

Klimaphysik

Mojib Latif, Sommersemester 2018

Mojib Latif
Klimawandel und
Klimadynamik



Ulmer **UTB**

Globale Erwärmung

Mojib Latif



Profile

Ulmer **UTB**

Alle Vorlesungsfolien werden im Netz verfügbar sein



future ocean
KIEL MARINE SCIENCES

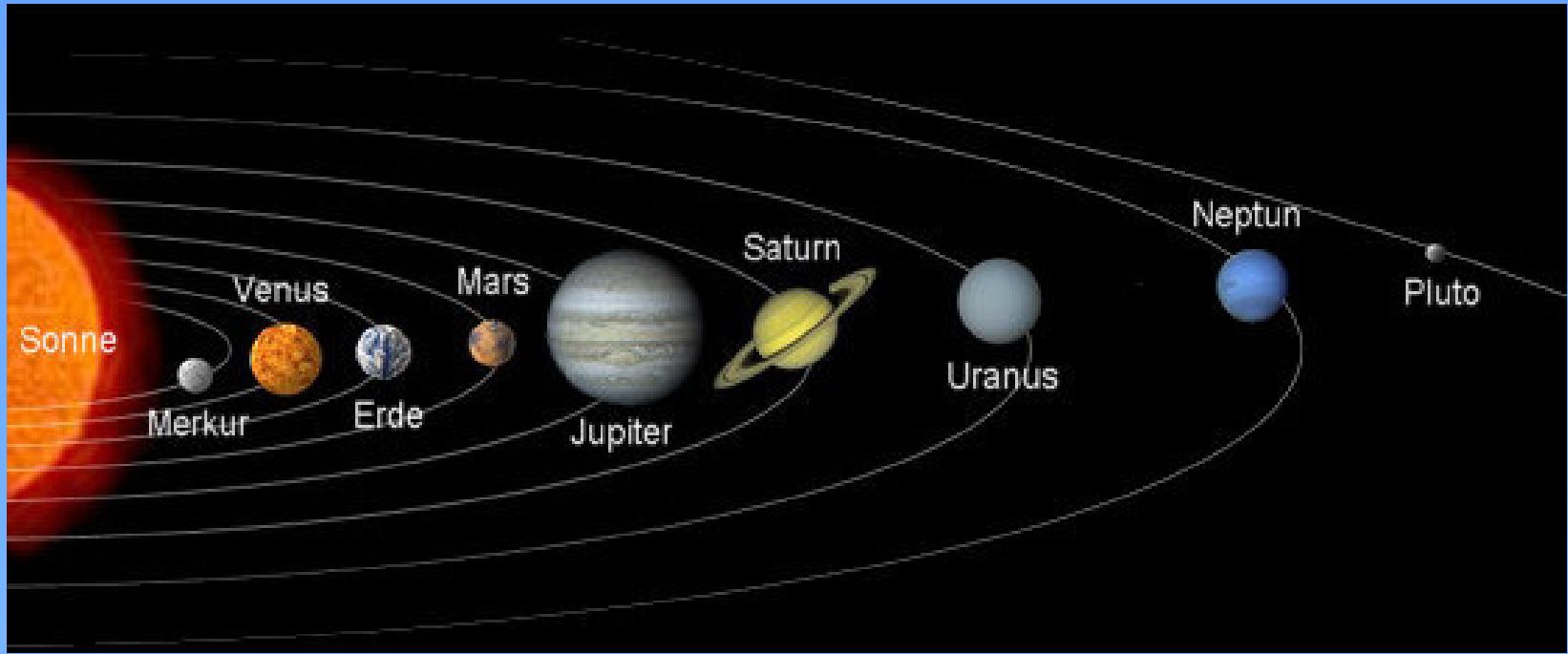


GEOMAR

1. Klima

- Erdbahnparameter
- Definition des Klimas
- Klimaänderung
- Statistische Beschreibung
- Natürliche und anthropogene Klimaänderungen

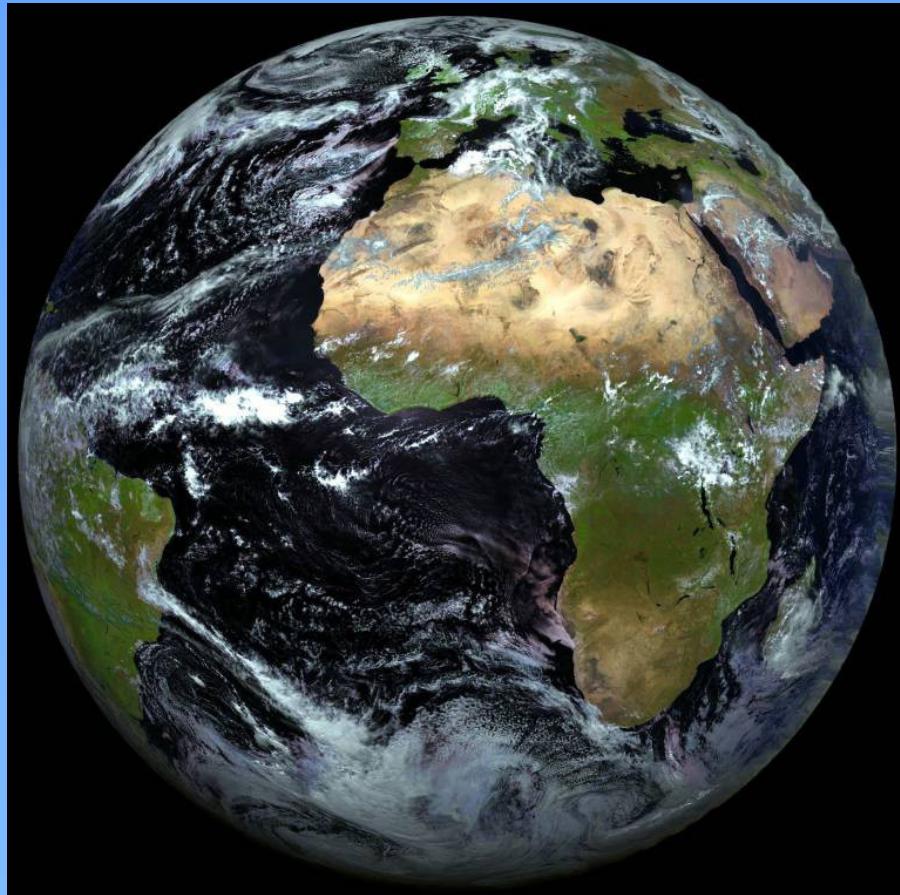
Das Sonnensystem mit seinen Planeten



Die Erde ist der dritte Planet von der Sonne aus

- Temperatur auf der Venus: +430° C
- Temperatur auf dem Mars: -30° C
- Temperatur auf der Erde: +15° C

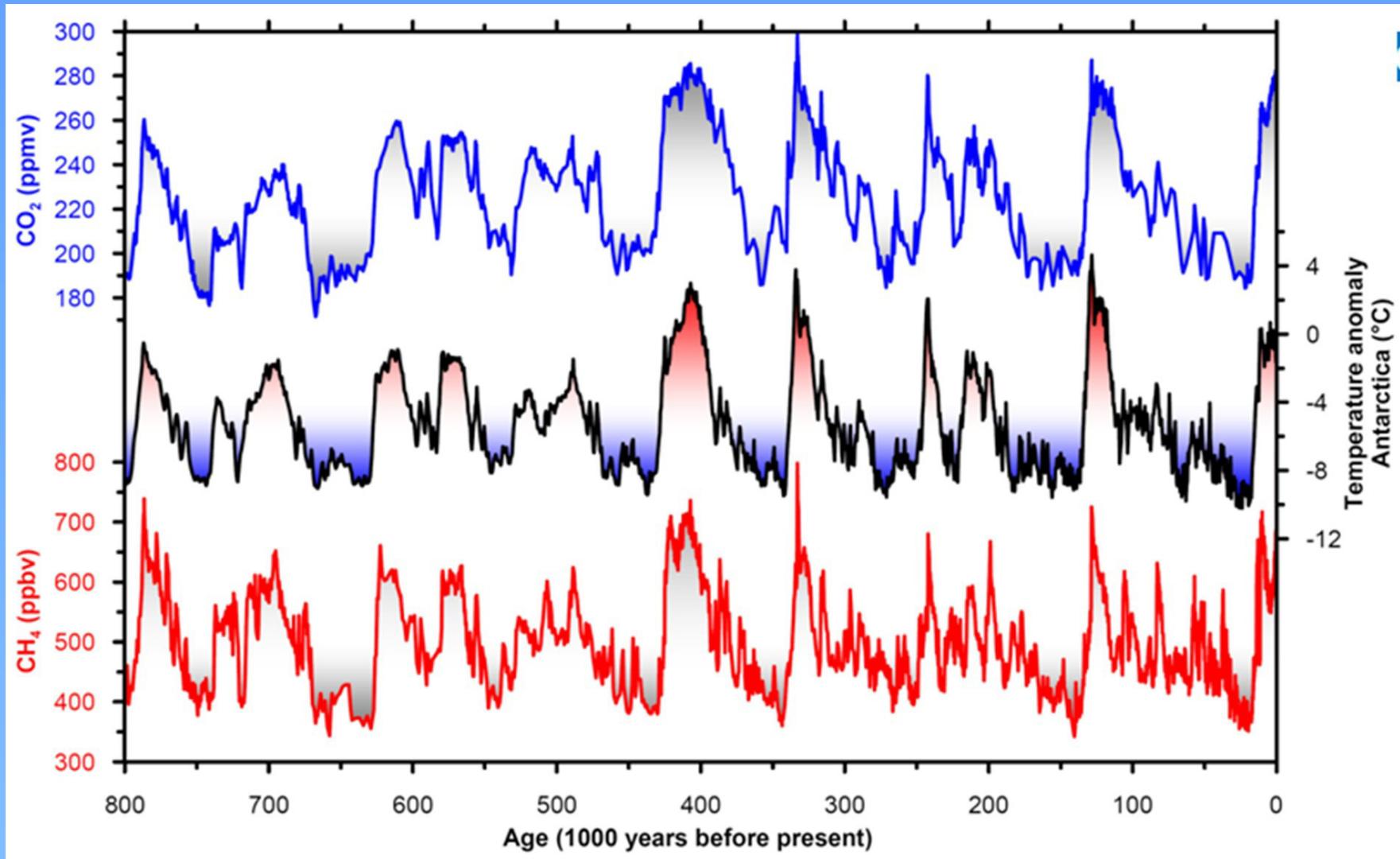
Temperaturen auf der Erde



Oberflächentemperatur:
 -50° C bis $+50^{\circ}\text{ C}$

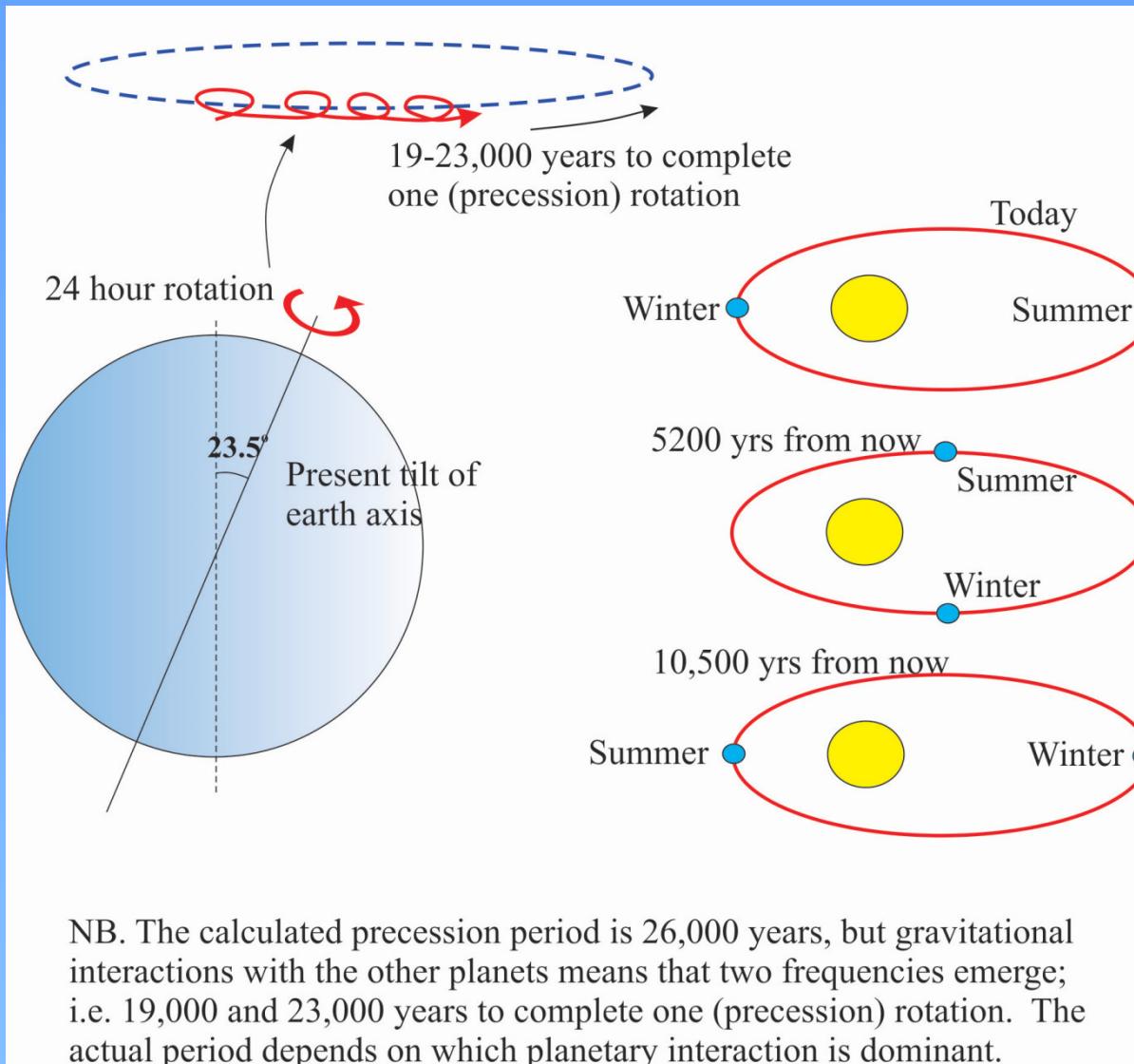
Temperatur im Erdmittelpunkt:
 7000° C

Die Eiszeitzyklen



Daten aus der Antarktis

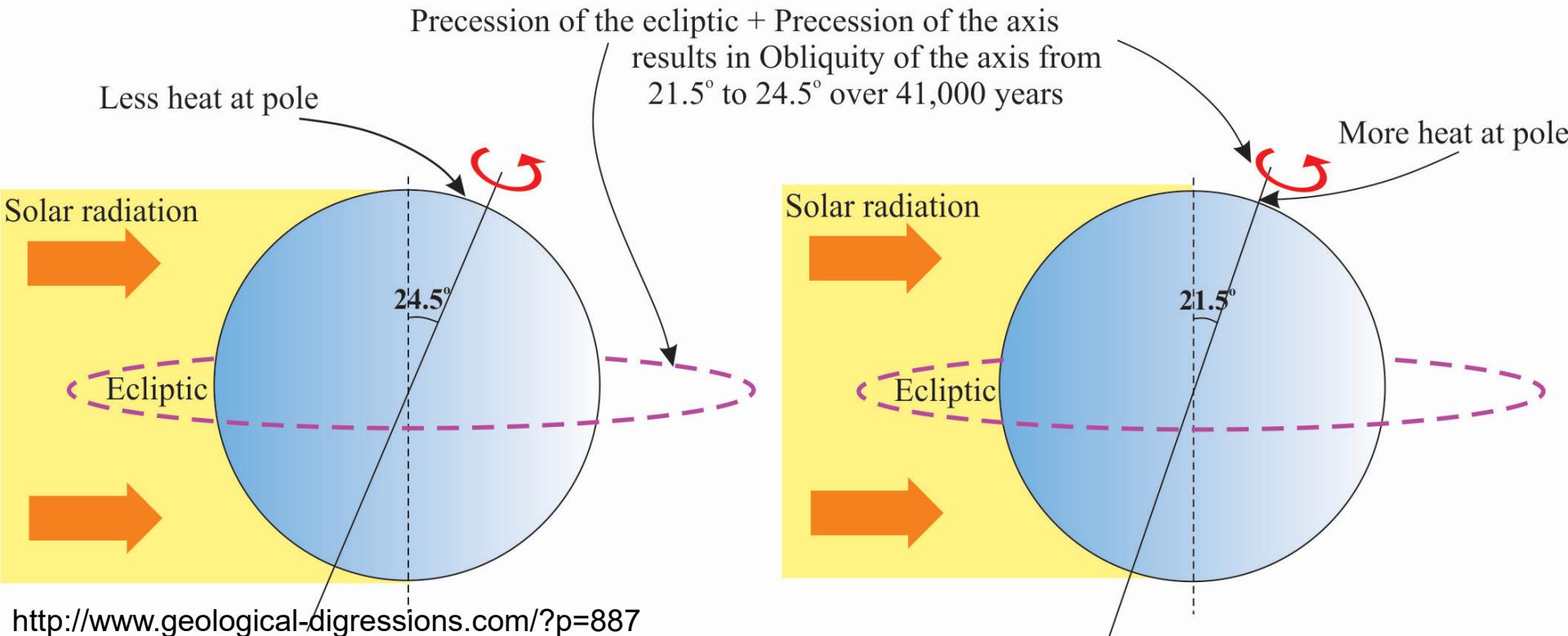
Präzession der Rotationsachse, Periode: 19.000 – 23.000 Jahre



<http://www.geological-digressions.com/?p=887>

Neigung der Rotationsachse variiert mit einer Periode von 41.000 Jahren

Obliquity and Insolation

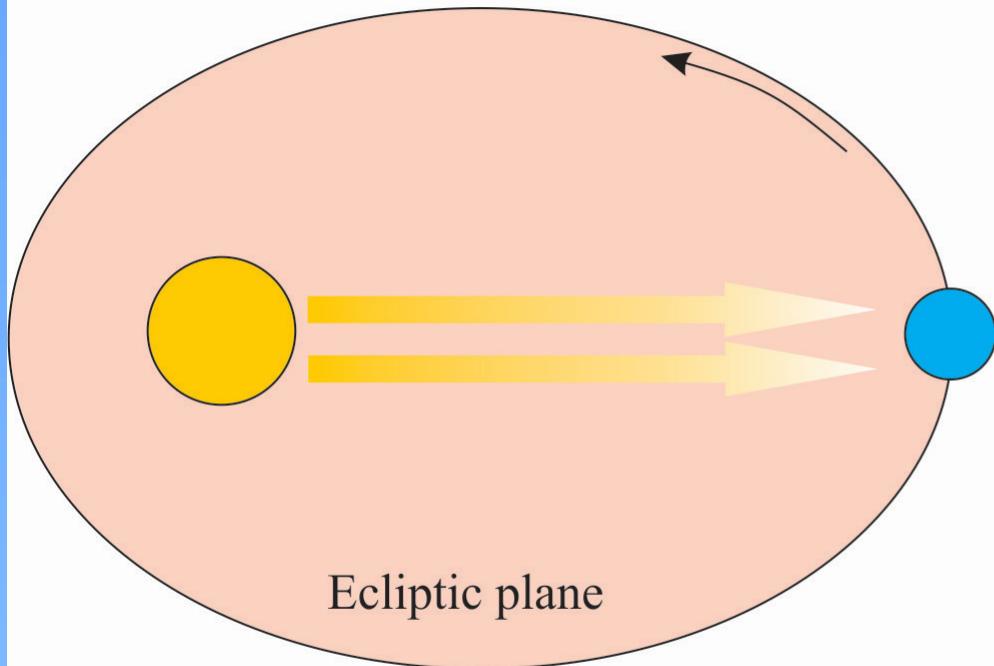


Saisonale Änderungen sind am geringsten, wenn die Achsenneigung am geringsten ist.

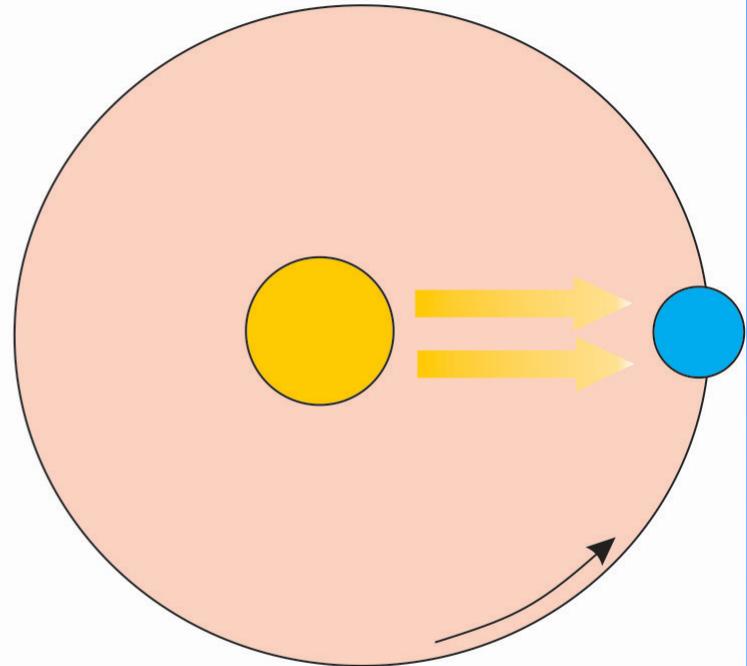
Exzentrizität, Periode: 100.000 Jahre

Eccentricity and insolation

More elliptical orbit



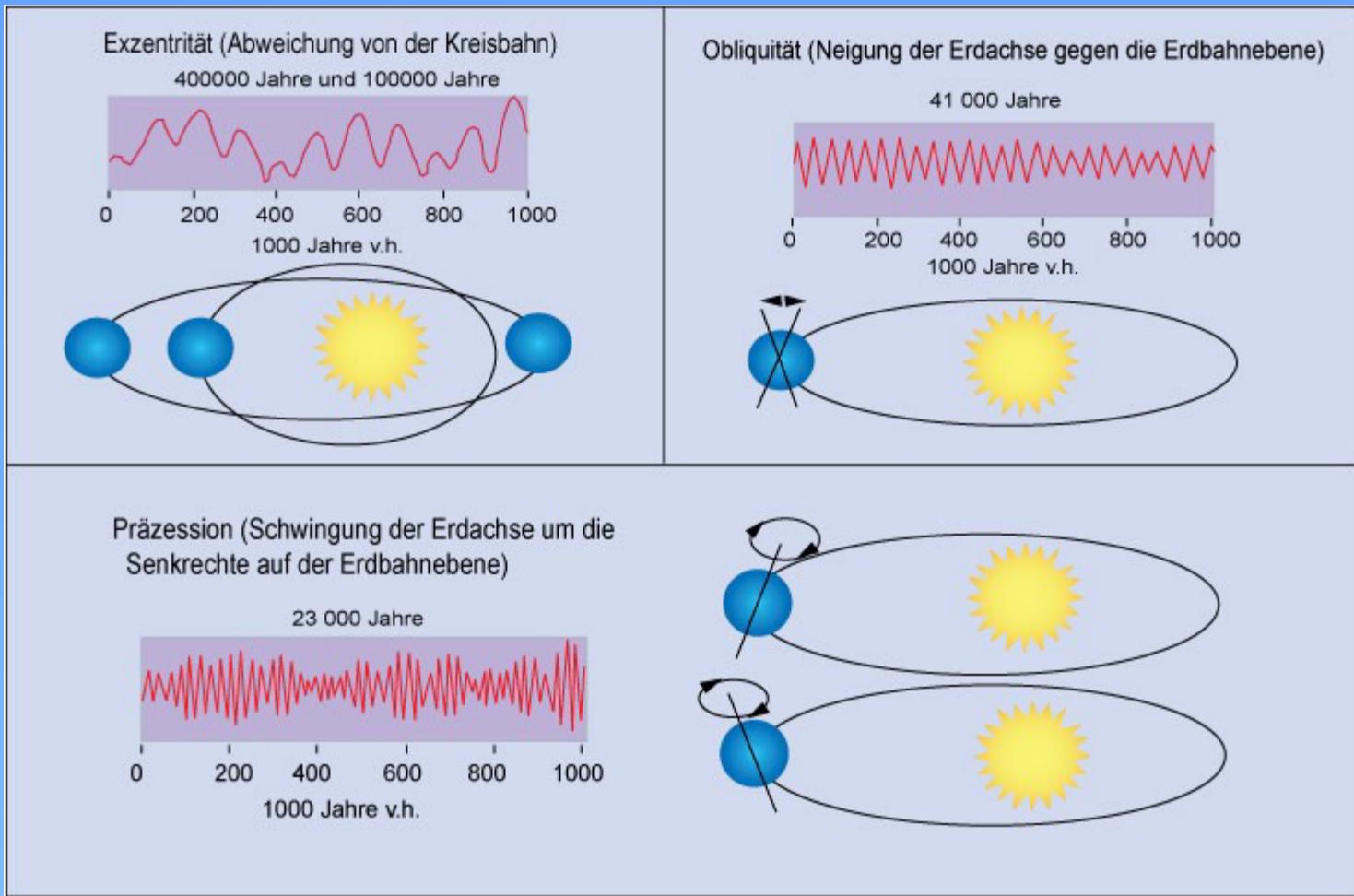
Less elliptical orbit



The cycle more through less elliptical and back takes 100,000 years.
The Ecliptic also precesses (wobbles) with a period of 71,000 years.
Insolation decreases with increased distance from the sun.

<http://www.geological-digressions.com/?p=887>

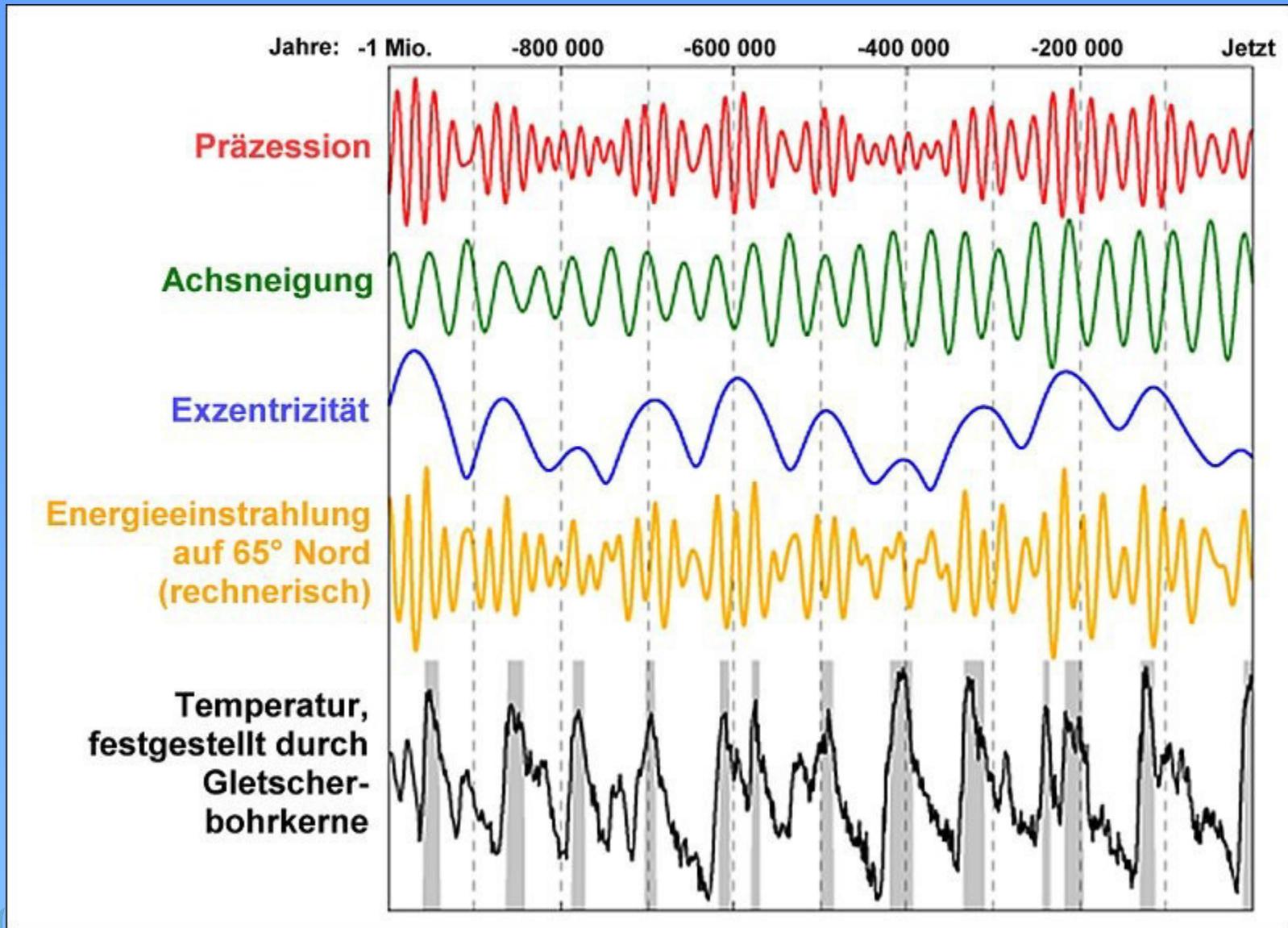
Die 3 Erdbahnparameter



<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Erdbahnparameter>

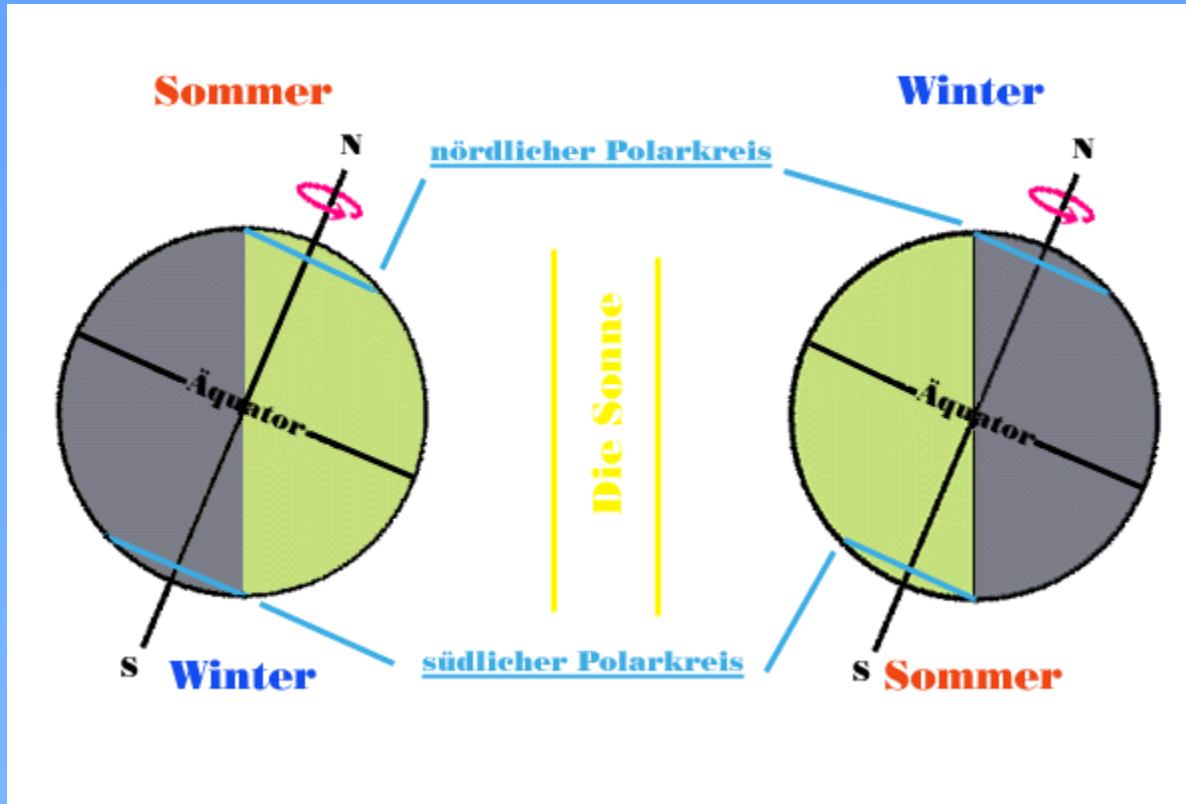
Die Milankovitch-Theorie für das Entstehen und Vergehen von Eiszeiten basiert auf der Änderung der Erdbahnparameter

Alle Zyklen auf einen Blick



<http://www.panoptikum.net/sonnensystem/erde.htm>

Der Begriff „Klima“



Der Begriff Klima ist von "klinein", dem griechischen Wort für „neigen“, abgeleitet. Die Jahreszeiten sind Folge der Neigung der Erdachse. Gegenwärtig beträgt die Neigung 23,5 Grad.

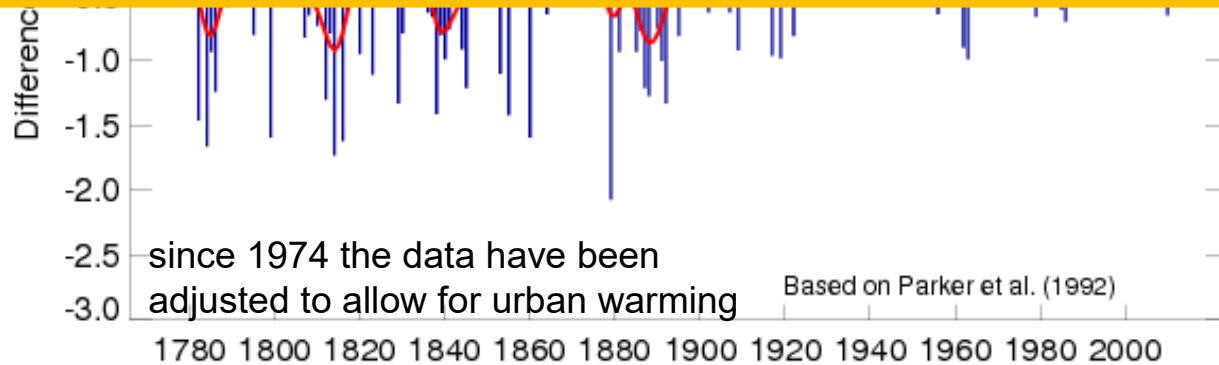
Definition des Klimas



Mean Central England Temperature
Annual anomalies, 1772 to 14th Apr 2018

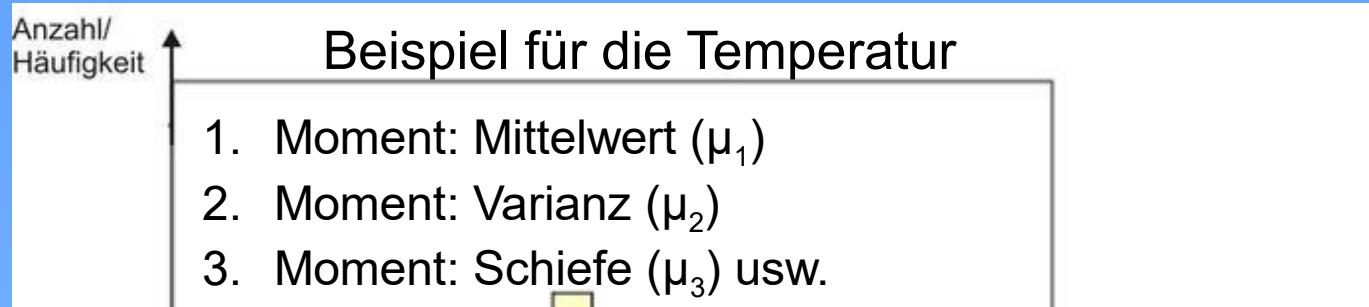
Annual anomalies relative to the 1961-1990 average. The red line is a 21-point binomial filter and roughly equivalent to a 10-year running mean.

Der Begriff Klima bezieht sich im Vergleich zum Wetter auf längere Zeiträume. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert Klima als die Statistik des Wetters über einen Zeitraum von 30 Jahren. Diese beinhaltet alle statistischen Momente, nicht nur den Mittelwert.

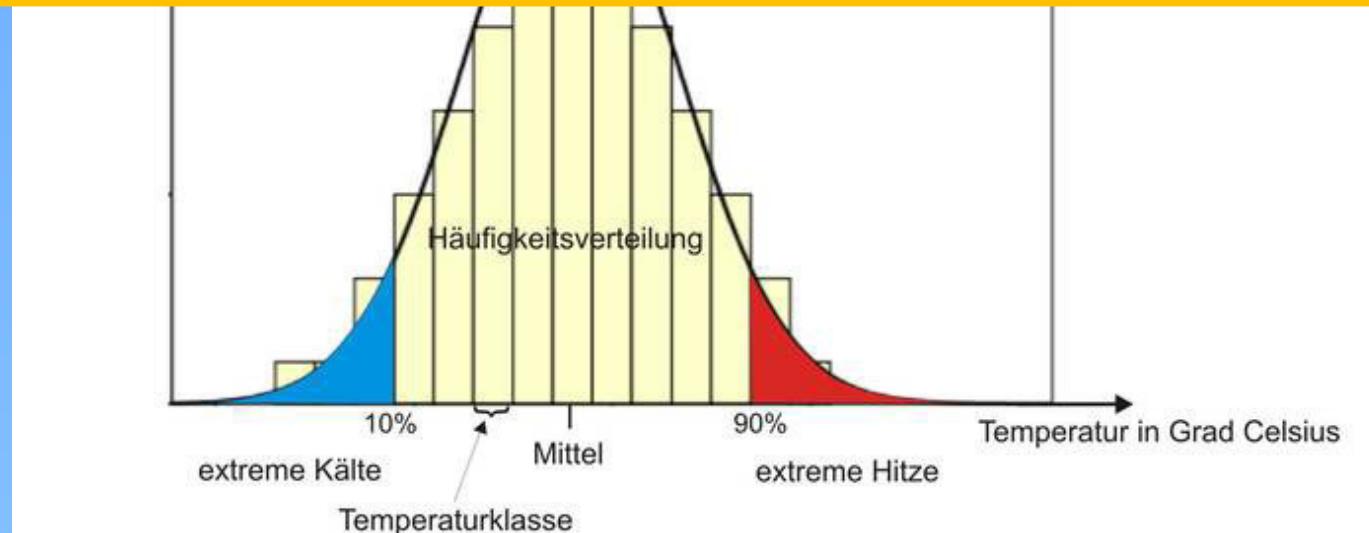


<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadct/>

Statistische Momente und Wetterextreme

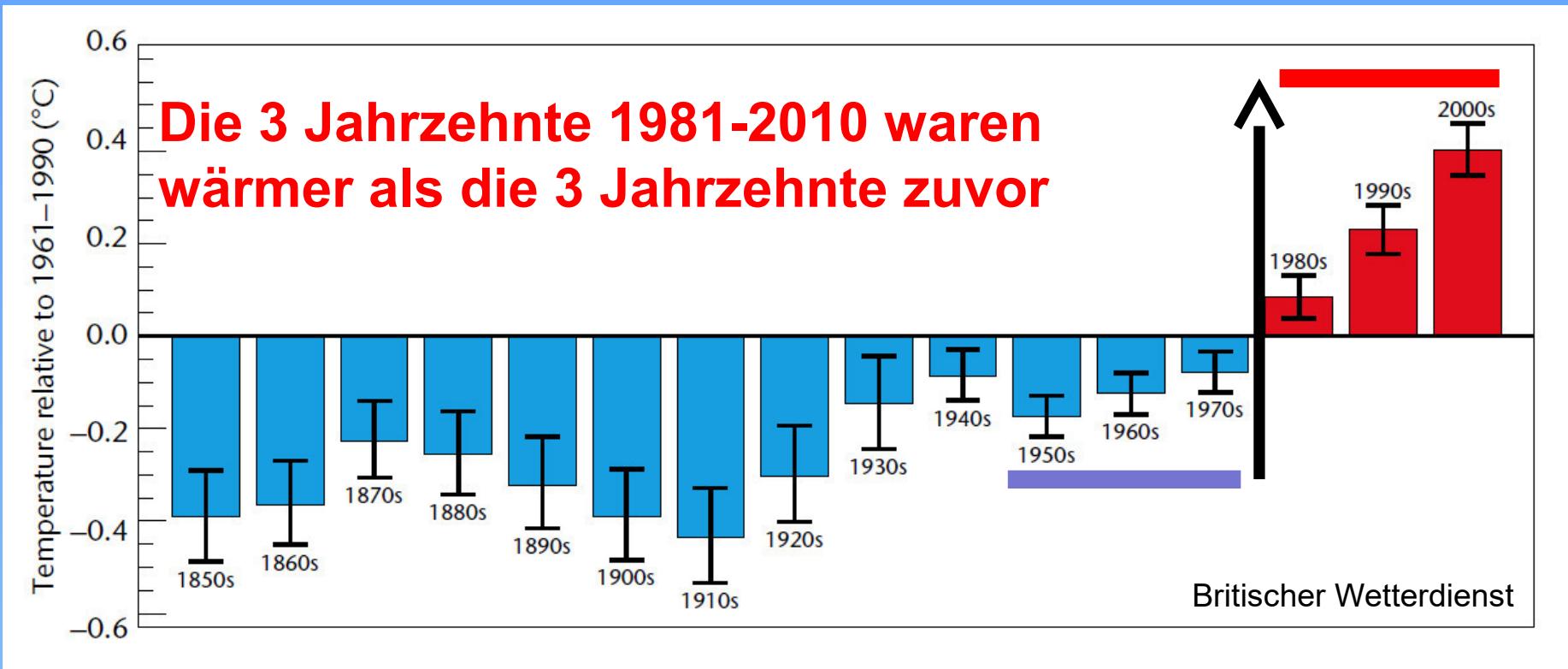


Die Definition des Klimas beinhaltet die Angabe der gesamten Verteilung einer Größe, beispielsweise auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wetterextremen.



Definition von Wetterextremen erfolgt über die Verteilungen

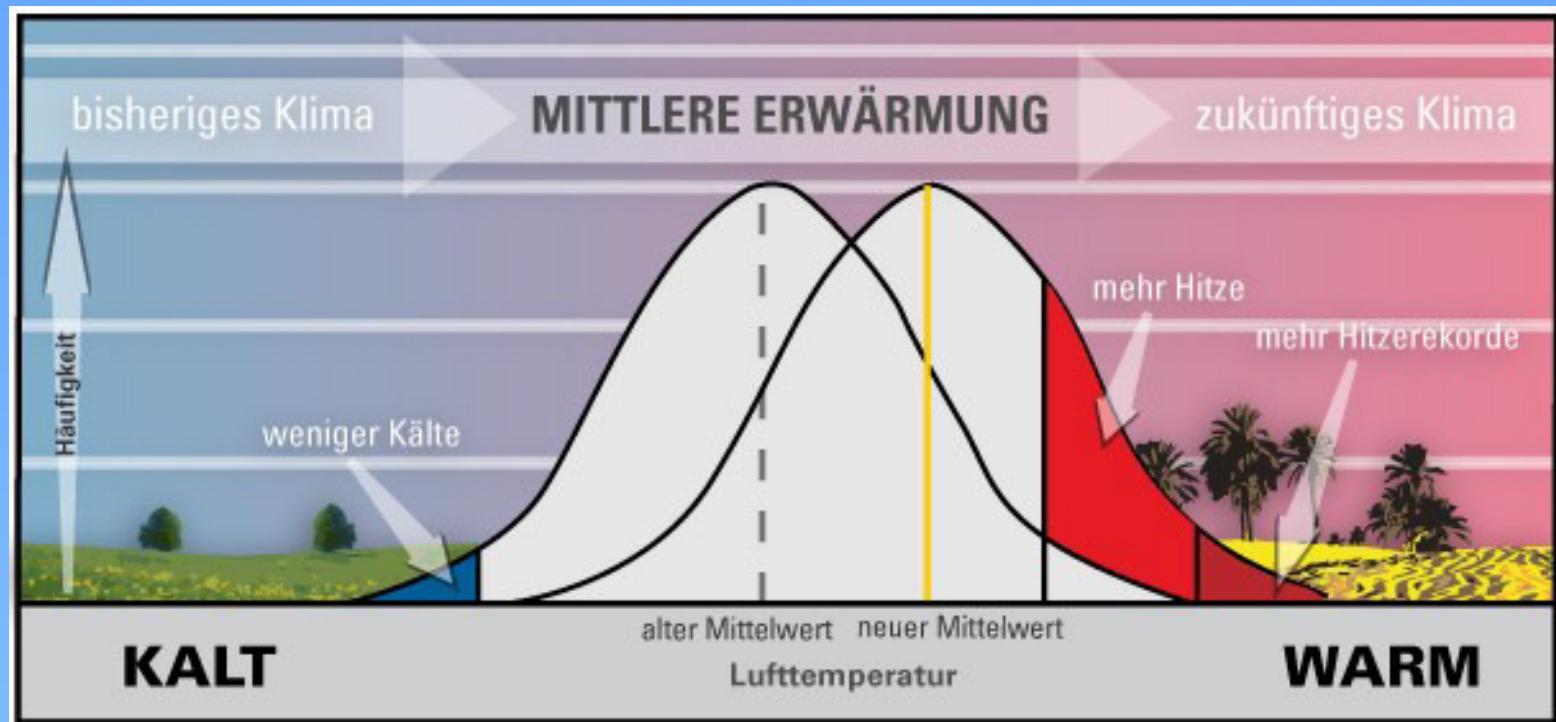
Klimaänderung: Die einzelnen Jahrzehnte seit 1850



Seit den 1950iger Jahren war sogar jedes Jahrzehnt im Mittel wärmer als das vorhergehende

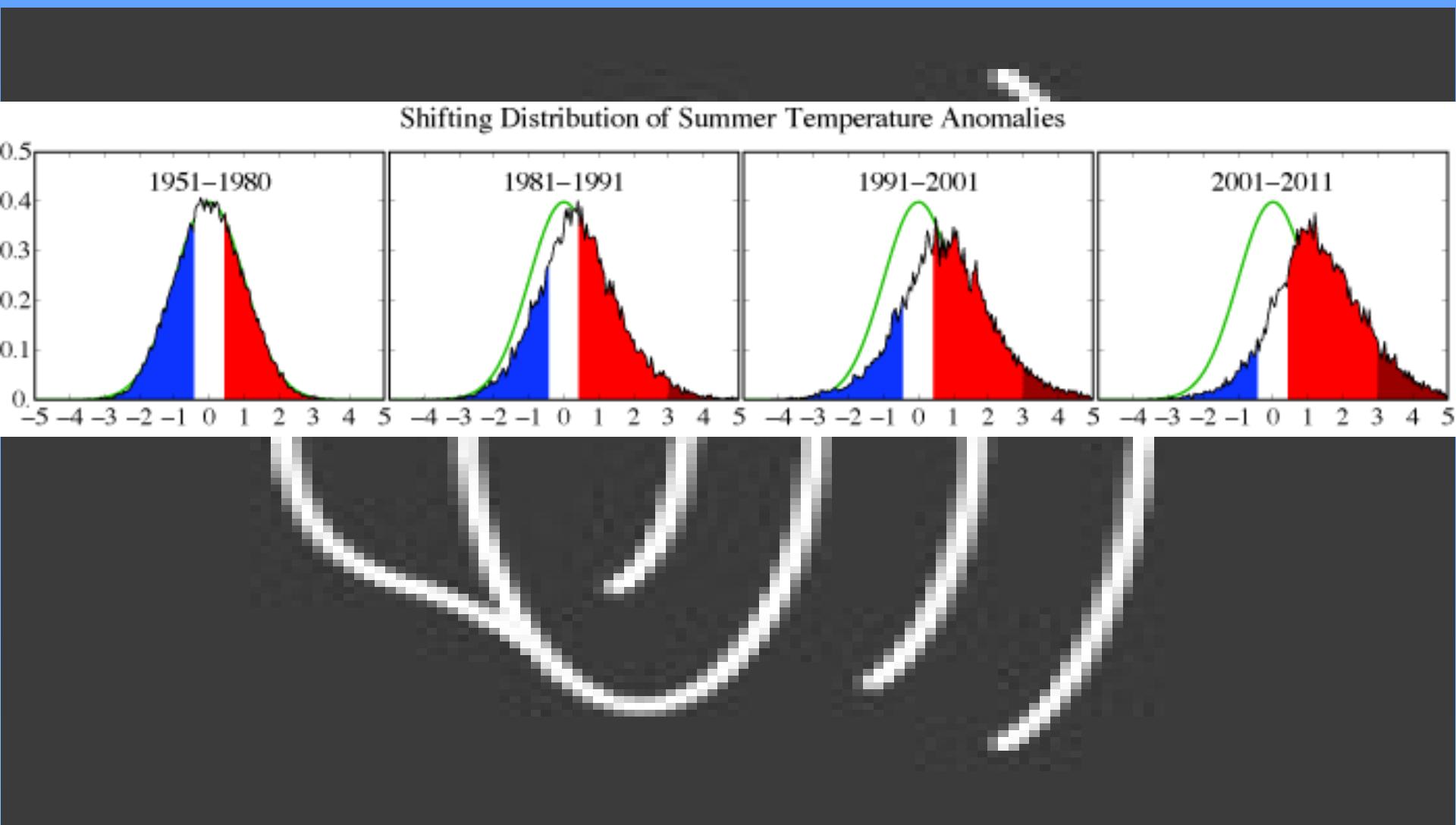
Änderung der Temperaturextreme

Schematische Temperaturverteilung an einem Ort und der Einfluss einer langfristigen Erwärmung auf die Temperaturextreme



Schon kleine Änderungen im Mittelwert reichen für bedeutende Änderungen bei den Extremen

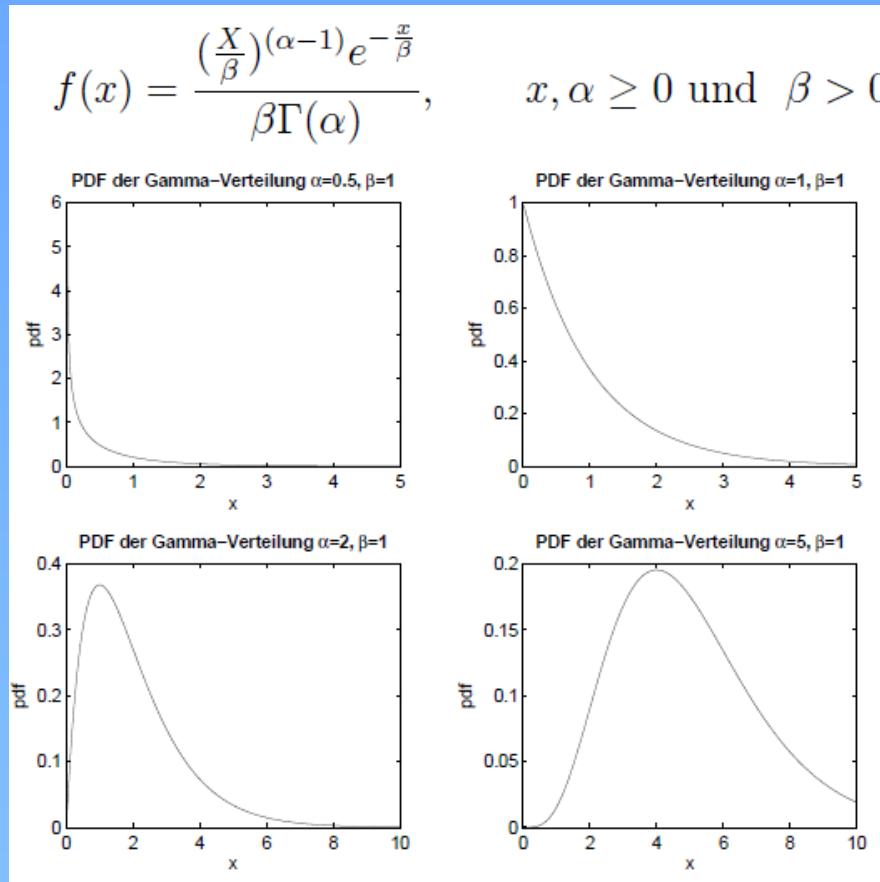
Beispiel NH-Sommertemperaturen



distribution of summer temperatures relative to a 1951-1980 mean of
Northern Hemisphere summer months (June-July-August). GISS,
<https://svs.gsfc.nasa.gov/3975>

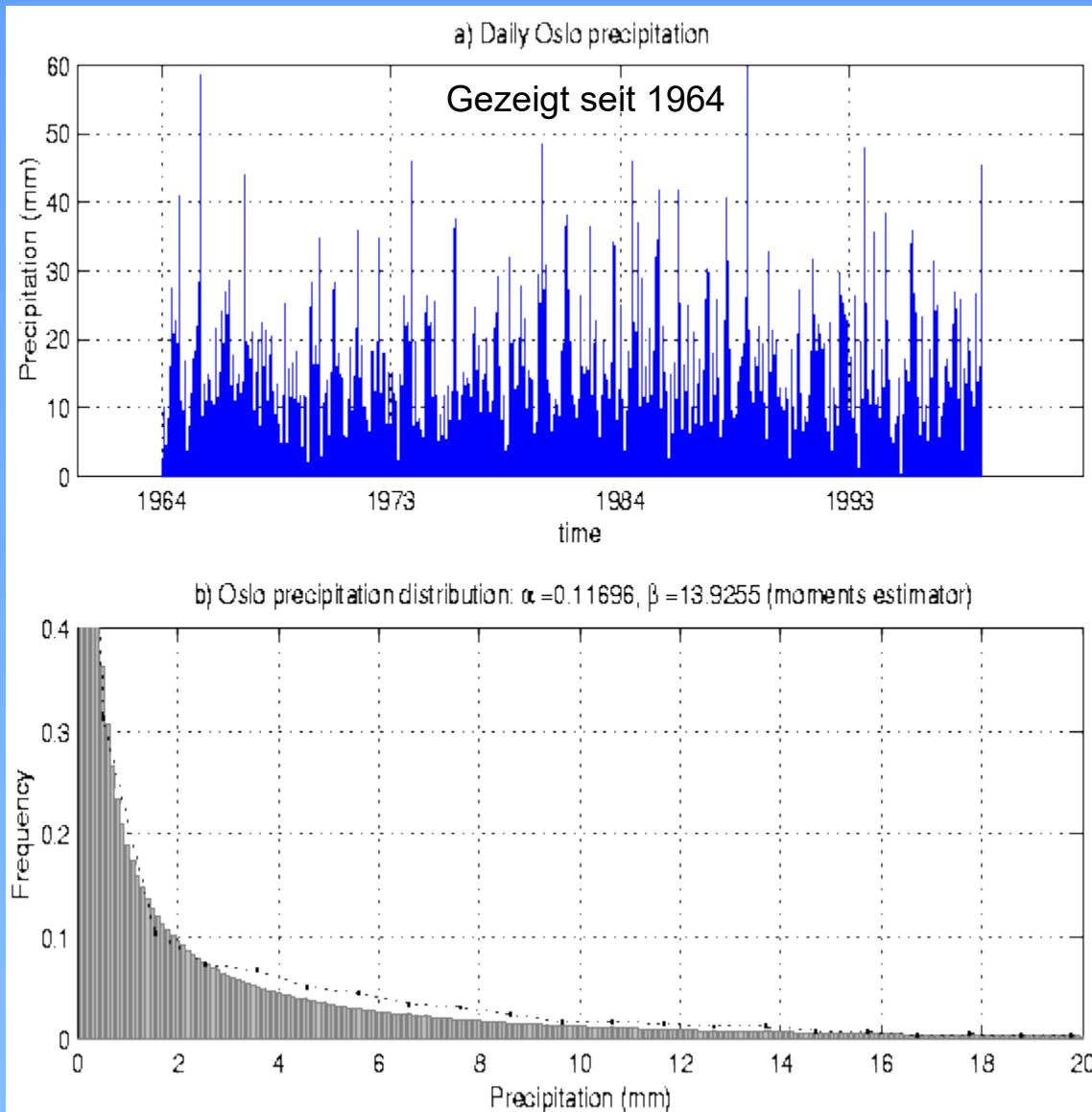
Die Gamma Verteilung

Wohl die häufigste Verteilung, die benutzt wird um Niederschlag der mittleren Breiten darzustellen, ist die Gammaverteilung. Die Gammaverteilung ist eine Verteilung mit zwei Parametern, dem "Shape"-Parameter α und dem "Scale"-Parameter β



<http://www2.meteo.uni-bonn.de/staff/pfried/einfstat.pdf>

Beispiel Oslo (Norwegen)



Example of a non-symmetric distribution and the best-fit Gamma distribution. The plot is based on the daily precipitation measurements since 1883

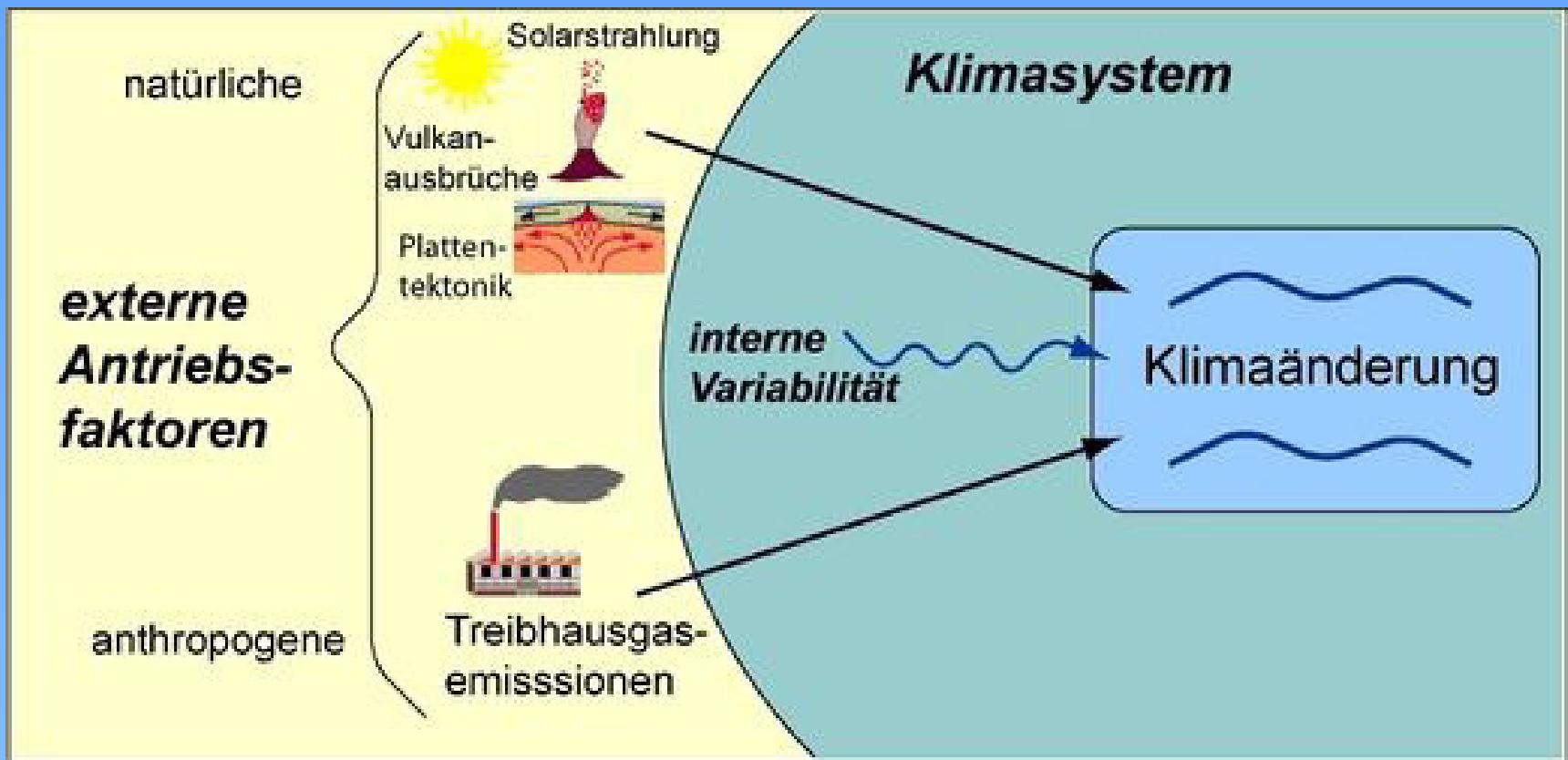


Niederschlagsverteilung: Westbengalen



Figs. 3(a-d). Histogram of daily rainfall at (a) Kuchbihar, (b) Darjeeling, (c) Alipore and (d) Haldia

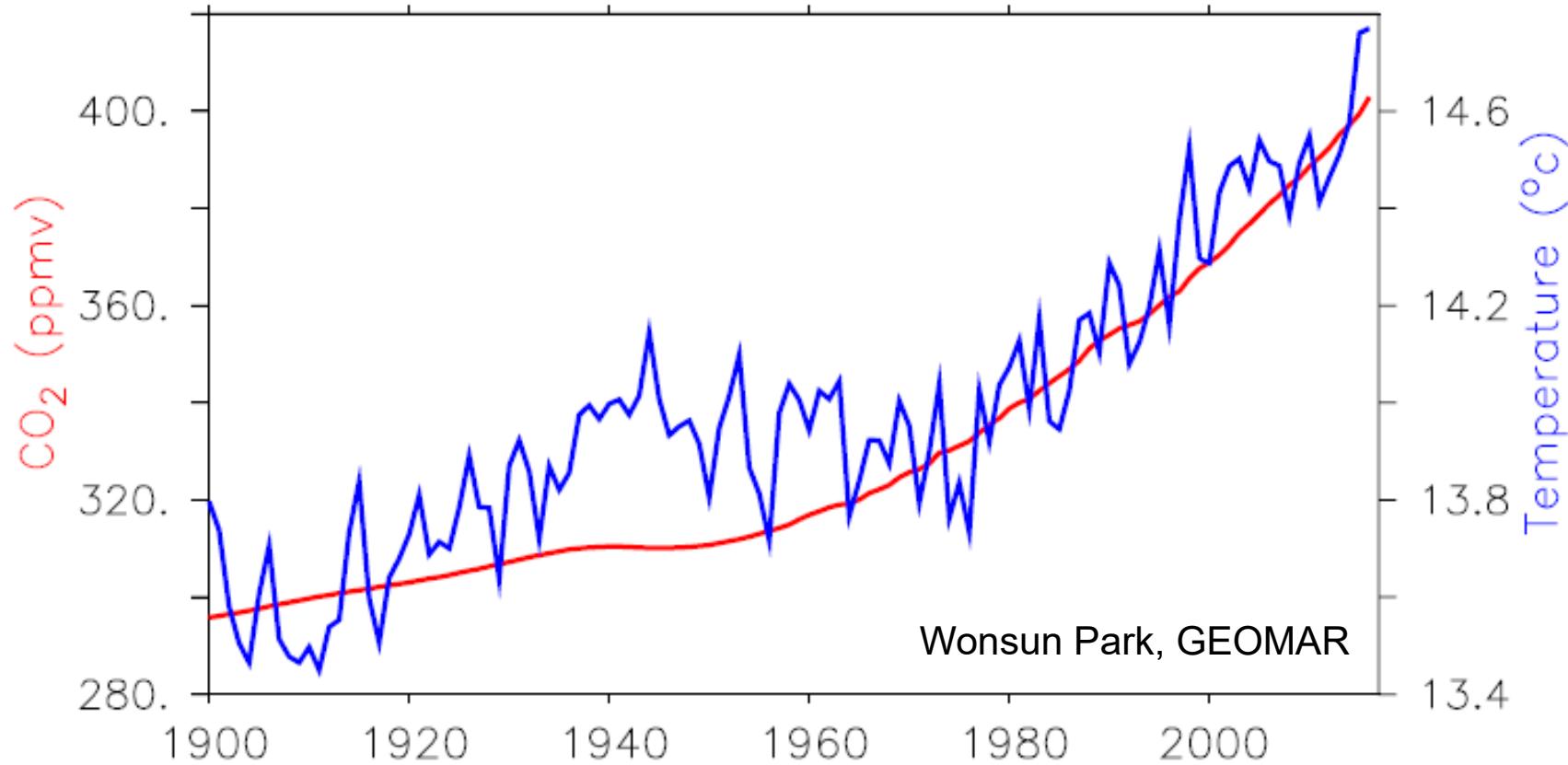
Es gibt natürliche und anthropogene Antriebe des Klimas



Hamburger Bildungsserver

Klima ist nicht monokausal Schwankungen sind „normal“

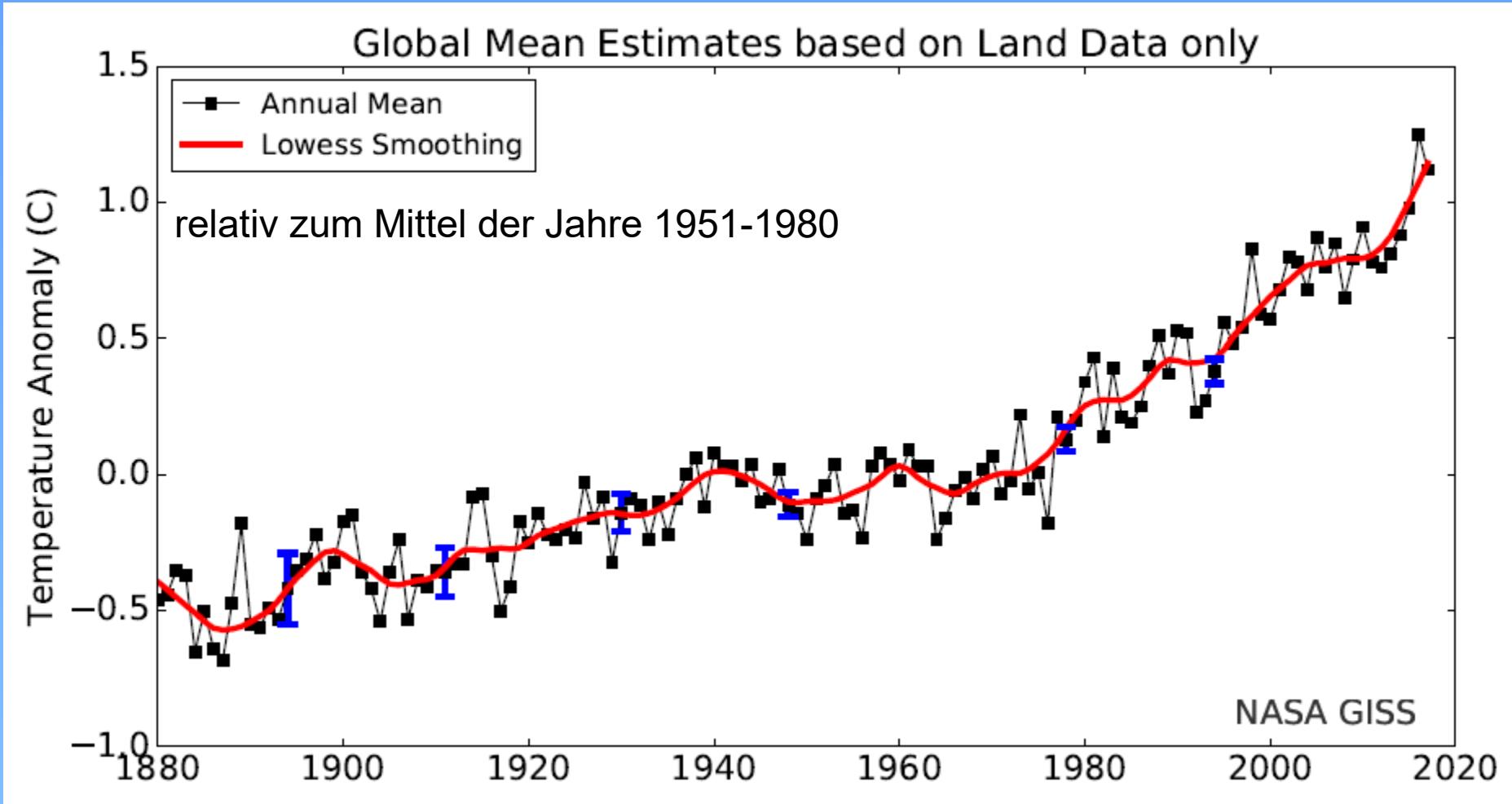
Globale Erdoberflächentemperatur und CO₂-Gehalt der Luft



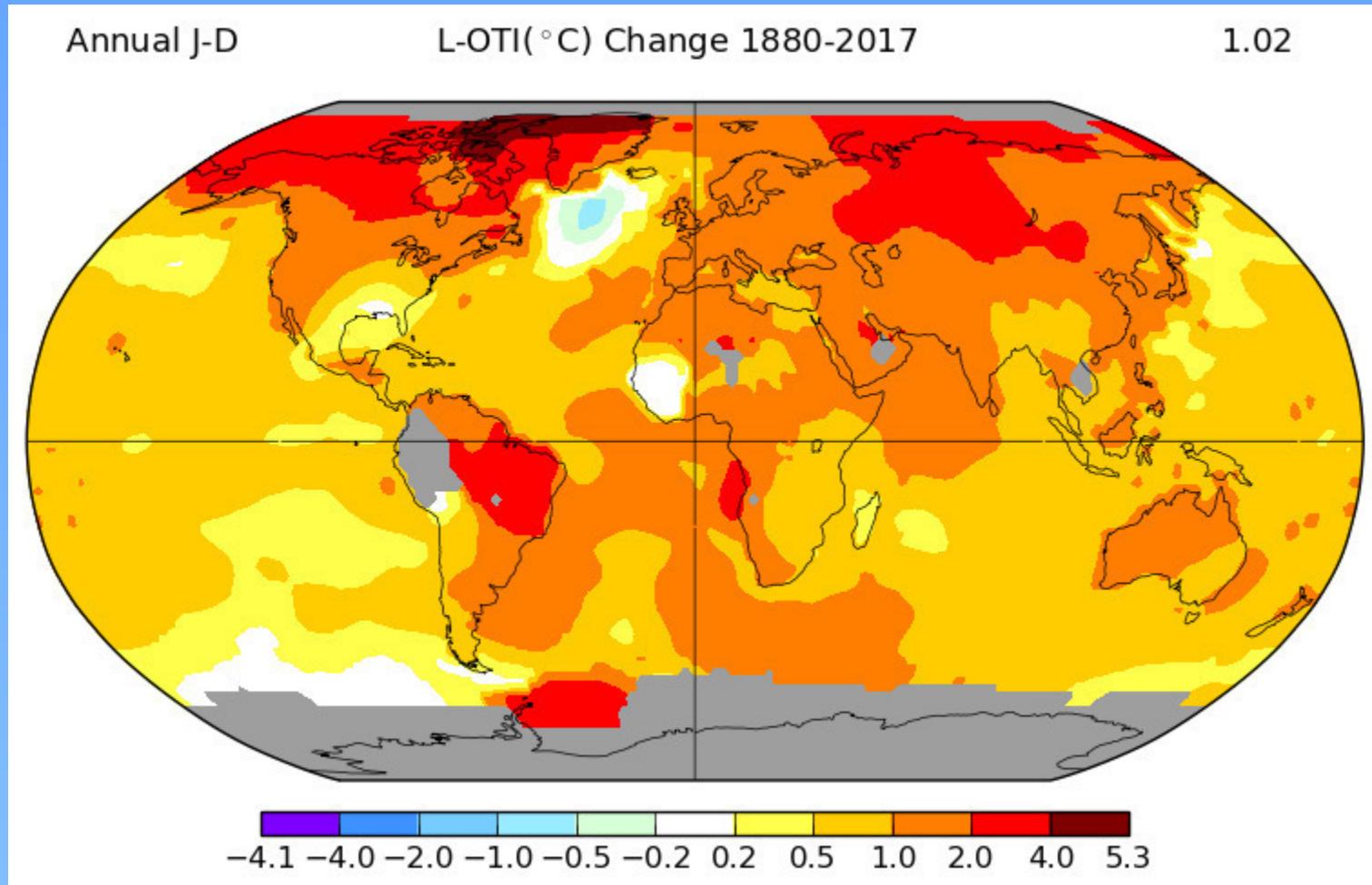
weltweit etwa +1°C seit 1900, Einfluss des Menschen
jedoch „klar“ (IPCC, 2014)



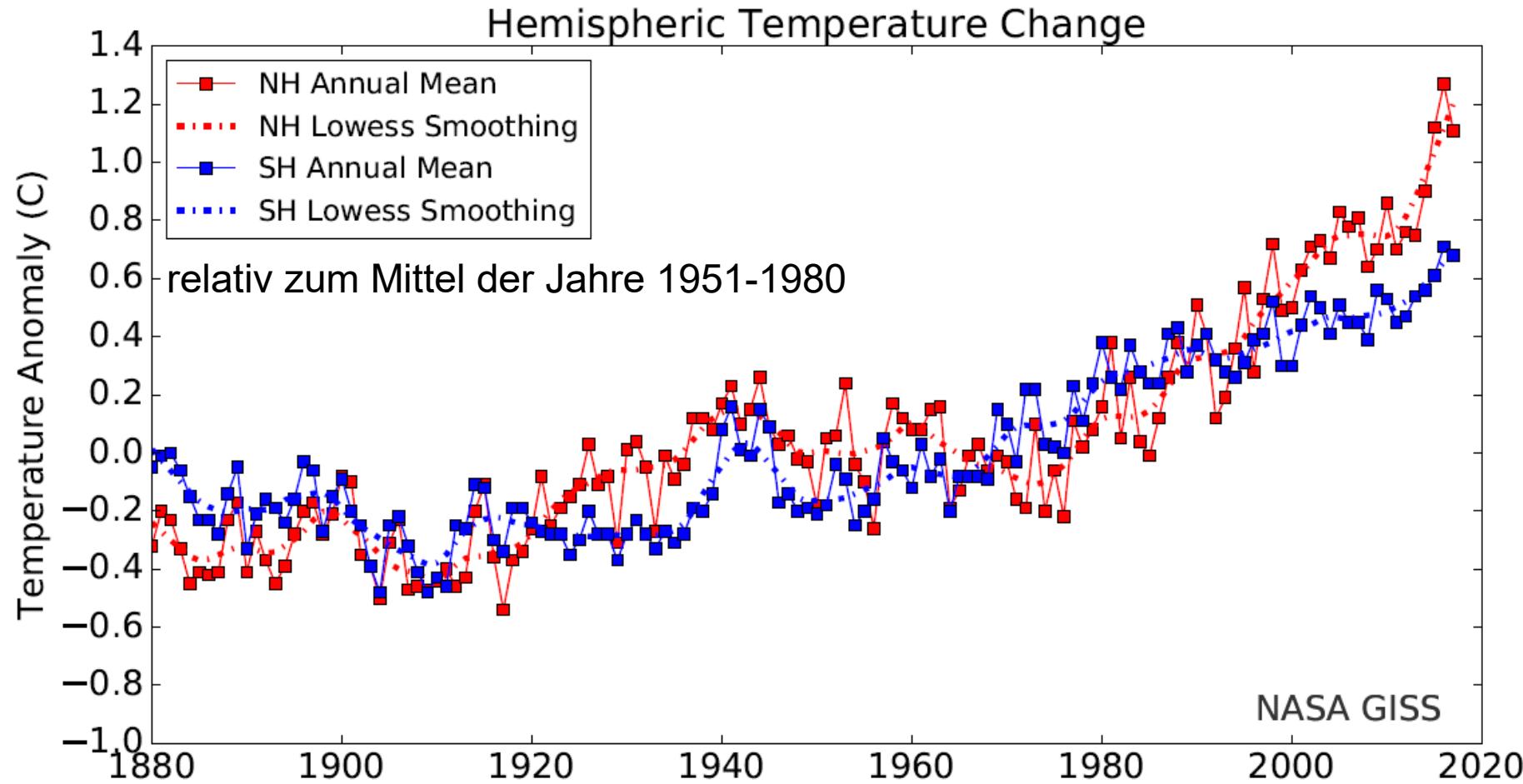
Die Temperaturrentwicklung seit 1880 im globalen Durchschnitt



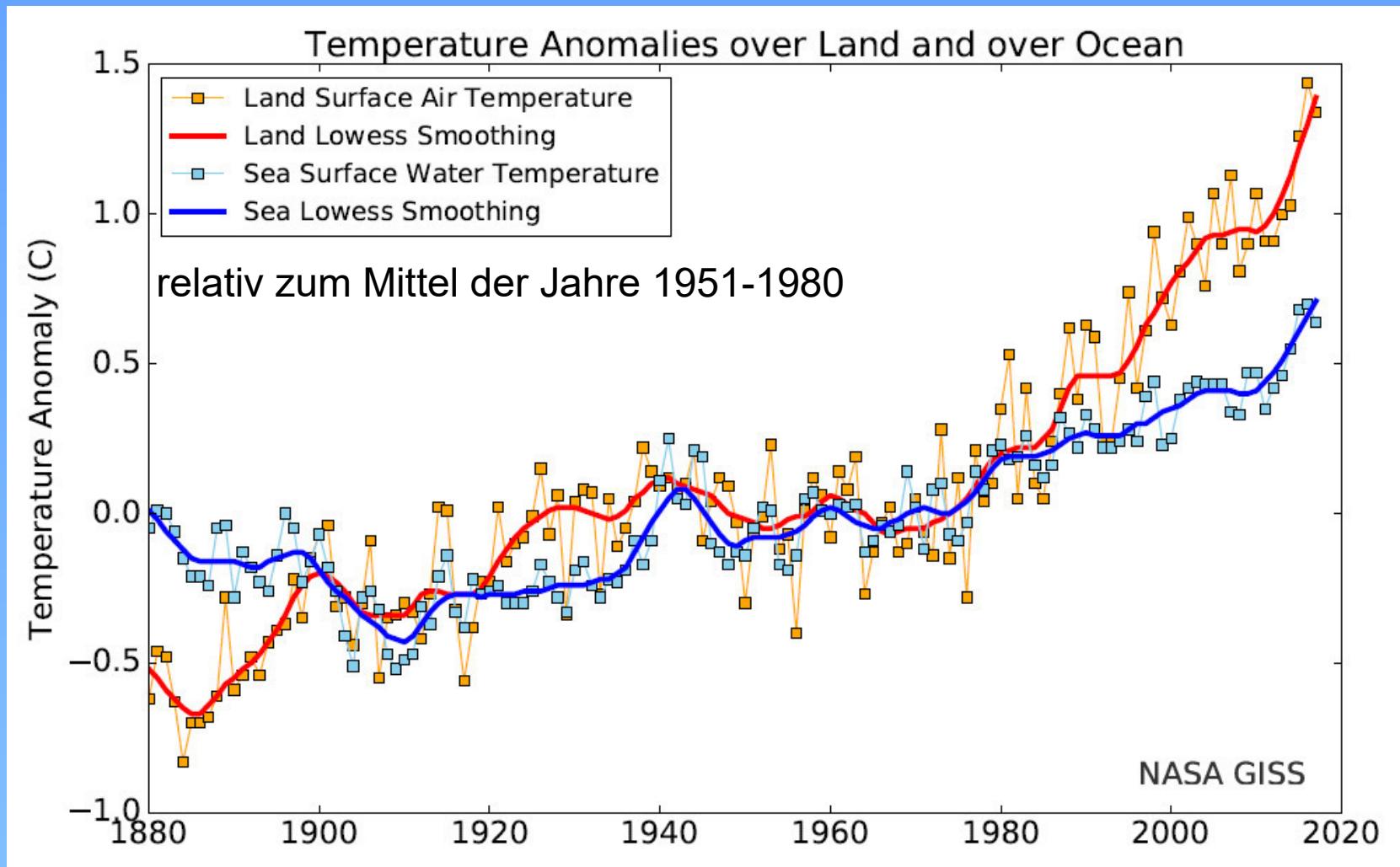
Der lineare Temperaturtrend an der Erdoberfläche seit 1880



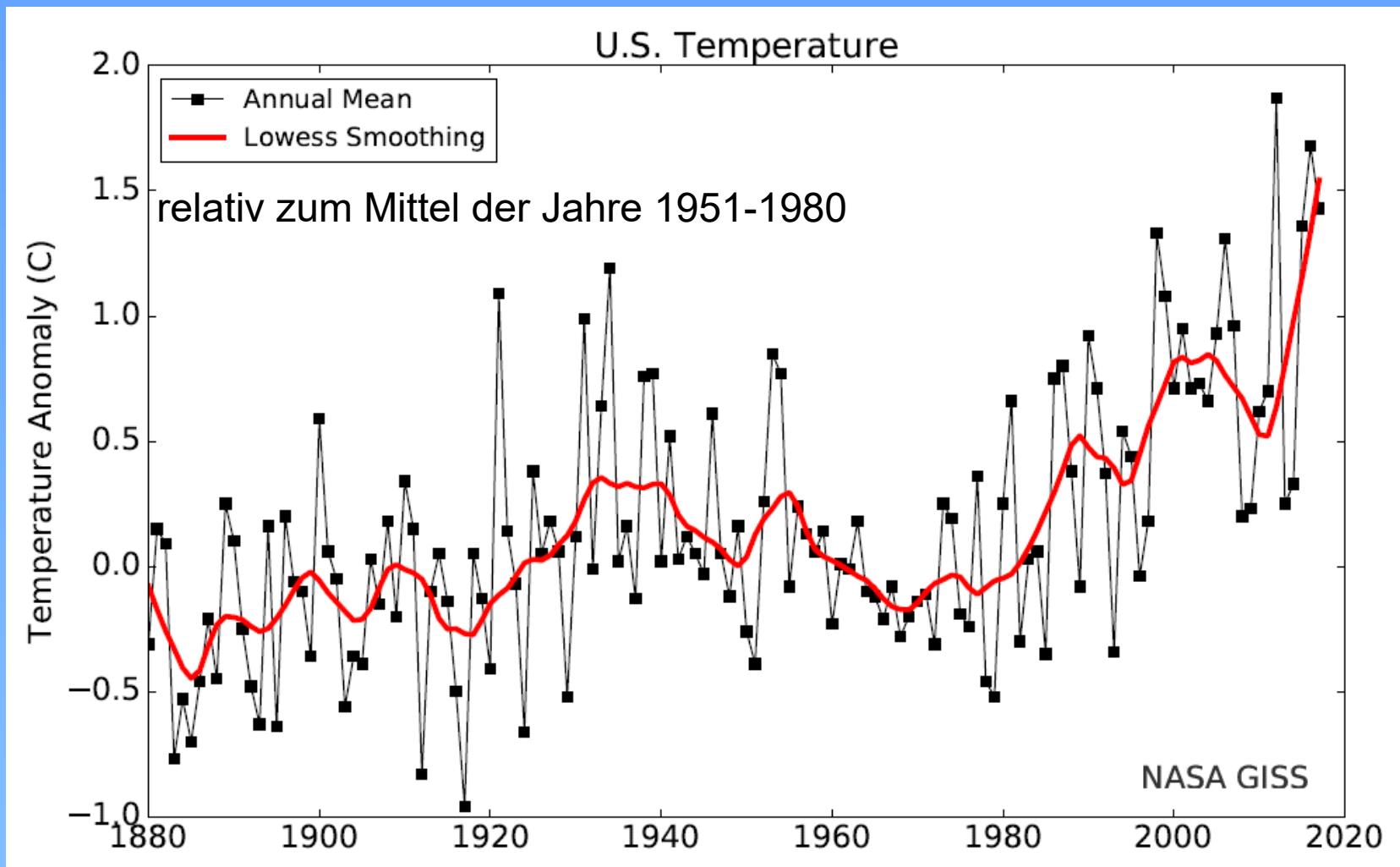
Die Temperaturentwicklung getrennt nach Nord- und Südhalbkugel



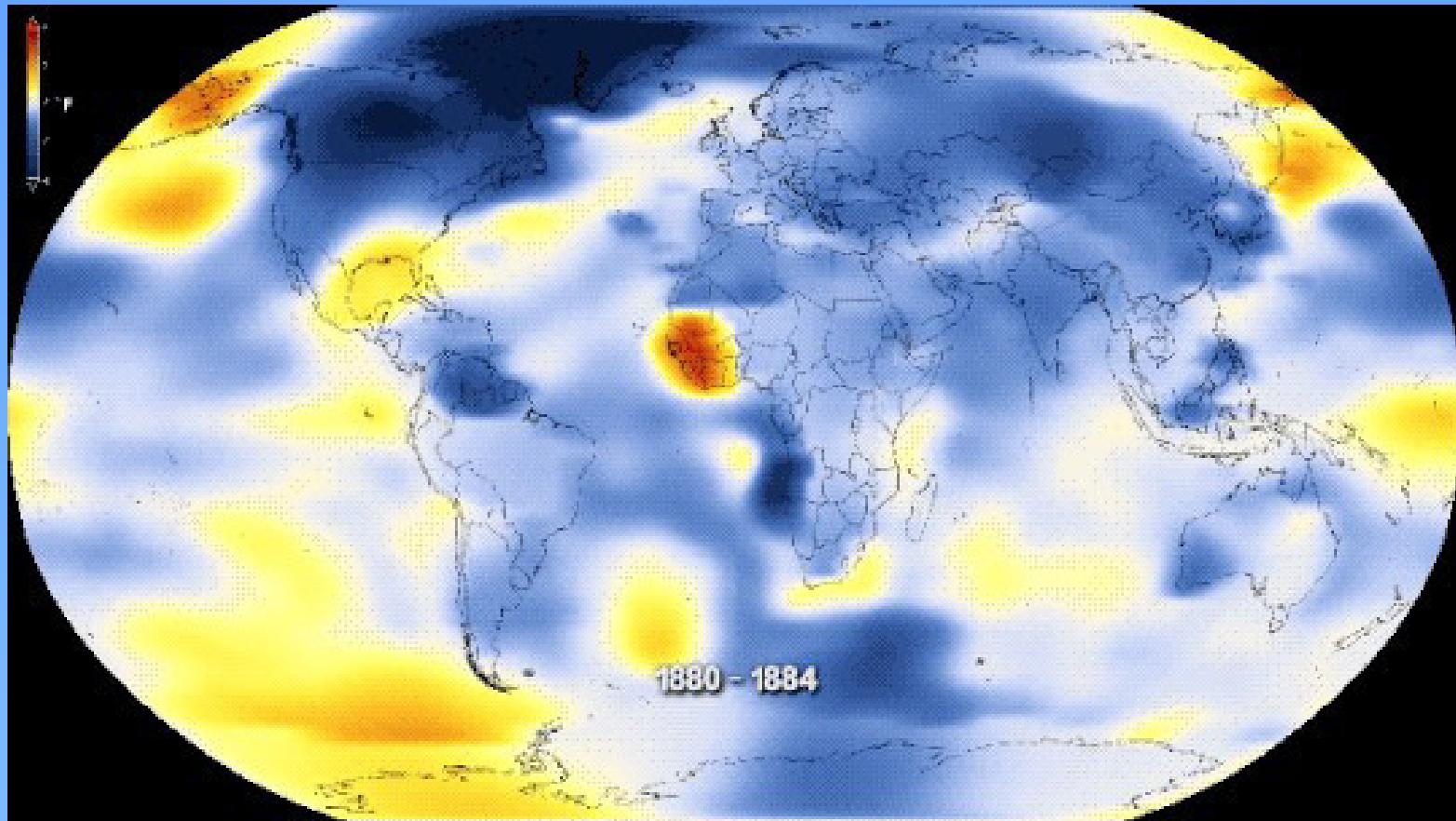
Die Temperaturentwicklung getrennt nach Land und Ozean



Die Temperaturrentwicklung seit 1880 in den USA



Die Entwicklung ist jedoch irregulär



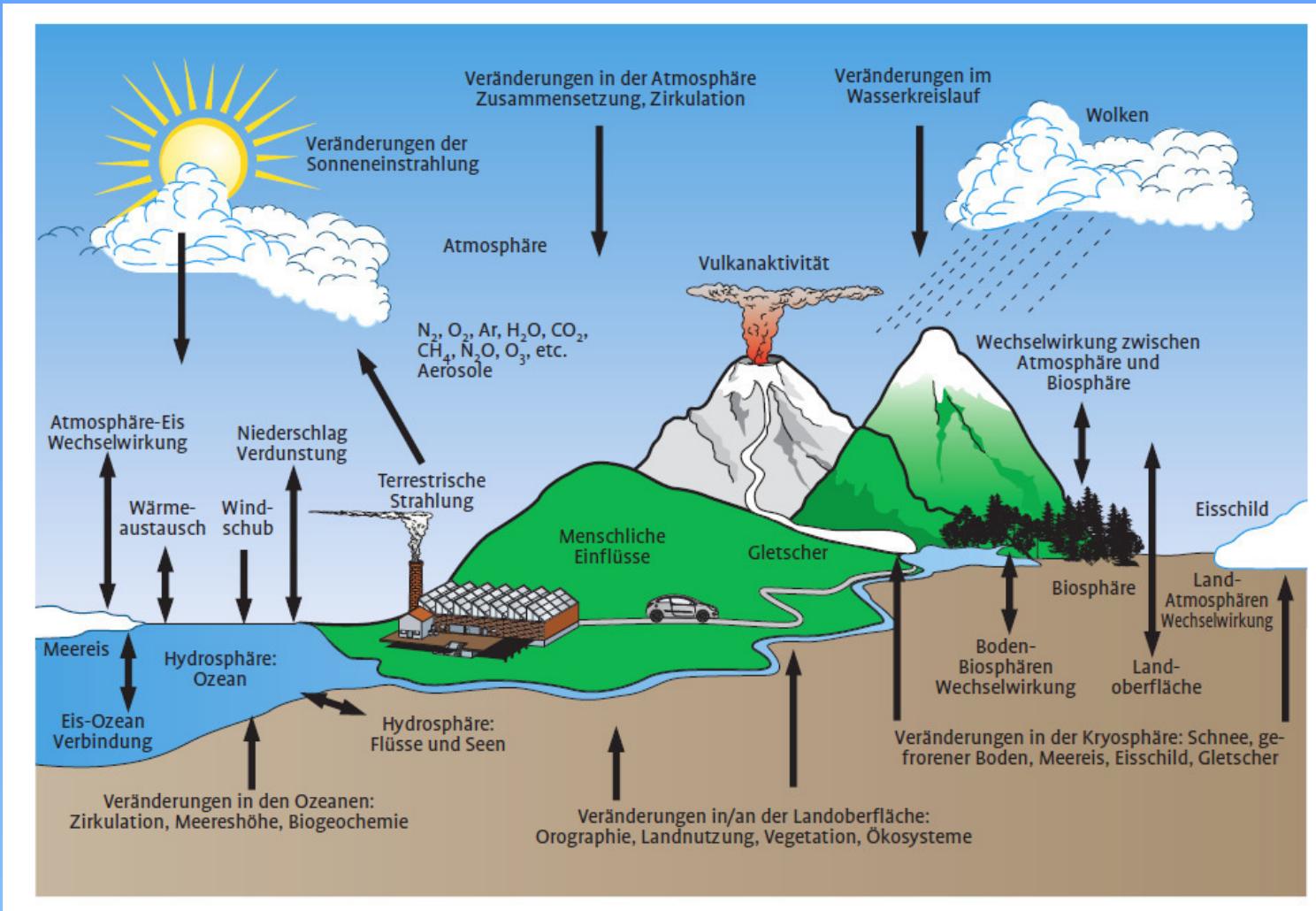
Leicht geglätteter Verlauf der Temperaturen (5-Jahres Mittelwerte)
relativ zu 1951-1980 (GISTEMP)

NASA

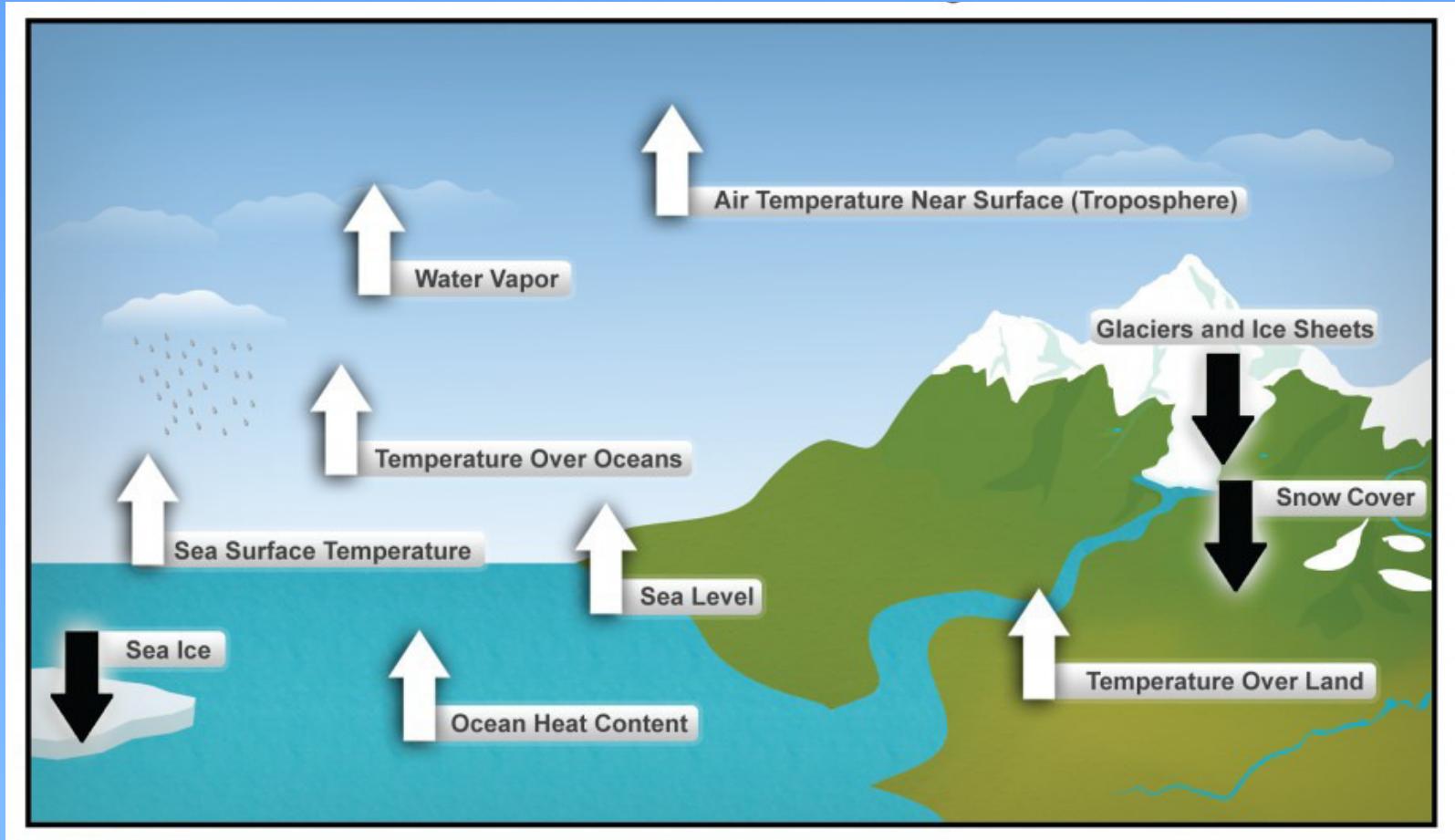
2. Systemkomponenten

- Klimasystem, Zeitskalen, Trägheit
- Systemkomponenten
 - Atmosphäre
 - Ozean
 - Kryosphäre
 - Vegetation

Komponenten und Prozesse im Klimasystem

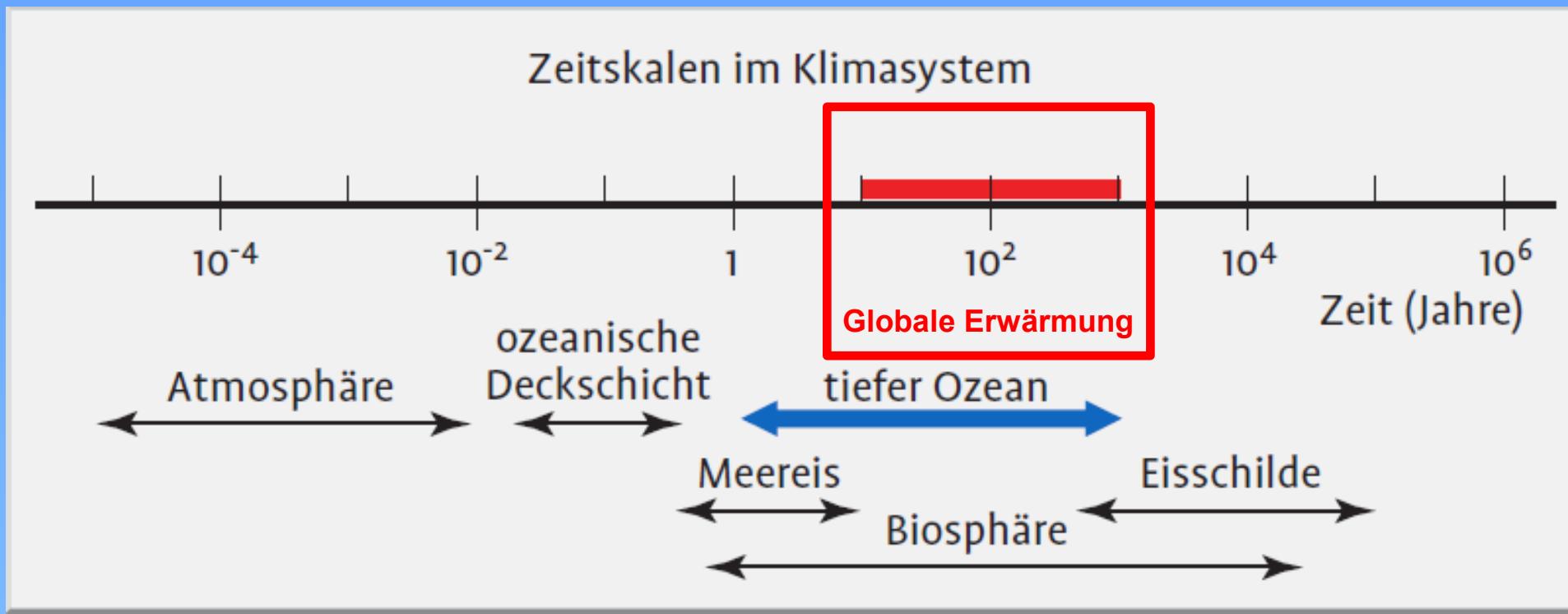


Indikatoren der Erderwärmung findet man nicht nur in der Atmosphäre



www.globalchange.gov/browse/multimedia/ten-indicators-warming-world

Interne Zeitskalen der Systemkomponenten

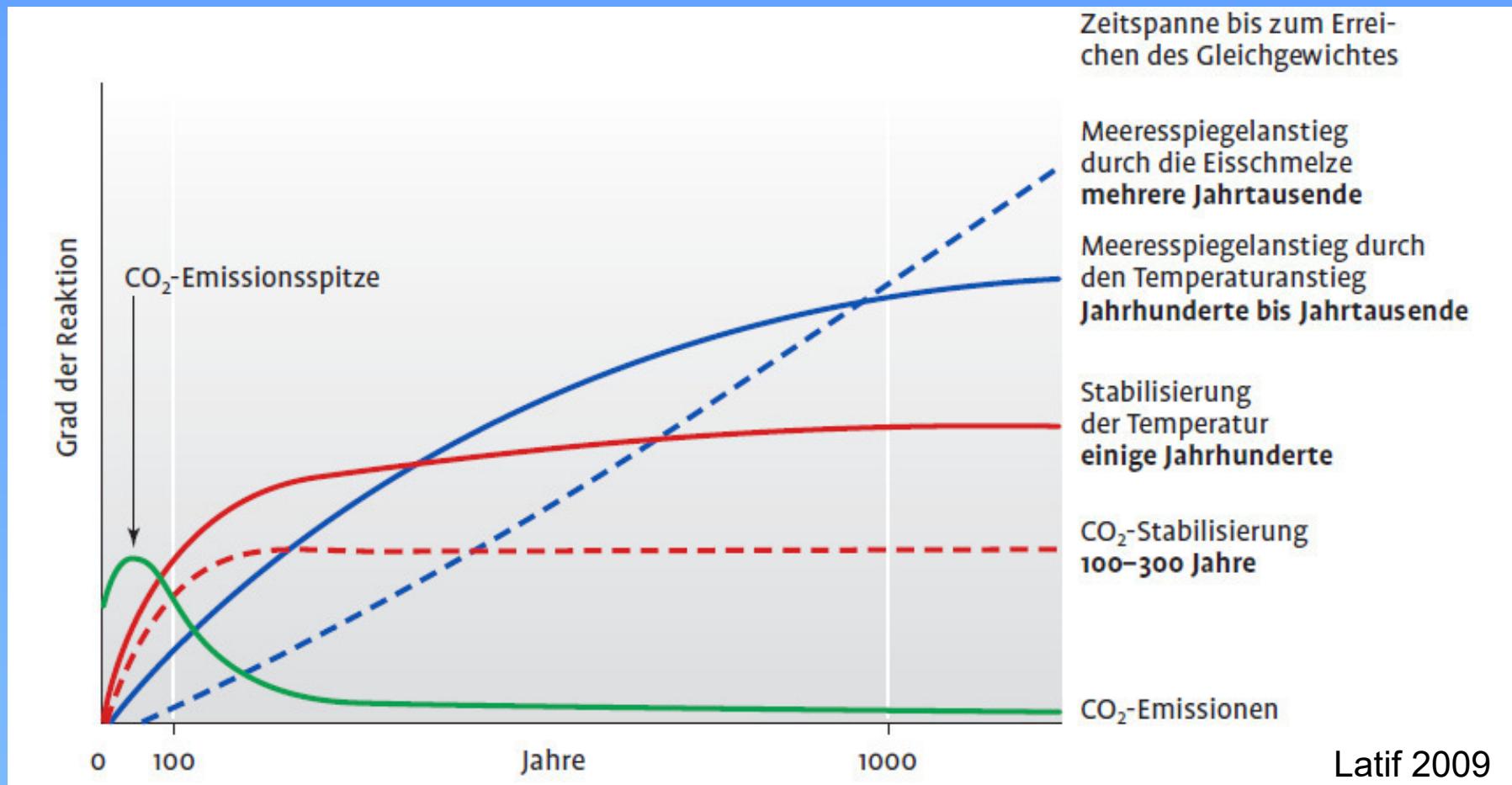


Latif 2009

Klimaänderungen nehmen wir durch die Atmosphäre wahr, sie entstehen jedoch vor allem durch die trügen Komponenten

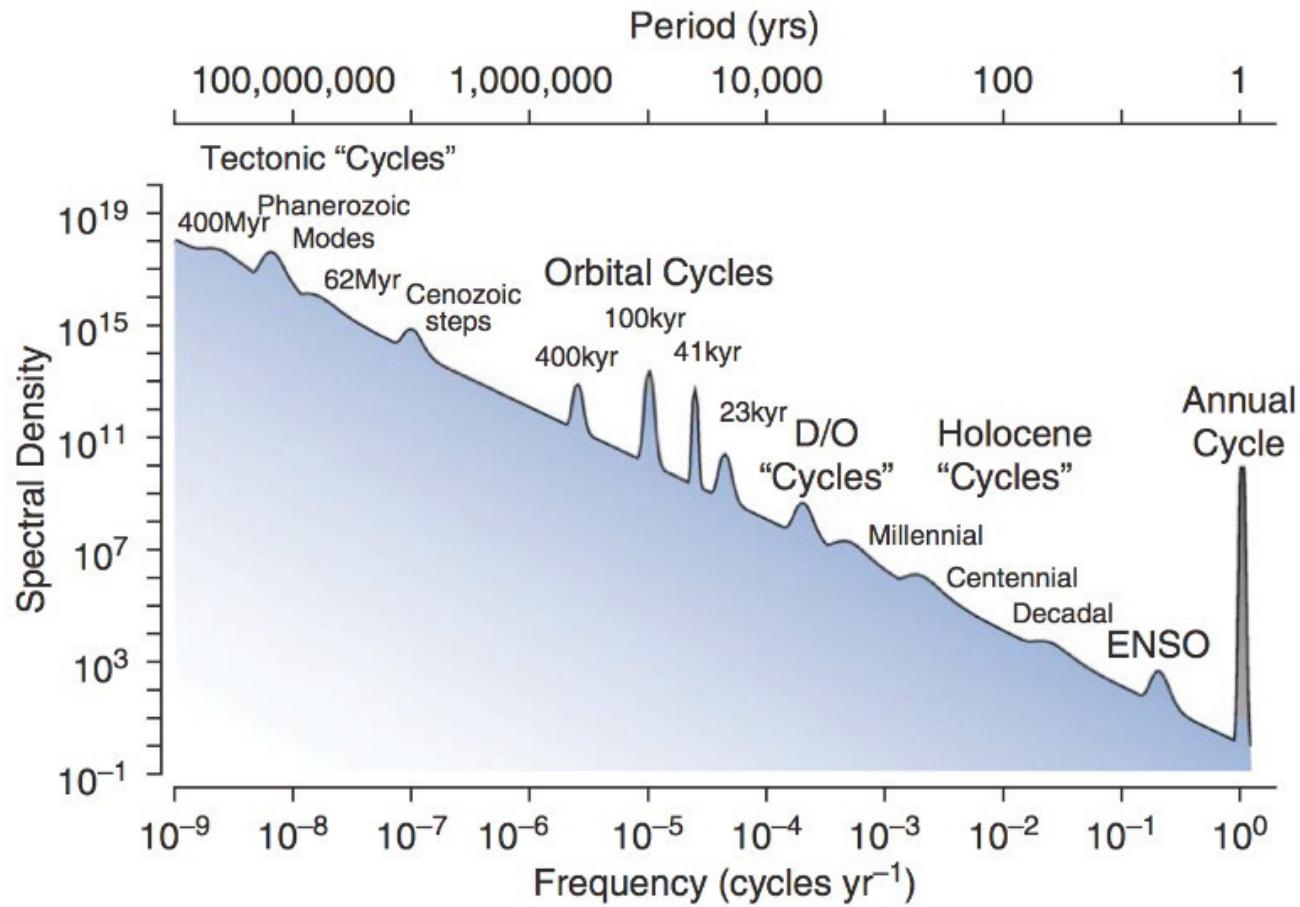


Die Trägheit des Klimas



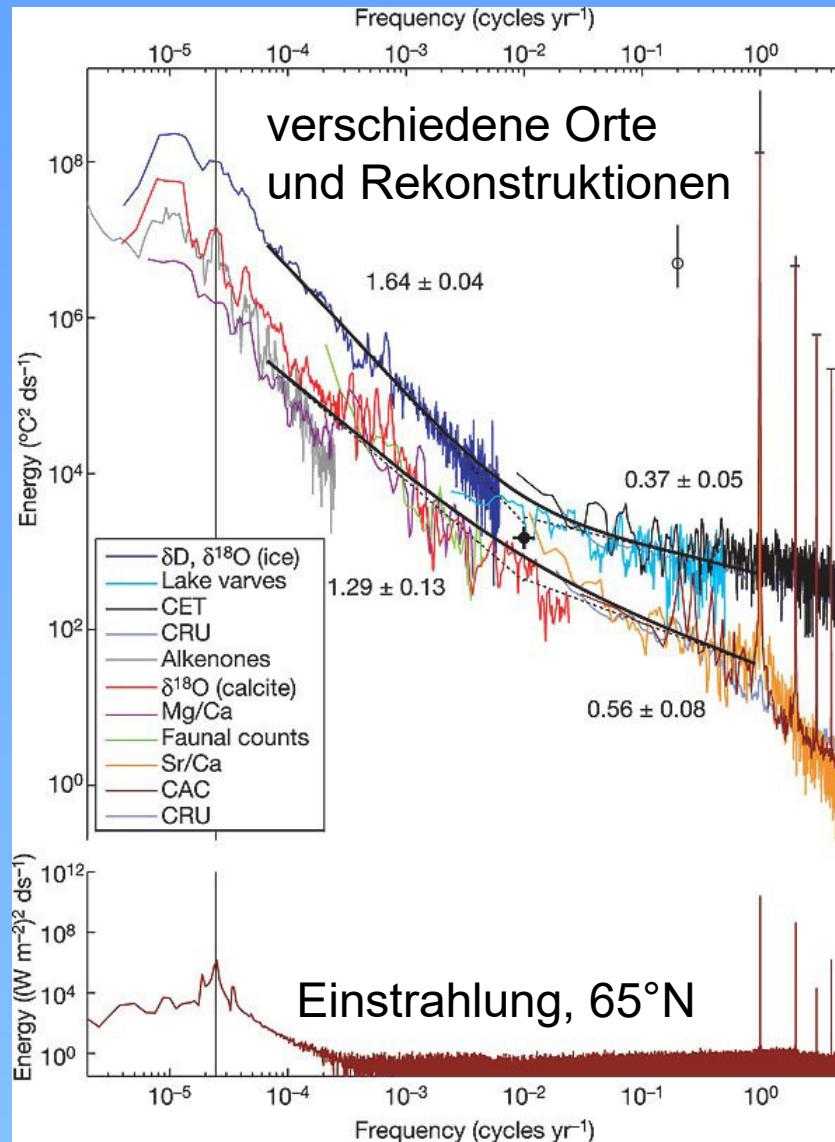
Reaktion des Klimasystems auf erhöhte Treibhausgase über ca. 200 Jahre. Sie kann über ein Jahrtausend lang anhalten.

Zyklen im Klimasystem



Source: Bartlein (2006), Encyclopedia of Quaternary Science

Spektren der Temperatur, und der Einstrahlung bei 65°N



Huybers and Curry,
Nature 2006

Entwicklung der Klimaforschung

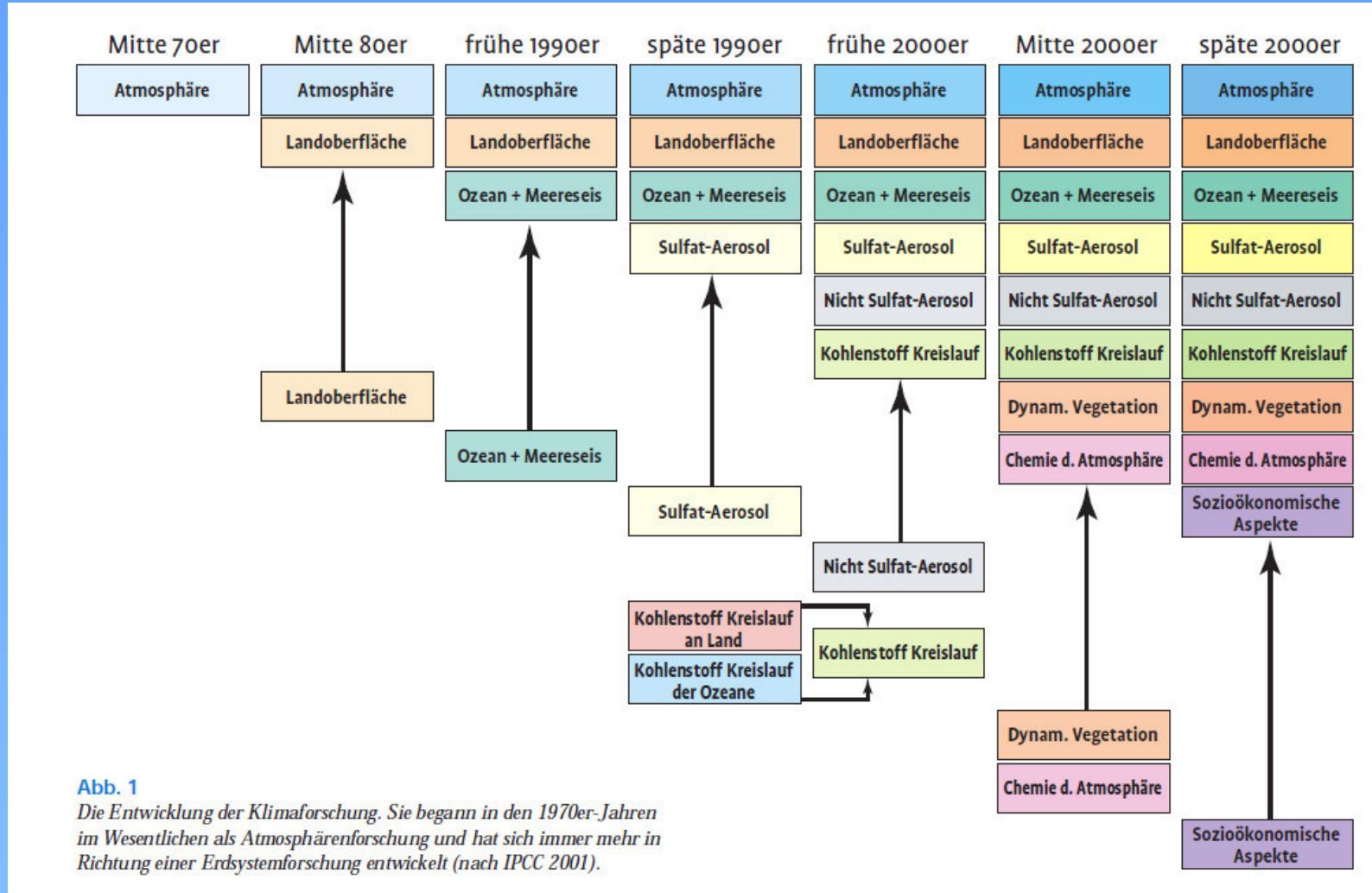


Abb. 1

Die Entwicklung der Klimaforschung. Sie begann in den 1970er-Jahren im Wesentlichen als Atmosphärenforschung und hat sich immer mehr in Richtung einer Erdsystemforschung entwickelt (nach IPCC 2001).

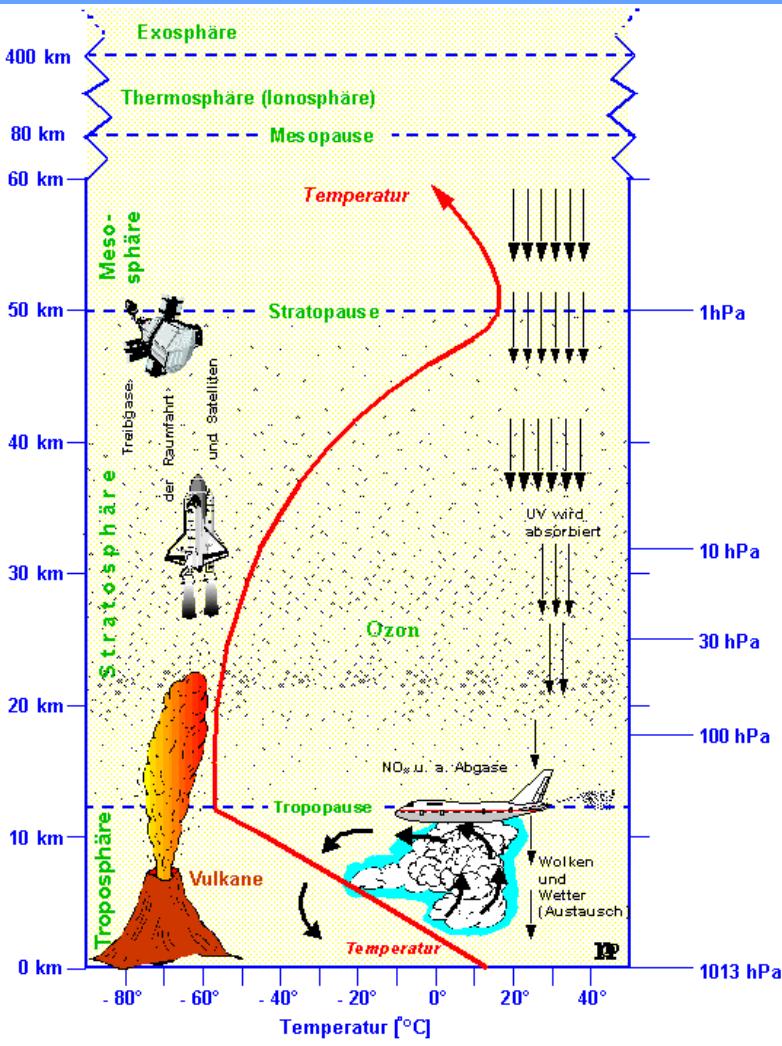
→ Erdsystemforschung

Latif 2009

2. Systemkomponenten

- Klimasystem, Zeitskalen, Trägheit
- Systemkomponenten
 - Atmosphäre
 - Ozean
 - Kryosphäre
 - Vegetation

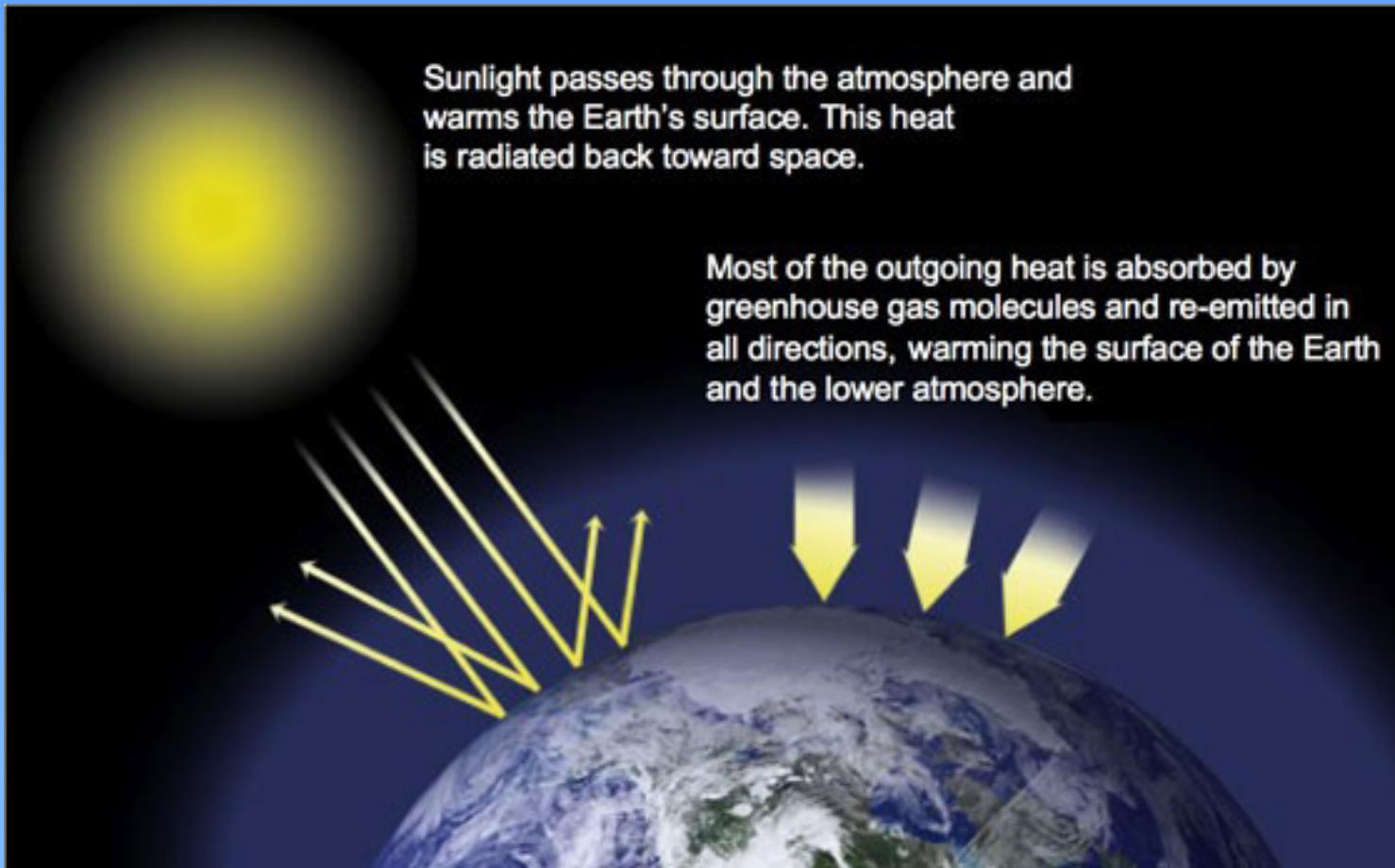
Zusammensetzung der Atmosphäre



Mittlere Zusammensetzung von trockener Luft in der Troposphäre	Volumenanteil in %
Stickstoff	78,08
Sauerstoff	20,95
Argon	0,934
Neon	0,0018
Helium	0,0005
Krypton	0,0001
Xenon	0,000009
Kohlendioxid	0,0409
Methan	0,00017
Distickstoffmonoxid	0,00003
Kohlenmonoxid*	0,00002
Wasserstoff	0,00005

Die Spurengase beeinflussen das Klima

Der Treibhauseffekt



<http://climate.nasa.gov/causes>

Bereits 1896 berechnete Svante Arrhenius, wie das CO₂ die Temperatur der Erde beeinflusst

Beiträge zum natürlichen Treibhauseffekt

© PG-Net Treibhausgas	chem. Formel	Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt	
		in °C	in %
Wasser dampf	H₂O	20,6	62,4
Kohlendioxid	CO₂	7,0	21,2
bodennahes Ozon	O₃	2,4	7,4
Distickstoffoxid	N₂O	1,4	4,0
Methan	CH₄	0,8	2,4
weitere		0,6	1,9
Summe		33,0	100,0

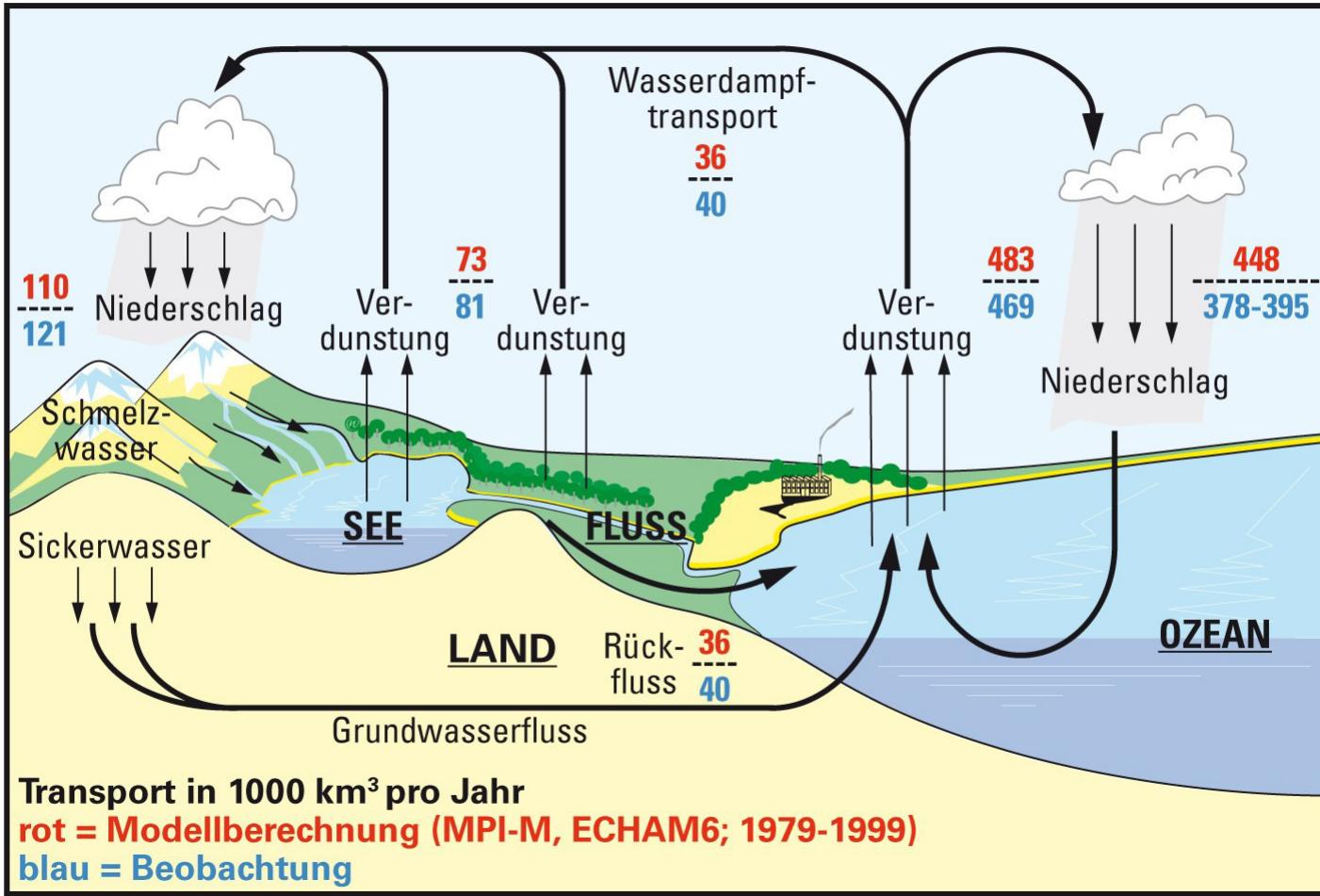
www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/klimaschwankungen/ursachen/ursachen_naturliche/ursachen_terrestrisch/atmosphaerenzusammensetzung/index.html

Der hydrologische Zyklus

Globaler Wasserkreislauf

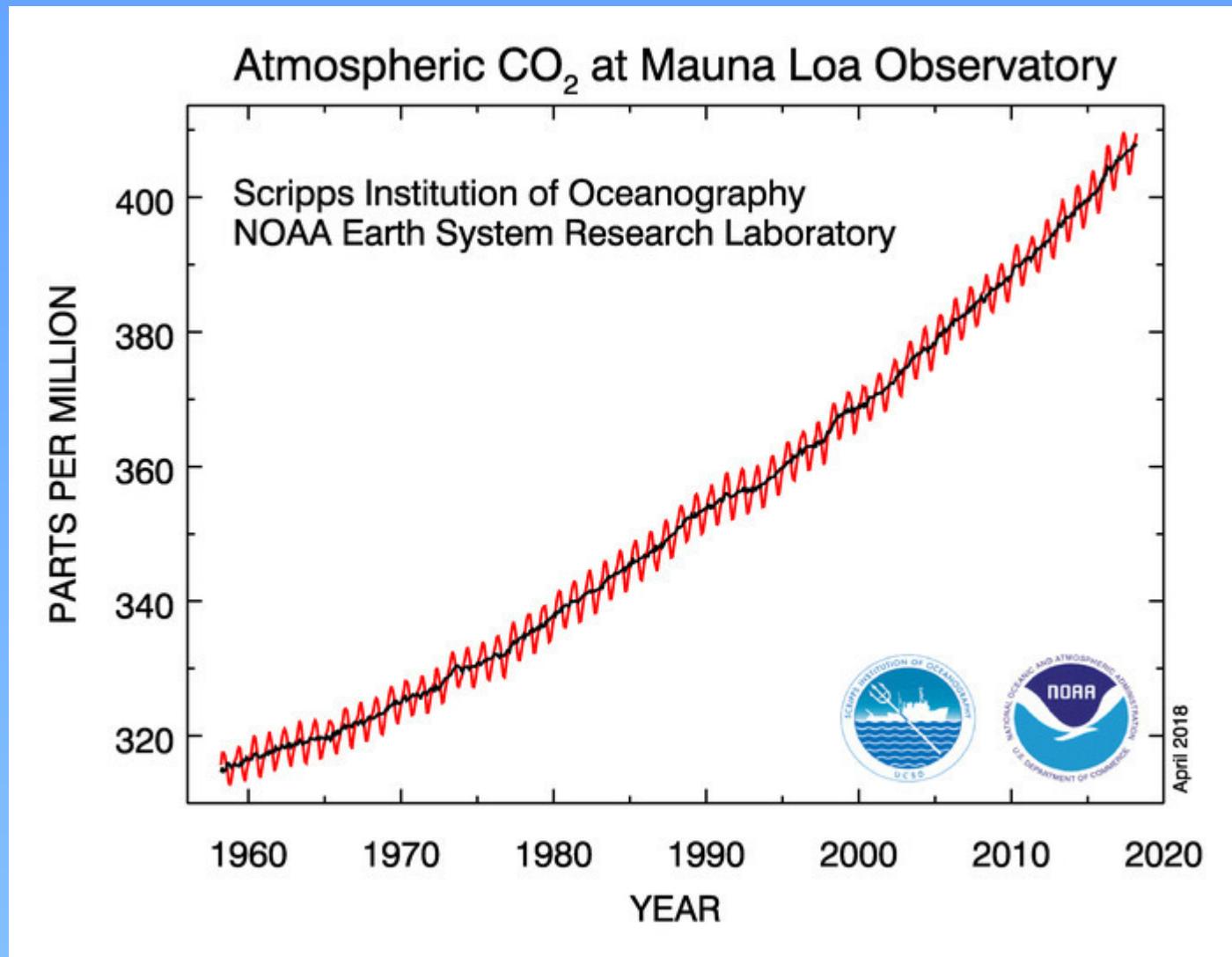


Max-Planck-Institut
für Meteorologie

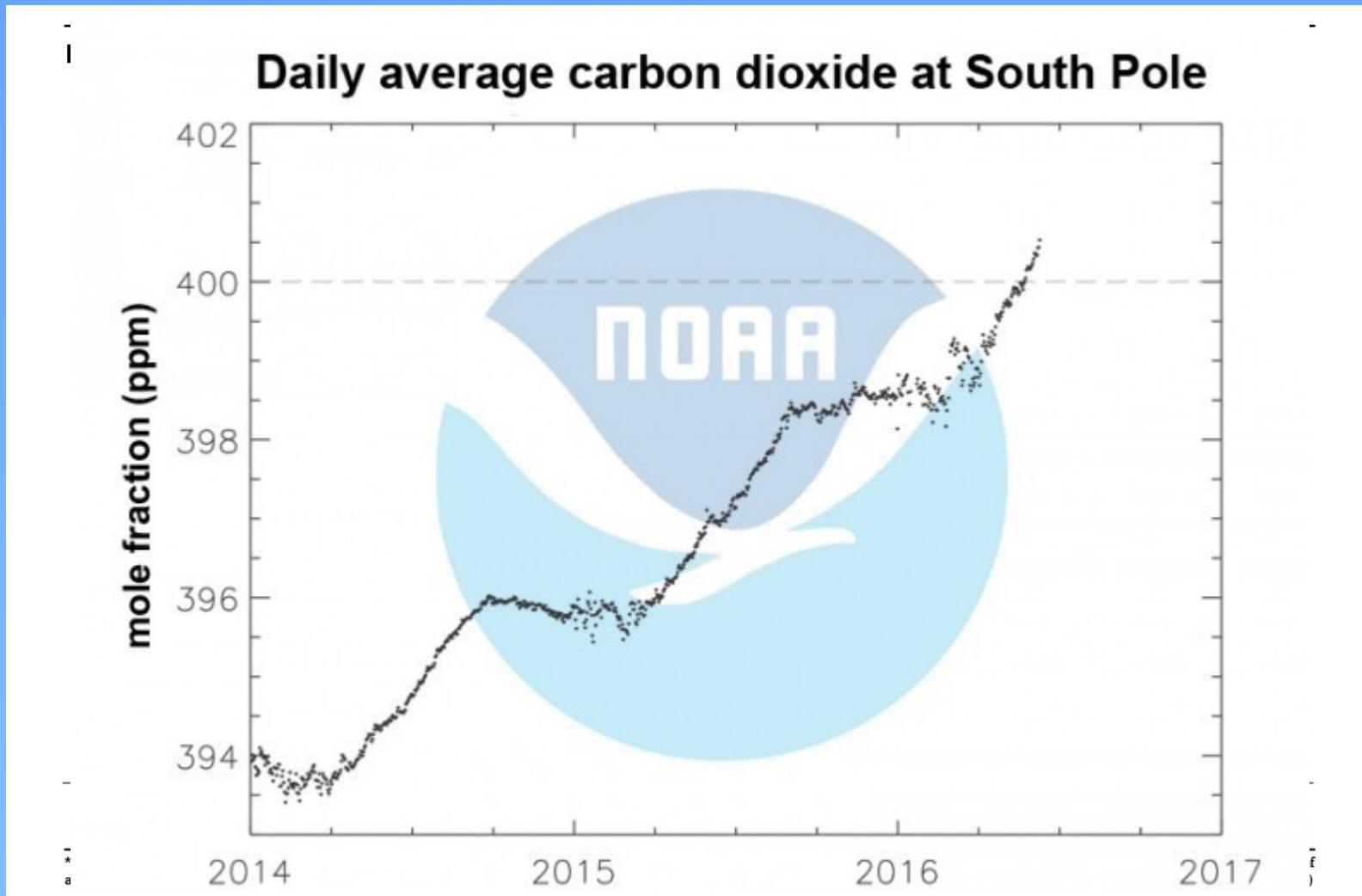


www.mpimet.mpg.de/fileadmin/download/Bilder_und_Grafik/WasKrei_ECHAM6_d_1556x1077x140.jpg

Vor allem der CO₂-Anstieg verstärkt den Treibhauseffekt



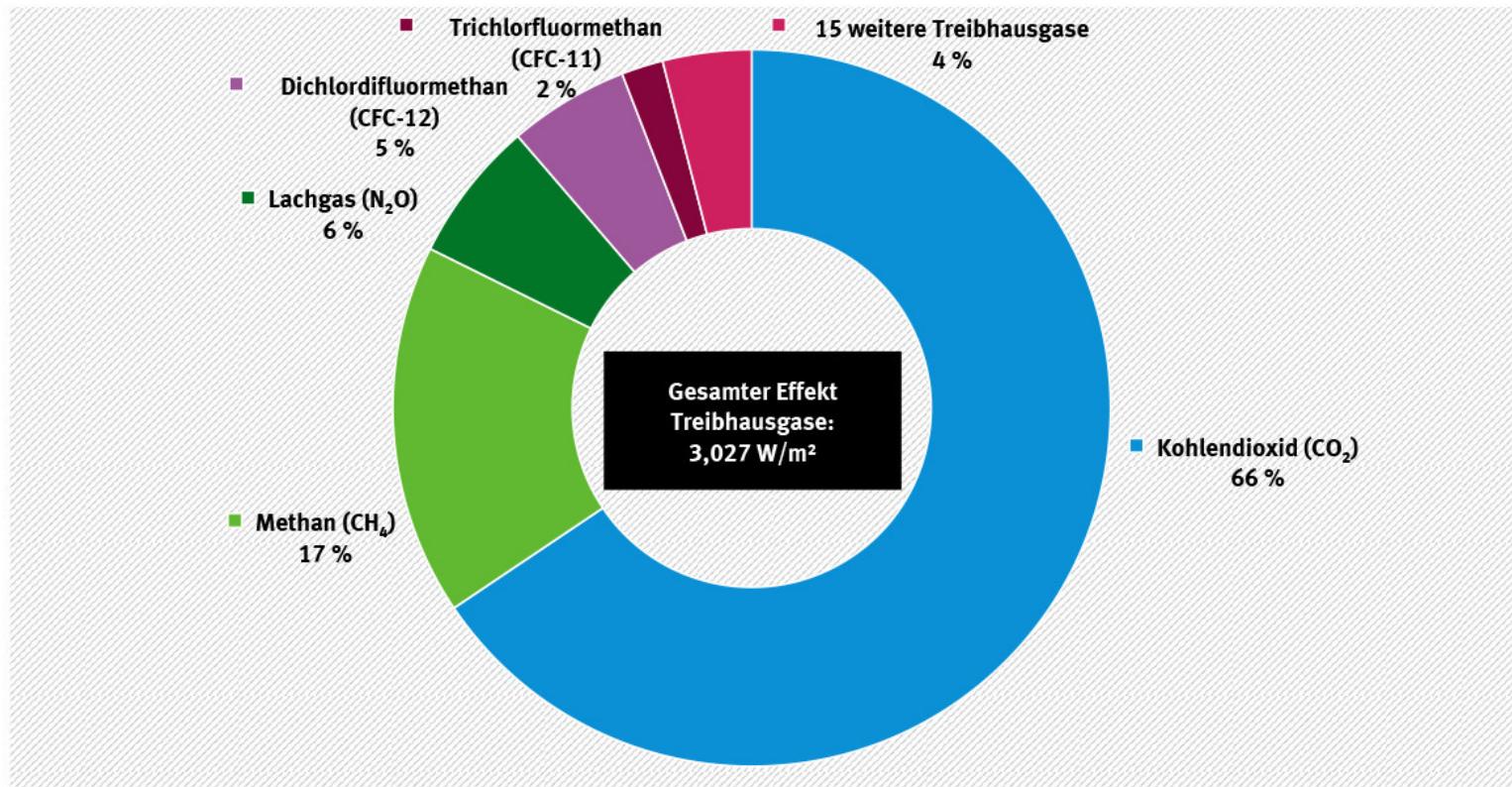
Langlebige Gase vermischen sich weltweit innerhalb kurzer Zeit



www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen

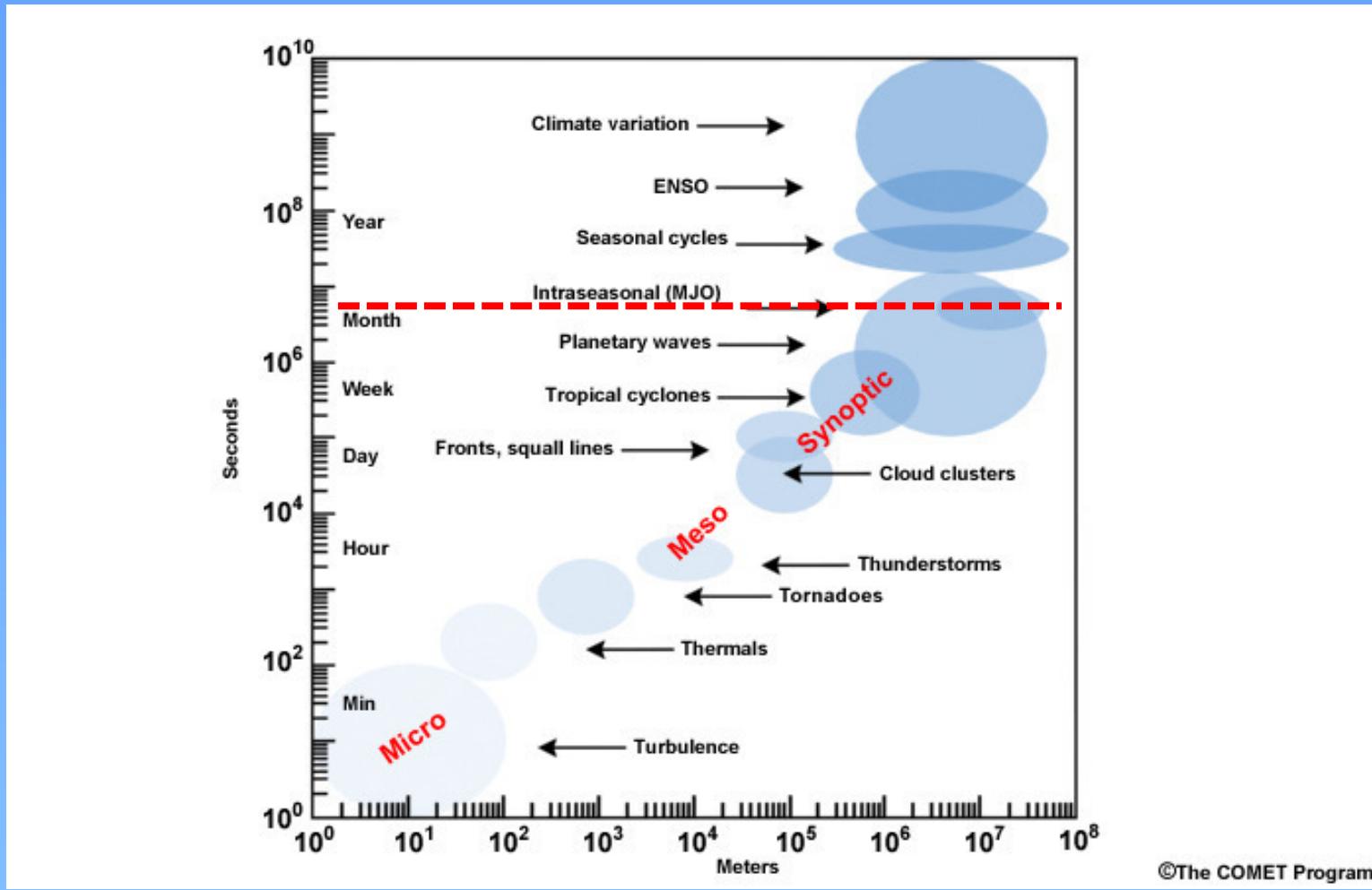
Beiträge zum anthropogenen Treibhauseffekt

Beitrag zum Treibhauseffekt durch Kohlendioxid und langlebige Treibhausgase 2016



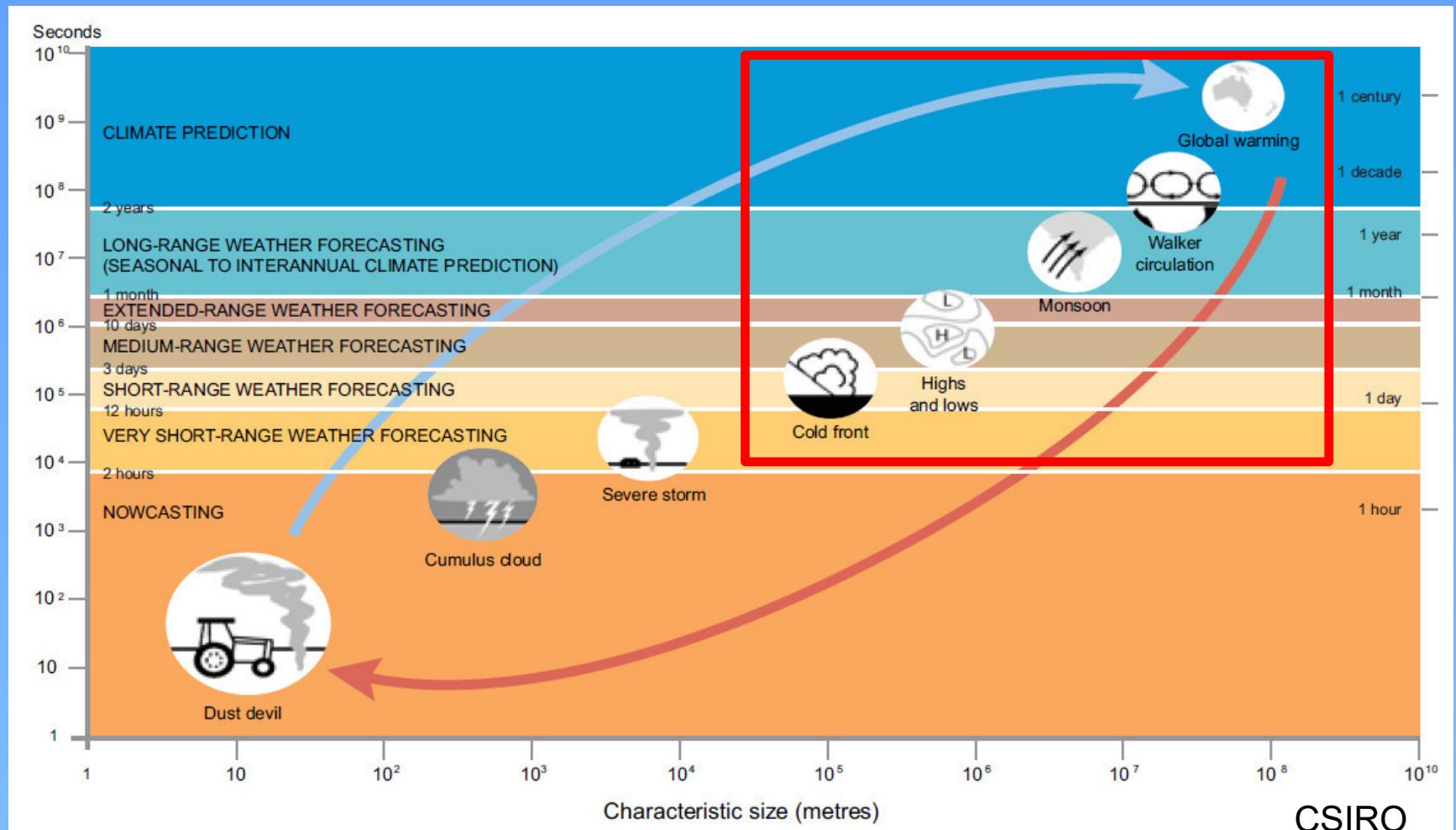
www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen

In der Atmosphäre unterscheidet man Mikro-, Meso- und synopt. Skala



Klimazeitskalen beginnen bei saisonalen Zeitskalen

Skalen in der Atmosphäre



Klimamodelle lösen nur einen kleinen Teil des Spektrums auf, die kleineren Skalen müssen parametrisiert werden

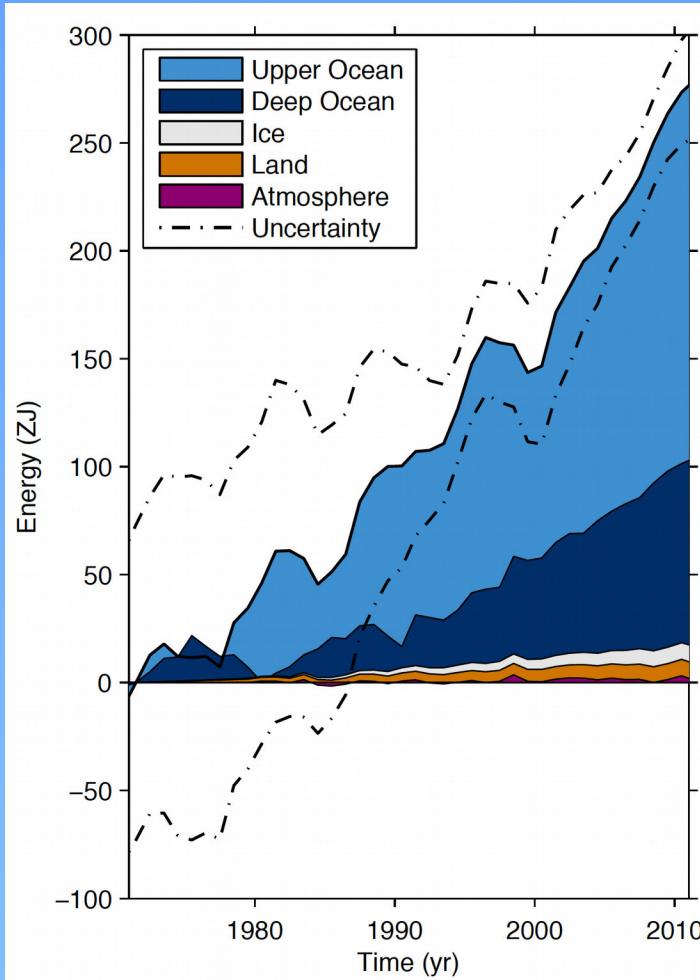
2. Systemkomponenten

- Klimasystem, Zeitskalen, Trägheit
- Systemkomponenten
 - Atmosphäre
 - Ozean
 - Kryosphäre
 - Vegetation

Rolle des Ozeans im Klimasystem

1. Trägheit des Klimas
2. Regionalität des Klimas
3. Klimavariabilität
4. Biogeochemische Kreisläufe
5. Marine Ökosysteme (z. B. Versauerung)
6. Transport von Substanzen (z. B. Öl, Radioaktivität)

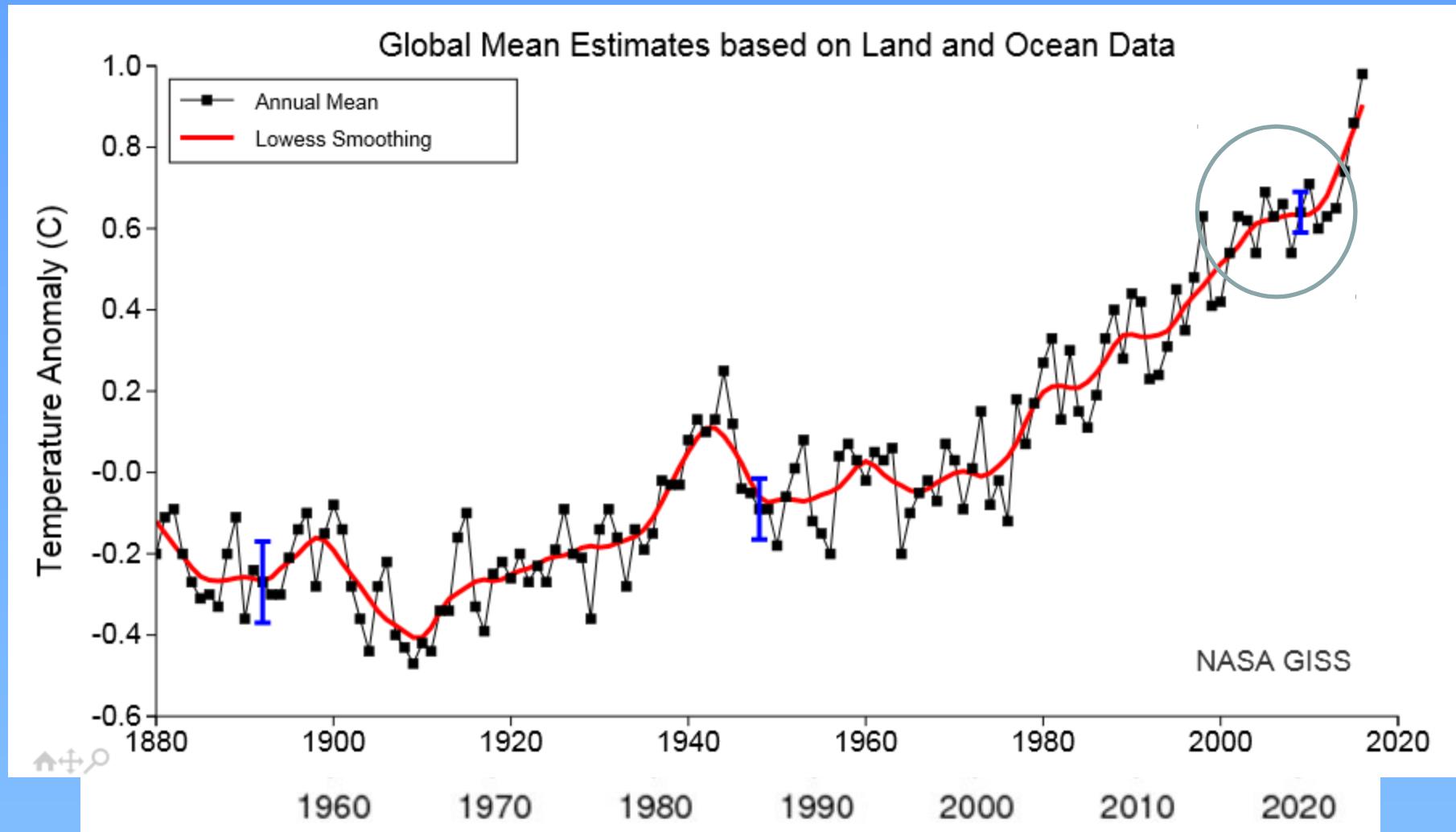
Rolle des Ozeans für Klimawandel: Beispiel Energiezunahme



- ◆ Erwärmung Ozean: macht 93% der Energiezunahme im Klimasystem aus *pro Jahr mehr als das 8-fache des jährlichen Weltenergieverbrauchs 2010*
- ◆ 3% Erwärmung Land
- ◆ 1% Erwärmung Atmosphäre
- ◆ 3% Schmelzen von Eis (Gletscher, Eisschilde, Meereis)
- ◆ Vor 1970 nicht genug Ozeandaten

IPCC WG1 AR5 (2013)

Der globale Wärmeinhalt der Ozeane



Die Klimaerwärmung schreitet unvermindert fort

Klimawandel und die Meere

WBGU

Wissenschaftlicher Beirat des Bundesregierung
GLOBALISCHEN KlimAVERÄNDERUNGEN

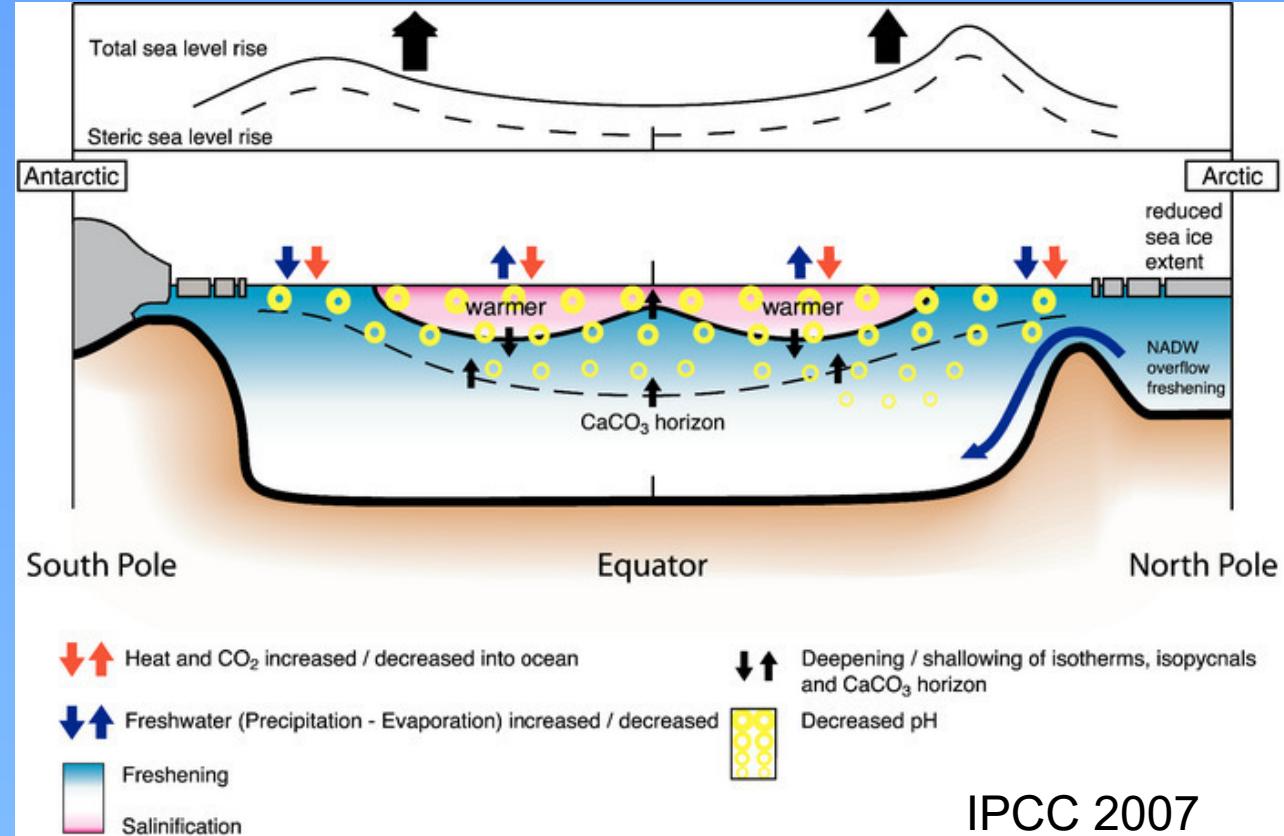


Die Zukunft der
Meere – zu warm,
zu hoch, zu sauer

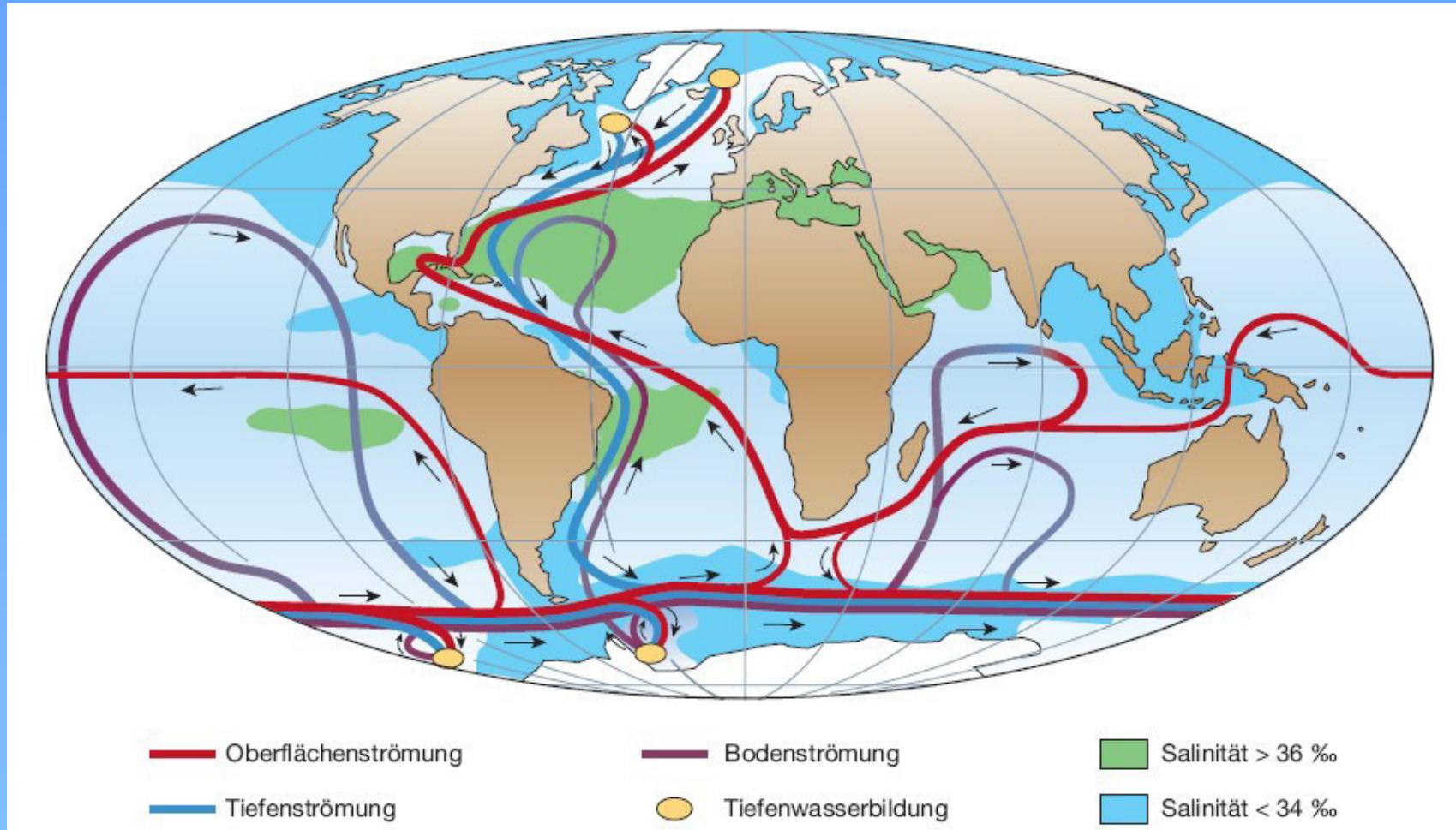
Sondergutachten



R. Schubert
H.-J. Schellnhuber
N. Buchmann
A. Epiney
R. Griebhammer
M. Kuleissa
D. Messner
S. Rahmstorf
J. Schmid



Die Meereströmungen beeinflussen das Klima ganz erheblich



PIK, Potsdam



future ocean
KIEL MARINE SCIENCES

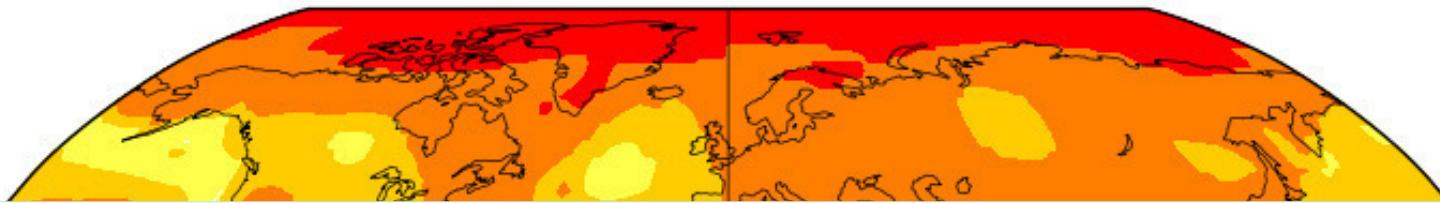


Die Erderwärmung zeigt große räumliche Unterschiede

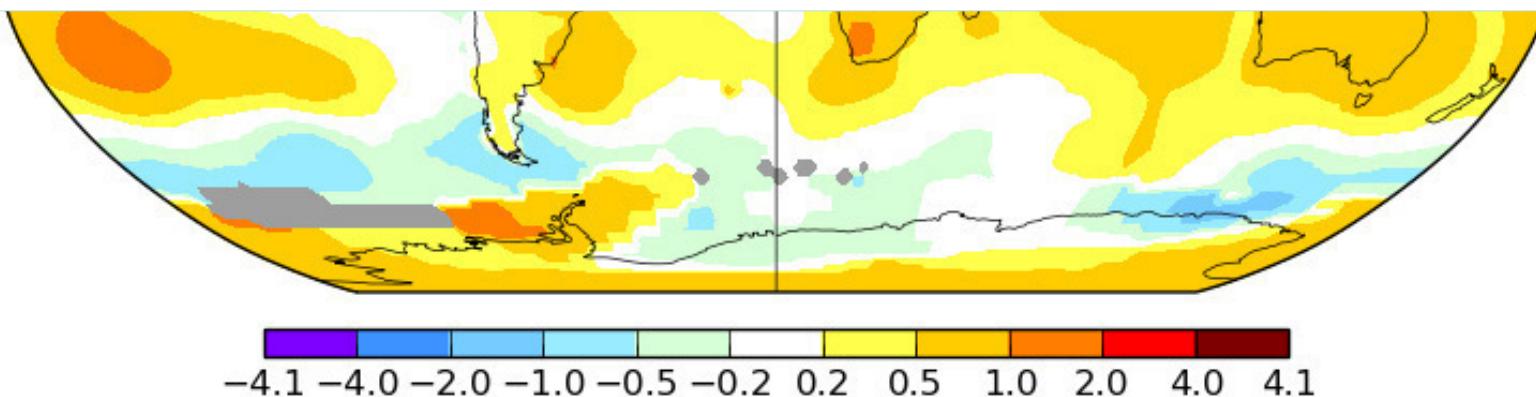
Annual J-D

L-OTI(°C) Change 1980-2016

0.63



Räumliche Variationen im Erwärmungsmuster können auf Änderungen der Ozeanzirkulation hinweisen.



Teile der tropischen Meere haben sich seit 1980 um 0.5°C erwärmt



Deswegen kommt es immer häufiger zur Korallenbeleiche

Die Korallenbleiche

CORAL BLEACHING

Have you ever wondered how a coral becomes bleached?

HEALTHY CORAL

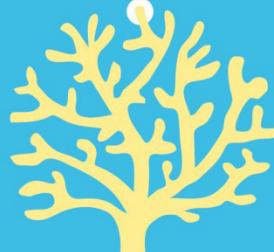
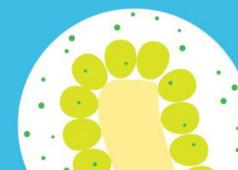
- 1 Coral and algae depend on each other to survive.



Corals have a symbiotic relationship with microscopic algae called zooxanthellae that live in their tissues. These algae are the coral's primary food source and give them their color.

STRESSED CORAL

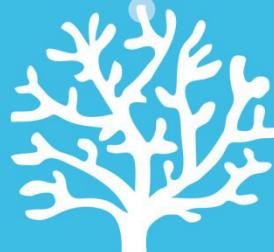
- 2 If stressed, algae leaves the coral.



When the symbiotic relationship becomes stressed due to increased ocean temperature or pollution, the algae leave the coral's tissue.

BLEACHED CORAL

- 3 Coral is left bleached and vulnerable.



Without the algae, the coral loses its major source of food, turns white or very pale, and is more susceptible to disease.

WHAT CAUSES CORAL BLEACHING?



Change in ocean temperature
Increased ocean temperature caused by climate change is the leading cause of coral bleaching.



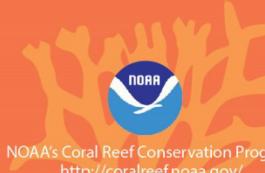
Runoff and pollution
Storm generated precipitation can rapidly dilute ocean water and runoff can carry pollutants — these can bleach near-shore corals.



Overexposure to sunlight
When temperatures are high, high solar irradiance contributes to bleaching in shallow-water corals.

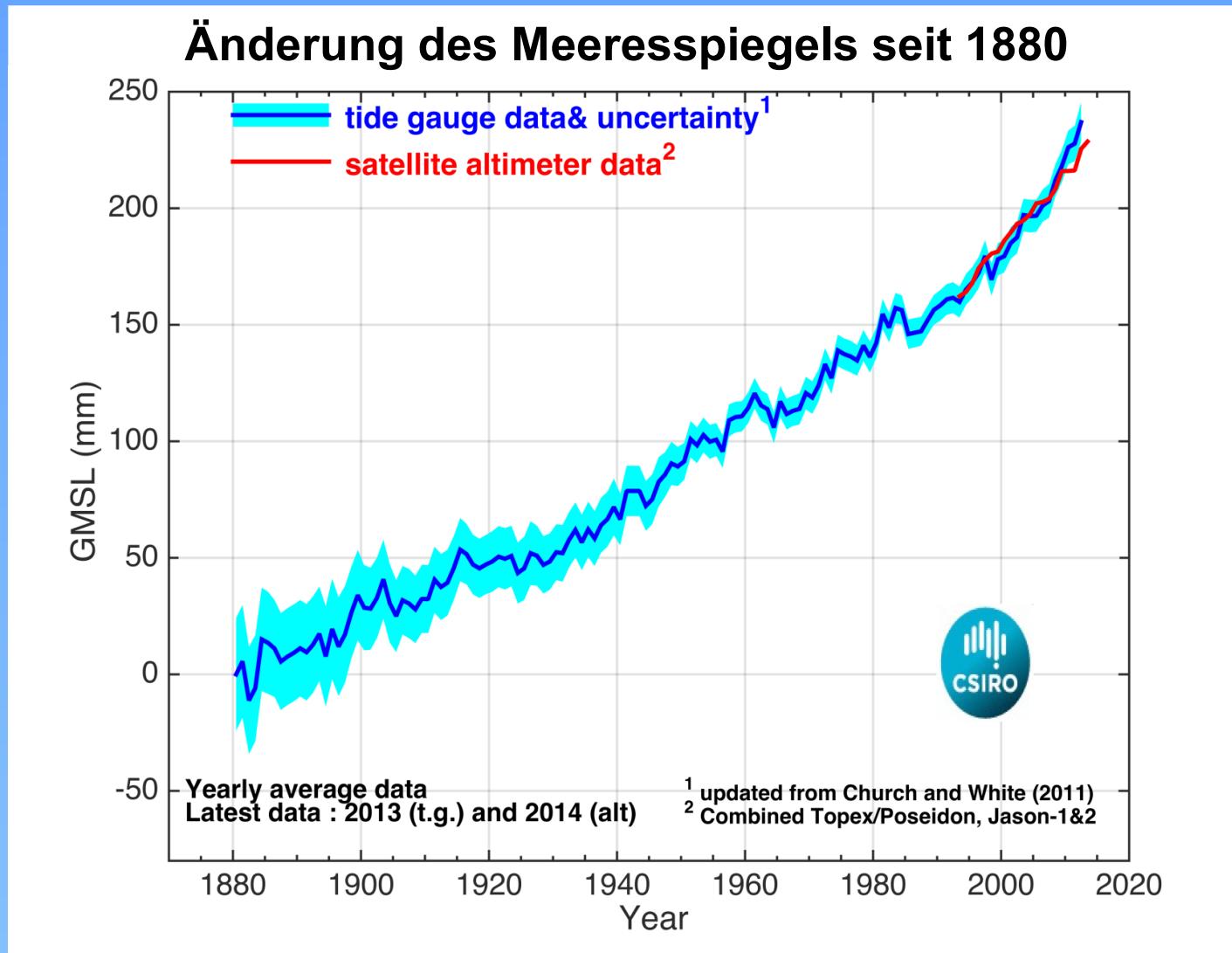


Extreme low tides
Exposure to the air during extreme low tides can cause bleaching in shallow corals.

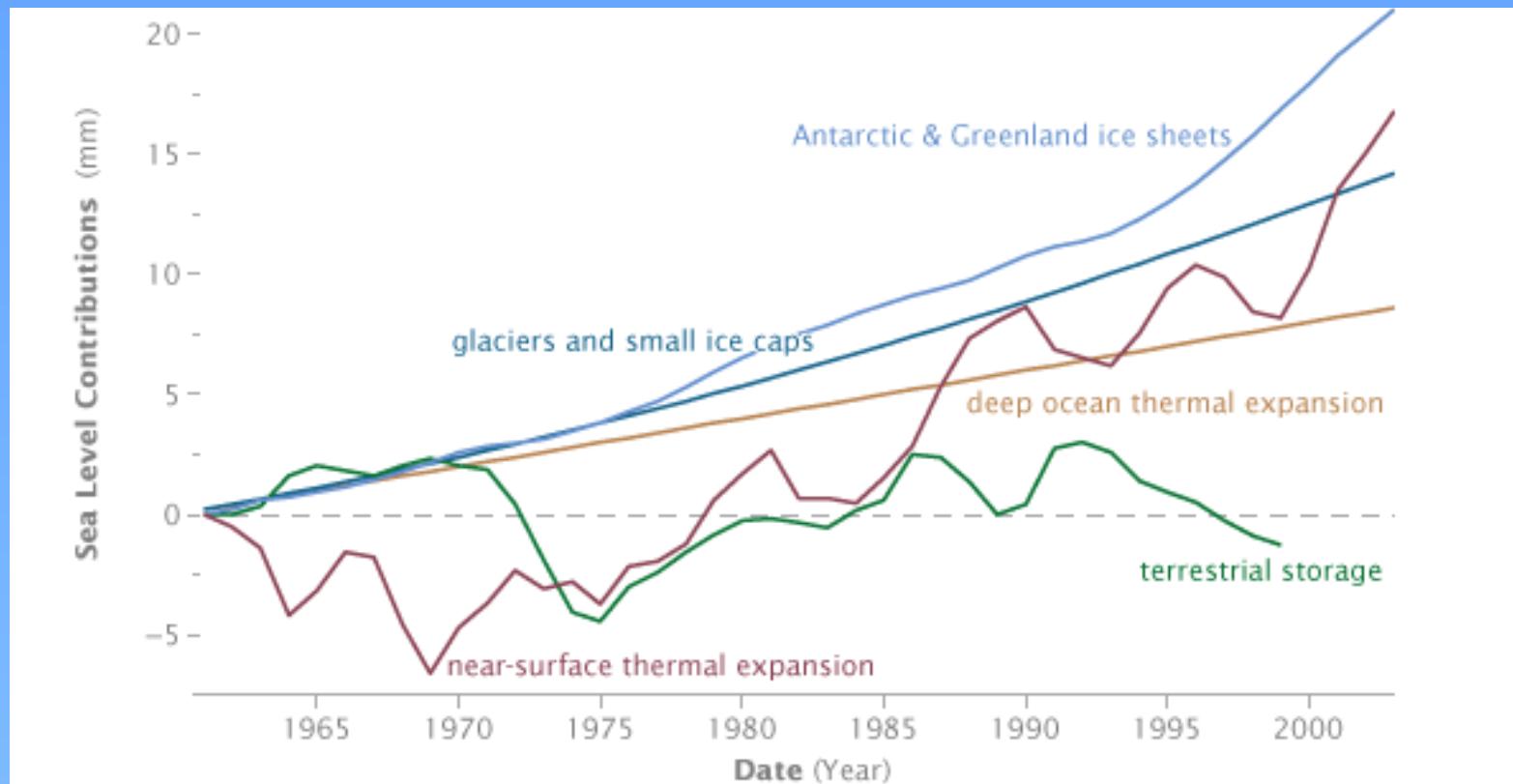


NOAA's Coral Reef Conservation Program
<http://coralreef.noaa.gov/>

Klimawandel betrifft mehrere Komponenten des Erdsystems



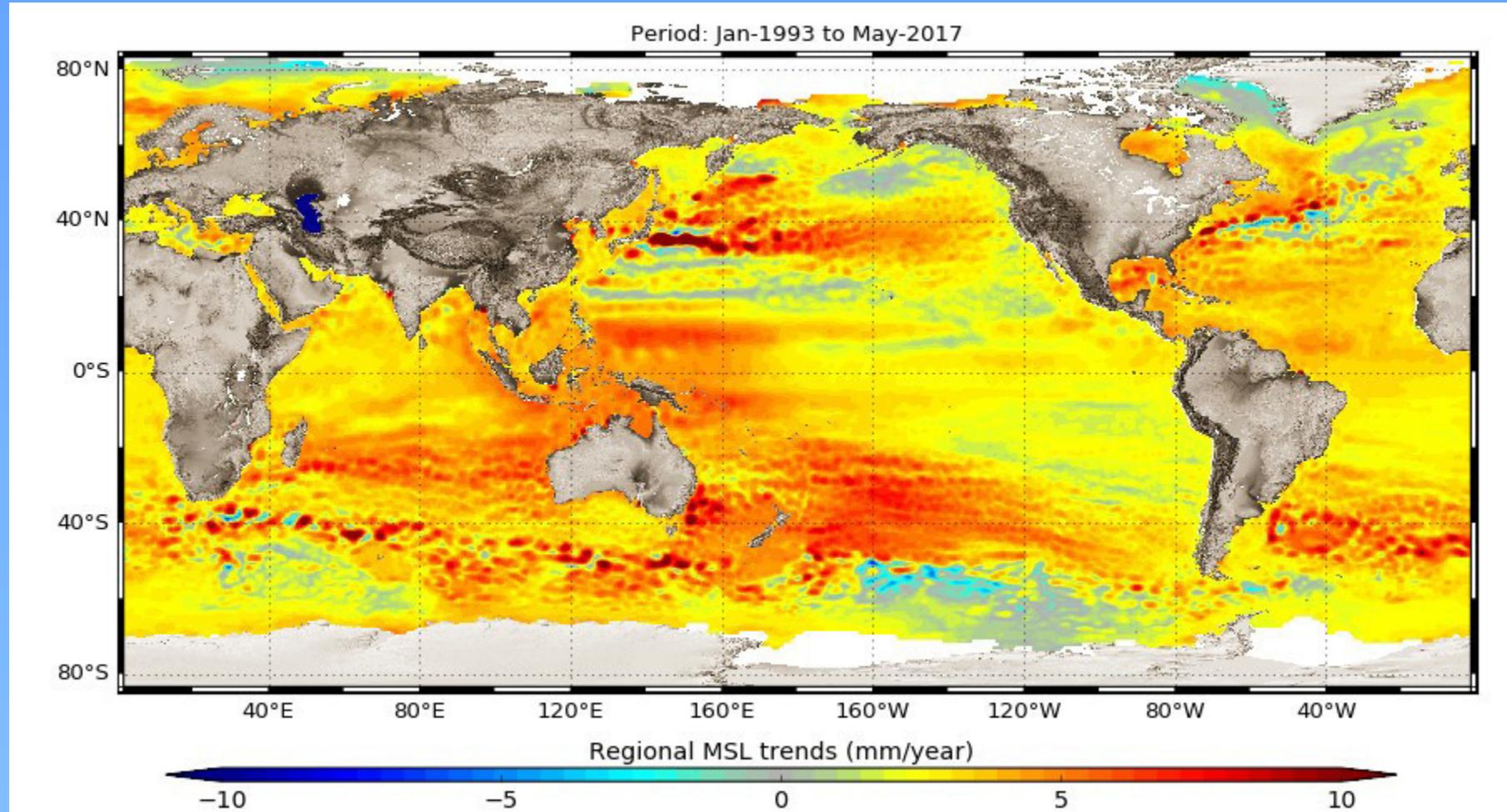
Die einzelnen Beiträge zum Anstieg des Meeresspiegels



<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OceanCooling/page5.php>

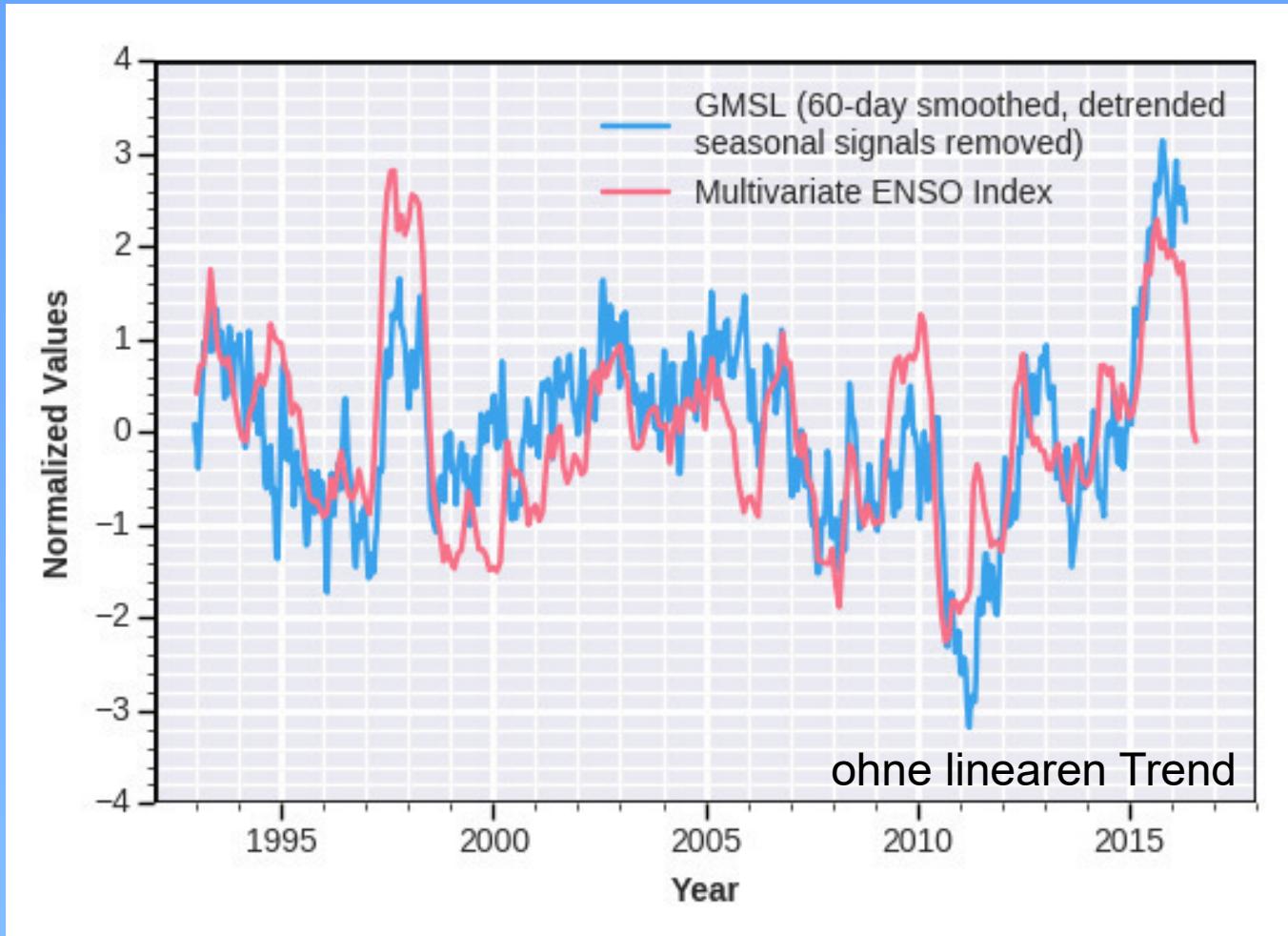
Der Meeresspiegel

An einigen Küsten gegenwärtig sogar um ca. 1 cm/Jahr,
das reflektiert den Einfluss der Ozeanzirkulation



seit 1900 im weltweiten Durchschnitt ca. 20 cm

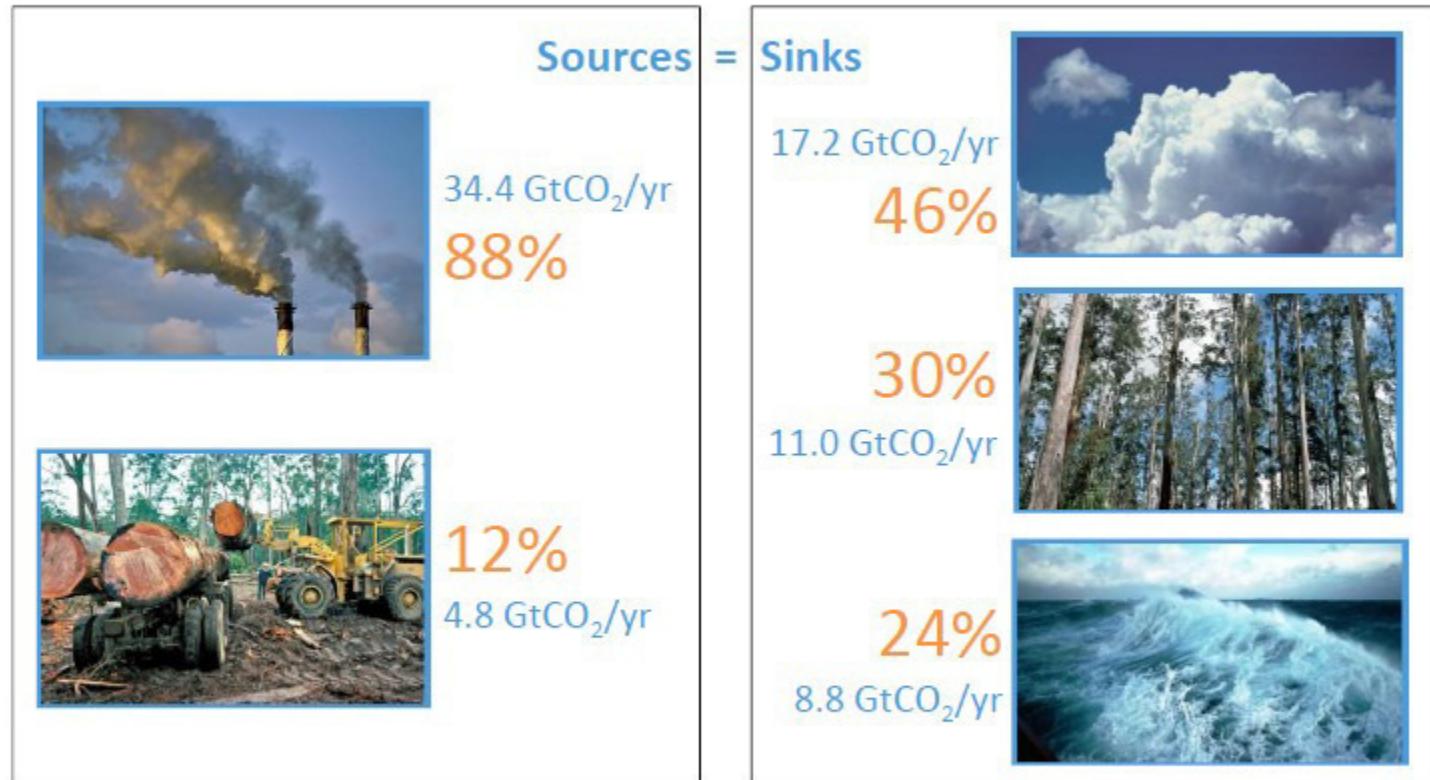
Meeresspiegelschwankungen durch El Niño/Southern Oscillation (ENSO)



Die CO₂-Bilanz 2007-2016



Fate of anthropogenic CO₂ emissions (2007–2016)



Source: [CDIAC](#); [NOAA-ESRL](#); [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)

Der Ozean nimmt CO₂ auf

Gehalt des anthropogenen CO₂ in der Wassersäule

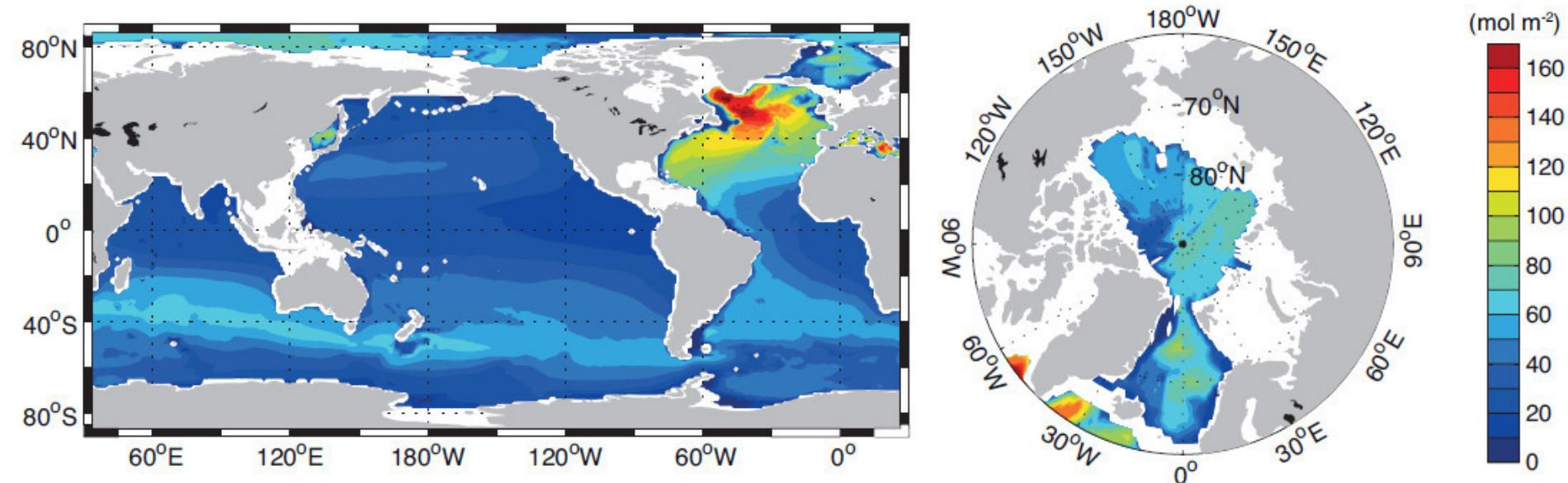
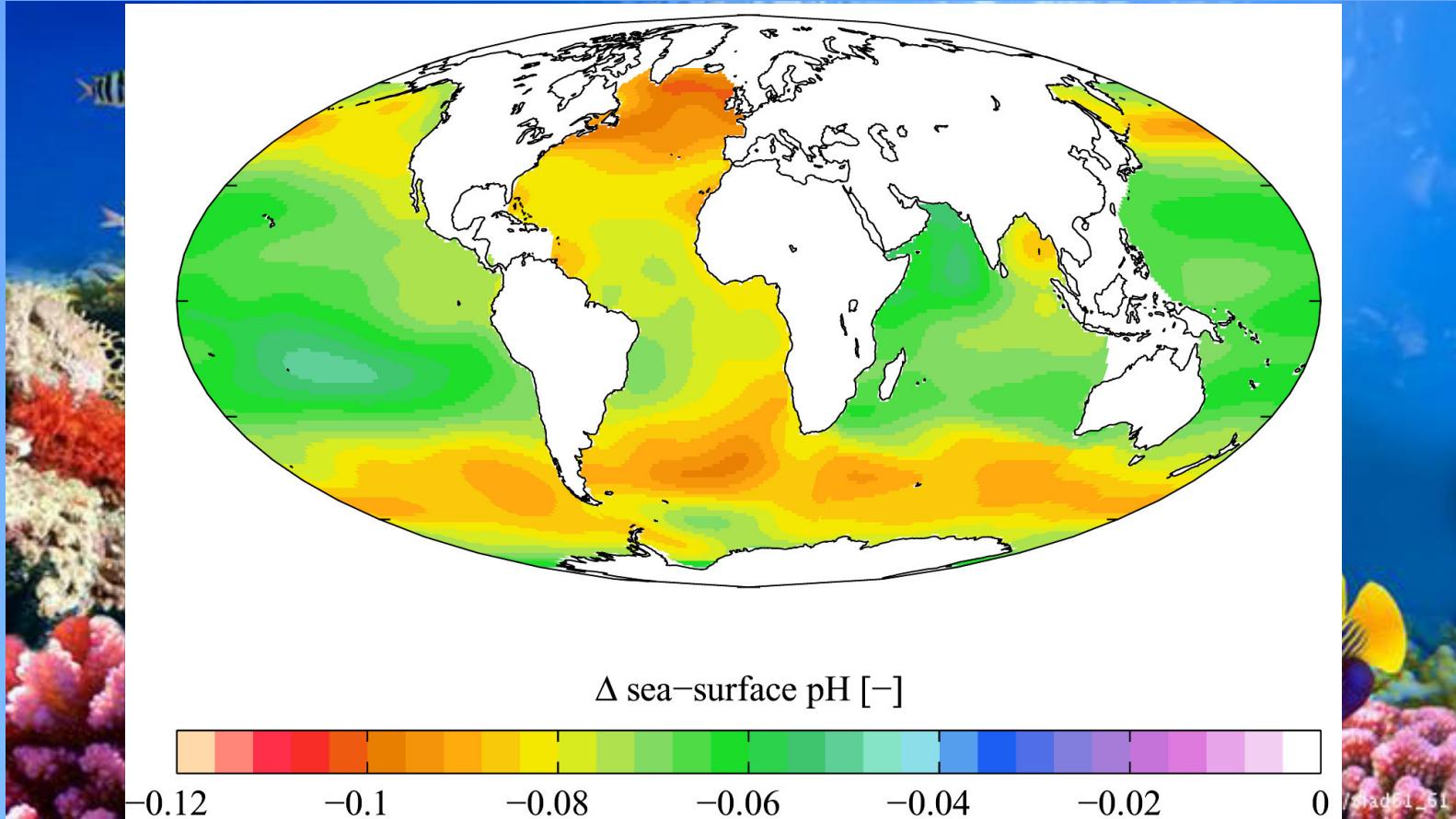


Figure 3.16 | Compilation of the 2010 column inventories (mol m⁻²) of anthropogenic CO₂: the global Ocean excluding the marginal seas (updated from Khatiwala et al., 2009) 150 ± 26 PgC; Arctic Ocean (Tanhua et al., 2009) 2.7 to 3.5 PgC; the Nordic Seas (Olsen et al., 2010) 1.0 to 1.6 PgC; the Mediterranean Sea (Schneider et al., 2010) 1.6 to 2.5 PgC; the Sea of Japan(Park et al., 2006) 0.40 ± 0.06 PgC. From Khatiwala et al. (2013).

IPCC 2013

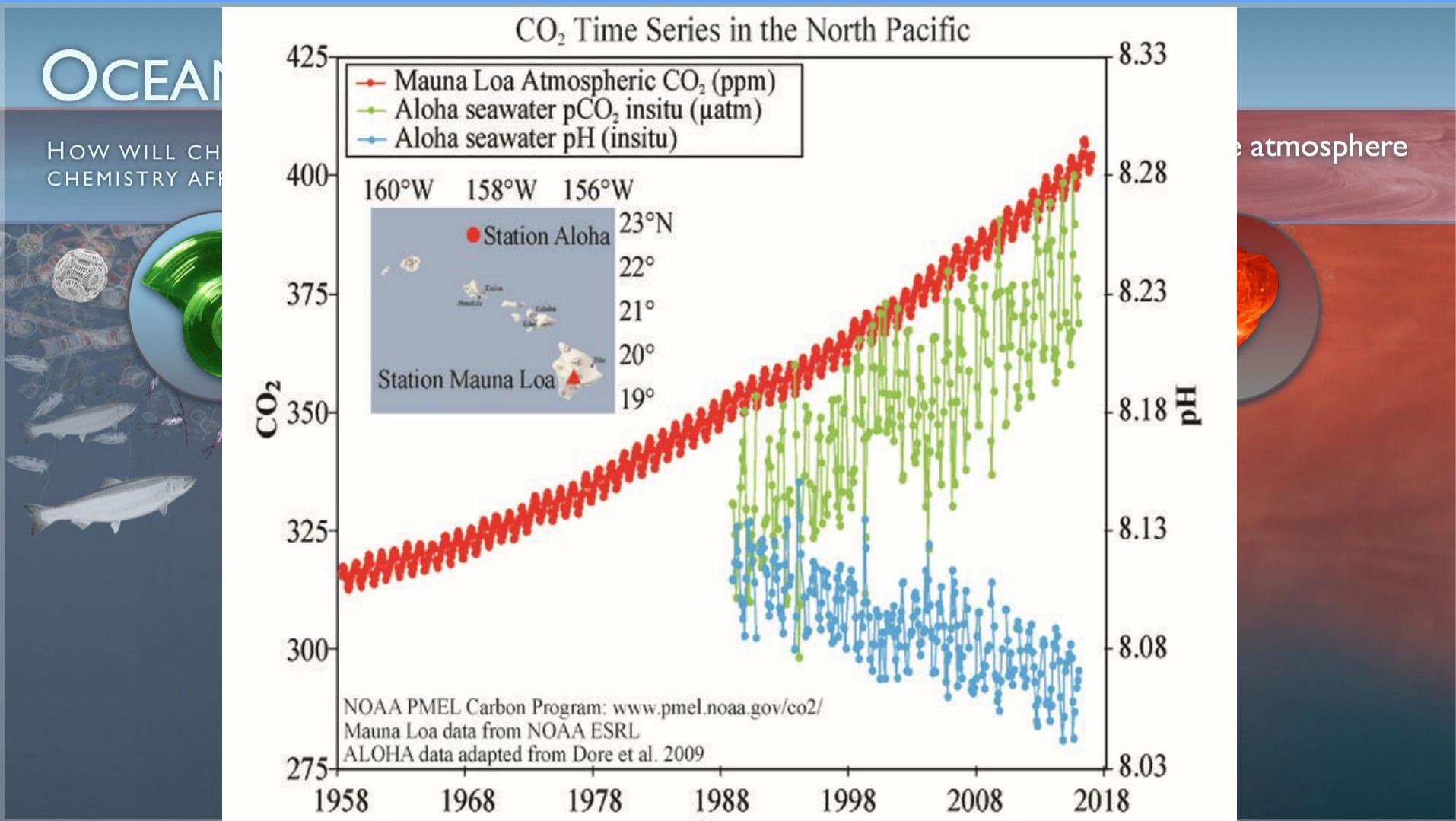
IPCC 2013: “Ocean observations are insufficient to assess whether there has been a change in the rate of total (anthropogenic plus natural) carbon uptake by the global ocean.”

Die Versauerung der Meere infolge der Aufnahme von CO₂

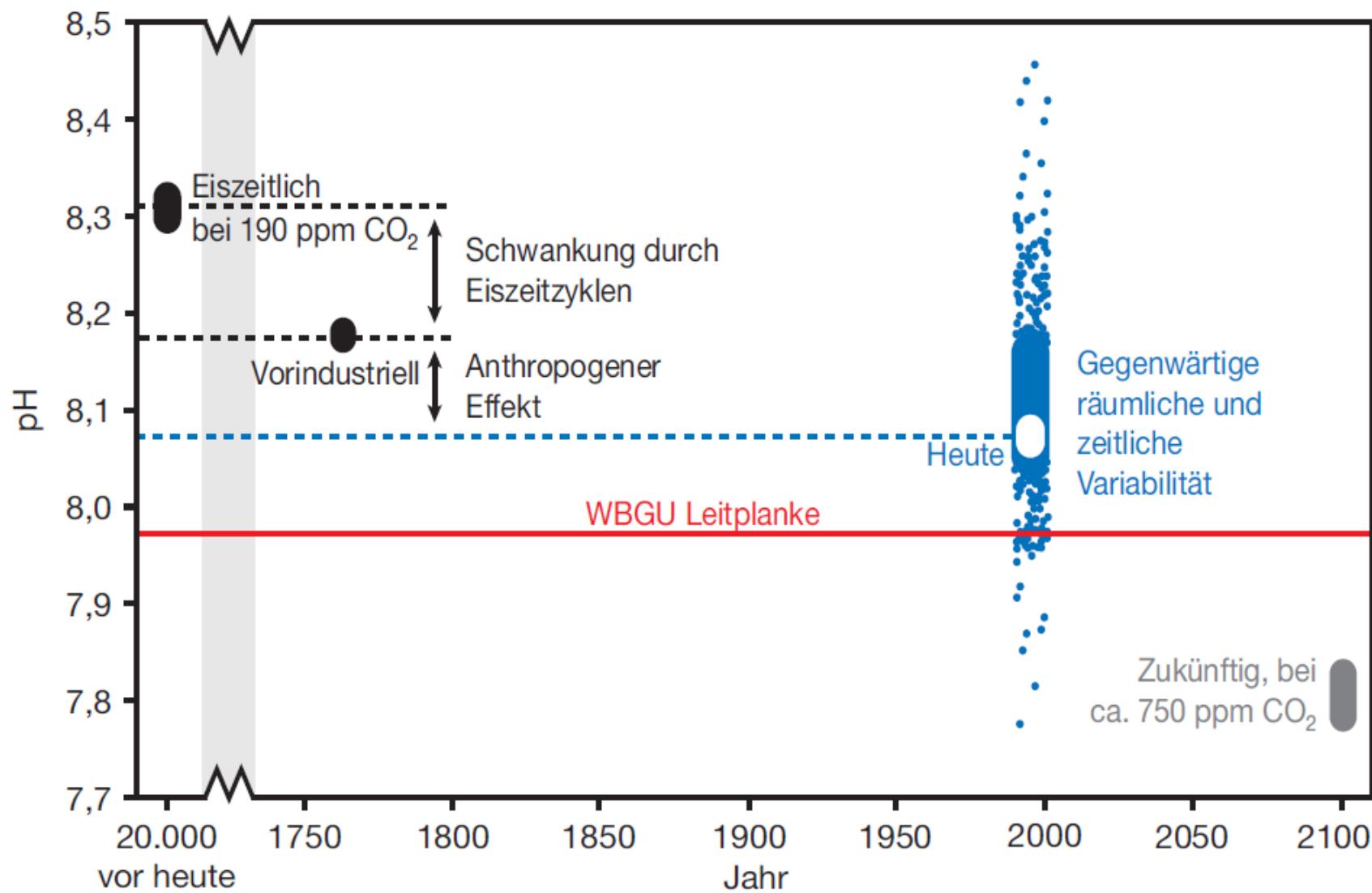


Die Versauerung der Meere ist bereits messbar

Die Chemie der Versauerung



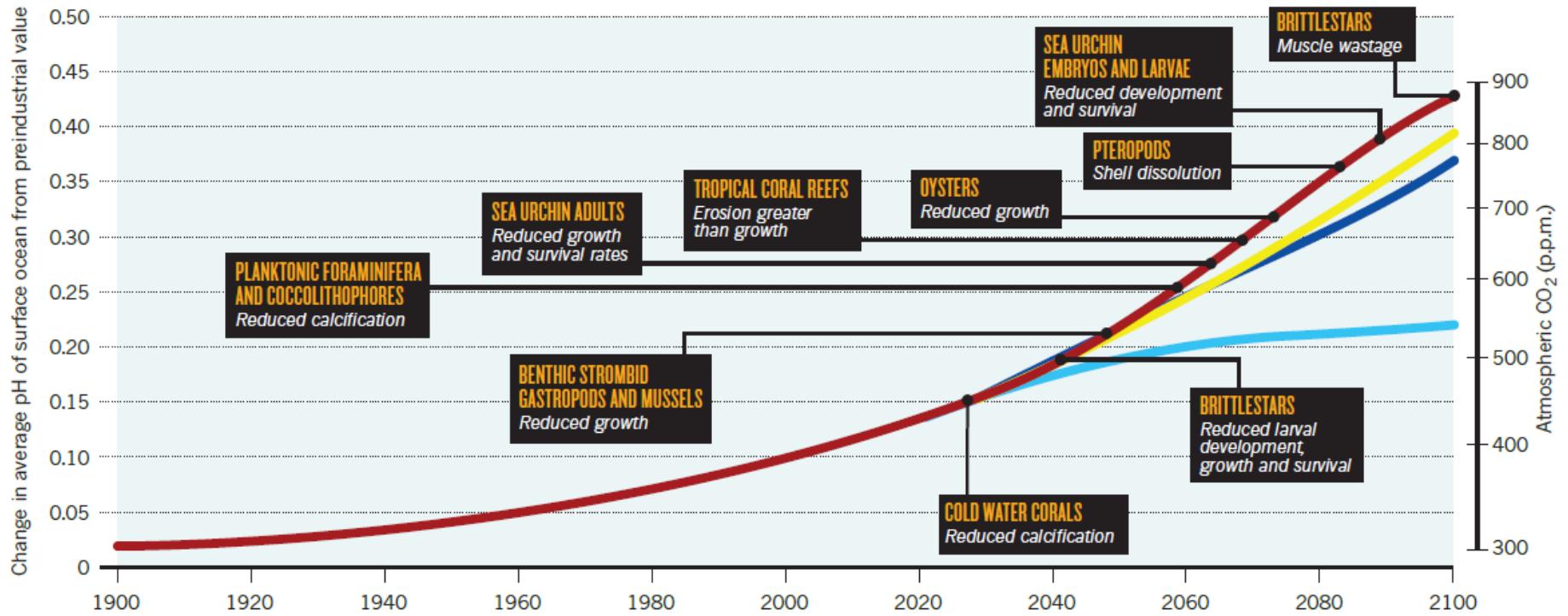
Projektion zur Ozeanversauerung



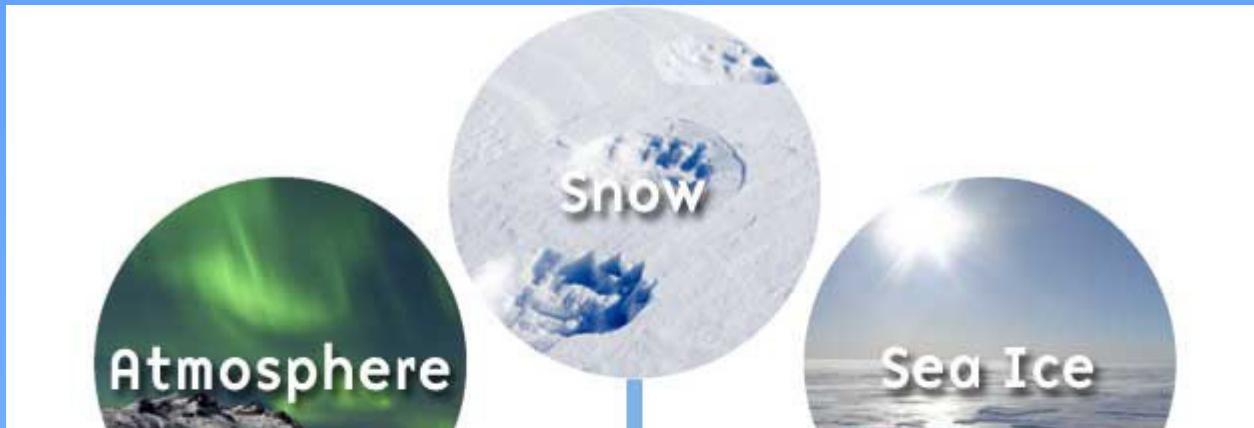
Mögliche Folgen der Meeresversauerung

FUTURE SHOCKS

Experiments suggest that marine organisms will respond differently to rising ocean acidity, depending on their physiology and habitat. The speed of acidification, and the timing of effects, will depend on future emissions of carbon dioxide (four scenarios are shown, in different colours).



Die Kryosphäre



Aus dem Griechischen „krios“, was „kalt“ bedeutet. Die Kryosphäre beinhaltet die Komponenten des Klimasystems, die zumindest während eines Teils des Jahres Temperaturen unter 0°C aufweisen.



Die Kryosphäre, ihre Komponenten und deren Raum- und Zeitskalen

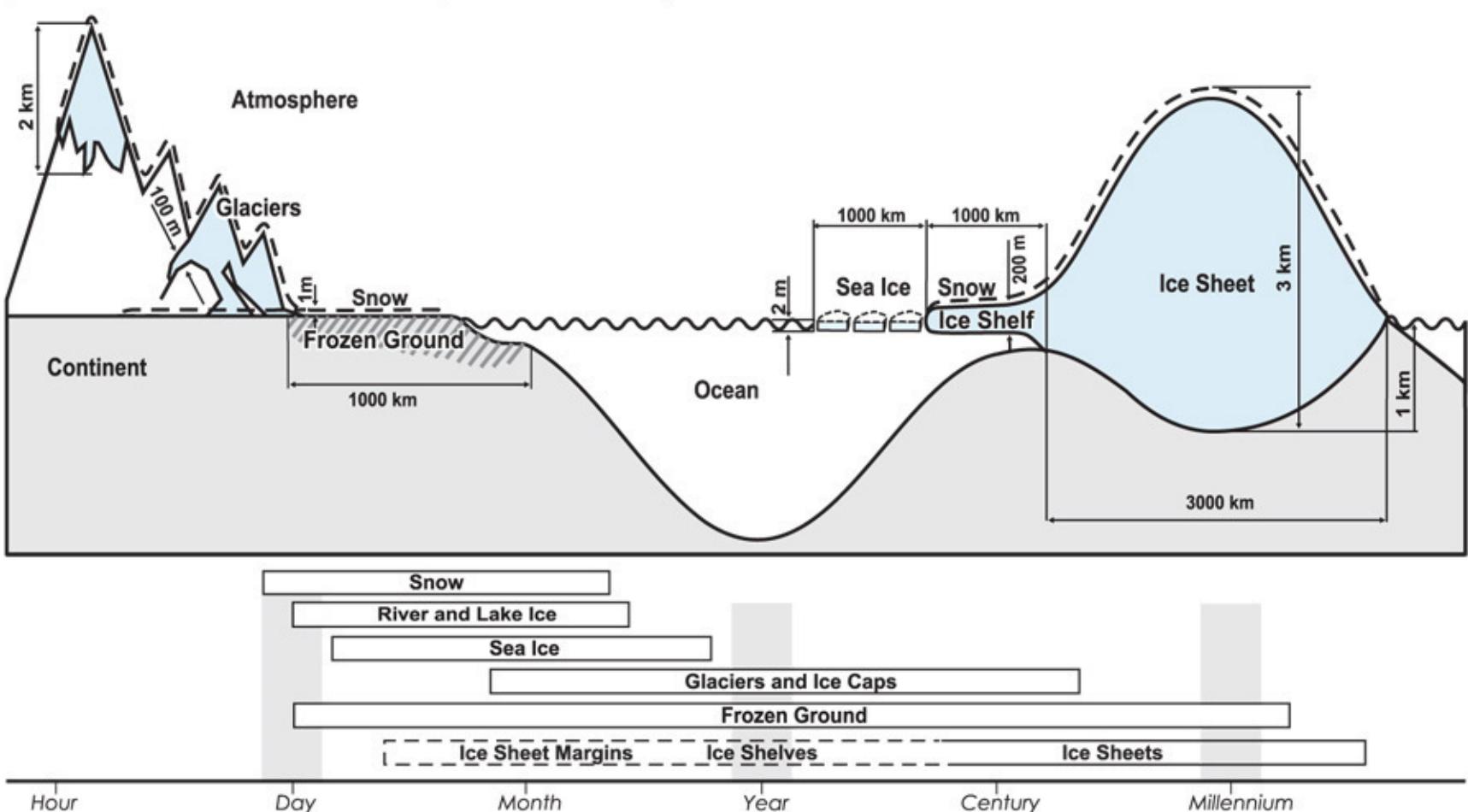


Fig. 1.1 Components of the cryosphere and their typical time scales. Source: Fig. 4.1 of IPCC (2007).

Einige Zahlen

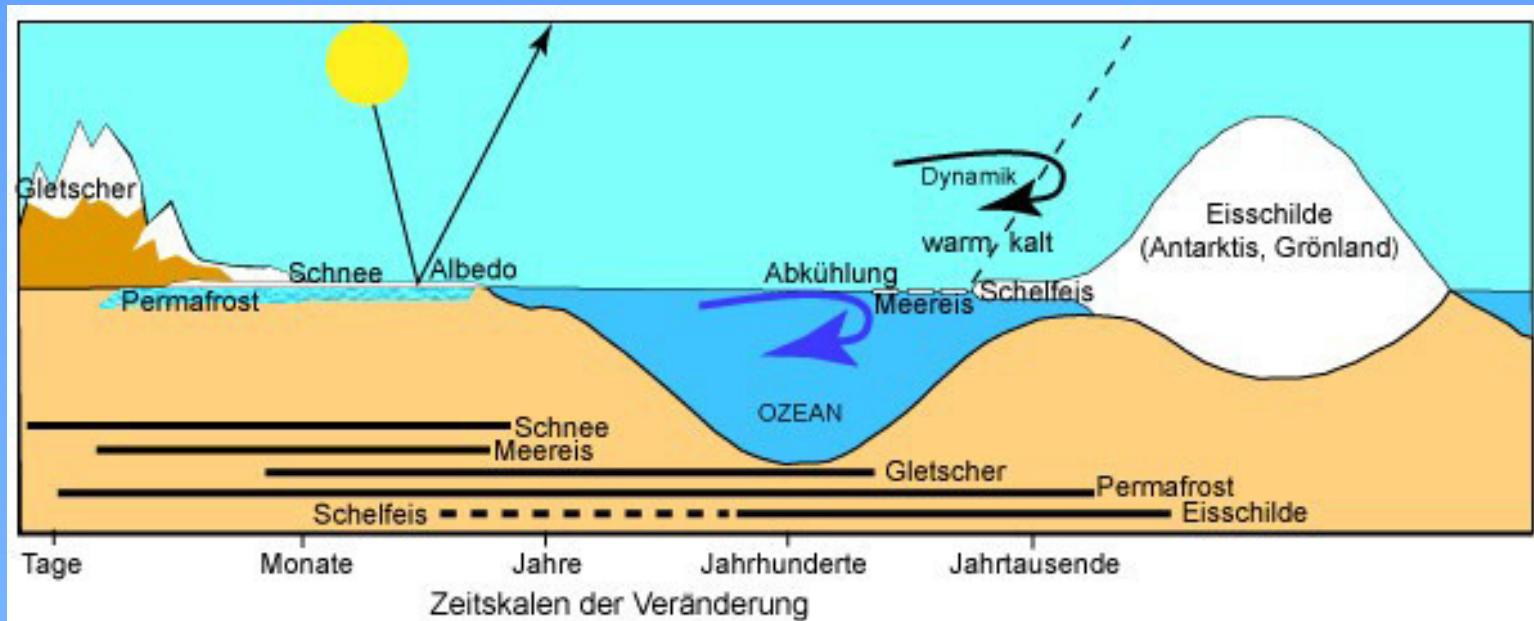
Representative Statistics for Cryospheric Components

Ice on Land	Percent of Global Land Surface ^a	Sea Level Equivalent ^b (metres)
Antarctic ice sheet ^c	8.3	58.3
Greenland ice sheet ^d	1.2	7.36
Glaciers ^e	0.5	0.41
Terrestrial permafrost ^f	9–12	0.02–0.10 ^g
Seasonally frozen ground ^h	33	Not applicable
Seasonal snow cover (seasonally variable) ⁱ	1.3–30.6	0.001–0.01
Northern Hemisphere freshwater (lake and river) ice ^j	1.1	Not applicable
Total ^k	52.0–55.0%	~66.1
Ice in the Ocean	Percent of Global Ocean Area ^a	Volume ^l (10 ³ km ³)
Antarctic ice shelves	0.45 ^m	~380
Antarctic sea ice, austral summer (spring) ⁿ	0.8 (5.2)	3.4 (11.1)
Arctic sea ice, boreal autumn (winter/spring) ⁿ	1.7 (3.9)	13.0 (16.5)
Sub-sea permafrost ^o	~0.8	Not available
Total ^p	5.3–7.3	

Source: IPCC 2013

<http://sites.gsu.edu/geog1112/lab-8-recent-climate-variability-change-part-2-under-development/>

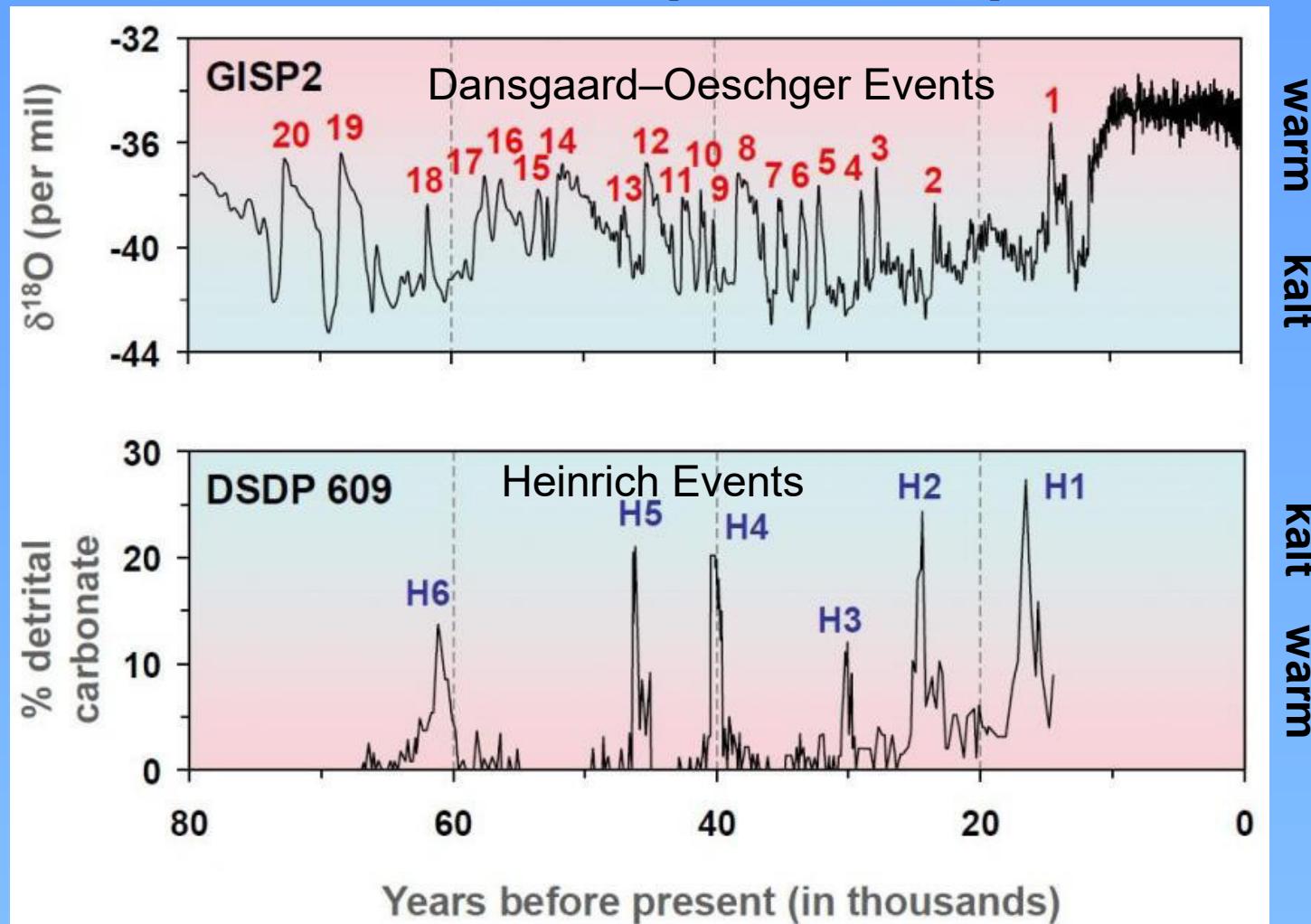
Rolle der Kryosphäre für das Klima



<http://bildungsserver.hamburg.de/eis-und-schnee-nav/2118194/kryosphaere/>

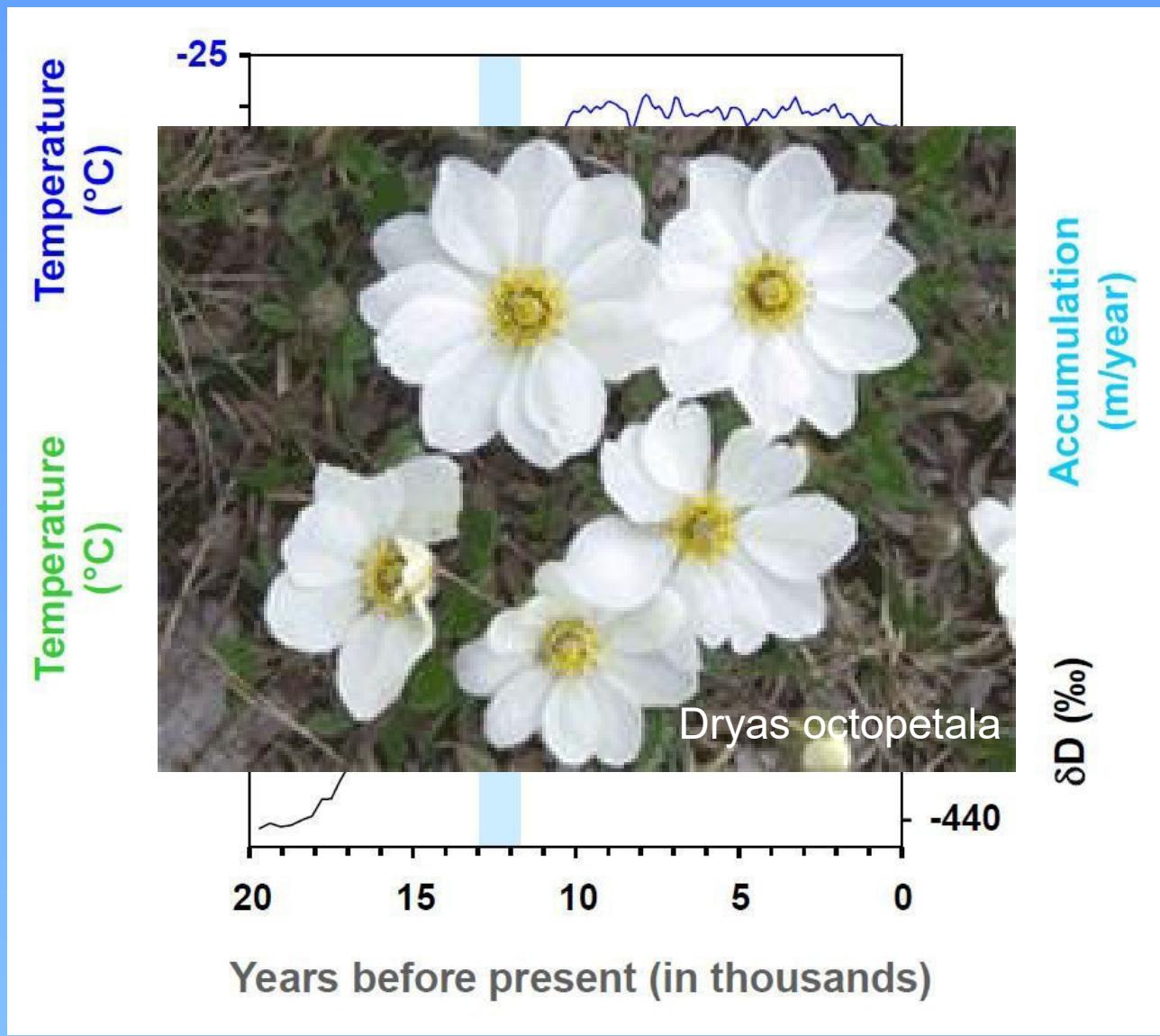
...beeinflusst die Strahlungsbilanz der Erde, die Zirkulation der Atmosphäre und des Ozeans und spielt bei globalen Klimaänderungen eine herausragende Rolle

Heinrich Events während des letzten Glazials (Eiszeit)



www.ncdc.noaa.gov/abrupt-climate-change/Heinrich%20and%20Dansgaard%20Events

The Younger Dryas Event

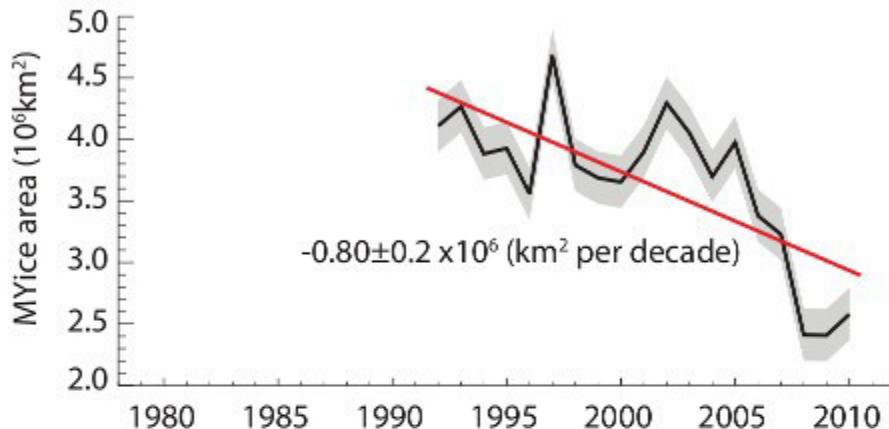


<https://www.ncdc.noaa.gov/abrupt-climate-change/The%20Younger%20Dryas>

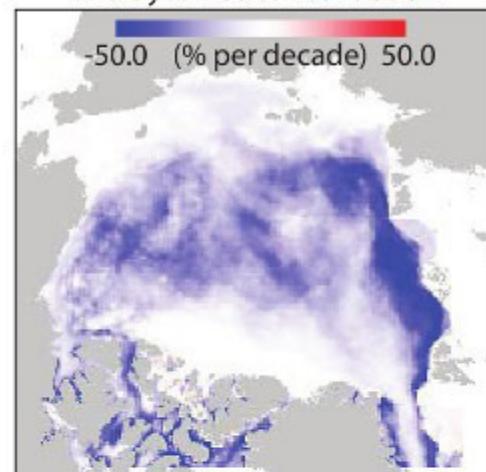
Vieljähriges Meereis und Eis-Dicke

Arktis

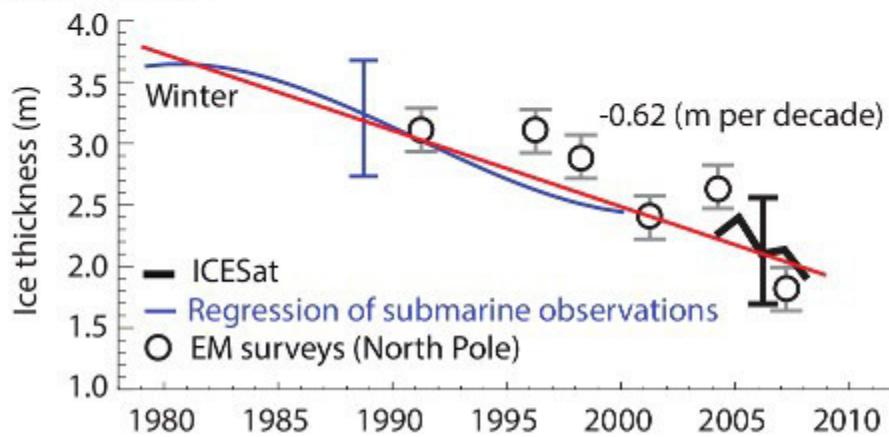
a) Multiyear ice coverage



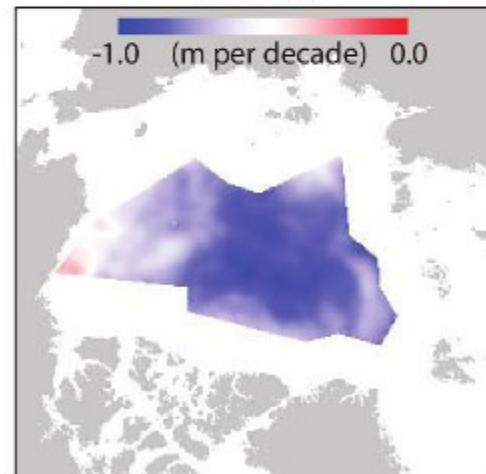
Multiyear ice concentration



b) Ice thickness

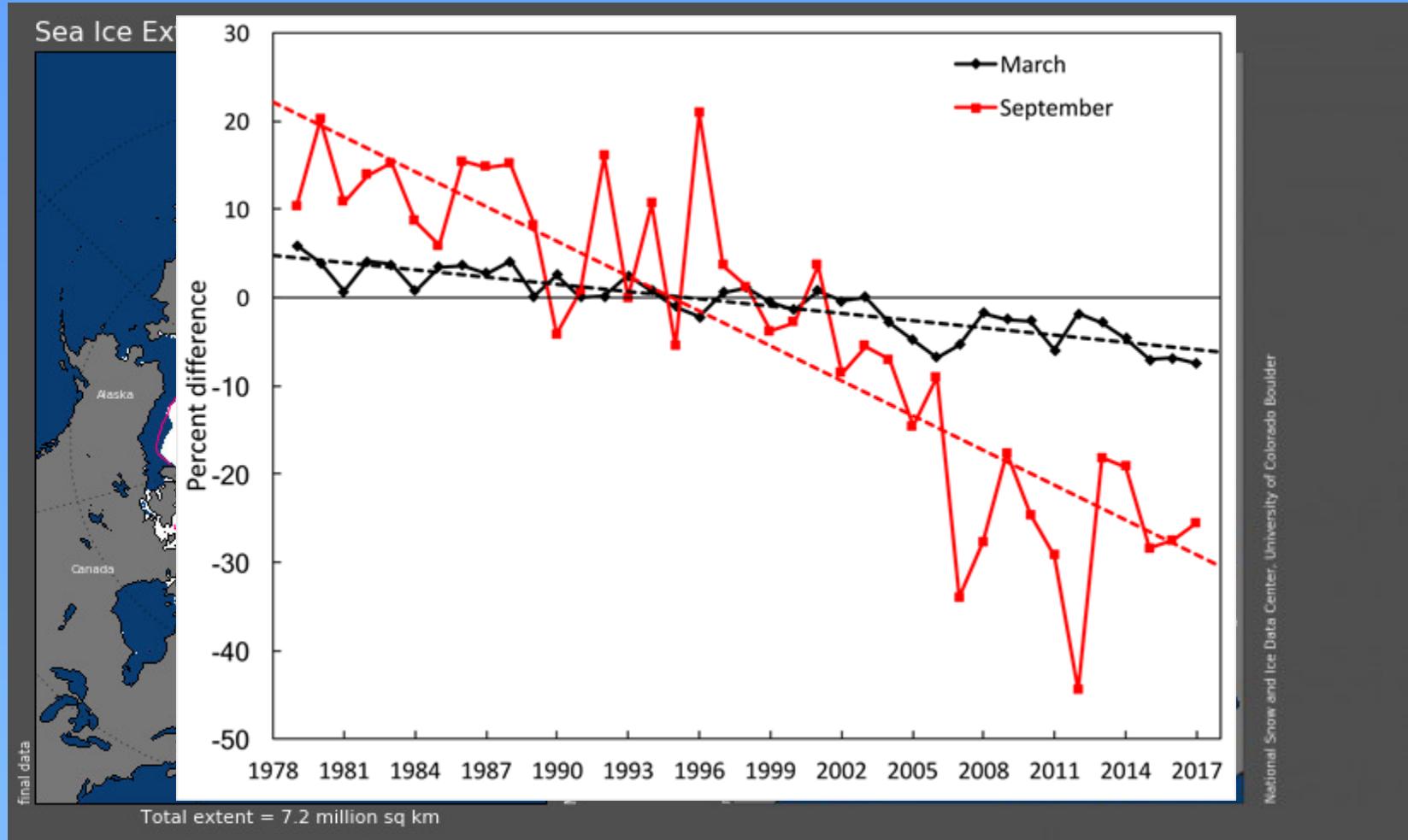


Thickness



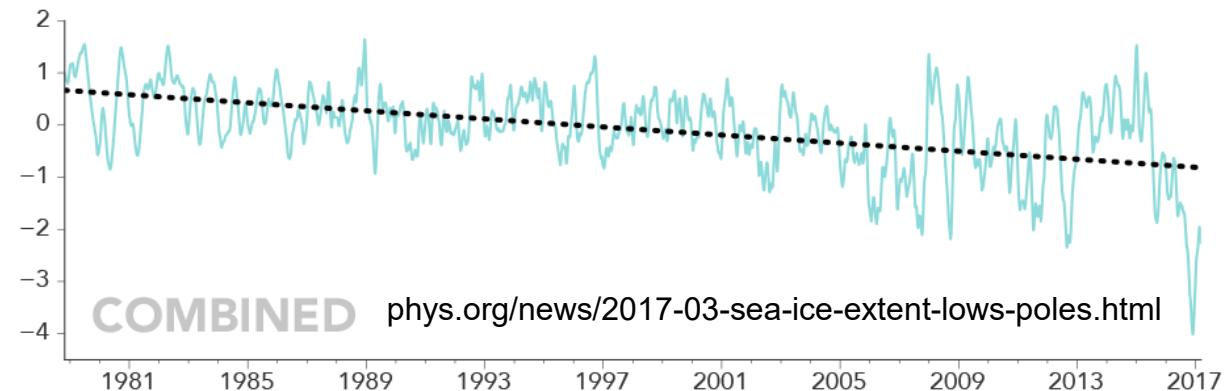
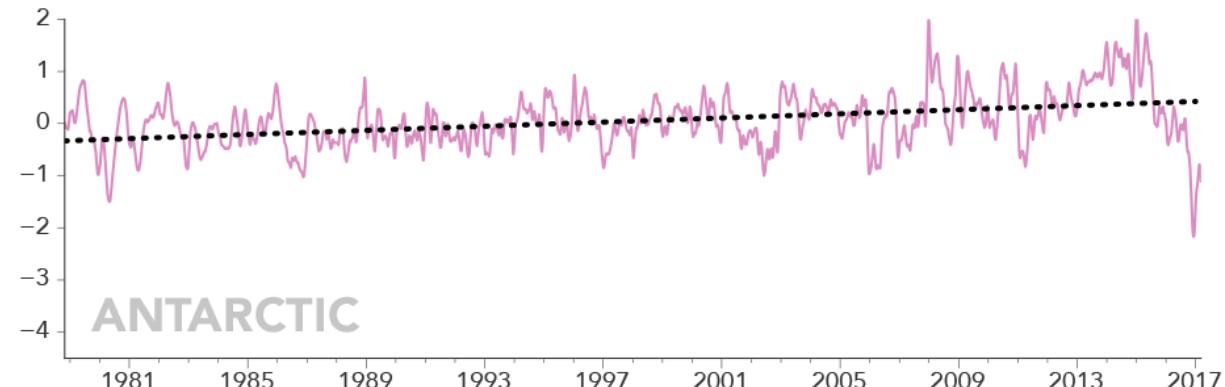
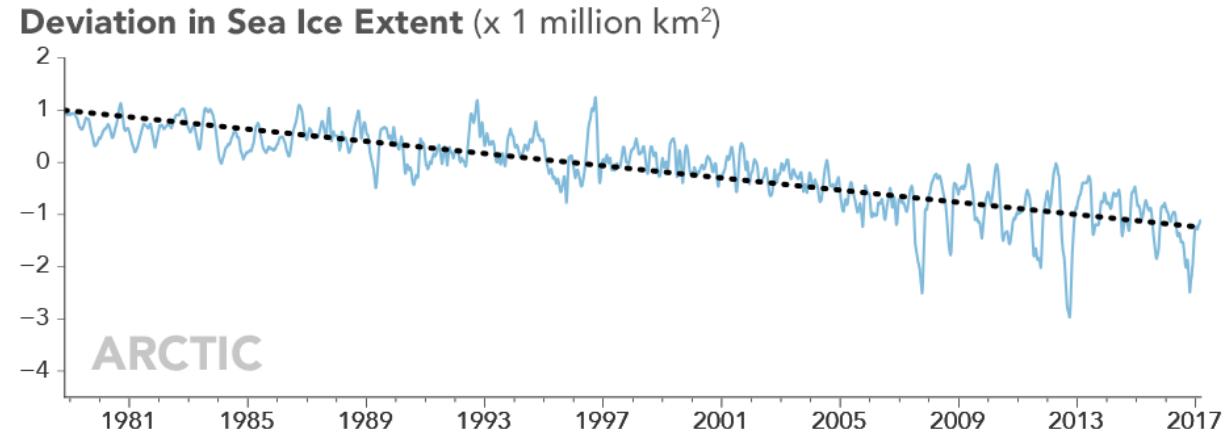
www.metoffice.gov.uk/research/climate/cryosphere-oceans/sea-ice

Das arktische Meereis



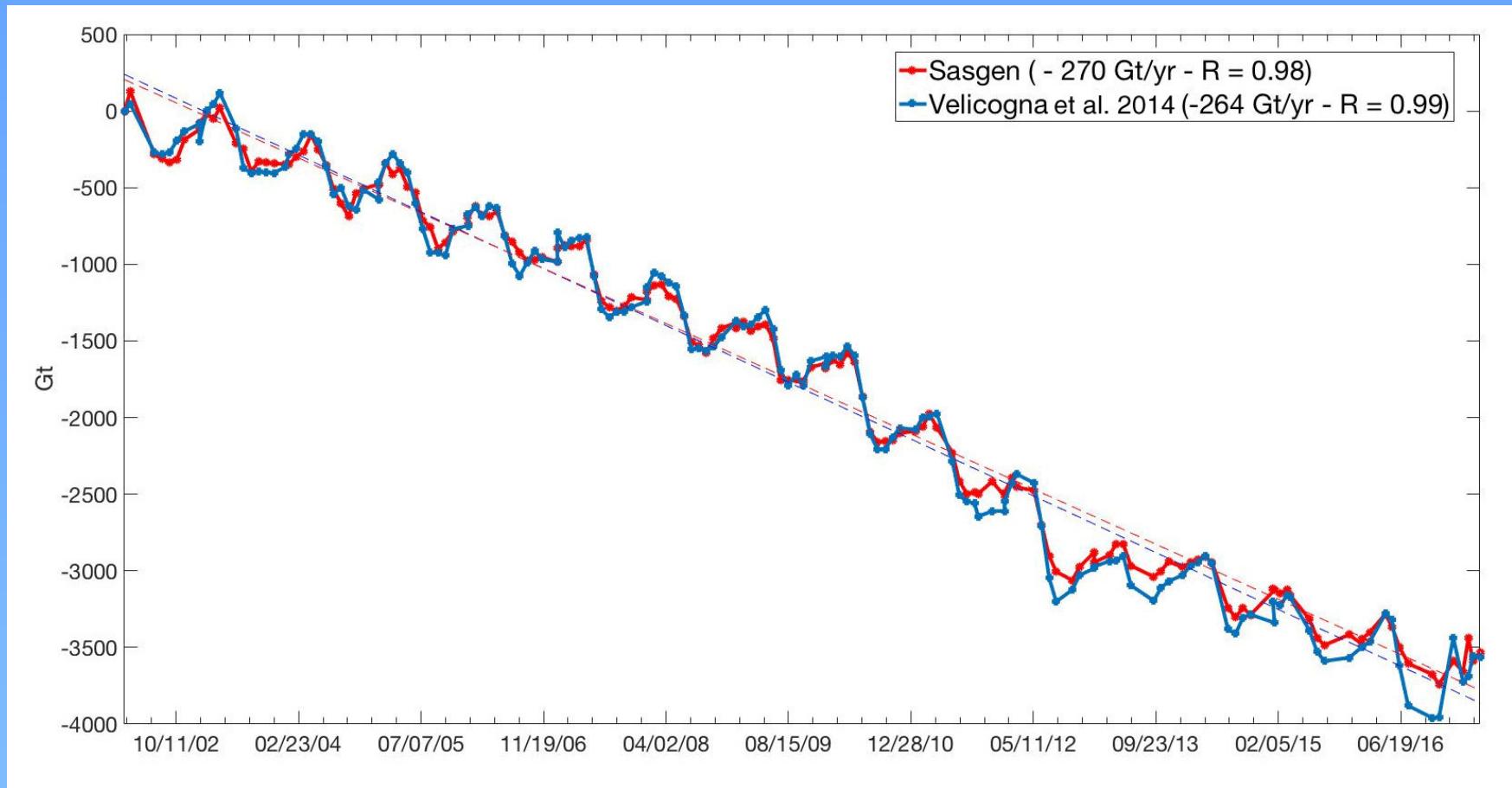
...entspricht ca. 40% Rückgang der Meereisfläche seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979

Meereis global



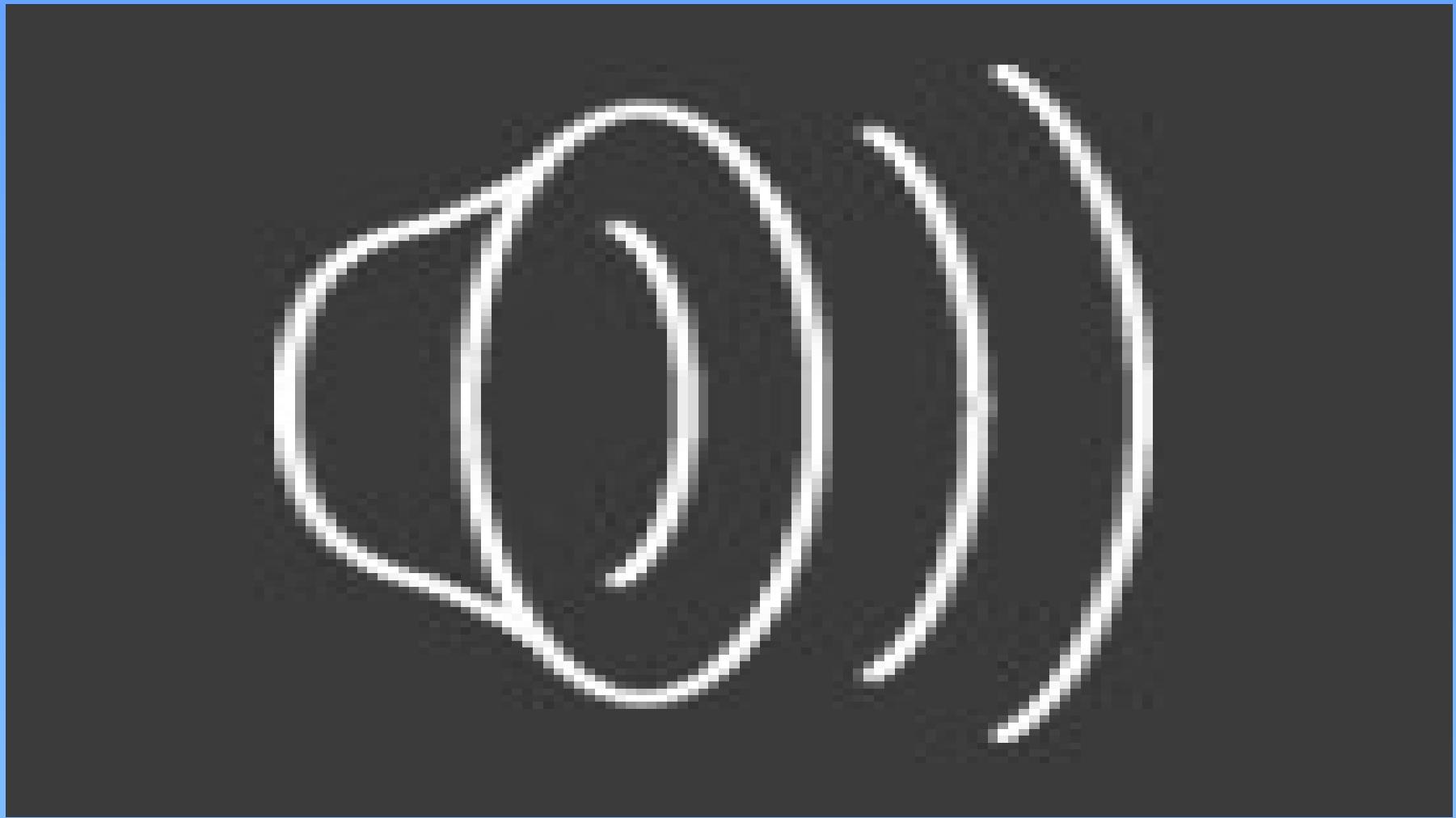
phys.org/news/2017-03-sea-ice-extent-lows-poles.html

Der Massenverlust in Grönland seit 2002



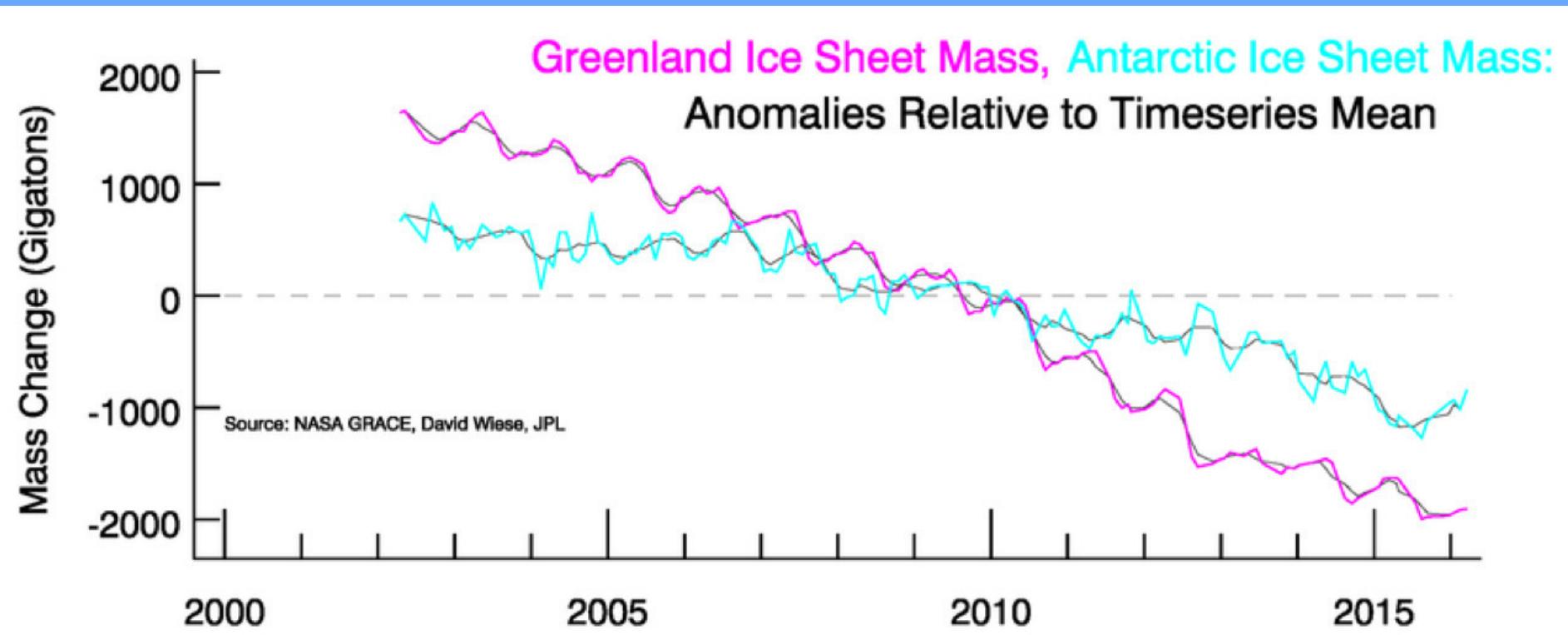
www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/697/Greenland-Ice-Sheet

Die Eisschmelze in Grönland



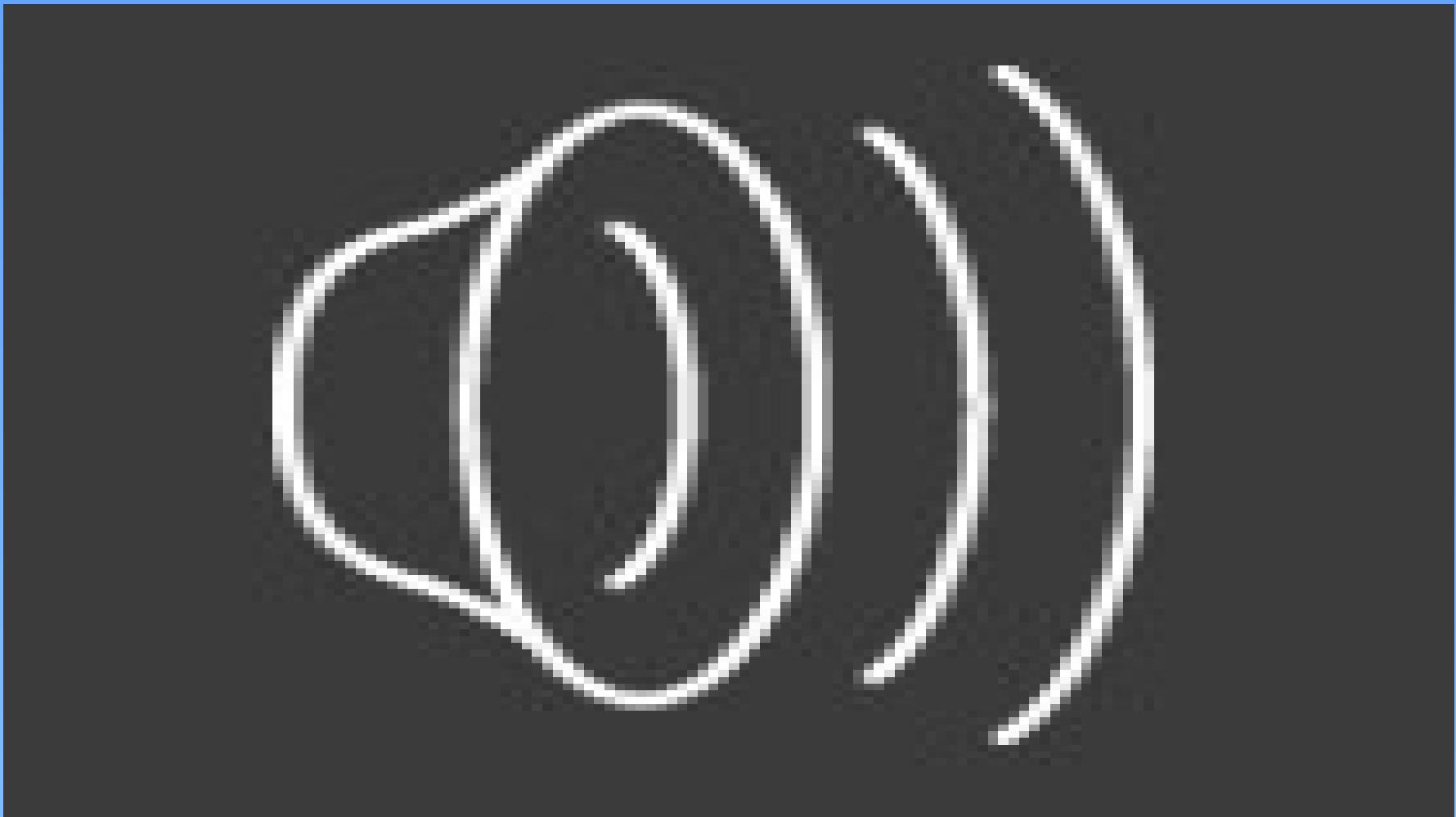
NASA 2015

Der Massenverlust in der Antarktis seit 2002 im Vergleich



<https://globalcryospherewatch.org/assessments/icesheets/>

Die Eisschmelze in der Antarktis

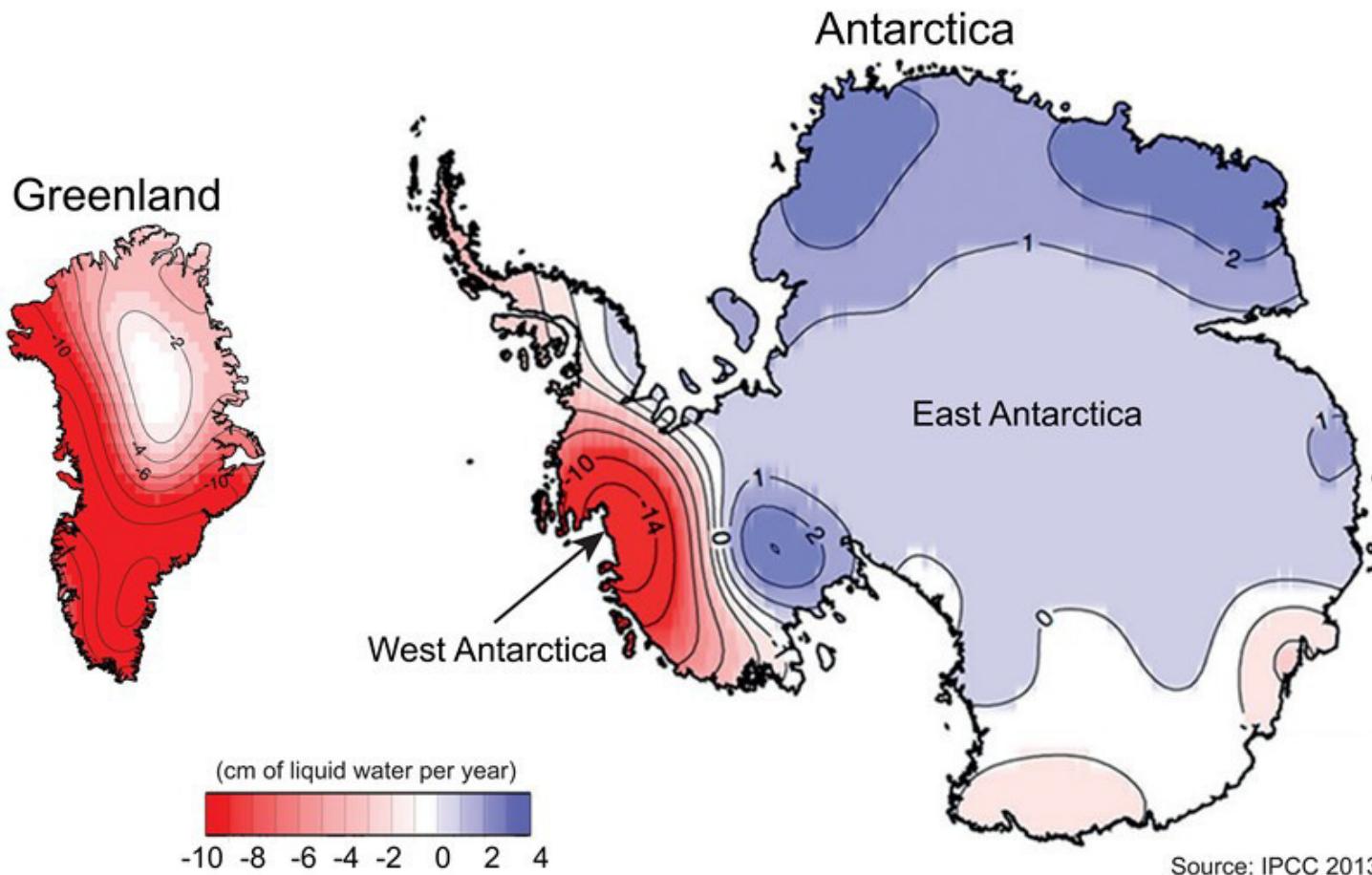


NASA 2015

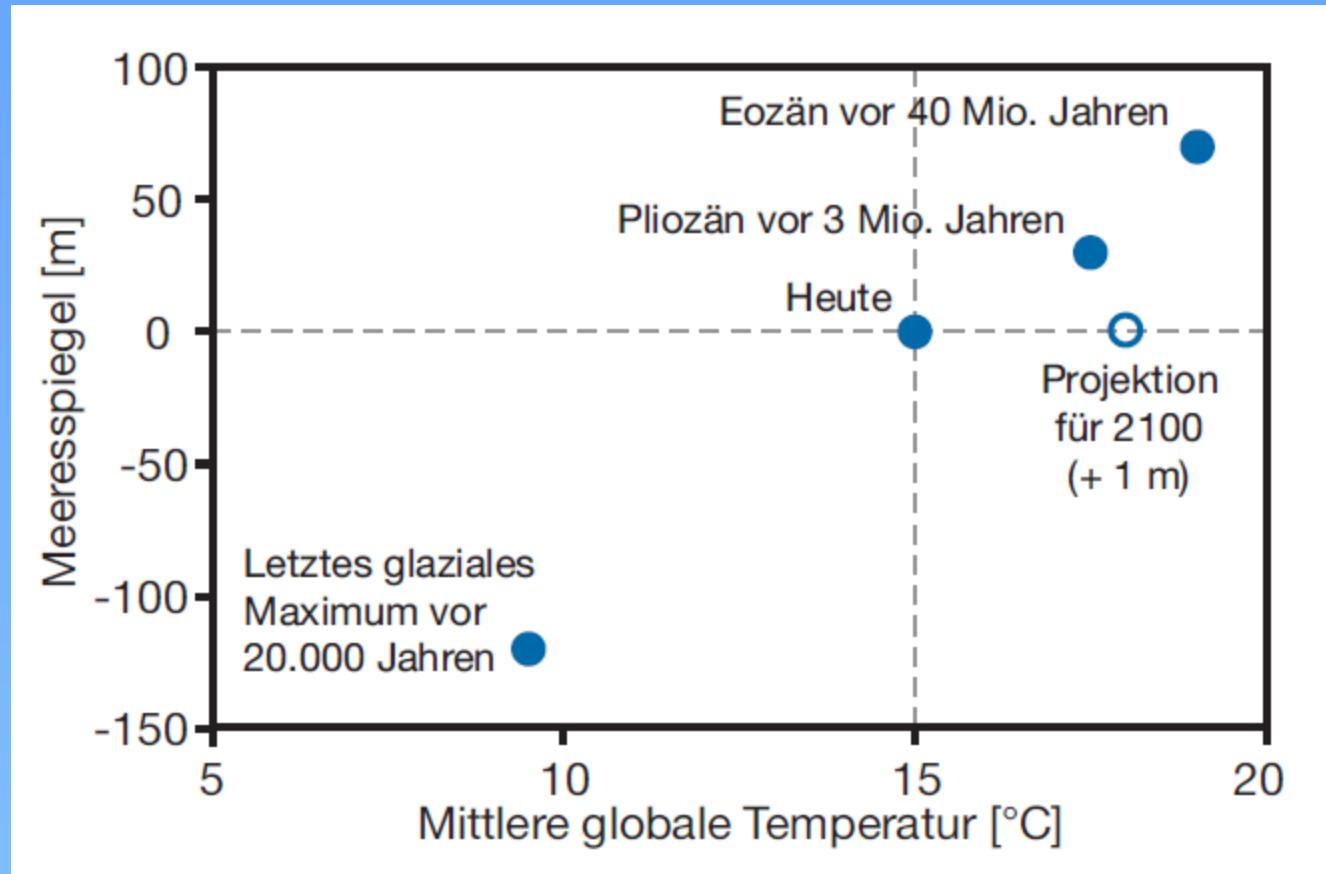
Änderungen der Eismasse

Greenland and Antarctica Ice Changes from 2003-2012

Red = ice loss
Blue = ice gain



Vergangene Veränderungen der Eismasse und der Meeresspiegel



WBGU 2006

Beiträge zum Meeresspiegel

Global Mean Sea Level Budget (mm yr⁻¹) over Different Time Intervals

The values in parentheses are the range in possible values for each observed estimate.

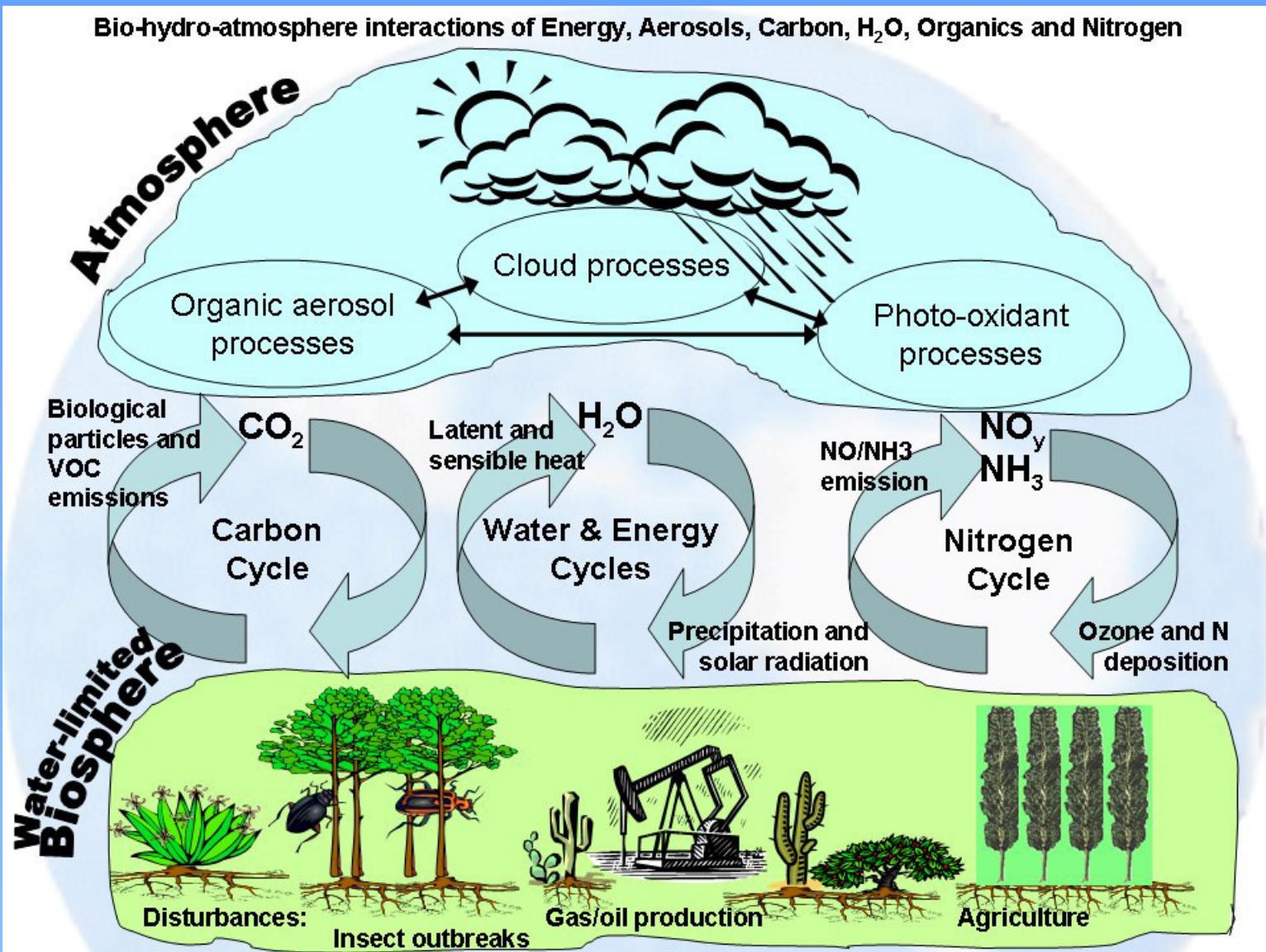
Source	1971–2010	1993–2010
Observed contributions to global mean sea level (GMSL) rise		
Thermal expansion	0.8 [0.5 to 1.1]	1.1 [0.8 to 1.4]
Glaciers except in Greenland and Antarctica ^a	0.62 [0.25 to 0.99]	0.76 [0.39 to 1.13]
Glaciers in Greenland ^a	0.06 [0.03 to 0.09]	0.10 [0.07 to 0.13] ^b
Greenland ice sheet	–	0.33 [0.25 to 0.41]
Antarctic ice sheet	–	0.27 [0.16 to 0.38]
Land water storage	0.12 [0.03 to 0.22]	0.38 [0.26 to 0.49]
Total of contributions	–	2.8 [2.3 to 3.4]
Observed GMSL rise	2.0 [1.7 to 2.3]	3.2 [2.8 to 3.6]

^a Data for all glaciers extend to 2009, not 2010.

^b This contribution is not included in the total because glaciers in Greenland are included in the observational assessment of the Greenland ice sheet.

Source: IPCC 2013

Vegetation

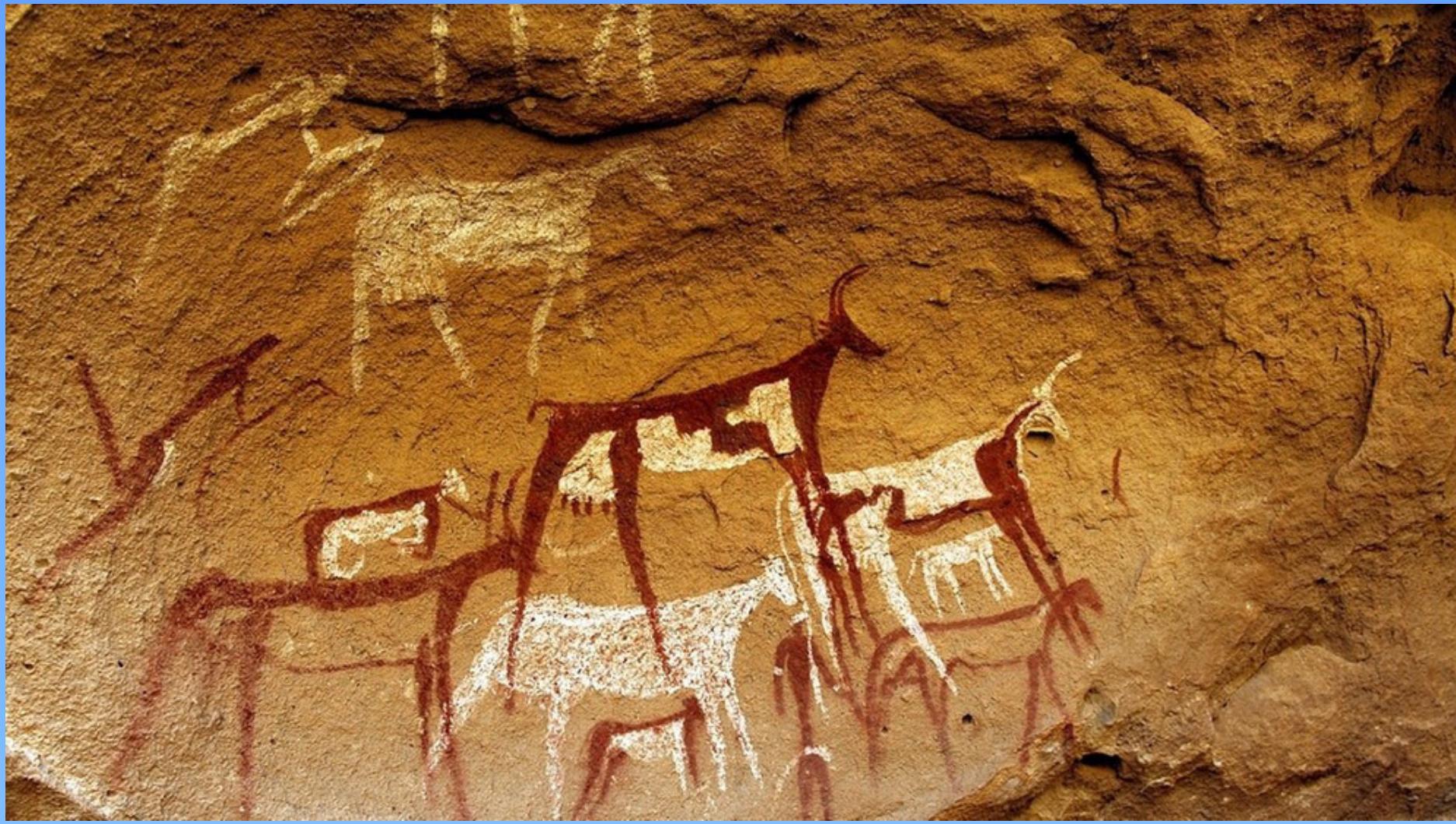


Felszeichnungen zeugen von der Milchvieh-Nutzung in der Sahara



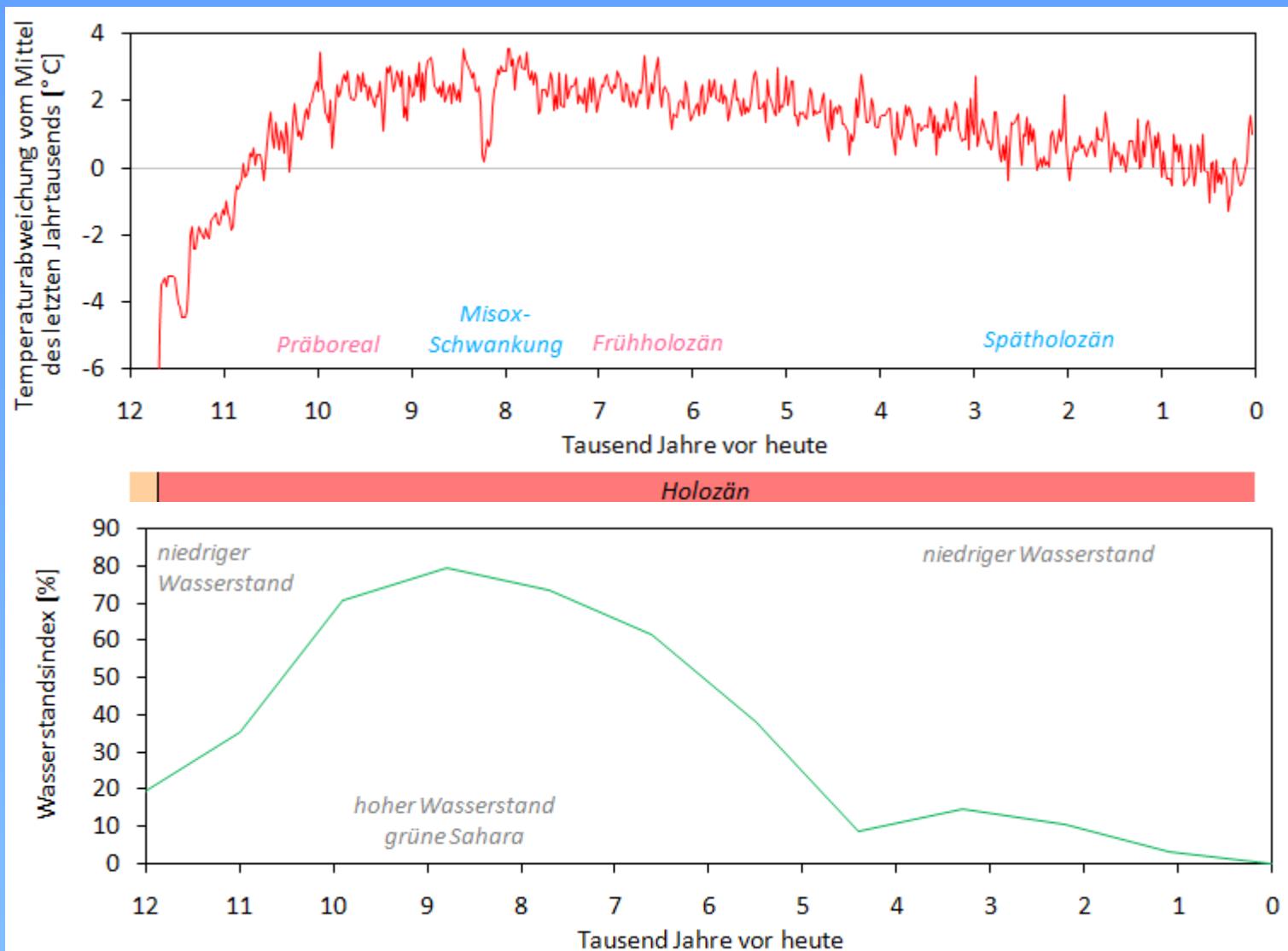
<http://www.sueddeutsche.de/wissen/hoehlenmalerei-in-der-sahara-milchwirtschaft-seit-jahren-1.1389221>

Höhlenmalerei in der Ostsahara

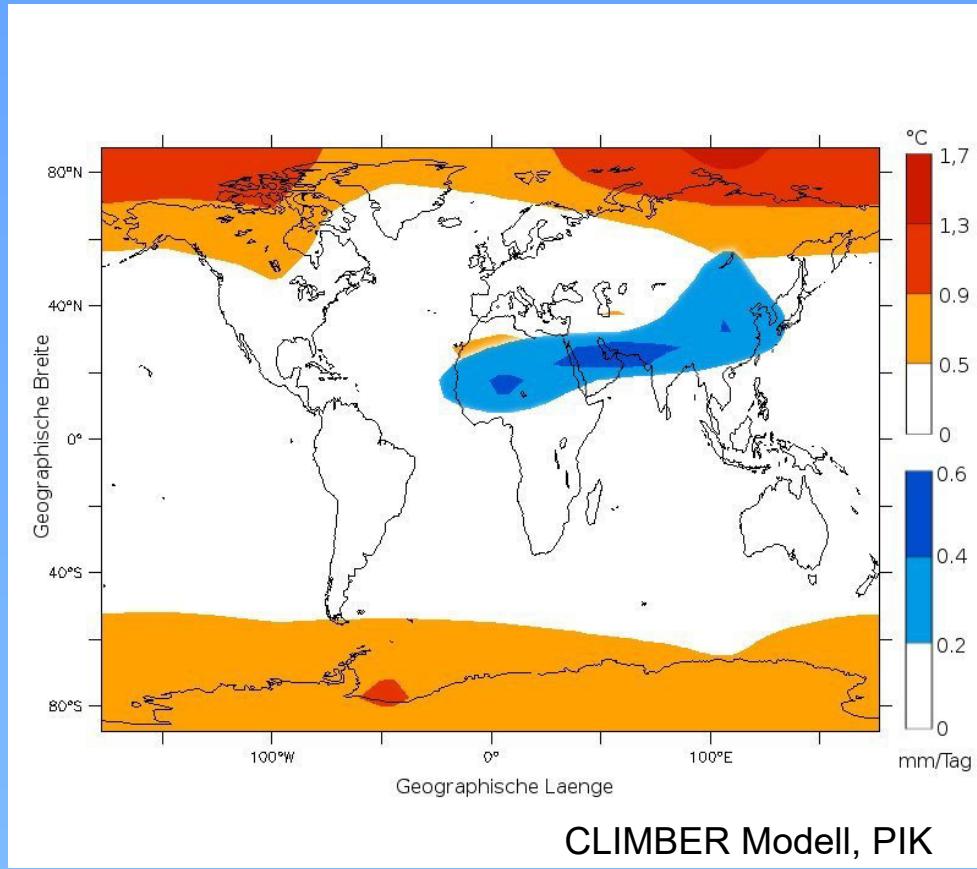


Um den fast 2.000 Meter hohen Gebirgsstock Uwaynat in der Ostsahara sind viele Felsgravuren und -malereien zu finden. Hier wurde in der Jungsteinzeit eine Jagdszene für die Nachwelt festgehalten. Die Sahara war damals eine Savanne, in der sich das Jagen lohnte.

NH-Temperatur und Sahara-Wasser

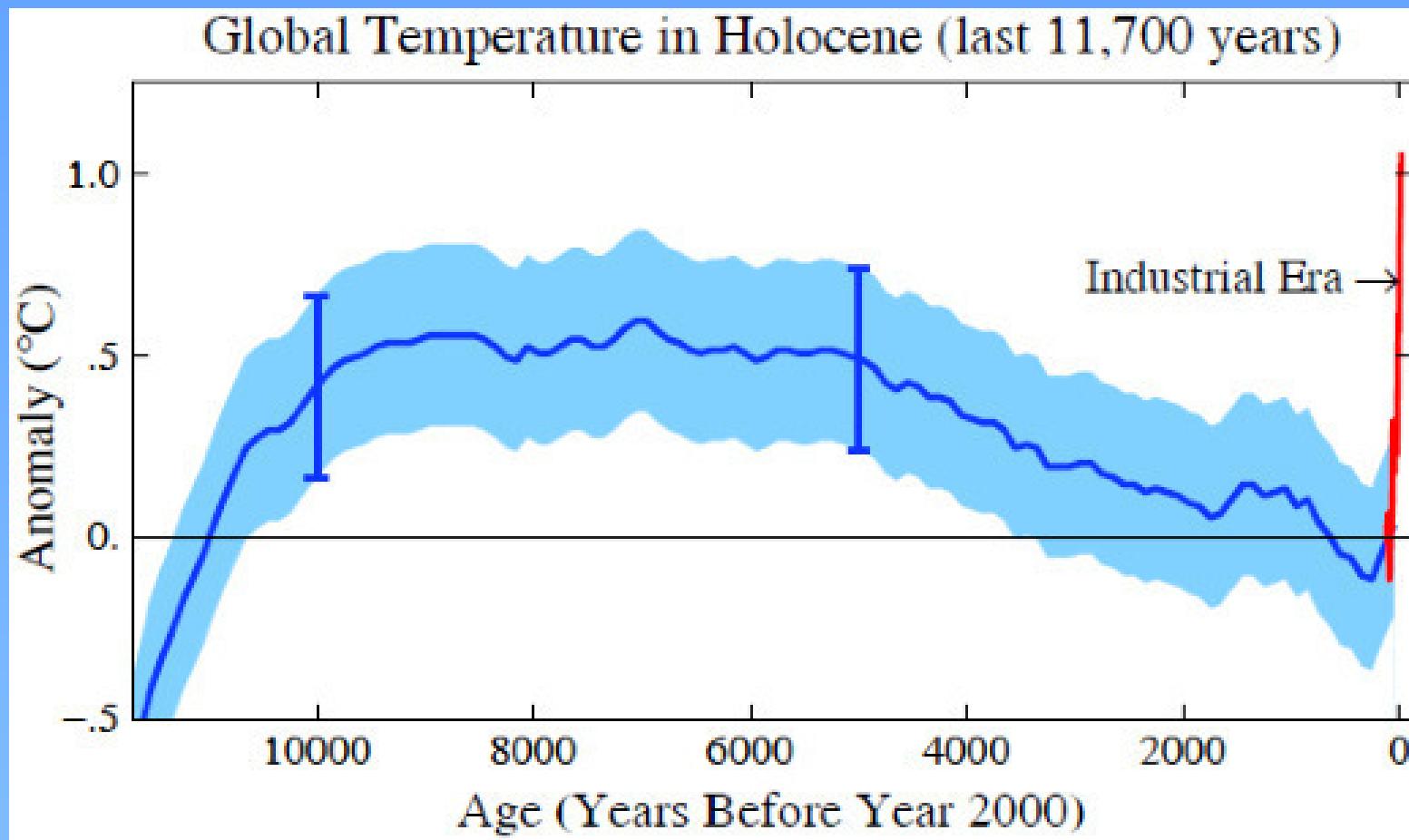


Die „grüne“ Sahara, vor ca. 6000 Jahren



schnelle Klimawechsel infolge einer möglichen Bi-Stabilität des
Systems Vegetation/Atmosphäre in Nordafrika

Die Temperaturentwicklung während des Holozäns

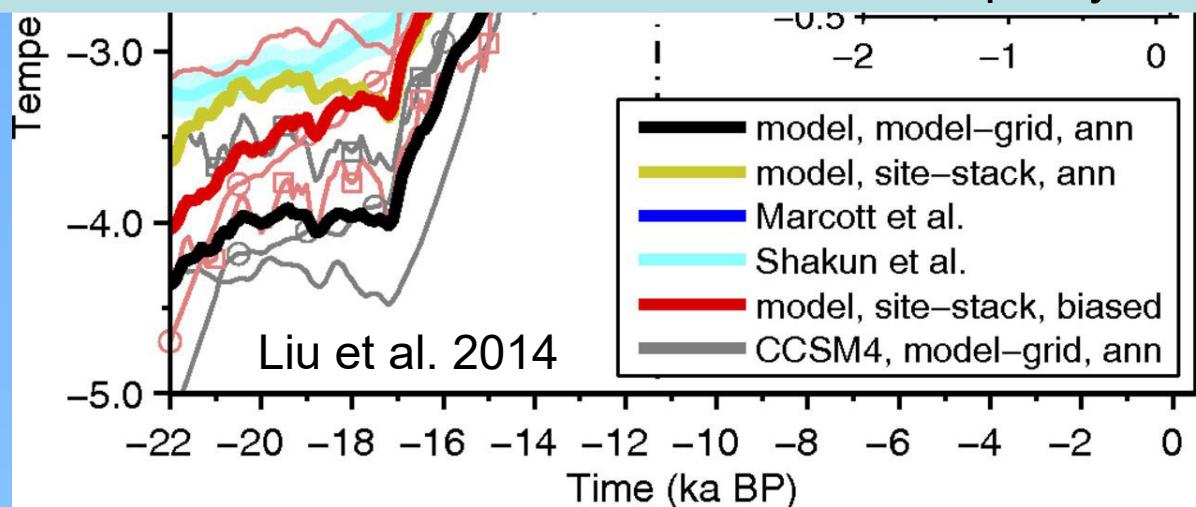


<https://cleantechica.com/2017/09/05/james-hansen-issues-new-young-peoples-burden-report-climate-change-video/>

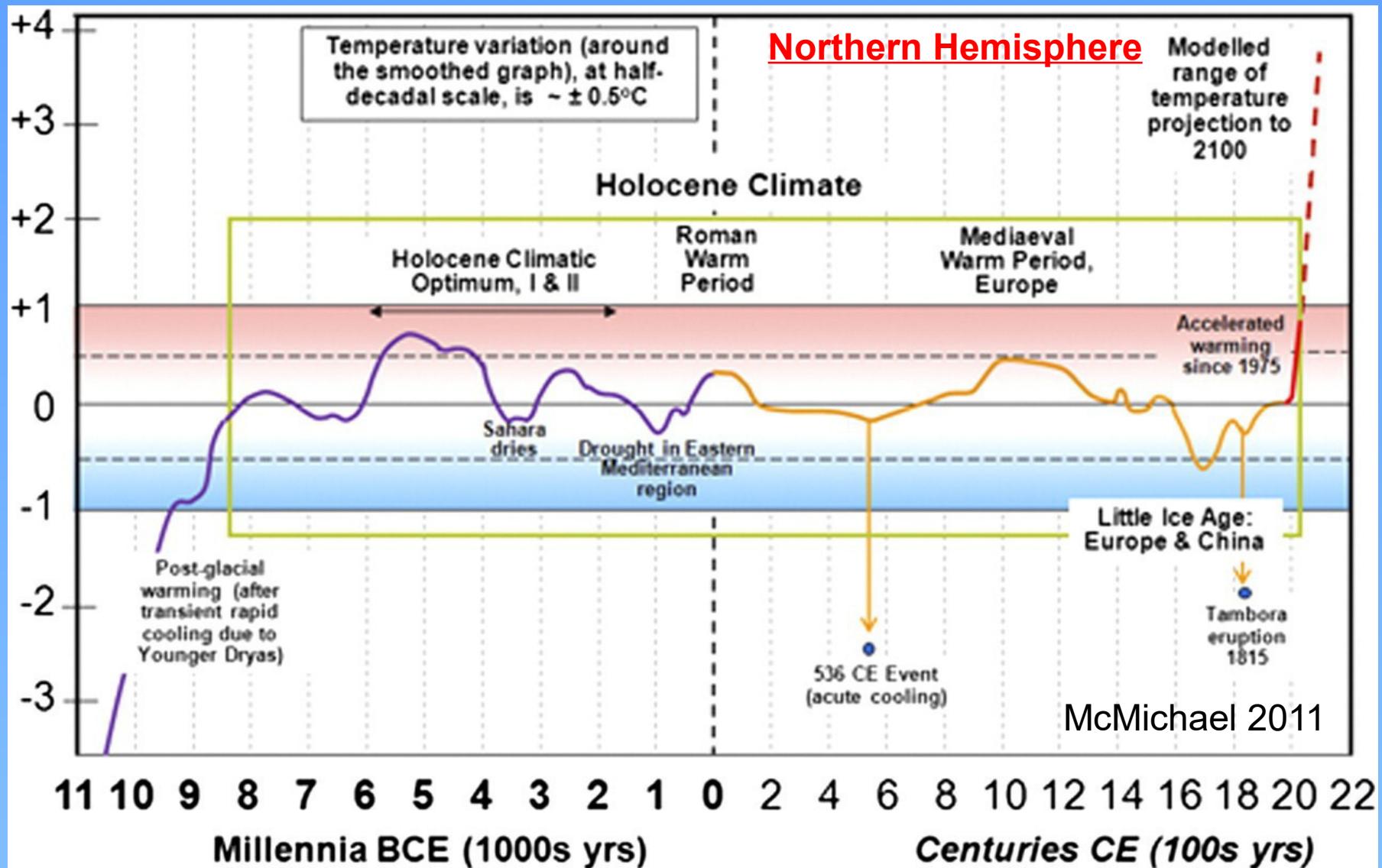
The Holocene temperature conundrum (Temperatur Rätsel)



Marine and terrestrial proxy records suggest global cooling during the Late Holocene, following the peak warming of the Holocene Thermal Maximum (~10 to 6 ka) until the rapid warming induced by increasing anthropogenic greenhouse gases. However, the physical mechanism responsible for this global cooling has remained elusive. Here, we show that climate models simulate a robust global annual mean warming in the Holocene, mainly in response to rising CO₂ and the retreat of ice sheets. This model-data inconsistency demands a critical reexamination of both proxy data and models.

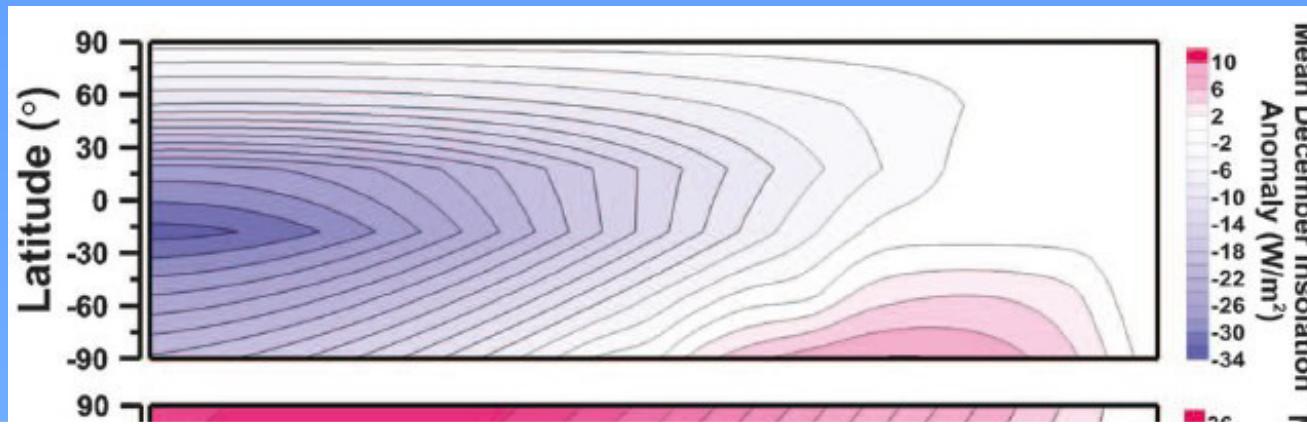


Entwicklung während des Holozäns

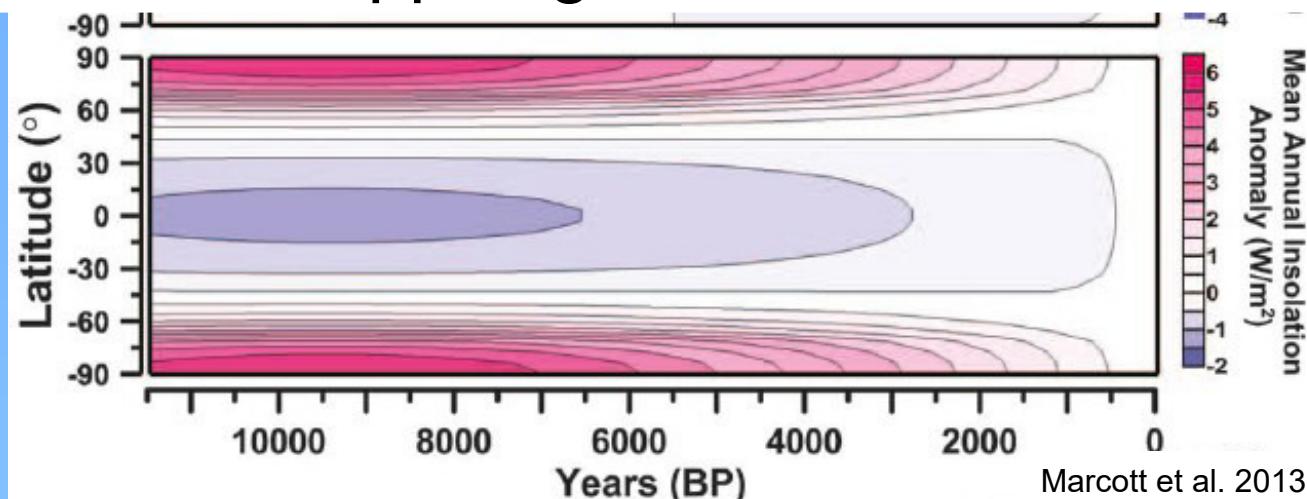


Variations in northern hemisphere temperature, $^\circ\text{C}$ (relative to mean temperature during 1960–1980), averaged from multiple sources published since 2007. Averaging of hemispheric temperature is therefore only indicative.

Sonneneinstrahlung im Holozän



Das Klimasystem reagiert besonders empfindlich auf die Sommereinstrahlung, weil sie durch die Schnee- und Eis-Albedo-Rückkopplung verstärkt wird.



Marcott et al. 2013

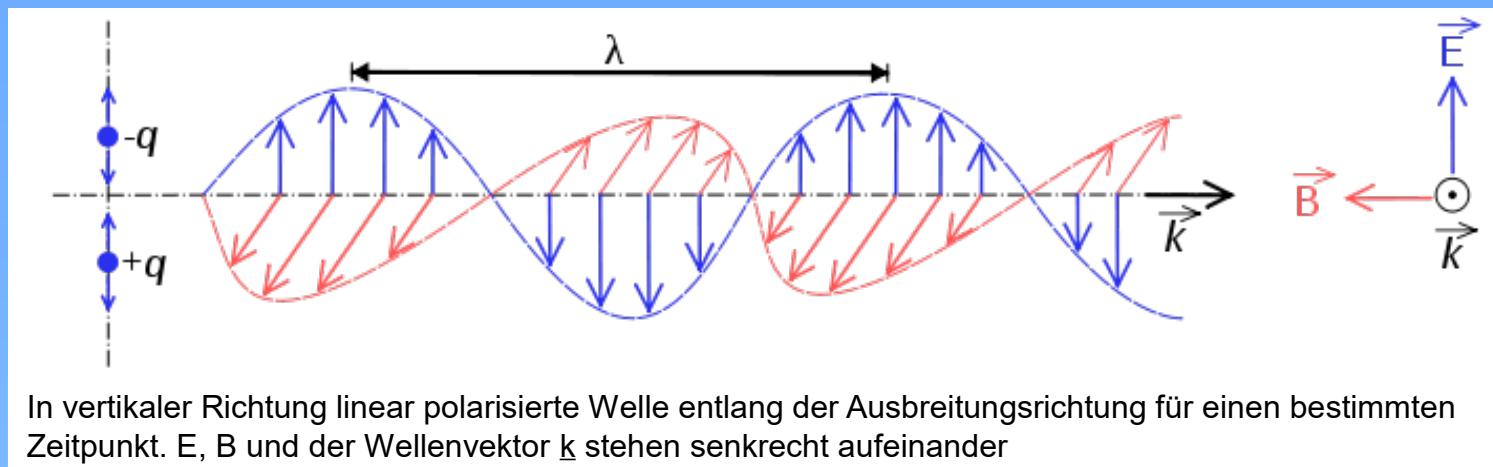
3. Strahlungsbilanz und Antrieb von großräumigen Bewegungen

- Strahlung
- Strahlungsbilanz
- Energietransporte
- Allgemeine Zirkulation

Elektromagnetische Strahlung

Unter elektromagnetischer Strahlung oder elektromagnetischen Wellen versteht man die sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Schwingungen elektrischer und magnetischer Felder.

Elektromagnetische Strahlung benötigt kein Trägermedium, sie breitet sich auch im Vakuum aus, hier mit der höchsten Geschwindigkeit, der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit $c=2,9979 \cdot 10^8$ m/s.

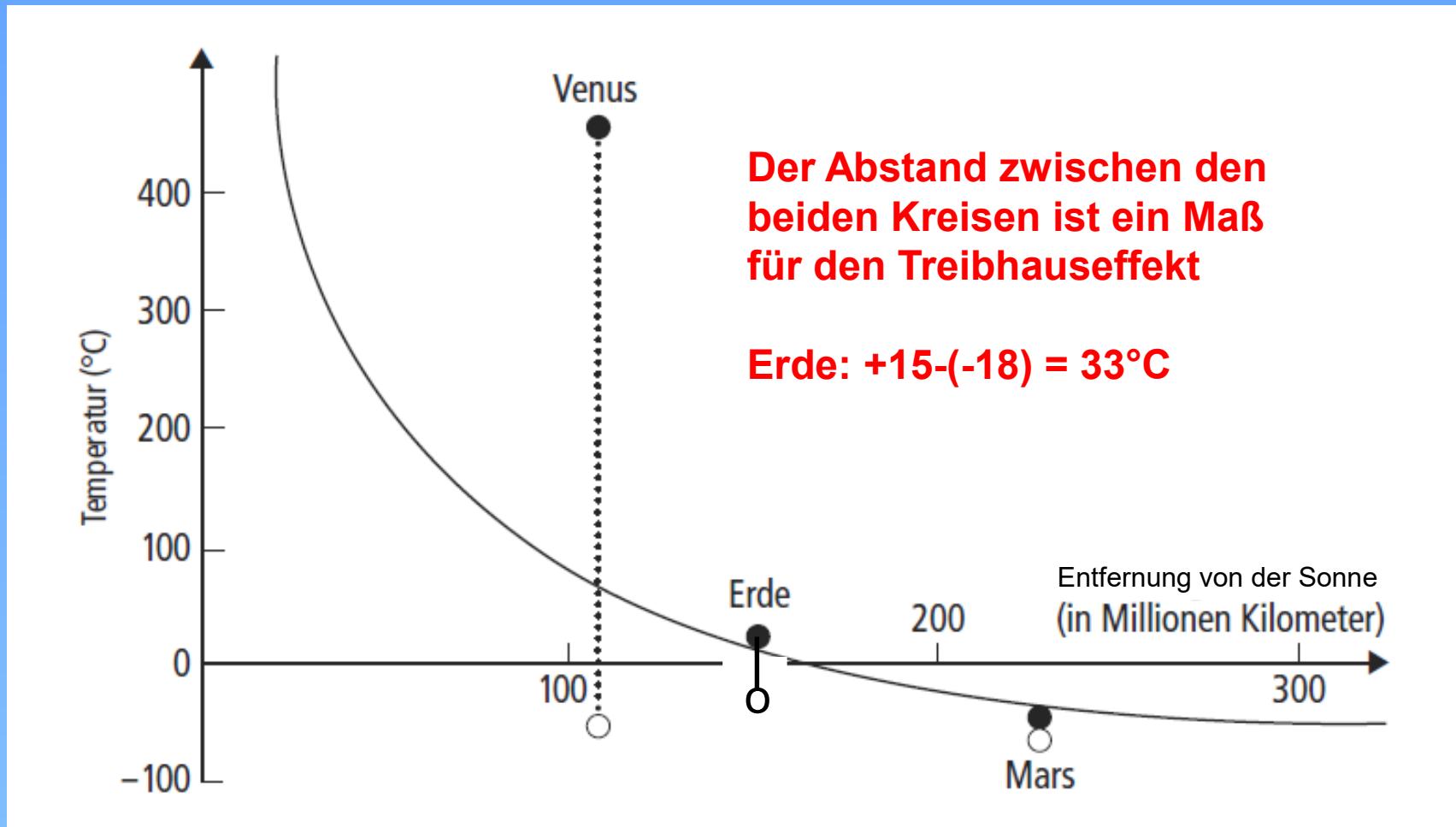


Wellenlänge λ : Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder -tälern; Einheit: [m]

Wellenzahl $\kappa=1/\lambda$: Anzahl Wellenlängen pro Längeneinheit; Einheit: [1/m]

Frequenz v : Anzahl Wellen, die pro Sekunde einen festen Punkt passieren; Einheit: [1/s] = [Hz] (Hertz)

Die Oberflächentemperatur von Planeten



Albedo ist berücksichtigt!

Strahlungsgesetze

Planck

$$B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

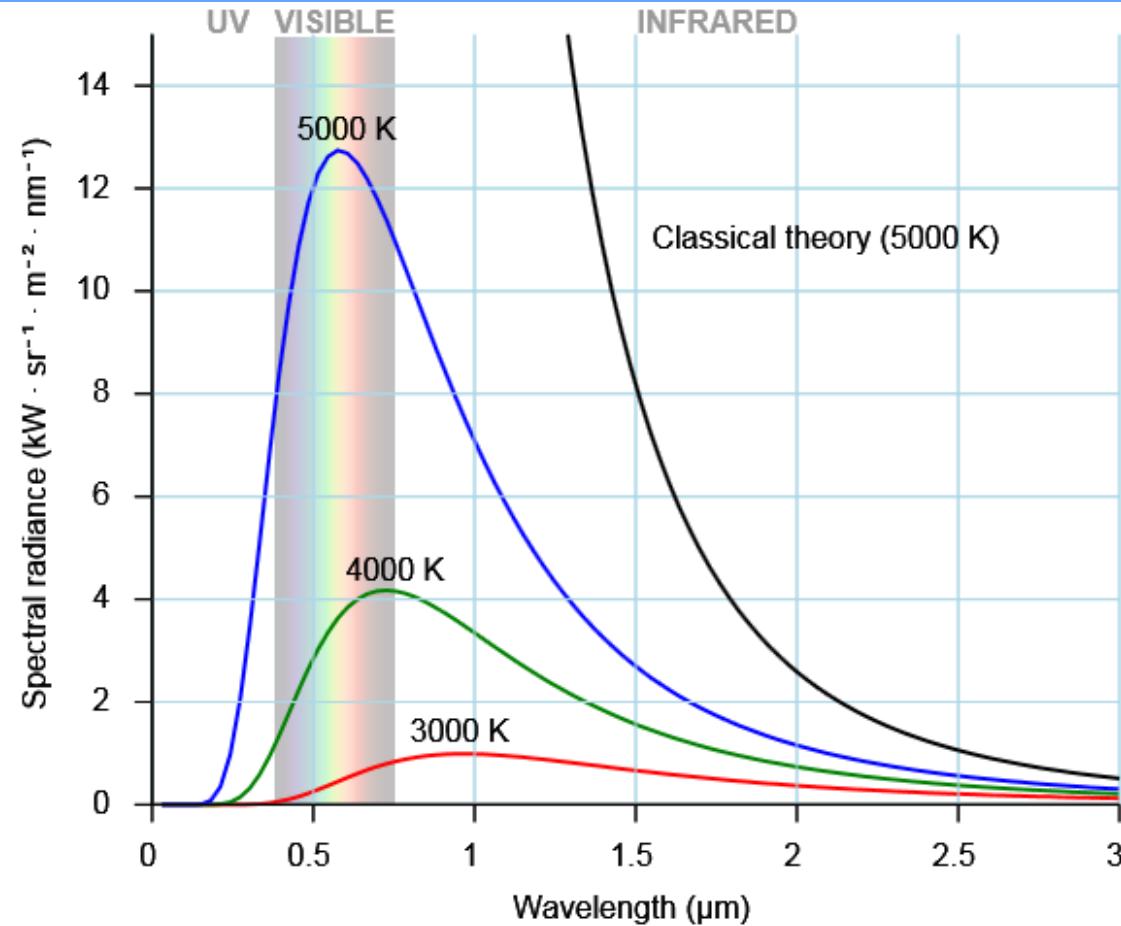
$b \approx 2900 \text{ } \mu\text{m}\cdot\text{K}$

Stefan-Boltzmann

$$j^* = \sigma T^4.$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4},$$

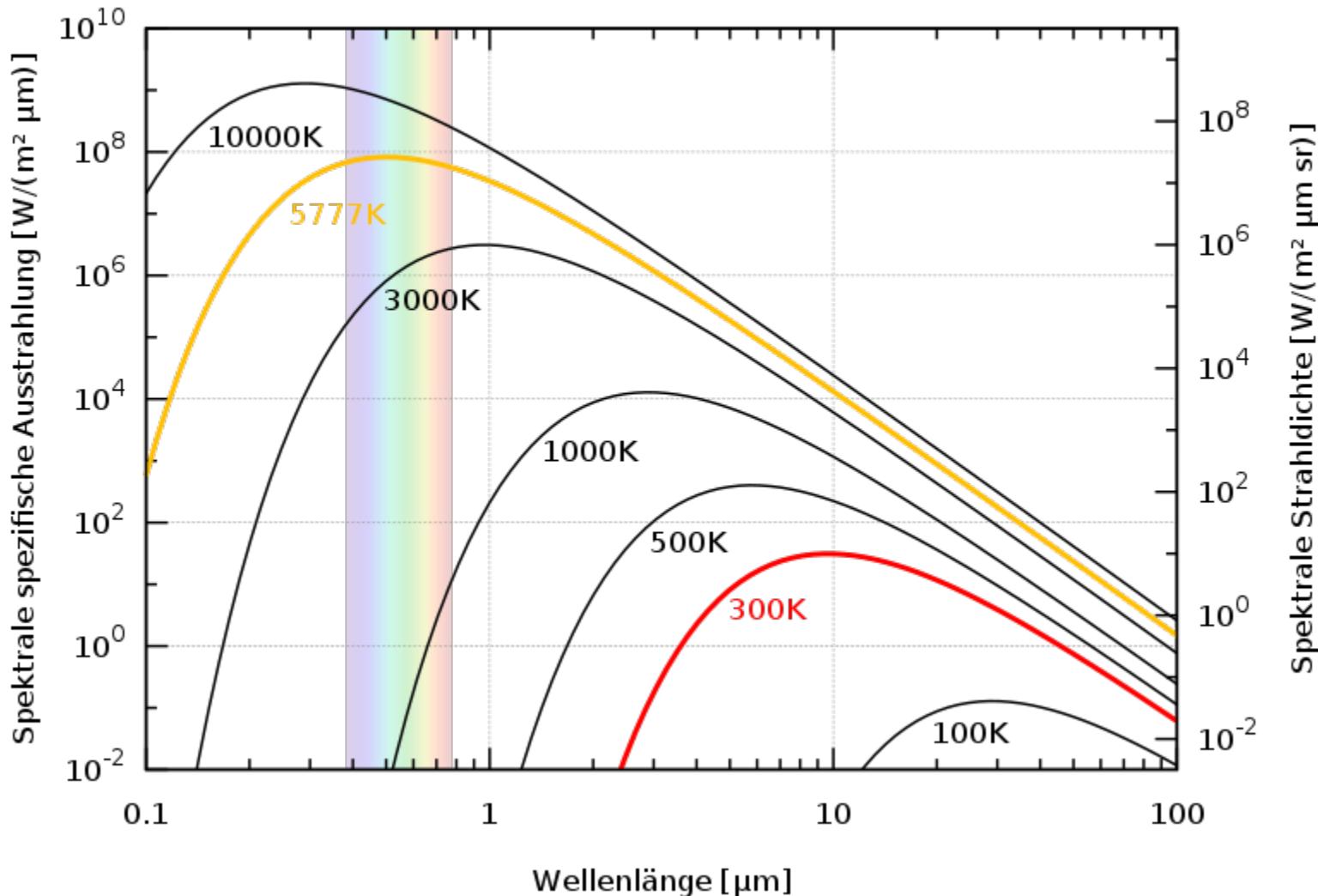
$$h \sim 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



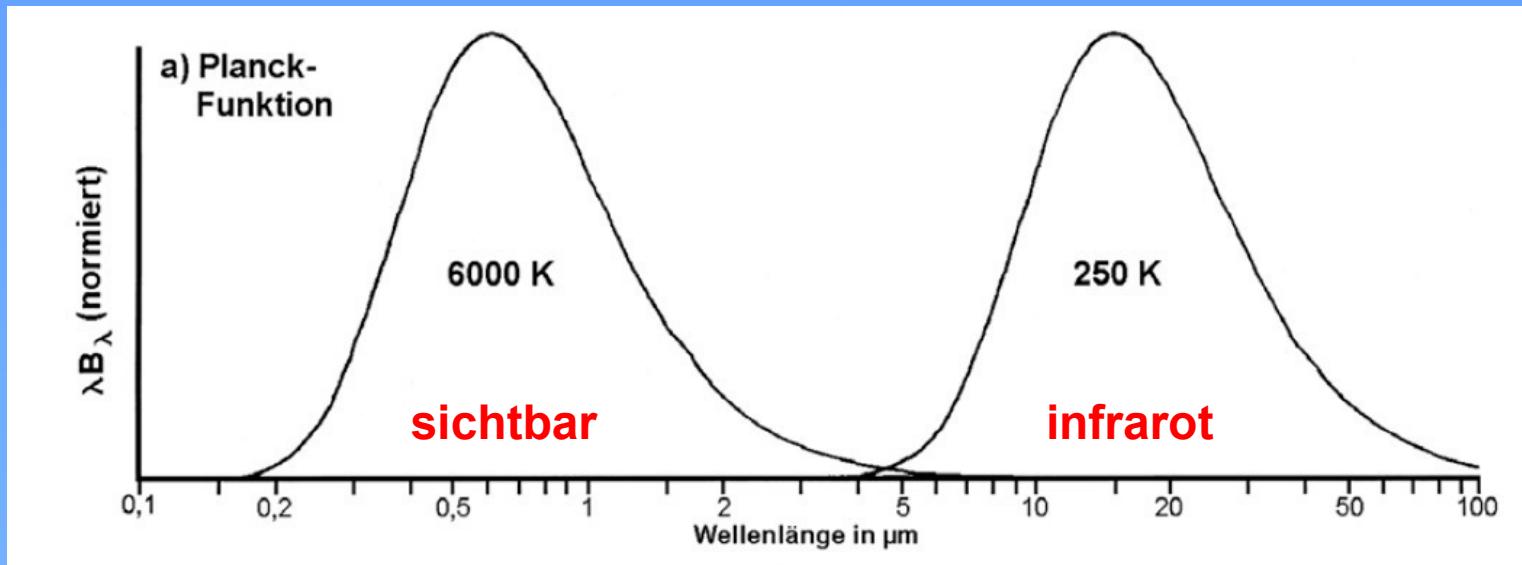
$$\text{Erde: } T \approx 300K \rightarrow \lambda_{\max} = 9.66 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\text{Sonne: } T \approx 6000K \rightarrow \lambda_{\max} = 0.48 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Plancksches Strahlungsspektrum

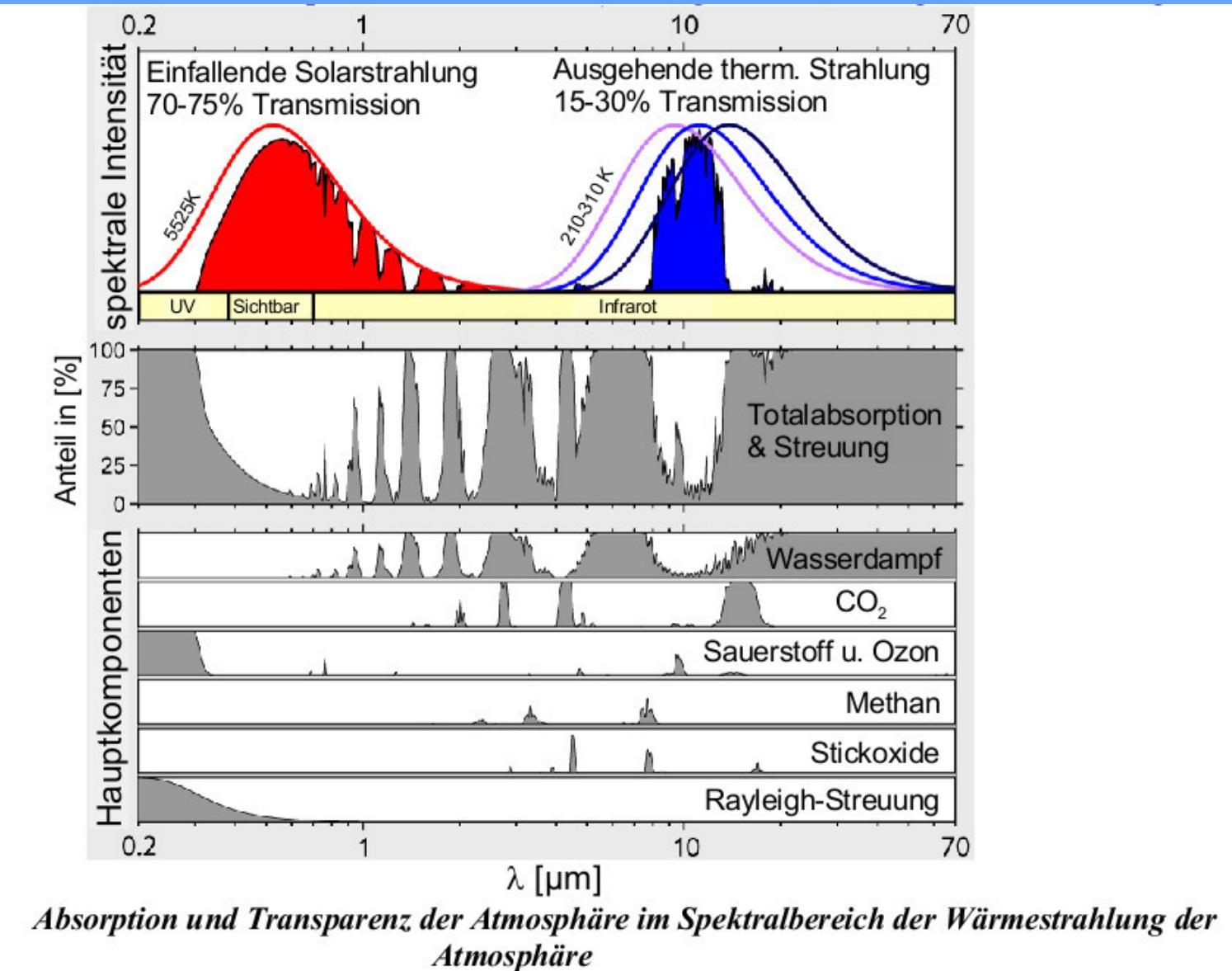


Die Planck-Funktion



Spektrum der als Schwarzkörper idealisierten solaren (6000 K) und terrestrischen (250 K) Wärmestrahlung (a), aufgetragen über der logarithmischen Wellenlängenskala von 0,1 bis 100 μm . Das Produkt aus Wellenlänge und Strahldichte auf der Ordinate stellt sicher, dass gleiche Flächen gleichen Energiemengen entsprechen. Es gibt praktisch keine Überlappung der beiden Spektralbereiche.

Schwächung der Strahlung



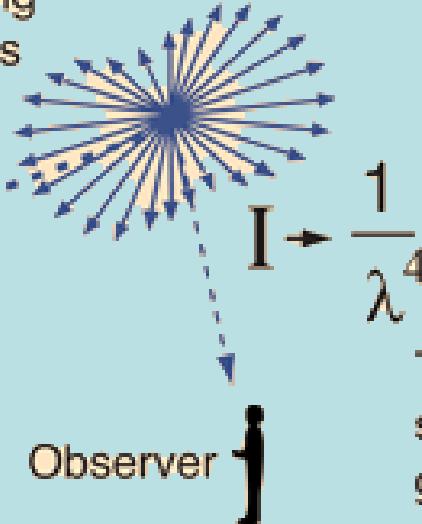
Rayleigh Streuung

Die Intensität der Rayleigh Streuung für ein Moleköl oder sehr kleines Teilchen ($d \ll \lambda$) ist proportional zu λ^{-4}

25

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta)$$

Rayleigh scattering
from air molecules

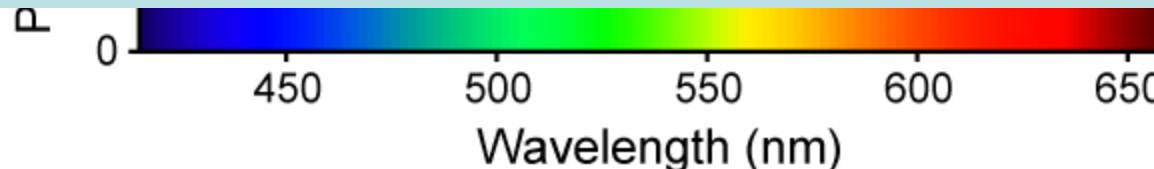


N = # of scatterers

α = polarizability

R = distance from scatterer

The strong wavelength dependence of Rayleigh scattering enhances the short wavelengths, giving us the blue sky.



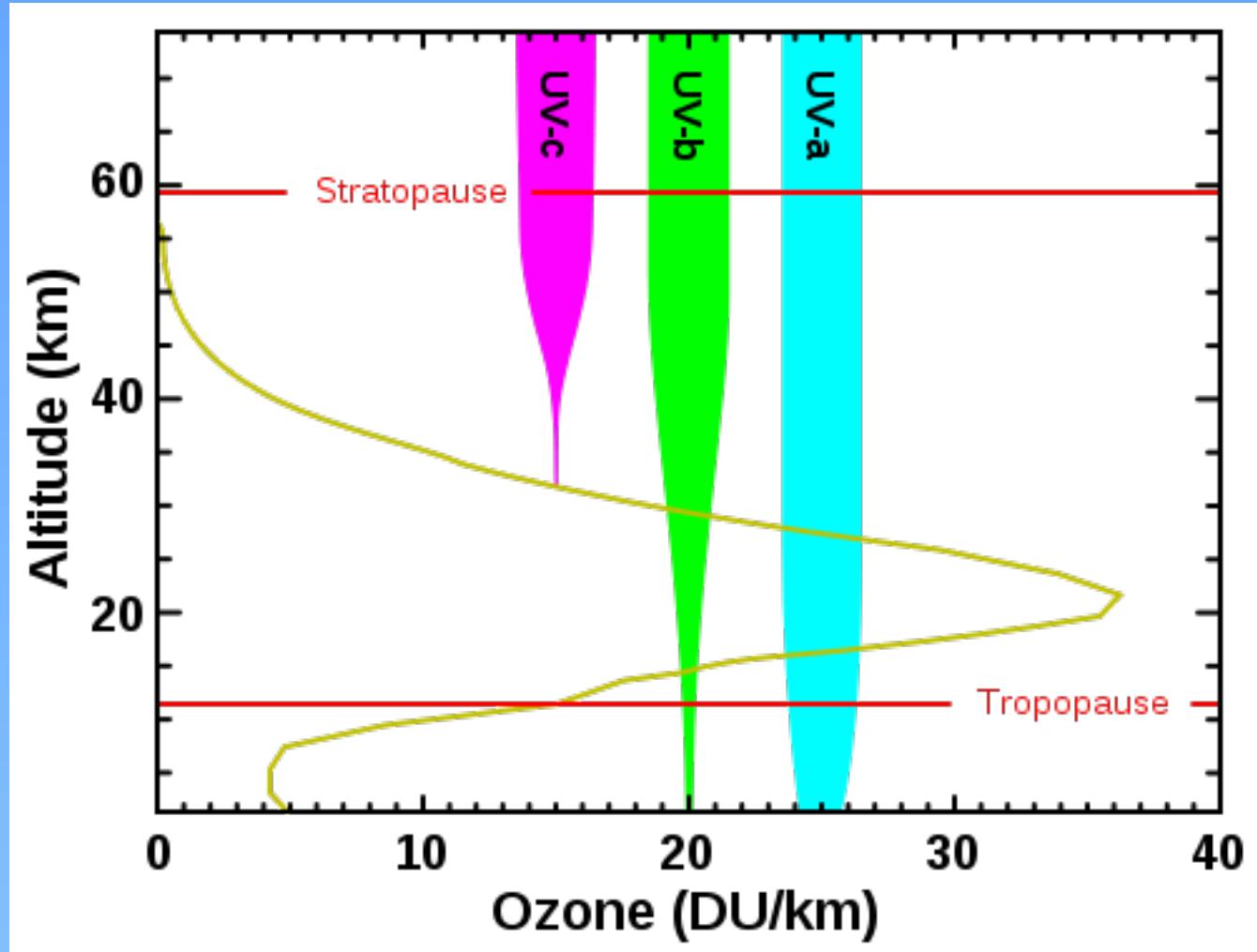
Mie-Streuung

Nach der Mie-Theorie ist der Streukoeffizient umgekehrt proportional zu λ^a , wobei der Exponent a bei durchschnittlichen Verhältnissen in der Atmosphäre den Wert 1,3 annimmt. Im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung ergibt sich bei der Mie-Streuung demnach nur eine schwache Wellenlängenabhängigkeit. Als Folge davon verursacht die Mie-Streuung auch keine charakteristische Streufarbe des Himmels, sondern führt zu einem weißlich aufgehellten Himmel.

Wikipedia, the free encyclopedia around the sun



Die Absorption der UV-Strahlung durch Ozon (O_3)



0-d Energiebilanzmodell

Der natürliche Treibauseffekt führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche, und ihre Temperatur beträgt daher im globalen Mittel knapp +15°C.

$$Q = (S_o/4) \cdot [(1 - \alpha)] = \epsilon \sigma T^4 = F$$

Hierin beschreibt $S_o = 1368 \pm 2 \text{ W/m}^2$ die Solarkonstante. Die Strahlung fällt allerdings nicht an jedem Ort der Erdoberfläche senkrecht ein, sodass zu jedem Zeitpunkt insgesamt nur eine Kreisfläche von der Sonne beschienen wird, woraus sich die Division der Solarkonstante mit vier erklärt. Ein Teil der Sonnenstrahlung erreicht die Erdoberfläche nicht und steht ihr nicht zur Verfügung. Wolken oder helle Flächen wie eis- oder schneebedeckte Gebiete und Wüsten beispielsweise reflektieren sie zurück in den Weltraum. Dieser Anteil ist die planetare Albedo und beträgt etwa 30%, sodass der Parameter $\alpha = 0.3$ in obiger Gleichung beträgt. $\epsilon = 0,62$ ist die Emissivität und liefert in etwa die tatsächliche Temperatur. Im Fall von $\epsilon = 1$ ergibt sich $T = -18^\circ\text{C}$.

Eine entsprechende Analyse für die Venus

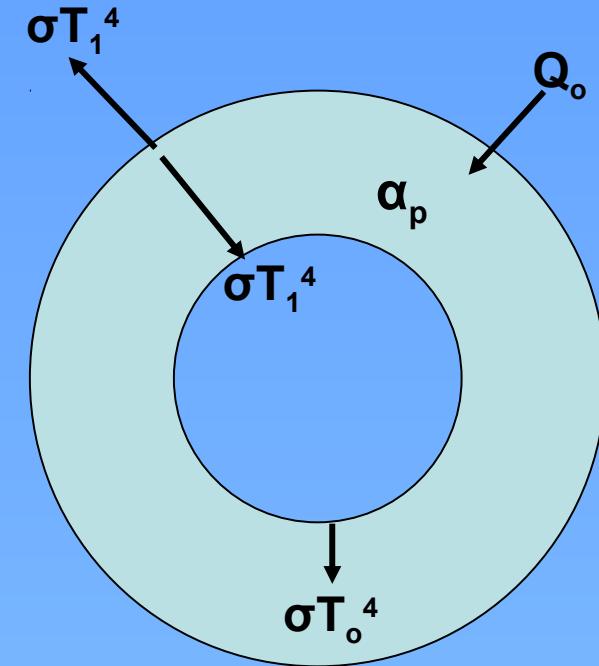
$S_{o,v} = 2619 \text{ W/m}^2$ und $\alpha_{p,v} = 0.7$

$T_{R,v} = 242\text{K}$, für $\varepsilon = 1$

Tatsächlich, $T_{ov} \approx 730\text{K}$

→ sehr starker Treibhauseffekt

Der Treibhausschild, I



A simple mathematical model to understand the action of the greenhouse gases is now discussed. We consider a “greenhouse shield” above the Earth’s surface which is completely transparent for the solar radiation but absorbs 100% of the thermal radiation emitted by the Earth’s surface. The greenhouse shield has then the radiation temperature $T_R = T_1$.

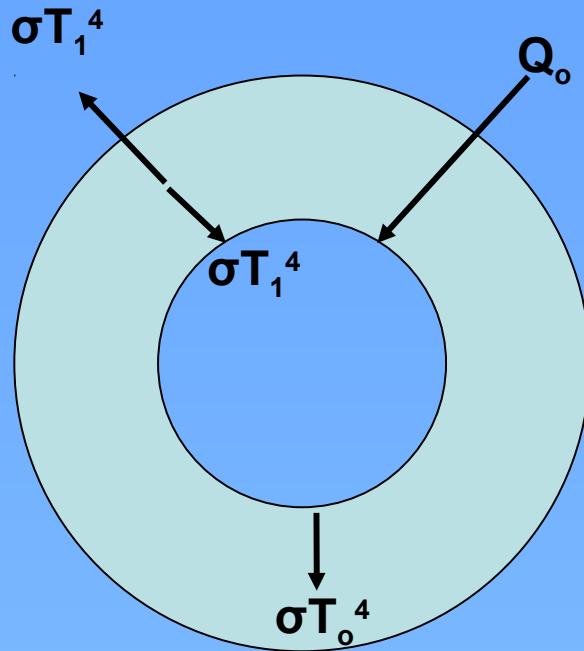
The balance for the shield is

$$\sigma T_o^4 = 2\sigma T_1^4$$

and for the surface there is back radiation from the greenhouse shield which warms the surface in addition to the solar radiation

$$\sigma T_o^4 = \sigma T_1^4 + Q_o(1 - \alpha_p)$$

Der Treibhausschild, II



It follows

$$\sigma T_o^4 = 2Q_o(1 - \alpha_p)$$

$$\sigma T_1^4 = Q_o(1 - \alpha_p)$$

Keeping in mind that $T_R = T_1$

$$T_o = 2^{1/4} T_R \approx 1.19 T_R \approx 300\text{K}$$

This is a somewhat too high temperature, but the simple model nicely illustrates the greenhouse effect. You can introduce again an emissivity $\varepsilon_{GS} < 1$ to account for the departure from a perfect absorber

Der Treibhausschild, III

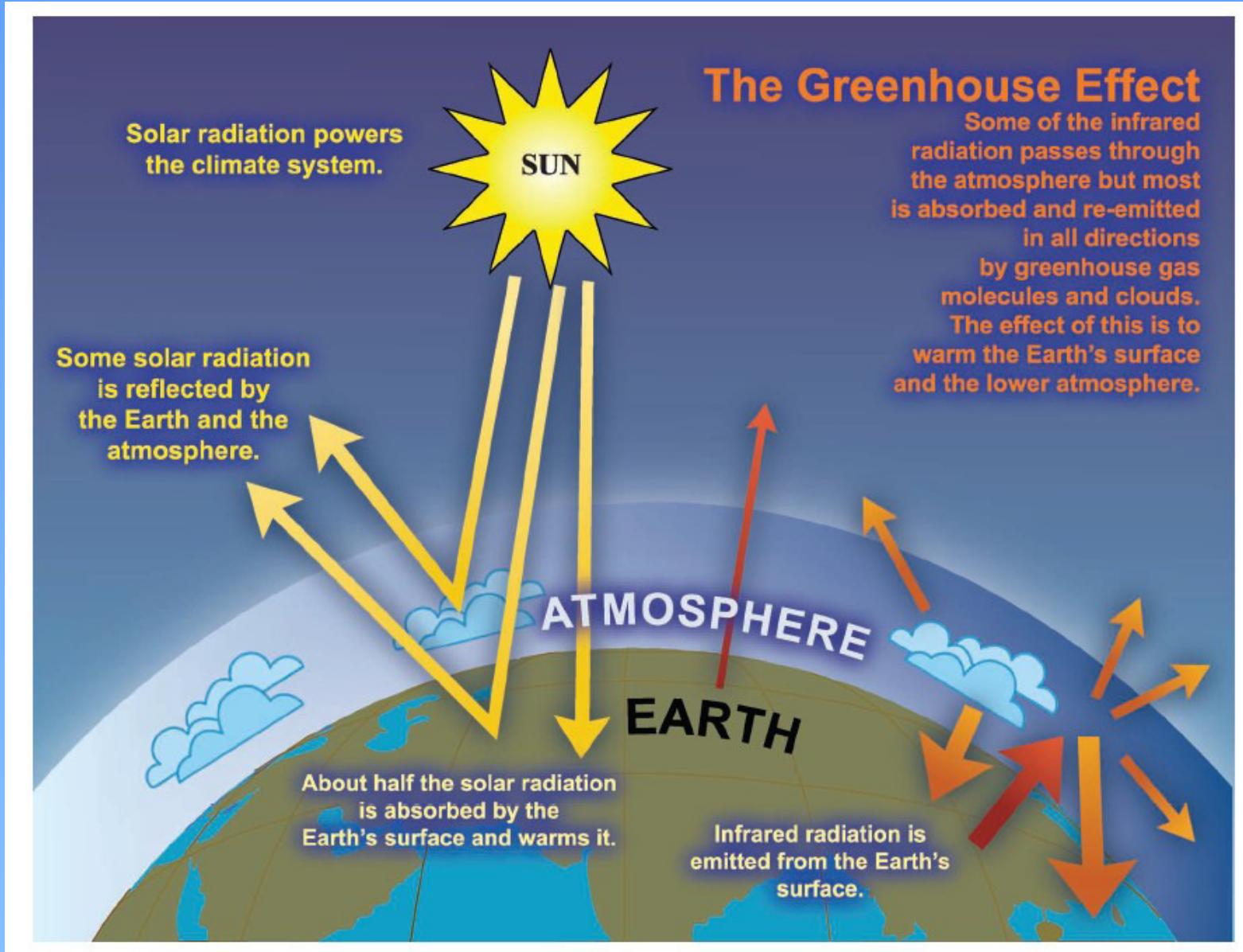
The greenhouse shield model can be easily refined by assuming that the shield is not a perfect absorber, with an efficiency $\varepsilon_{GS} < 1$. The shield absorbs $\varepsilon_{GS}\sigma T_o^4$ and the rest $(1-\varepsilon_s)\sigma T_o^4$ is lost to space. The solution is

$$T_o = 2^{1/4}T_1 \approx (1 - \varepsilon_s/2)^{-1/4}T_R$$

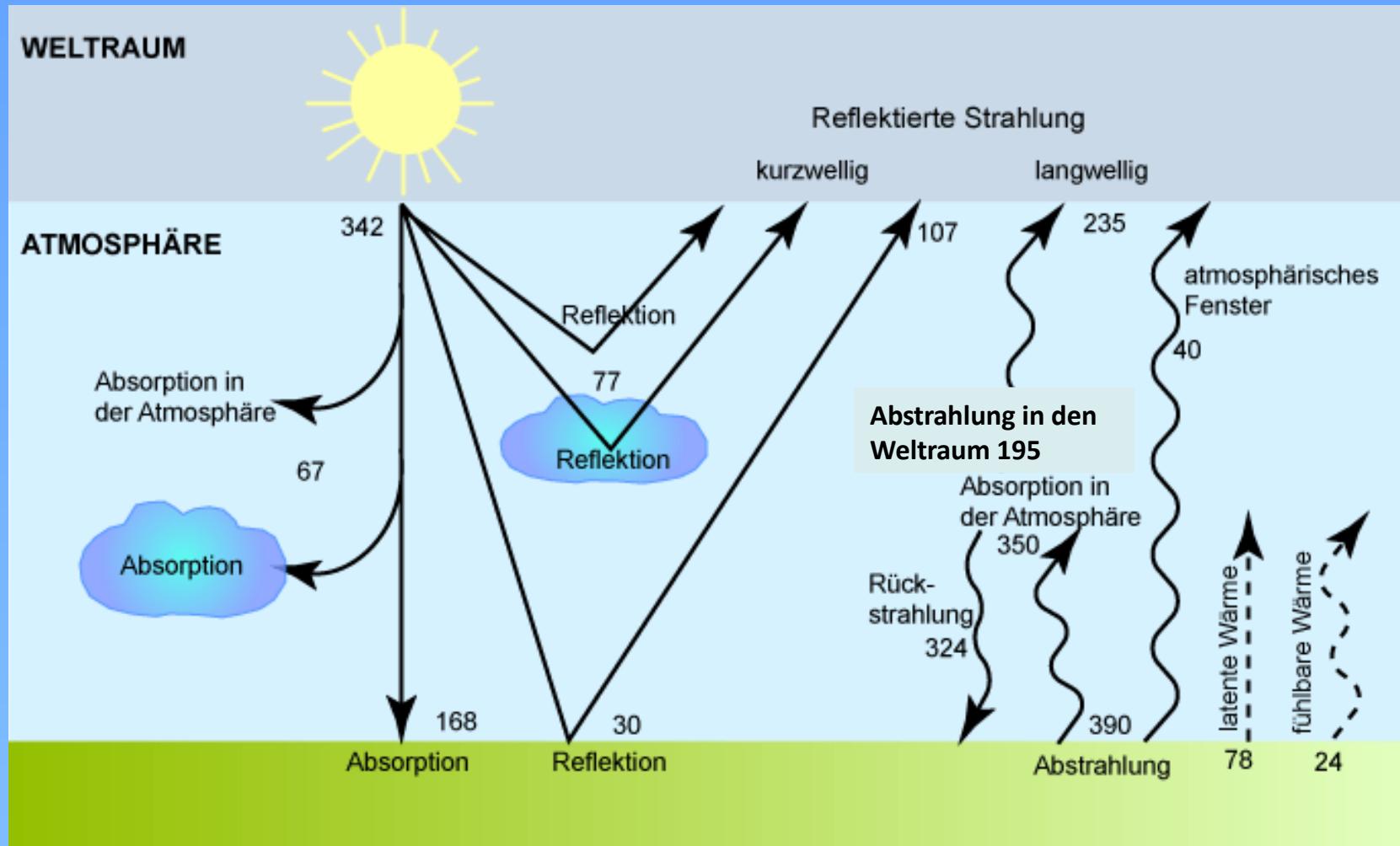
$$T_1 = (2 - \varepsilon_s)^{-1/4}T_R$$

For $\varepsilon_{GS} = 0.77$, we obtain the correct surface temperature of the Earth, $T_o \approx 288K$ (about $15^\circ C$)

Strahlungsbilanz (vereinfacht)

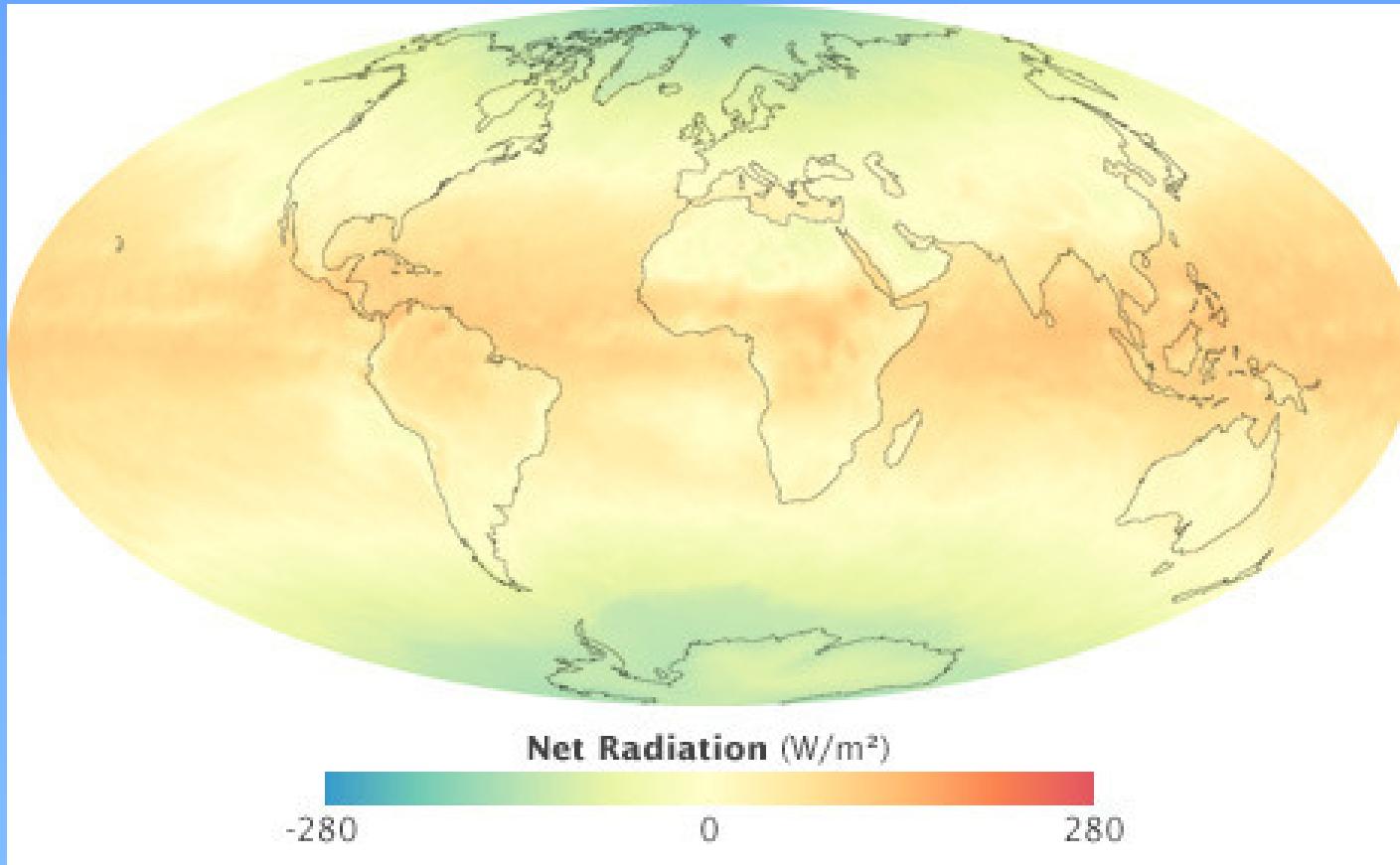


Strahlungsbilanz (W/m^2)



Die Nettostrahlung an der Erdoberfläche

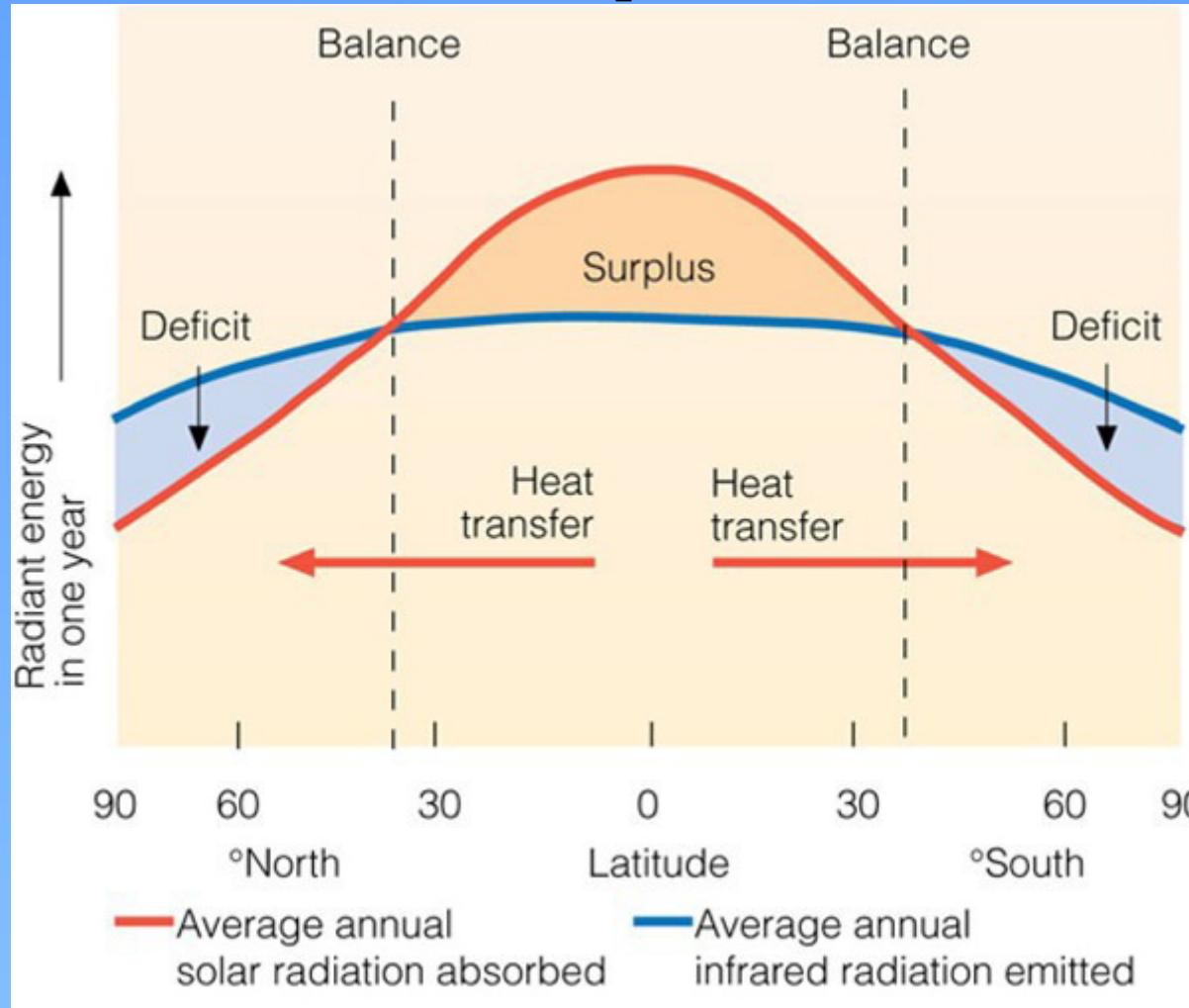
Einstrahlung minus Ausstrahlung (Q-F), September



http://www.eoearth.org/files/115701_115800/115730/Ceres_net_radiation_200809.jpg

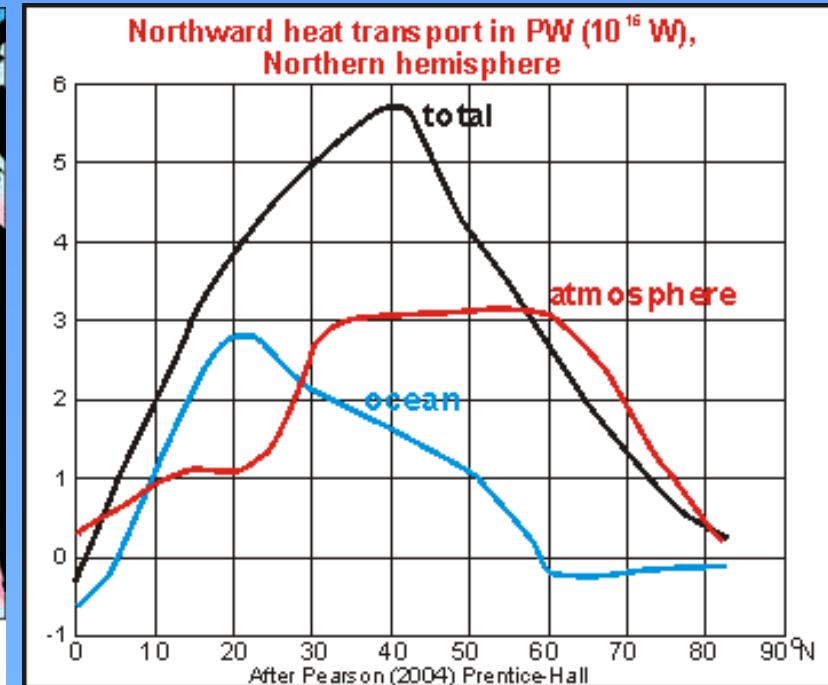
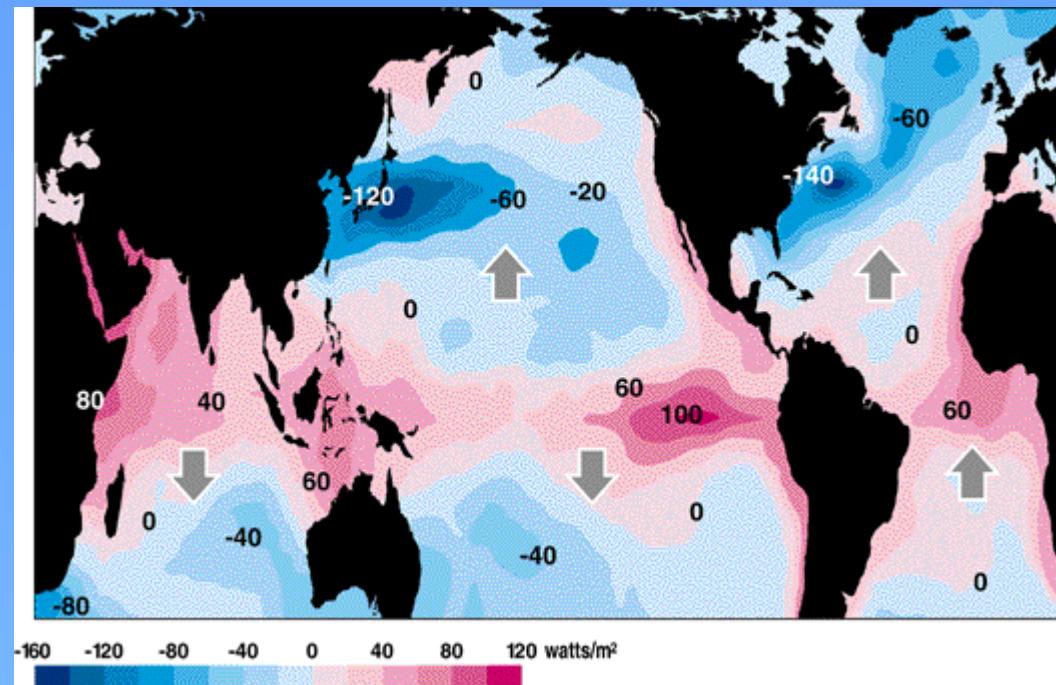
Überschuss in den Tropen, Defizit an den Polen

4. Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre



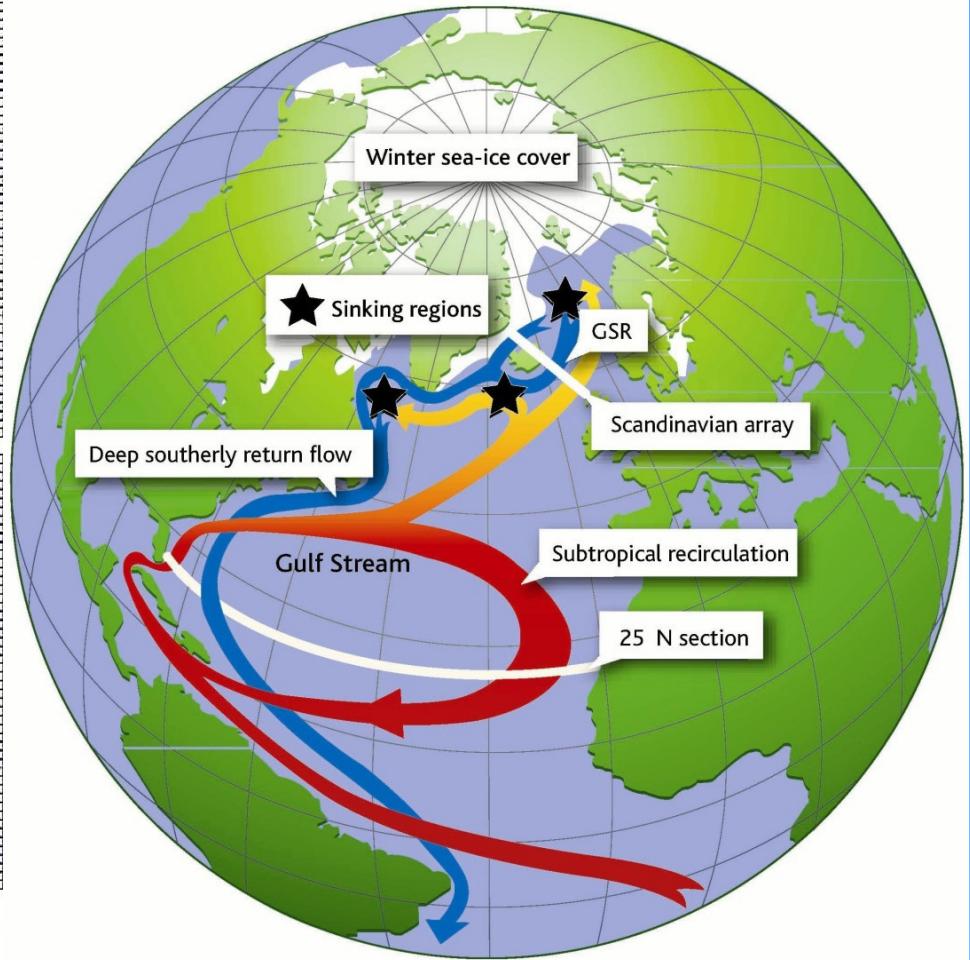
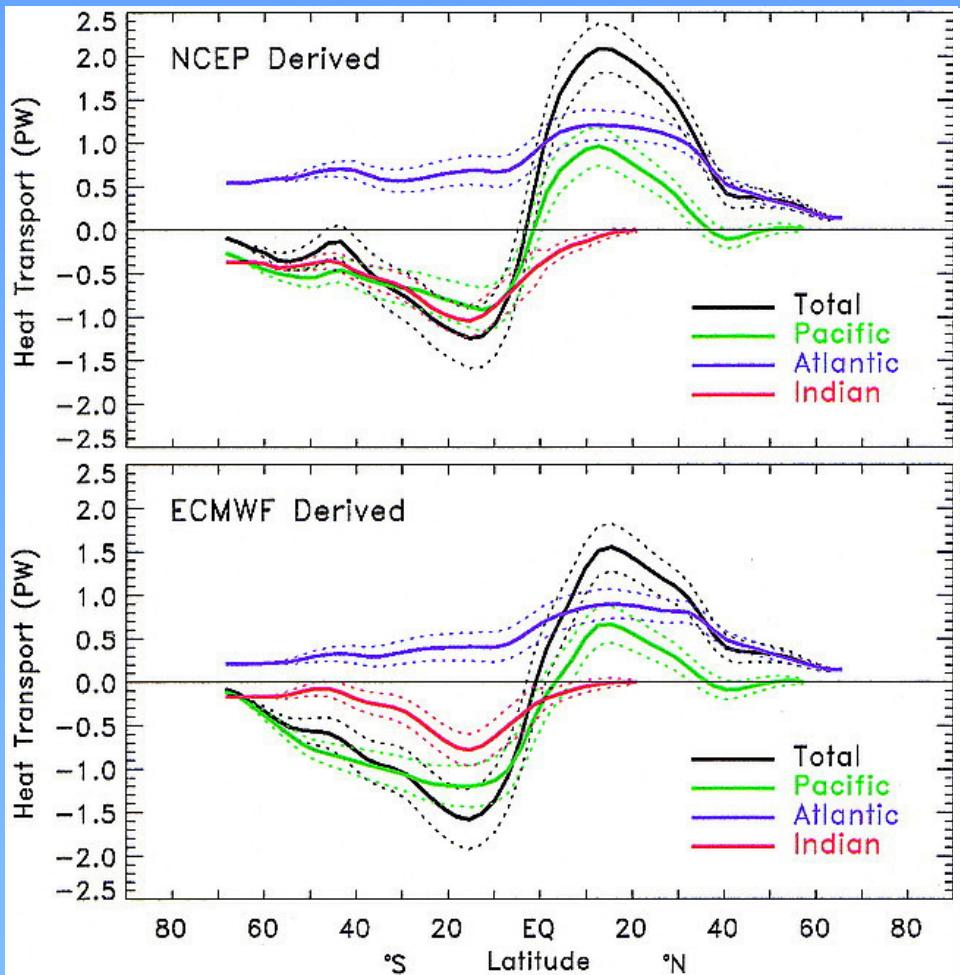
Es gibt einen Energieüberschuss in den Tropen und ein Energiedefizit weiter polwärts. Das treibt die Allgemeine Zirkulation an.

Wärmetransporte



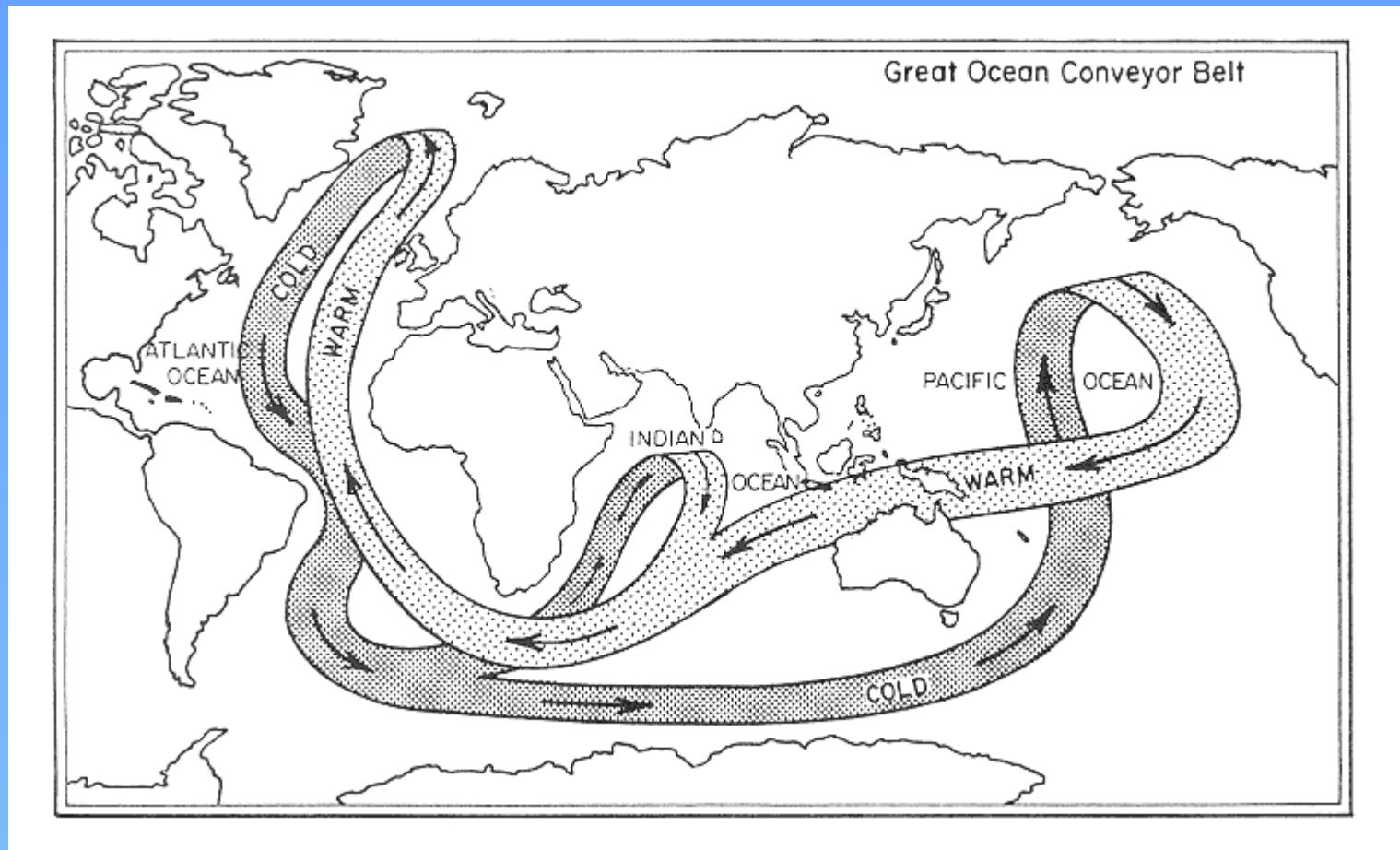
Die Atmosphäre übernimmt den Transport in den mittleren und hohen Breiten. Das Meer nimmt Wärme in den Tropen auf und transportiert sie polwärts. Man erkennt die wichtigen Strömungen auch anhand der Wärmeflüsse zwischen Ozean und Atmosphäre.

Der Atlantik: Wärmetransport über den Äquator hinweg



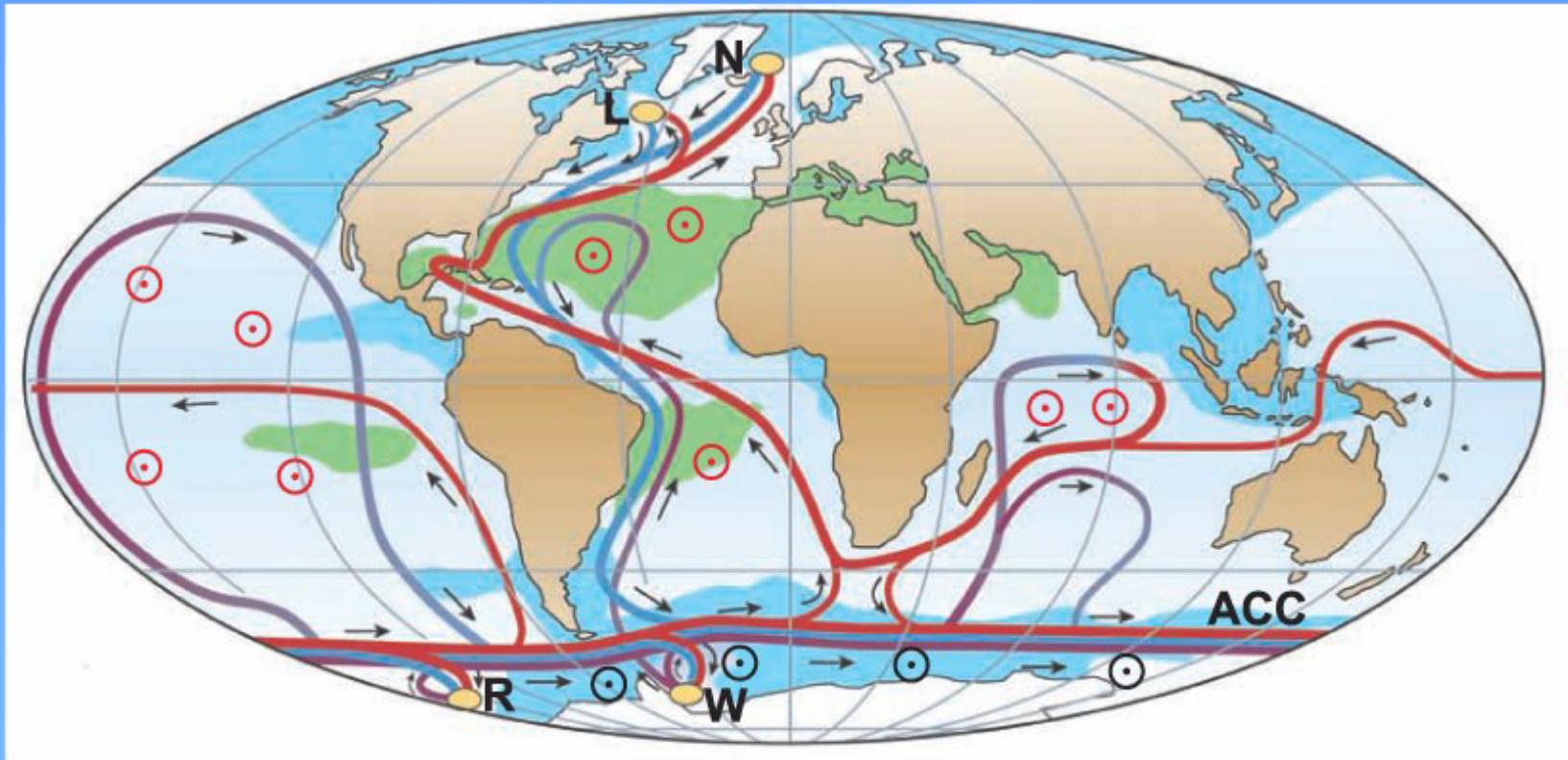
Trenberth and Caron 2001

Thermohaline Zirkulation (THZ)



Conceptual view of the oceanic conveyor belt (or thermohaline circulation), Broecker (1991)

Die globale Umwälzbewegung



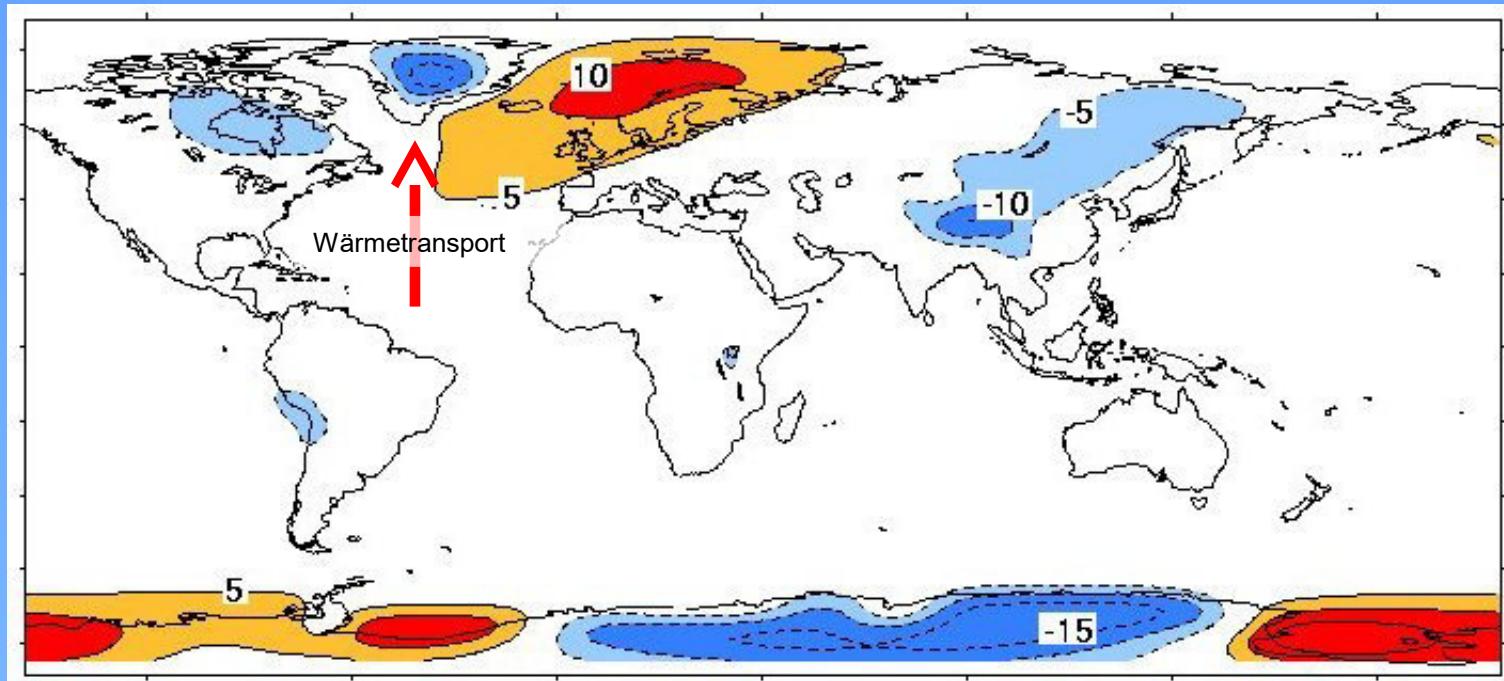
- Surface flow
- Deep flow
- Bottom flow
- Deep Water Formation

- Wind-driven upwelling
- Mixing-driven upwelling
- Salinity > 36 ‰
- Salinity < 34 ‰

- L Labrador Sea
- N Nordic Seas
- W Weddell Sea
- R Ross Sea

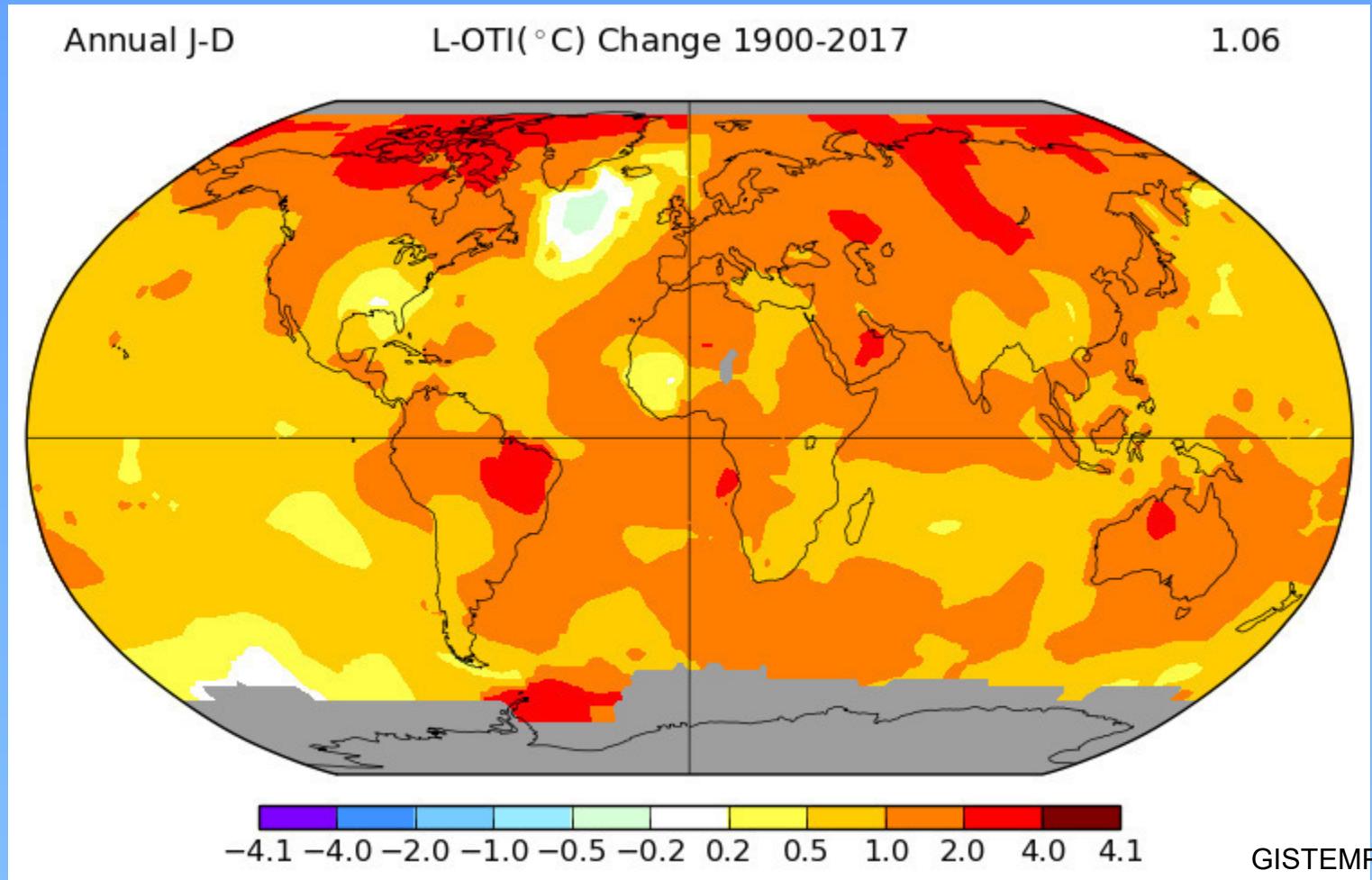
http://a.static.trunity.net/files/172501_172600/172511/sap3-4-final-report-all131.png

Nord Europa ist relativ mild



Der atlantische Wärmetransport bei 30°N beträgt $\approx 1 \text{ PW}$ ($10^{15} \text{ W} = 1.000.000.000.000 \text{ W}$), das entspricht der Leistung von etwa 1 Million Kernkraftwerke

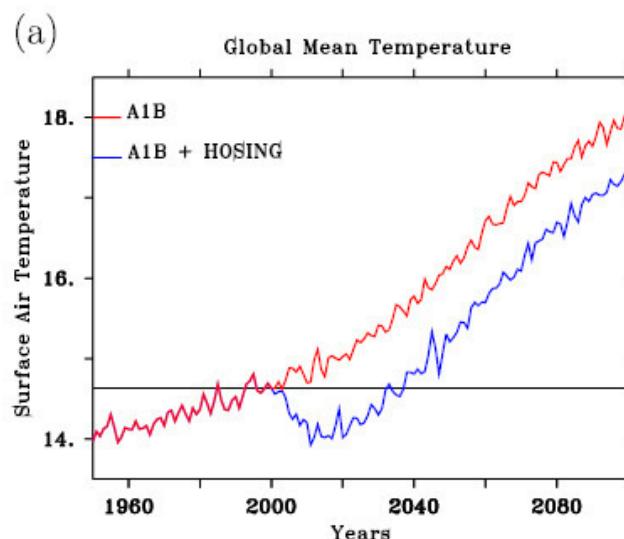
Das „Erwärmungslöch“ im Nordatlantik



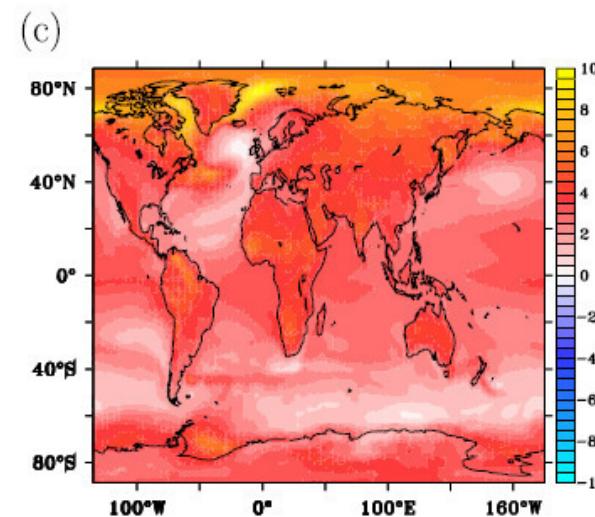
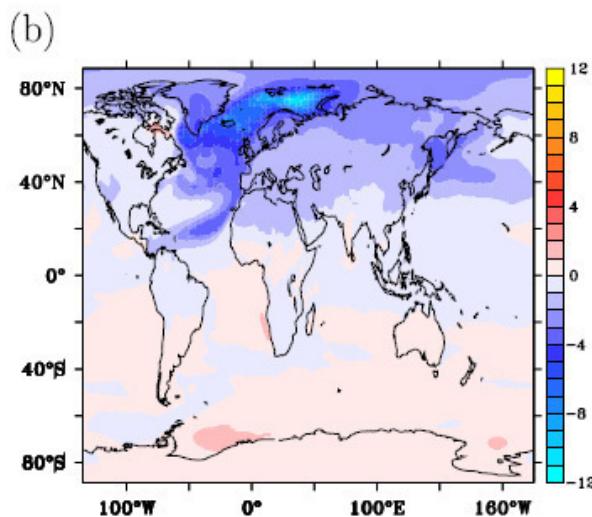
Lineare Trends ($^{\circ}\text{C}/118$ Jahre) der Oberflächentemperatur

Einfluss eines AMOC Kollapses

Kollaps erzwungen durch
permanenter Süßwasser-
Eintrag (1 Sv)

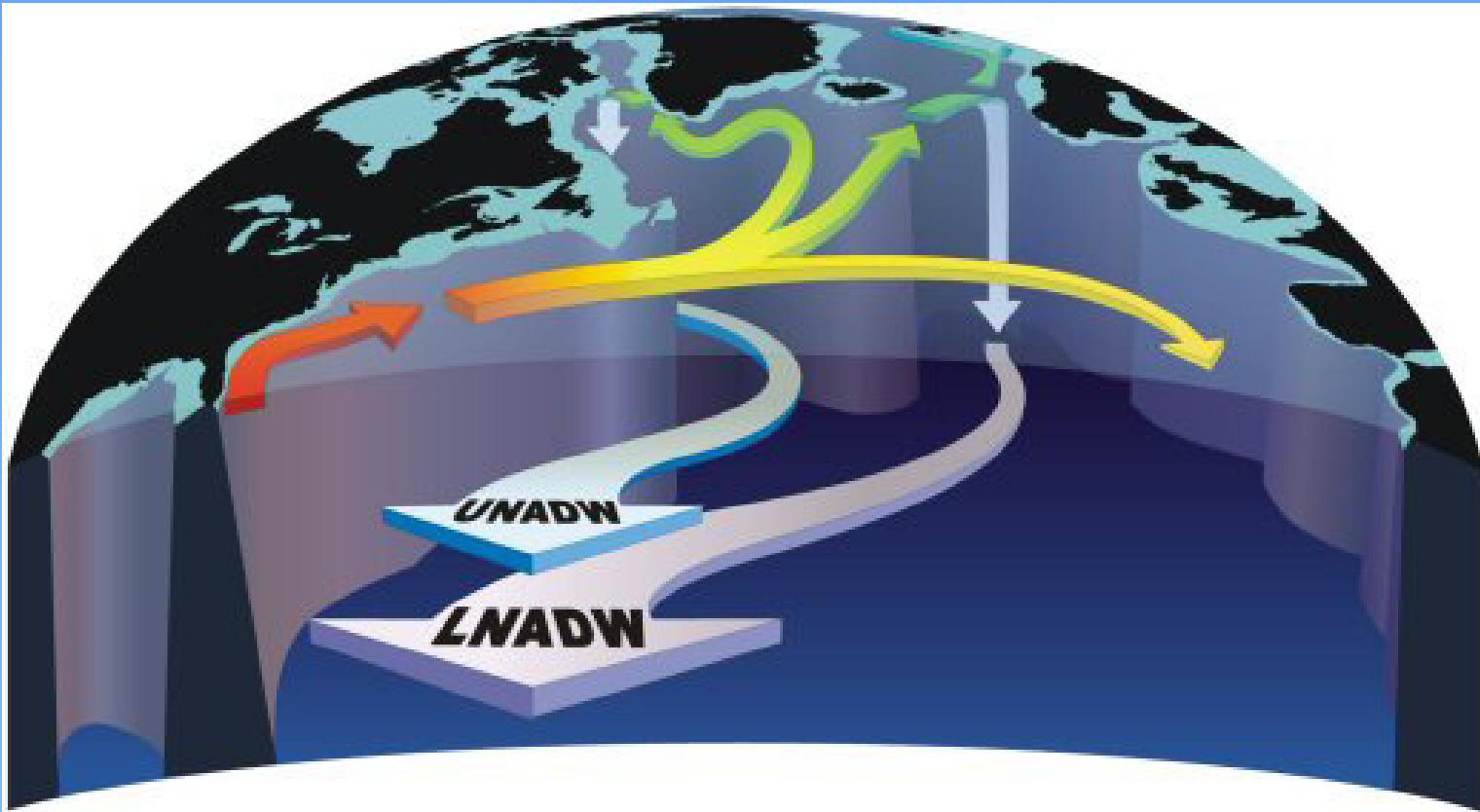


Drijfhout 2015



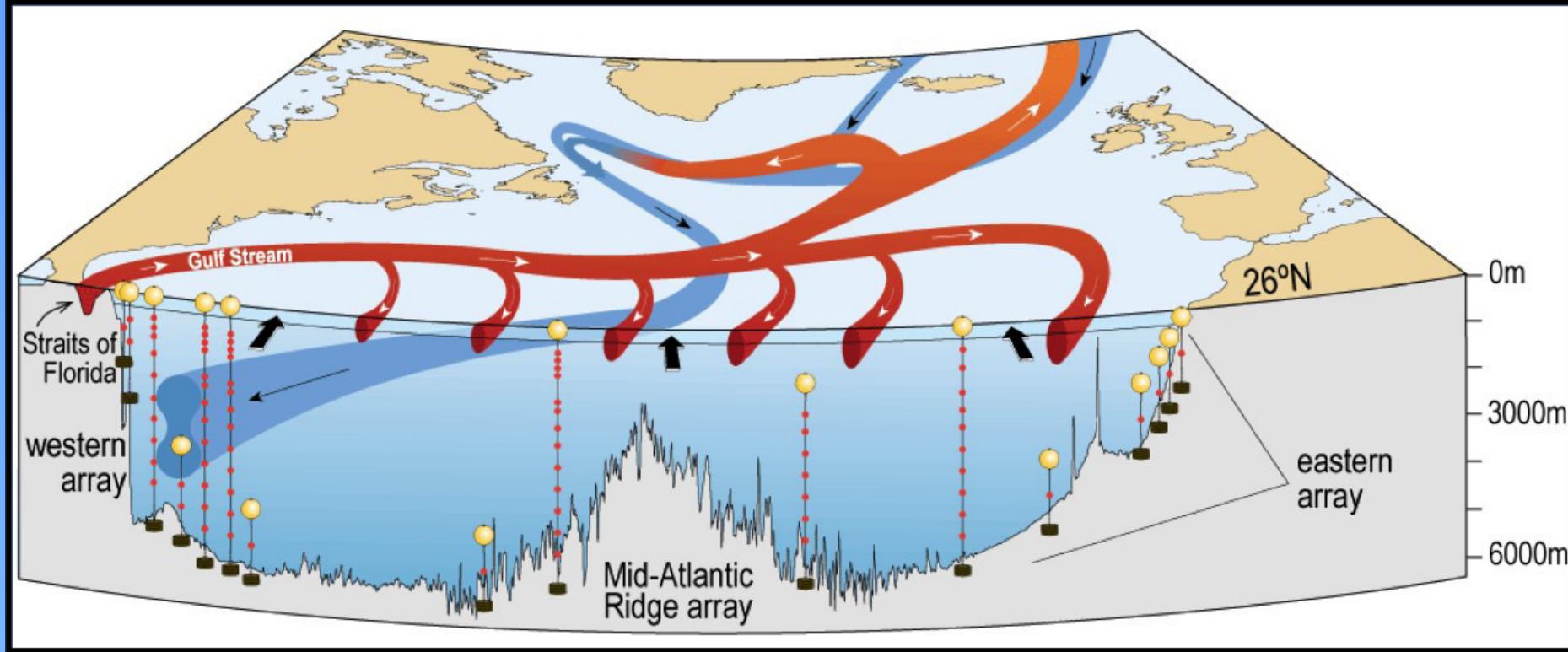
(a) Annual mean time series of global mean temperature in °C in the A1B climate change scenario with and without an AMOC collapse. (b) Temperature anomaly after 15 years since the onset of the AMOC collapse. (c) Same as (b) but for the temperature difference between years 95 and 15.

Der obere und untere Ast der atlantischen Umwälzbewegung



"An outstanding problem in the oceanic sciences is the rate of heat and freshwater transport from the equator to the poles, for it is this transport which powers the Earth's weather and climate system." Keffer and Holloway, Nature (1988).

Das RAPID Array

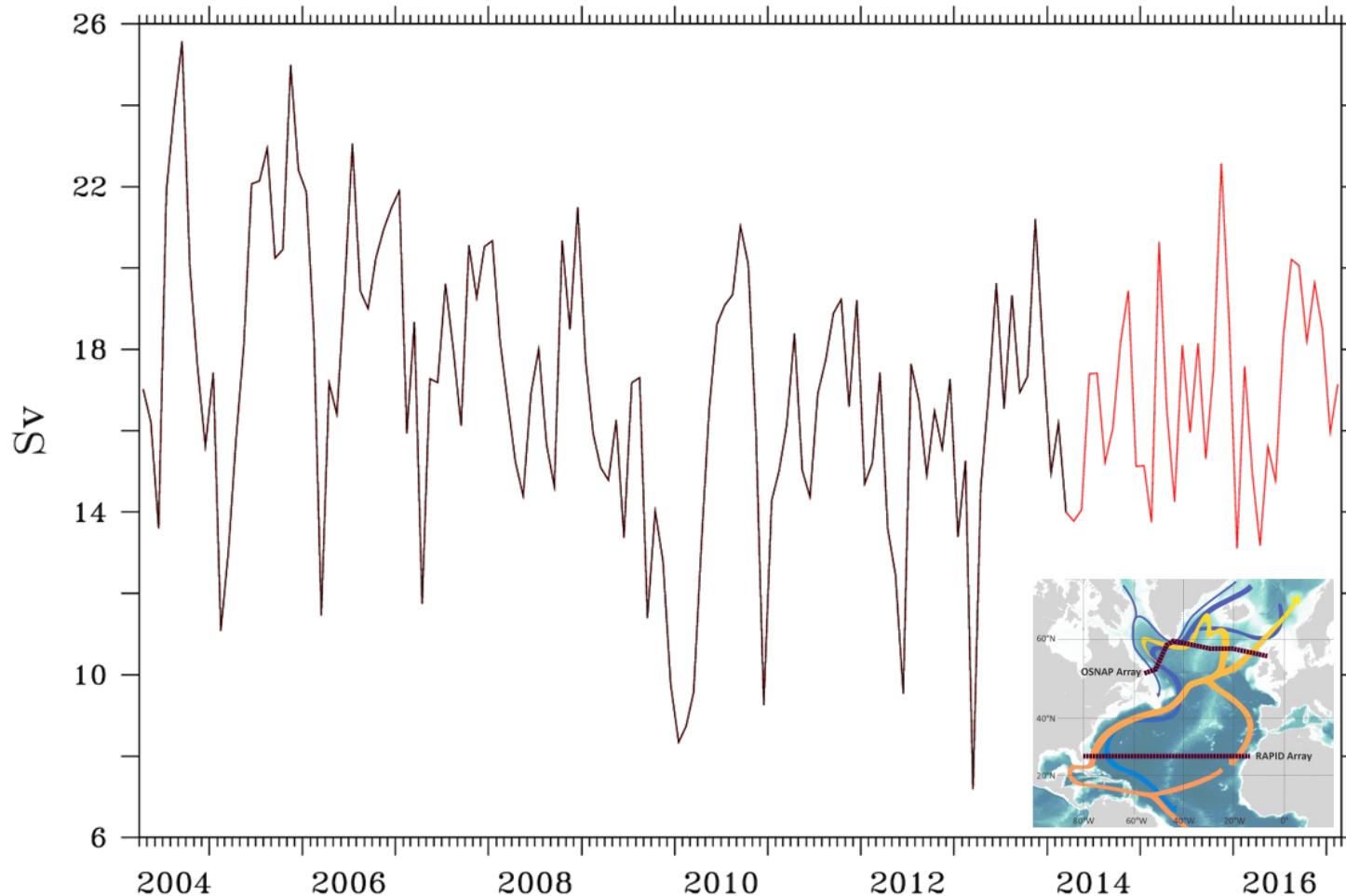


An estimate of the meridional flow relating to the MOC along 26.5°N can be obtained by decomposing it into three components:

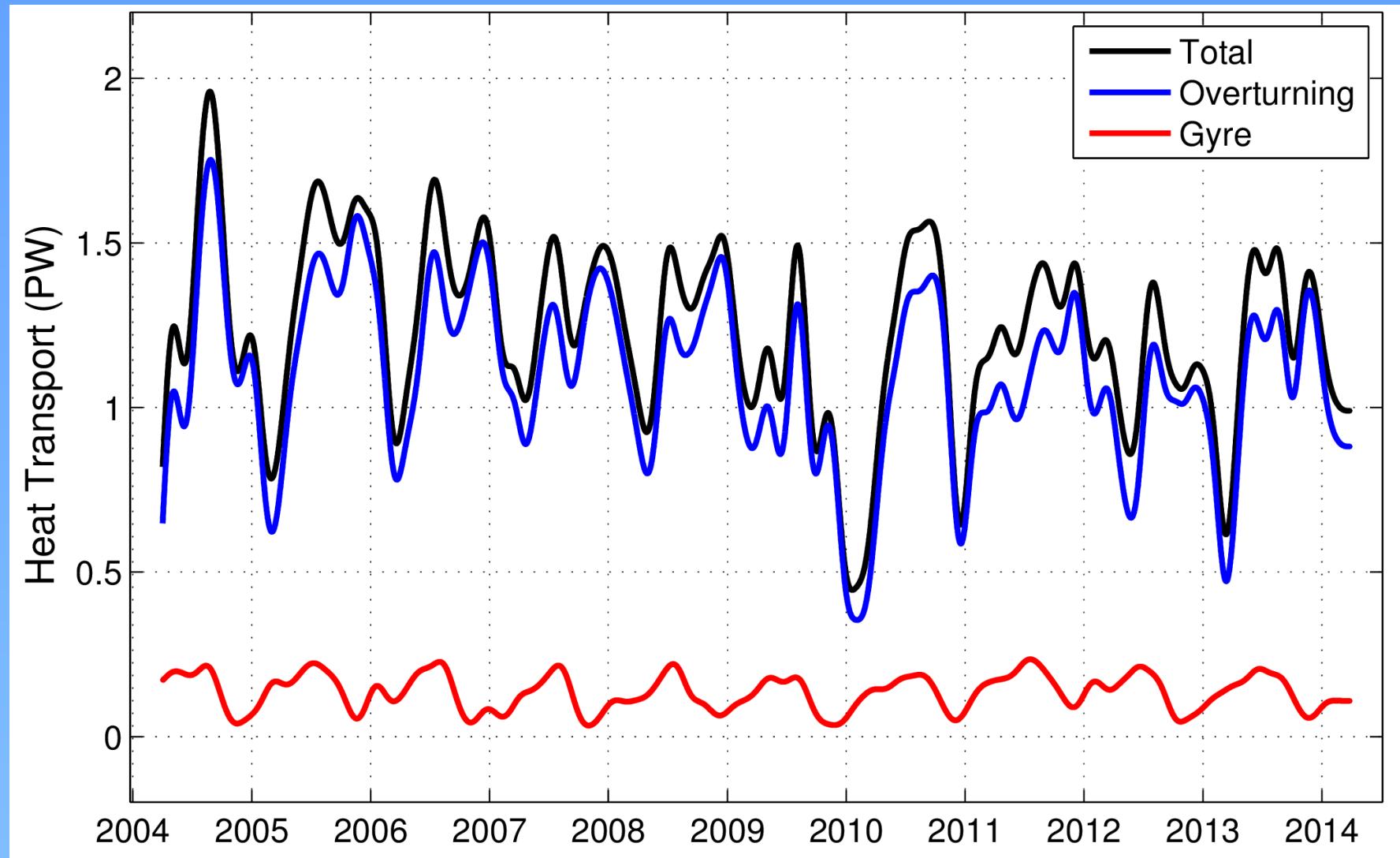
- transport through the Florida Straits
- flow induced by the interaction between wind and the ocean surface (Ekman transport)
- transport related to the difference in sea water density between the American and African continents

Volumentransport bei 26,5°N

RAPID Array

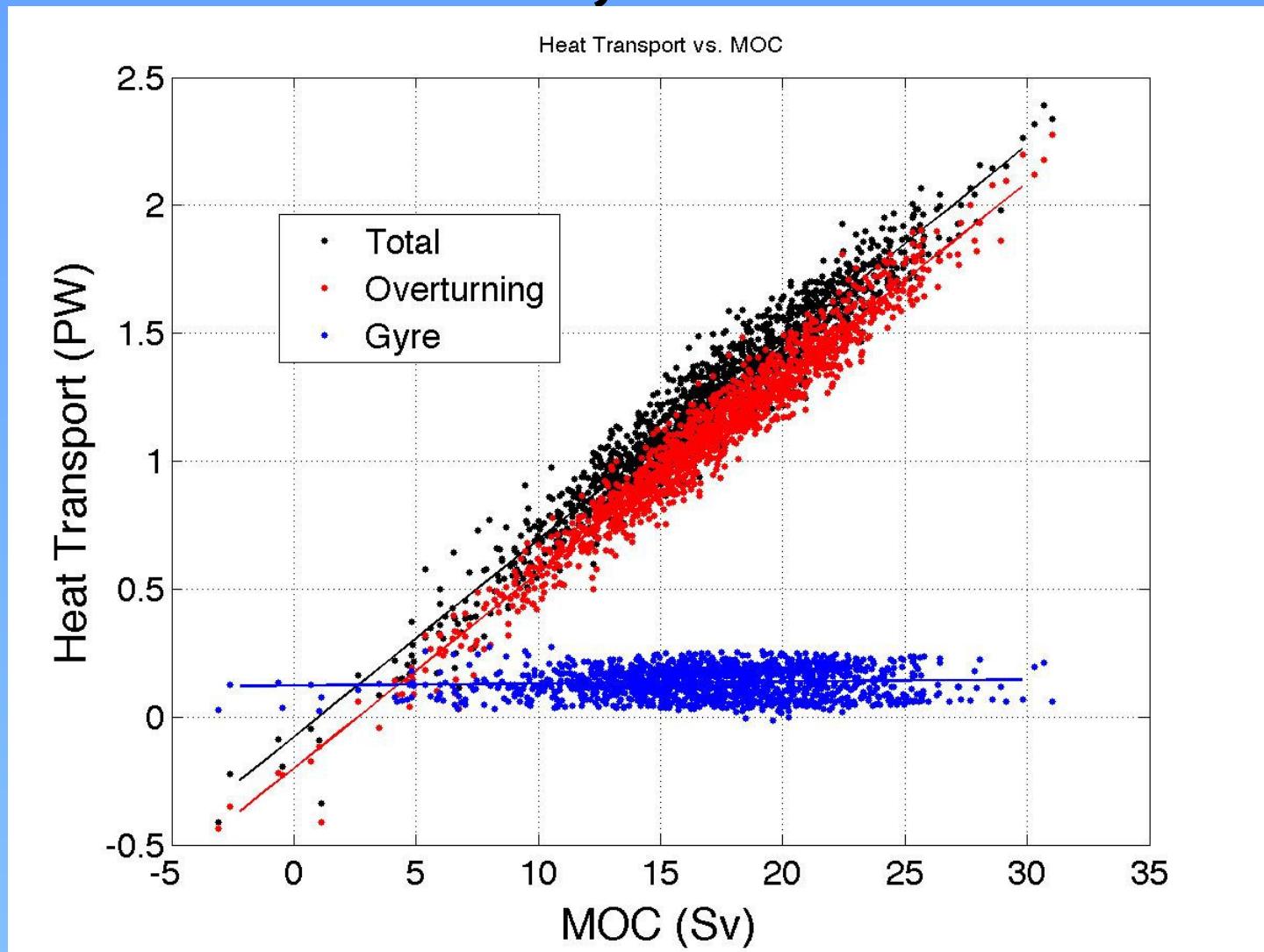


Wärmetransport bei 26,5°N

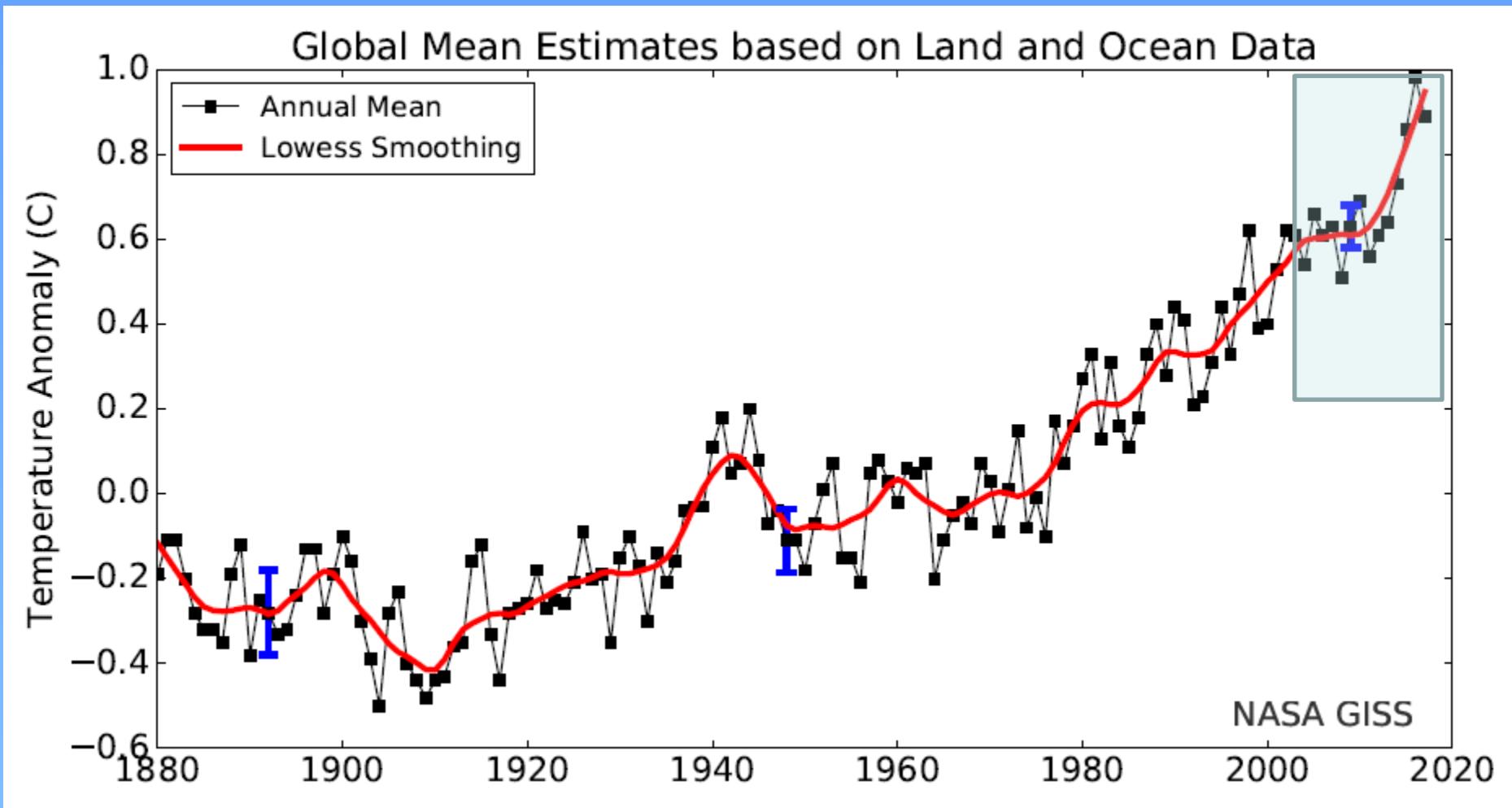


http://yyy.rsmas.miami.edu/users/mocha/mocha_results.htm

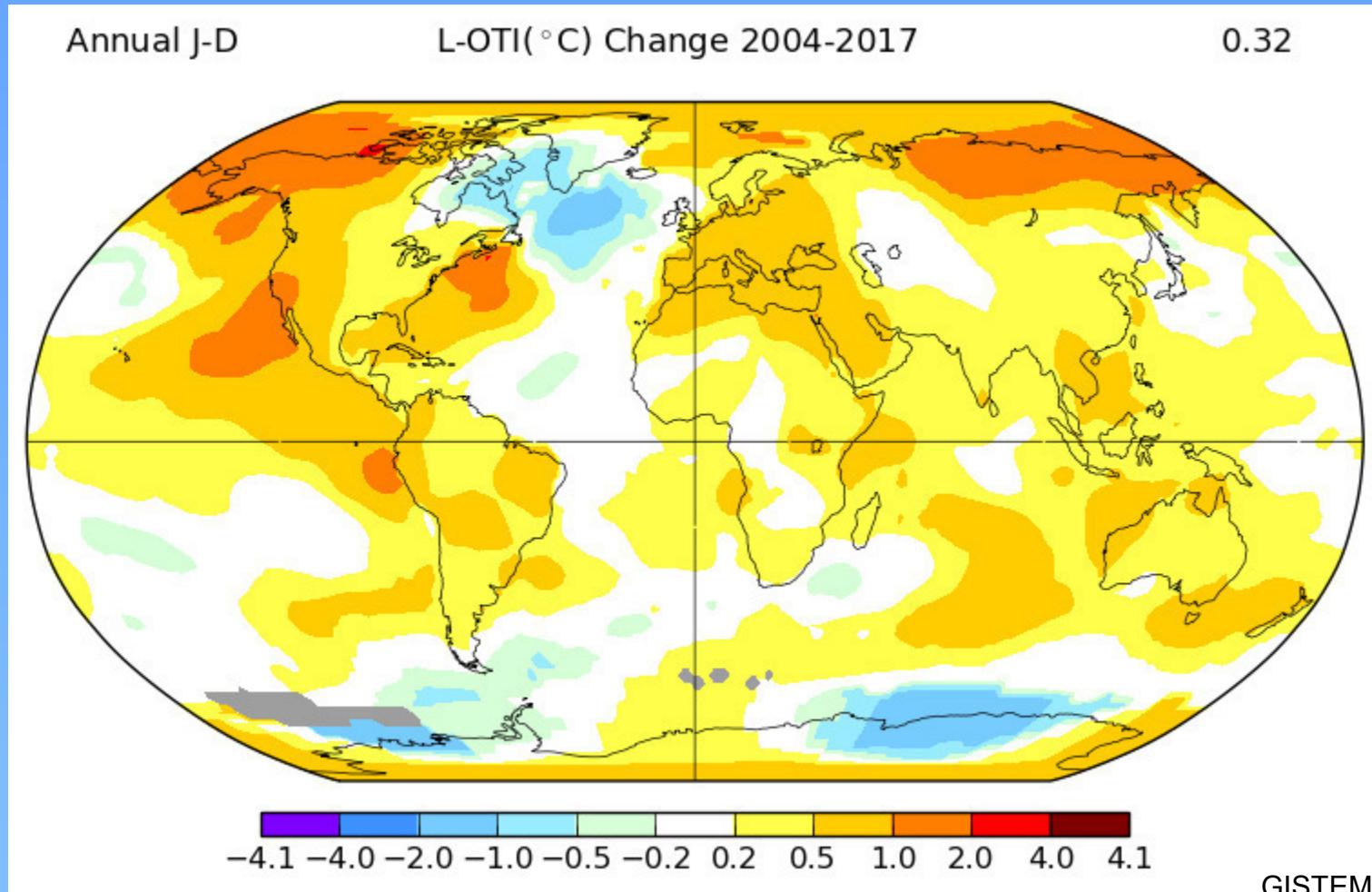
Wärmetransport vs. AMOC, 26,5°N



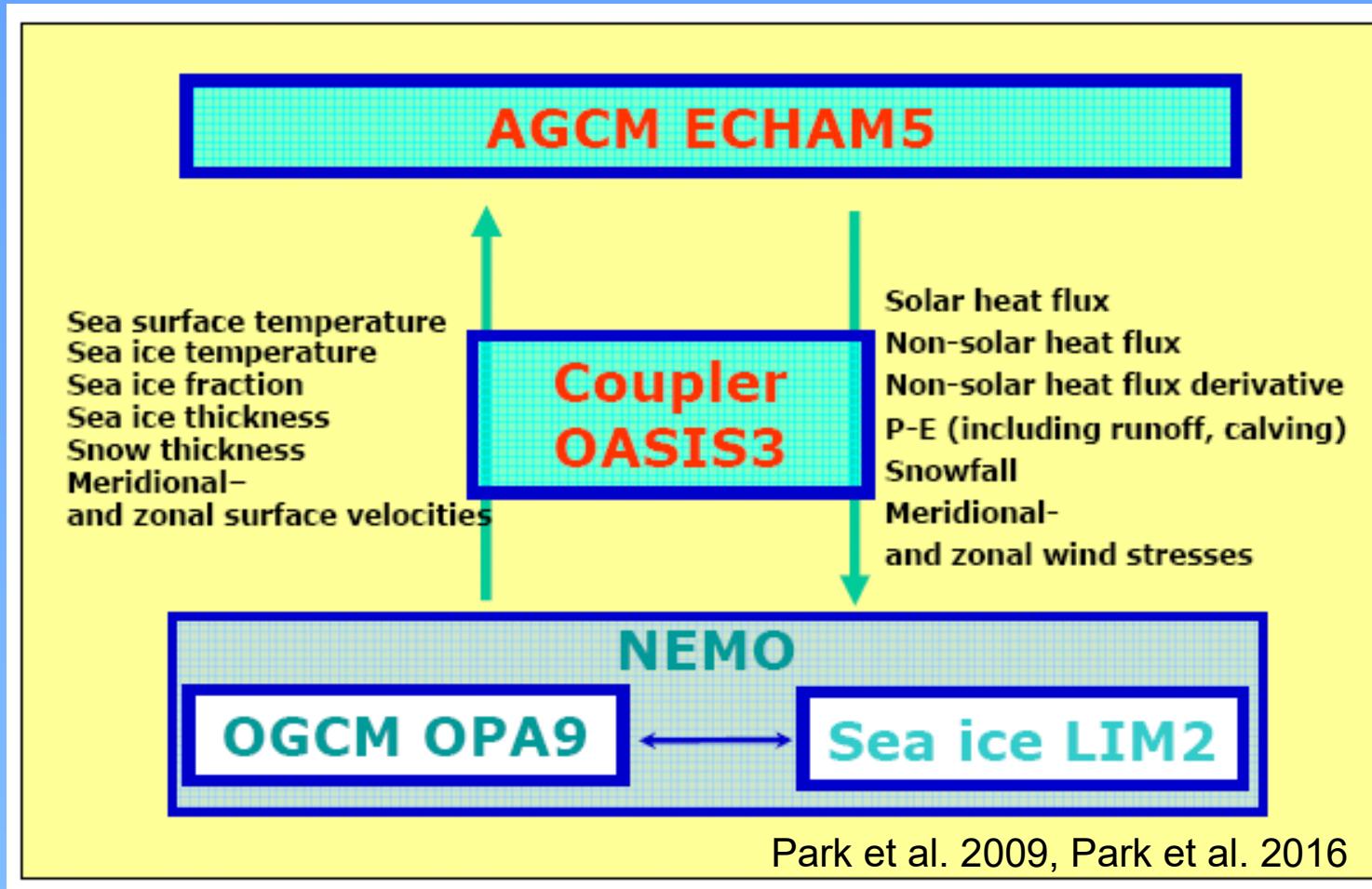
Die globale Temperatur seit 1880



Der „kalte Klecks“ während der letzten Jahre

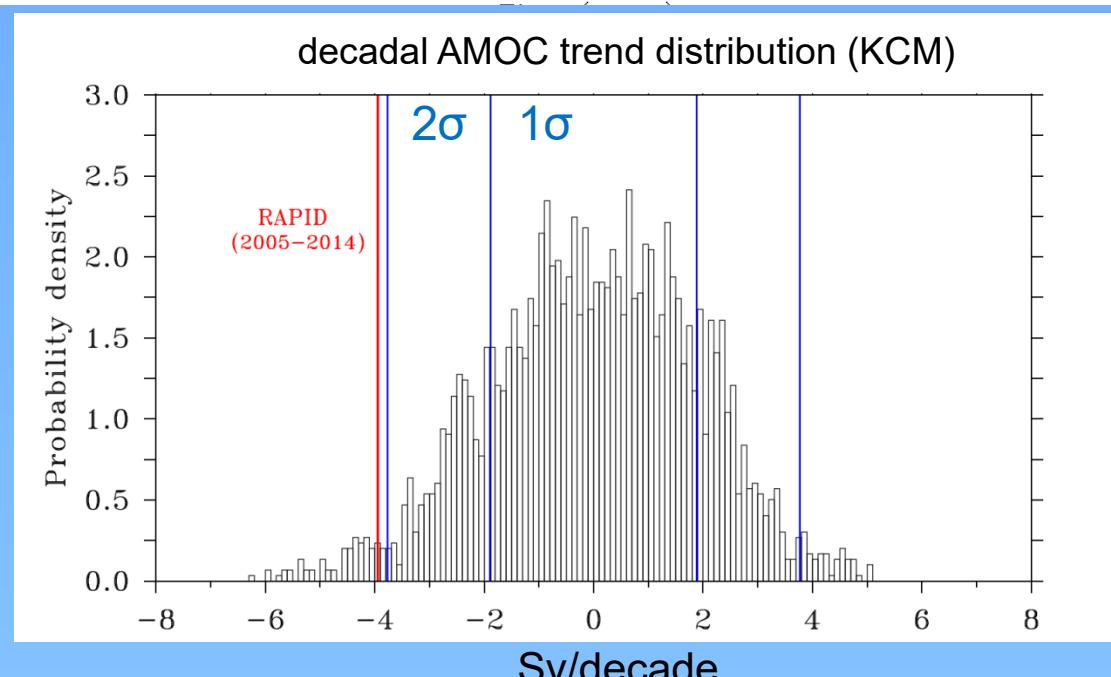
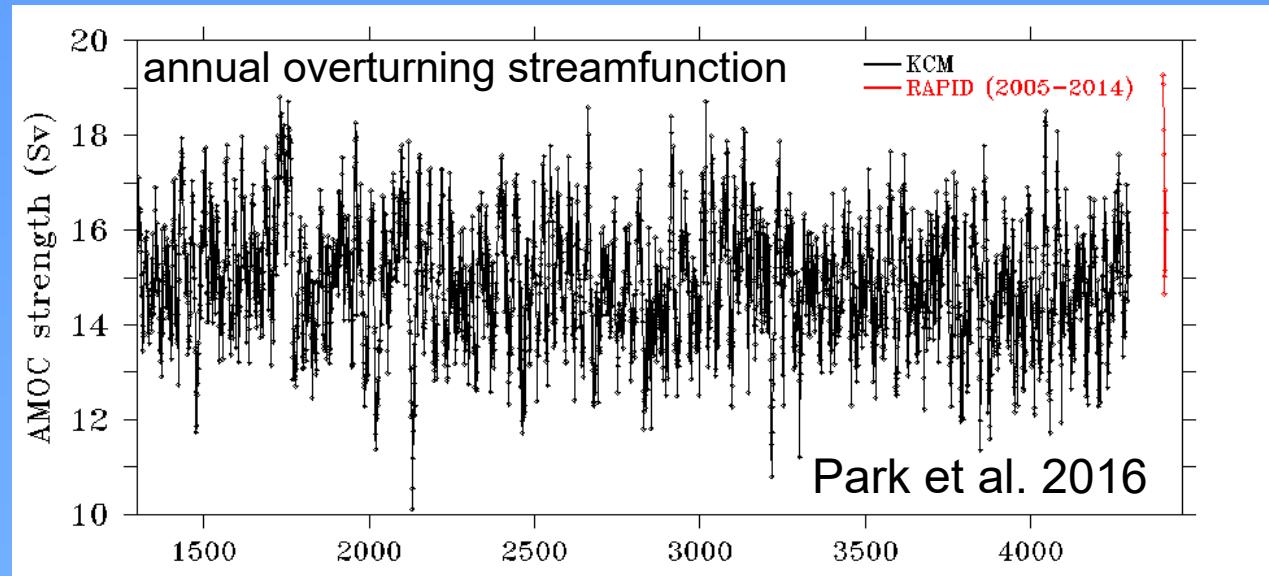


Kiel Climate Model (KCM)

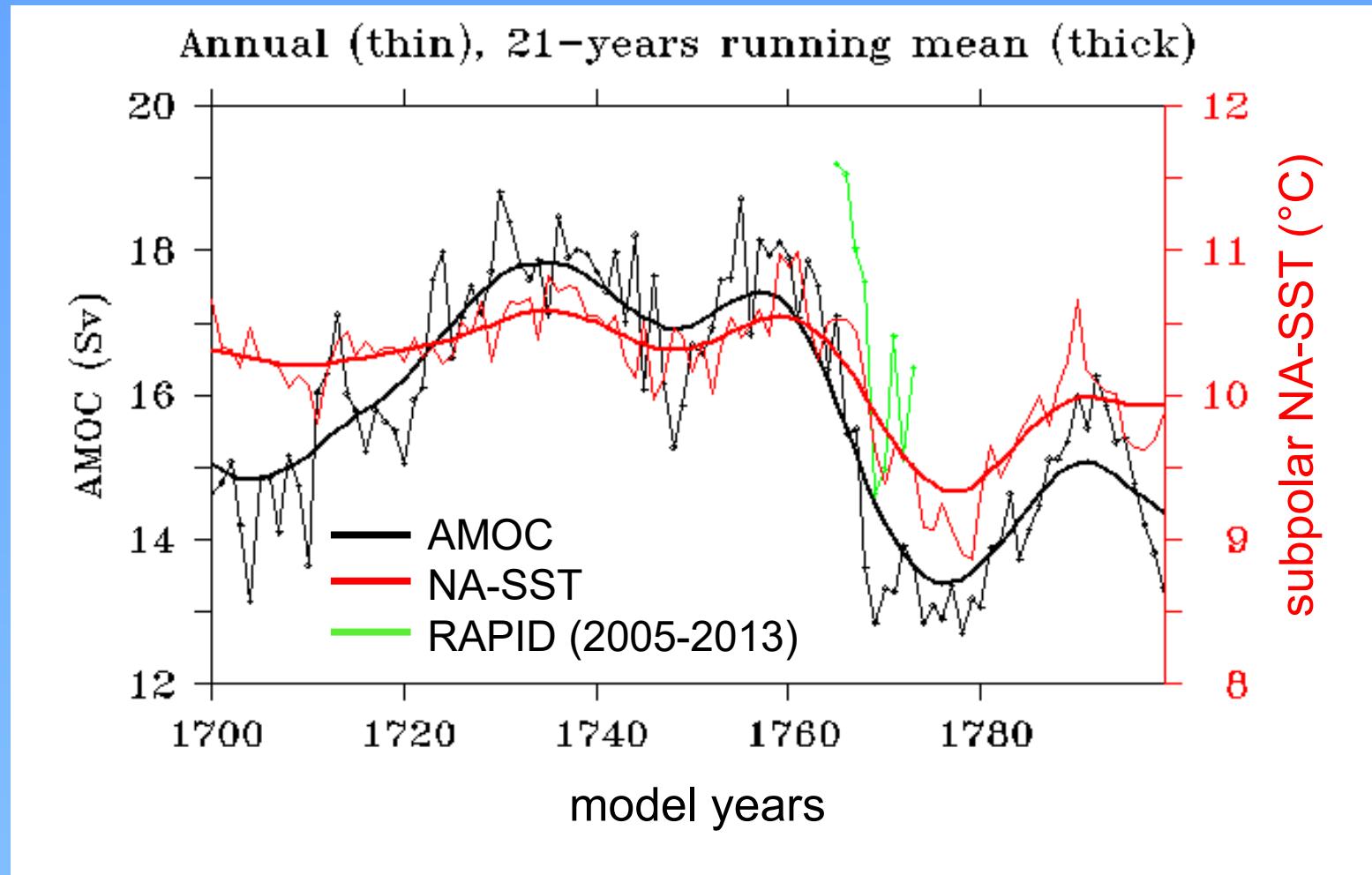


freshwater flux correction applied over the North Atlantic

AMOC in einem Kontrolllauf

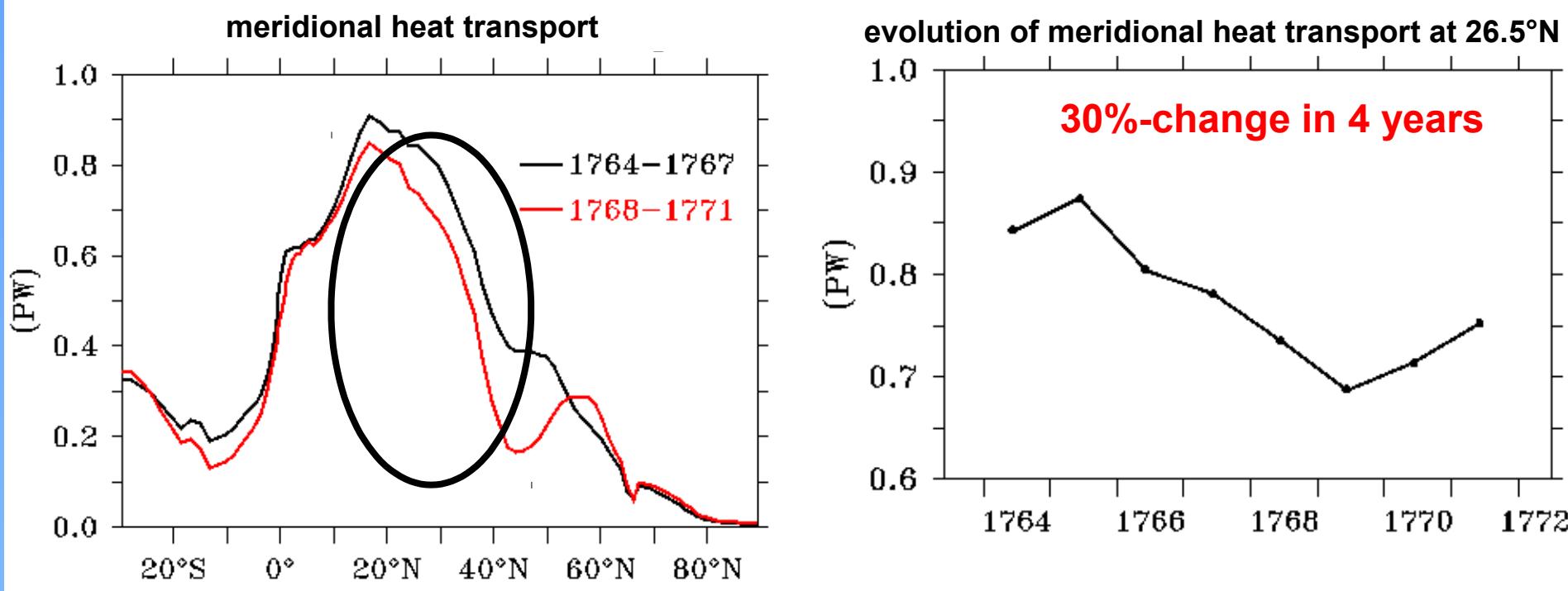


“Analogon” zum 2009/2010 AMOC Ereignis



...and the SST clearly follows the AMOC

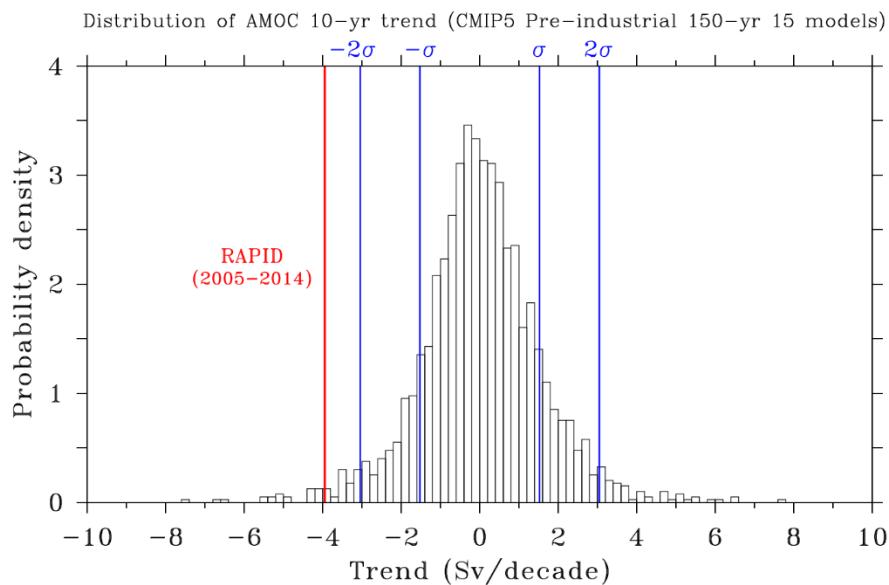
Änderung des Wärmetransports im Modell



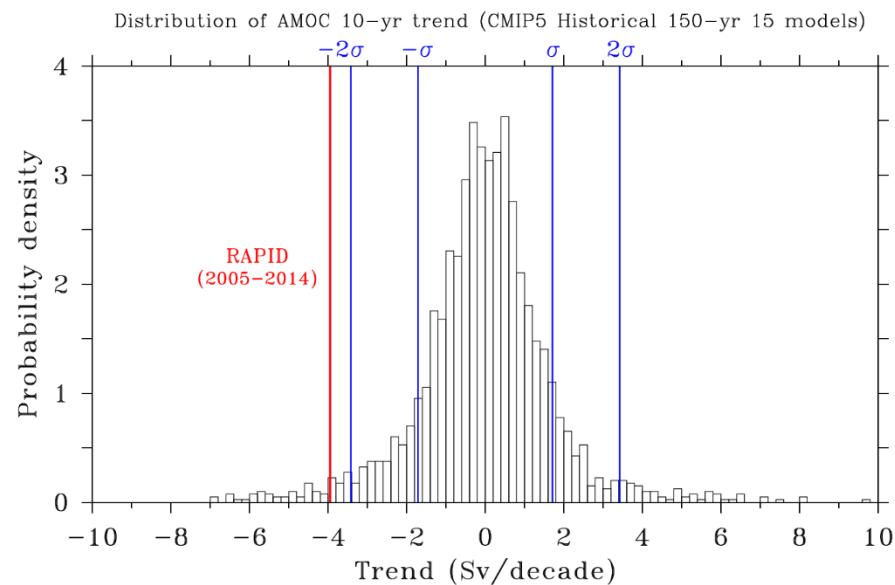
a fast decline in meridional heat transport did contribute to the SST change in the mid-latitudes

AMOC Variabilität in CMIP5*-Modellen

a) Decadal AMOC trend distribution, pre-industrial control runs



b) Decadal AMOC trend distribution, "historical" simulations (not de-trended)

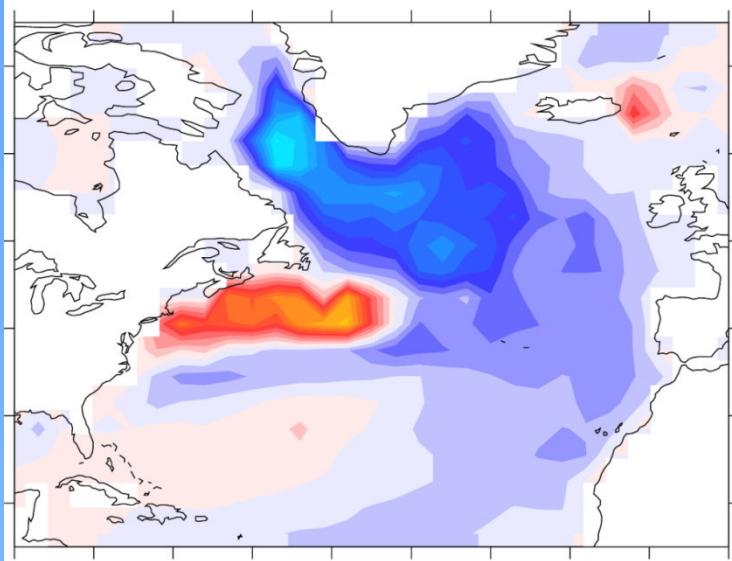


Der gemessene Trend während der letzten Jahre ist noch im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite

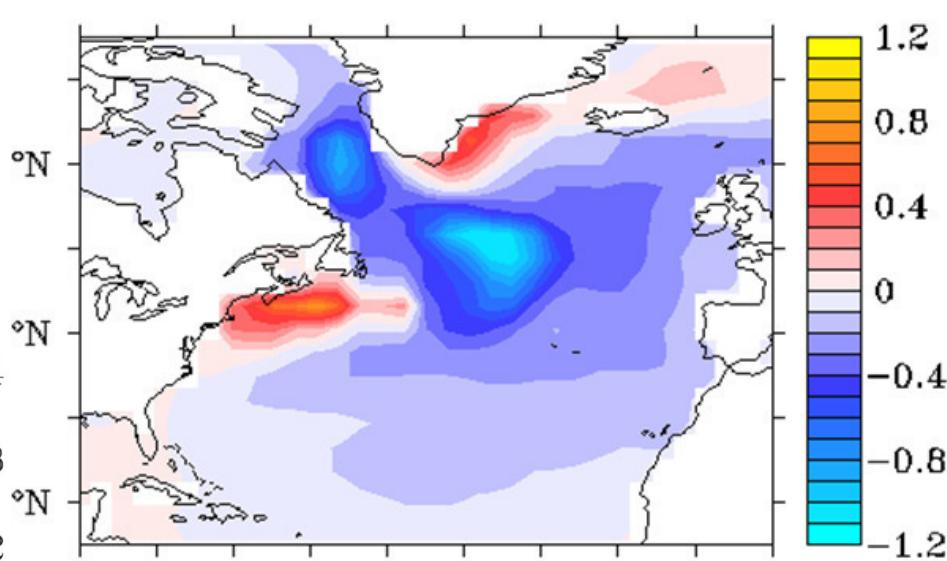
*CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project phase 5

Decadal SST differences (low AMOC – high AMOC)

CMIP composite

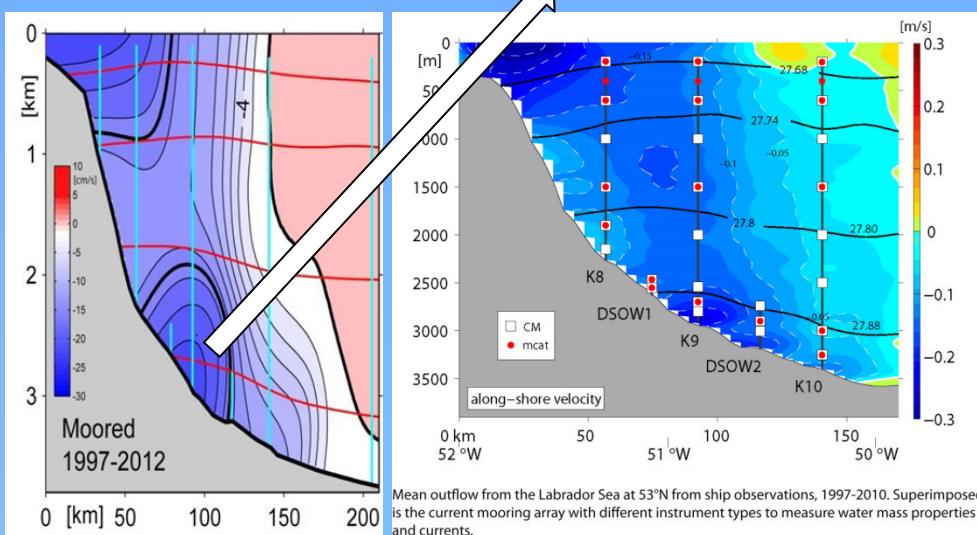
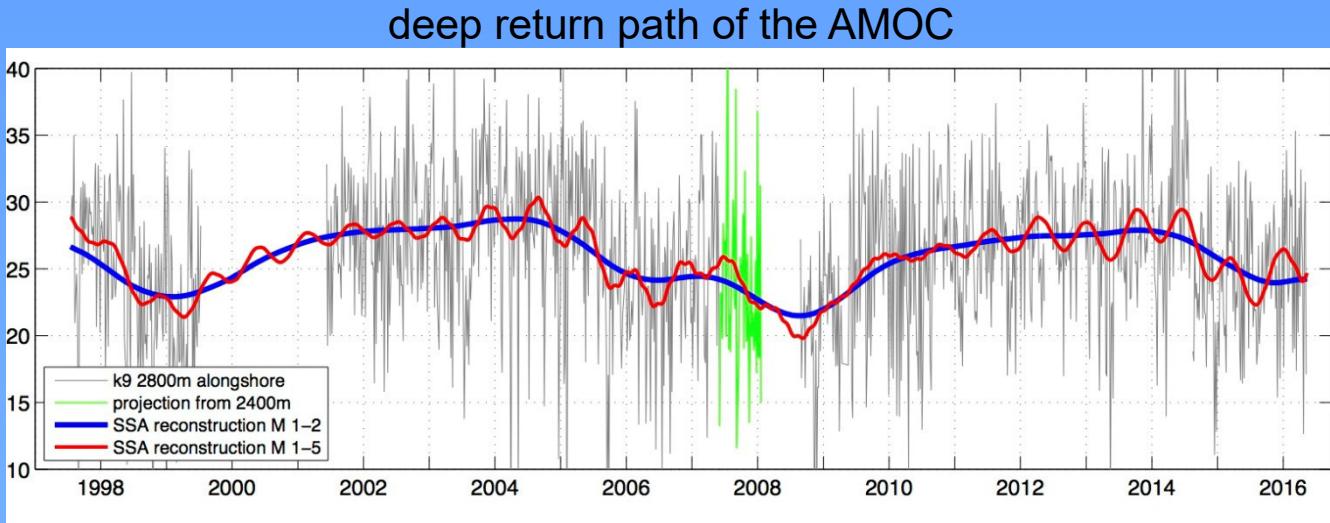


KCM composite



computed from decadal AMOC events exceeding the 2σ -threshold

Messungen im tiefen Randstrom

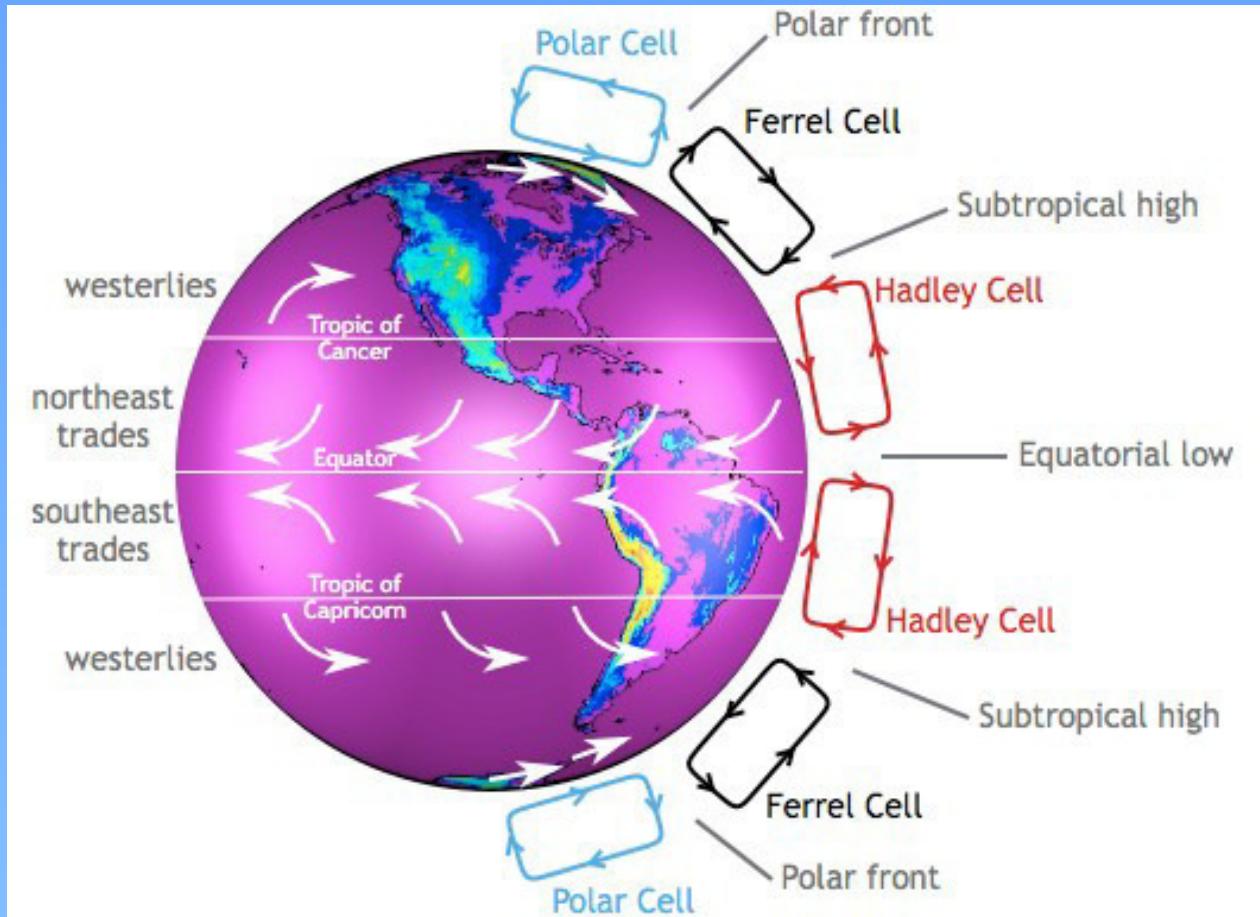


Zantopp et al. 2017, JGR Oceans

Tiefer Westlicher
Randstrom

Deep Western Boundary
Current (DWBC)

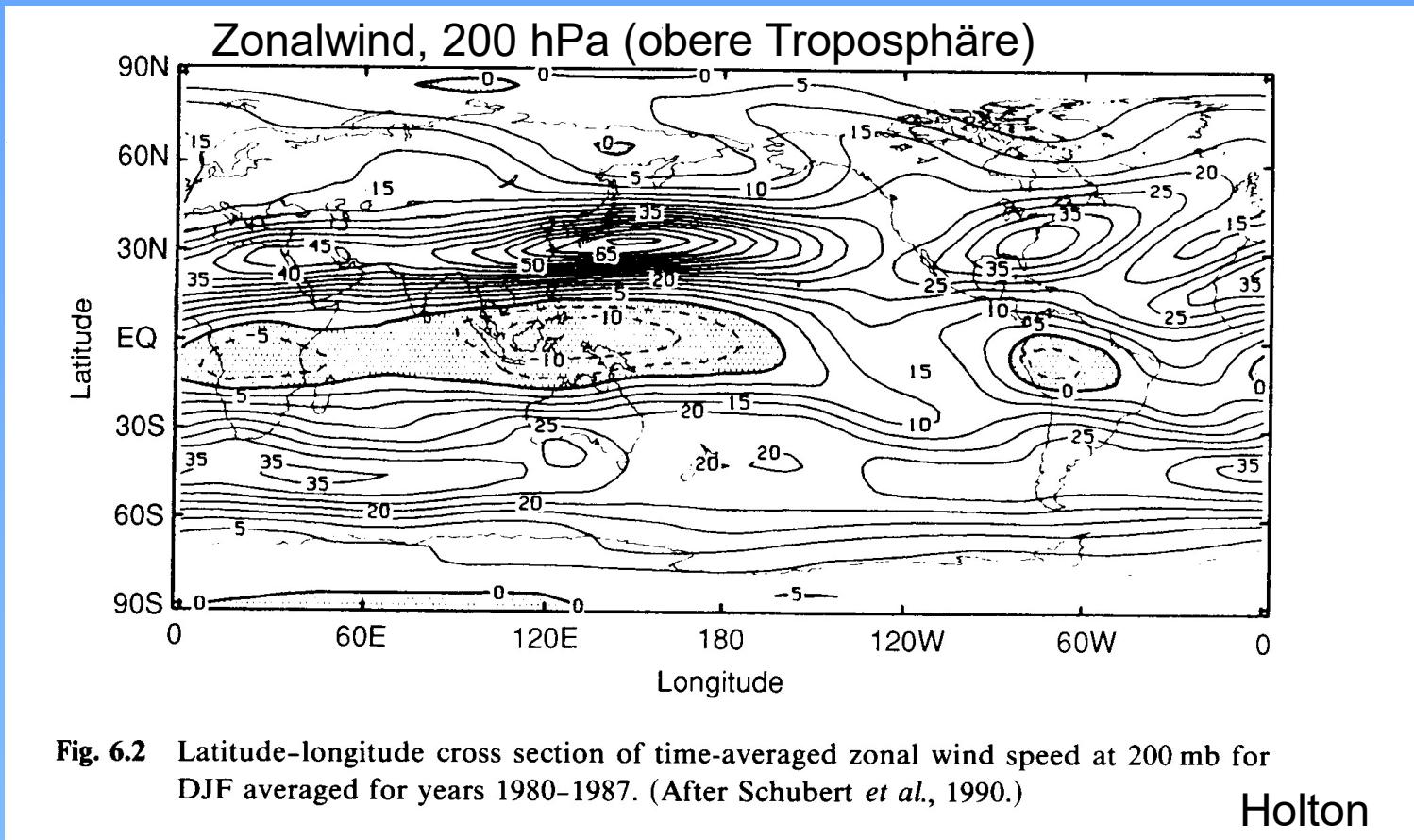
Die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre



<http://kiwi.atmos.colostate.edu/cmmap/learn/climate/circ1.html>

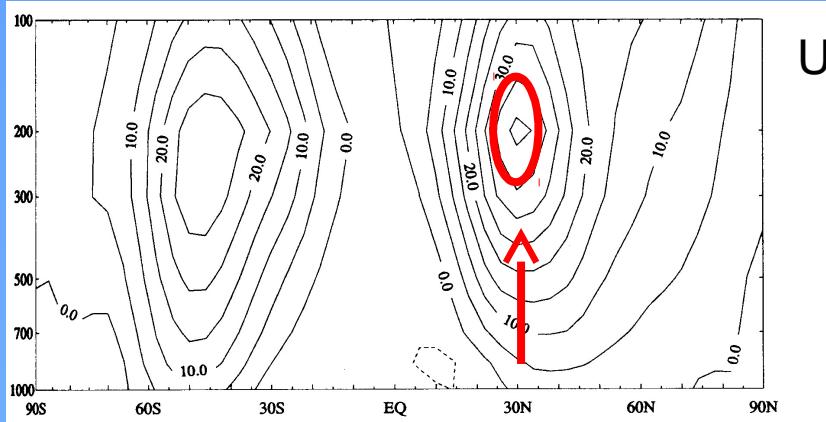
Der Zonalwind in der Höhe

siehe das Lehrbuch von Holton „An Introduction to Dynamic Meteorology“
für weitere Details über die allgemeine Zirkulation

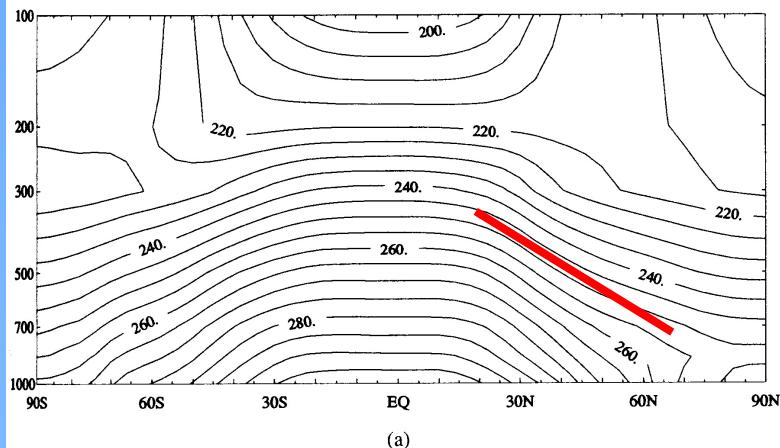


Wir werden im Folgenden die zonalen Mittelwerte betrachten

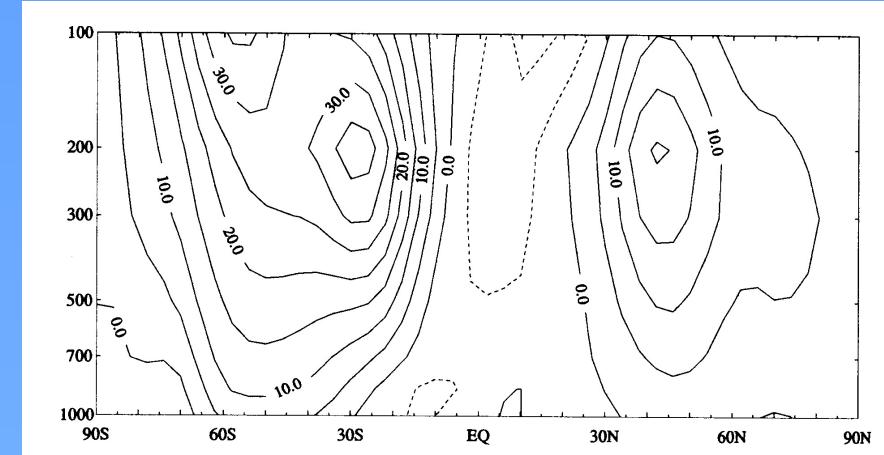
Die zonal gemittelte Zirkulation



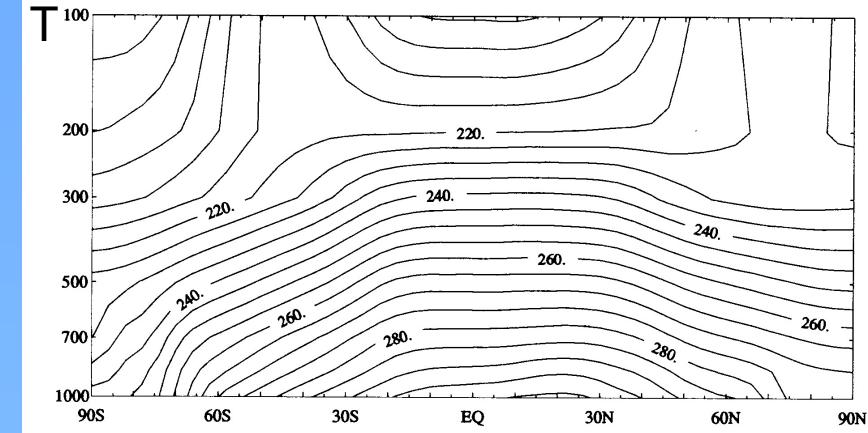
U



(a)



T



(b)

Fig. 6.1 Meridional cross sections of longitudinally averaged zonal wind (top panels, m s $^{-1}$) and temperature (bottom panels, contours, K) for (a) DJF and (b) JJA averaged for years 1980–1987. (Adapted from Schubert *et al.*, 1990.) (Figure continues.)

Fig. 6.1 (Continued)

Holton

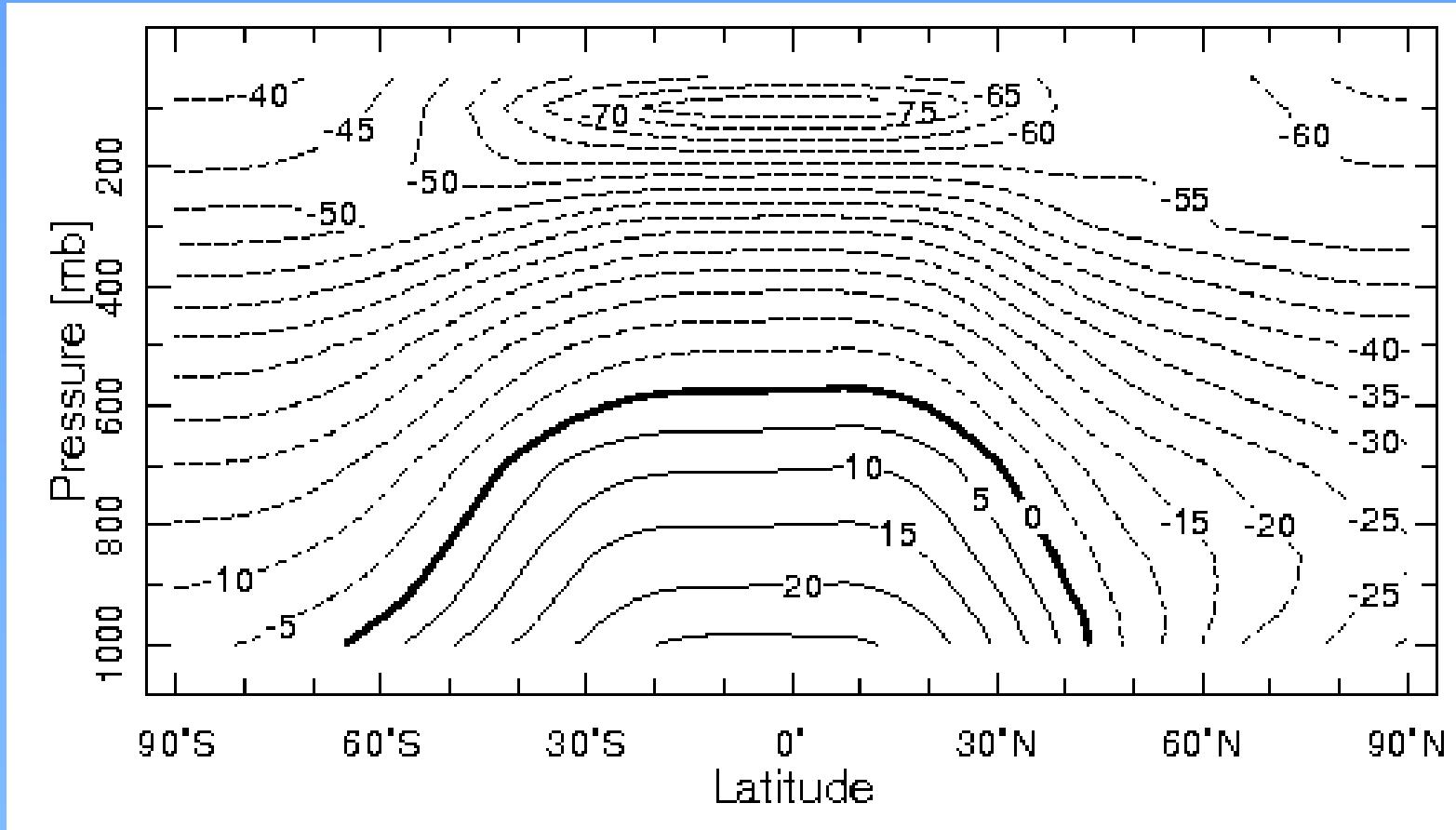
Nordwinter

Die Thermische Windbilanz ist in den mittleren Breiten offensichtlich

Südwinter

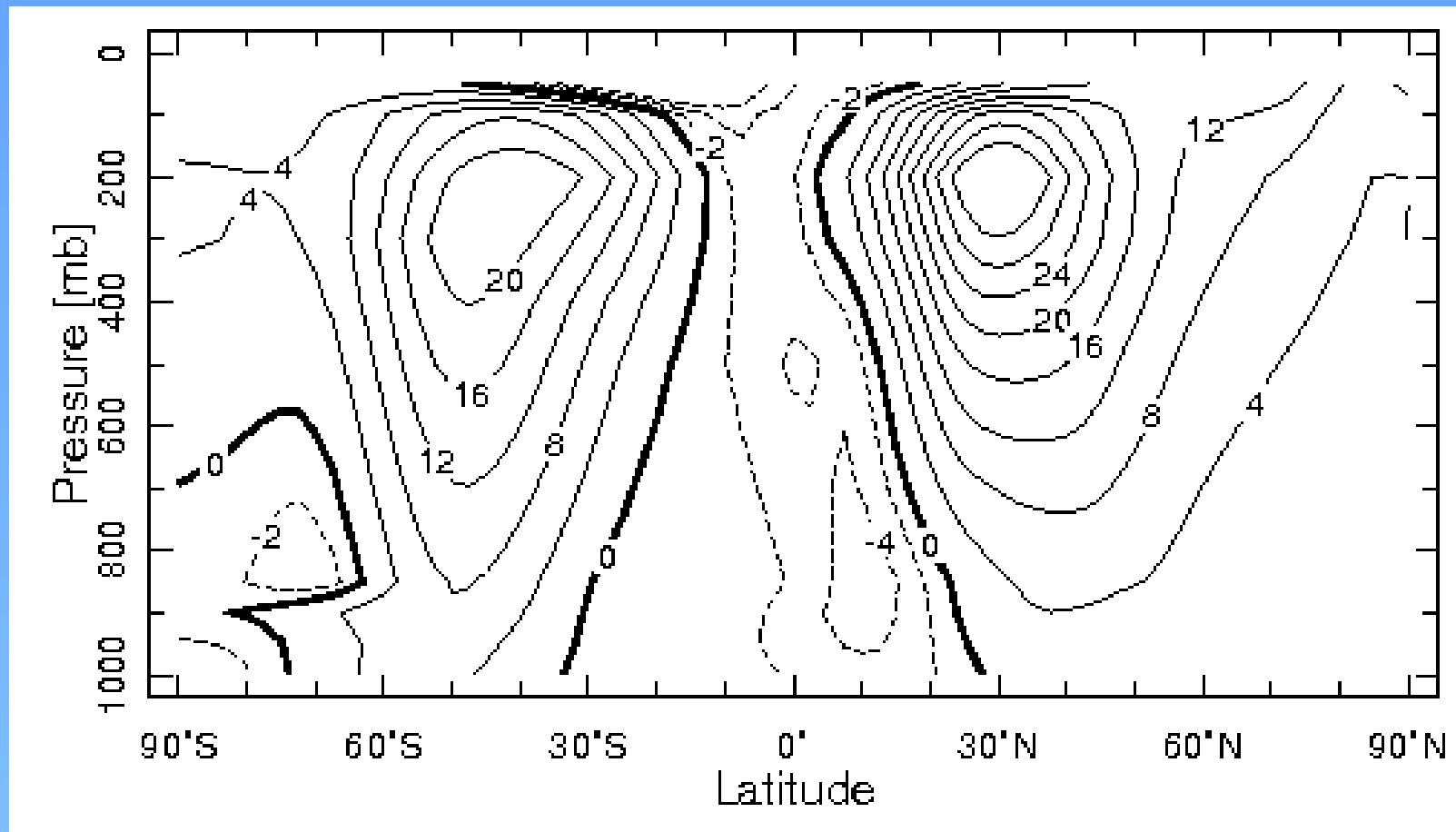
GEOMAR

Zonal gemittelte Temperatur (DJF)



<http://paoc.mit.edu/labweb/atmos-obs/temperature.htm>

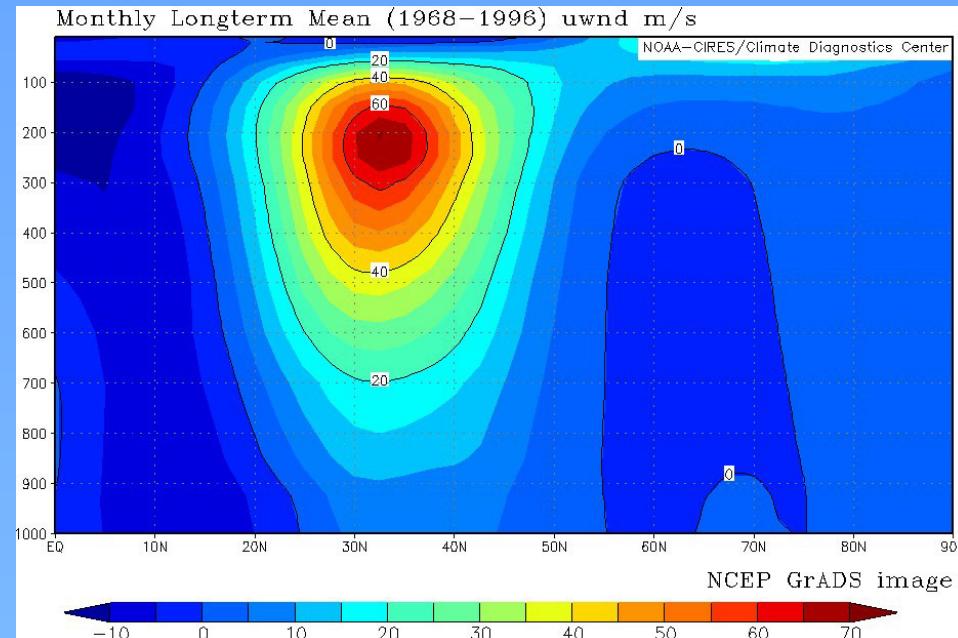
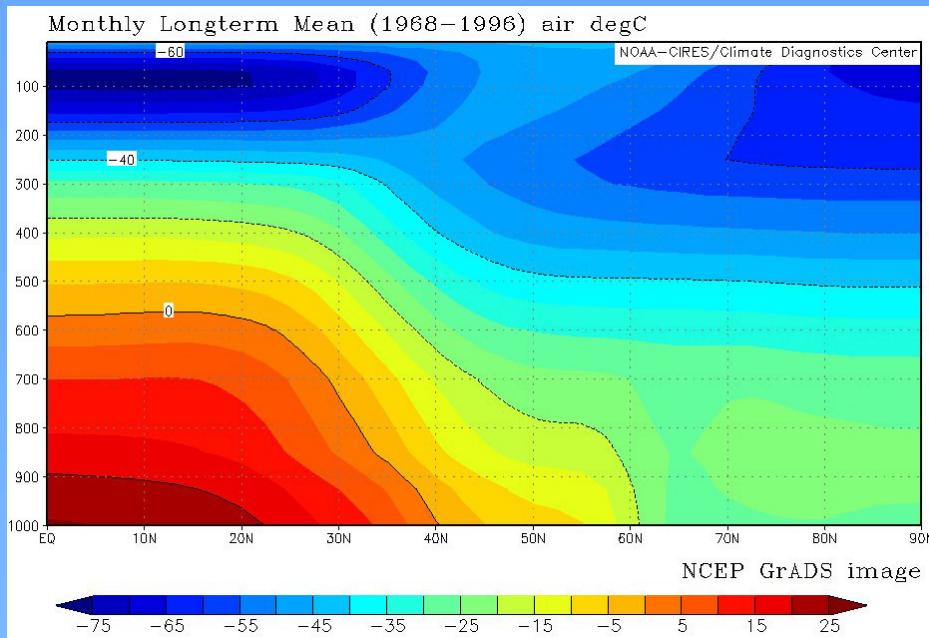
Zonal gemittelter Zonalwind (DJF)



<http://paoc.mit.edu/labweb/atmos-obs/zonalwind.htm>

Die thermische Windbilanz am Beispiel der Daten bei 150°E

Monat Januar



$$f_0 \partial \bar{u} / \partial z + RH^{-1} \partial \bar{T} / \partial y = 0$$

$$z = -H \cdot \ln(p/p_s)$$

Theoretische Beschreibung (siehe Lehrbuch von Holton)

- Vertikale Koordinate: logarithmisches Druck-System,
 $z = -H \cdot \ln(p/p_s)$, H : Skalenhöhe (RT_s/g), T_s ist die globale Mitteltemperatur
- Hydrostatische Approximation
- Zonale Mittelung ($A = \bar{A} + A'$), Eddy-Terme treten auf (stören die thermische Windbilanz)
- Quasi-geostrophische Bewegung auf einer β -Ebene (gute Approximation für großräumige Bewegung in den mittleren Breiten)
- Rossby-Zahl (Ro) $\ll 1$, $Ro = U/(fL)$, $(10 \text{ ms}^{-1}/(10^{-4} \text{ s}^{-1} \cdot 10^6 \text{ m}) = O(Ro) \ll 1$
- Die Meridionalzirkulation sorgt dafür, dass die thermische Windbeziehung für (die zonalen Mittel) der Temperatur und des Zonalwindes gilt

Die resultierenden Gleichungen

$$\partial \bar{u} / \partial t - f_0 \bar{v} = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{u' v'} \right) + \bar{X}$$

$$\partial \bar{T} / \partial t + N^2 H R^{-1} \bar{w} = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{v' T'} \right) + \bar{J} / c_p$$

$$N^2 \equiv \frac{R}{H} \left(\frac{\kappa T_0}{H} + \frac{dT_0}{dz} \right)$$

$$f_0 \partial \bar{u} / \partial z + R H^{-1} \partial \bar{T} / \partial y = 0$$

Die thermische Windbilanz muss (!) erfüllt sein

$f = f_0 + \beta y$, β -Ebene Approximation

Konsistent mit der quasi-geostrophischen Theorie gibt es keine Advektion nur durch die ageostrophische meridionale Zirkulation (\bar{v}, \bar{w})

Definition der Stromfunktion

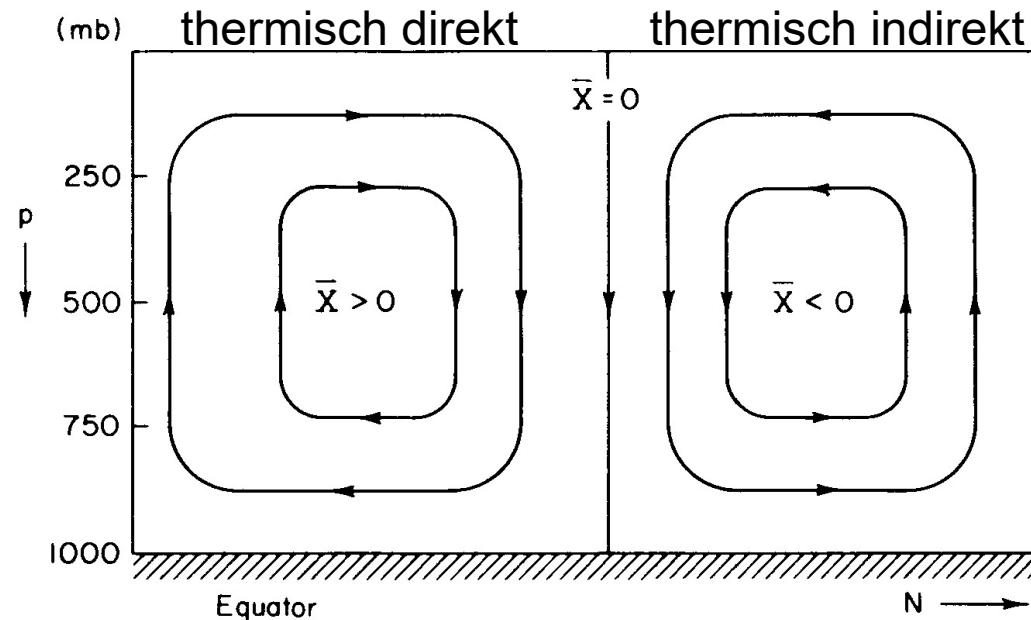


Fig. 10.1 Relationship of the Eulerian mean meridional streamfunction to the vertical and meridional motion.

Holton

Thermisch direkte Zelle: Aufsteigen bei relativ warmen Temperaturen, Absinken bei relativ kalten Temperaturen. In den Tropen gibt es eine direkte Zelle (Hadley-Zelle), in den mittleren Breiten eine indirekte Zelle (Ferrel-Zelle)

Gleichung für die Stromfunktion

Durch Manipulation der quasi-geostrophischen und zonal gemittelten Gleichungen und mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung können wir eine Stromfunktion einführen und eine Gleichung für diese herleiten

$$\rho_0 \bar{v} = -\frac{\partial \bar{\chi}}{\partial z} \quad , \quad \rho_0 \bar{w} = \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\chi}}{\partial y^2} + \frac{f_0^2}{N^2} \rho_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial z} \right) = \frac{\rho_0}{N^2} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa \bar{J}}{H} - \frac{R}{H} \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}' T') \right) - f_0 \left(\frac{\partial^2 (\bar{u}' v')}{\partial z \partial y} - \frac{\partial \bar{X}}{\partial z} \right) \right]$$

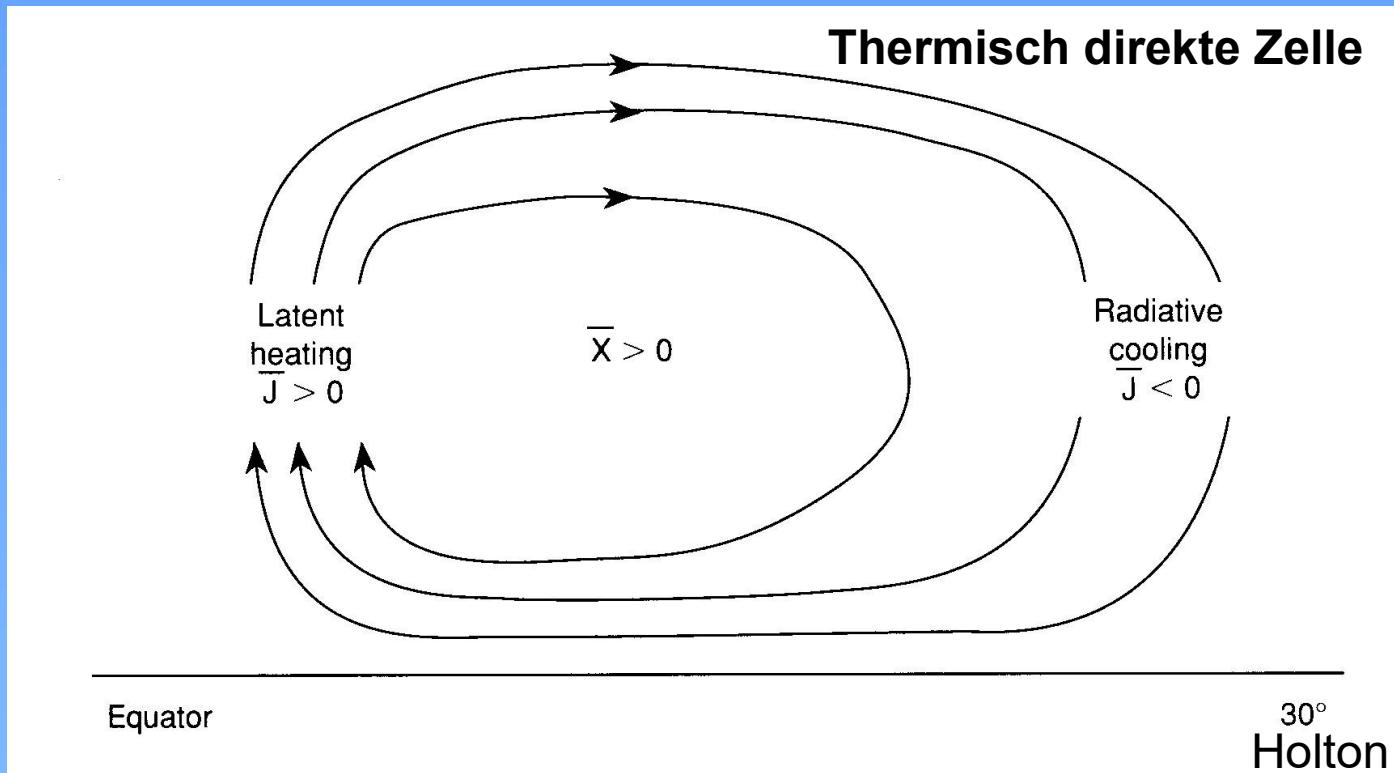
$$\bar{\chi} \sim -\frac{\partial}{\partial y} \quad (\text{diabatische Heizung})$$

$$+ \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (\text{Eddy-Wärmefluss})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} \quad (\text{Eddy-Impulsfluss})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{zonale turbulente Reibung})$$

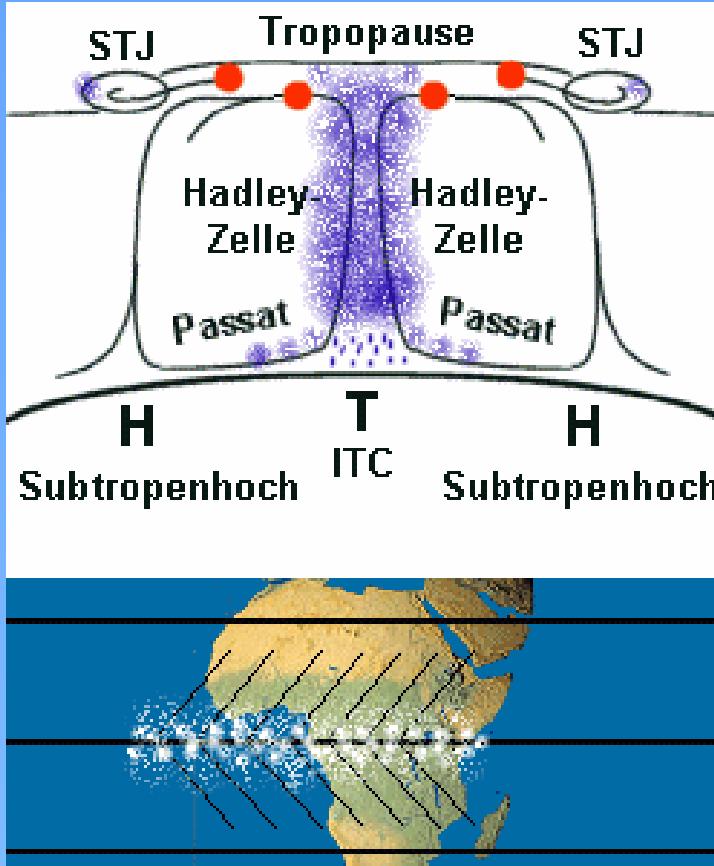
Die Hadley Zelle, schematisch



$$\frac{d\bar{J}}{dy} < 0$$

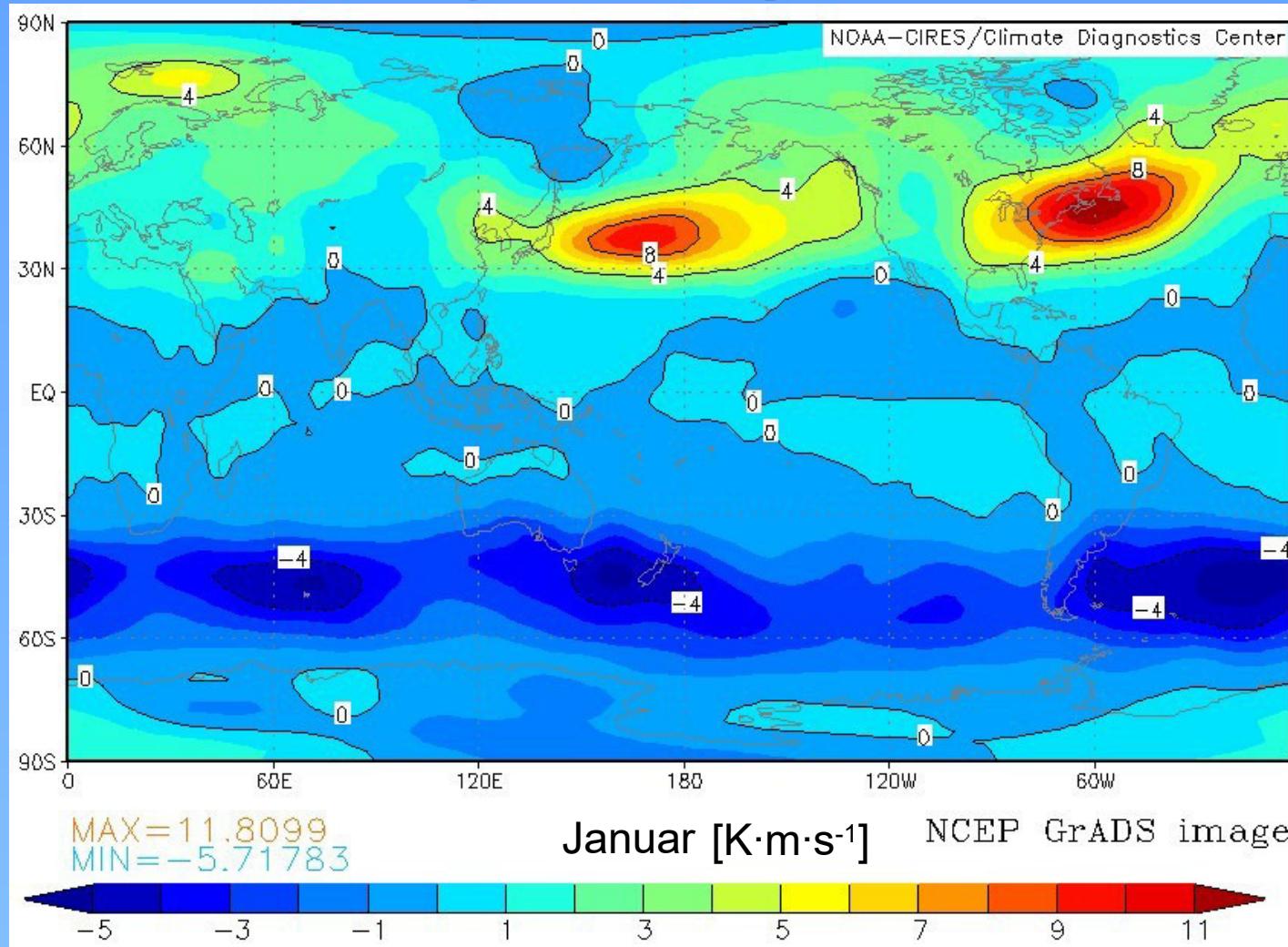
Starke Heizung durch latente Wärme am Äquator,
Strahlungsabkühlung in den Subtropen

Der Gradient der diabatischen Heizung treibt die Hadley-Zelle



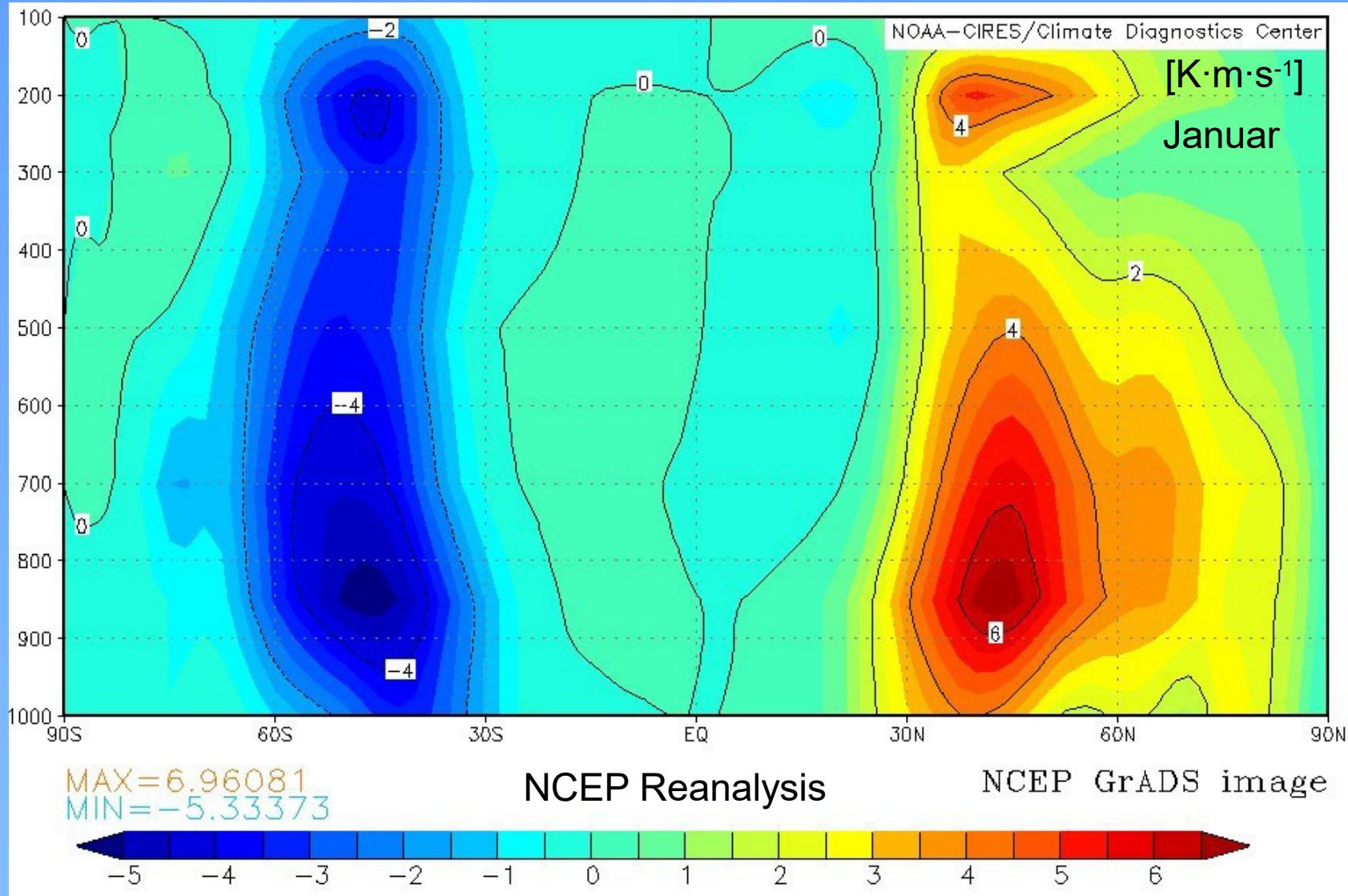
$\bar{\chi} \sim -\frac{\partial}{\partial y}$ (diabatische Heizung) → treibt eine thermisch direkte Zelle

Transiente Eddy-Wärmeflüsse, vertikal integriert (1000-100 hPa)



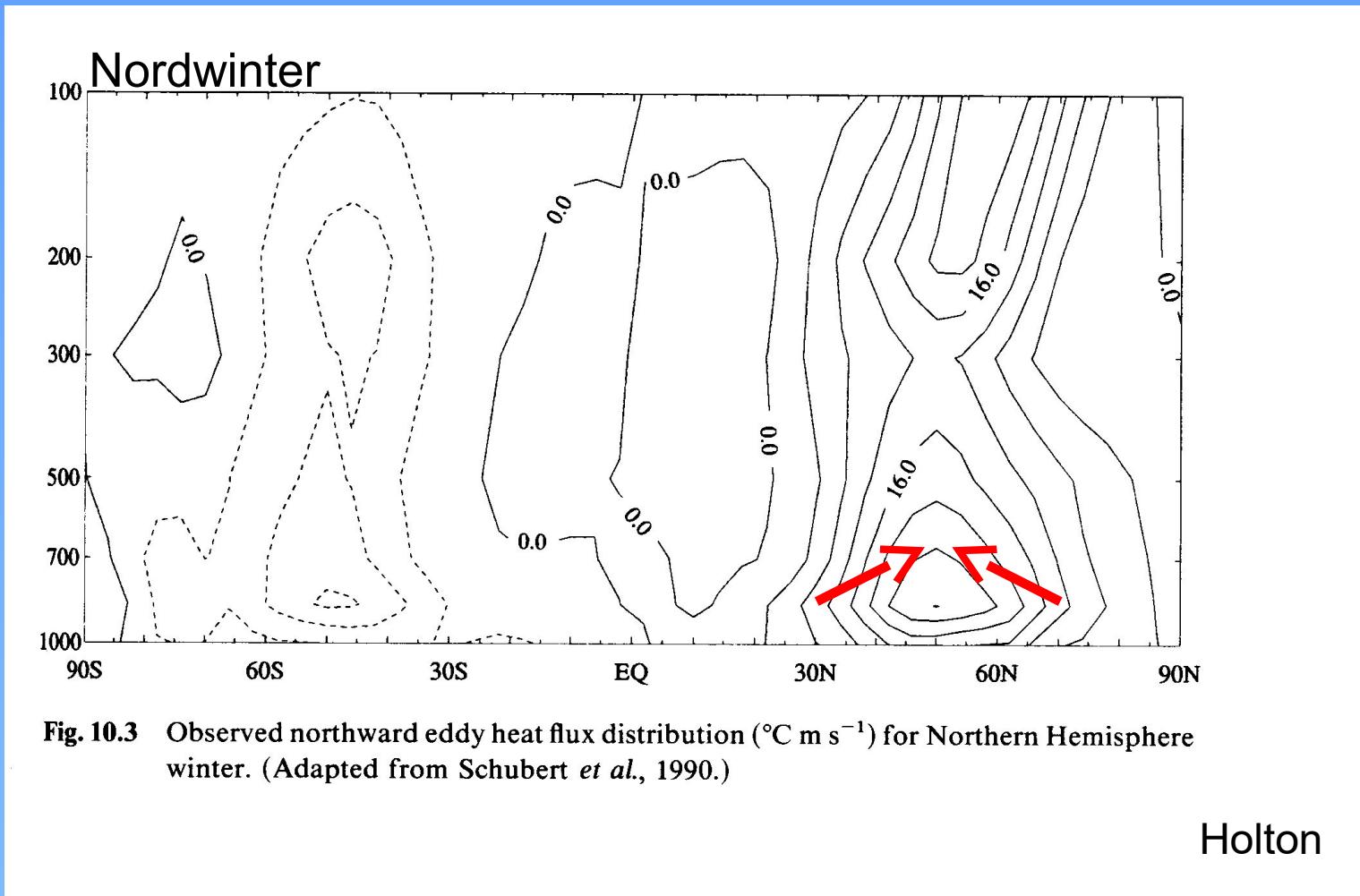
http://paoc.mit.edu/labguide_old/gen_circ/atmosdata/eddyheat_vertical.htm

Transient Eddy-Wärmeflüsse



http://paoc.mit.edu/labguide_old/gen_circ/atmosdata/eddyheat_zonal.htm

Eddy-Wärmeflüsse



Die Eddy-Wärmeflüsse treiben eine indirekte Zelle in den mittleren Breiten, die 2. Ableitung ist negativ

Der Effekt der Eddy-Wärmefflüsse

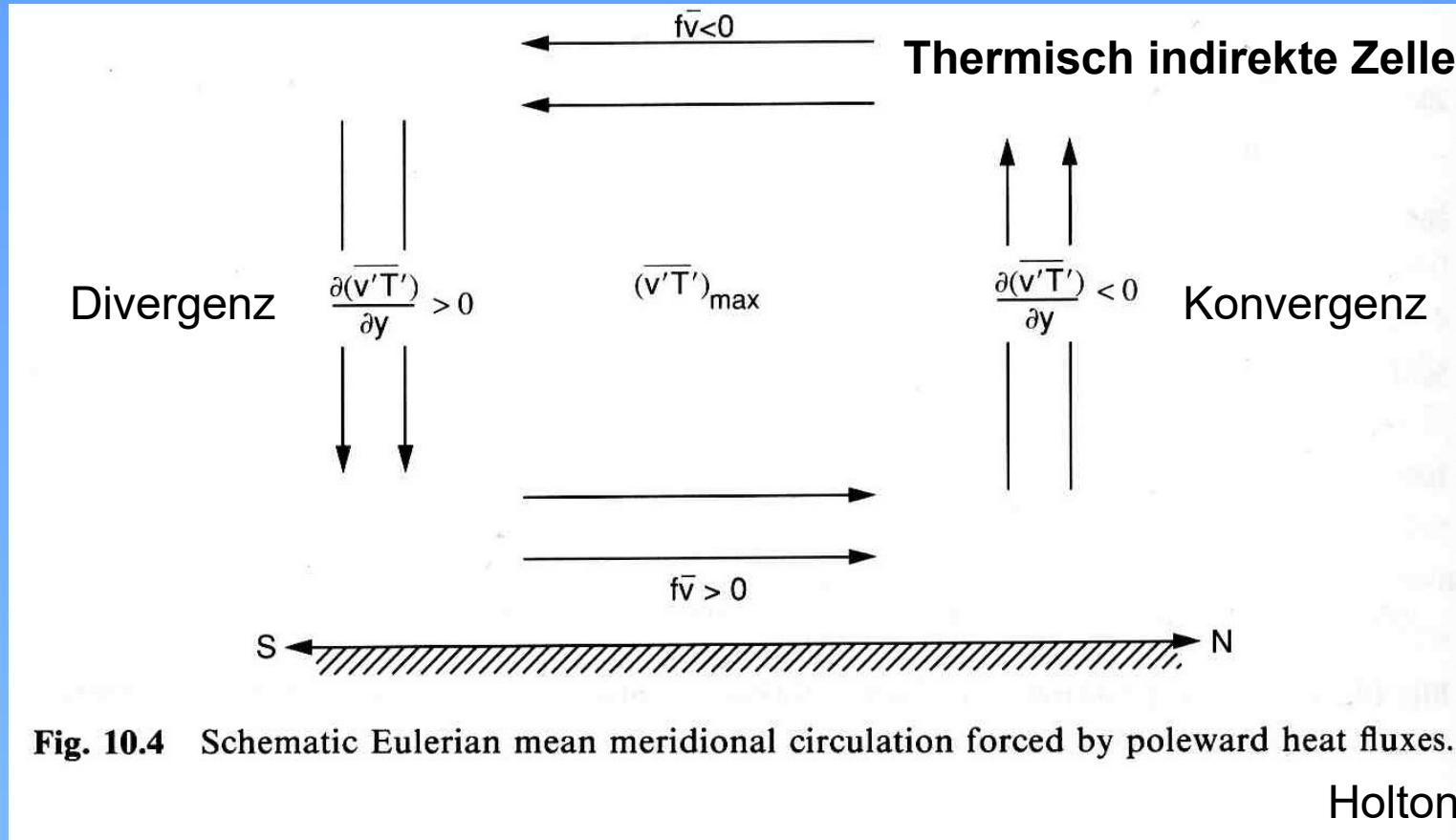


Fig. 10.4 Schematic Eulerian mean meridional circulation forced by poleward heat fluxes.
Holton

Die Eddy-Wärmefflüsse führen zu einer Verminderung des meridionalen Temperaturgradienten → deswegen muss sich auch die vertikale Windscherung ändern (thermischer Wind). Das besorgt der Coriolisterm in der Gleichung für den gemittelten zonalen Impuls.

Eddy-Impulsflüsse

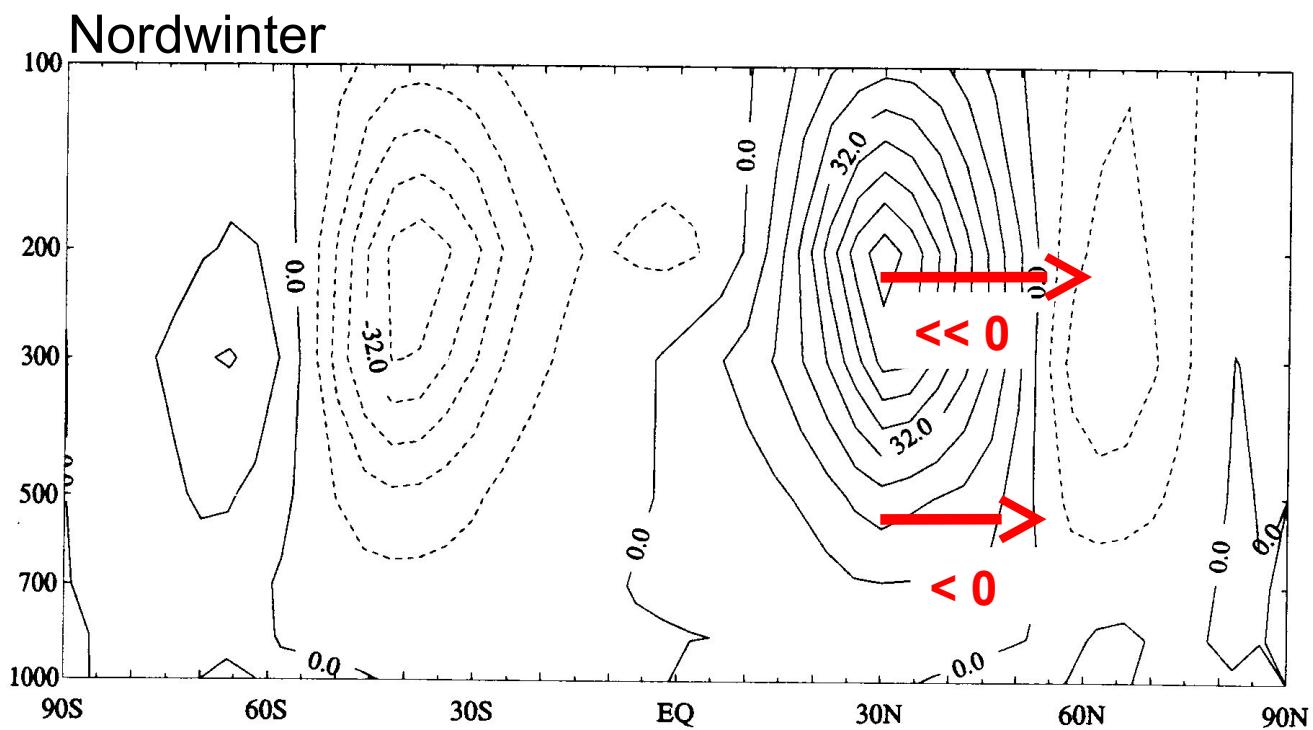
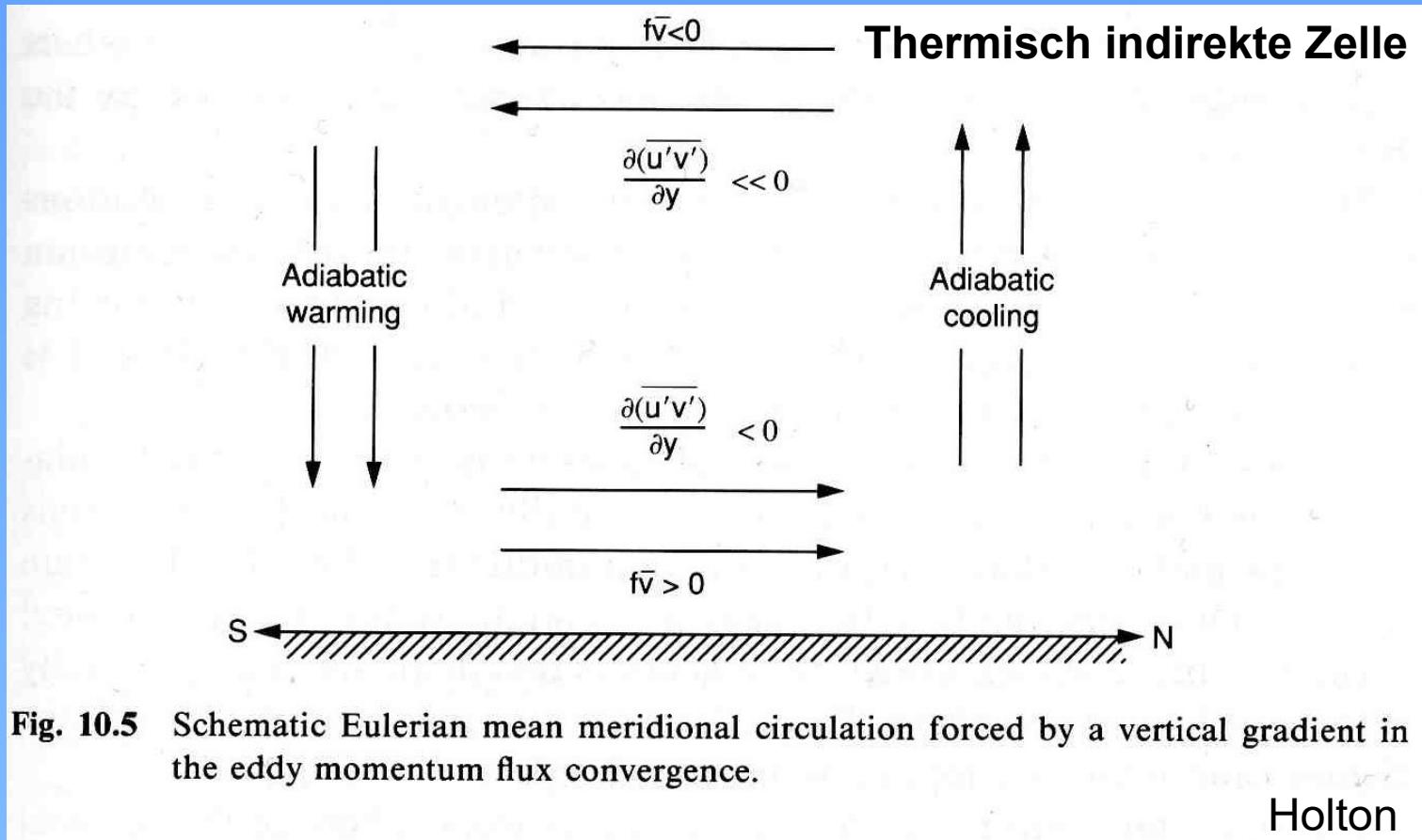


Fig. 10.6 Observed northward eddy momentum flux distribution ($\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$) for Northern Hemisphere winter. (Adapted from Schubert *et al.*, 1990.)

Holton

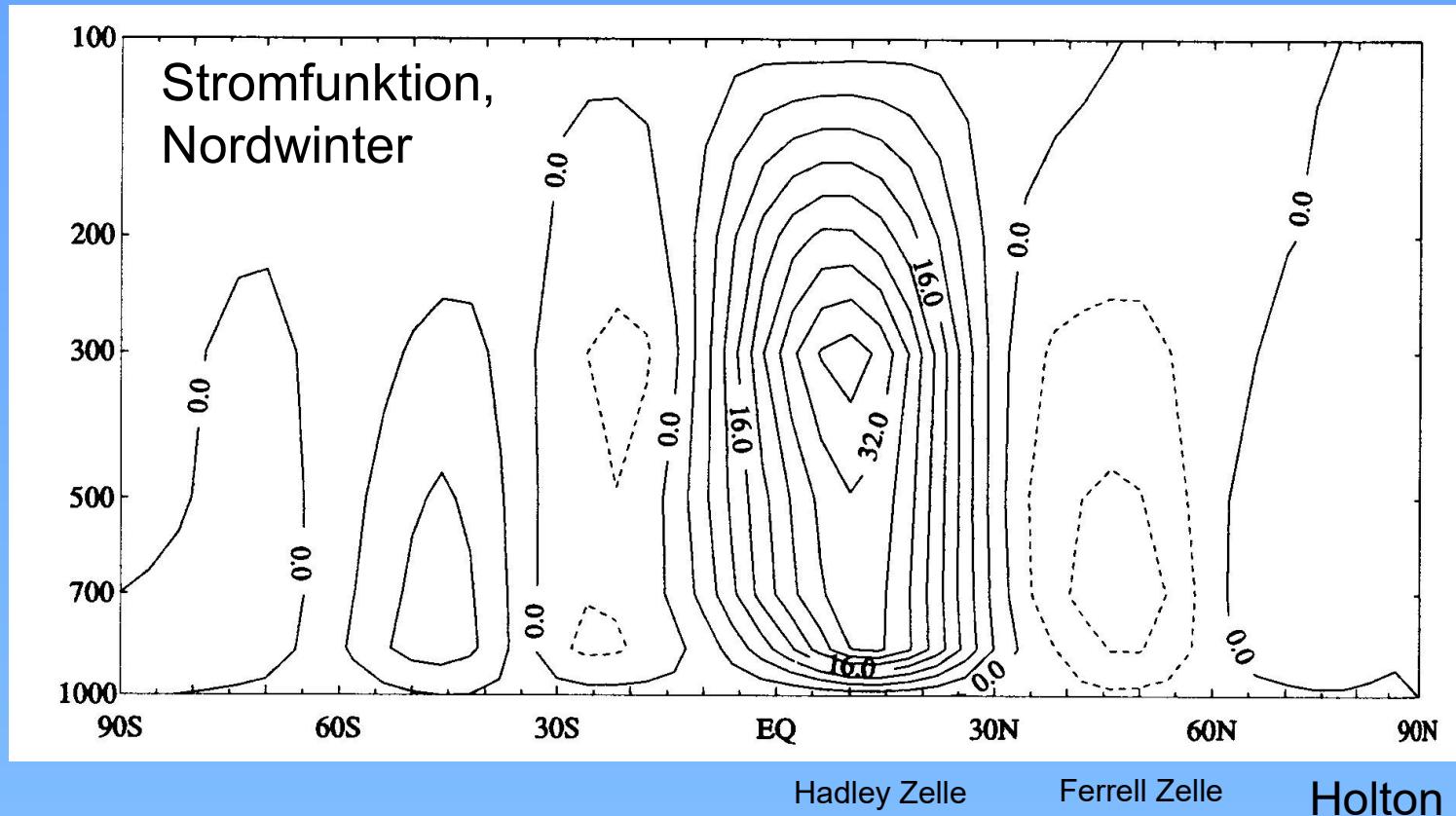
Die Eddy-Impulsflüsse treiben ebenfalls eine indirekte Zelle in den mittleren Breiten

Der Effekt der Eddy-Impulsflüsse



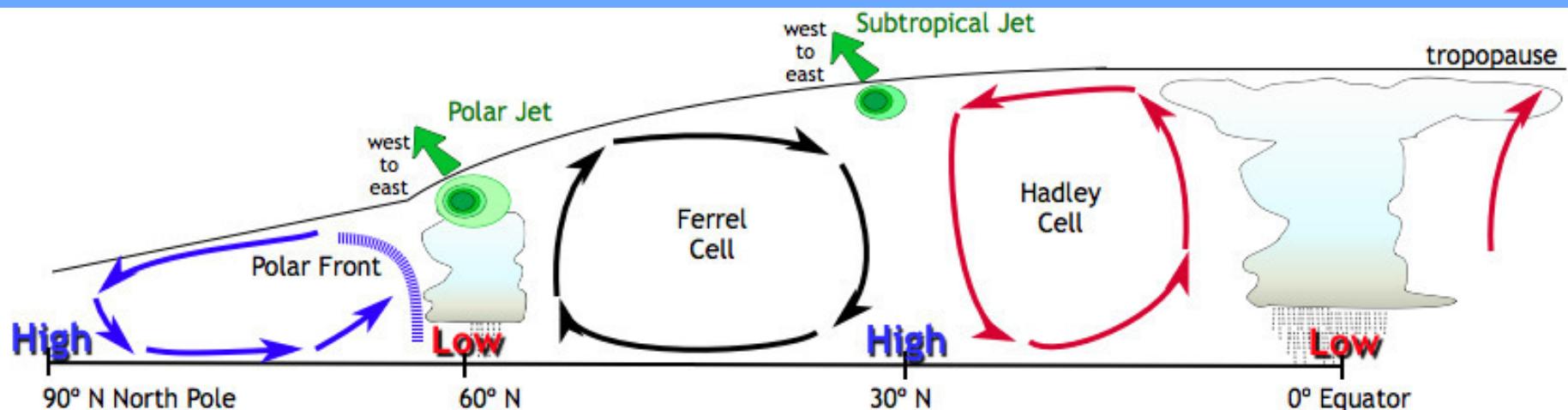
Die Eddy-Impulsfluss Divergenz ist negativ (Konvergenz) und nimmt mit der Höhe weiter ab (zu). Das stört die thermischen Windbilanz und muss wieder durch den Coriolisterm kompensiert werden, damit die thermische Windbilanz erfüllt ist.

Zonal gemittelte Zirkulation aus der Stromfunktion-Gleichung



Man erhält die Drei-Zellen Struktur, wenn man die Antriebe aus den Beobachtungen verwendet

Zonal gemittelte Zirkulation, schematisch



<http://kiwi.atmos.colostate.edu/cmmmap/learn/climate/circ7.html>