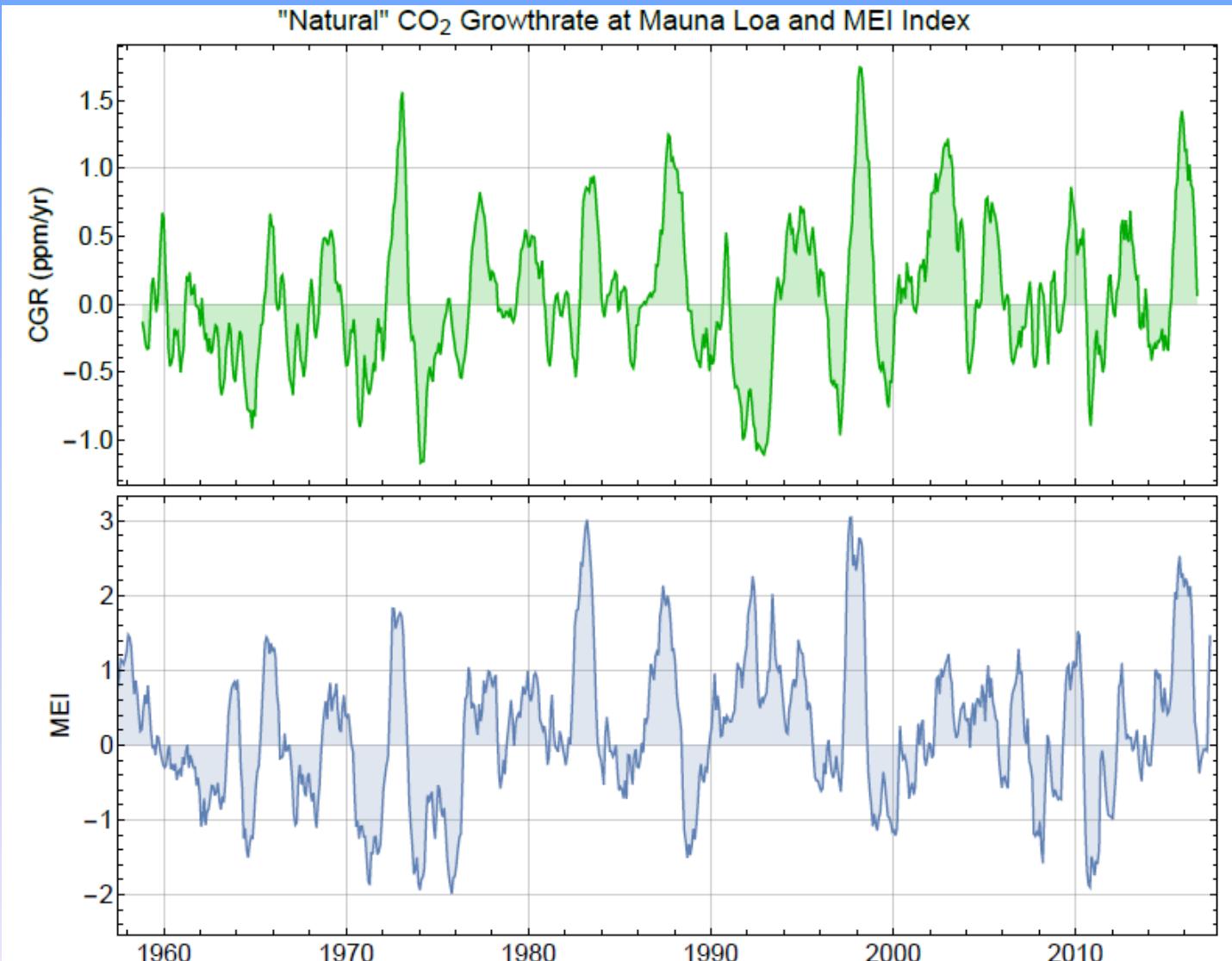
<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>

# CO<sub>2</sub>-Wachstumsrate



<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gr.html>

# ENSO und der Kohlenstoffkreislauf



Martin Heimann, MPI-BGC, Jena

# Massensterben im Meer: Tote Fische bedecken Chiles Strände



**Die steigenden Wassertemperaturen sorgen für eine massenhafte Vermehrung von Algen, was zu Sauerstoffmangel oder hohen Konzentrationen von Toxinen führt.**

# Waldbrände in Alberta



Spiegel online 10.05.2016

# El Niño verschiebt auch Regengebiete: Die Atacama Wüste blüht



Spiegel online 30.10.2015

# Die Wüste, ein Blütenmeer



Spiegel online 30.10.2015

Samstag, 31.10.2015 – 17:04 Uhr

## **Umweltkatastrophe in Indonesien: Ein Land ringt nach Luft**

Brandrodung und Dürre haben in Indonesien eine Klimakatastrophe ausgelöst, die globale Auswirkungen haben könnte. Millionen Menschen leiden unter beißendem Smog, auch seltene Wildtiere wie der Orang-Utan sind bedroht.



# Die Brandrodungen sind die eigentliche Ursache



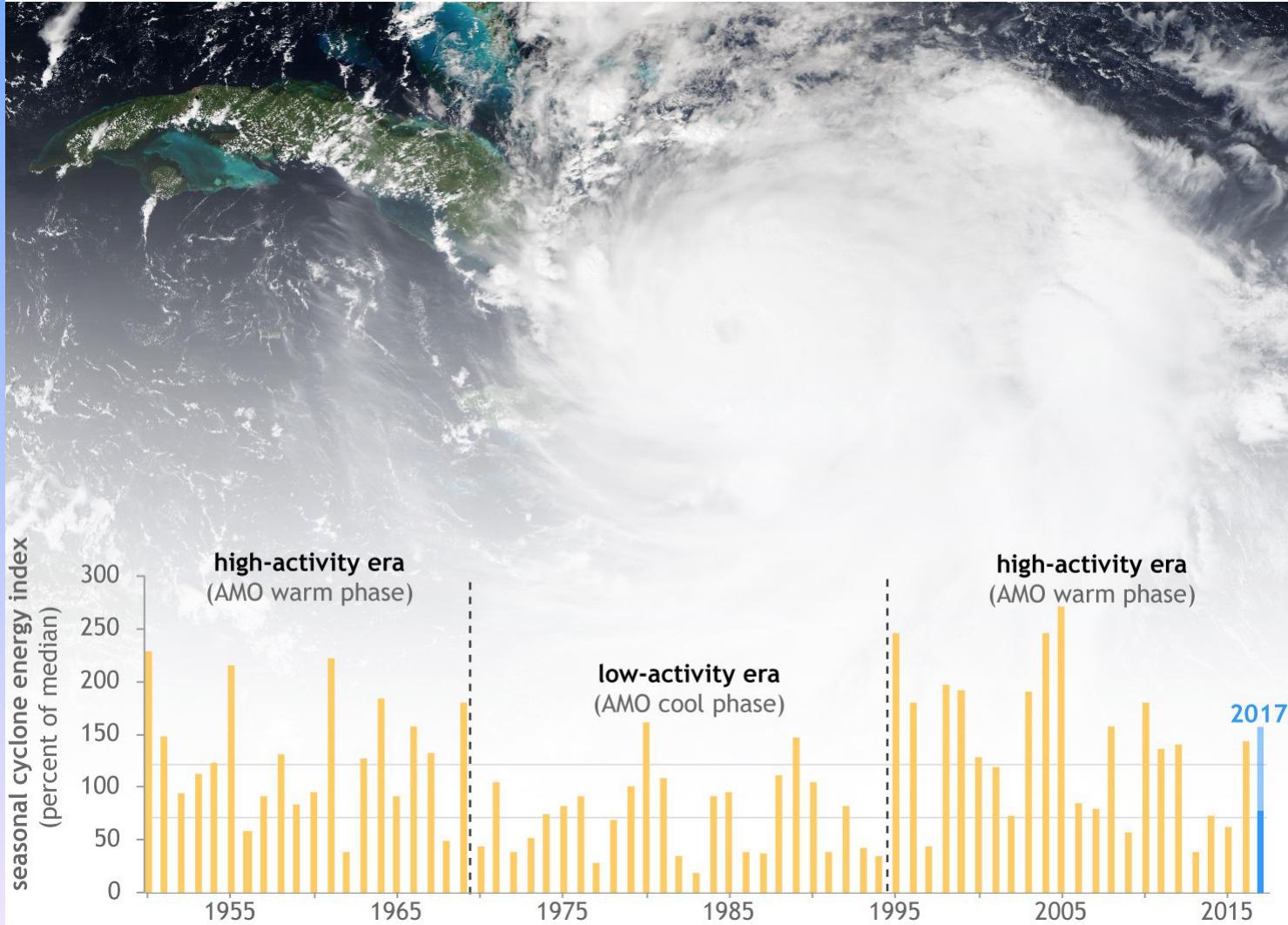
Spiegel online 31.10.2015

# Die Waldbrände sind kaum zu stoppen

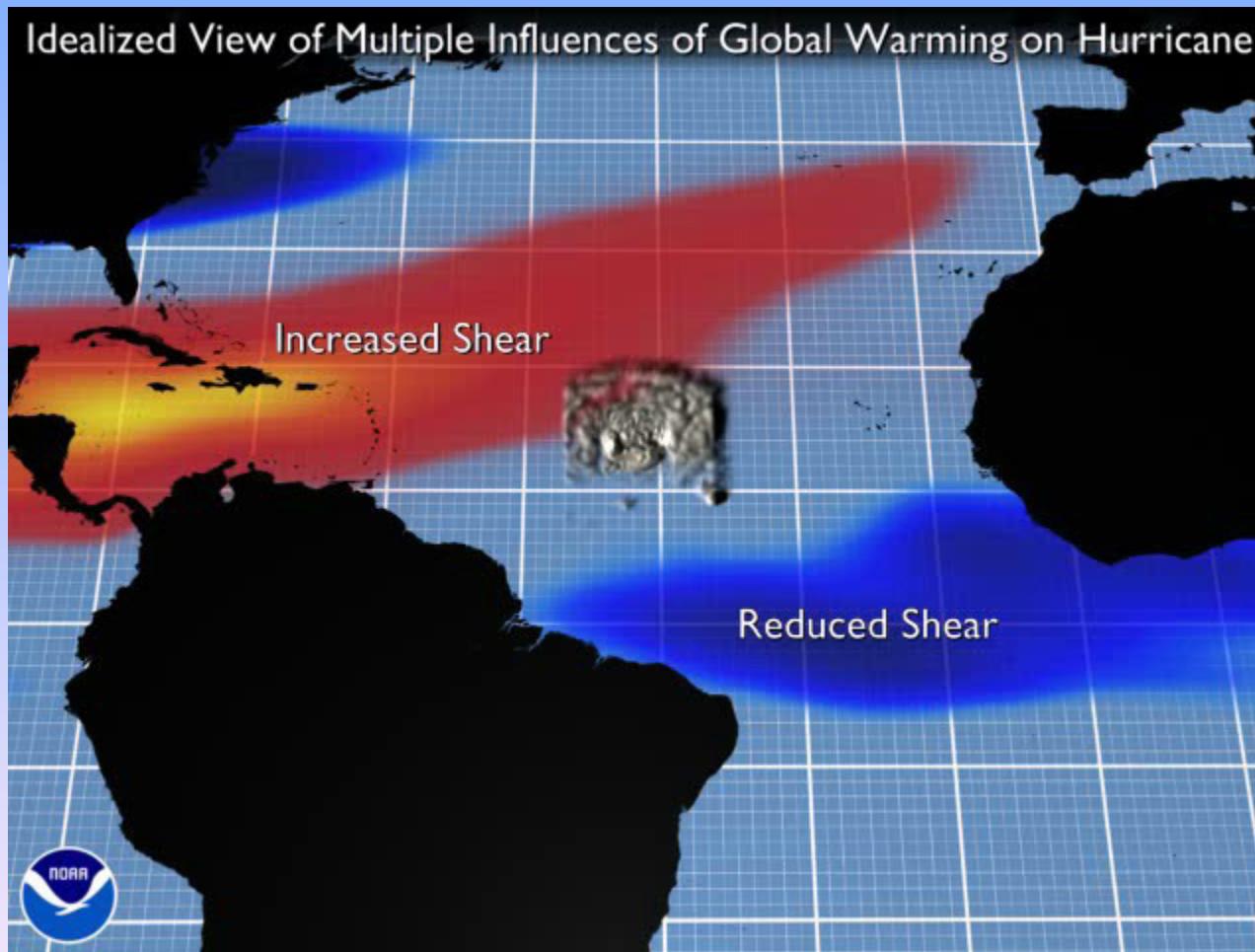


# Weniger Hurrikane durch El Niño

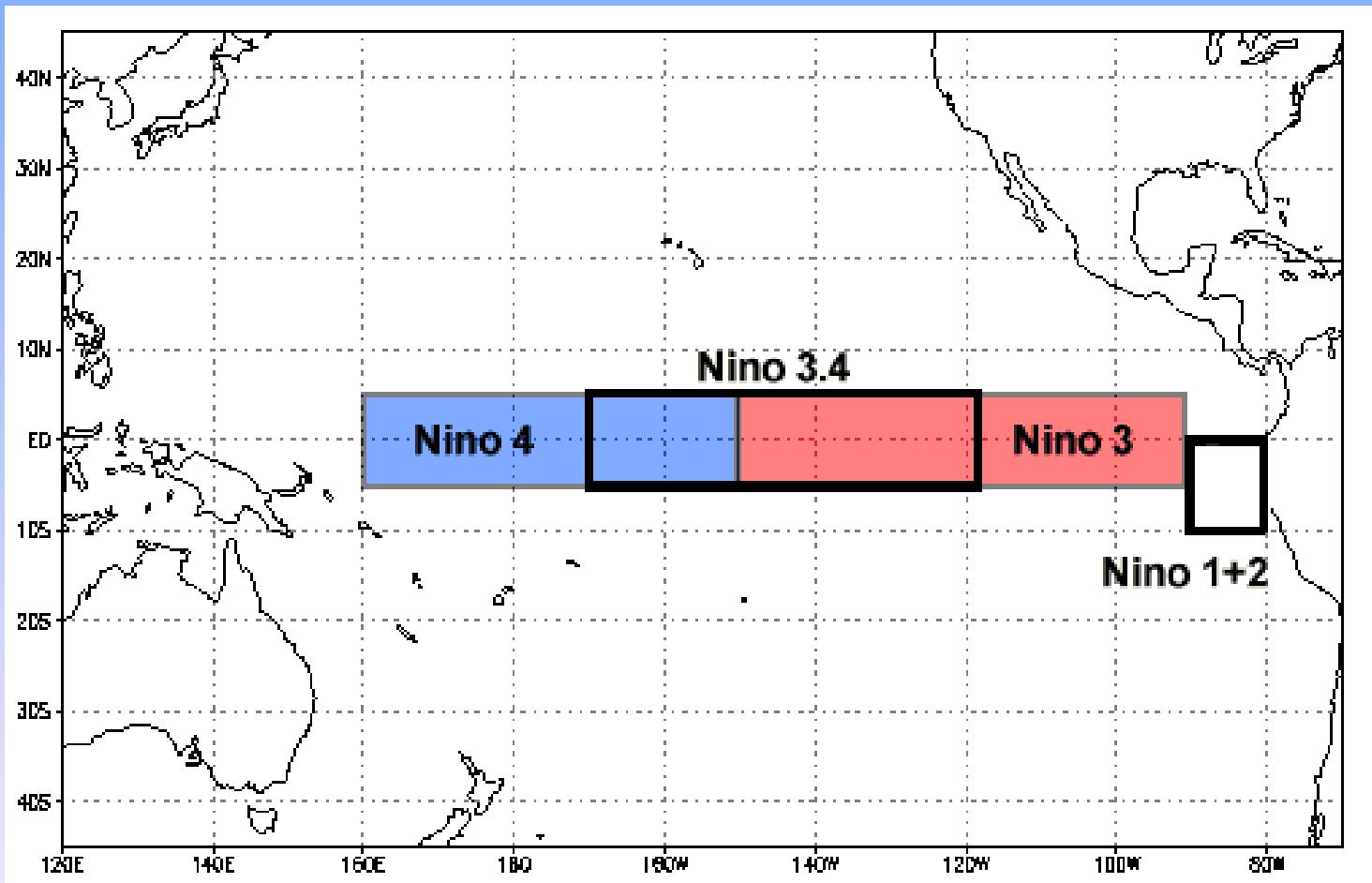
Atlantic hurricane seasons since 1950



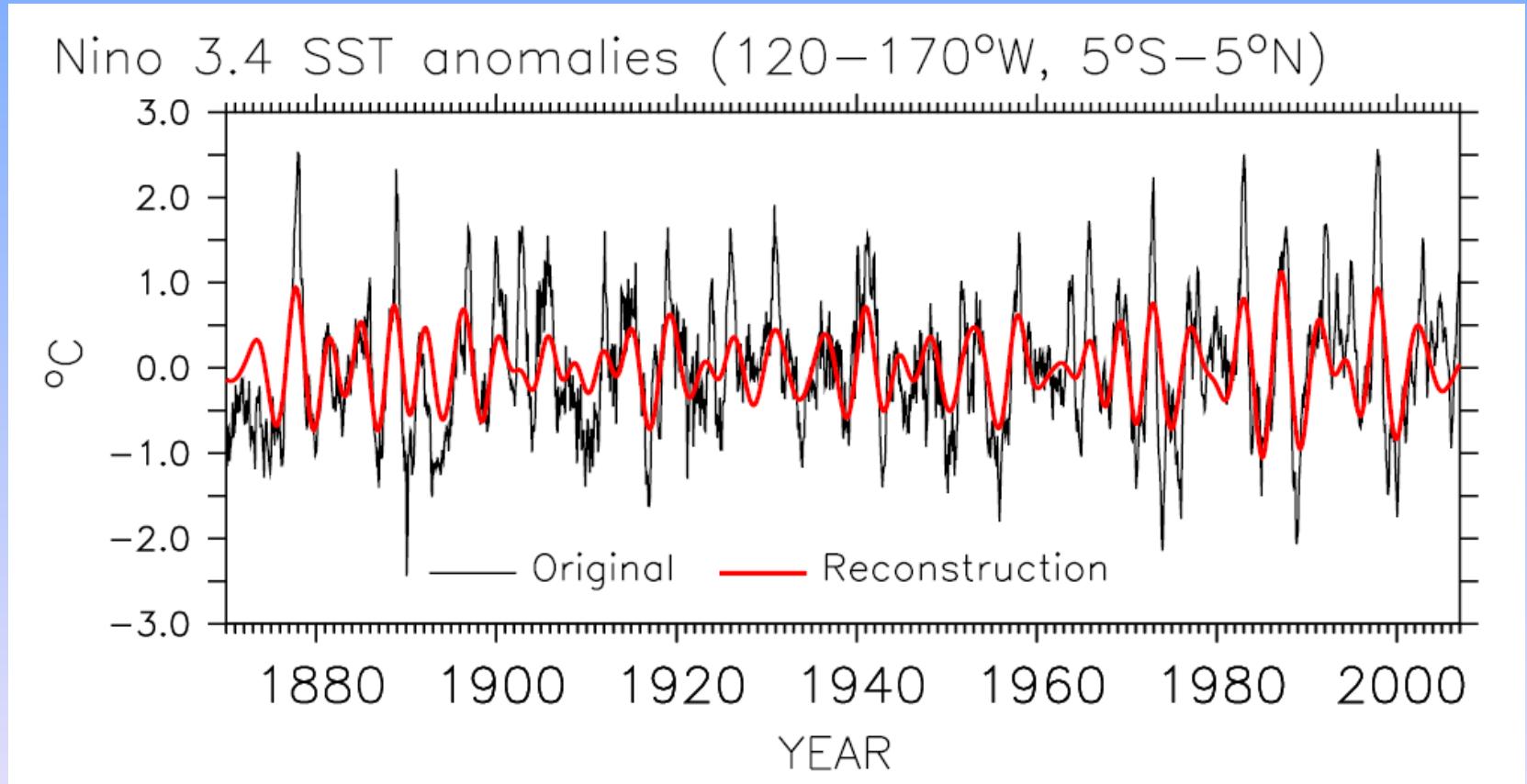
# Der Einfluss der vertikalen Windscherung auf die Entwicklung von Hurrikanen



# Der äquatoriale Osthindien und Ozean Pazifik, Hotspot für das Weltklima

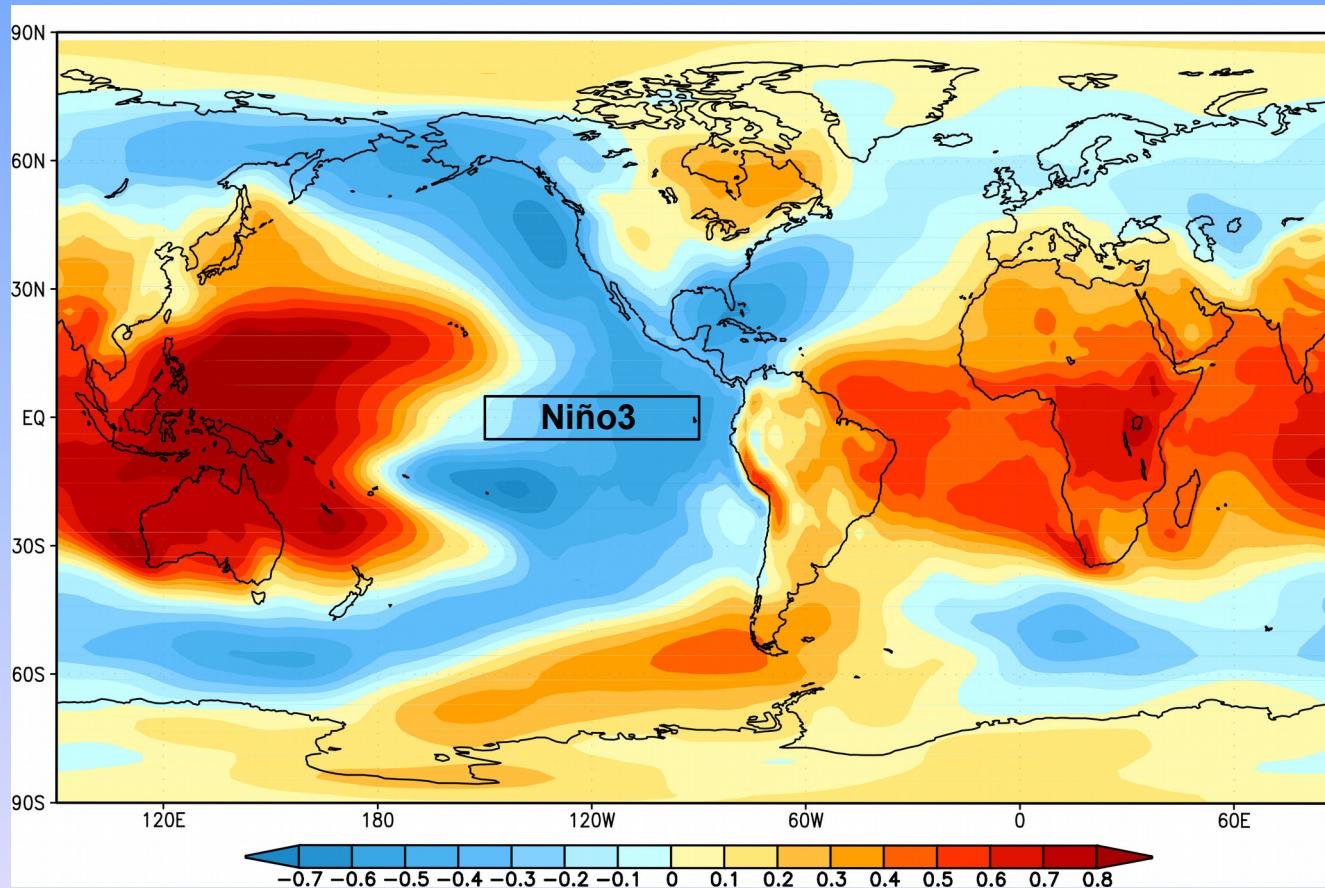


# Entwicklung der Meeresoberflächentemperatur



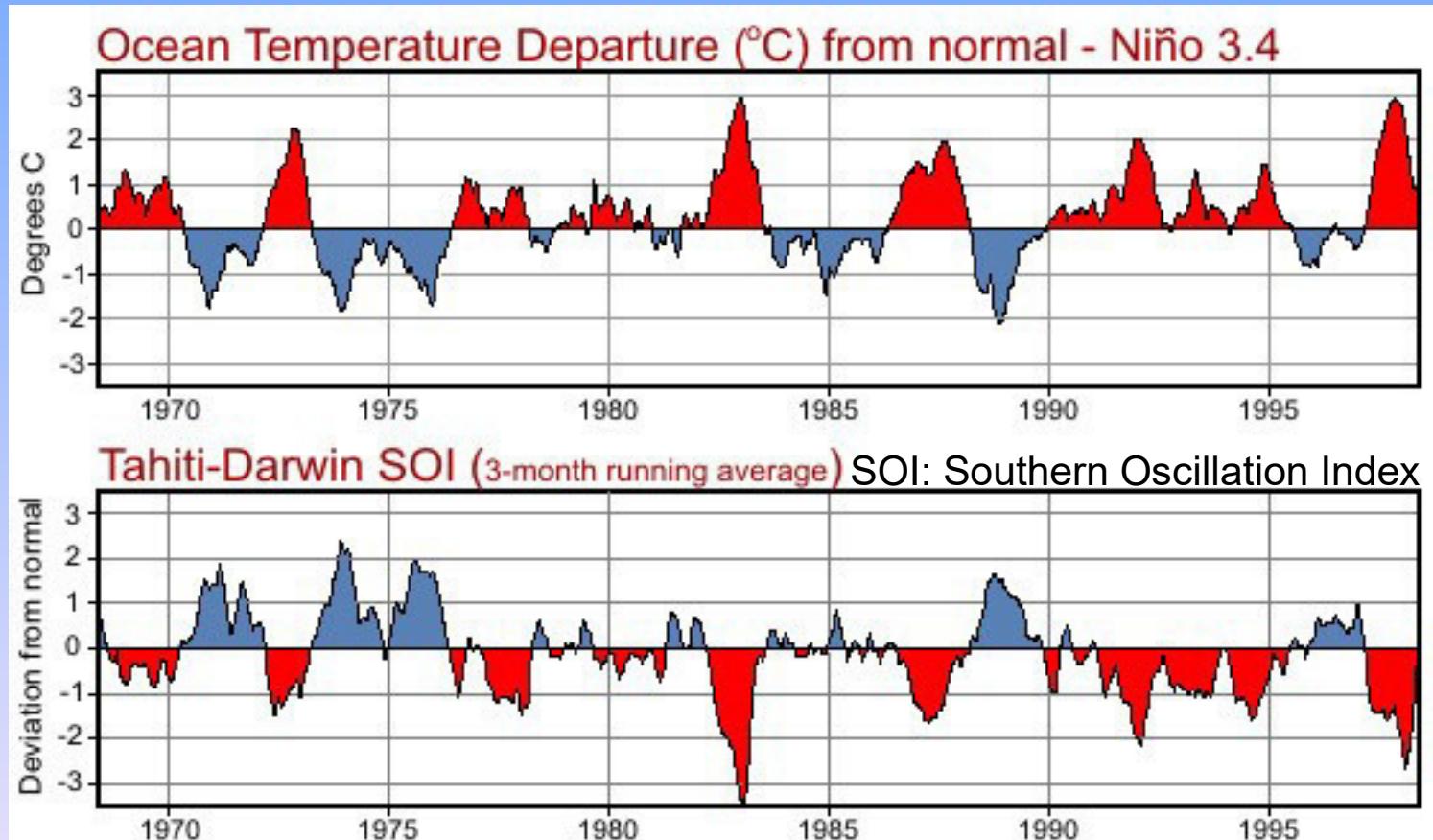
ENSO hat eine starke oszillatorische Komponente,  
stochastisch angetriebene gekoppelte Oszillation?

# El Niño und die Southern Oscillation (ENSO)



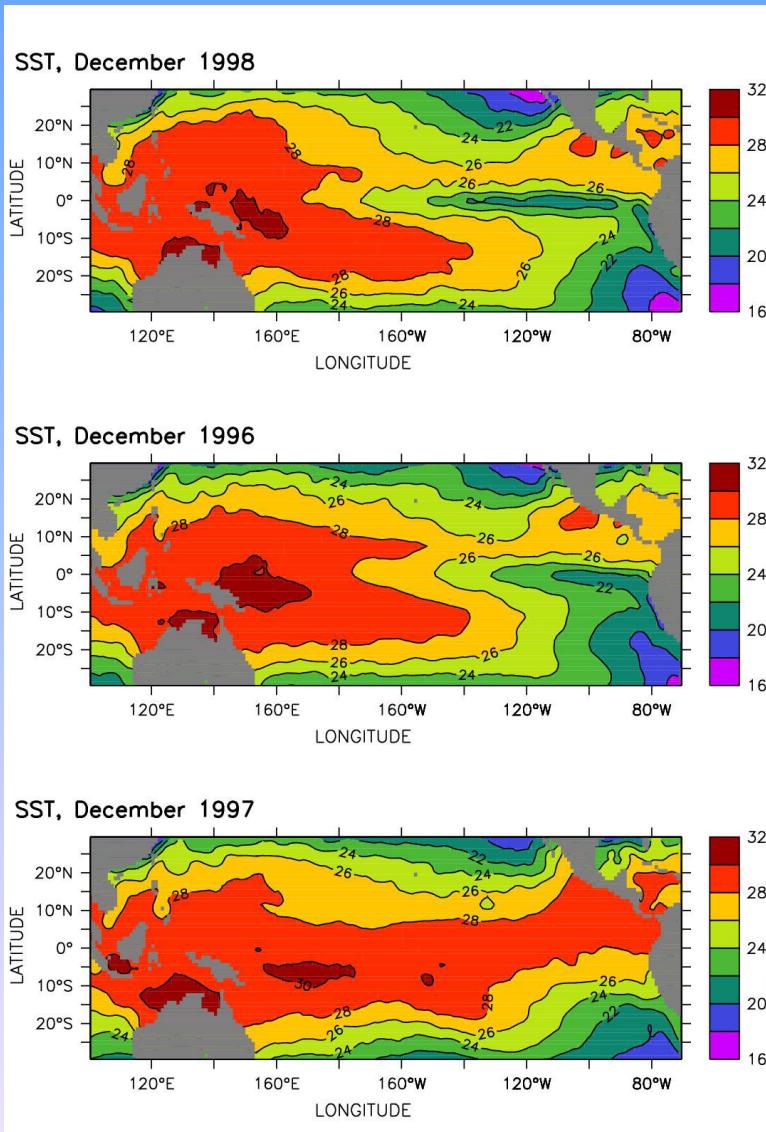
Korrelation der Niño3 SST Anomalie mit den Druckanomalien an der Oberfläche (SLP)

# Niño3.4 SSTA und SOI sind antikorreliert



Warmphasen gehen mit schwachen Passatwinden einher

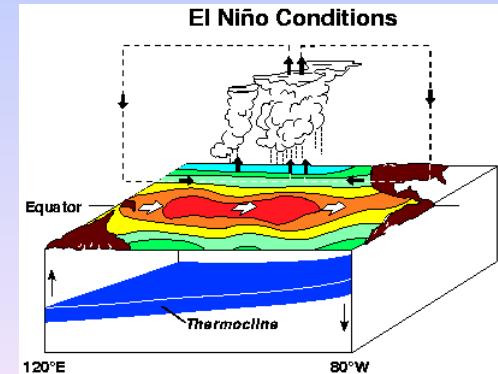
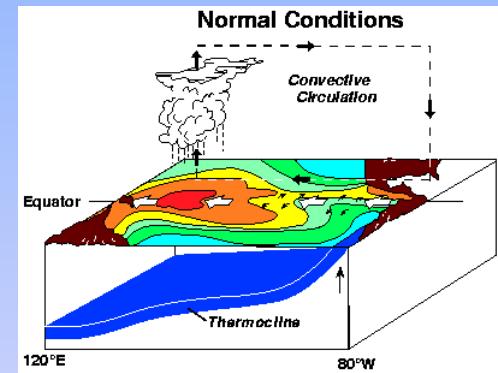
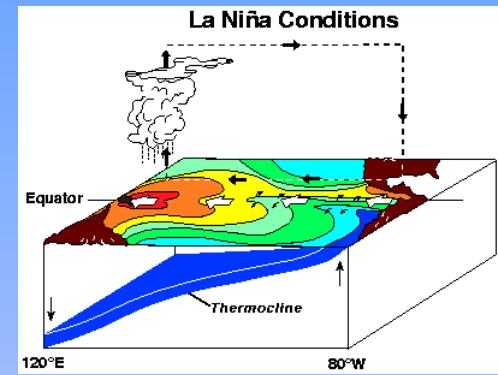
# El Niño und La Niña



La Niña

normal

El Niño

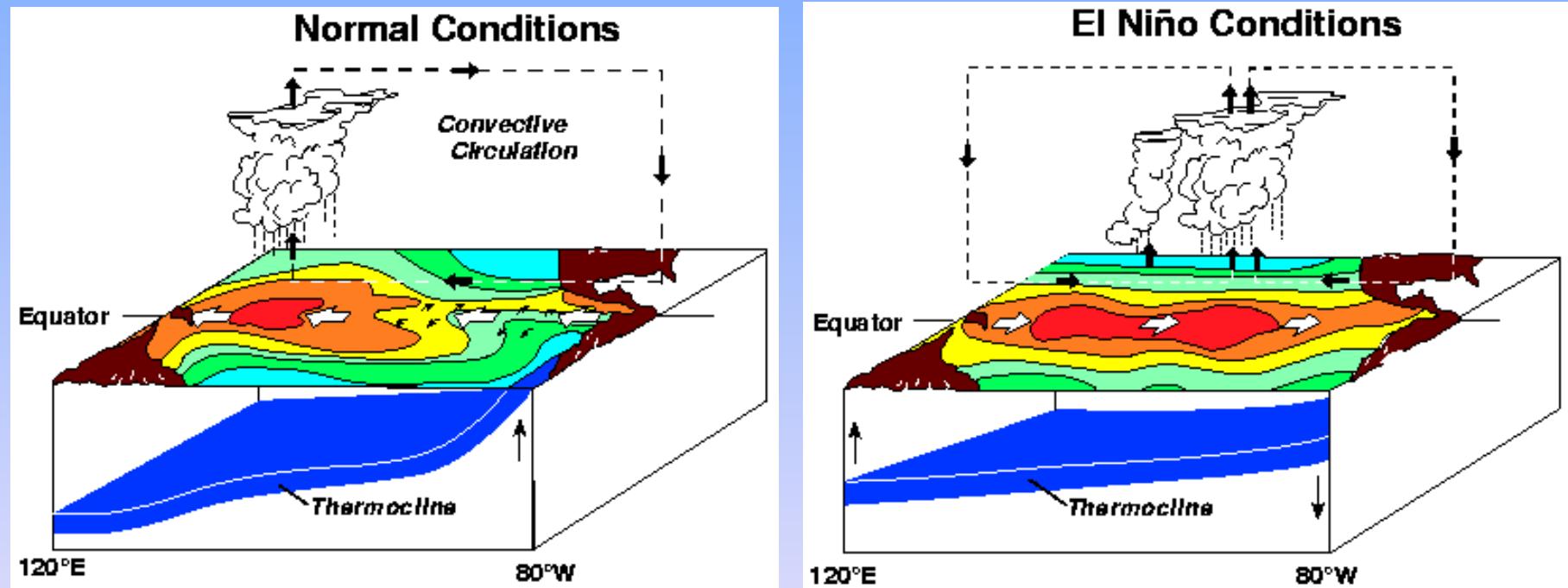


Kopplung über die Walker Zirkulation



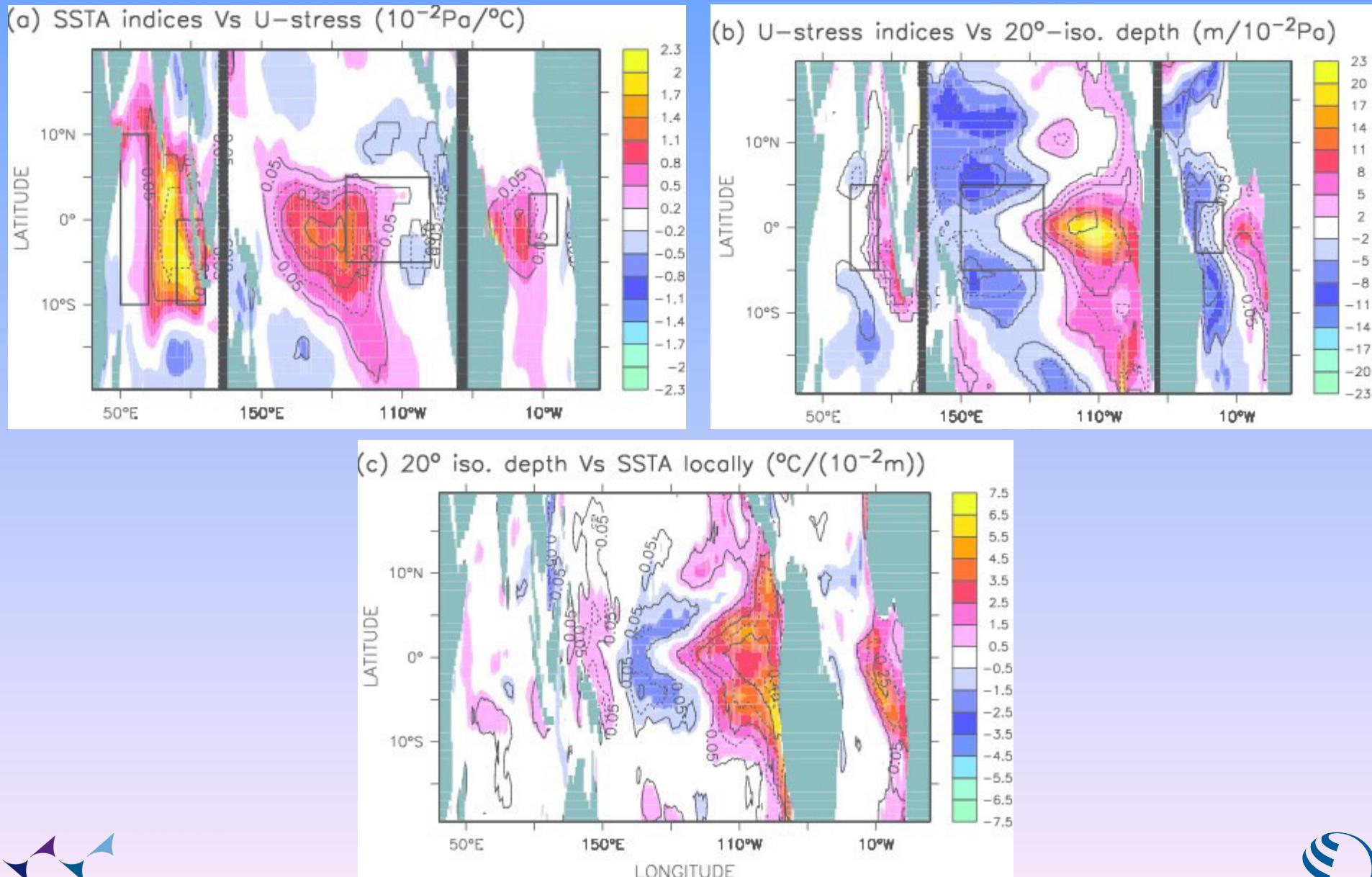
# Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre

Positive Rückkopplung



Die Windschubänderungen bestimmen die Lage der Thermokline und damit den Wärmeinhalt. Das bestimmt die Meerestemperatur vor allem im äquatorialen Ostpazifik, was den zonalen Temperaturgradienten an der Oberfläche bestimmt. Und der bestimmt wieder die Windschubspannung.

# Die 3 Komponenten des Bjerknes Feedbacks

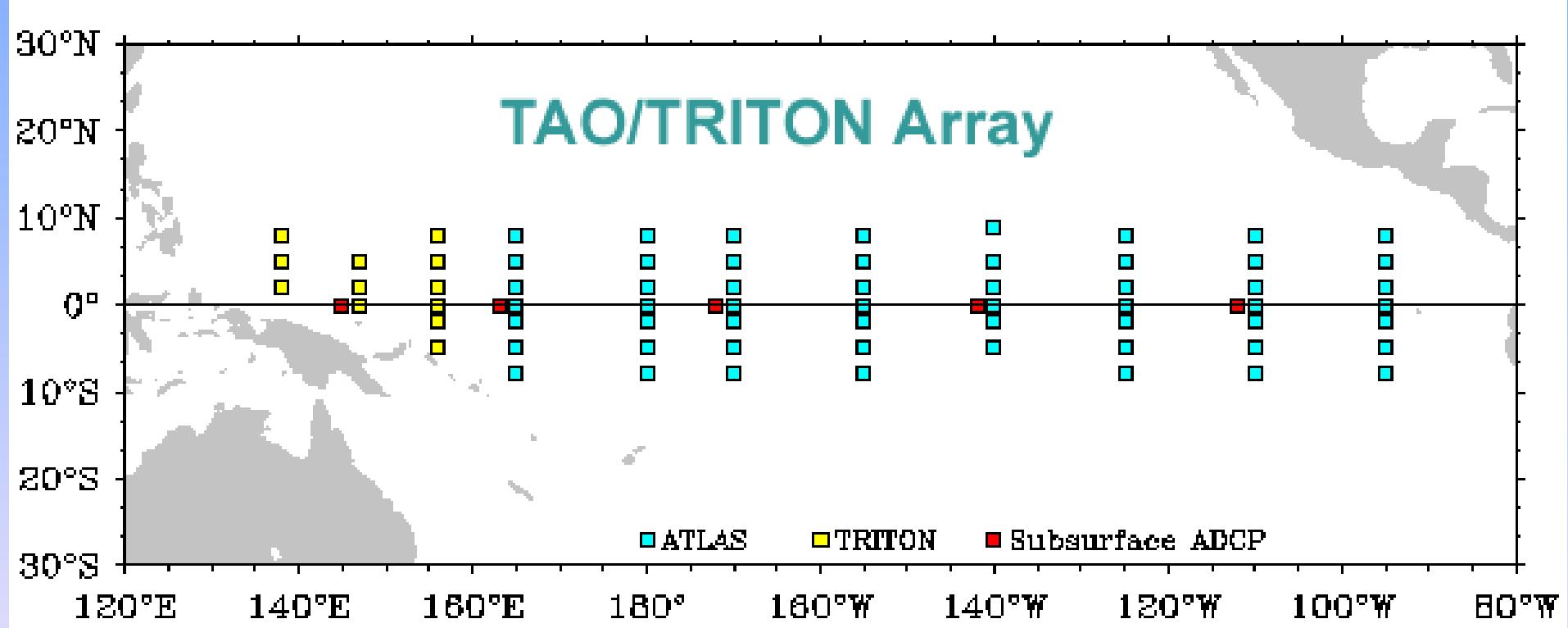


# Der (positive) Bjerknes Feedback

1. Der Zonale Windstress im Westen reagiert auf die SST im Osten
2. Der Zonale Windstress im Westen verursacht Anomalien der Thermoklinentiefe
3. Die Tiefe der Thermokline ändert die SST hauptsächlich im Osten, weil die Themokline sich dort dicht unterhalb der Oberfläche befindet

Bjerknes 1969: "There is thus ample reason for a never-ending succession of alternating trends by air-sea interaction in the equatorial belt, but just how the turnabouts between trends takes place is not quite clear."

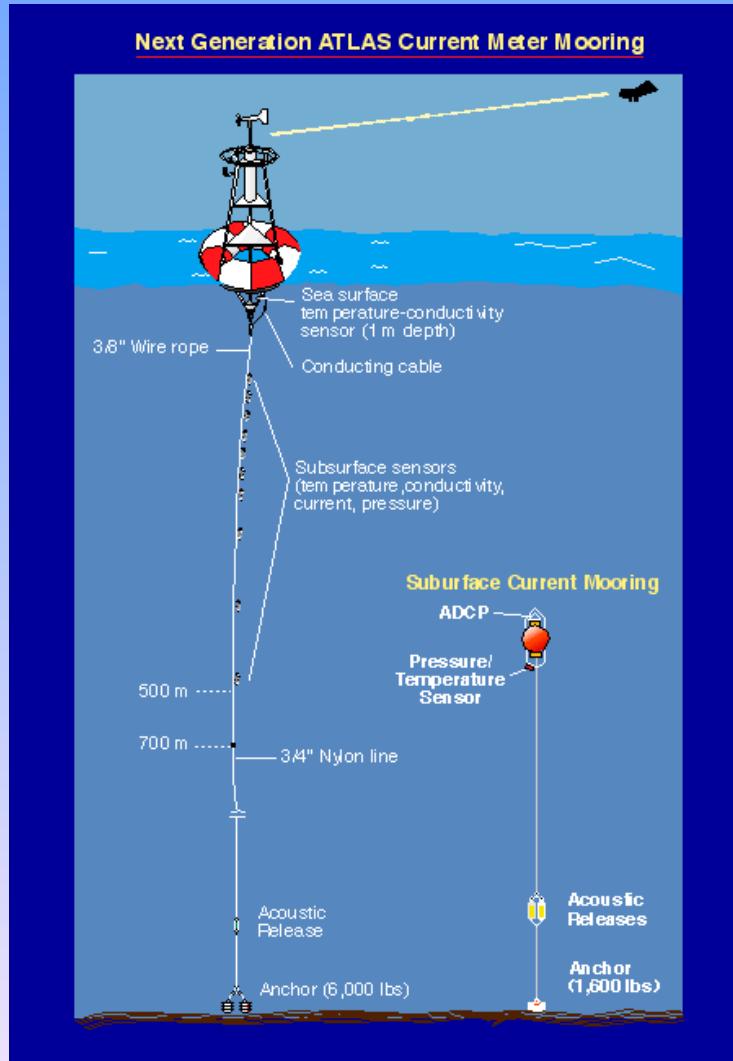
# Beobachtungssystem (I)



# Beobachtungssystem (II)



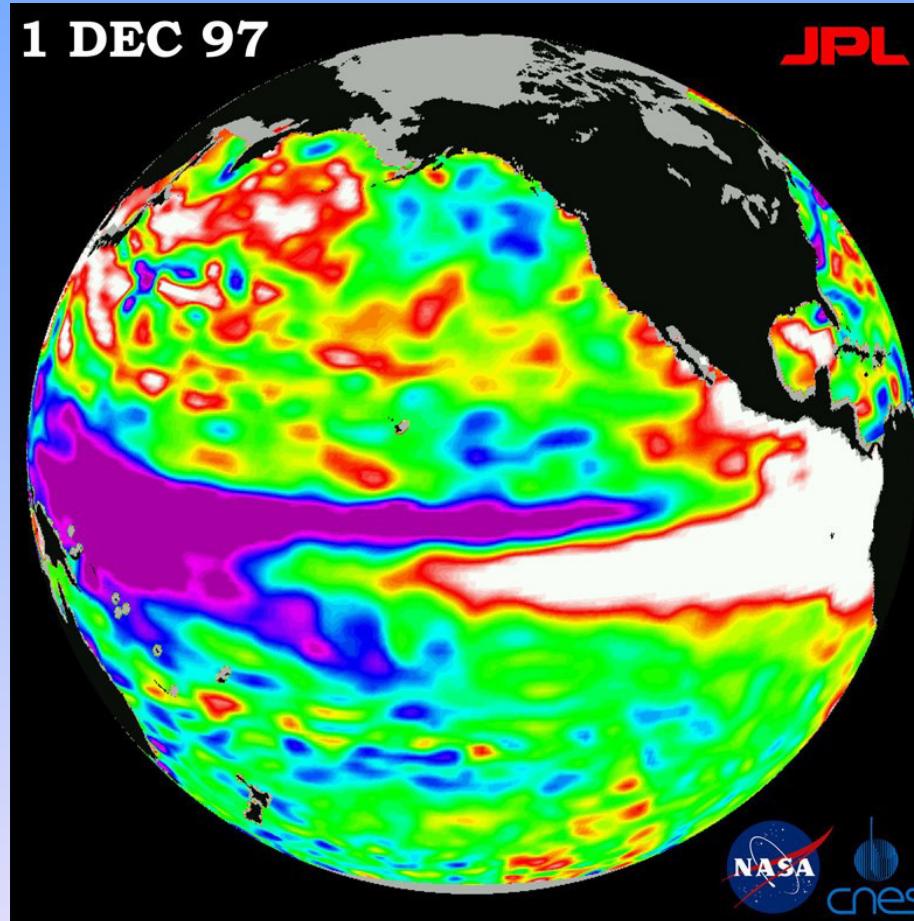
# Beobachtungssystem (III)



# Beobachtungssystem (IV)

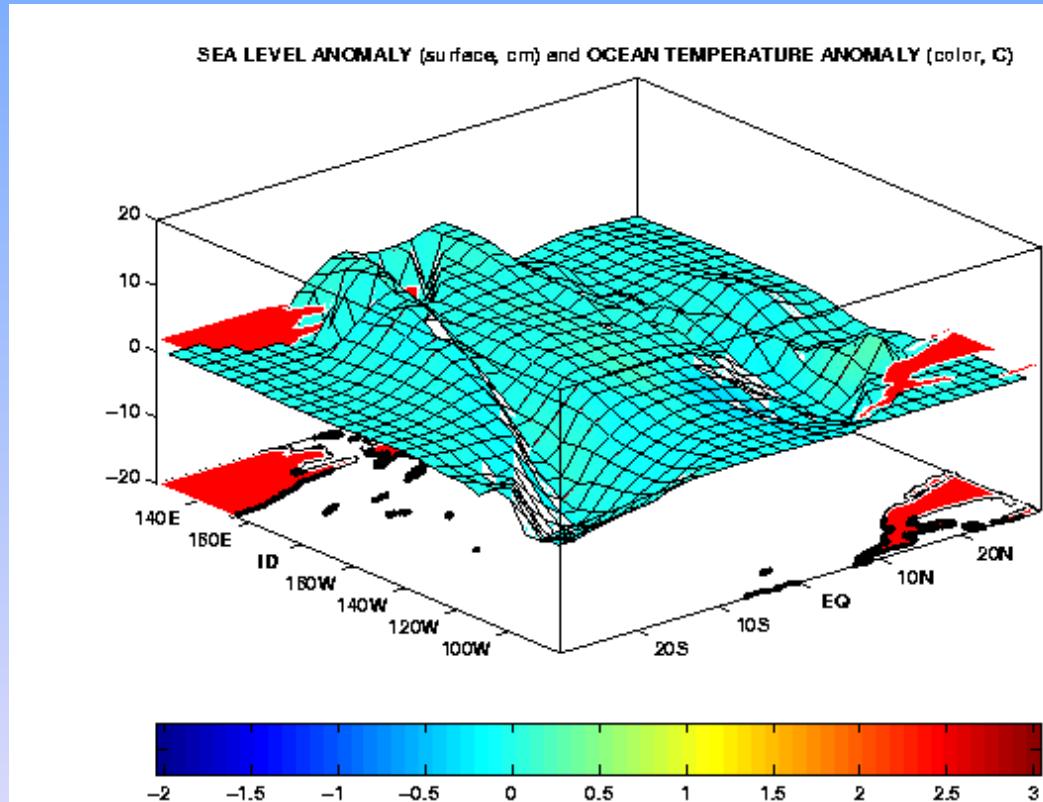


# Die „Beulen“ der Meeresoberfläche während El Niño aus dem Weltall gesehen



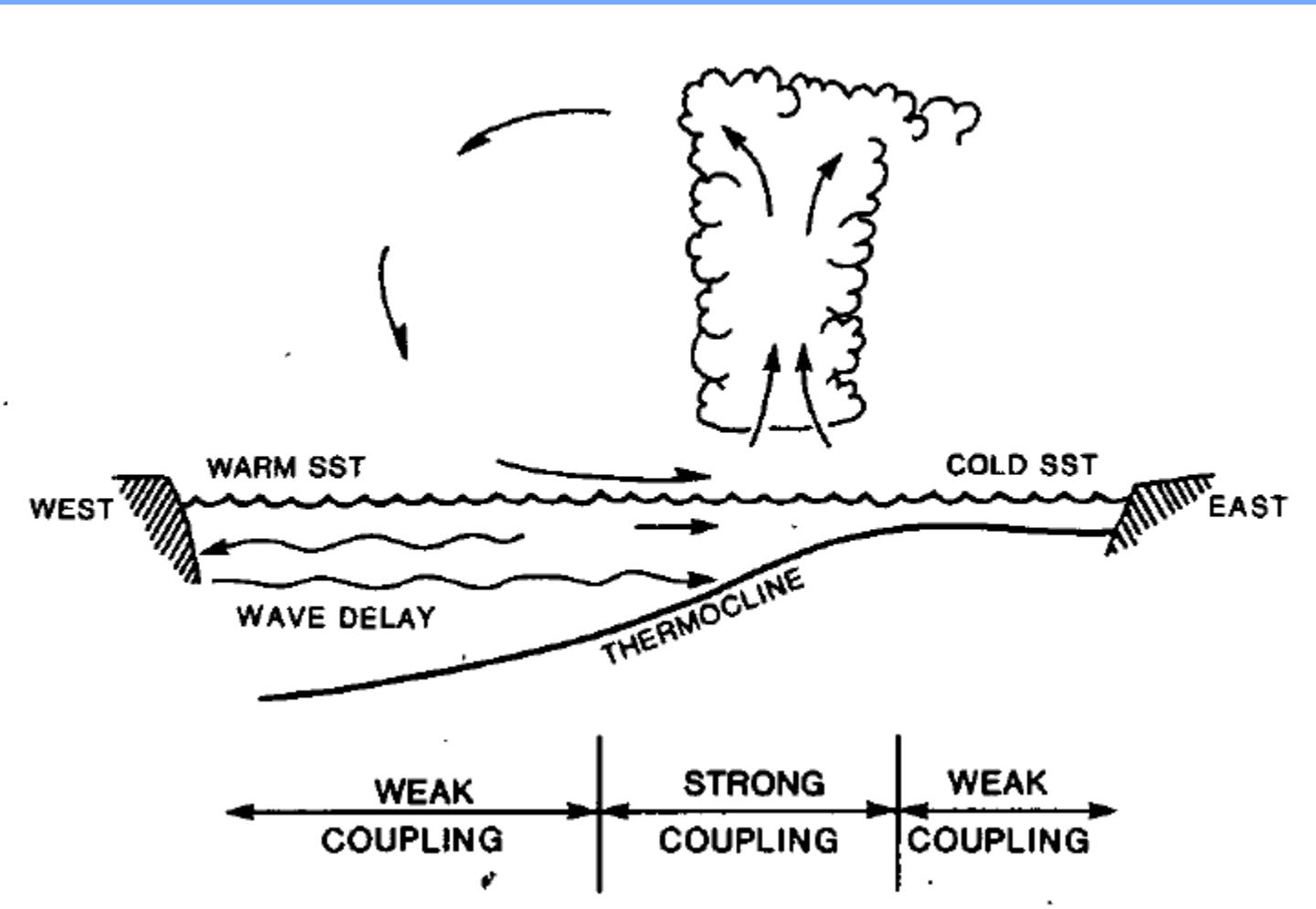
Die Anomalie der Meereshöhe im tropischen Pazifik ist ein Maß für den Wärmeinhalt, sie liegen lokal im Bereich von ca. 20cm

# Die Oberfläche bewegt sich durch Änderungen des Wärmeinhalts



Die Windschubänderungen rufen barokline Änderungen der Dichte- (Temperatur) Schichtung hervor. Warmes Wasser wird adiabatisch umverteilt. Das ist im Meeresspiegel sichtbar. Eine tiefe Thermokline geht mit einem hohen Meeresspiegel einher. Im äquatorialen Ostpazifik sieht man die Änderungen auch in der Meeresoberflächentemperatur.

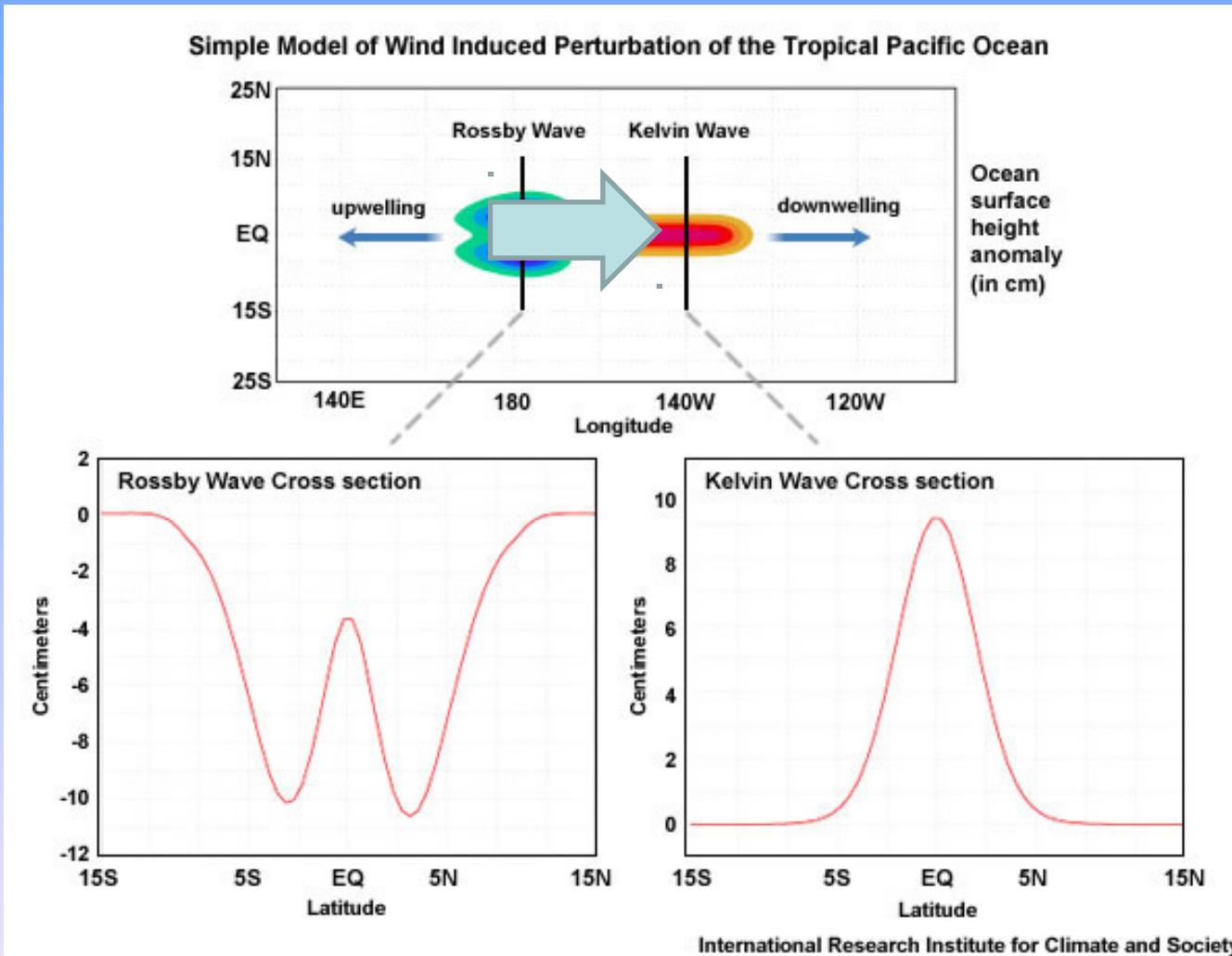
# Ozean-Atmosphäre Kopplung



Suarez and Schopf 1988

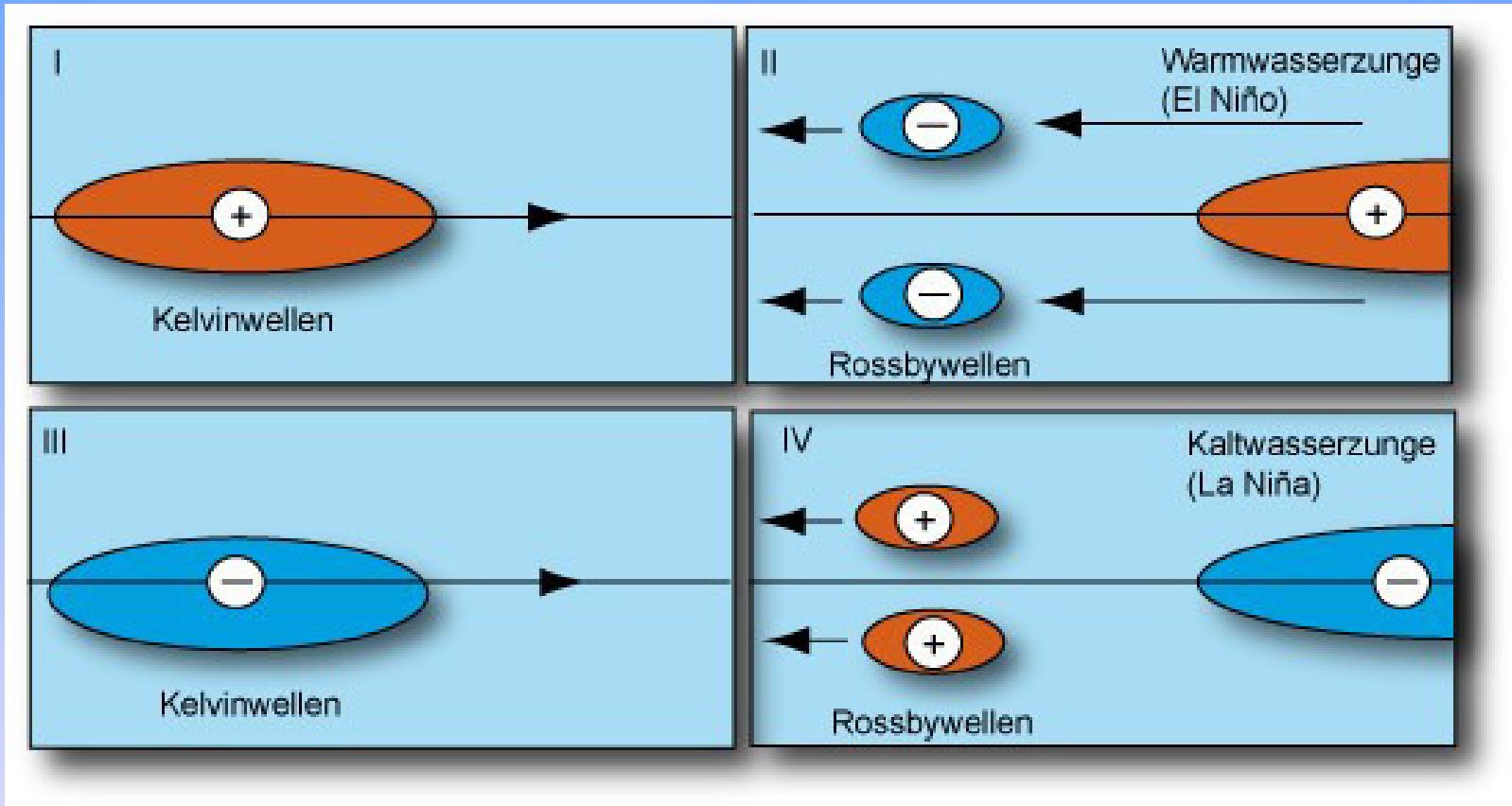


# Delayed action oscillator, Schopf and Suarez 1987, Suarez and Schopf 1988



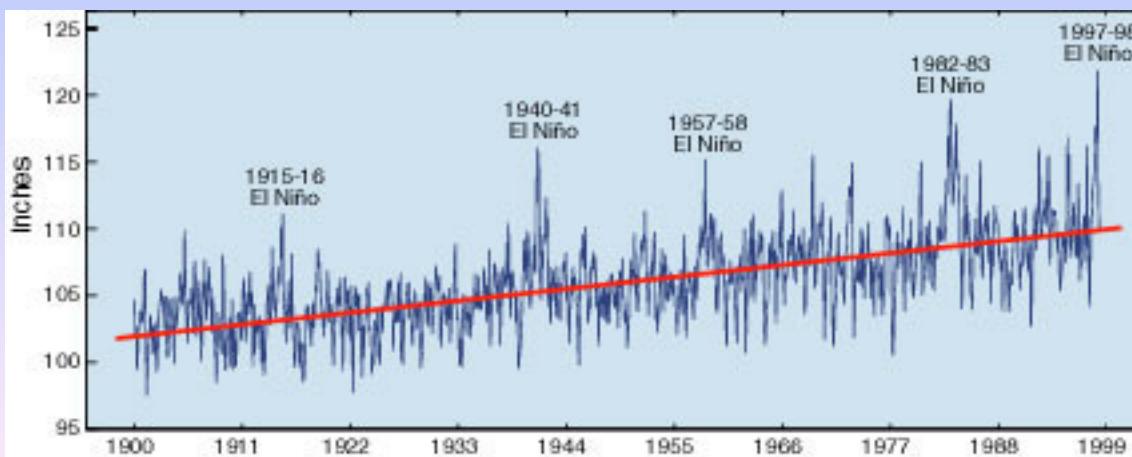
$$dT/dt = T - T^3 - \alpha T(t - \delta)$$

# Delayed action oscillator

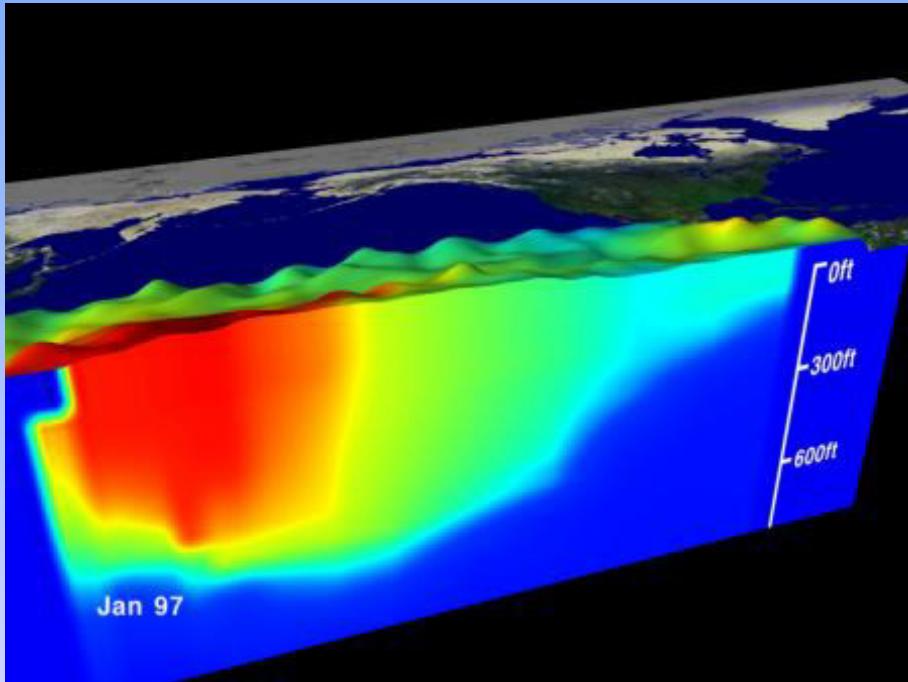


<http://bildungsserver.hamburg.de/ozean-und-klima/4337350/enso-wellen-artikel/>  
nach M. Latif (2006): Das El Niño/Southern Oscillation-Phänomen, promet 32, Nr. 3/4,

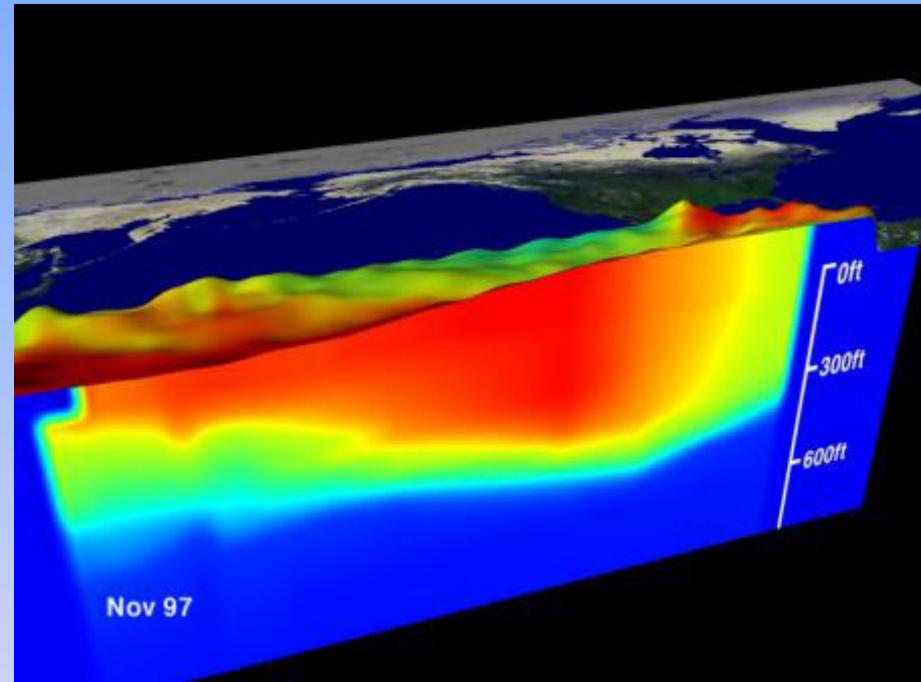
# Selbst der Meeresspiegel fernab wie in San Francisco ist betroffen



# Umverteilung von Wärme von Westen nach Osten während eines El Niños



Jan 97

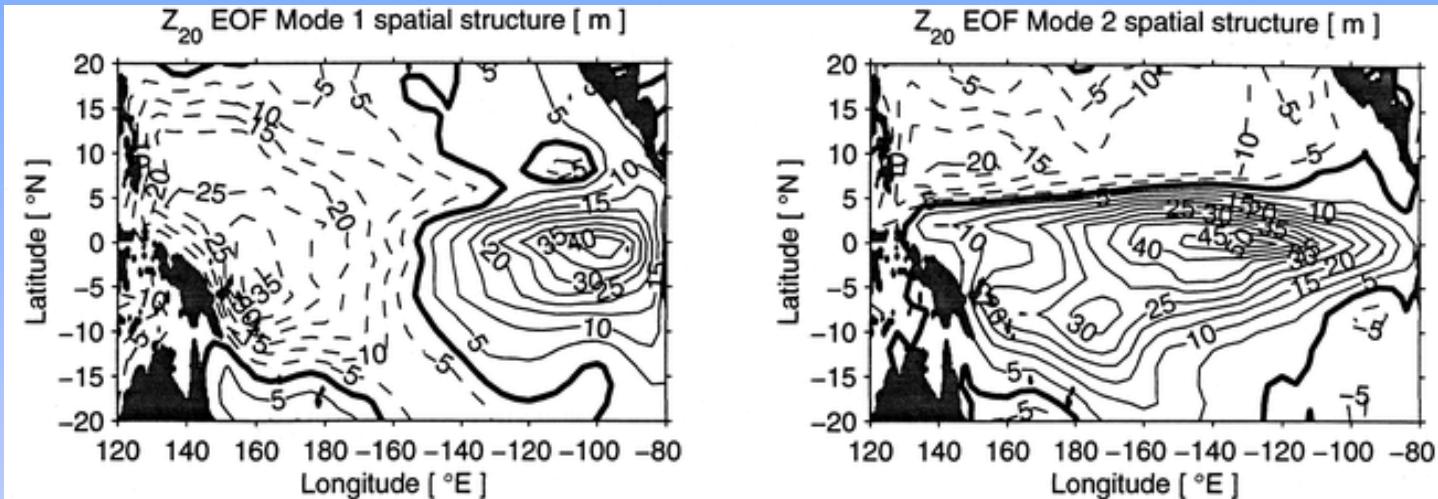


Nov 97

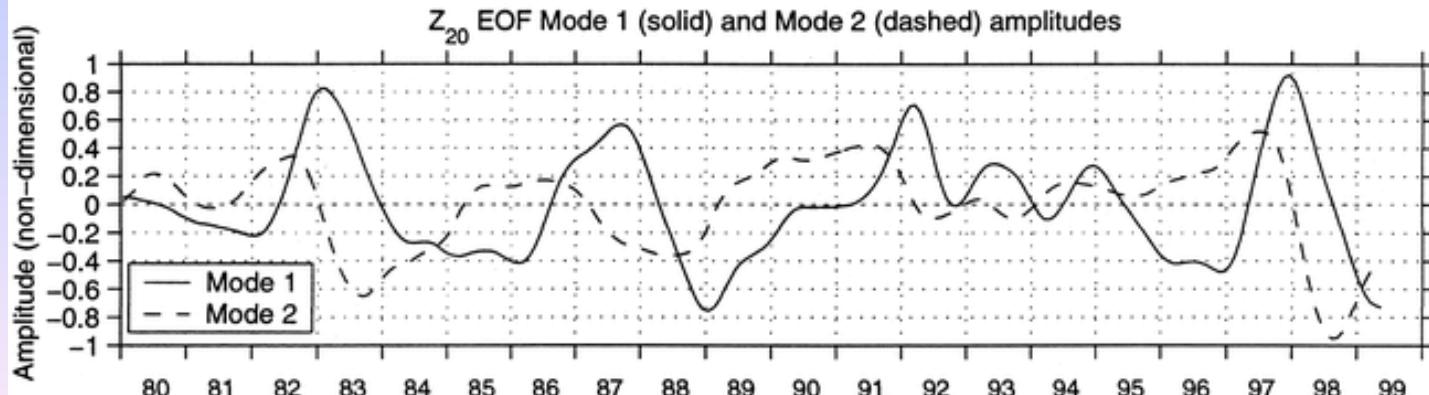
**Red is 30 degrees C and blue is 8 degrees C.**

<http://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/mein2119/mein2119.shtml>

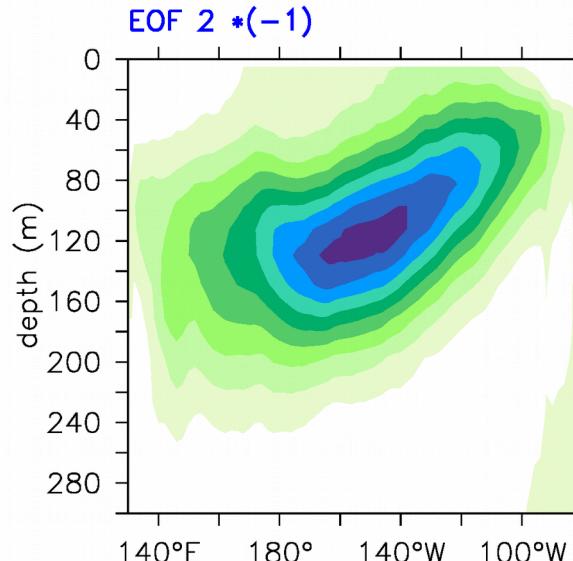
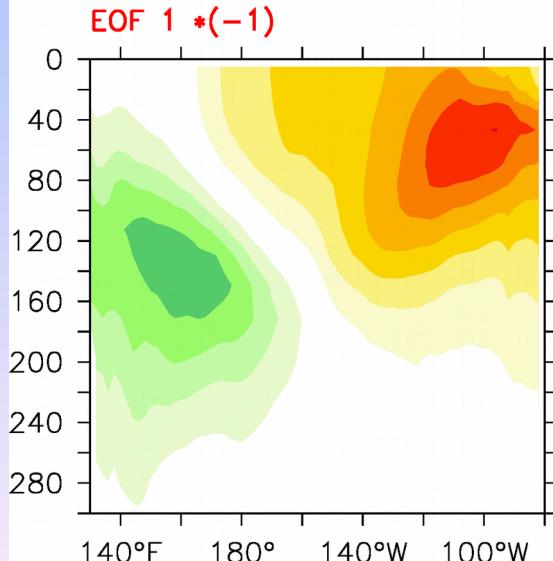
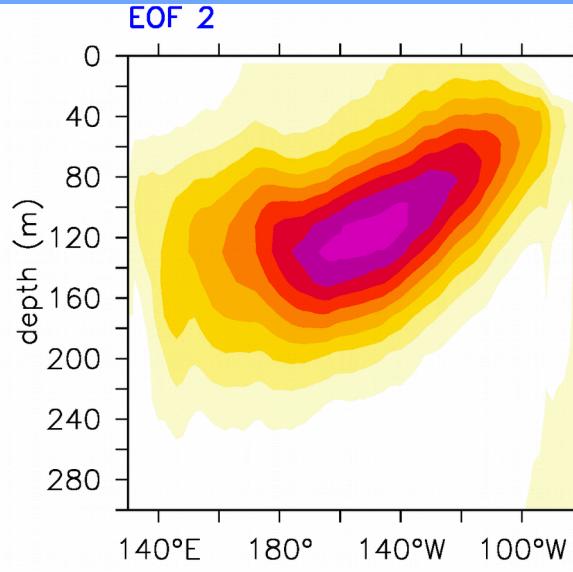
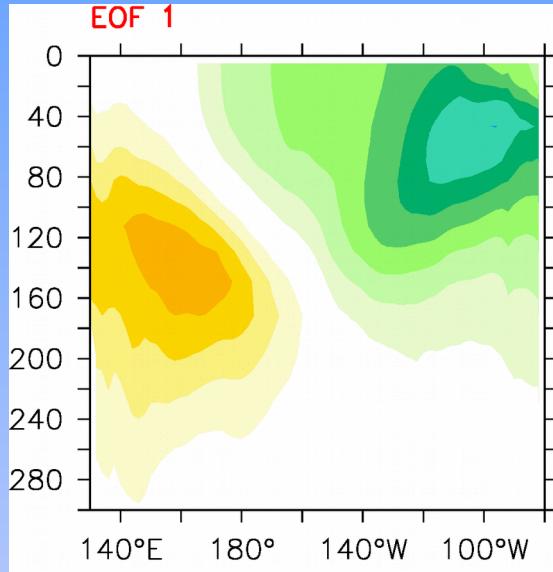
# Die beiden ersten EOF-Moden der Thermoklinen-Tiefe ( $Z_{20}$ )



impliziert ein quasi-oszillatorisches Verhalten

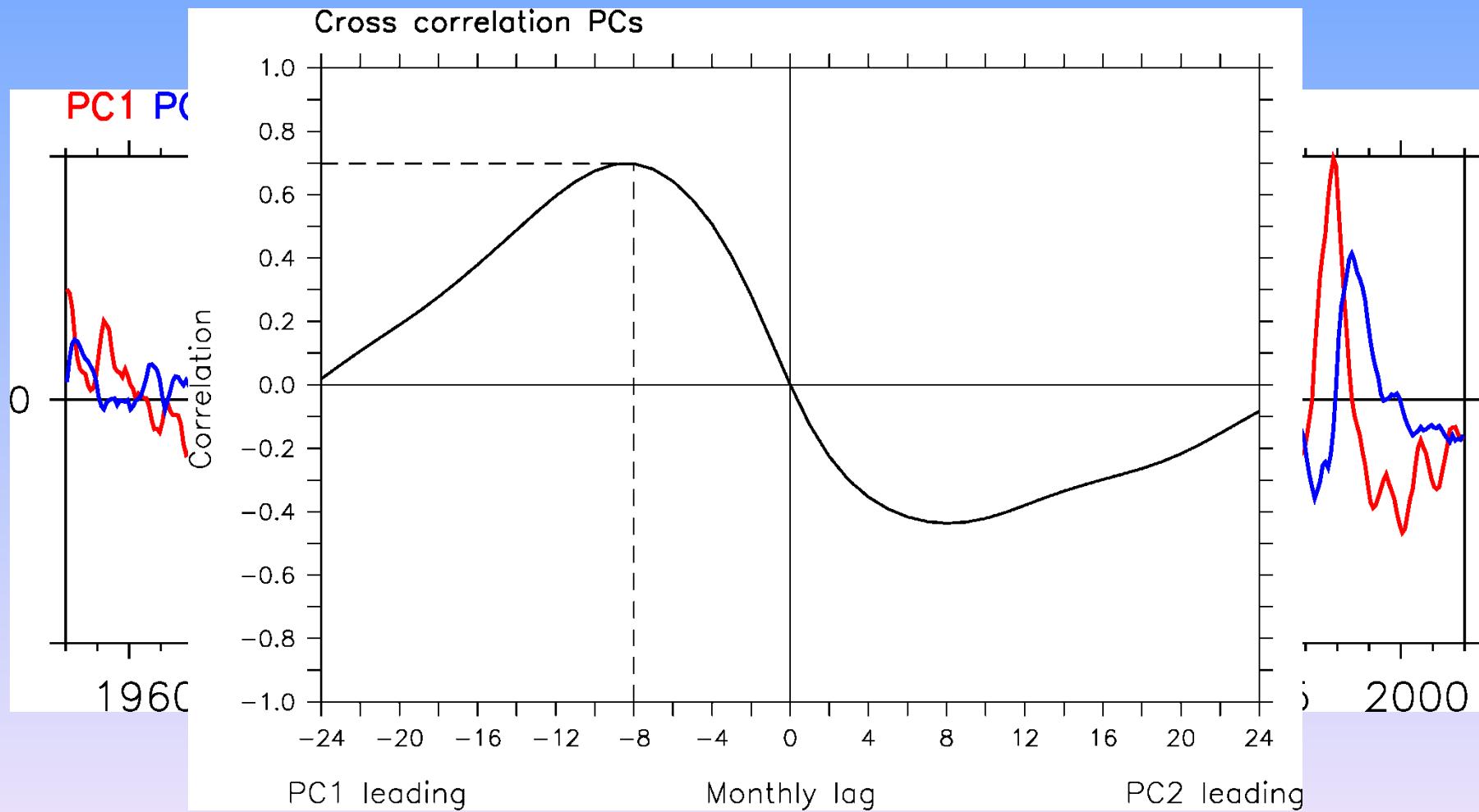


# Die ersten beiden Temperatur-EOFs



T.Bayr und C. Wengel

# Die EOF-Zeitreihen (PCs)

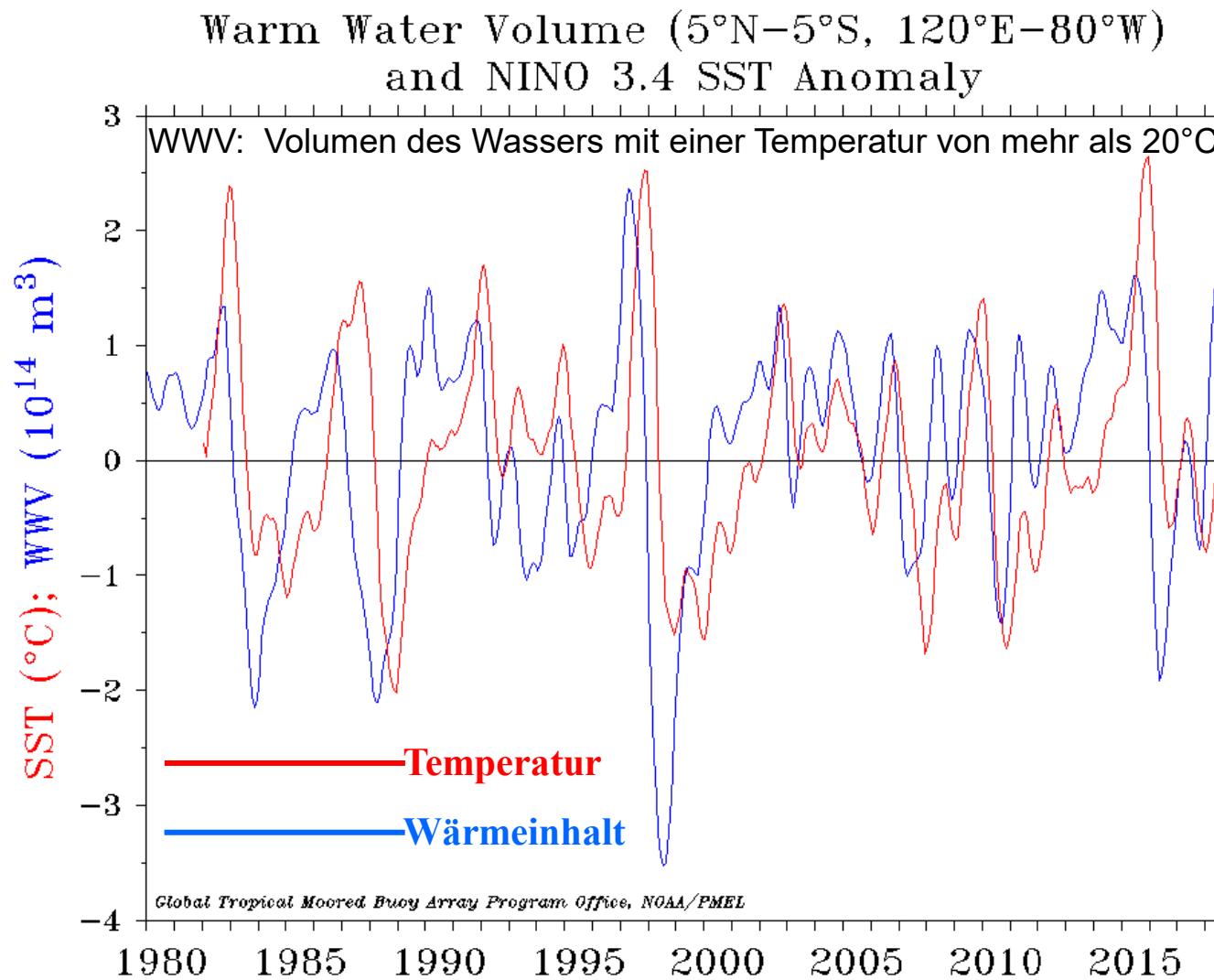


T.Bayr und C. Wengel

**Animation (EOF1→EOF2→EOF1→-EOF2) aus den ersten beiden EOF-Moden, eine Sequenz erstellt aus den 2 EOF-Mustern**

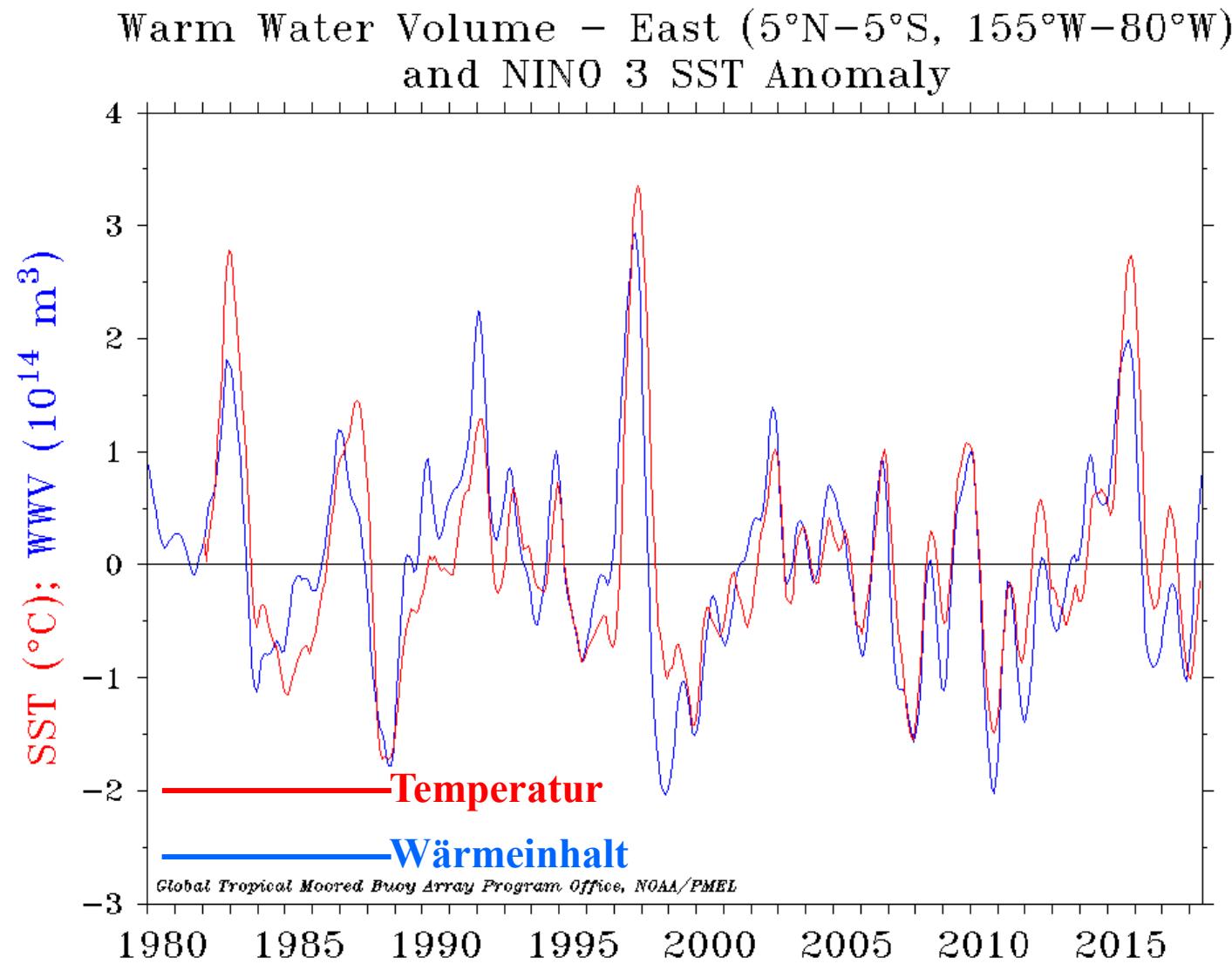
..\..\ENSO Recharge Oscillator\\recharge\_oscillator new.mp4

# Der äquatoriale Wärmeinhalt als Vorbote



Der Wärmeinhalt läuft der Meeresoberflächentemperatur voraus

# Der Wärmeinhalt im Osten ist **kein (!) Vorbote**



# Der Recharge-Oscillator, Jin 1997

811

JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES

VOLUME 54

## An Equatorial Ocean Recharge Paradigm for ENSO. Part I: Conceptual Model

FEI-FEI JIN

*Department of Meteorology, School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii*

(Manuscript received 11 January 1995, in final form 3 September 1996)

### ABSTRACT

A new conceptual model for ENSO has been constructed based upon the positive feedback of tropical ocean–atmosphere interaction proposed by Bjerknes as the growth mechanism and the recharge–discharge of the equatorial heat content as the phase-transition mechanism suggested by Cane and Zebiak and by Wyrtki. This model combines SST dynamics and ocean adjustment dynamics into a coupled basinwide recharge oscillator that relies on the nonequilibrium between the zonal mean equatorial thermocline depth and wind stress. Over a wide range of the relative coupling coefficient, this recharge oscillator can be either self-excited or stochastically sustained. Its period is robust in the range of 3–5 years. This recharge oscillator model clearly depicts the slow physics of ENSO and also embodies the delayed oscillator (Schopf and Suarez; Battisti and Hirst) without requiring an explicit wave delay. It can also be viewed as a mixed SST–ocean dynamics oscillator due to the fact that it arises from the merging of two uncoupled modes, a decaying SST mode and a basinwide ocean adjustment mode, through the tropical ocean–atmosphere coupling. The basic characteristics of this recharge oscillator, including the relationship between the equatorial western Pacific thermocline depth and the eastern Pacific SST anomalies, are in agreement with those of ENSO variability in the observations and simulations with the Zebiak–Cane model.



future ocean  
KIEL MARINE SCIENCES



GEOMAR

# Die ursprünglichen Gleichungen des Recharge Oscillators

$$\frac{dh_w}{dt} = -rh_w - \alpha b T_E$$

$$\frac{dT_E}{dt} = RT_E + \gamma h_w,$$

$$R = \gamma b + \delta_s b' - c$$

Instabilität für  $(R - r)/2 > 0$

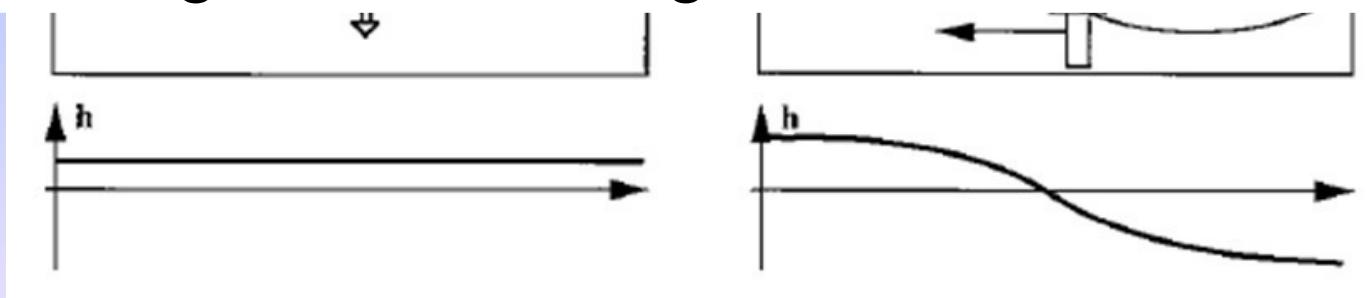
Oszillationen für  $\omega = \sqrt{\alpha b \gamma - (r + R)^2/4}$

There are abundant transient atmospheric disturbances of much shorter decorrelation timescales than the ENSO timescale. These transient disturbances can exert forcing on the coupled system through wind stress and heat flux. They can be conceptually considered as sources of noise agitation to the slow ENSO dynamical

# Der Recharge-Oscillator, schematisch



The recharge/discharge theory postulates that, prior to El Niño, heat content builds up in the equatorial region; the heat is then "discharged" eastward and poleward during El Niño. Transport below the Ekman layer is the key to recharge and discharge.



Gezeigt sind Anomalien vom mittleren Zustand

# Vereinfachtes Modell nach Burgers et al. 2005

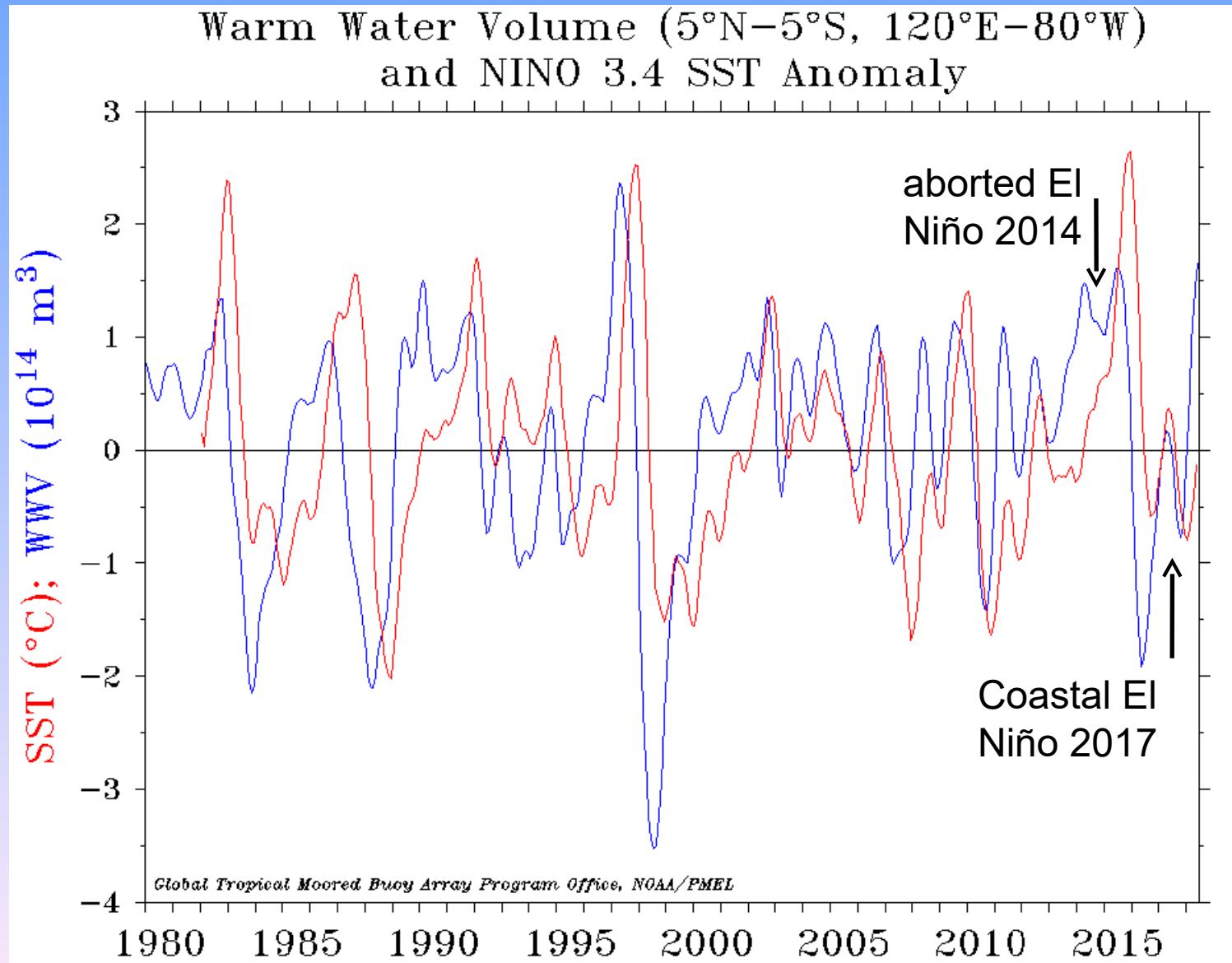
→ gedämpft, stochastischer Antrieb ist nötig

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}T_E &= a_{11}T_E + a_{12}h \\ \frac{d}{dt}h &= a_{21}T_E + a_{22}h,\end{aligned}$$

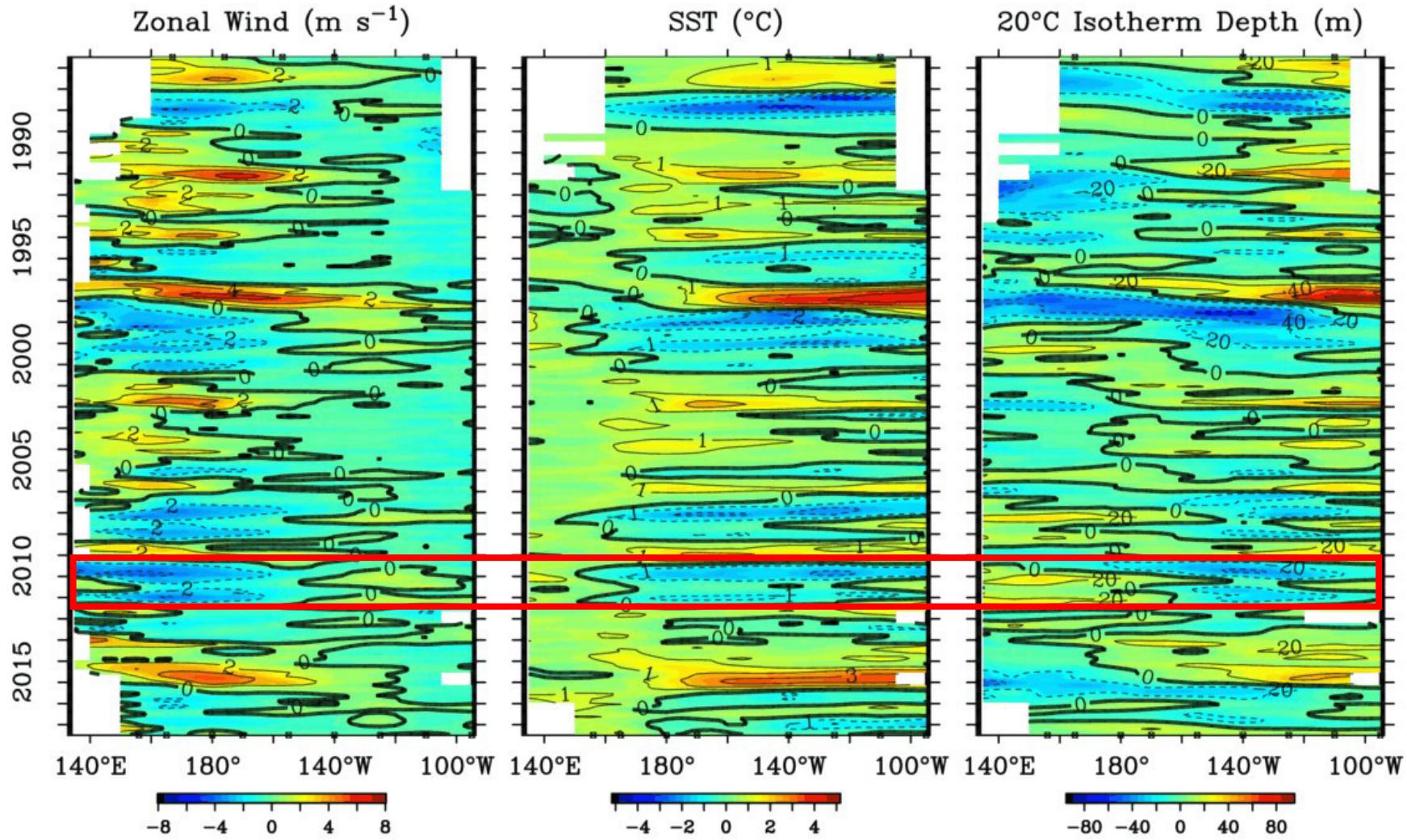
$a_{11}$	$-0.076 \frac{1}{\text{month}}$
$a_{12}$	$0.021 \frac{K}{\text{month } m}$
$a_{21}$	$-1.400 \frac{m}{K \text{ month}}$
$a_{22}$	$-0.008 \frac{1}{\text{month}}$

Gedämpfter linearer Oszillatör. Die SST spielt die Rolle des Impulses, die Tiefe der Thermokline die des Ortes

# Two events that were not predicted



# The “aborted” El Niño of 2014

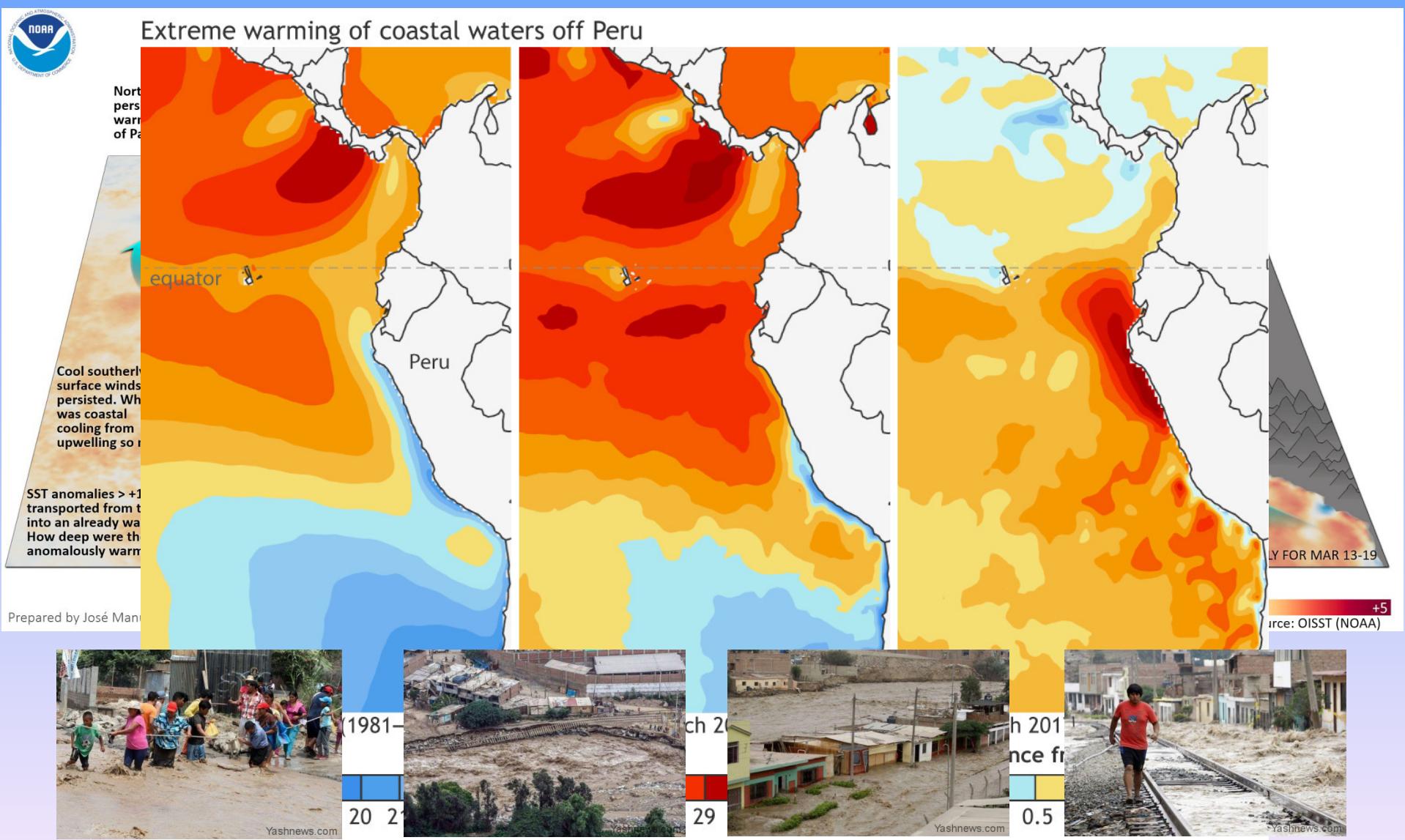


Global Tropical Moored Buoy Array Program Office, NOAA/PMEL

Jun 16 2018

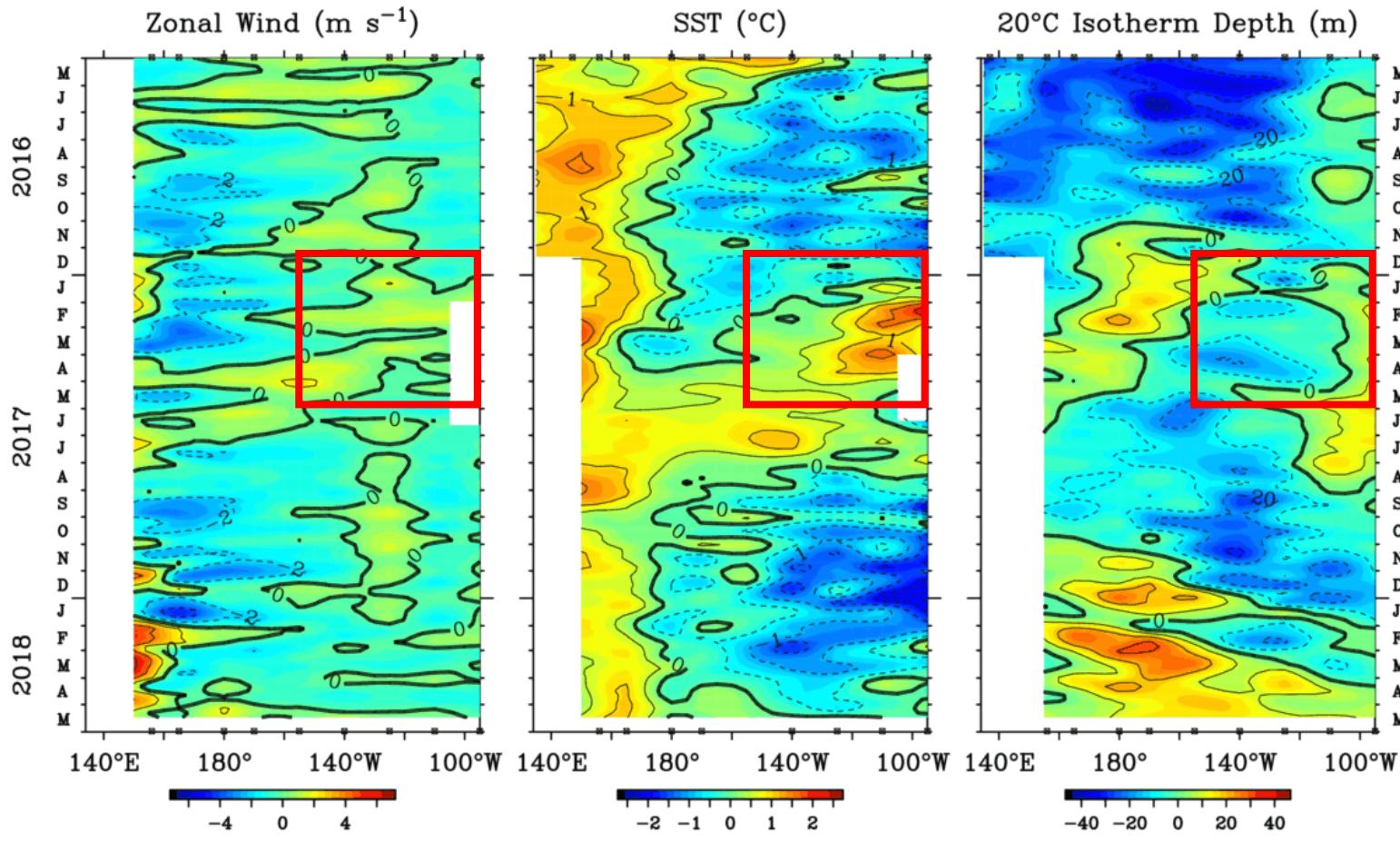
see Hu and Fedorov 2016 for the role of the easterly wind burst

# The coastal El Niño of 2017



# The coastal El Niño of 2017

Five Day Zonal Wind, SST, and 20°C Isotherm Depth Anomalies 2°S to 2°N Average



Global Tropical Moored Buoy Array Program Office, NOAA/PMEL

May 18 2018

no precursor!

# Zusammenfassung (ENSO)

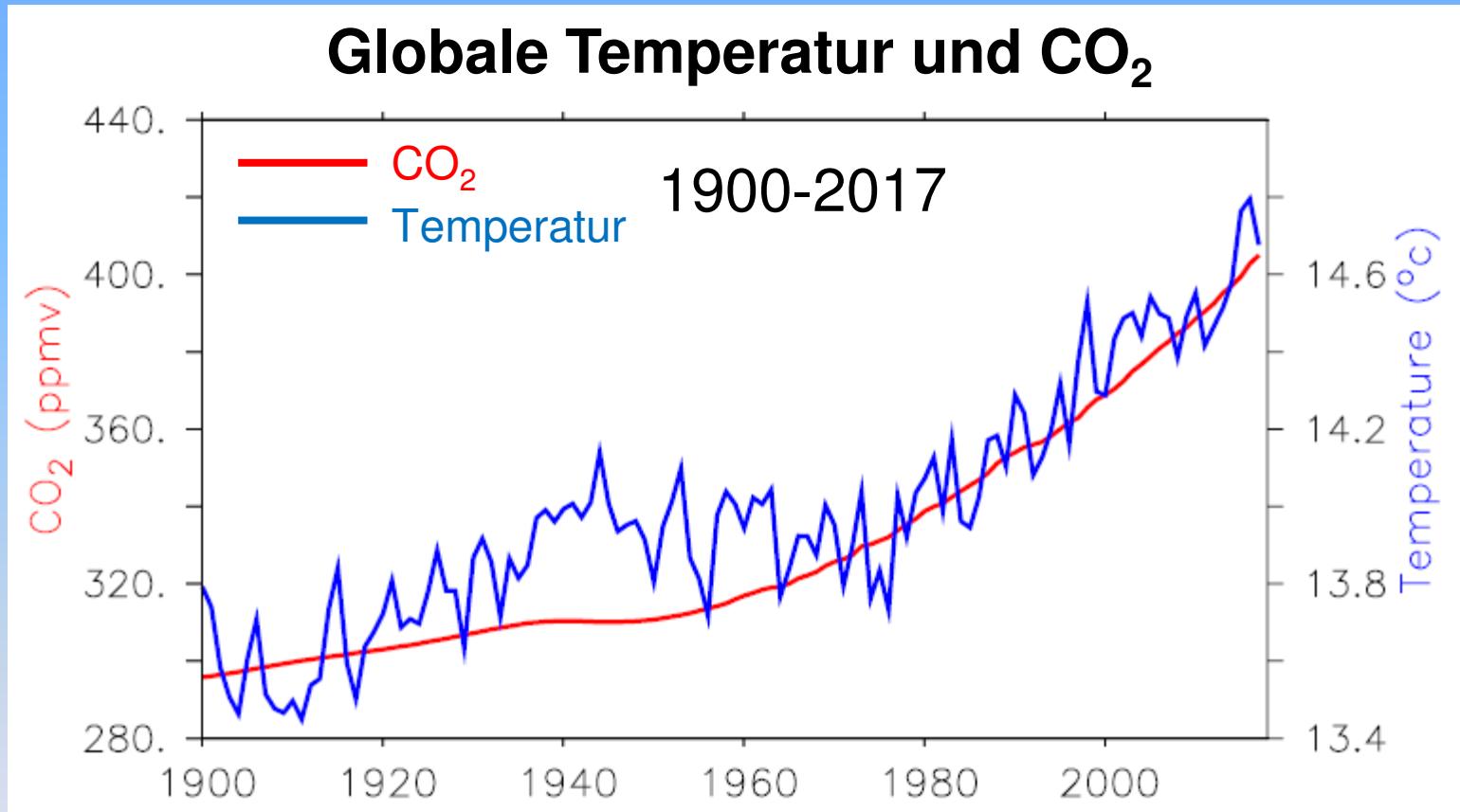
- El Niño ist das Resultat von grossskaligen Wechselwirkungen zwischen dem Ozean und der Atmosphäre.
- El Niño hat weltweite Auswirkungen in Bezug auf Temperatur und Niederschlag und beeinflusst auch die Hurrikan-Aktivität im Atlantik und die Taifun-Tätigkeit im Pazifik und Indischen Ozean.
- Die Simulation von ENSO ist ein geeigneter Test für Klimamodelle, die auch für Rechnungen zum globalen Wandel eingesetzt werden.
- ENSO basiert auf einem (gedämpften) Zyklus und kann im Rahmen des stochastischen Klimamodells verstanden werden (stochastisch angetriebene Eigenschwingung des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre).
- Der zonal integrierte äquatoriale Wärmeinhalt ist ein Vorbote
- ENSO-Extreme sind einige Monate im voraus vorhersagbar, und das bedeutete den Einstieg in die Jahreszeitenvorhersage.



# 6. Klimavorhersagbarkeit

- Arten, Lorenz Modell
- Sensitivität bzgl. Anfangsbedingungen
- Randwerte (Beispiel ENSO)
- Projektionen
- Beispiel Südozean

# Global gemittelte Temperatur und atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Gehalt seit 1900



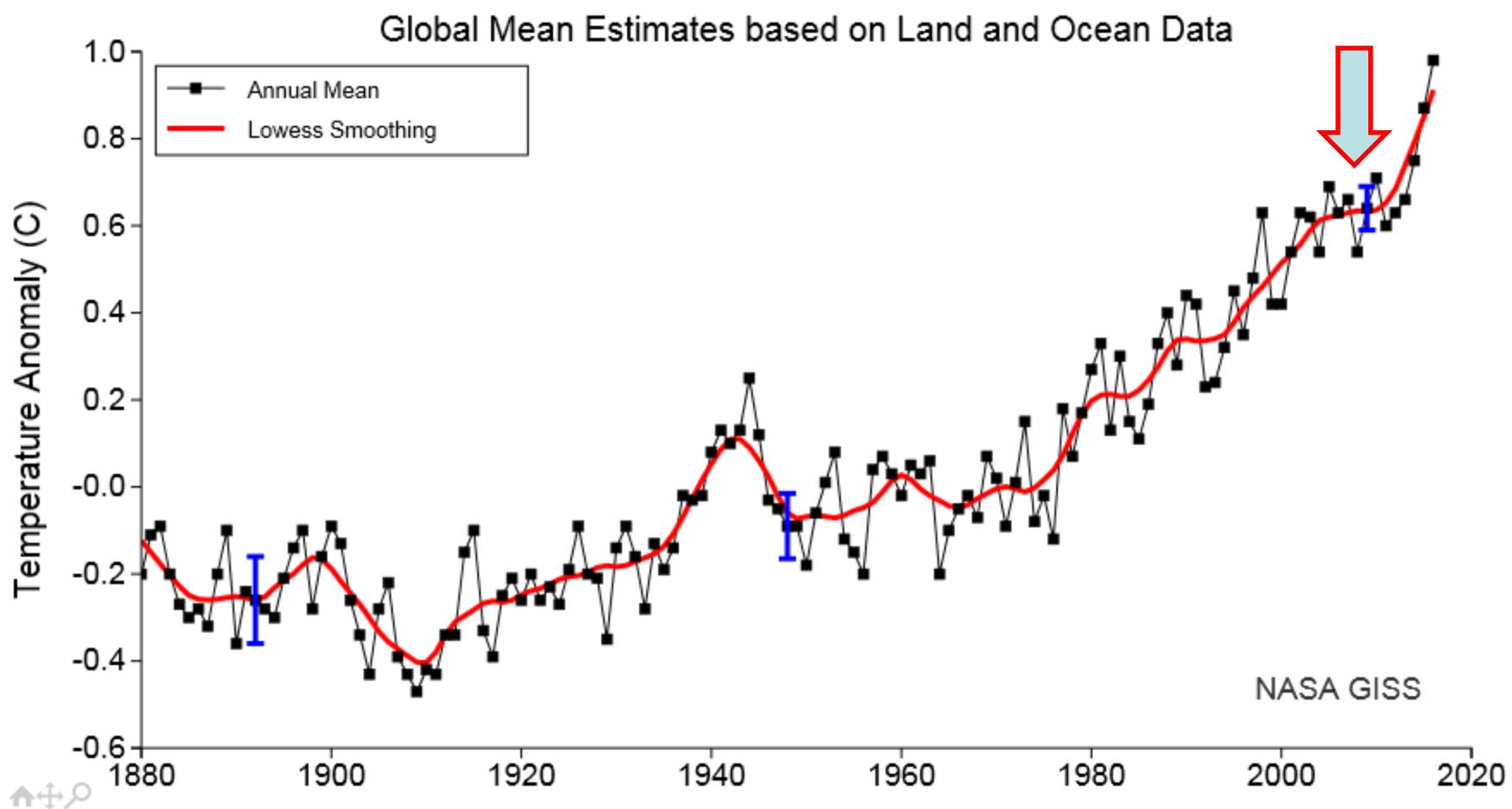
Auch der Anstieg des CO<sub>2</sub> ist eine Änderung einer Randbedingung

# Wo war auf einmal die globale Erwärmung geblieben?

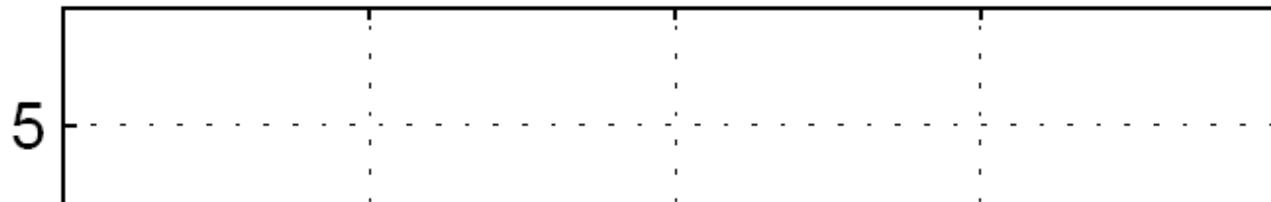


BBC

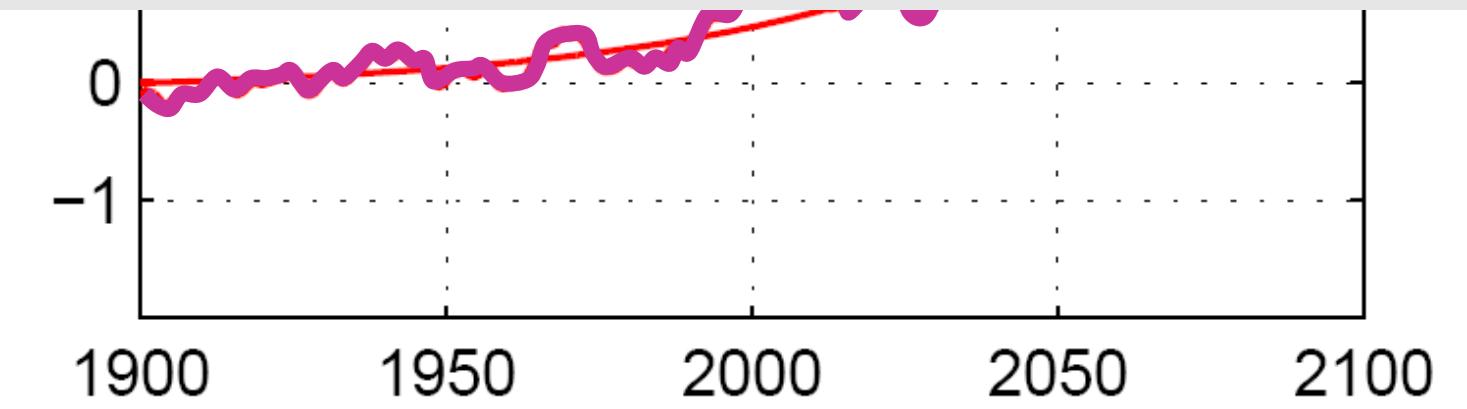
# Die globale Temperatur 1880-2016



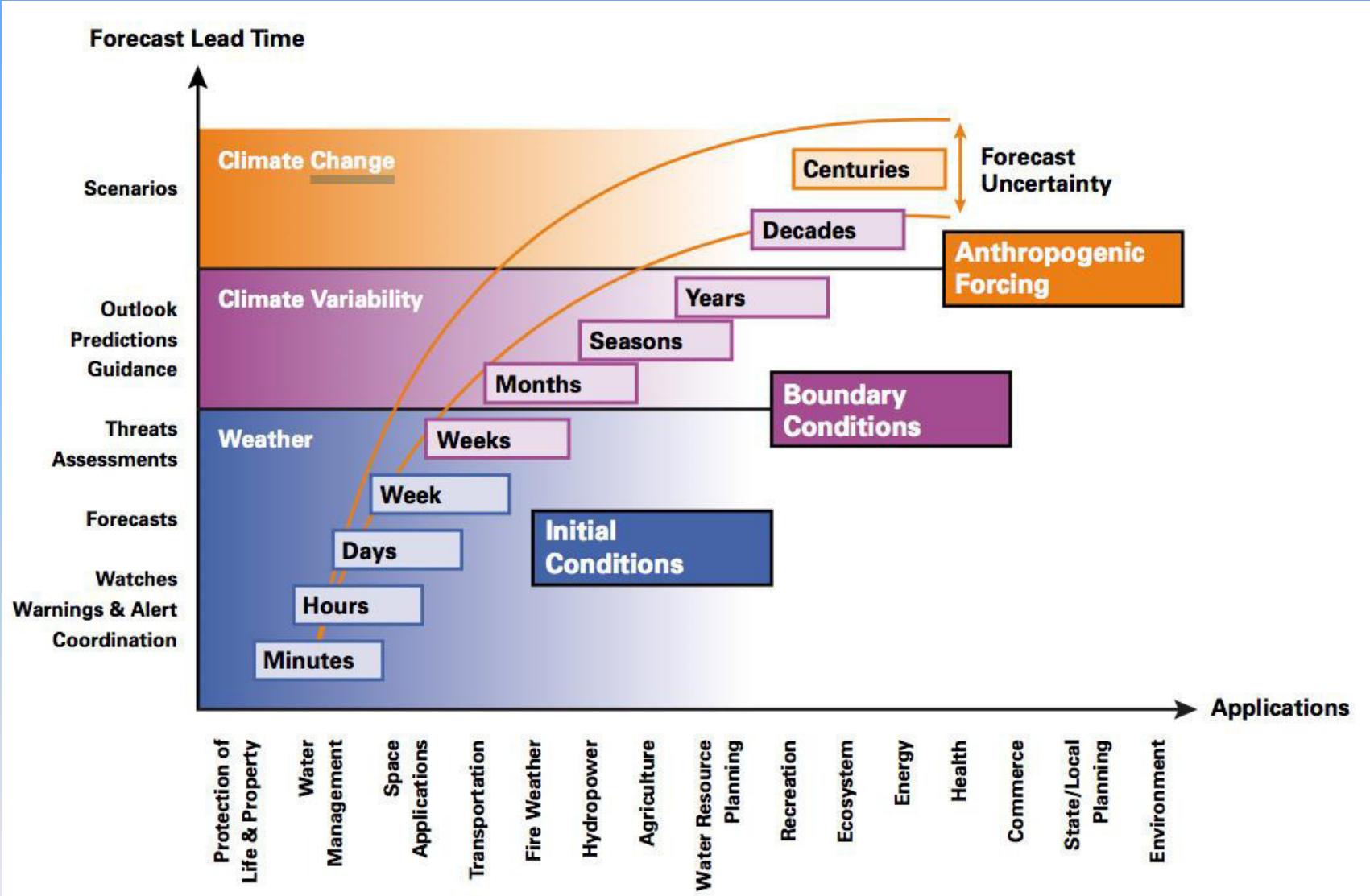
# „Überraschungen“



Das Miteinander von langfristiger anthropogener Erwärmung und kurzfristiger natürlicher Klimavariabilität erfordert die Betrachtung langer Zeiträume von mehreren Jahrzehnten

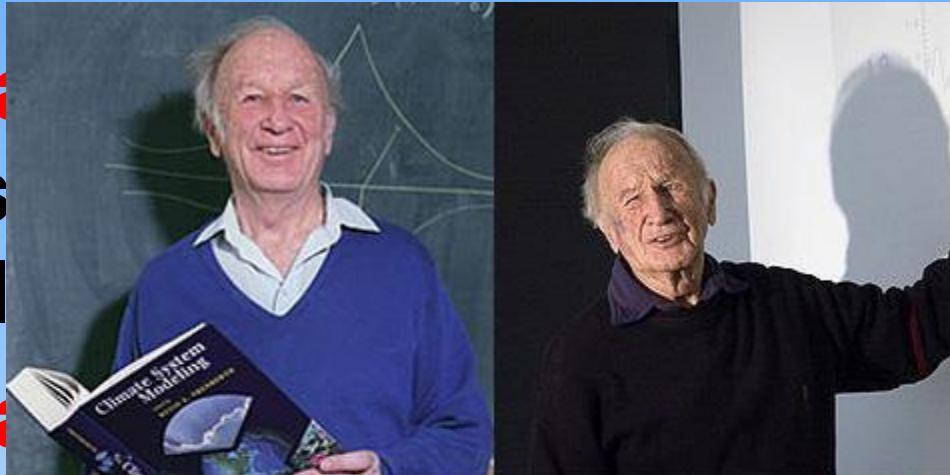


# Die verschiedenen Vorhersagetypen



# Zwei Arten von Vorhersagbarkeit (nach Lorenz)

- **Vorhersage**  
Anfangsbedingungen  
saisonale Abweichungen
- **Vorhersage**  
Randbedingungen  
Spurengase
- **Kurzfristige**  
**Jahrzehnte**



aus den Anfangsbedingungen  
der Vorhersage,



aus den Randbedingungen  
der Spurengase  
nächsten Jahrzehnten

# Wetter und Klima (Lorenz)



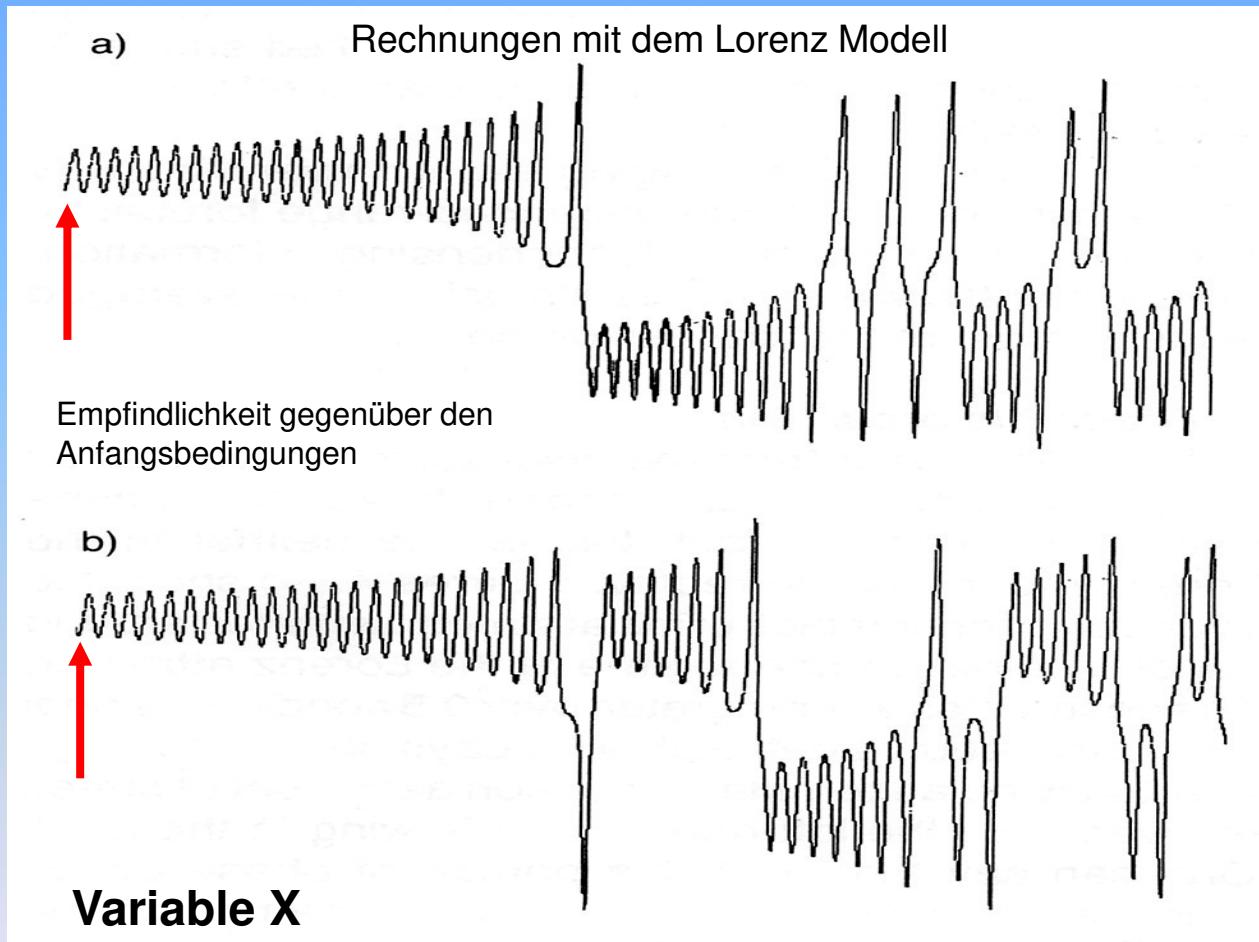
$$\dot{x} = -\sigma x + \sigma y + f,$$

$$\dot{y} = -xz + rx - y + f,$$

$$\dot{z} = xy - bz,$$

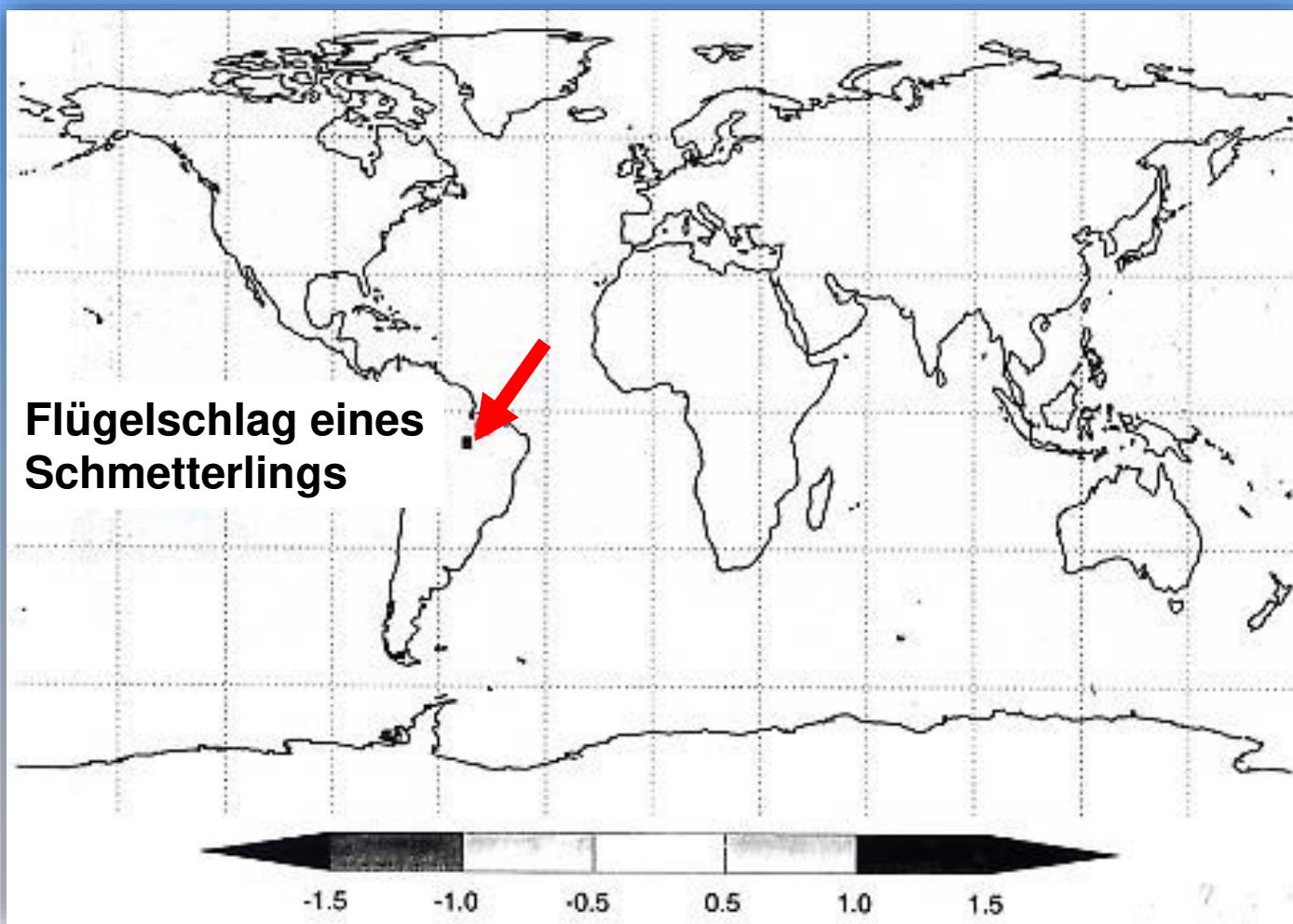
ursprüngliches Modell  
ohne Antrieb  $f$

# Chaos: Sensitivität bzgl. Anfangsbedingungen



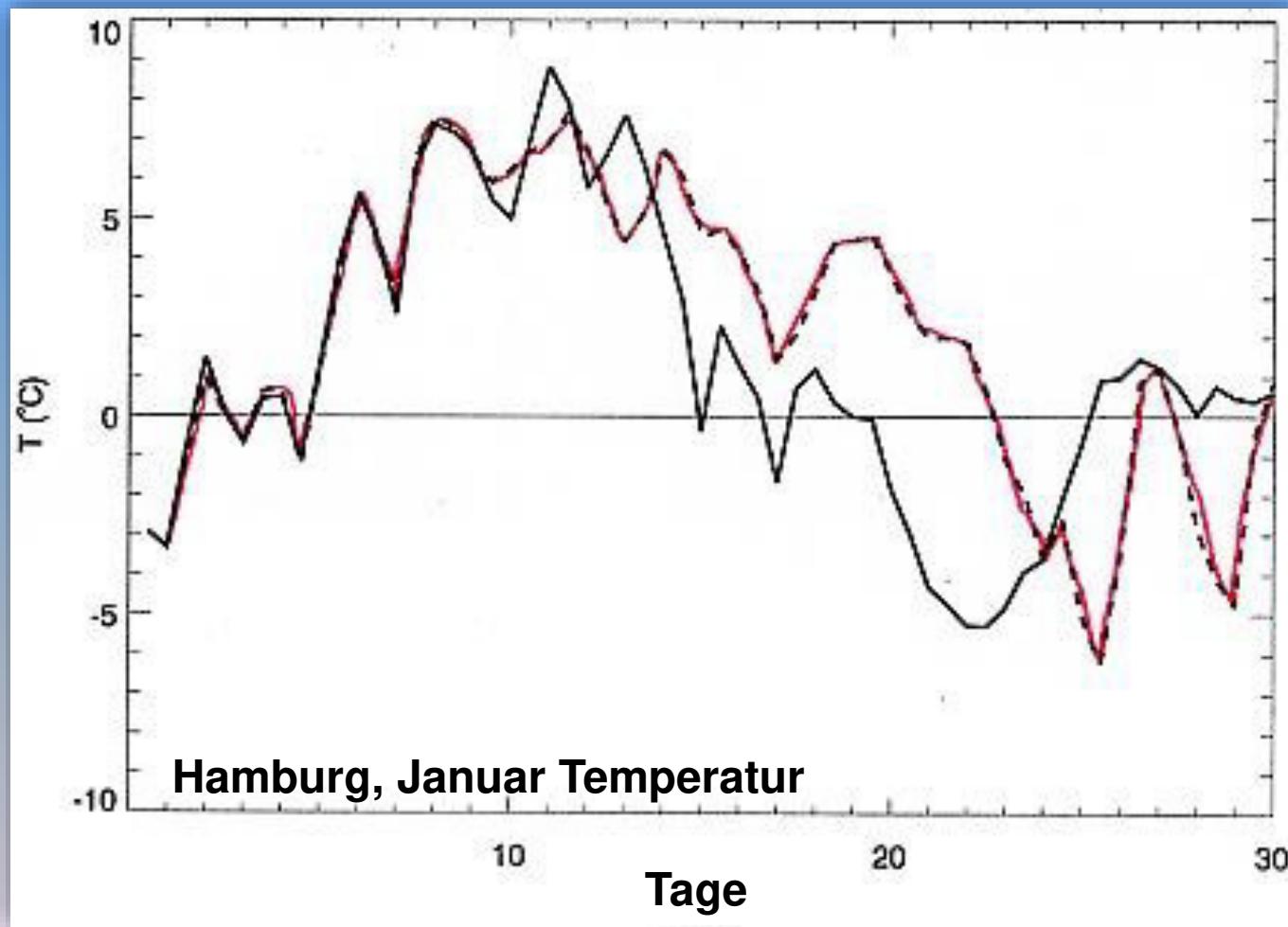
# Ein komplexes Modell (AGCM)

Störung von 1Pa im Amazonas an einem einzigen Gitterpunkt

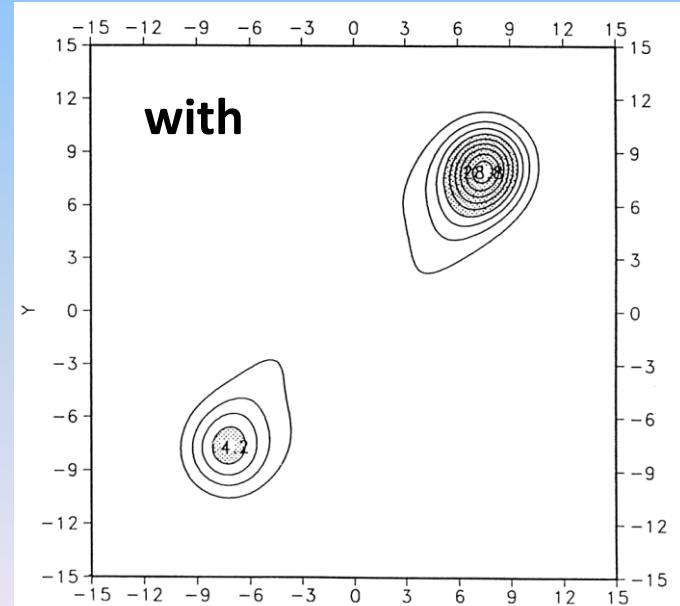
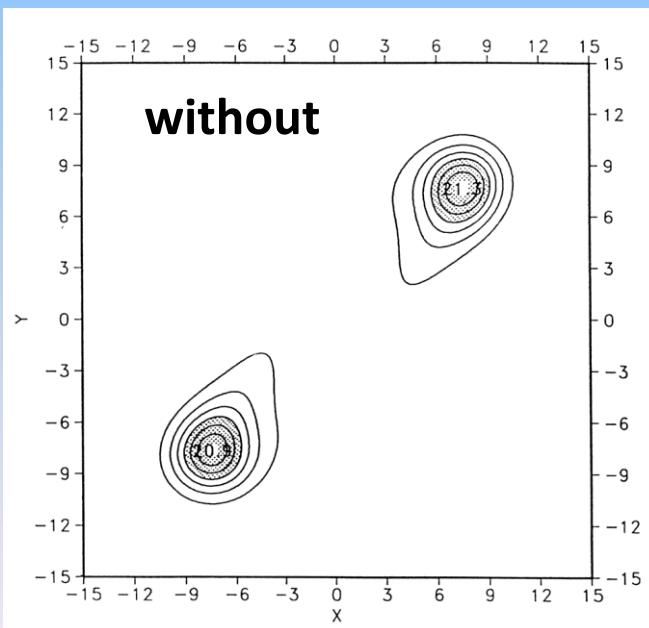
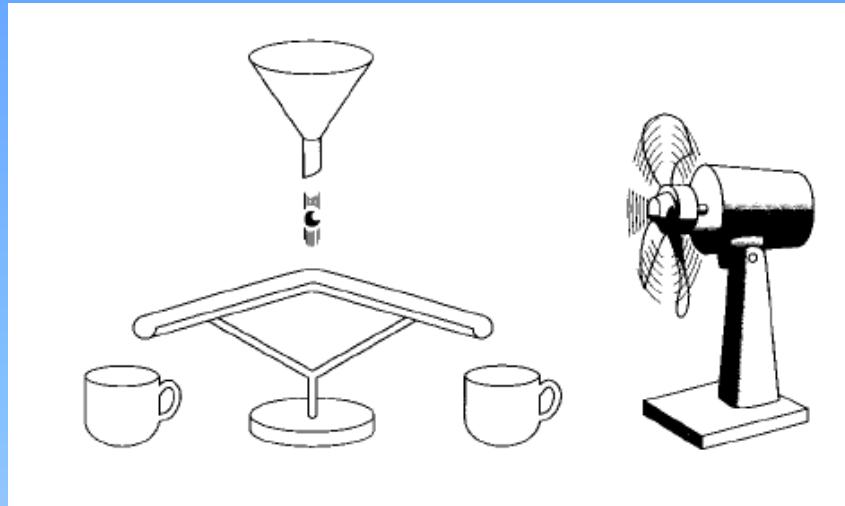


# Der Schmetterlingseffekt

Die Trajektorien entwickeln sich schnell auseinander

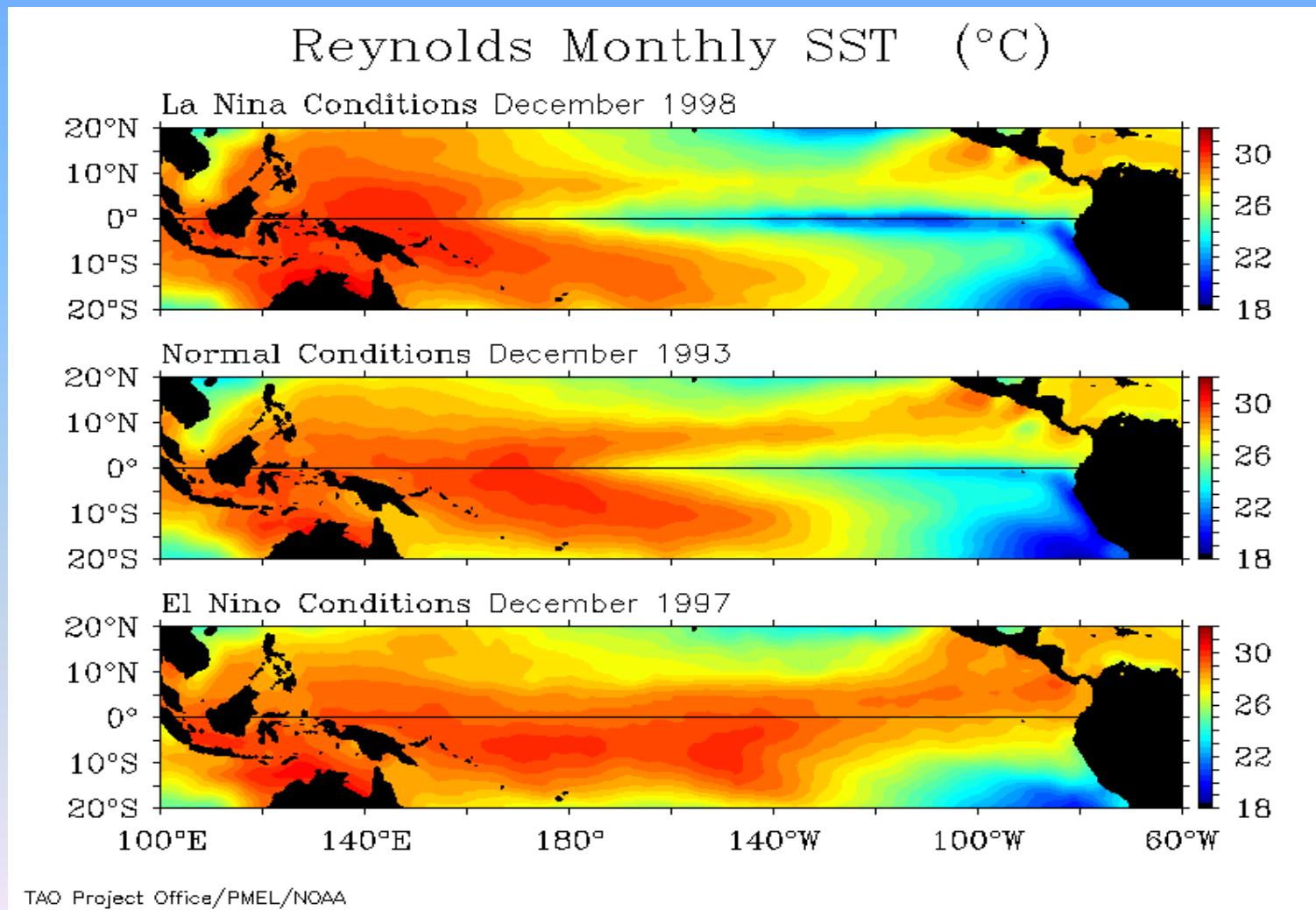


# Einfluss einer externen Kraft



Rechnungen mit dem Lorenz Modell

# Die Meerestemperatur ist eine Randbedingung für die Atmosphäre



TAO Project Office/PMEL/NOAA

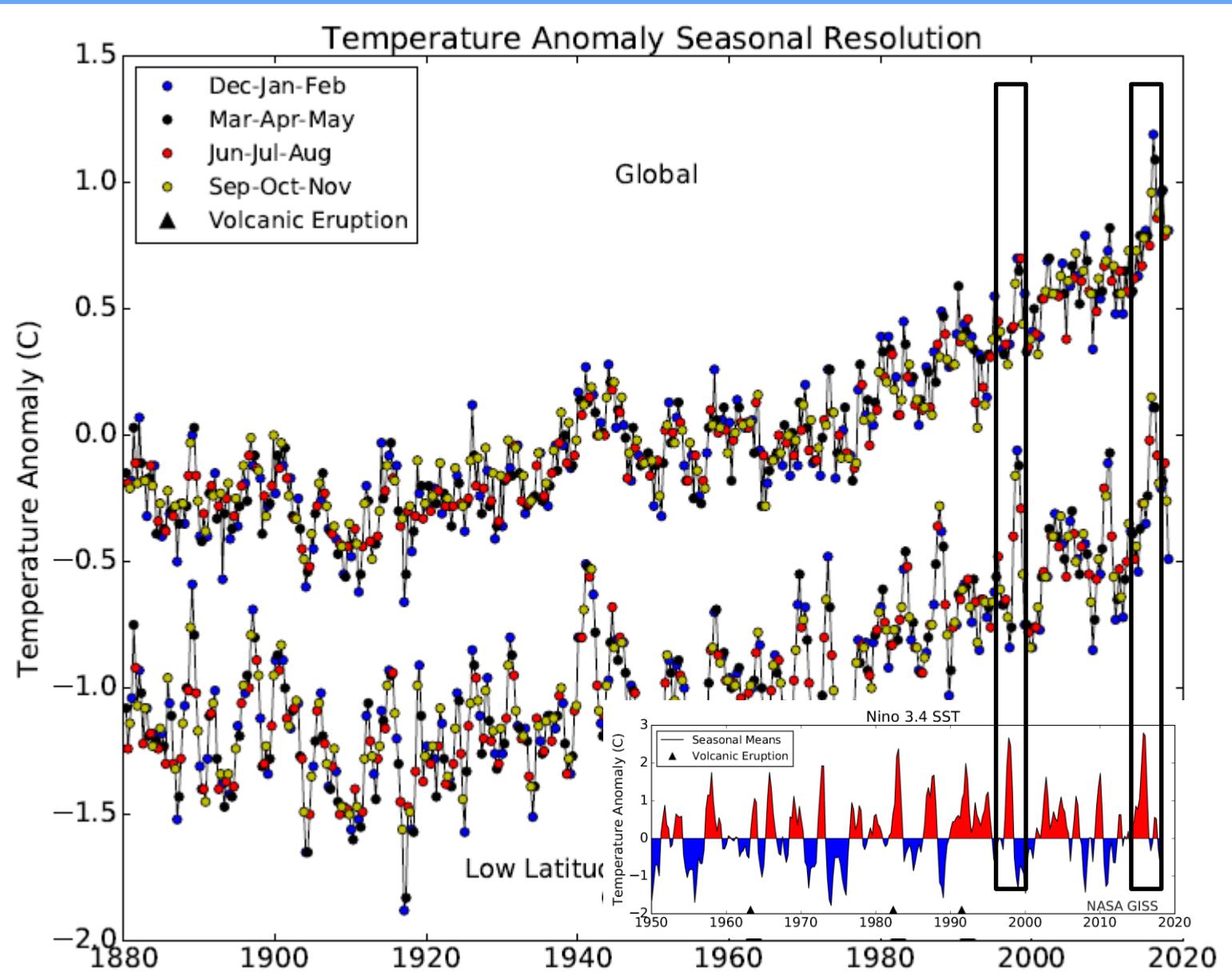


future ocean  
KIEL MARINE SCIENCES

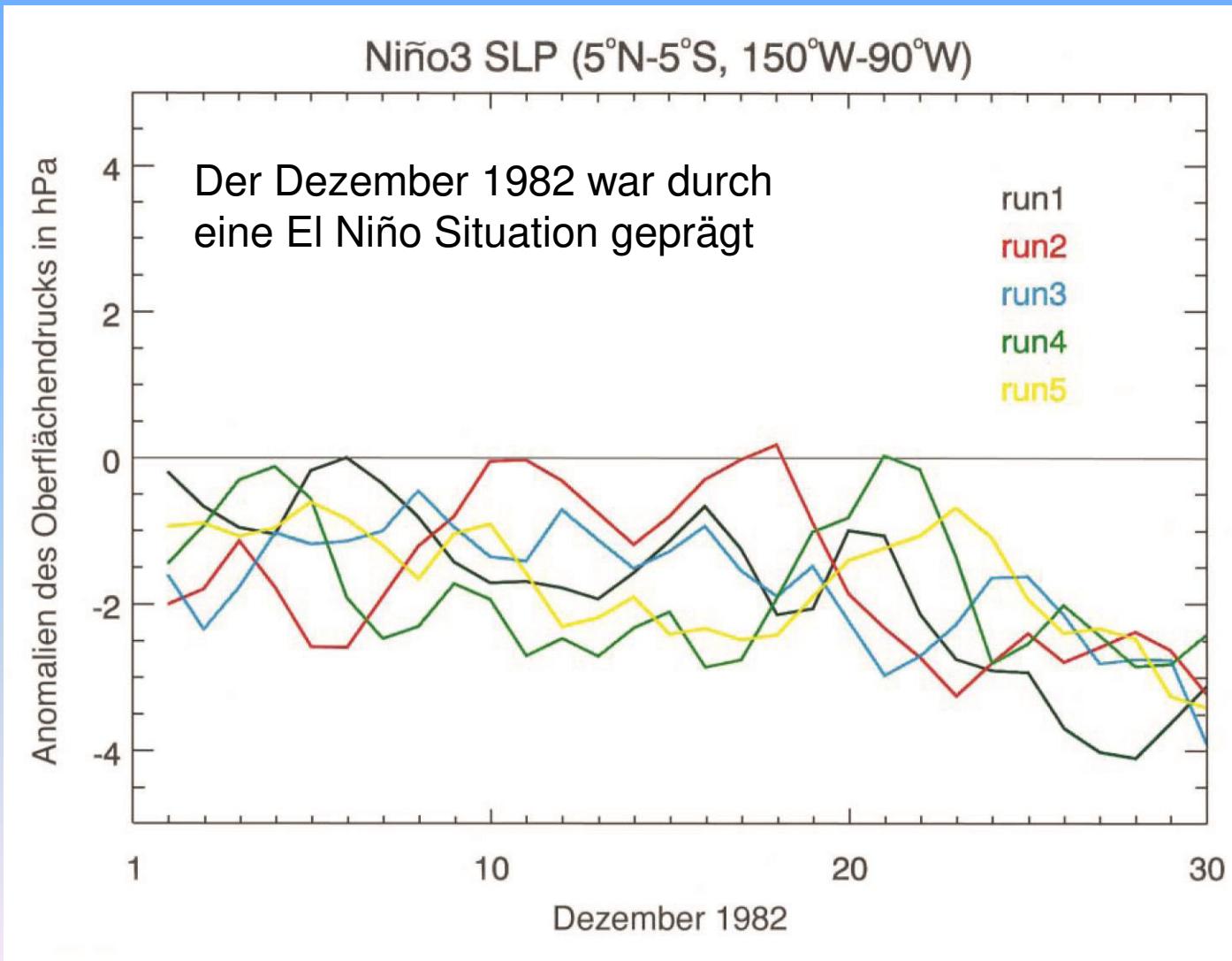


GEOMAR

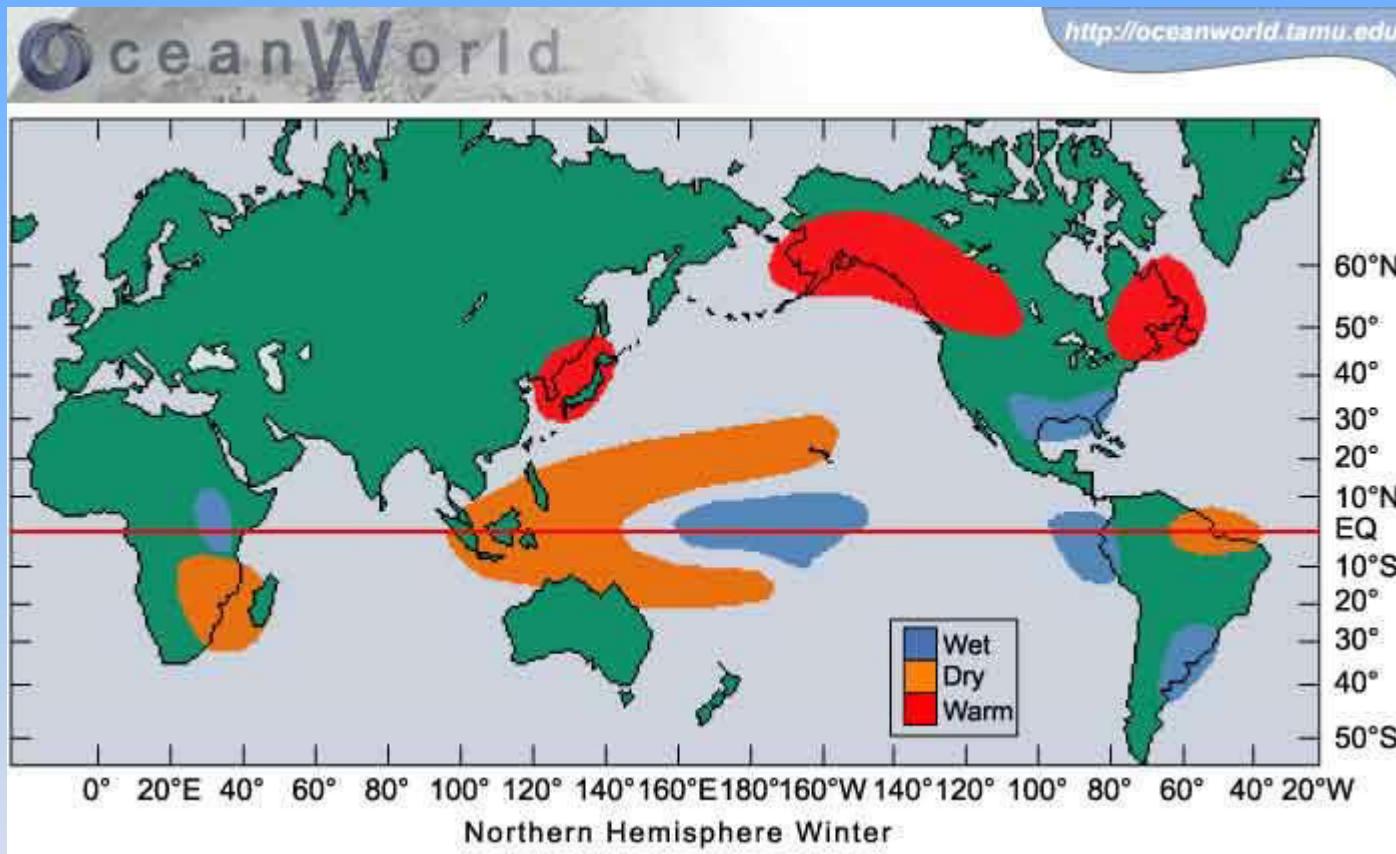
# Einfluss auf die Globaltemperatur (saisonal)



# Einfluss der Meeresoberflächen-temperatur im Pazifik auf den Luftdruck



# EI Niño besitzt globale Auswirkungen, die vorhersagbar wären...



Texas A&M University

...wenn man die Meeresoberflächentemperatur vorhersagen könnte

# Wie gut sind ENSO-Vorhersagen?

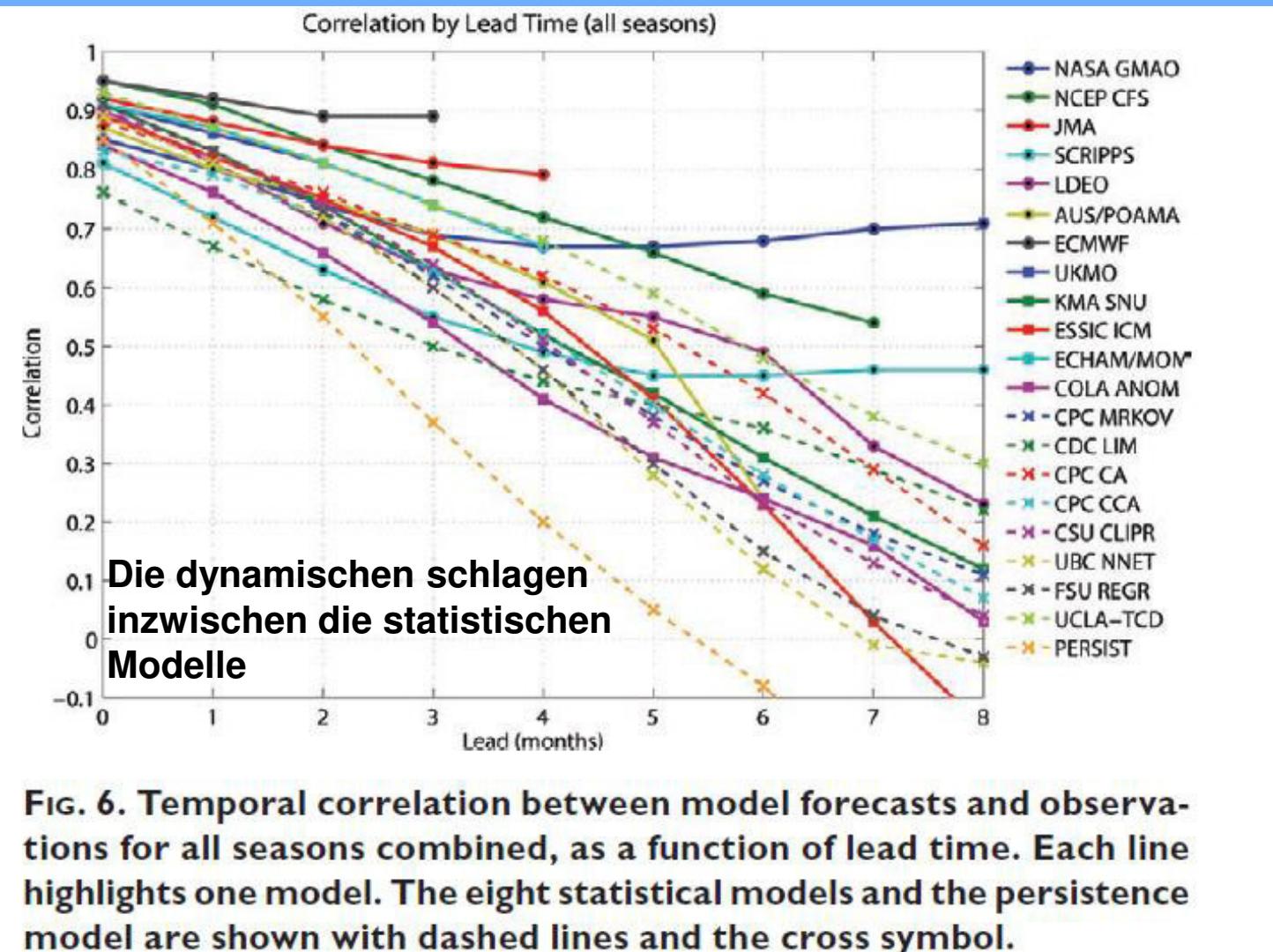
## SKILL OF REAL-TIME SEASONAL ENSO MODEL PREDICTIONS DURING 2002–11 Is Our Capability Increasing?

BY ANTHONY G. BARNSTON, MICHAEL K. TIPPETT, MICHELLE L. L'HEUREUX, SHUHUA LI, AND DAVID G. DEWITT

The low predictability of the past decade masked a gradual improvement of ENSO predictions, with skill of dynamical models now exceeding that of statistical models.

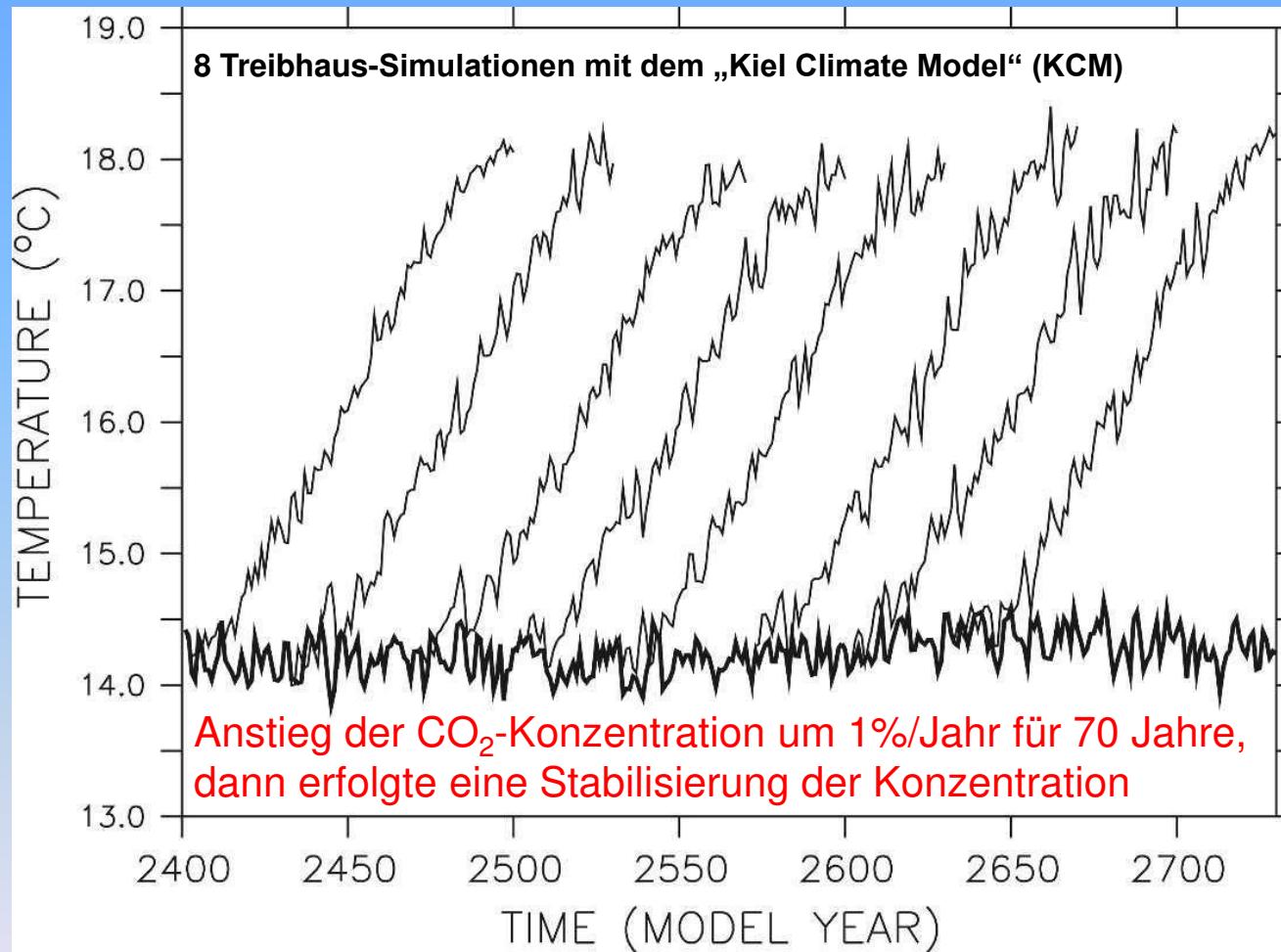
Barnston et al., BAMS 2012

# Korrelation als Funktion des Vorhersagezeitraums



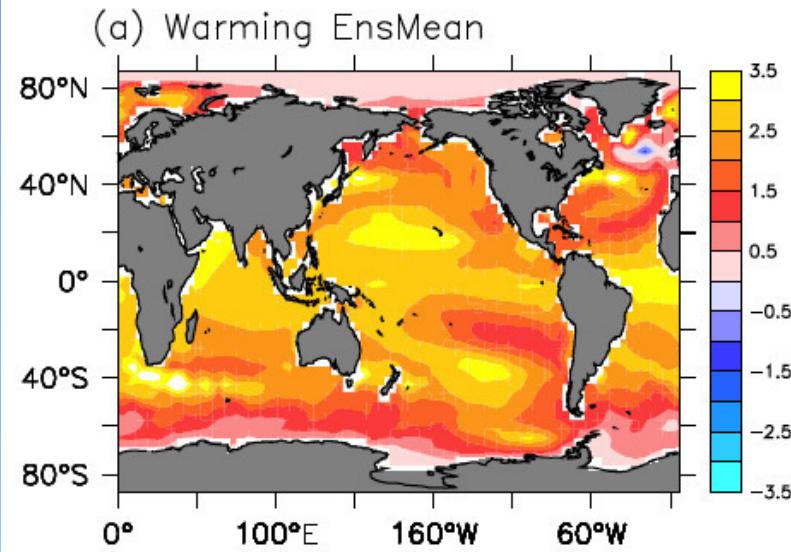
Barnston et al., BAMS 2012

# Einfluss der Randbedingung „Zusammensetzung der Luft“

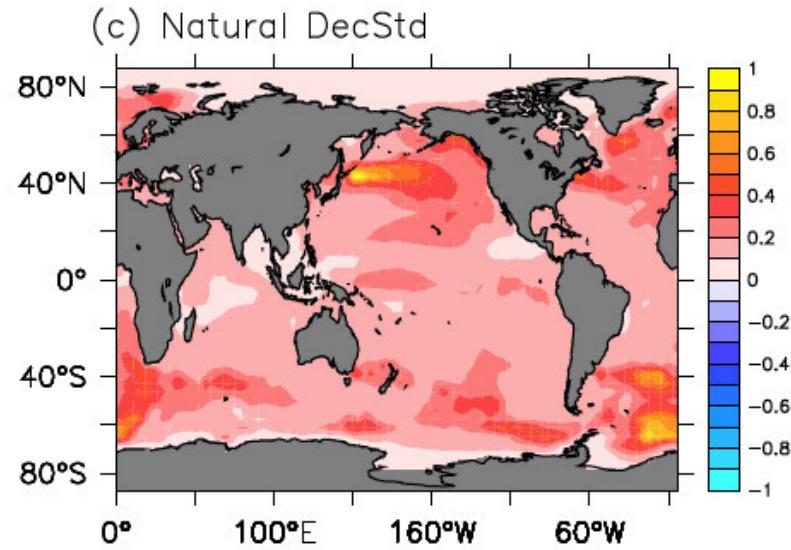
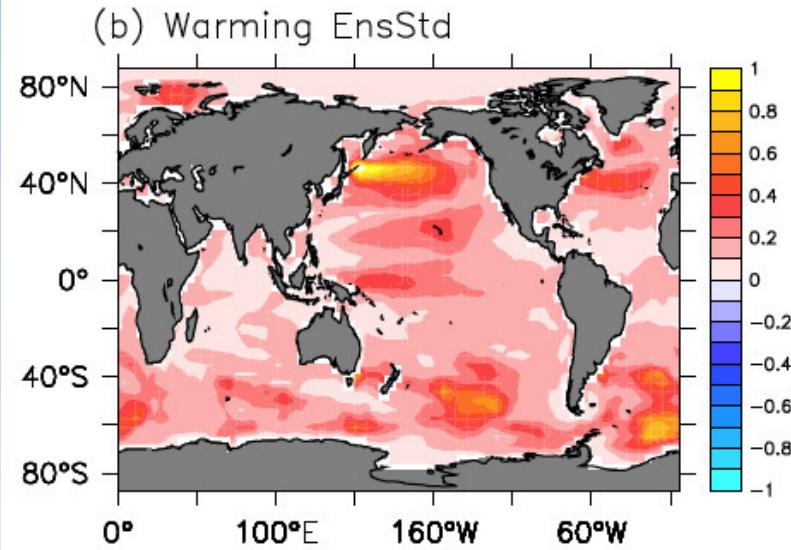


Die langfristige Entwicklung der globalen Temperatur bei steigendem CO<sub>2</sub>-Gehalt ist kaum durch das „Chaos“ beeinflusst

# Regionale Unterschiede sind groß

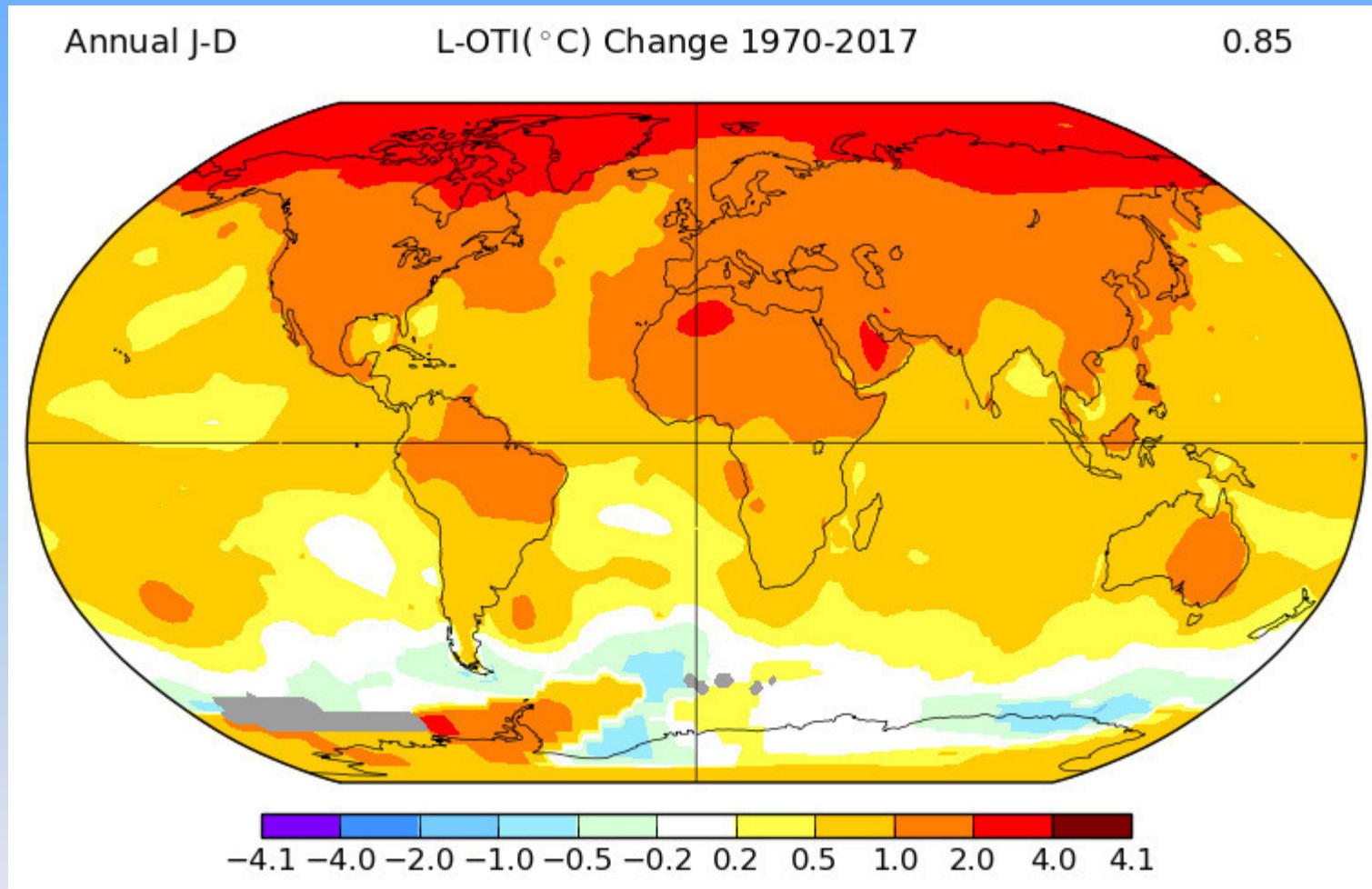


Die interne dekadische Variabilität ist ein wichtiger Grund für die Unsicherheit in den Projektionen auf der regionalen Skala



Berechnet aus 8 Treibhaus-Simulationen mit dem „Kiel Climate Model“ (KCM)  
und einer langen Kontrollsimulation

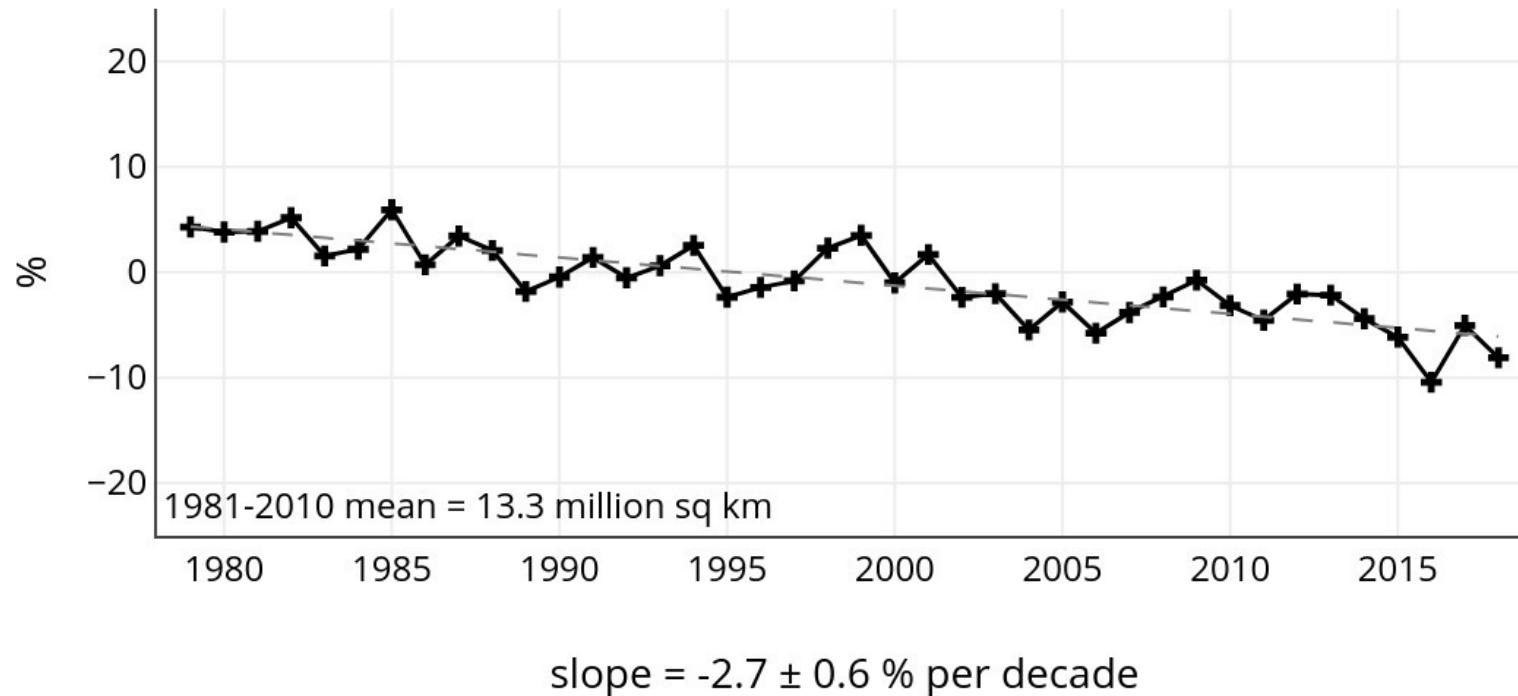
# Sind regionale Änderungen im Erwärmungsmuster vorhersagbar?



Abkühlung in großen Bereichen des Südozeans

# Ausdehnung des arktischen Meereises

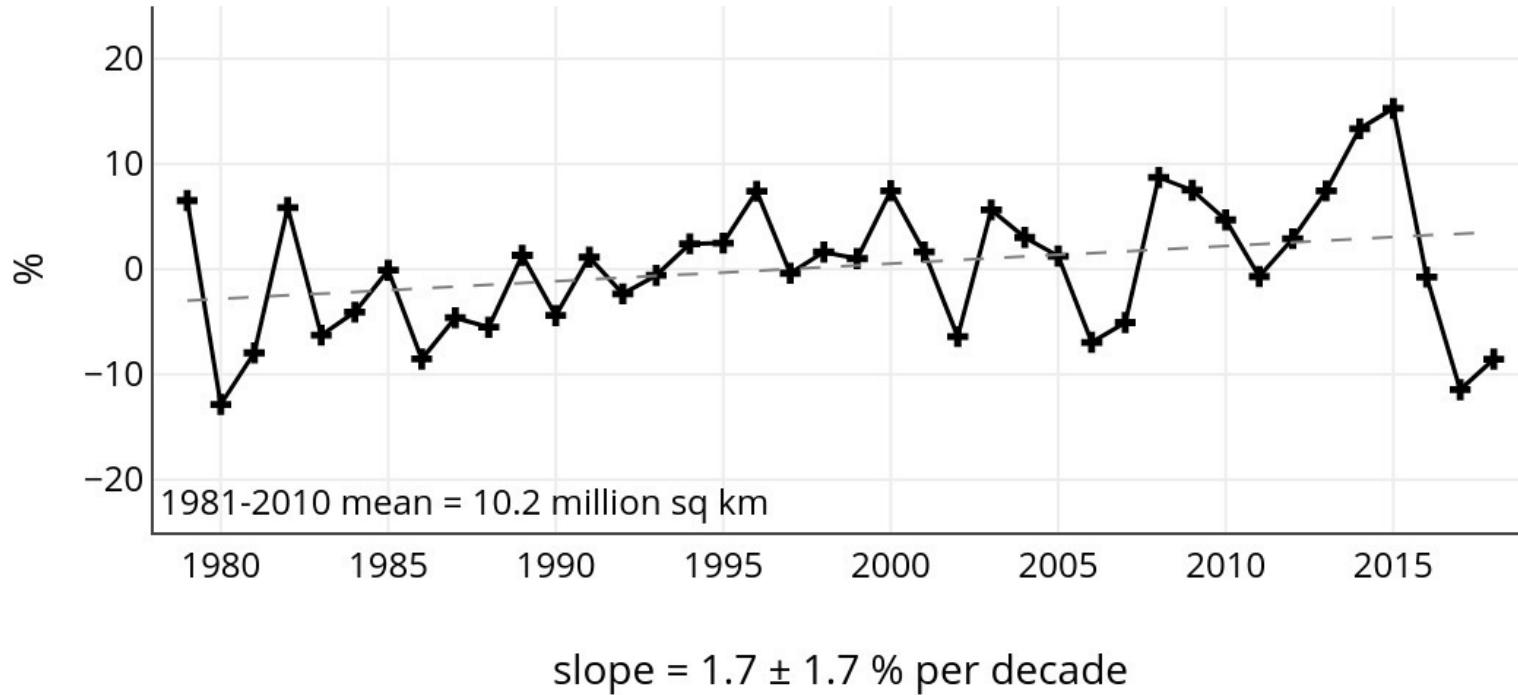
Northern Hemisphere Extent Anomalies May 1979 - 2018



National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder

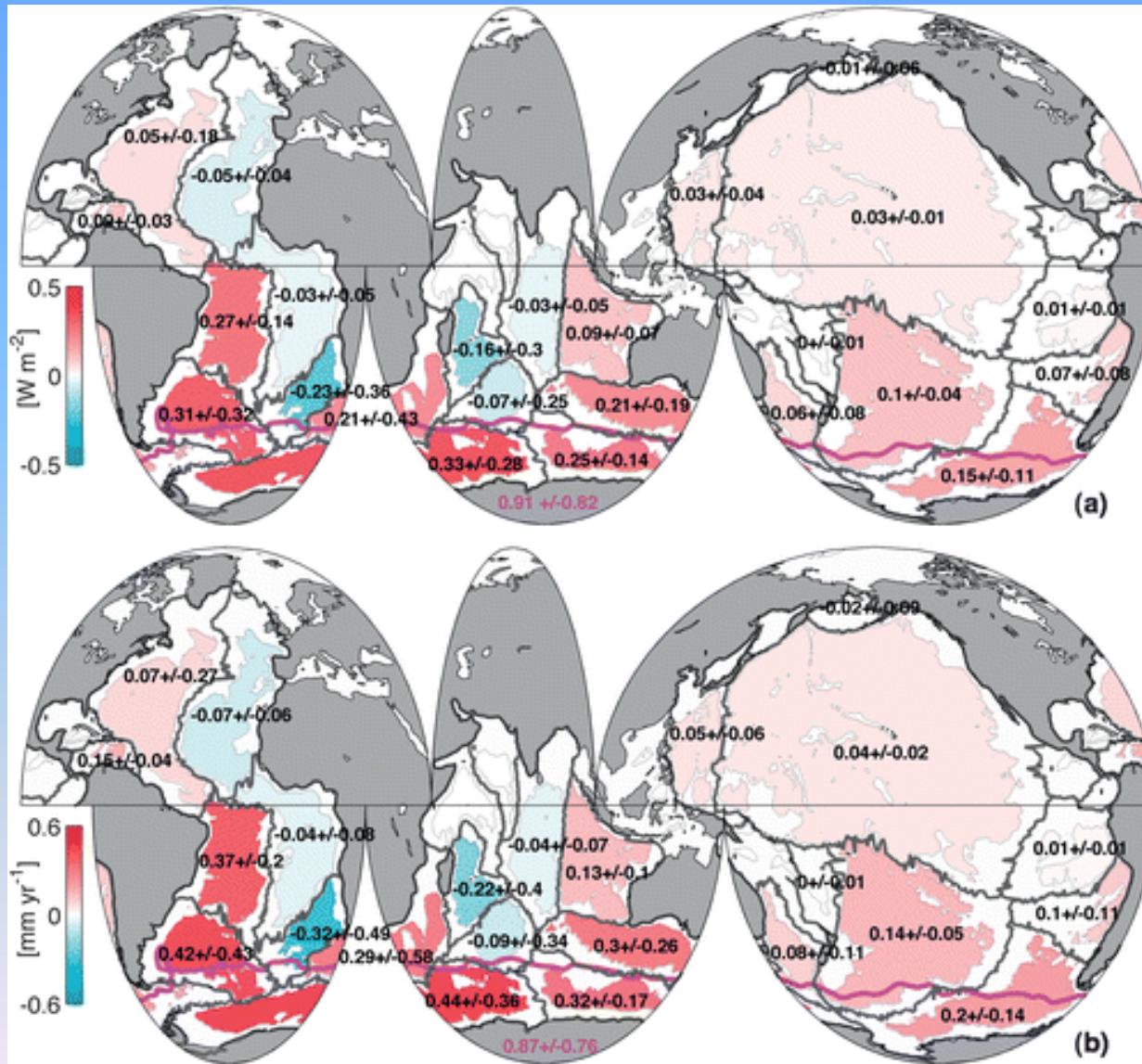
# Ausdehnung des antarktischen Meereises

Southern Hemisphere Extent Anomalies May 1979 - 2018



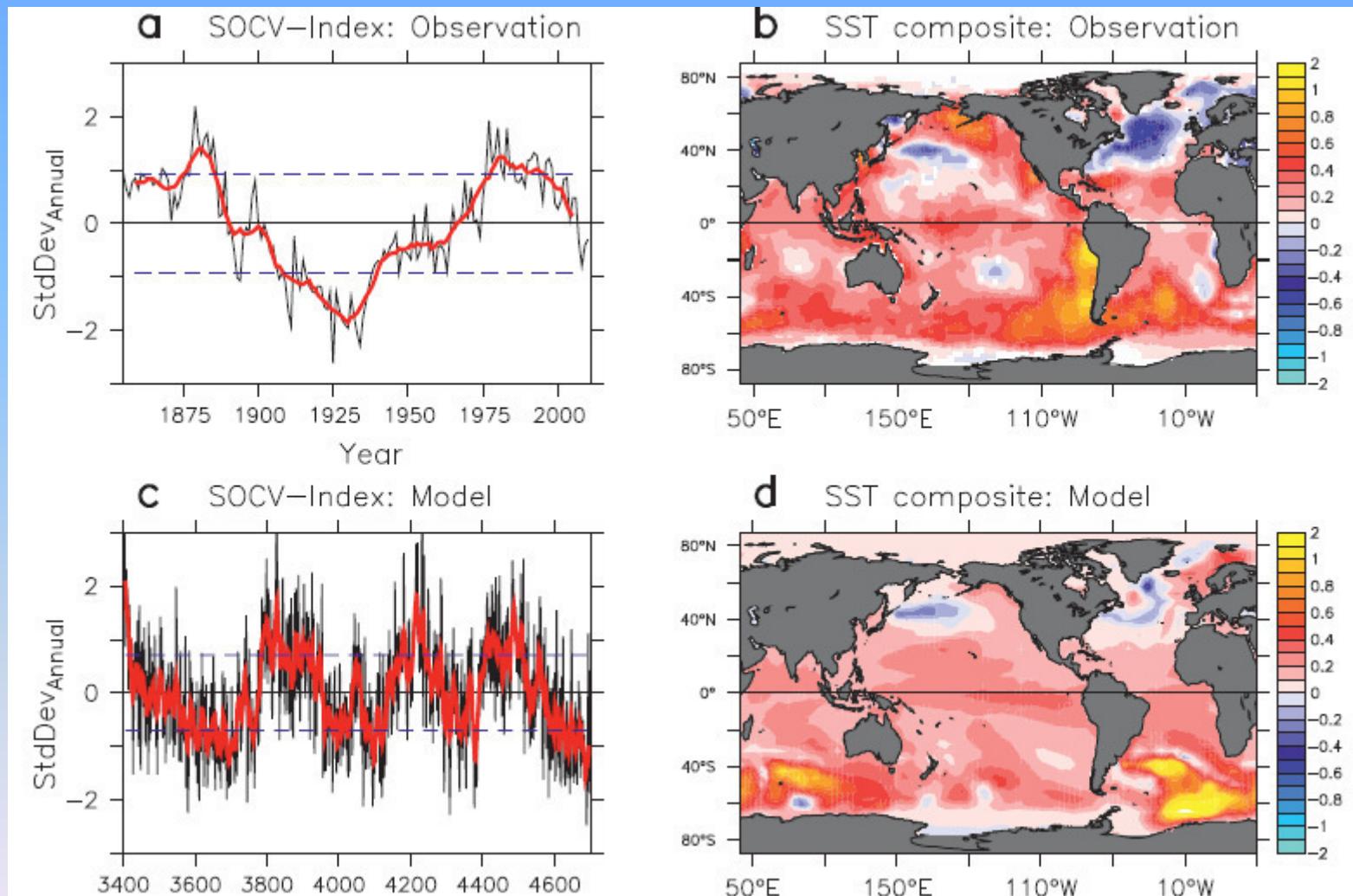
National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder

# Erwärmung der Tiefsee im Süd-Ozean



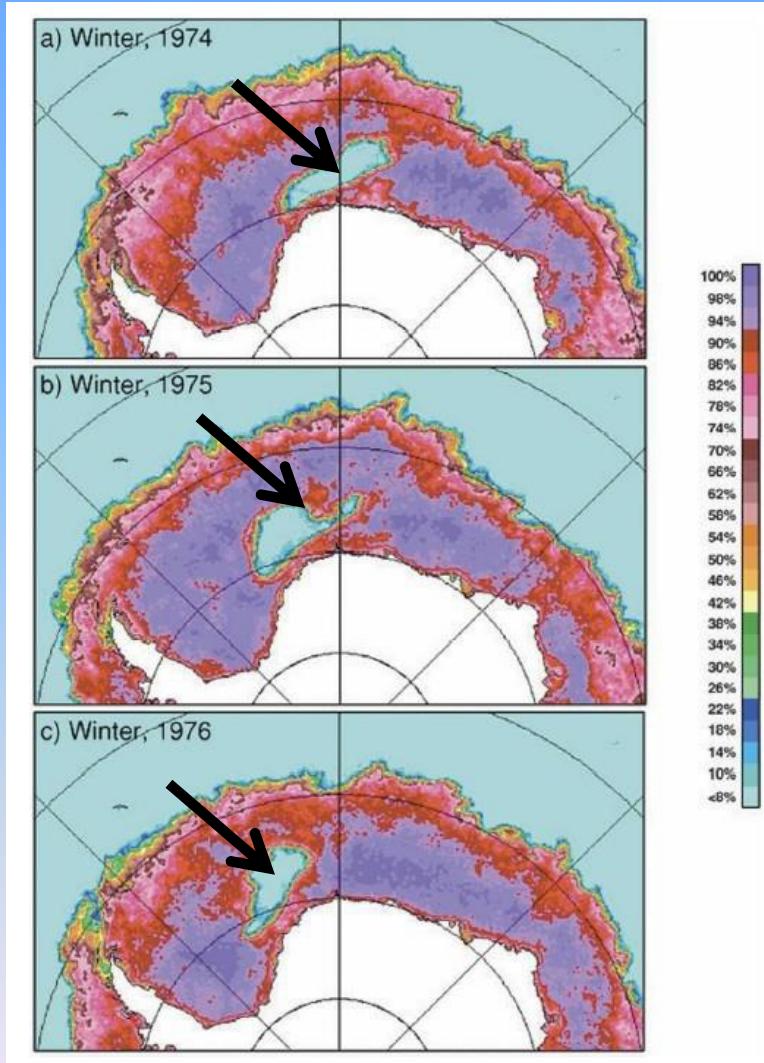
Purkey and Johnson 2010

# Langzeitvariabilität im Kieler Klimamodell (KCM)

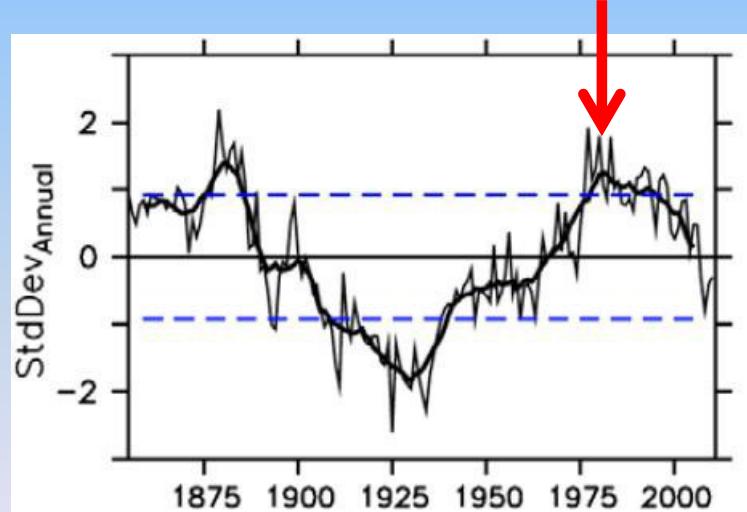


Latif et al. 2013

# Die Weddell Polynya der 1970iger Jahre wurde in der Warmphase beobachtet

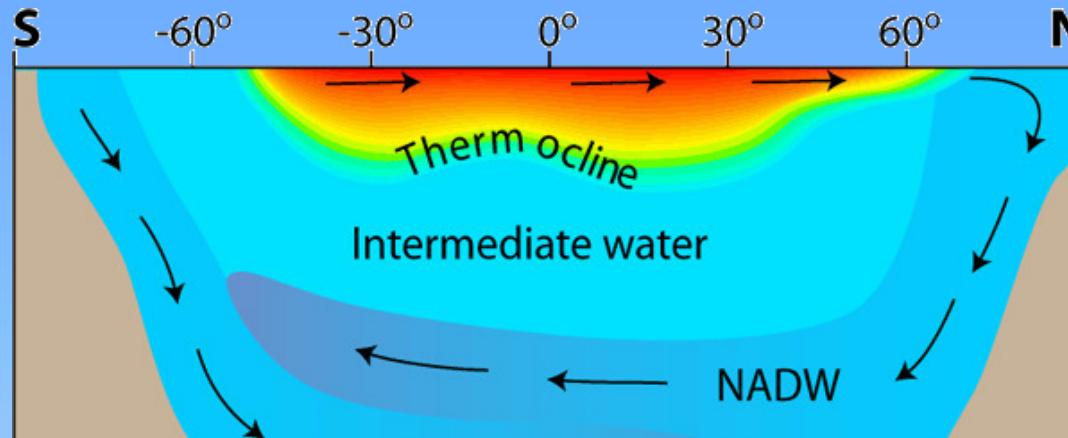


- Very large area ( $350,000 \text{ km}^2$ ) of open water within the ice-covered Weddell Sea.
- There was vigorous air-sea interaction.
- This resulted in deep convection and the formation of vast amounts of cold and very dense Antarctic Bottom Water.
- This is flowing equatorward.

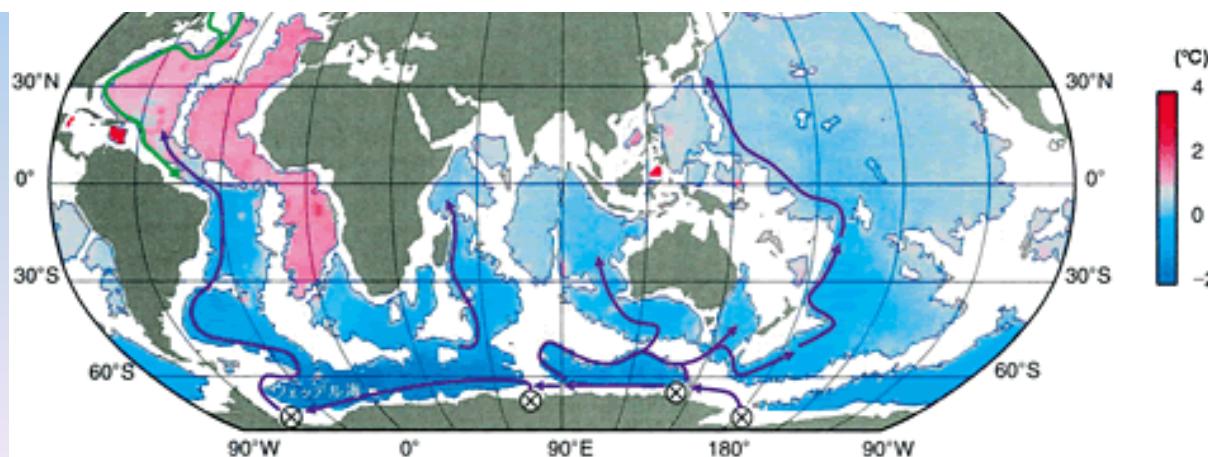


the Weddell Polynya may not re-appear for decades

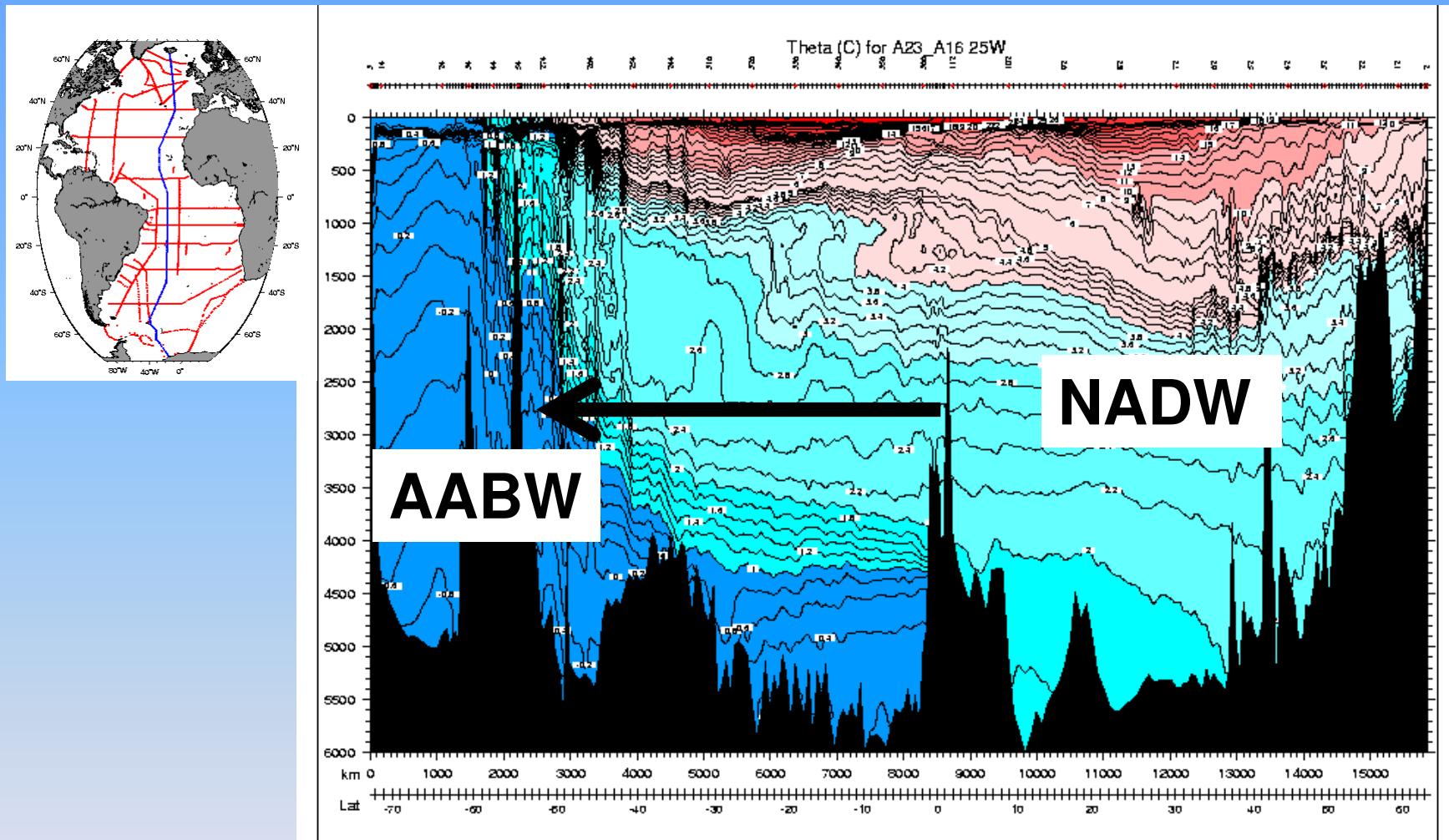
# The mechanism of centennial variability in the Kiel Climate Model (KCM)



**The North Atlantic Deep Water (NADW) plays a crucial role in the mechanism**



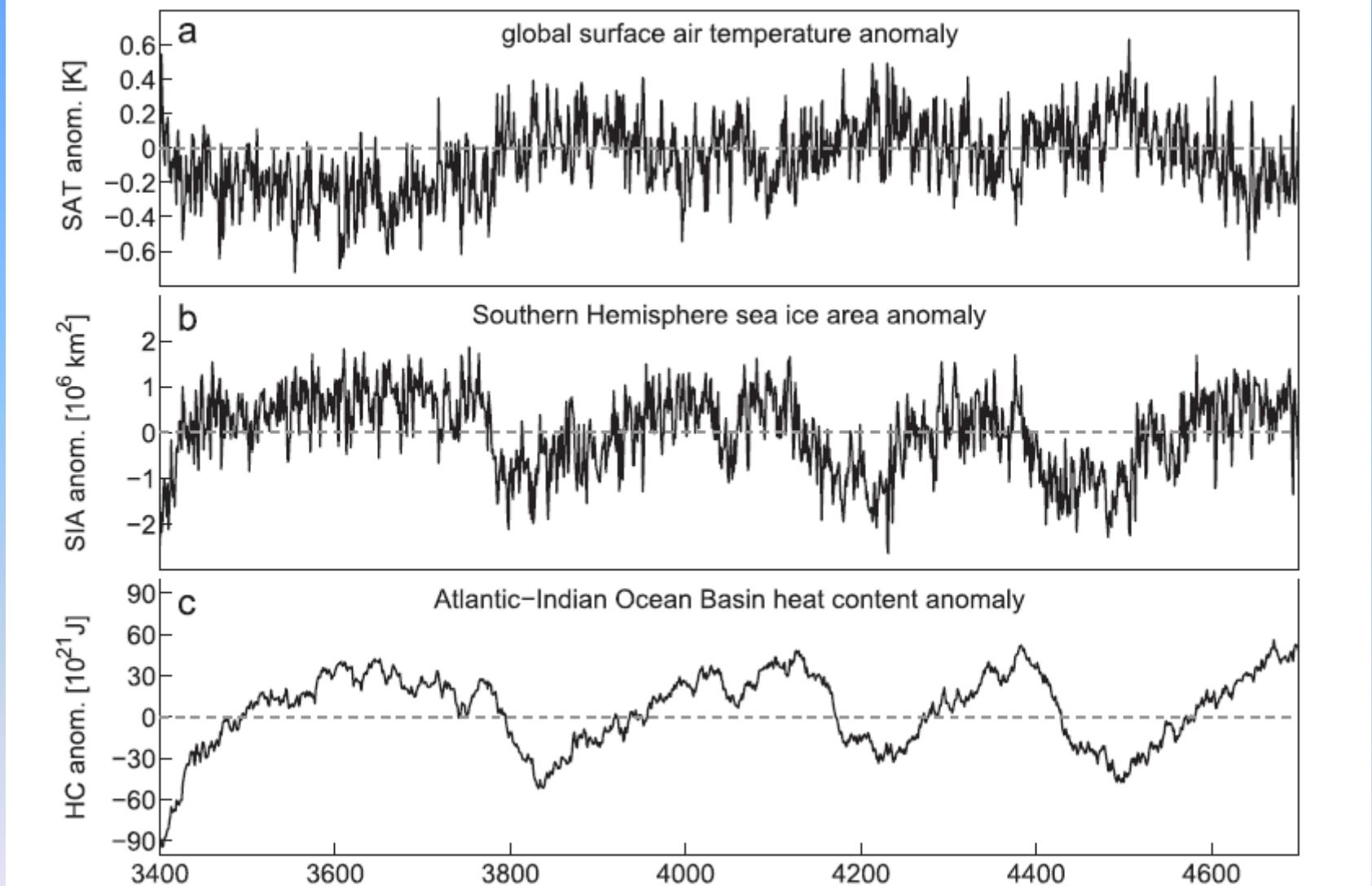
# Potential temperature in the Atlantic



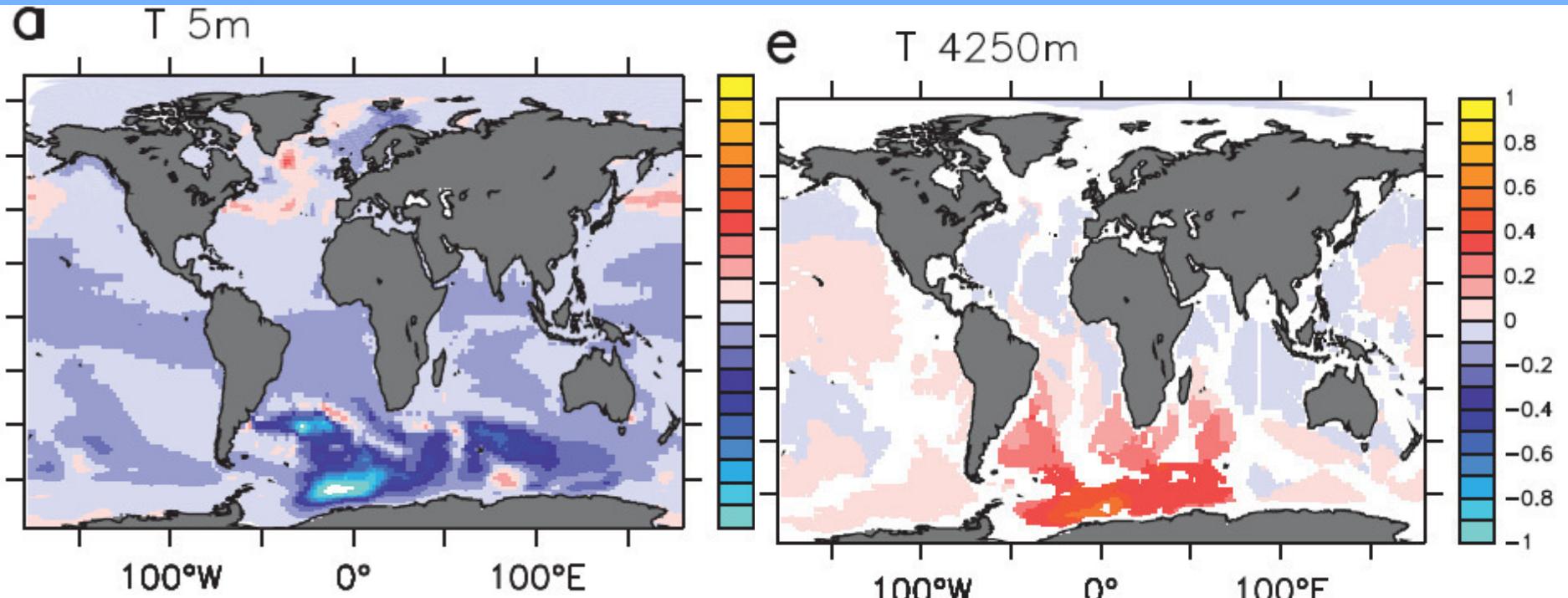
**NADW (warm water) accumulation in the Southern Ocean by the lower limb of the AMOC**



# Änderungen in drei Variablen



# KCM: Abkühlung an der Oberfläche, Erwärmung in der Tiefsee



Latif et al. 2013

Im Prinzip sind die verschiedenen Änderungen vorhersagbar, wenn man die Klimamodelle mit den tatsächlichen Ozeanbedingungen initialisiert