

Klima und Energie – Ein stark gekoppeltes System

Hartmut Graßl

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

*Vortrag am Pädagogischen Landesinstitut
Rheinland-Pfalz*

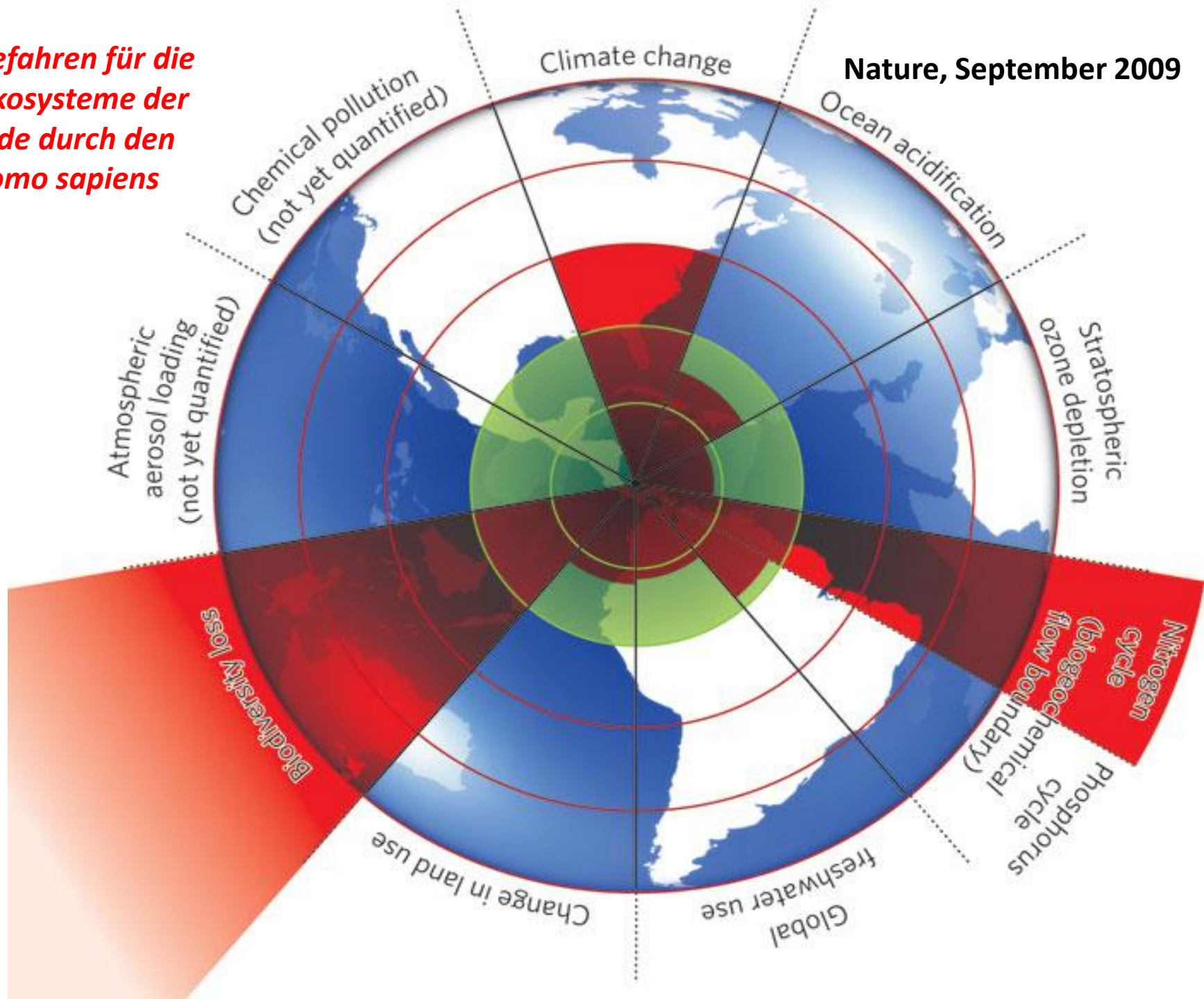
Speyer, 21. März 2012

Störungen globaler Stoffkreisläufe durch den Menschen

Die für das Klima und das Leben auf der Erde wichtigsten Kreisläufe sind die des Wassers, des Kohlenstoffs und des Stickstoffs. Ersterer wird von uns direkt höchstens regional beeinflusst, der zweite ist global bereits stark gestört und der dritte global dominiert. Also ändern wir auch Klima.

Gefahren für die Ökosysteme der Erde durch den homo sapiens

Nature, September 2009



Gliederung

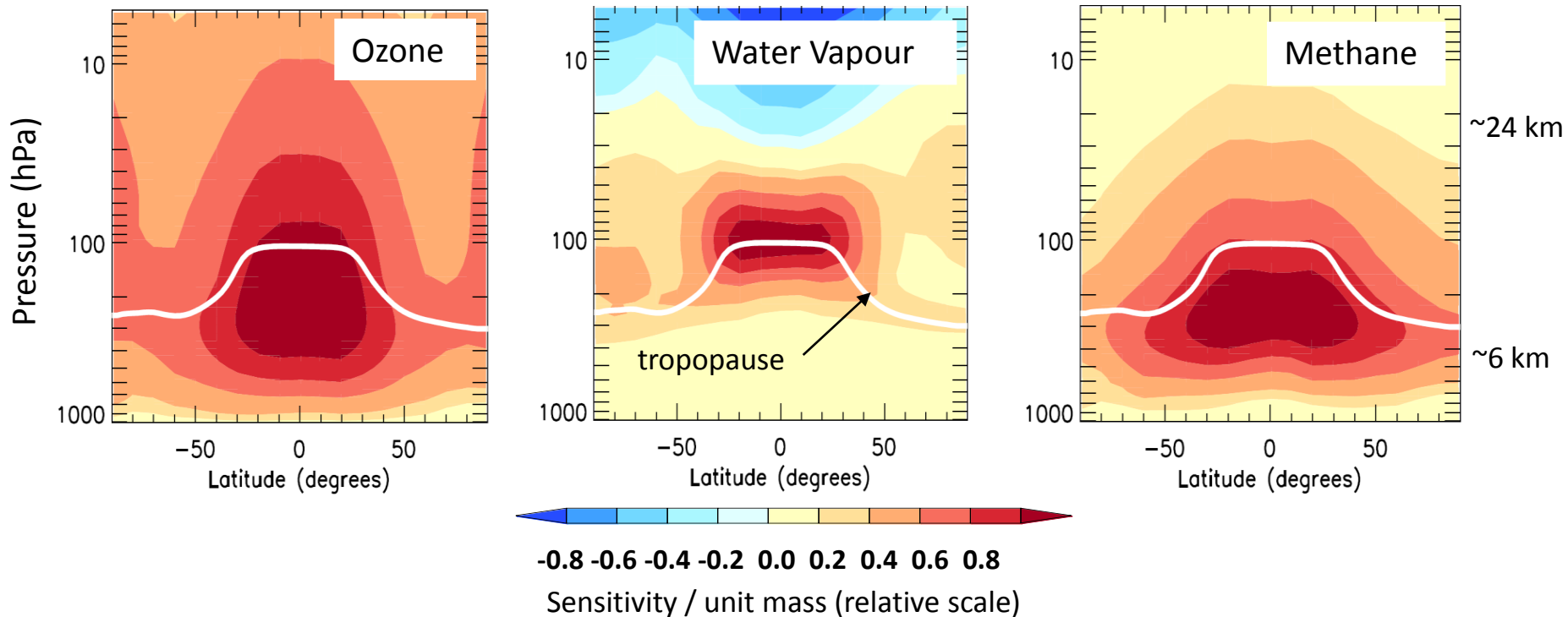
- ***Störung wichtiger Stoffkreisläufe***
- ***Empfindlichkeit gegenüber Konzentrationsänderungen von Treibhausgasen***
- ***Emissionen des wichtigsten anthropogenen Treibhausgases***
- ***Konzentrationsanstieg der langlebigen Treibhausgase***
- ***Störung des globalen Kohlenstoffkreislaufes***
- ***Änderungen der Strahlungsflussdichte der Sonne***
- ***Der Strahlungshaushalt der Erde***
- ***Die beobachtete Erwärmung***
- ***Klimaszenarien***
- ***Folgen einer Erwärmung***
- ***Konsequenzen des 2°C-Zieles***
- ***Potenziäle erneuerbarer Energieträger***
- ***Erste Etappen der Energiewende***

In der Erdatmosphäre sind die kleinen Beimengungen die für das Klima bedeutenden Substanzen

Gereiht nach bisheriger Wirkung auf die Temperatur an der Oberfläche sind es:

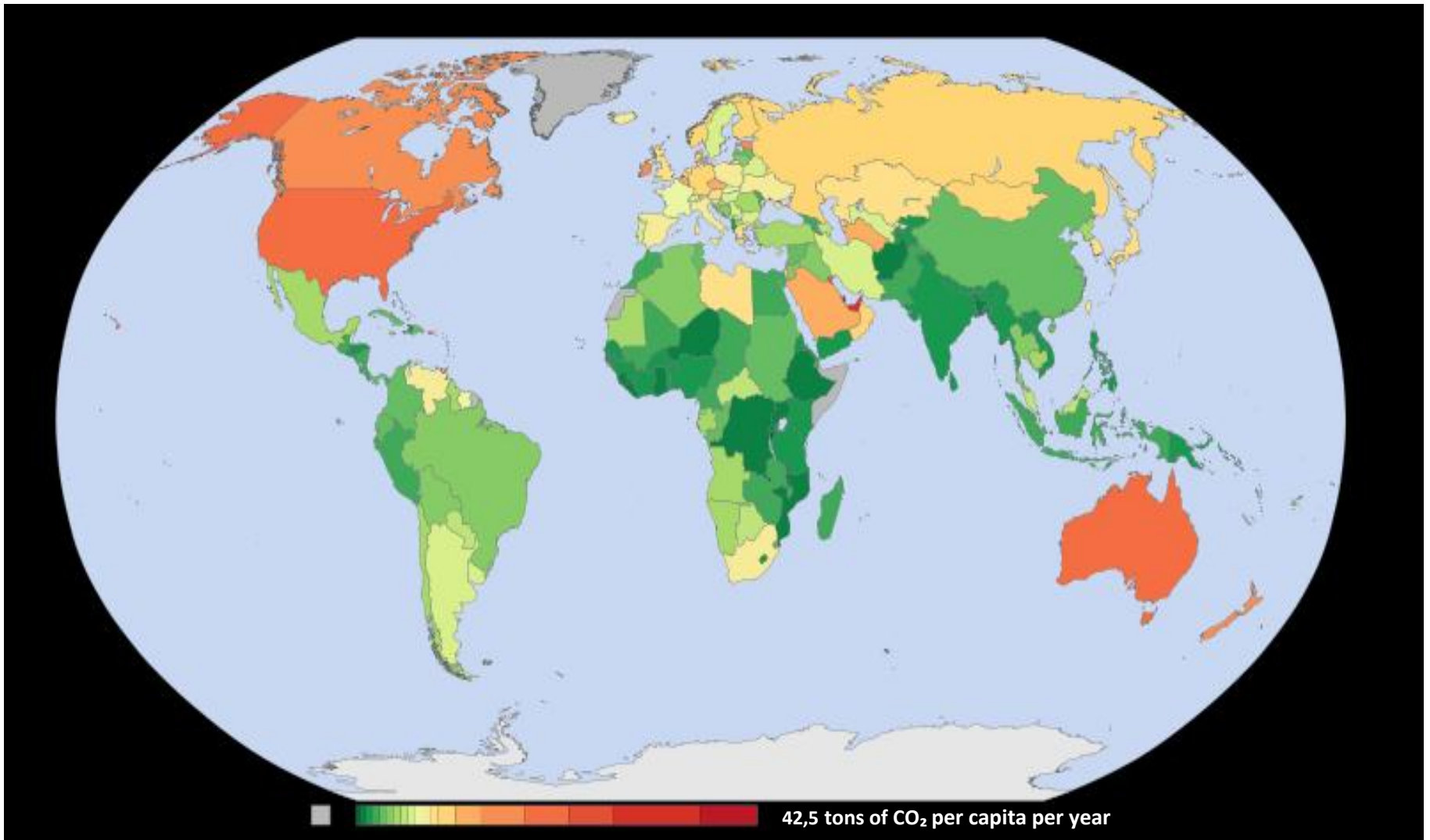
- 1. Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis in den Wolken (3 Promille der Masse)***
- 2. Kohlendioxid (0,5 Promille)***
- 3. Ozon (weniger als ein Millionstel)***
- 4. Lachgas (0,48 Millionstel)***
- 5. Methan (knapp über 1 Millionstel)***
- 6. Schwebeteilchen (Aerosolteilchen, <10 Mia)***

Reaktion der Oberflächentemperatur bei Änderung der Konzentration eines Treibhausgases

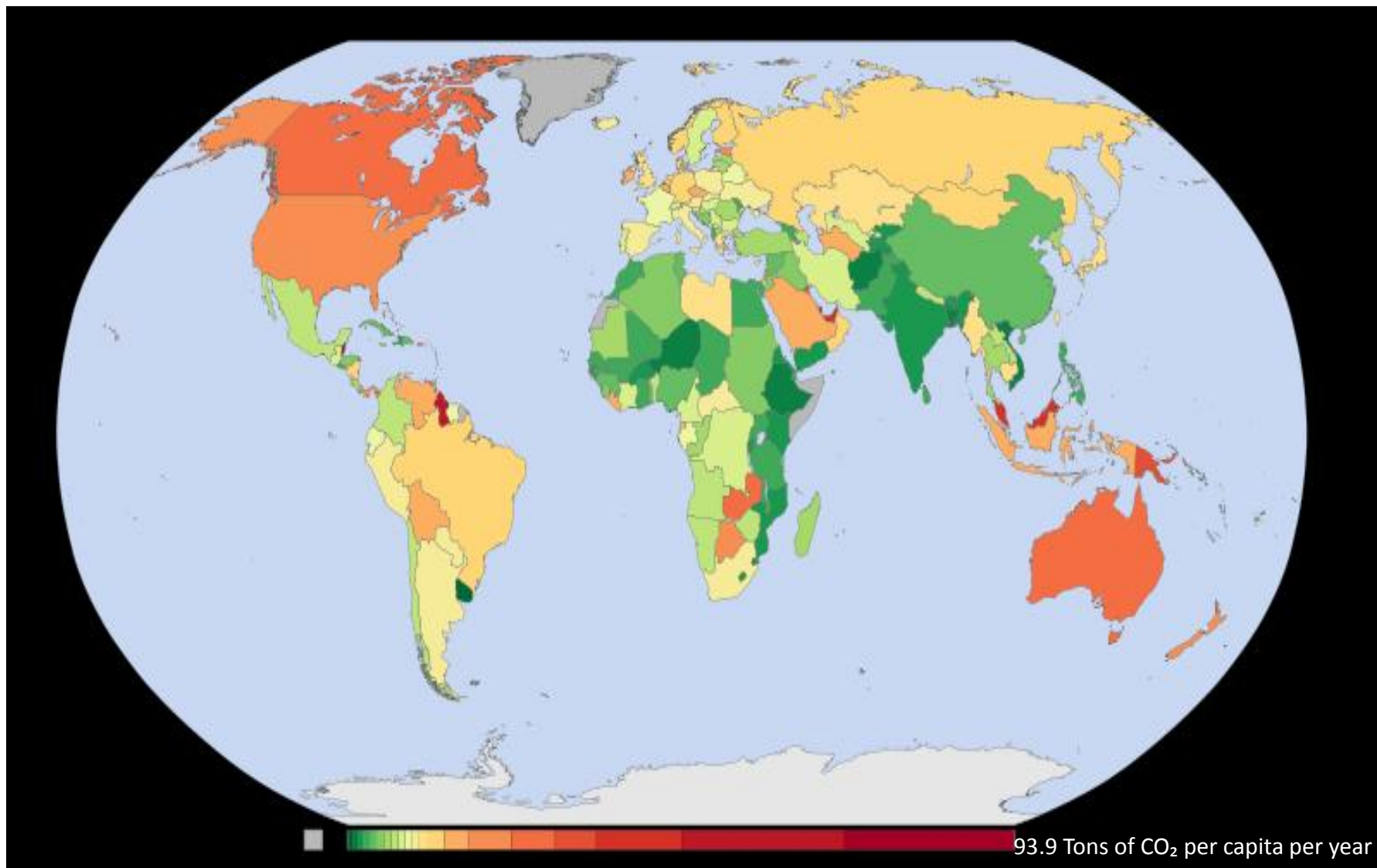


Der Höhenbereich mit besonders hoher Empfindlichkeit bei einem Konzentrationsanstieg eines Treibhausgases ist die mittlere/obere Troposphäre und die untere Stratosphäre

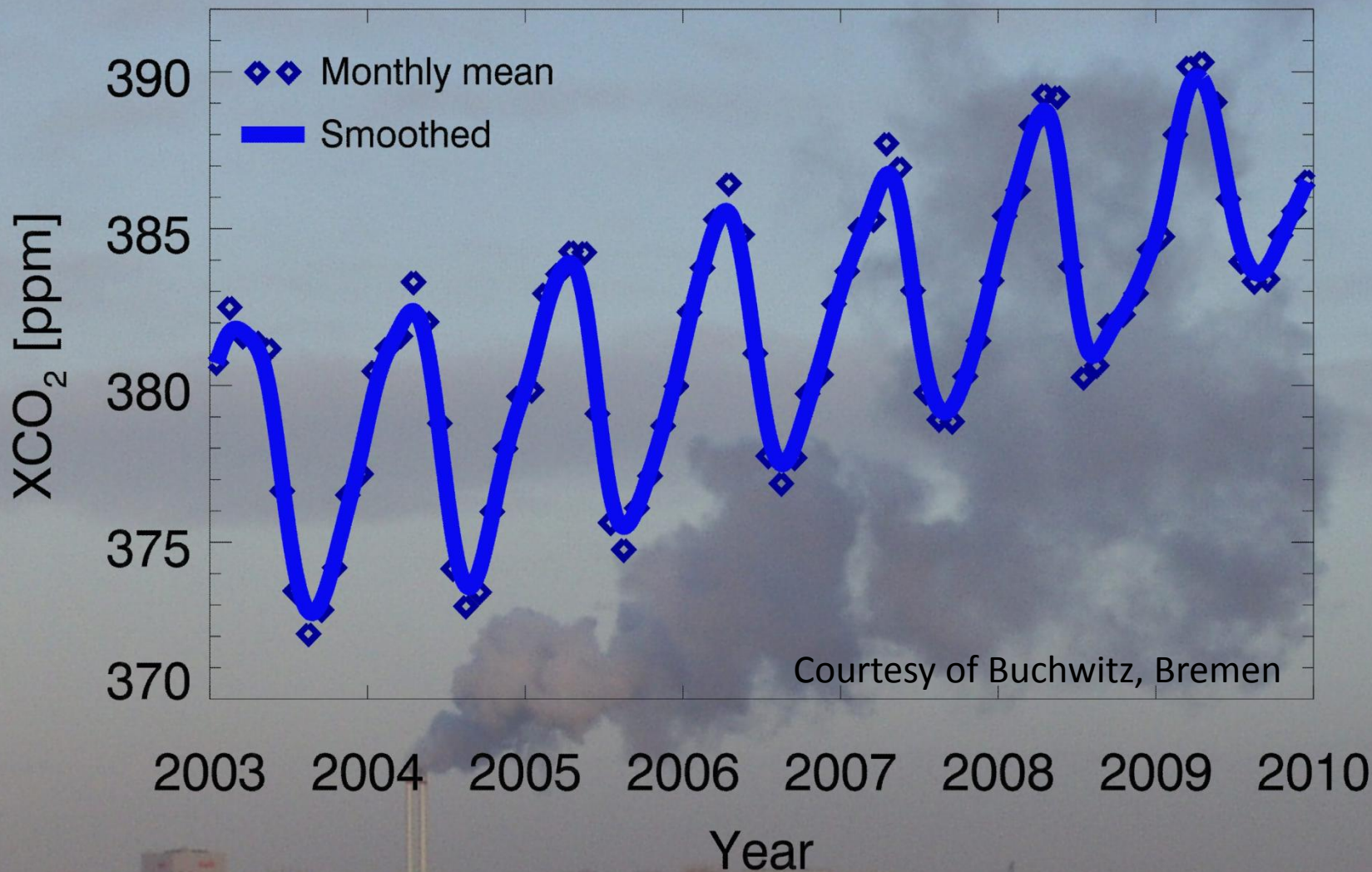
Per capita emission in 2000 not including land use change
Emissionen pro Kopf ohne Beachtung der Änderung der Landnutzung



Emissionen pro Kopf mit Beachtung der Änderung der Landnutzung
Greenhouse gas per capita emissions in 2000 including land use change



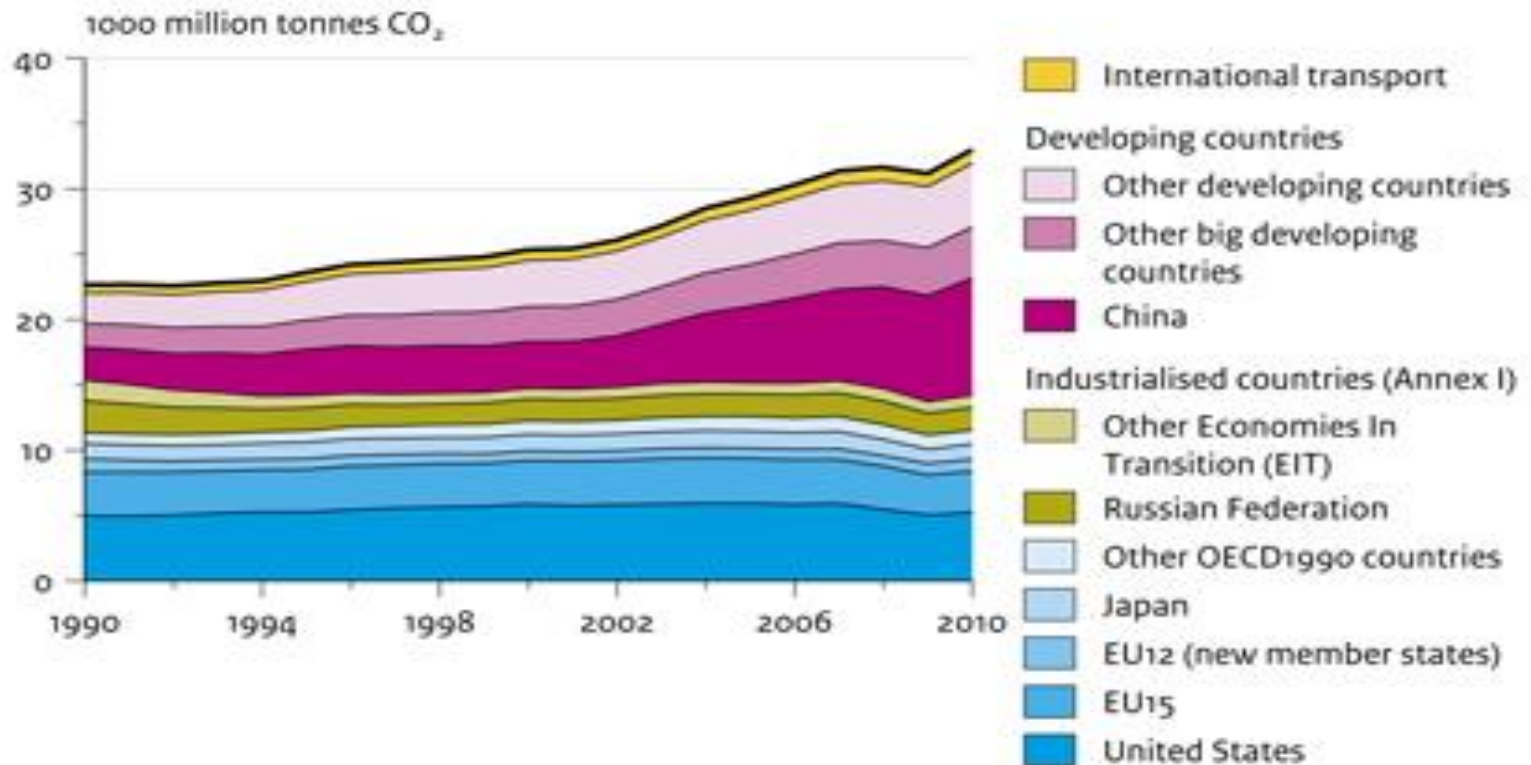
SCIAMACHY CO₂ Northern Hemisphere



Kohlendioxidzunahme vom Satelliten aus beobachtet

Wer emittierte wie in der Zeitperiode des Kioto-Protokolles

Global CO₂ emissions from fossil fuel use and cement production per region

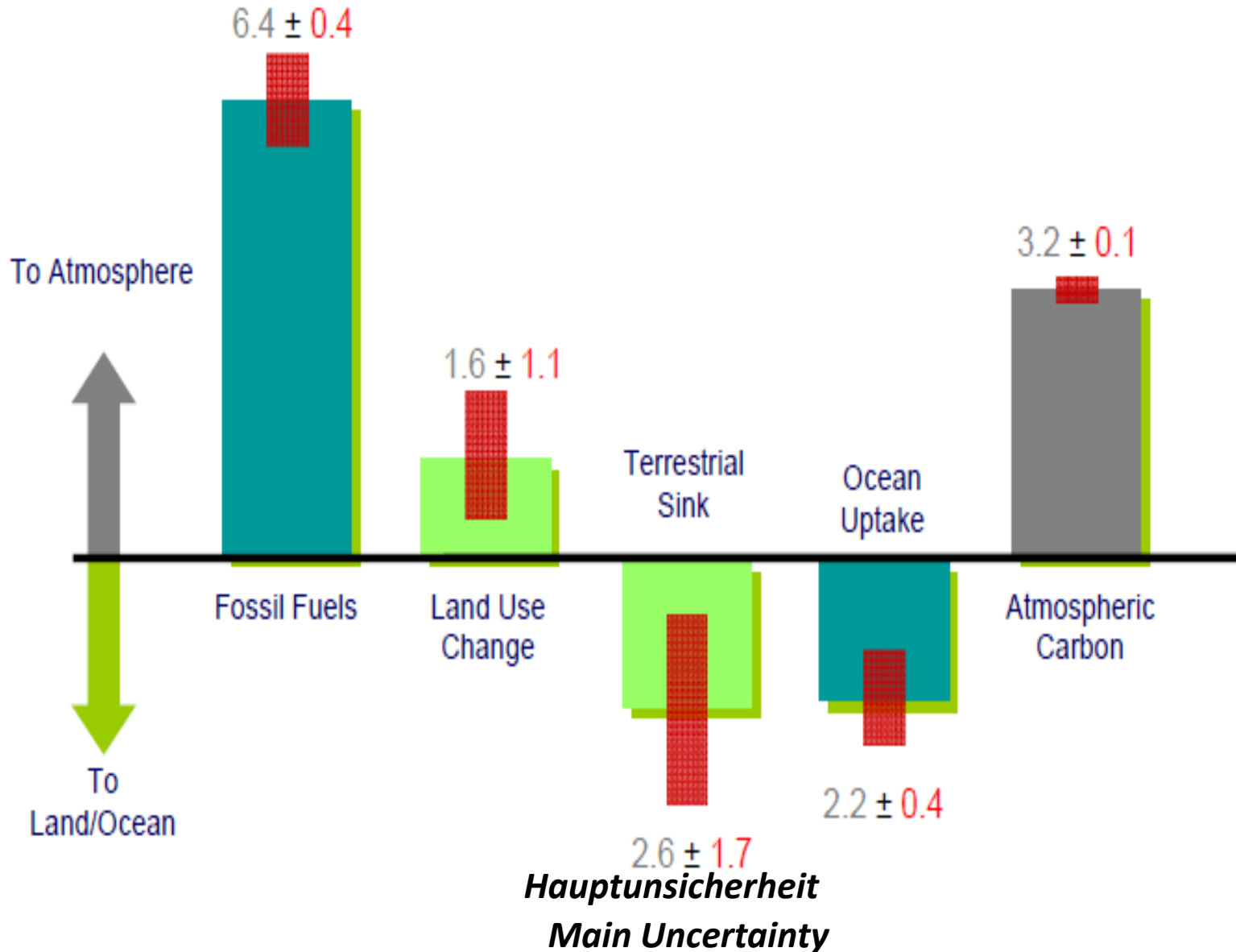


Source: EDGAR 4.2 (1970-2008); IEA, 2010; BP, 2011; USGS, 2011, WSA, 2011, NOAA, 2011.

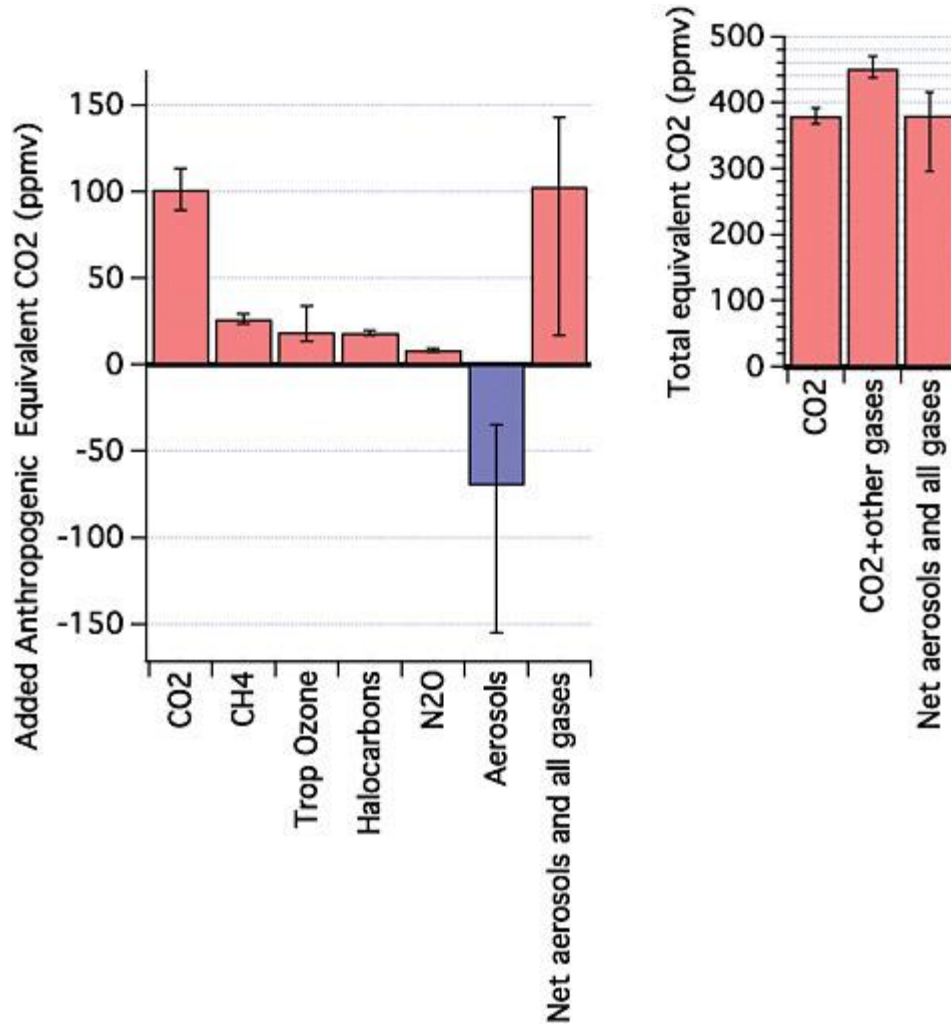
www.pbl.nl

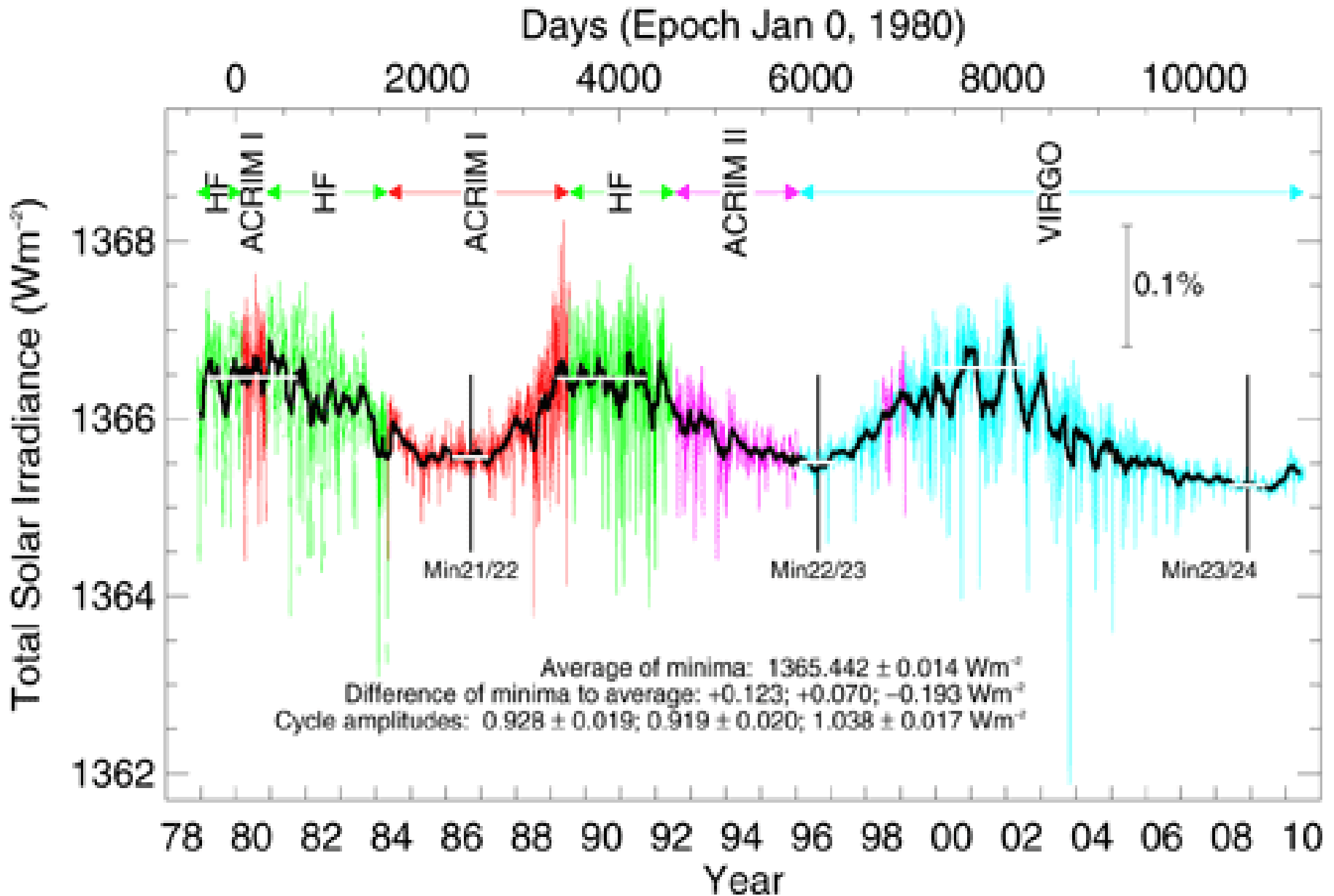
Disturbances and Uncertainties in the Global Carbon Cycle

Störung und Unsicherheit im globalen Kohlenstoffkreislauf



Der erhöhte Treibhauseffekt seit 1750



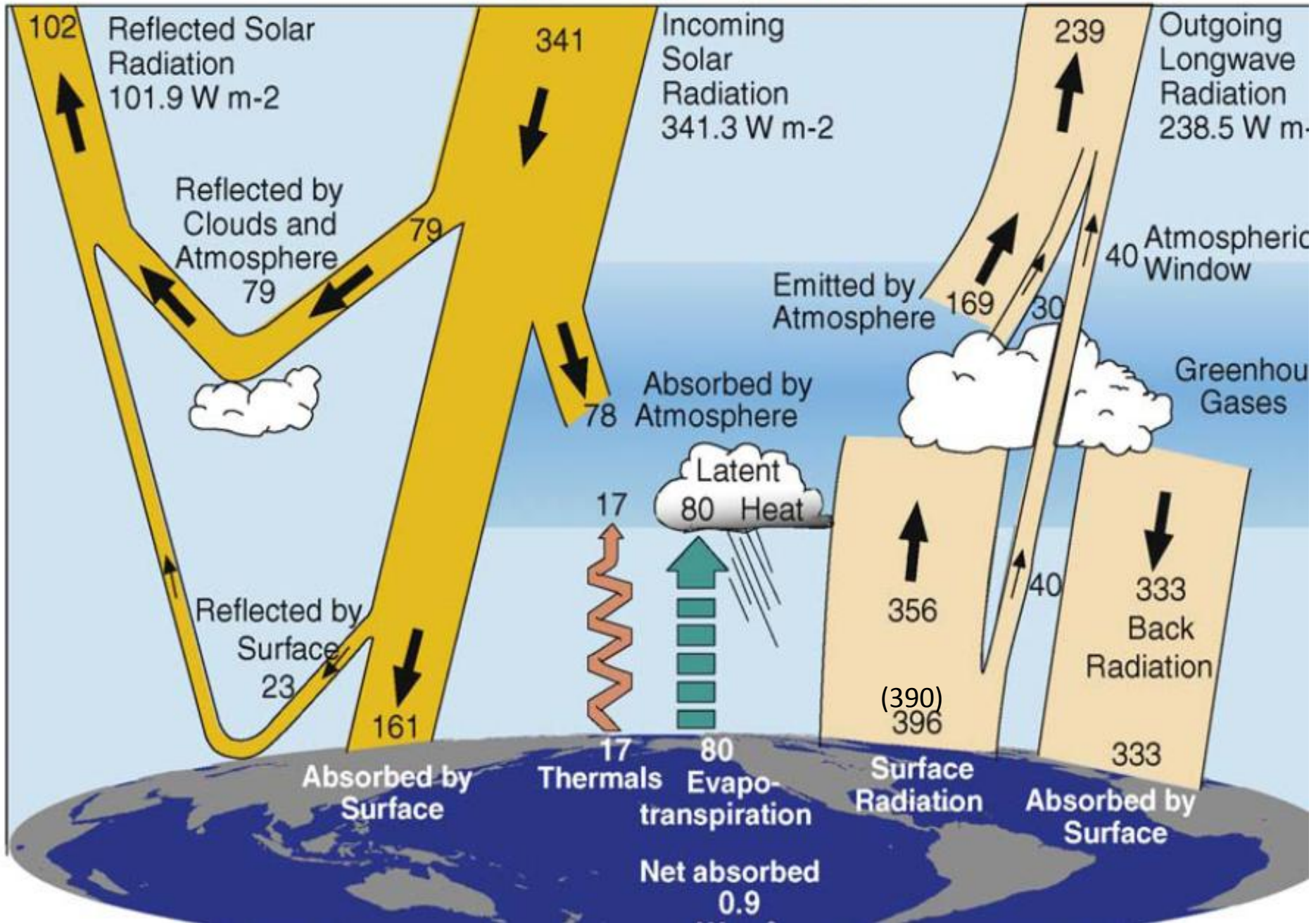


Die Sonne ist erstaunlich stabil und nicht der Anlass zur Erwärmung in den letzten Jahrzehnten

Fröhlich, 2010

Globale Energieflüsse

Global Energy Flows $W m^{-2}$



Temperaturrekorde und Temperaturtrends

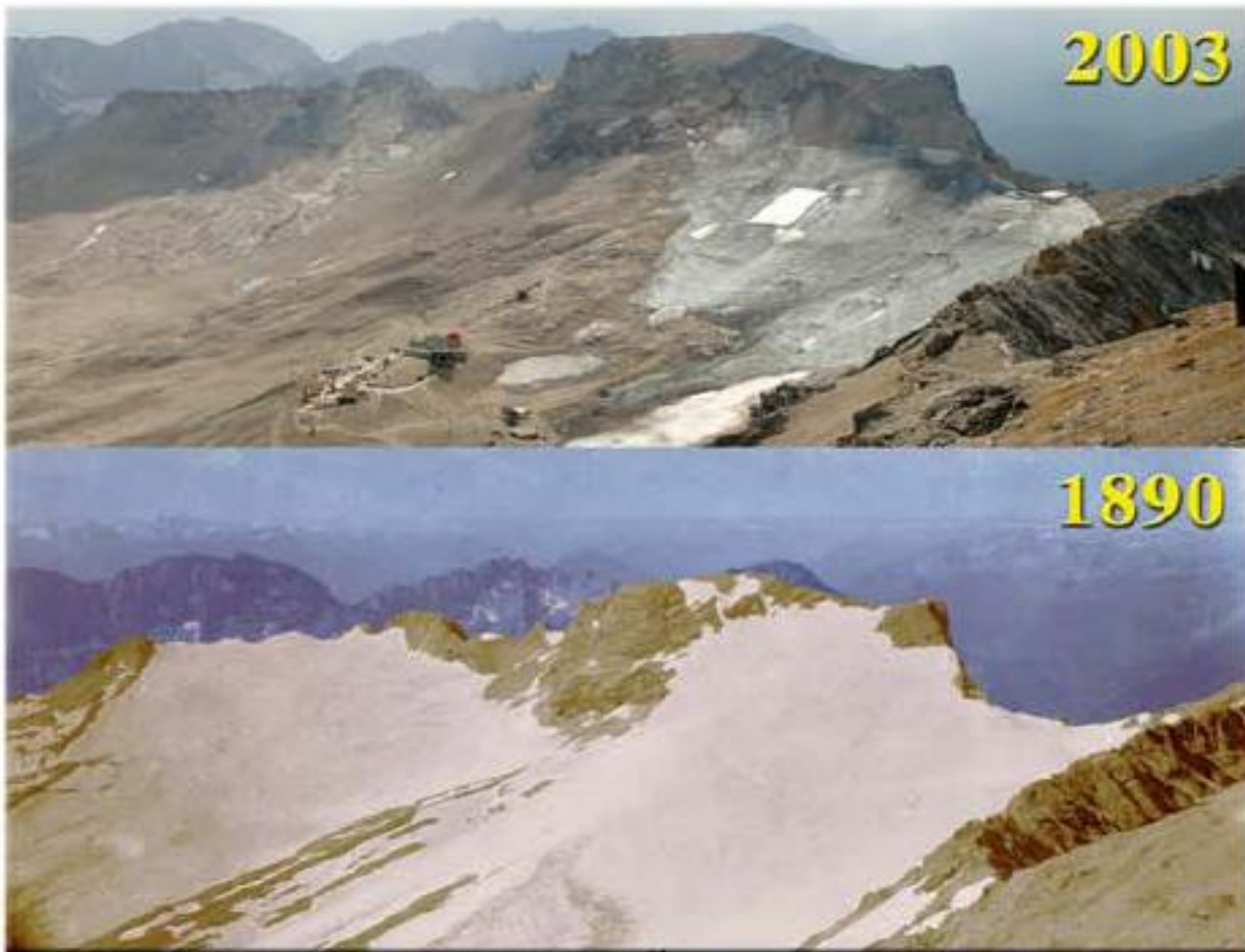
*Die bisher drei wärmsten Jahre seit 1856 mit annähernd globaler Temperaturmessung sind: **2010, 2005, 1998***

Lineare Trends von 1979 bis 2010:

***0,171 ± 0,032 °C/10 Jahre** HadCRUT 4 (Morice et al., 2012)*

***0,163 ± 0,030 °C/10 Jahre** NCDC MLOST (Vose et al., 2012)*

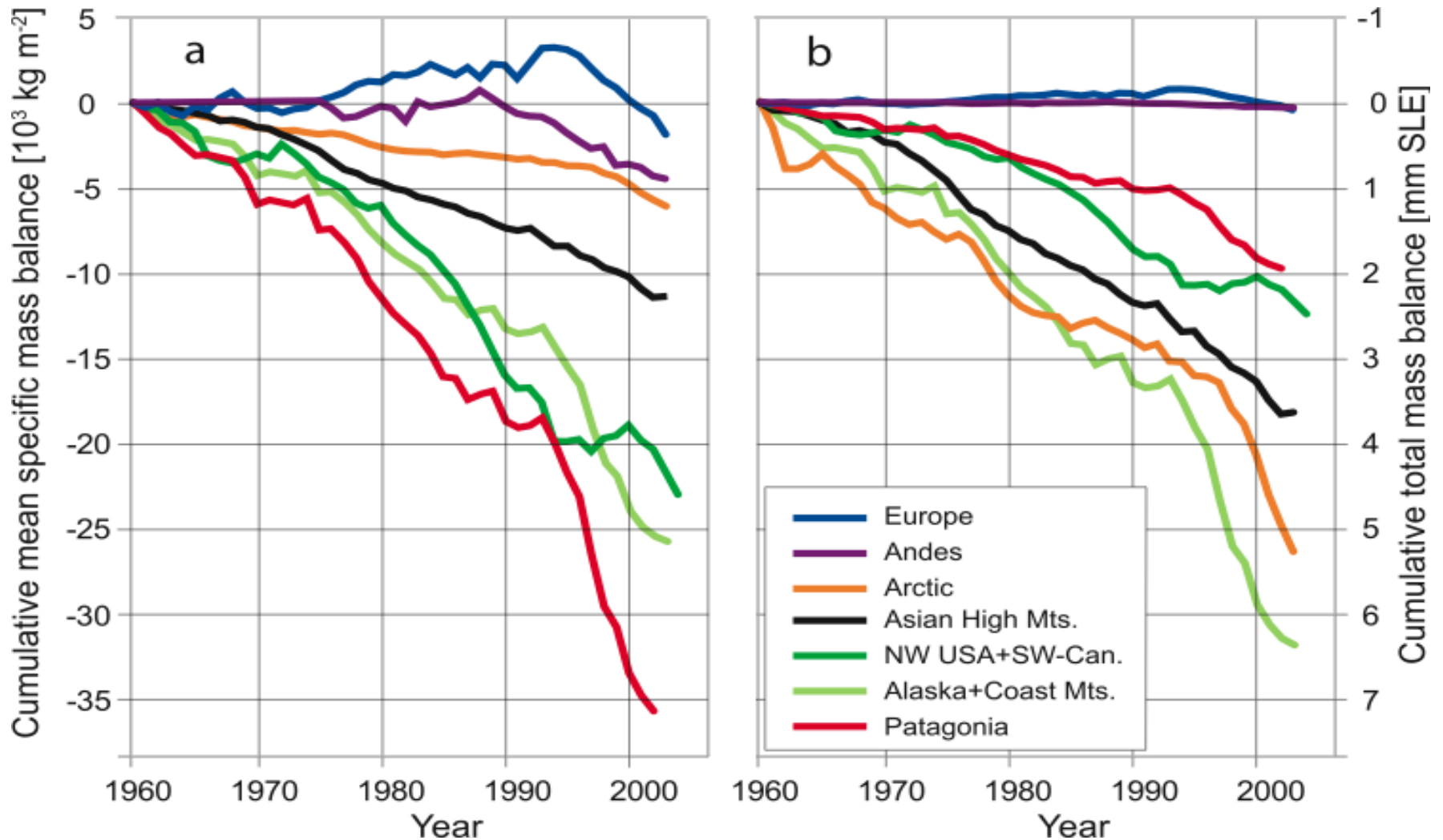
***0,167 ± 0,034 °C/10 Jahre** GISS (Hansen et al., 2010)*



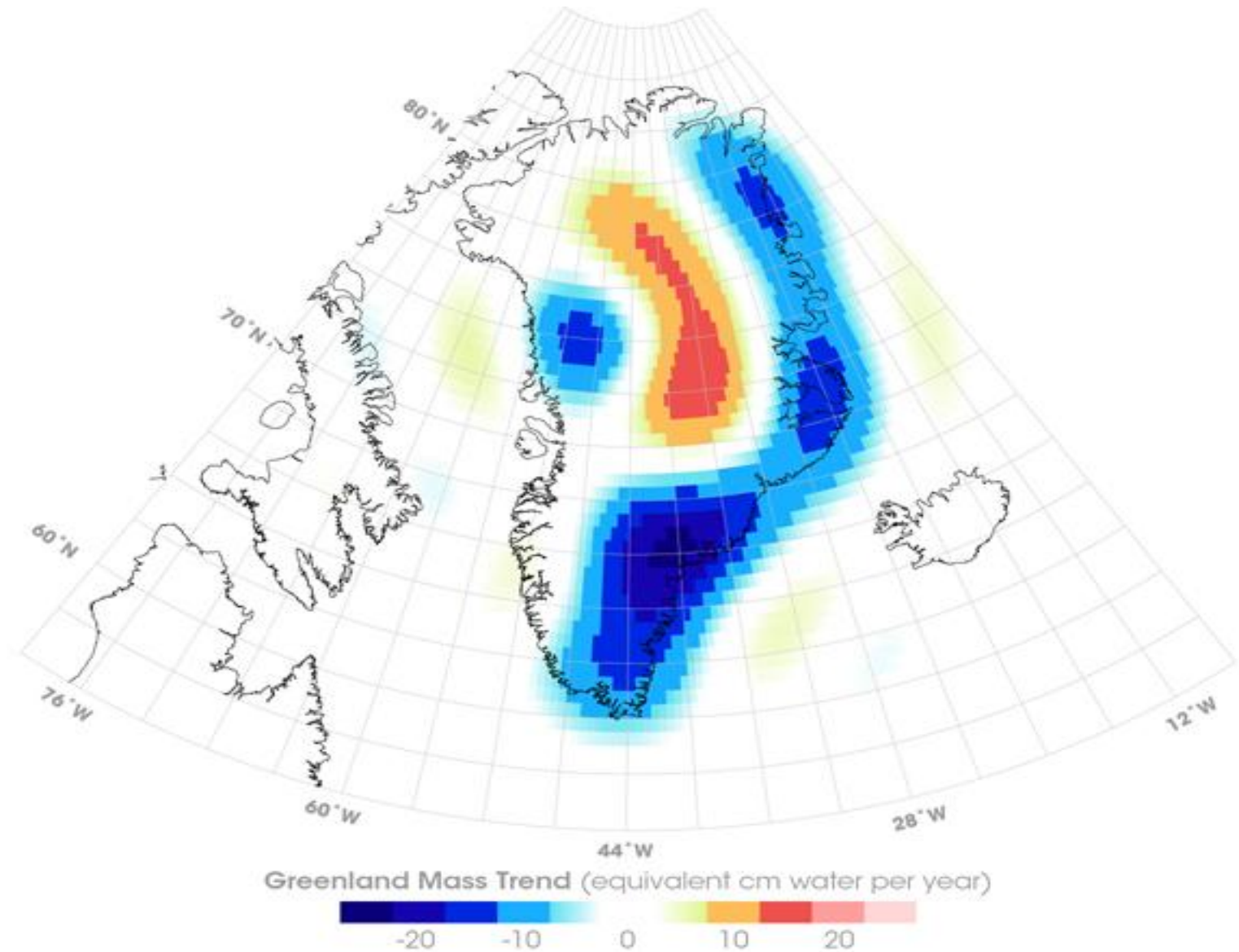
Zwei Fotografien des Zugspitzplatt vom Gipfel der Zugspitze (2962 m), welche die gegenwärtige Ausdehnung des Schneeferners und die am Ende des 19. Jahrhunderts dokumentieren.

Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2012

Gletscherschwund weltweit

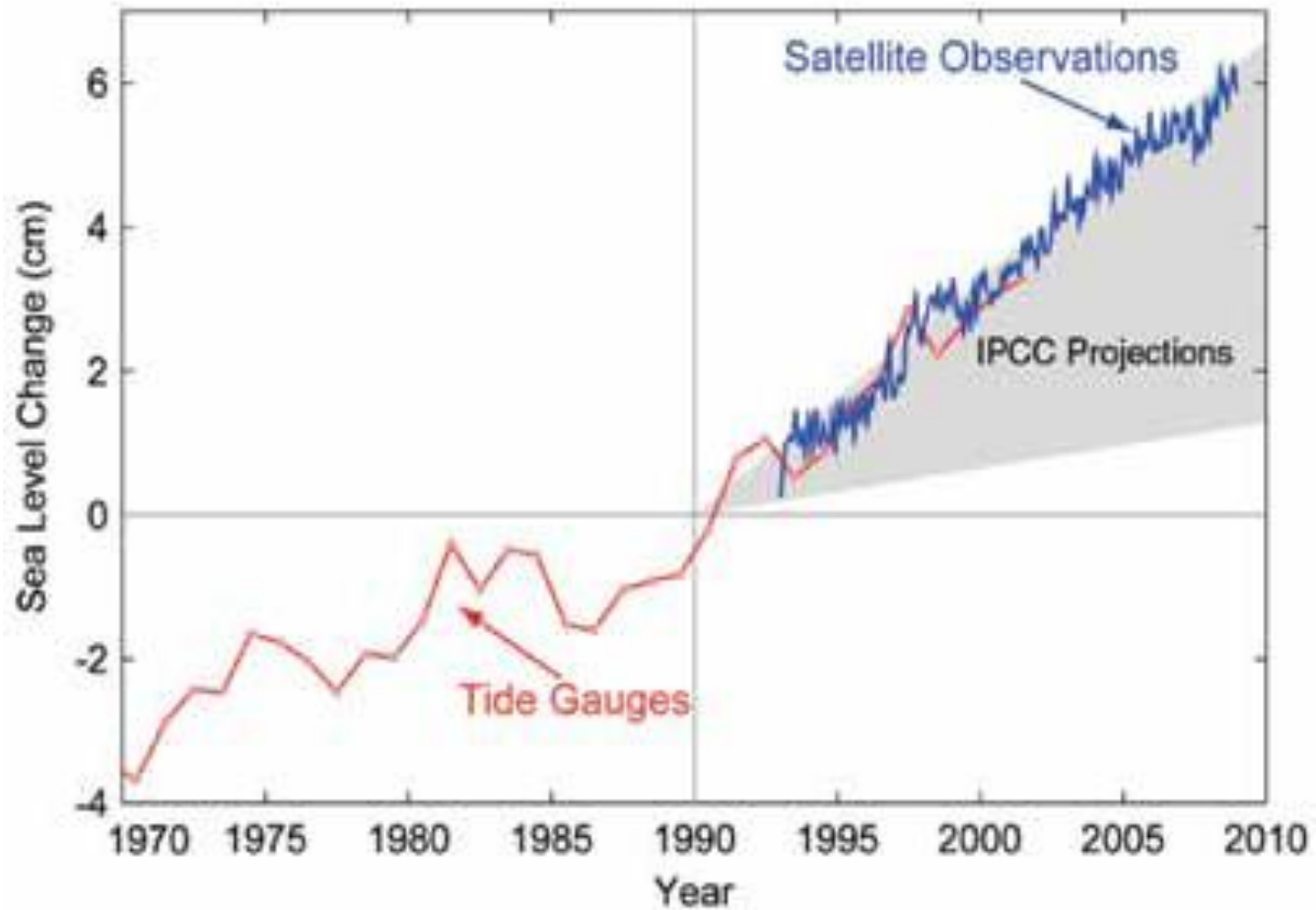


Cumulative mean specific mass balances (a) and cumulative total mass balances (b) of glaciers and ice caps, calculated for large regions (Dyurgerov and Meier, 2005). Mean specific mass balance shows the strength of climate change in the respective region. Total mass balance is the contribution from each region to sea level rise.



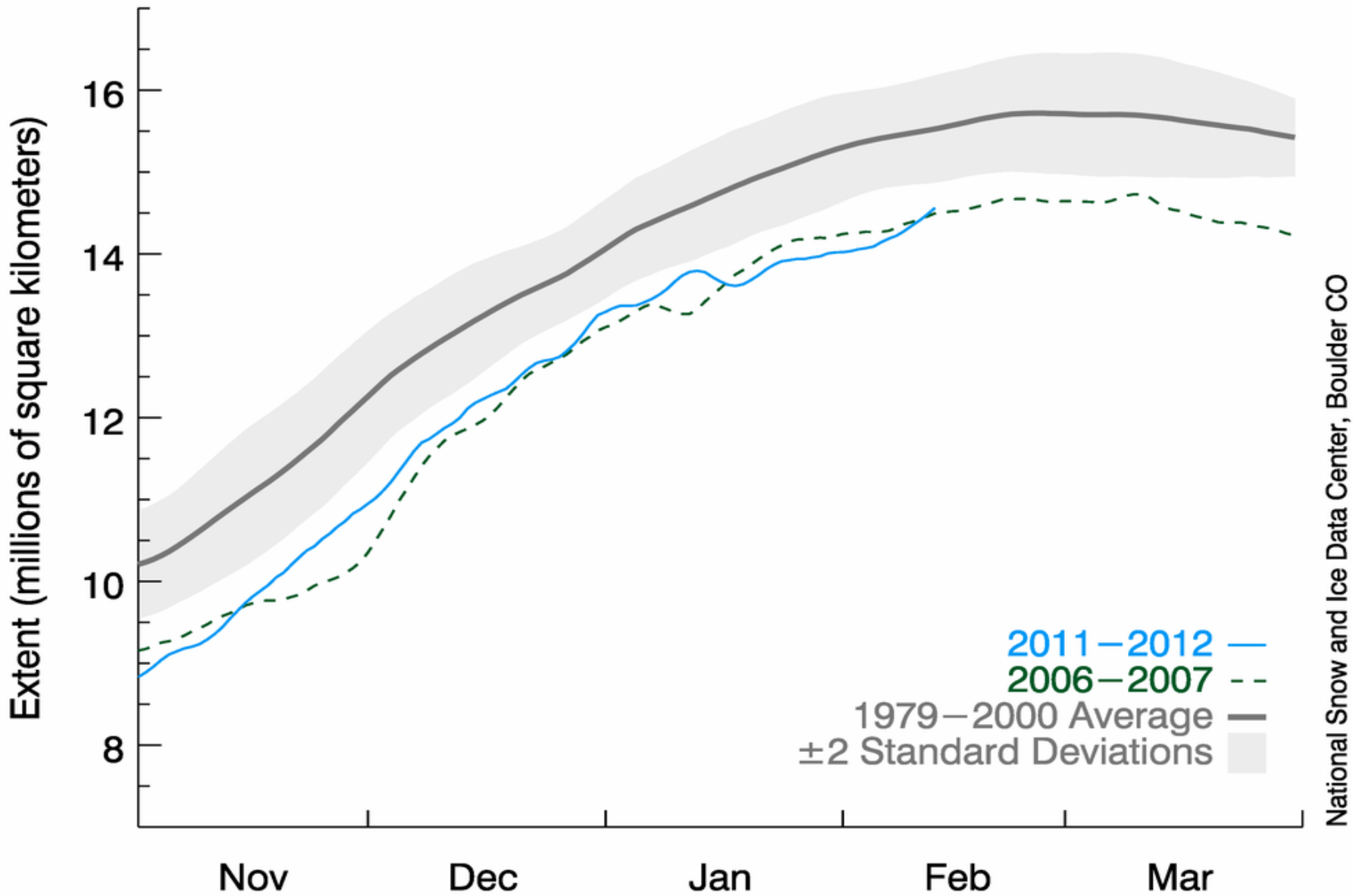
Änderung der Höhe des grönländischen Inlandeises in den letzten Jahren; NASA GRACE-Daten

Der beobachtete mittlere Meeresspiegelanstieg seit 1970

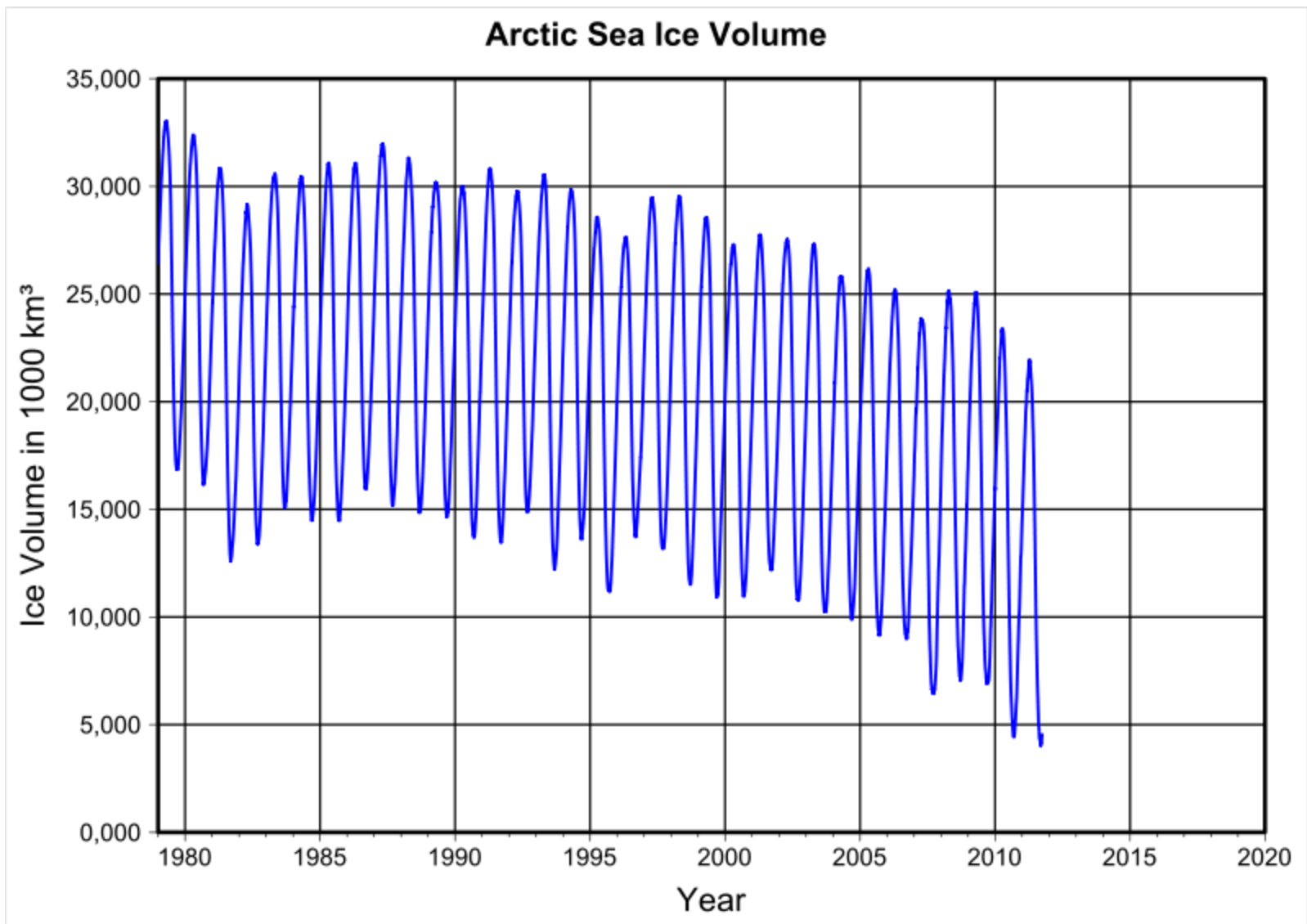


Arctic Sea Ice Extent

(Area of ocean with at least 15% sea ice)

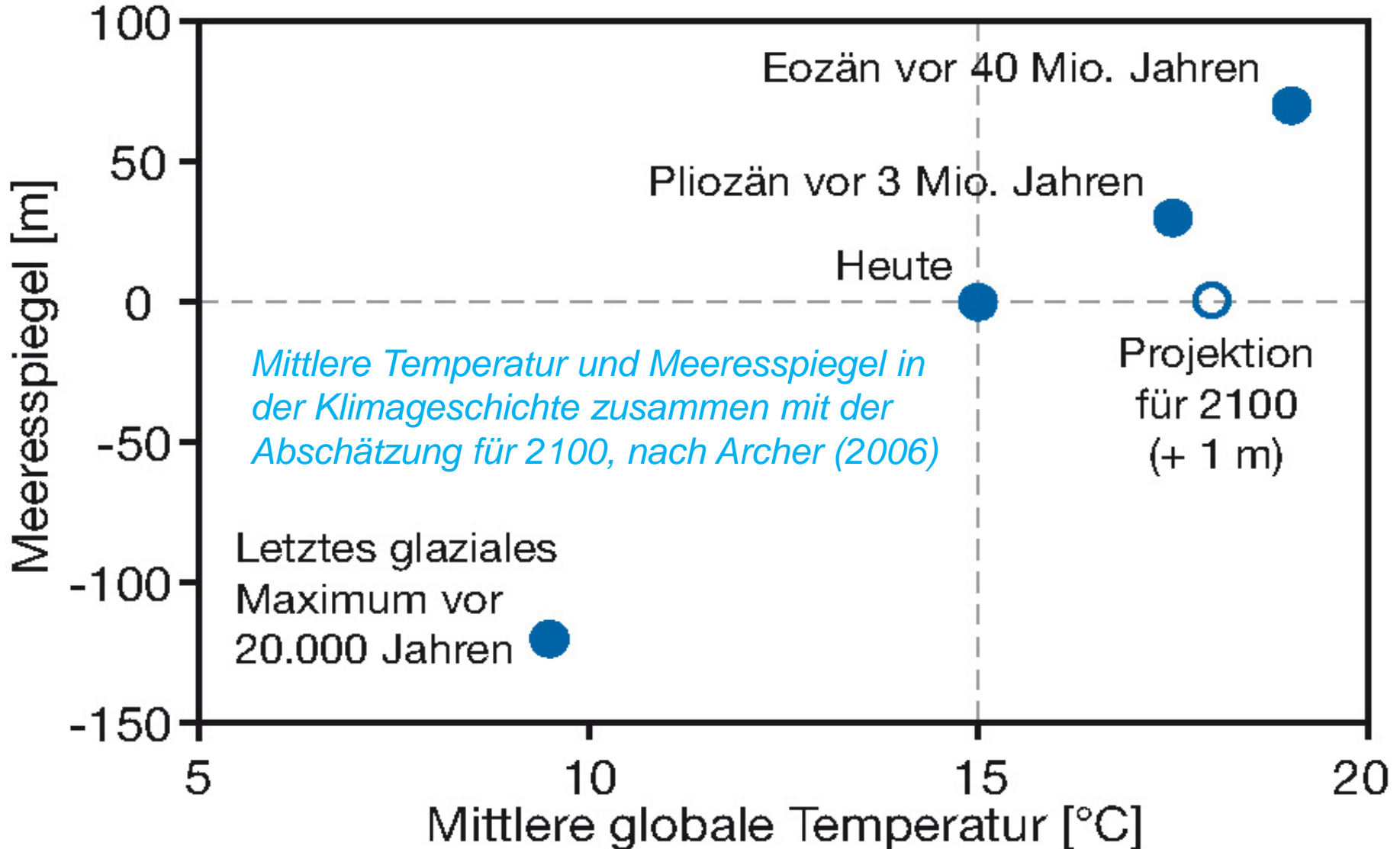


National Snow and Ice Data Center, Boulder CO



NSIDC, 2012

**WBGU (2006):
Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer**



Typische Reaktionszeiten von Komponenten der Erde auf Störungen

Atmosphäre: Stunden (Gewitter) bis einige Jahre (völlige Durchmischung)

Ozean: Tage (durchmischte obere Schicht) bis ca. ein Jahrtausend (eine volle Umwälzung)

Böden: Stunden (voller Verlust bei Sturzfluten) bis Jahrtausende zur Neubildung nach einer Eiszeit

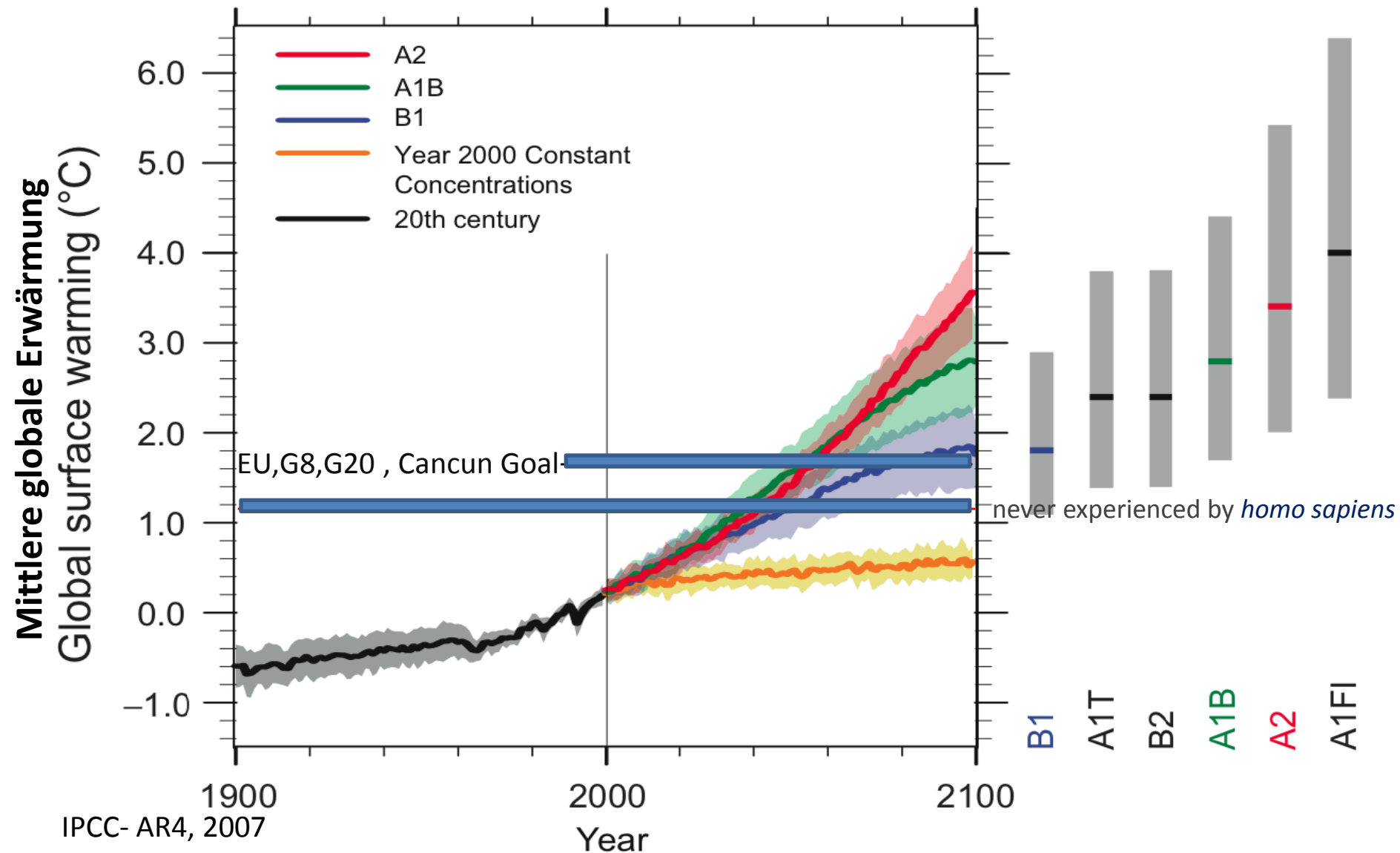
Inlandeise: einige Jahrtausende für das wesentliche Abschmelzen und Zigttausende von Jahren für den Aufbau

Vegetation: viele Jahrhunderte um sich an eine Temperaturänderung von wenigen Grad anzupassen, nämlich durch Wanderung der Biome (ca. 200 bis 400 km pro Grad)

Kontinentalverschiebung: Millionen von Jahren

Mit Klimamodellen errechnete mittlere Erwärmung an der Erdoberfläche
 (Modellmittel und Unsicherheitsbereiche der Klimamodelle)

Multi-model Averages and Assessed Ranges for Surface Warming



Äquivalente CO₂-Konzentration in ppm: Spanne und beste Schätzung

Erwärmung bei voller Anpassung

Minimum

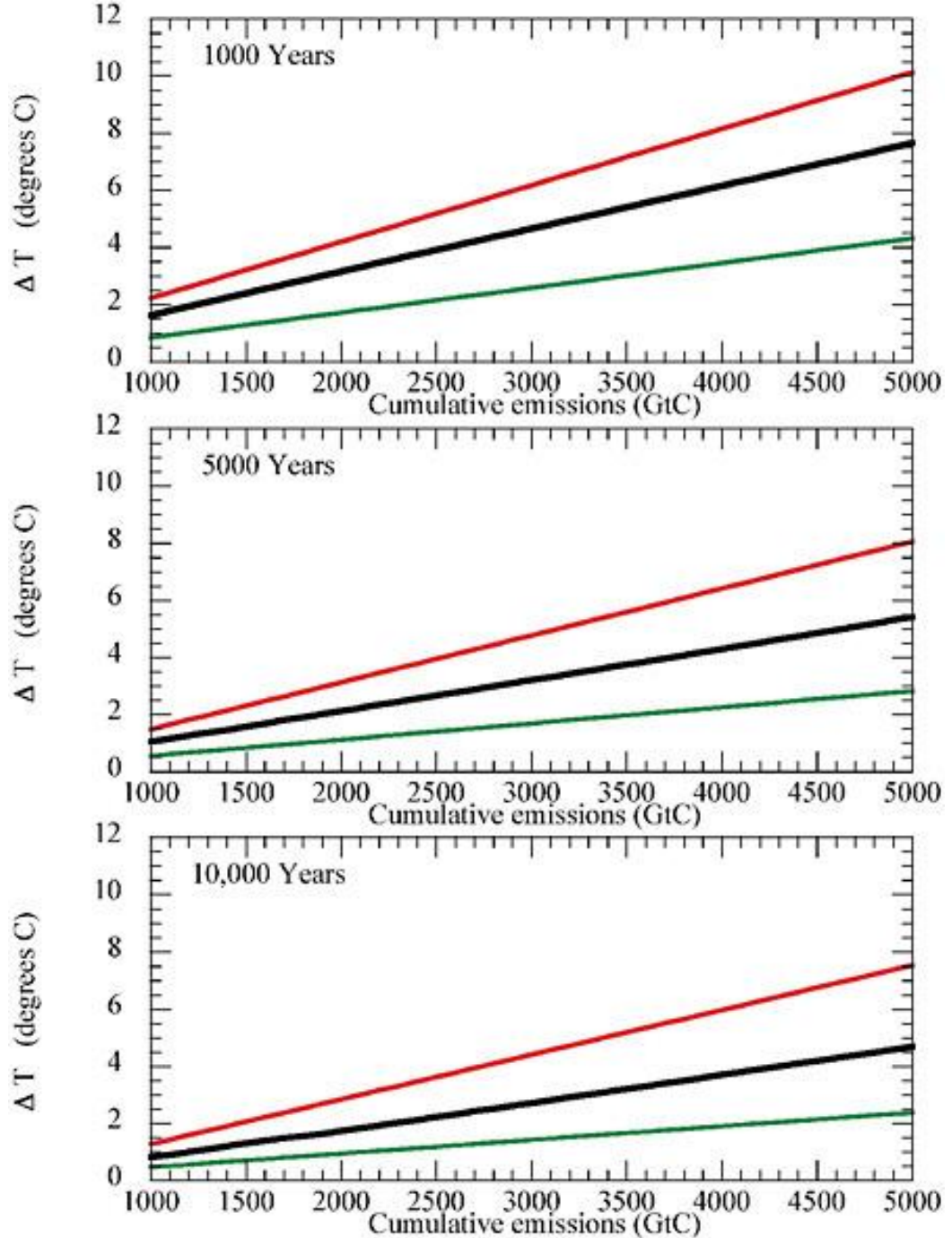
Maximum

| | | | |
|-----|------------|------|-----|
| 320 | 340 | 380 | 1°C |
| 370 | 430 | 540 | 2°C |
| 440 | 540 | 760 | 3°C |
| 530 | 670 | 1060 | 4°C |

| Stabilization CO ₂ -equivalent concentration (ppmv): range and best estimate | | | | Equilibrium global average warming (°C) |
|---|---|------------|---------------|---|
| 320 | ← | 340 | → 380 | 1 |
| 370 | ← | 430 | → 540 | 2 |
| 440 | ← | 540 | → 760 | 3 |
| 530 | ← | 670 | → 1060 | 4 |
| 620 | ← | 840 | → 1490 | 5 |
| Note: Green and red numbers represent low and high ends of ranges, respectively; black bolded numbers represent best estimates. | | | | |

Range of very long-term warming obtained by applying the range of equilibrium climate sensitivities to the LTMIP ensemble of carbon-cycle models discussed in Archer et al. (2009). The upper red curve gives the maximum, the heavy black curve the median, and the lower green curve the minimum warming over all combinations of climate sensitivity and carbon-cycle models. These results incorporate the uptake of CO₂ by land and ocean, but do not include other Earth System feedbacks such as vegetation change or ice sheet response.

NRC, USA (2011)



Muster der Niederschlagsänderungen Projected Patterns of Precipitation Changes

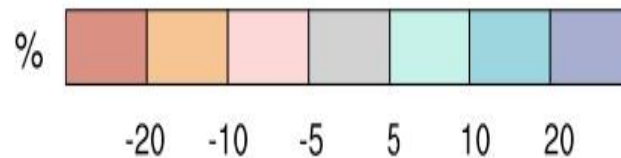
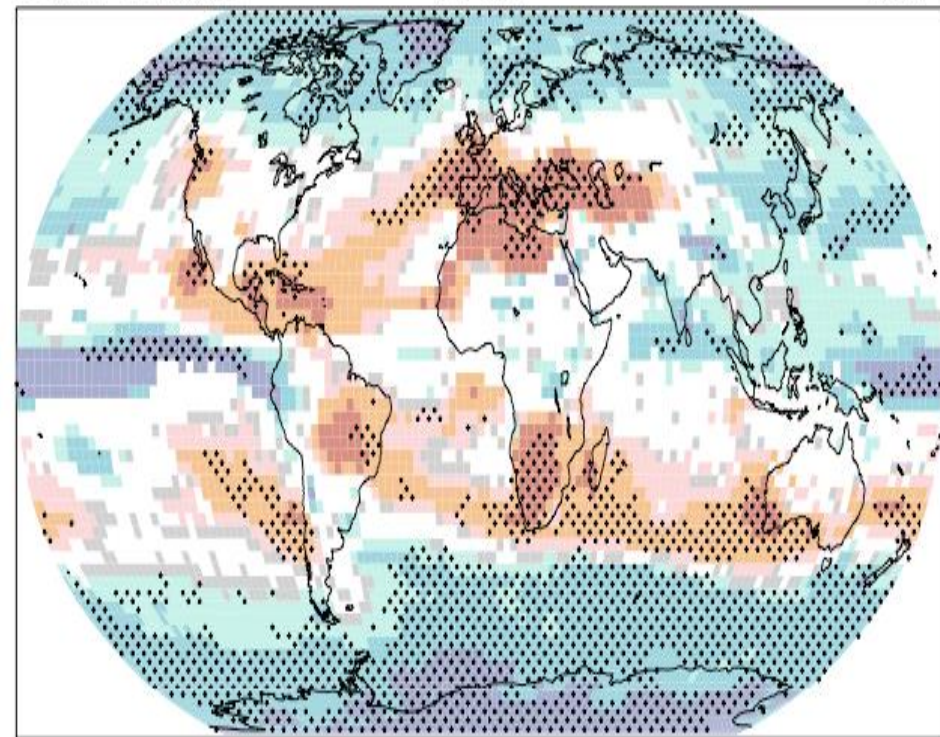
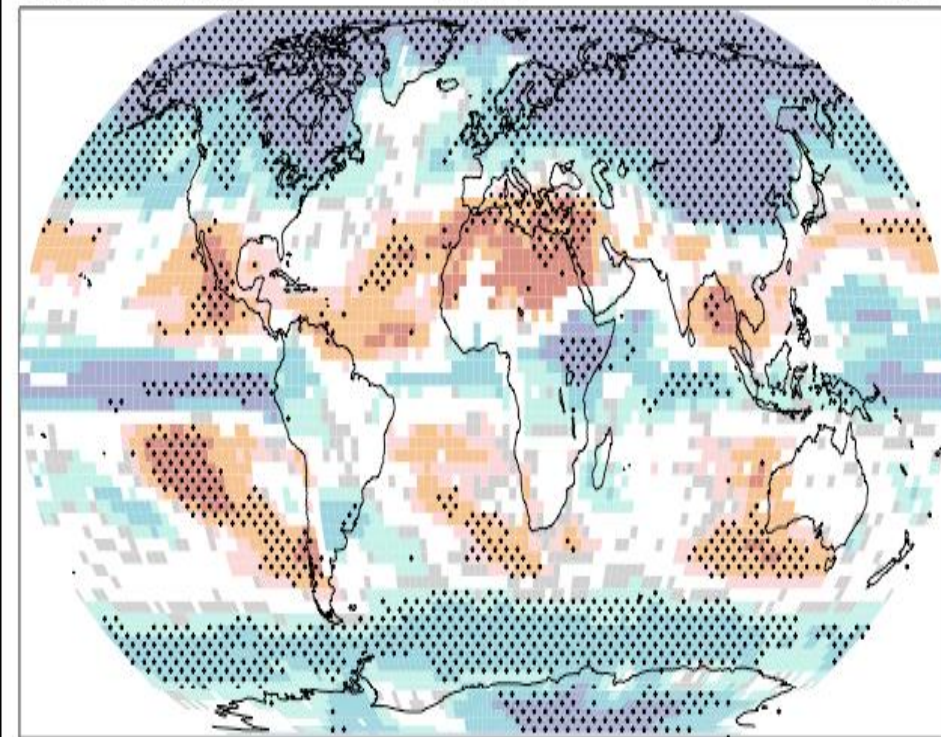
multi-model

A1B

DJF multi-model

A1B

JJA



©IPCC 2007: WG1-AR4

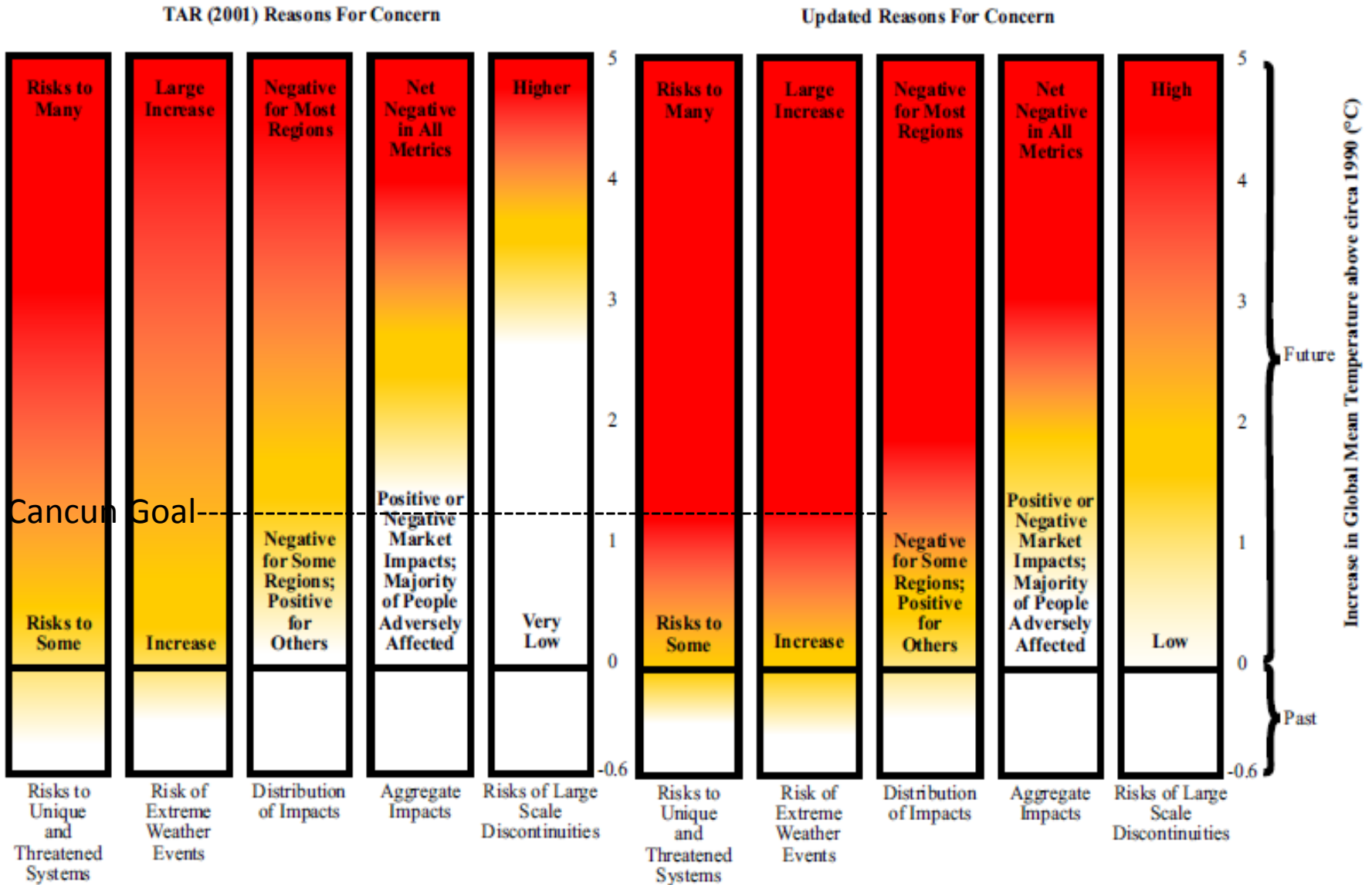
Stippled: 90% of models agree

White: no significant changes in 60% of all models

Erhöhte Verletzbarkeit

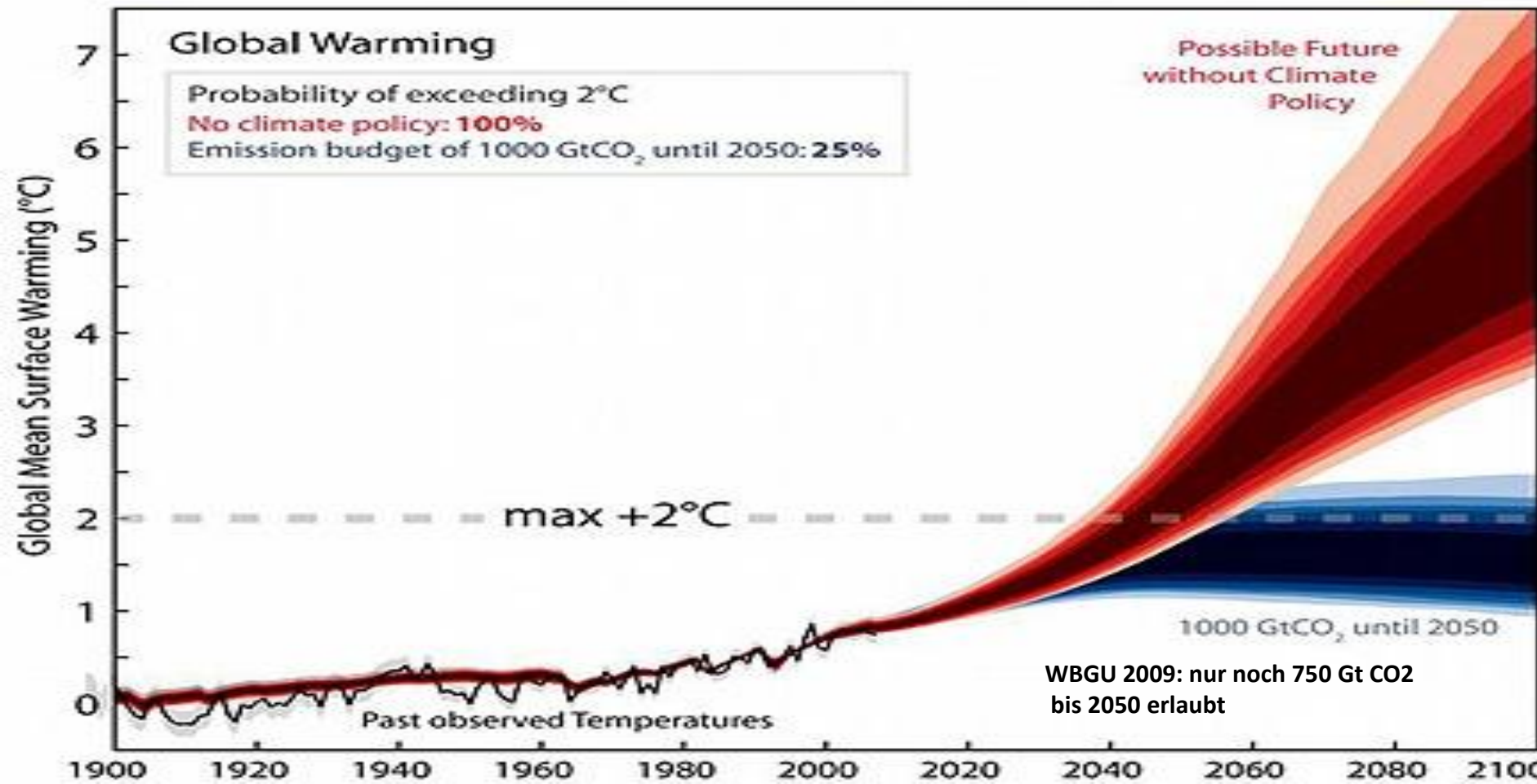
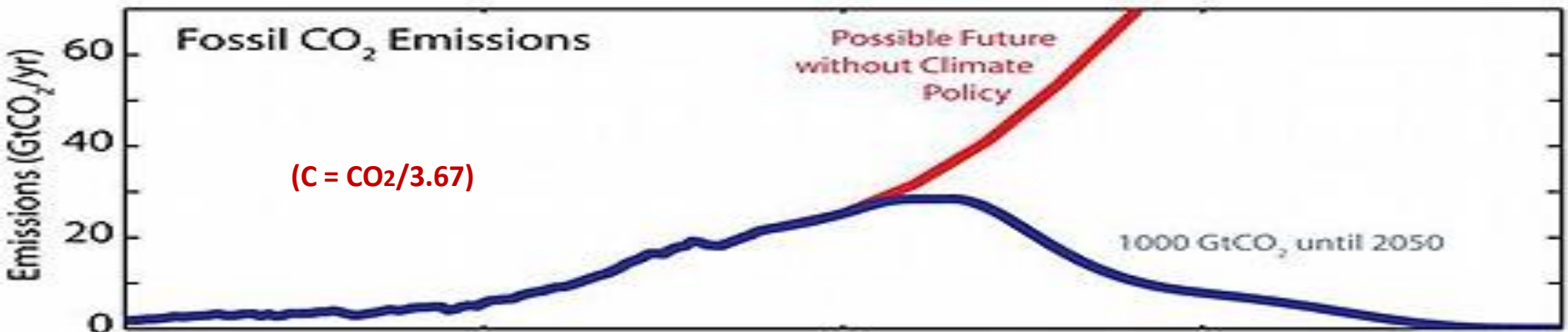
IPCC 2001

PNAS 2009



2°C Erwärmung in nur 200 Jahren stellen eine noch nie erlebte rasche Klimaänderung für den Menschen dar

Nature 2009, Meinshausen et al.



Schlussfolgerung:

Die Menschheit muss aus der energetischen Nutzung der fossilen Energieträger aussteigen bevor diese zur Neige gehen, wenn das von der Völkergemeinschaft errichtete Ziel $<2^{\circ}\text{C}$ mittlere globale Erwärmung bis 2100 eingehalten werden soll!

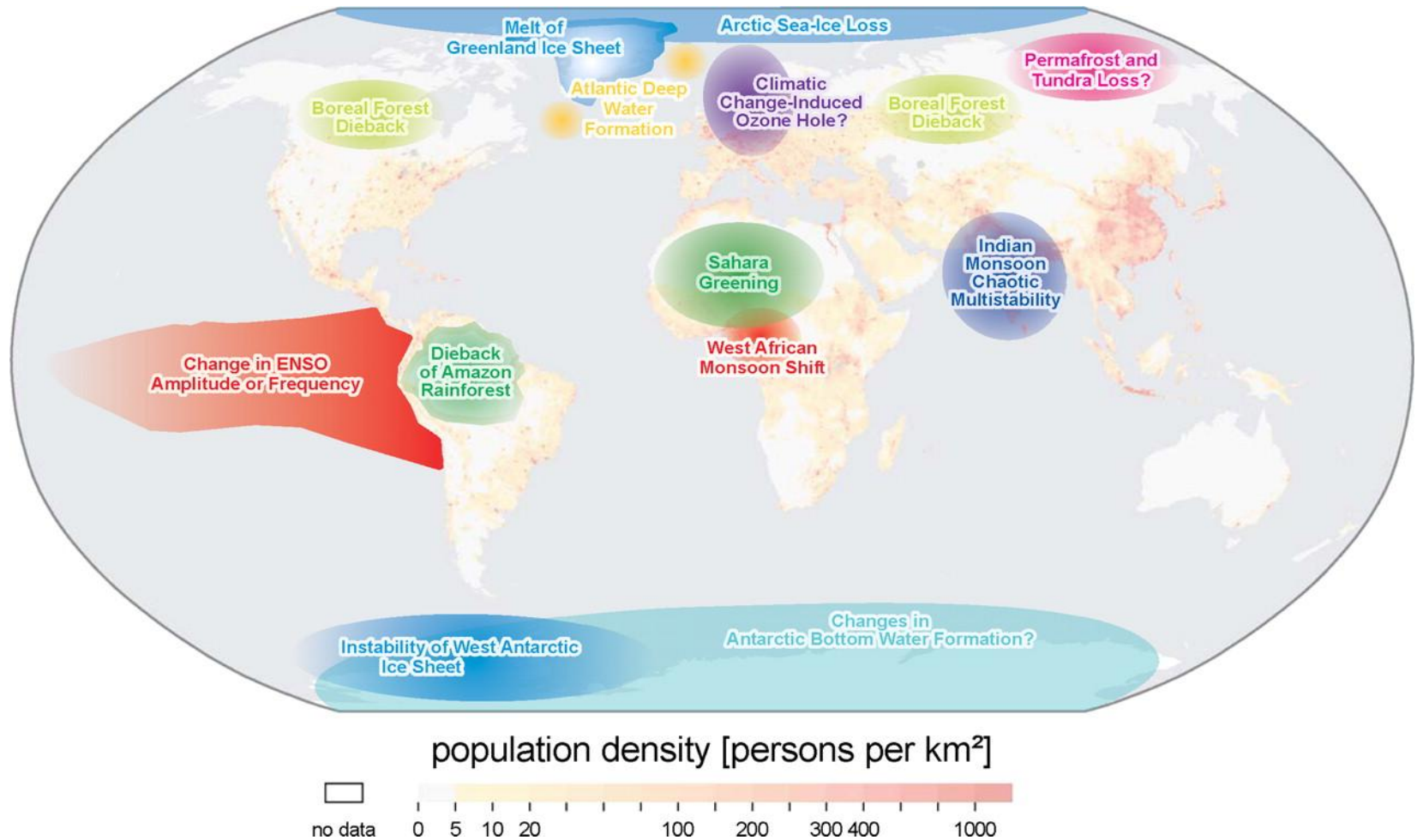
***Wir brauchen also ein völkerrechtlich
verbindliches Protokoll zur weiteren
Emissionsreduktion bei Ausweitung der Zahl
der Länder mit Verpflichtungen wie vorläufig in
Durban beschlossen***

Was ist eine abrupte Klimaänderung?

Wir sprechen von einer solchen, wenn das Klimasystem über eine Schwelle (Kipp-Punkt) zu einem neuen Zustand getrieben wird, wobei dann die Geschwindigkeit vom Klimasystem selbst bestimmt wird und größer ist als die des Anlasses.

Kipp-Punkte im Klimasystem

Map of potential policy-relevant tipping elements in the climate system, updated from ref. 5 and overlain on global population density.



Lenton T M et al. PNAS 2008;105:1786-1793

PNAS

Mögliche langfristige Wirkung einer Erwärmung:

Mobilisierung von Methan aus Methanhydraten
(Wassereis mit hohem Methananteil) im Ozeansediment

Geschätzte Lagerstättengröße: 3000 bis 11000 Gt C

Erste Schätzung für Klimawirkung: 2000 Gt C aus
fossilen Brennstoffen mobilisieren 2000 bis 4000 Gt C in
Tausenden von Jahren und verstärken den erhöhten
Treibhauseffekt.

Buffett, B.; Archer, D. (2004). "[Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean](#)". *Earth and Planetary Science Letters* **227** (3–4): 185.

Macdonald, G. J. (1990). "Role of methane clathrates in past and future climates". *Climatic Change* **16** (3): 247–243. [doi:10.1007/BF00144504](#).

Archer, D.; Buffett, B. (2005). "[Time-dependent response of the global ocean clathrate reservoir to climatic and anthropogenic forcing](#)". *Geochemistry Geophysics Geosystems* **6** (3): Q03002.

Permafrost

layer of soil or rock, at some depth beneath the surface, in which the temperature has been continuously below 0°C for at least several years; it exists where summer heating fails to reach the base of the layer of frozen ground.

Permafrost

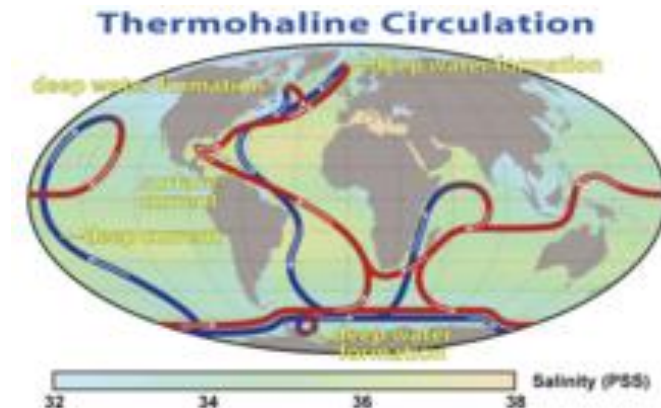
Boden- oder Felsschicht unter der Oberfläche in welcher die Temperatur mindestens einige Jahre unter 0 °C lag; er kommt nur dort vor wo das Auftauen im Sommer die Unterkante der gefrorenen Schicht nicht erreicht.

Effekte auf Zeitskalen von Jahrtausenden: das Beispiel Nordatlantische Drift (Golfstrom)

Die besten bisherigen gekoppelten
Klimamodelle zeigen eine Abschwächung,
aber keinen Abriss.

Der könnte aber während des Abklingens der
globalen Erwärmung kommen

Knutti, R.; Stocker, T. F. (2002)



Welche anderen Energieträger gibt es?

- ***Uran***

Zur Zeit sind weltweit etwas mehr als 400 Kernkraftwerke einsatzfähig, die ca. 2 % zur Primärenergieversorgung beitragen; ihr relativer Anteil wächst jedoch seit Jahren nicht mehr

- ***Erneuerbare Energien***

- ***Sonne***

- ***Wind***

- ***Wasserkraft***

- ***Biomasse***

- ***Geothermie***

- ***Gezeiten***

Rangliste der technischen Potenziale Erneuerbarer Energiequellen

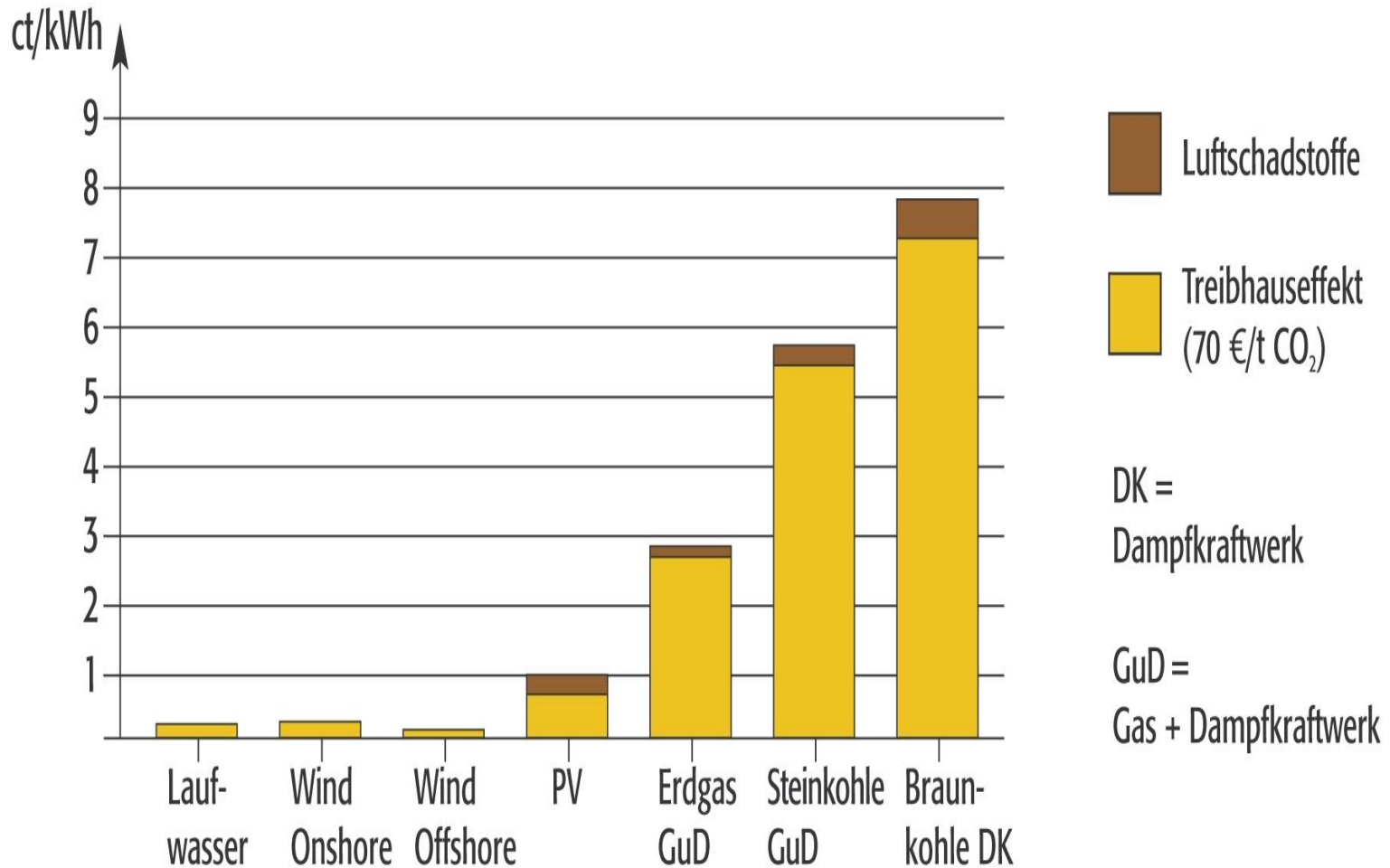
Ranking of technical potentials of renewable energy types

| Energiequelle | Globaler Mittelwert | Deutschland/Germany | Angebotstyp/Type of offer |
|--|---------------------|--|---|
| Sonne Sun | ~ 165 | ~ 110 | stark schwankend, nur tagsüber; <i>strongly varying, daytime only</i> |
| Wind | ~ 3 | ~ 3 | unregelmäßig, Tag und Nacht; <i>variable, day and night</i> |
| Biomasse Biomass | ~ 0,1 | < 0,3 Gedüngter Maisacker <0,5 Zuckerrohr | steuerbar, jedoch großer Flächenverbrauch, Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung; <i>manageable, but low energy flux density, competition with food production</i> |
| Tiefe Geothermie Deep Geothermal Energy | ~ 0,1 | ~ 0,08 | kontinuierlich, risikohafte Erkundung <i>continuous, risky exploration</i> |
| Gezeiten Tides | << 0,1 | | regelmäßig, jedoch alternierend, nur wenige Küstenabschnitte; <i>regularly alternating, only few coastal areas</i> |
| Ozeanwellen Ocean waves | < 0,1 | | unregelmäßig, fast wie Wind, küstennah; <i>irregular, nearly as wind, coastal areas</i> |
| Energieflussdichte heute Energy flux density today | < 0,03 | ~ 1,5 | |
| Energieflussdichte in 2050 Energy flux density in 2050 | < 0,06 | < 1.5 | |

Globale Mittelwerte der Energieflussdichten an der Erdoberfläche, in Watt pro Quadratmeter (Wm^{-2}), für verschiedene Quellen, gereiht nach Bedeutung; zum Vergleich sind auch aktuelle Werte des Energieversorgungssystems mit angegeben.

Externe Kosten (Beispiel Stromerzeugung).

Quelle: BMU (2009)



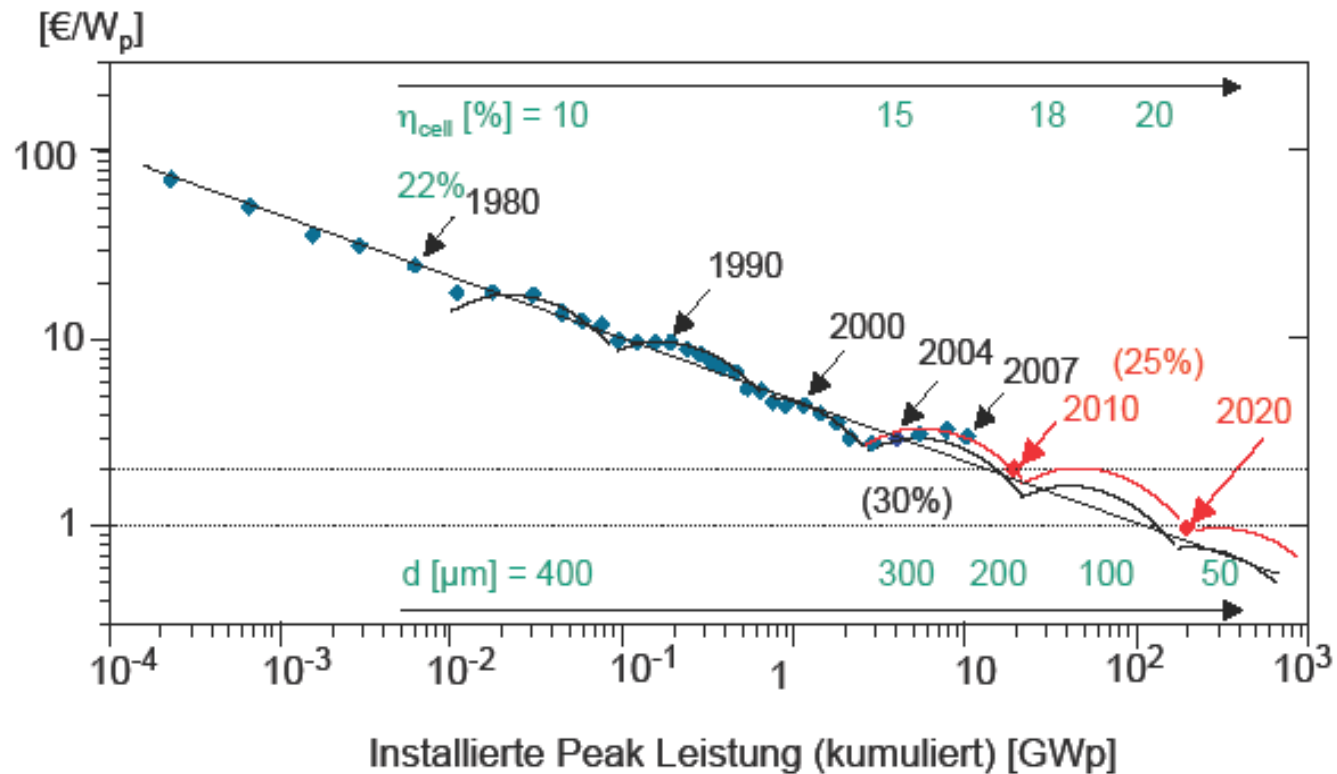
Situation erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland

(eine Erfolgsgeschichte bei Blick zu den Nachbarn)

Was haben das Einspeise-Gesetz von 1990 und das Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2000 bewirkt?

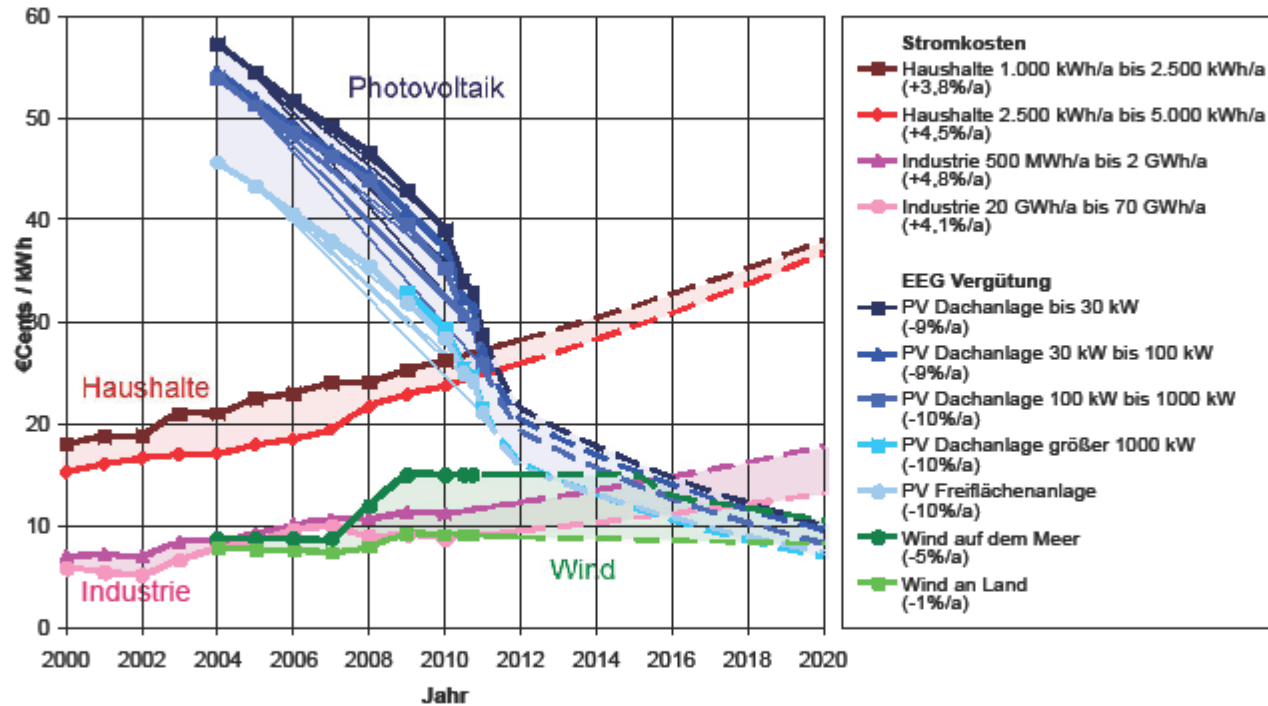
Einige Beispiele und überraschende Einblicke

Preis-Lernkurve von PV-Modulen aus kristallinem Si



Graph: G. Willeke, ISE

Stromkosten und EEG-Tarife in Deutschland



Quelle: B. Burger Fh-ISE, "Energiekonzept 2050", FVEE (7) Juni 2010, Update vom 09.02.2011

Die Energiewende der jetzigen Regierung wäre nie gekommen ohne das jahrzehntelange Wirken einer starken Umweltbewegung. Sie hat den Hauptteil der 20% des elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energiequellen gegen heftigen Widerstand der bisherigen Hauptversorger durchgesetzt und finanziert. Jetzt muss sie die Wende nicht nur konstruktiv und kritisch begleiten, sondern auch die Politik muss durch mehr Transparenz und die Bürger müssen durch weiter hohes Engagement das Ziel einer Energieversorgung mit erneuerbaren Energien bis 2050 erreichen lassen.

Amerikanische Akademie der Wissenschaften (2011):

Die Erde tritt in eine neue geologische Epoche ein, manchmal Anthropozän genannt, während der die Entwicklung des Planeten überwiegend durch die Effekte der Aktivitäten des Menschen kontrolliert sein wird, vor allem durch Kohlendioxidemissionen. Aktionen in diesem Jahrhundert bestimmen darüber, ob die Klimaanomalie des Anthropozän eine relativ kurze und kleine Abweichung vom Klima des Holozän sein wird, oder eine extreme über viele Jahrtausende.