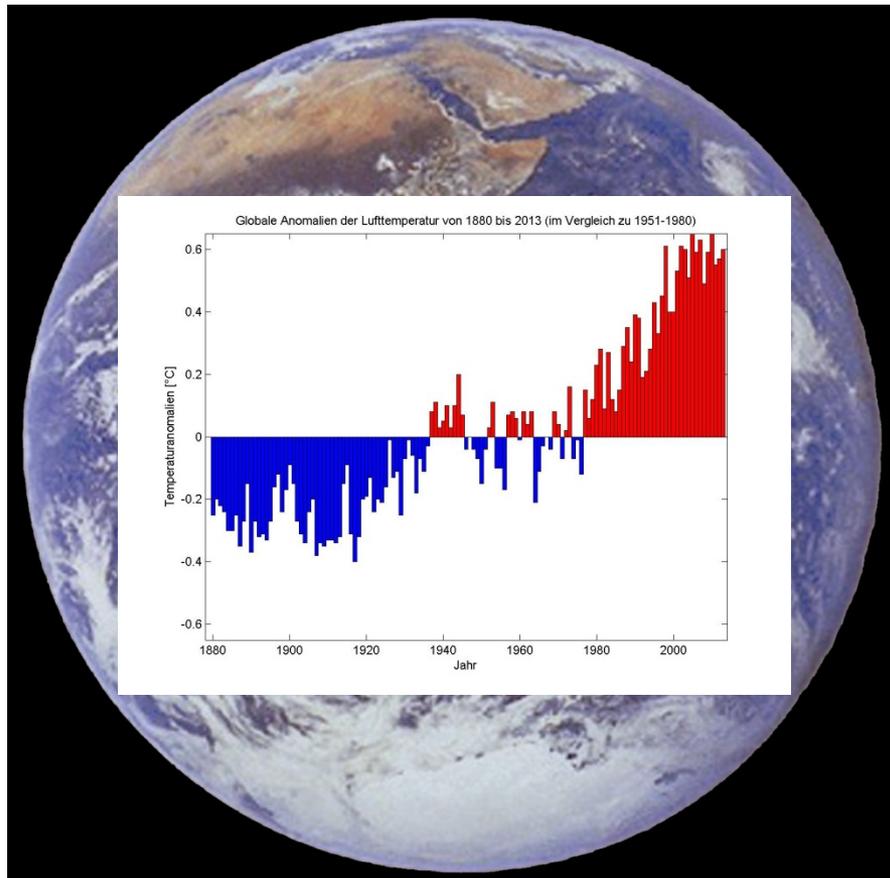


Klimawandel als Herausforderung



Peter Lemke

**Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für
Polar- und Meeresforschung
Bremerhaven**

**Institut für Umweltphysik
Universität Bremen**

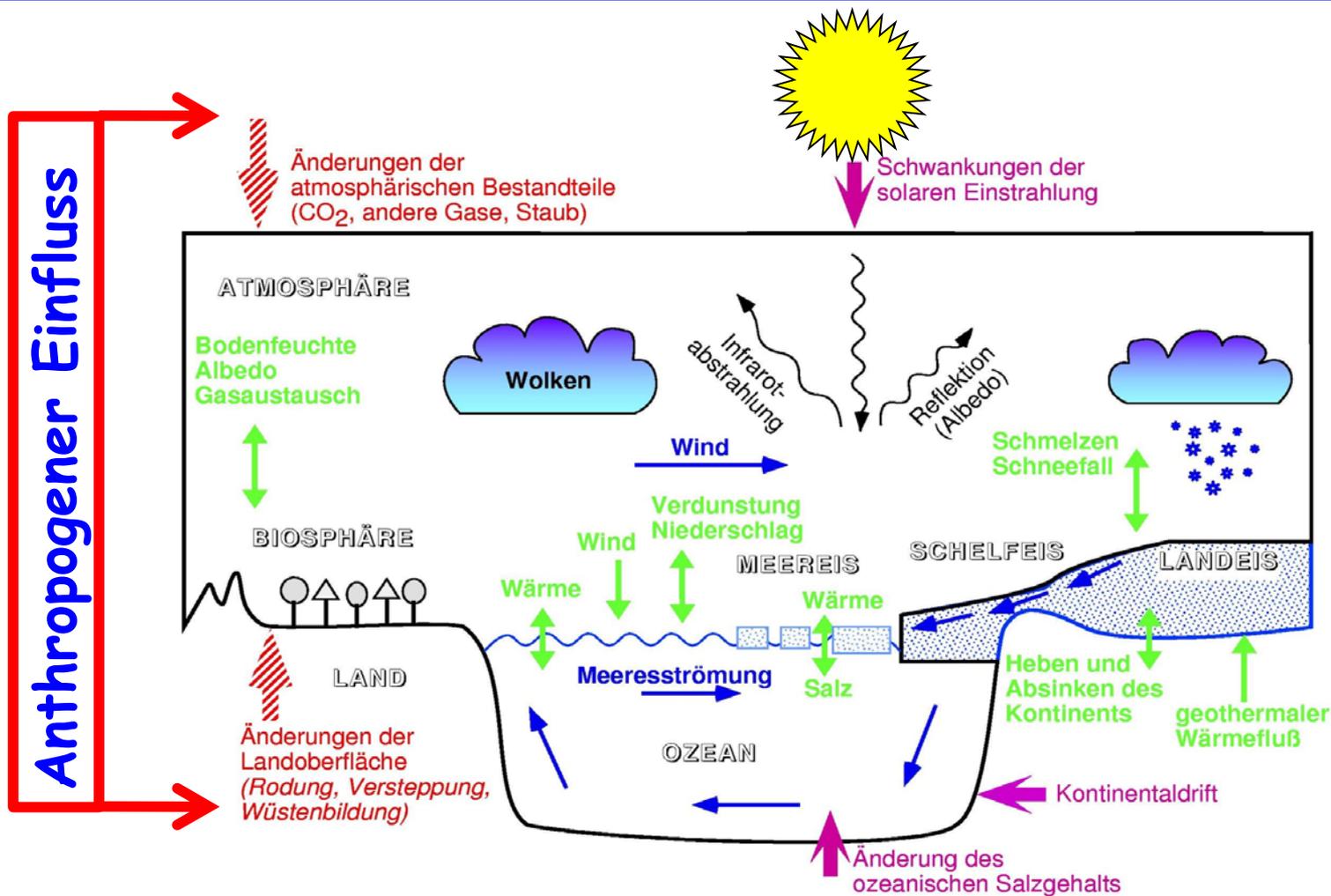
Inhalt

1. Was ist das Problem?
2. Was wird beobachtet?
3. Was bringt die Zukunft?
4. Und was tun wir?

Inhalt

1. Was ist das Problem?
2. Was wird beobachtet?
3. Was bringt die Zukunft?
4. Und was tun wir?

Das multi-disziplinäre Klimaproblem



**Wechselwirkung zwischen Klimakomponenten:
Austausch von Wärme, Impuls, Masse**

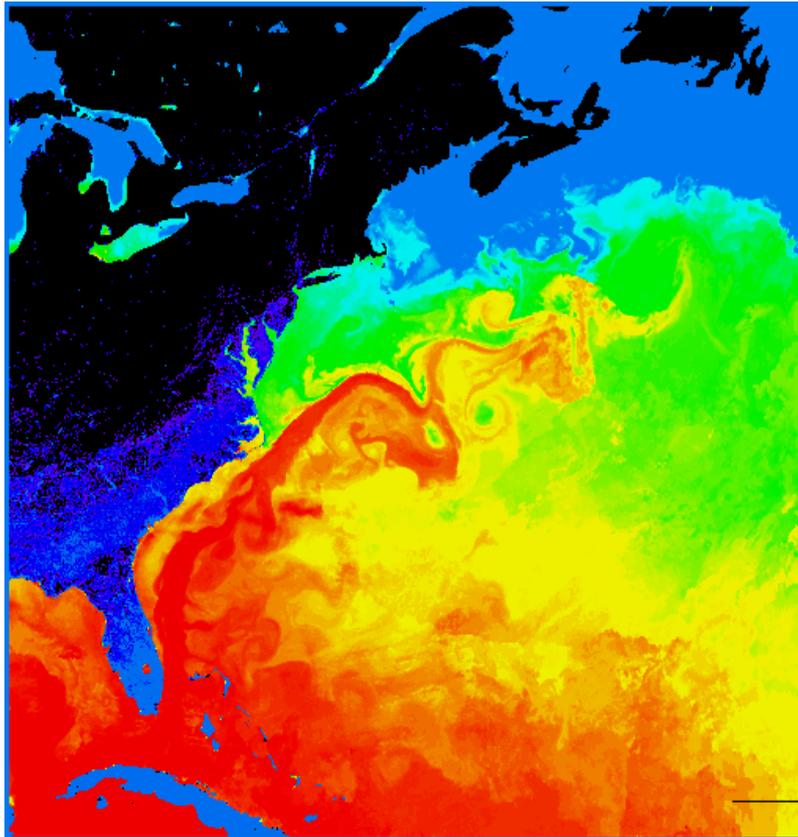
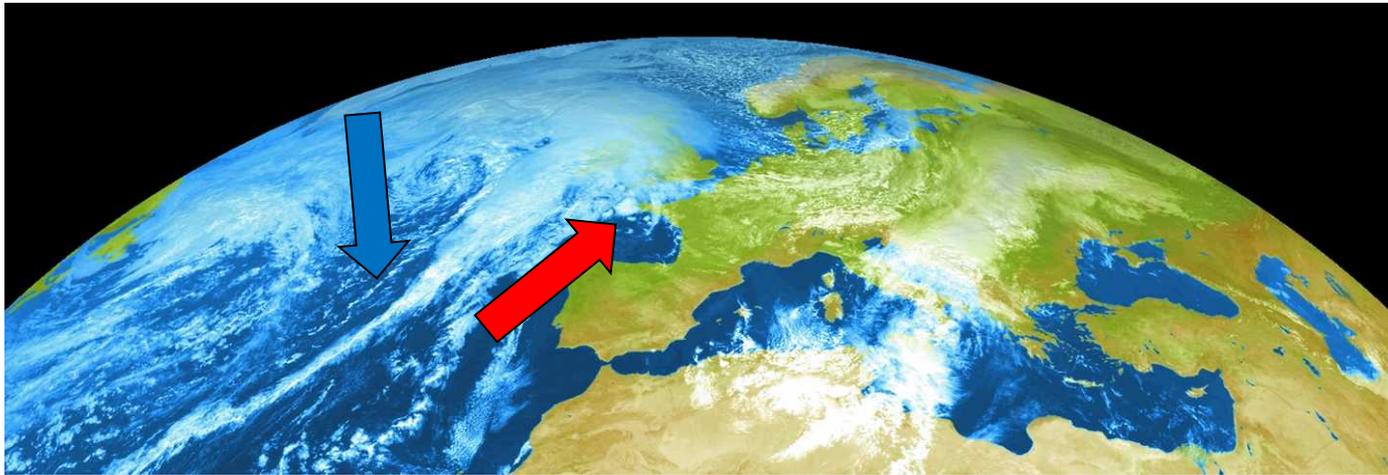
Klimaänderungen

Natürliche Ursachen:

- ❖ Externe: Sonne (zurzeit sehr konstant)
Änderungen der Umlaufbahn
(lange Zeitskalen, >20.000 Jahre)
Vulkanausbrüche (kurze Zeitskala)
- ❖ Interne: Rückkopplungen im Klimasystem,
Nichtlinearitäten

Ursachen der Klimaschwankungen (1)

- ◆ **Regional unterschiedliche Sonneneinstrahlung**
 - Tropen empfangen mehr Energie als Polargebiete
- ◆ **Temperaturunterschiede erzeugen Bewegungen in Atmosphäre und Ozean, die Wärme polwärts transportieren**
 - Golfstrom: 1 Peta-Watt \approx 31 Millionen Euro / Sekunde
- ◆ **Bewegung in Atmosphäre und Ozean ist turbulent**
 - Hoch- und Tiefdruckgebiete, Golfstrommäander



Turbulenz in Atmosphäre und Ozean

**Satellitenaufnahme
der Golfstrom-
Temperatur**

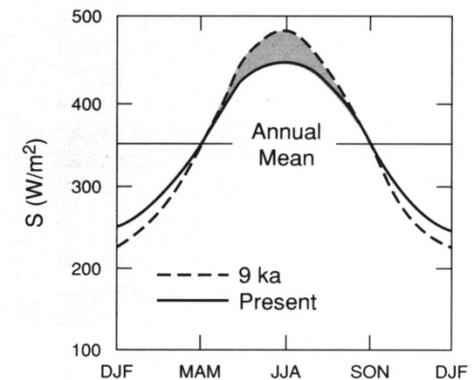
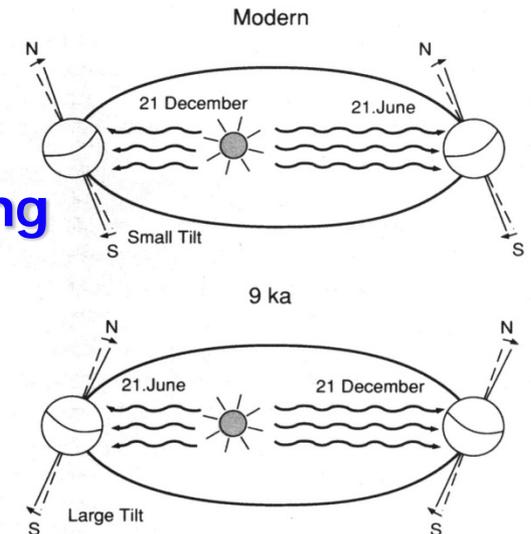
Ursachen der Klimaschwankungen (2)

Zeitlich unterschiedliche Sonneneinstrahlung

➤ Jahreszeiten durch die Neigung der Erdachse

Änderung der Erdbahnparameter

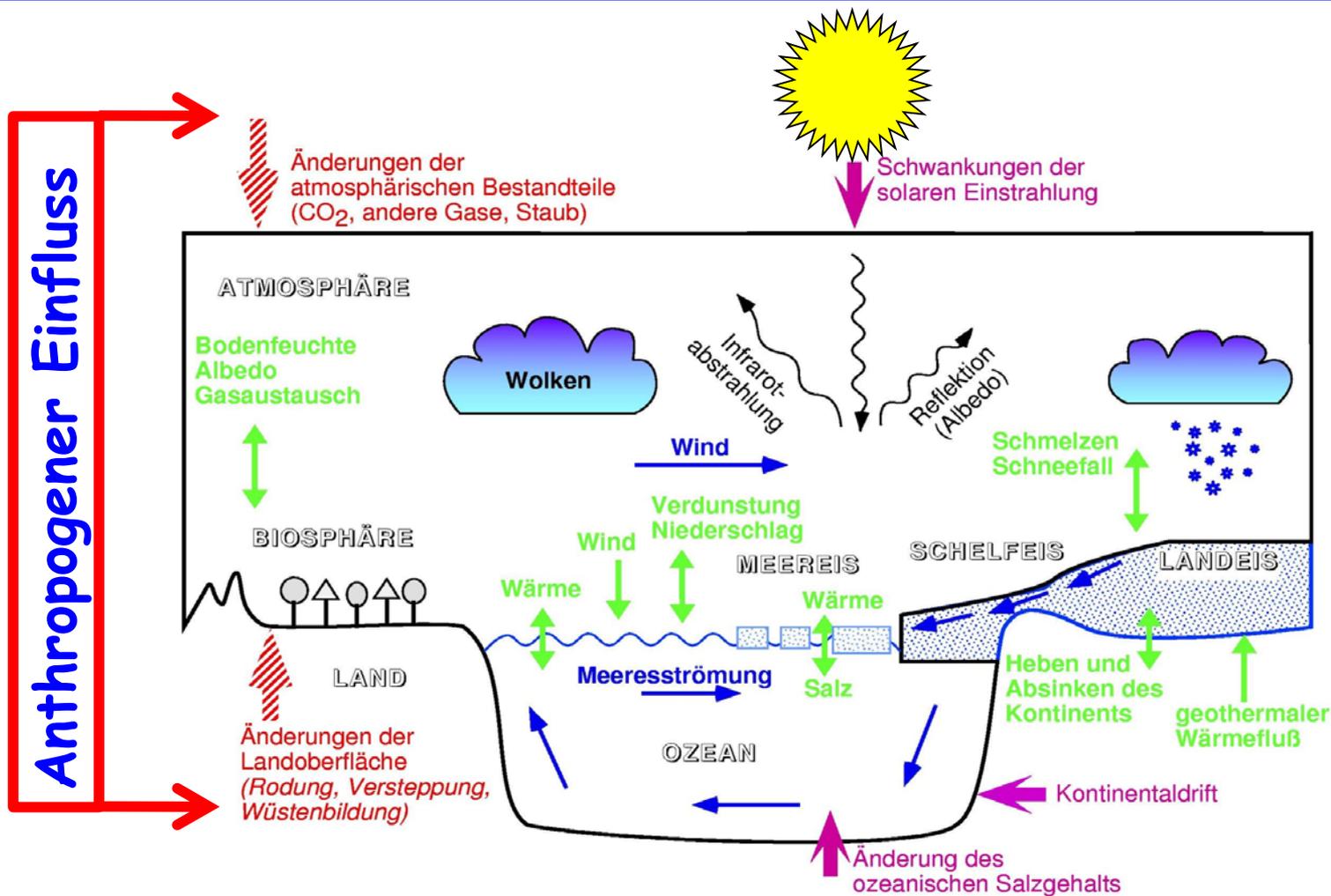
- Neigung der Erdachse (41.000 Jahre)
- Präzession der Erdachse (19.000, 23.000 Jahre)
- Exzentrizität (100.000 Jahre)



Ursachen der Klimaschwankungen (3)

- ◆ **Atmosphäre, Ozean, Eis und Biosphäre sind nicht unabhängig, sondern wechselwirken miteinander.**
 - **Klimasystem**

Das multi-disziplinäre Klimaproblem



**Wechselwirkung zwischen Klimakomponenten:
Austausch von Wärme, Impuls, Masse**

Ursachen der Klimaschwankungen (3)

- ◆ **Atmosphäre, Ozean, Eis und Biosphäre sind nicht unabhängig, sondern wechselwirken miteinander.**
 - **Klimasystem**
- ◆ **Wechselwirkung ist durch positive (instabile) und negative (stabile) Rückkopplungen geprägt.**
 - **Eis-Albedo / Temperatur Feedback**
- ◆ **Komponenten des Klimasystems schwanken auf unterschiedlichen Zeitskalen.**
 - **schnelle** Atmosphäre, **langsamer** Ozean

Klimaänderungen

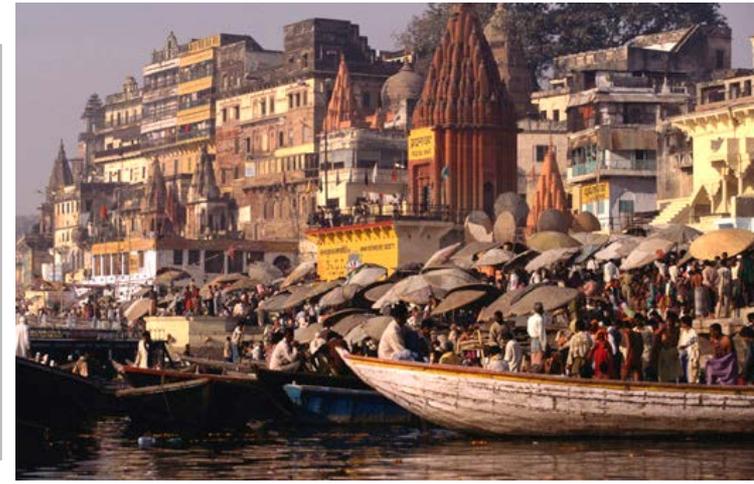
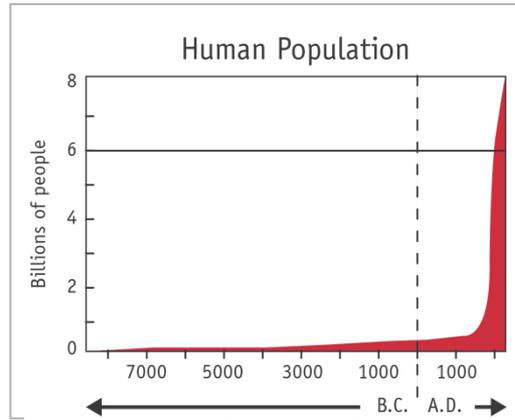
Natürliche Ursachen:

- ❖ Externe: Sonne (zurzeit sehr konstant)
Änderungen der Umlaufbahn
(lange Zeitskalen, >20.000 Jahre)
Vulkanausbrüche (kurze Zeitskala)
- ❖ Interne: Rückkopplungen im Klimasystem,
Nichtlinearitäten

Anthropogene (menschliche) Ursachen:

- ❖ Änderungen der Landoberfläche
- ❖ CO₂-Emissionen

Weltbevölkerung: 6,756,528,577



The Challenge: Sustainable Management of an Ever-Changing Planet



Ernährung

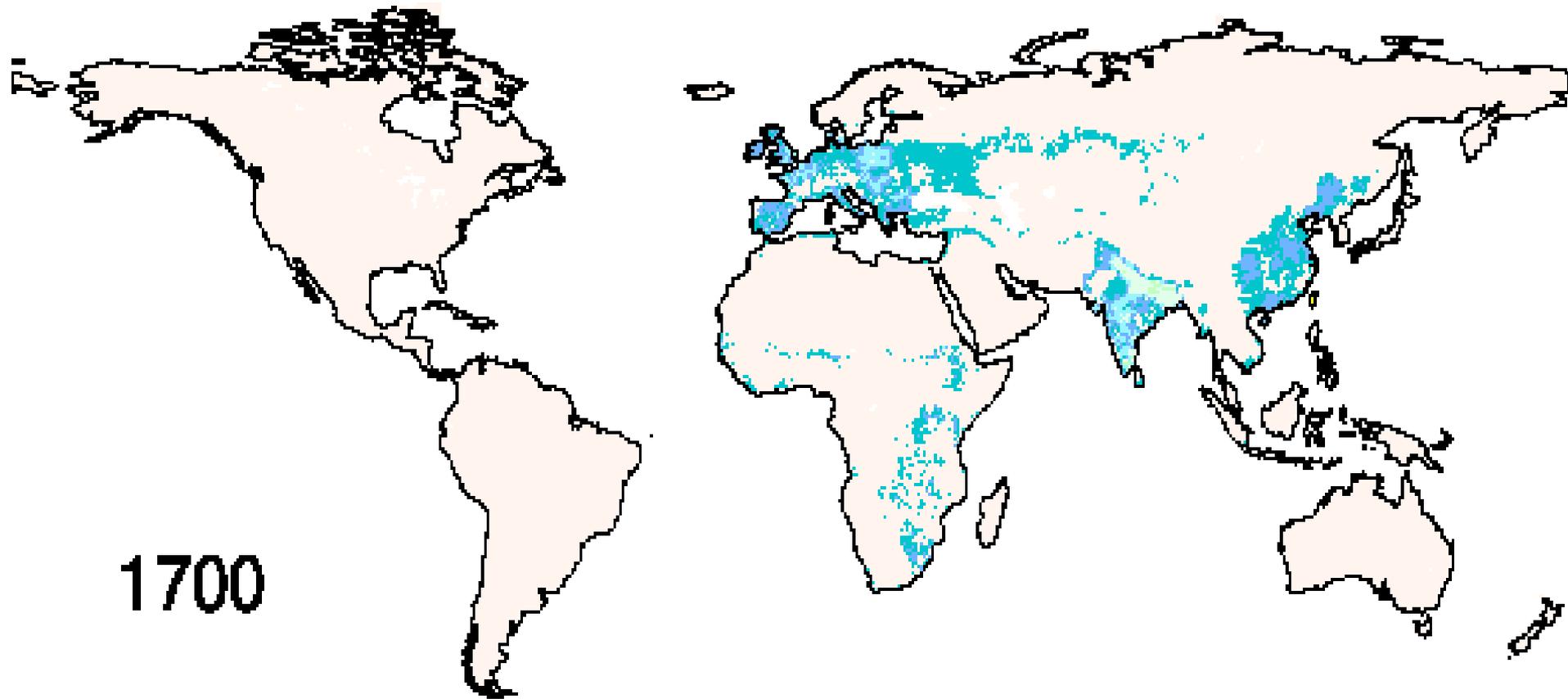


The Challenge: Food Security

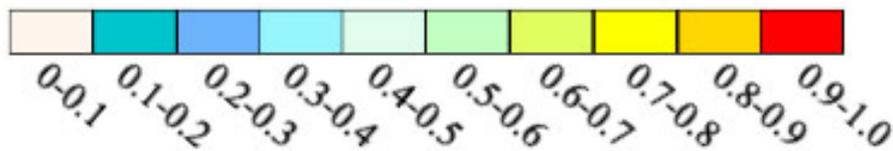
Global Crop Cover Change 1700 to 1992



Center for
Sustainability and
the Global Environment
Institute for Environmental Studies
University of Wisconsin-Madison

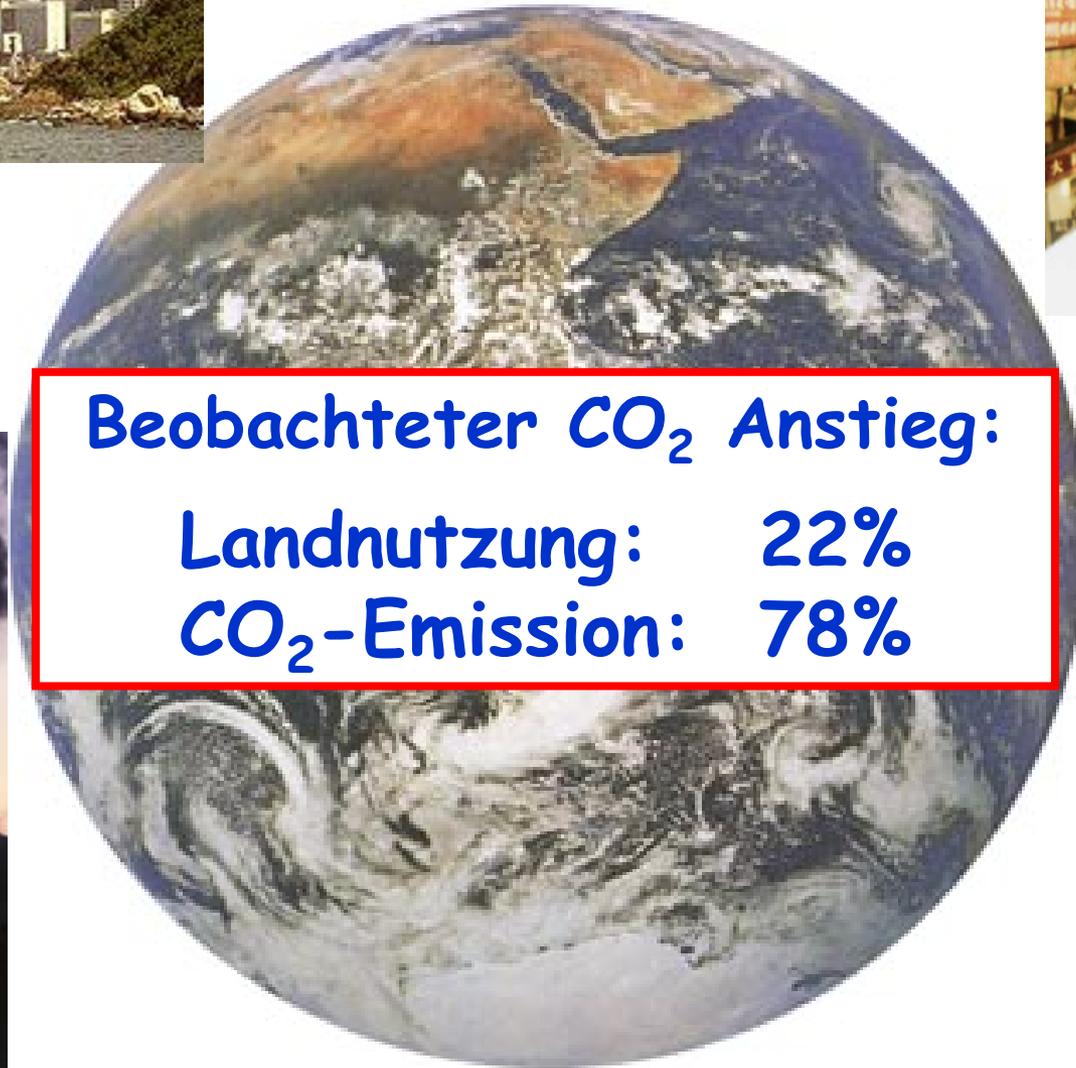


1700



Fraction of Grid Cell in Croplands

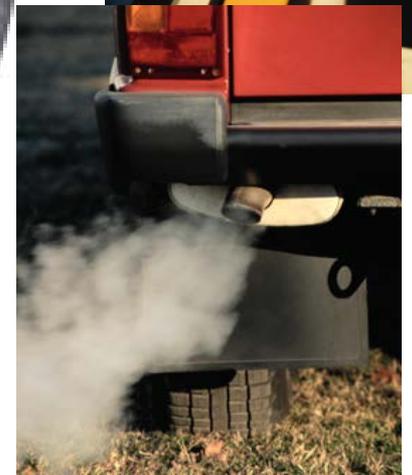




Beobachteter CO_2 Anstieg:

Landnutzung: 22%

CO_2 -Emission: 78%



Was bedeutet das für die Energiebilanz der Erde?

Strahlungsbilanz

Solarkonstante
(Energieflußdichte)
 $S = 1368 \text{ W/m}^2$

Energieaufnahme der Erde:
Querschnitt $\times S \times$ Absorption

$$\pi r^2 S (1 - \alpha)$$

α = Albedo = Reflektivität

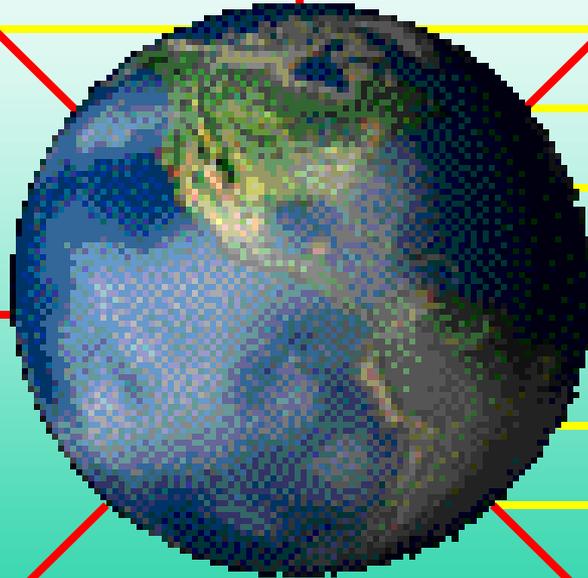
Wärmeabstrahlung der Erde:
Oberfläche \times therm. Strahlung

$$4\pi r^2 \sigma T^4$$

σ = Stefan-Boltzmann Konstante

thermisches
Gleichgewicht:

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4\pi r^2 \sigma T^4$$



Strahlungstemperatur

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4 \pi r^2 \sigma T^4$$

$$(1 - \alpha) S = 4 \sigma T^4$$

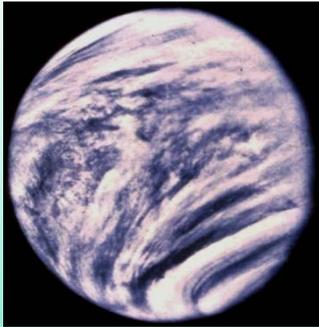
$$T = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (4\sigma)}$$

Sonnenenergie

Reflektivität

Venus – Erde - Mars

$$T = \sqrt[4]{S(1-\alpha)/(4\sigma)}$$



Venus:

$$S_v = 2623 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\alpha_v = 0.77$$

Also:

$$T_v = 227\text{K} = -46^\circ\text{C}$$



Erde:

$$S_e = 1368 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\alpha_e = 0.3$$

Also:

$$T_e = 255\text{K} = -18^\circ\text{C}$$



Mars:

$$S_m = 589 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\alpha_m = 0.24$$

Also:

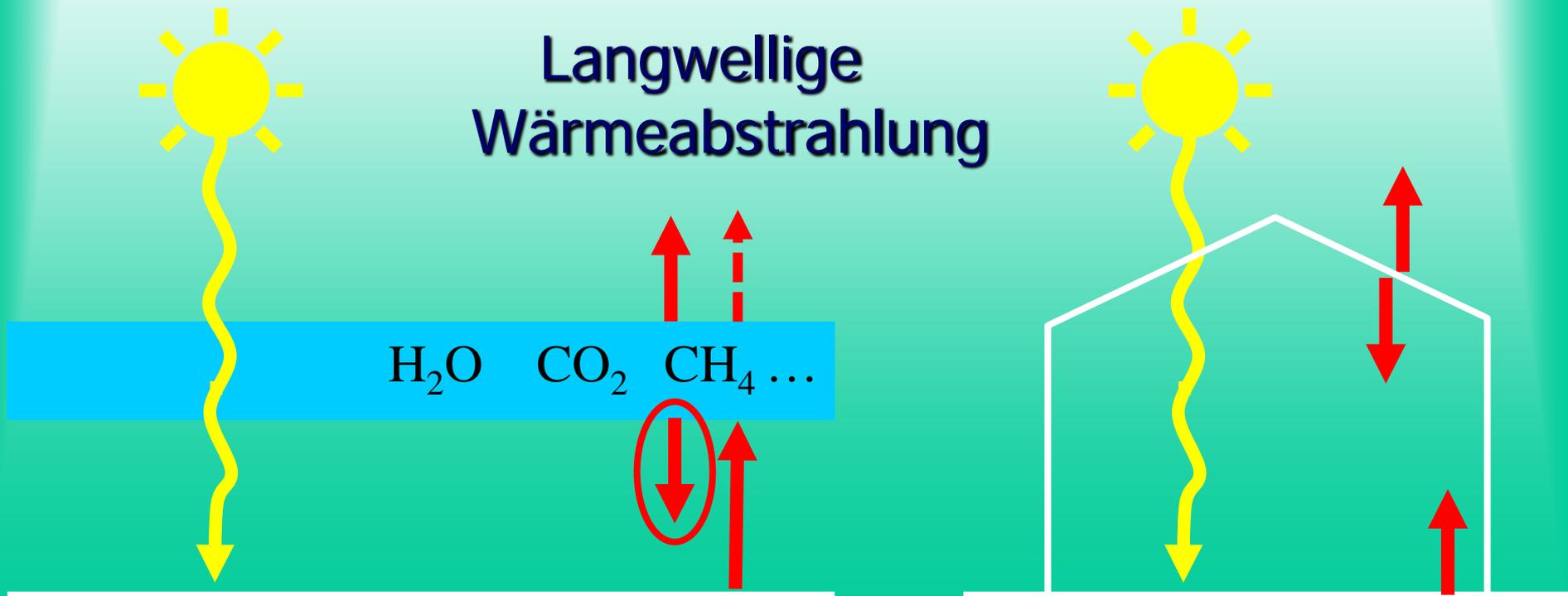
$$T_m = 211\text{K} = -62^\circ\text{C}$$

Erde als Schwarzkörper ($\alpha_{es} = 0$)

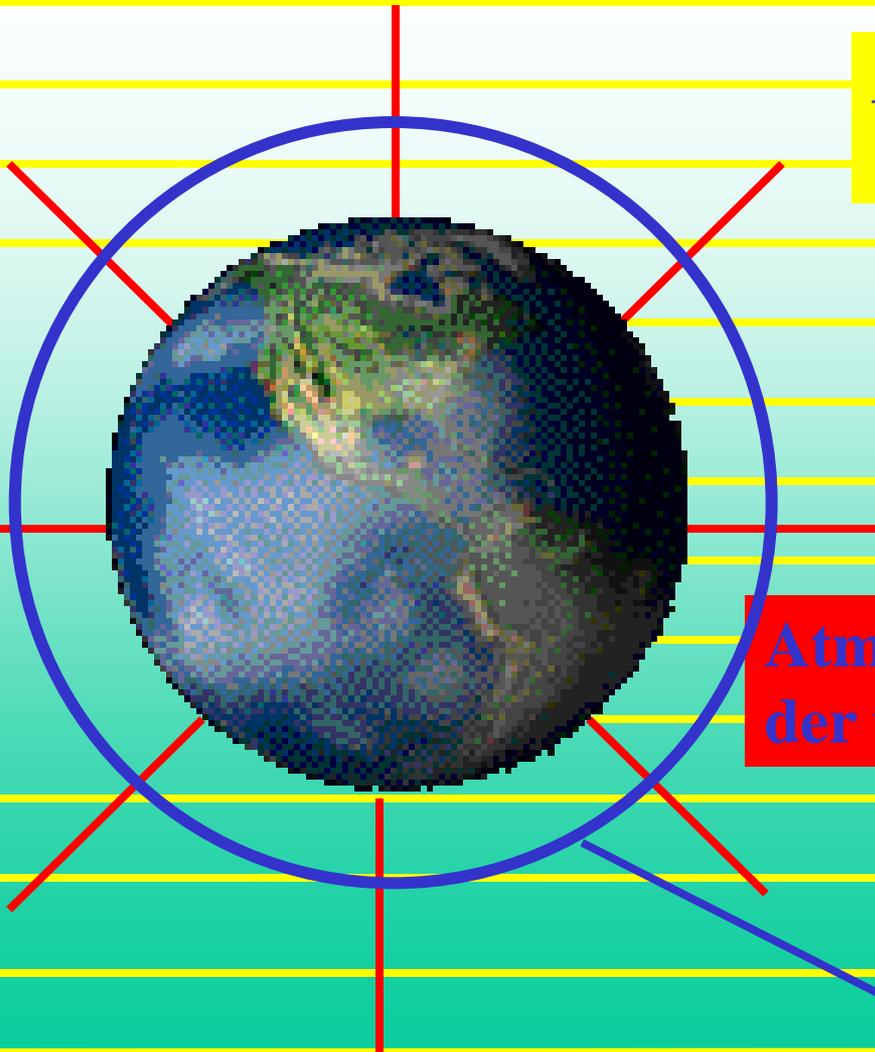
$$T_{es} = 278,7\text{K} = 5,6^\circ\text{C}$$

Der Treibhauseffekt

Solare Einstrahlung



Treibhauseffekt



Atmosphäre ist durchlässig
für solare Einstrahlung

$$\pi r^2 S (1 - \alpha)$$

Atmosphäre absorbiert einen Teil
der thermischen Ausstrahlung

$$\beta 4\pi r^2 \sigma T_s^4$$

Treibhauseffekt

Temperatur:
$$T_s = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (\beta 4\sigma)}$$

Venus:

$$S_v = 2623 \text{ W m}^{-2}$$

$$\alpha_v = 0.77$$

$$\beta = 0.008 \text{ (99,2\%)}$$

Also:

$$T_{vs} = 760 \text{ K} = 487^\circ \text{C}$$

$$T_v = 227 \text{ K} = -46^\circ \text{C}$$

Erde:

$$S_e = 1368 \text{ W m}^{-2}$$

$$\alpha_e = 0.3$$

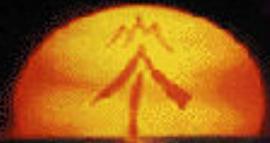
$$\beta = 0.62 \text{ (38\%)}$$

Also:

$$T_{es} = 287 \text{ K} = 15^\circ \text{C}$$

$$T_e = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$$

BEYOND THE HORIZON LIES THE SECRET TO A NEW BEGINNING



WATERWORLD

Waterworld:

$$S_{ww} = 1368 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\alpha_{ww} = 0.1$$

$$\beta = 0.62$$

Also:

$$T_{ww} = 306 \text{ K} = 32^\circ \text{ C}$$





Eisplanet Krypton

$$S_{ep} = 1368 \text{ W m}^{-2}$$

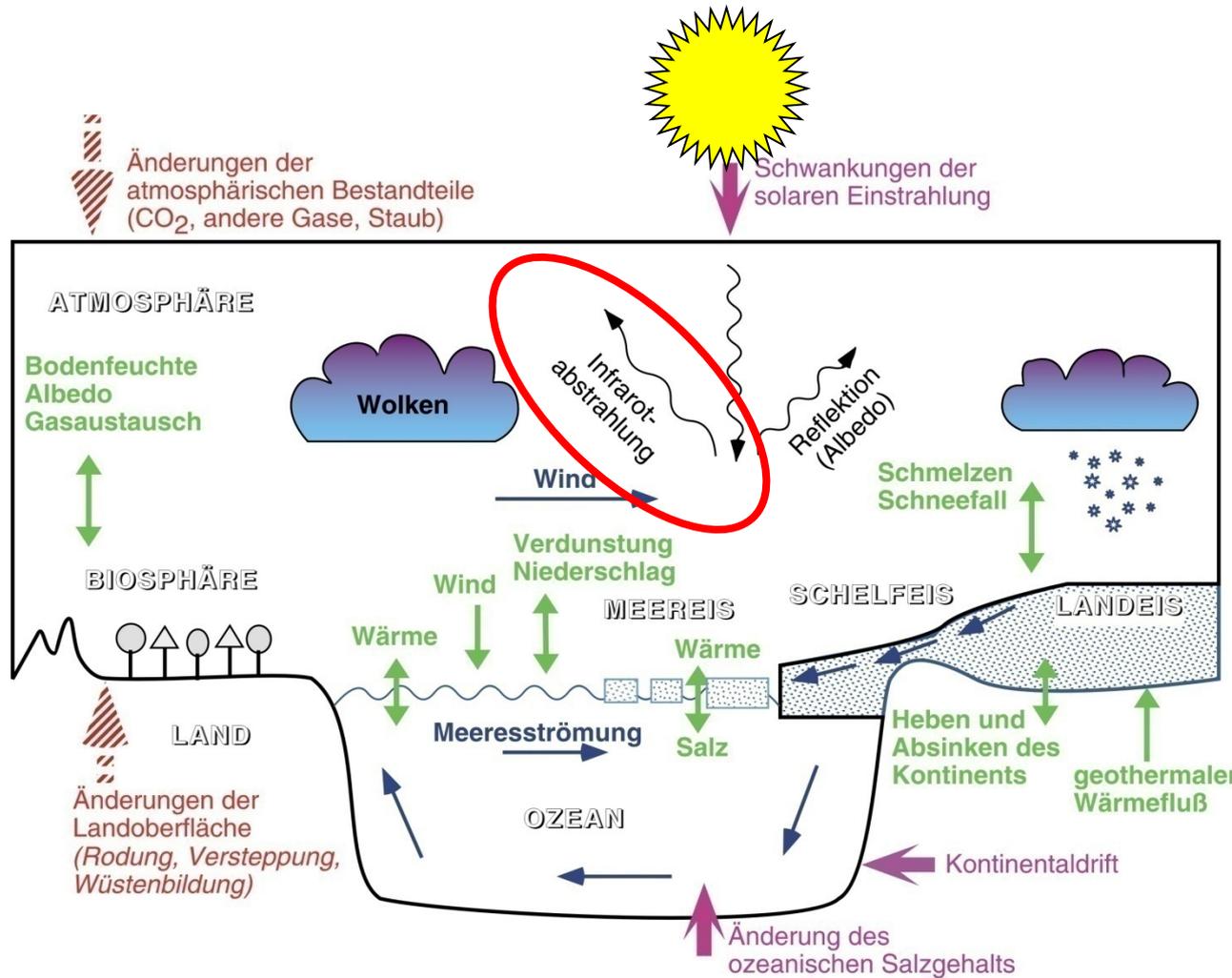
$$\alpha_{ep} = 0.8$$

$$\beta = 0.62$$

Also:

$$T_{ep} = 210 \text{ K} = -63^\circ \text{C}$$

Klimasystem



Planetare Gleichgewicht:
Strahlungs-
Temperatur

255 K = -18°C

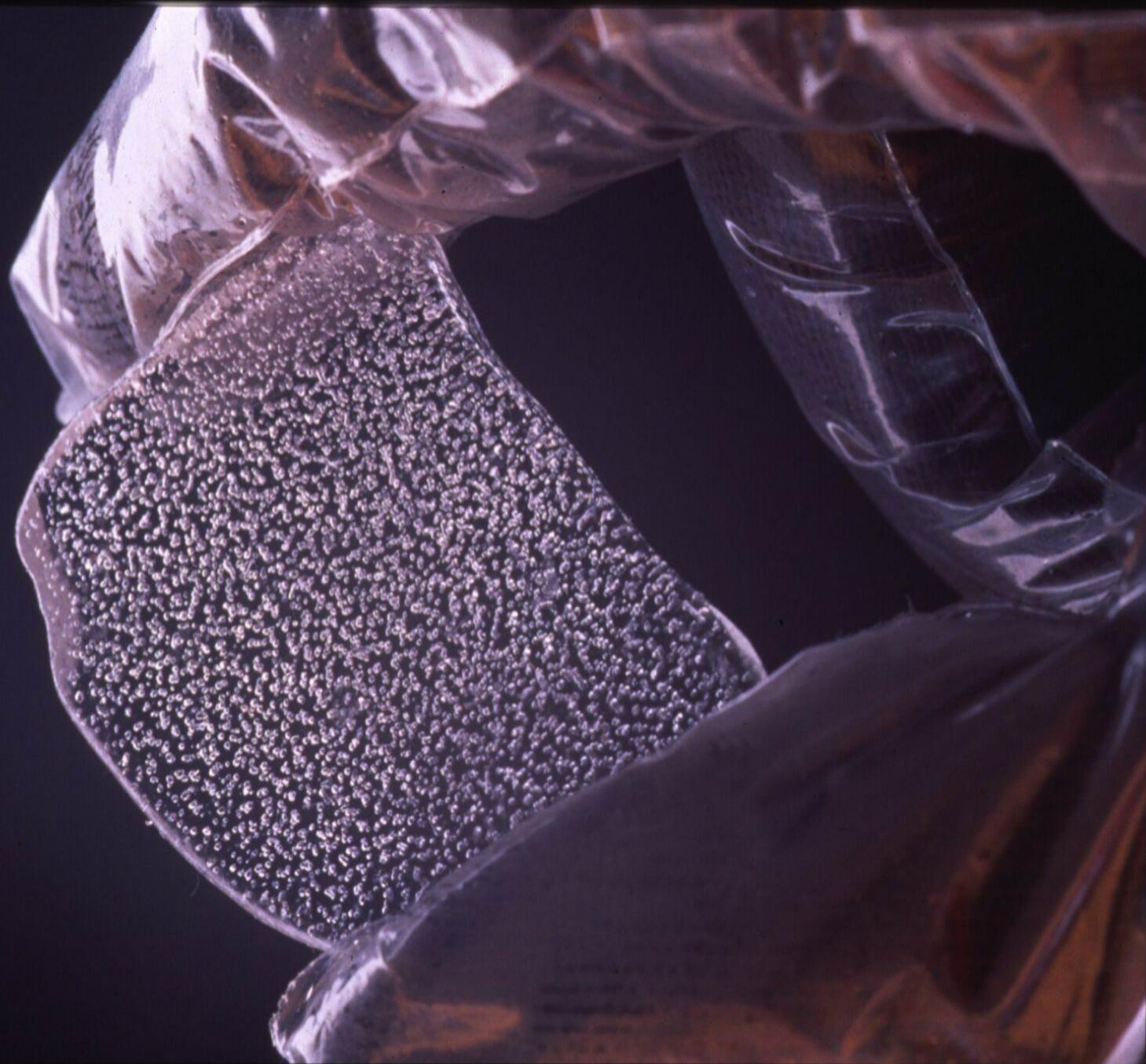
Natürliche
Treibhausgase

Oberflächentemp.

288 K = +15°C

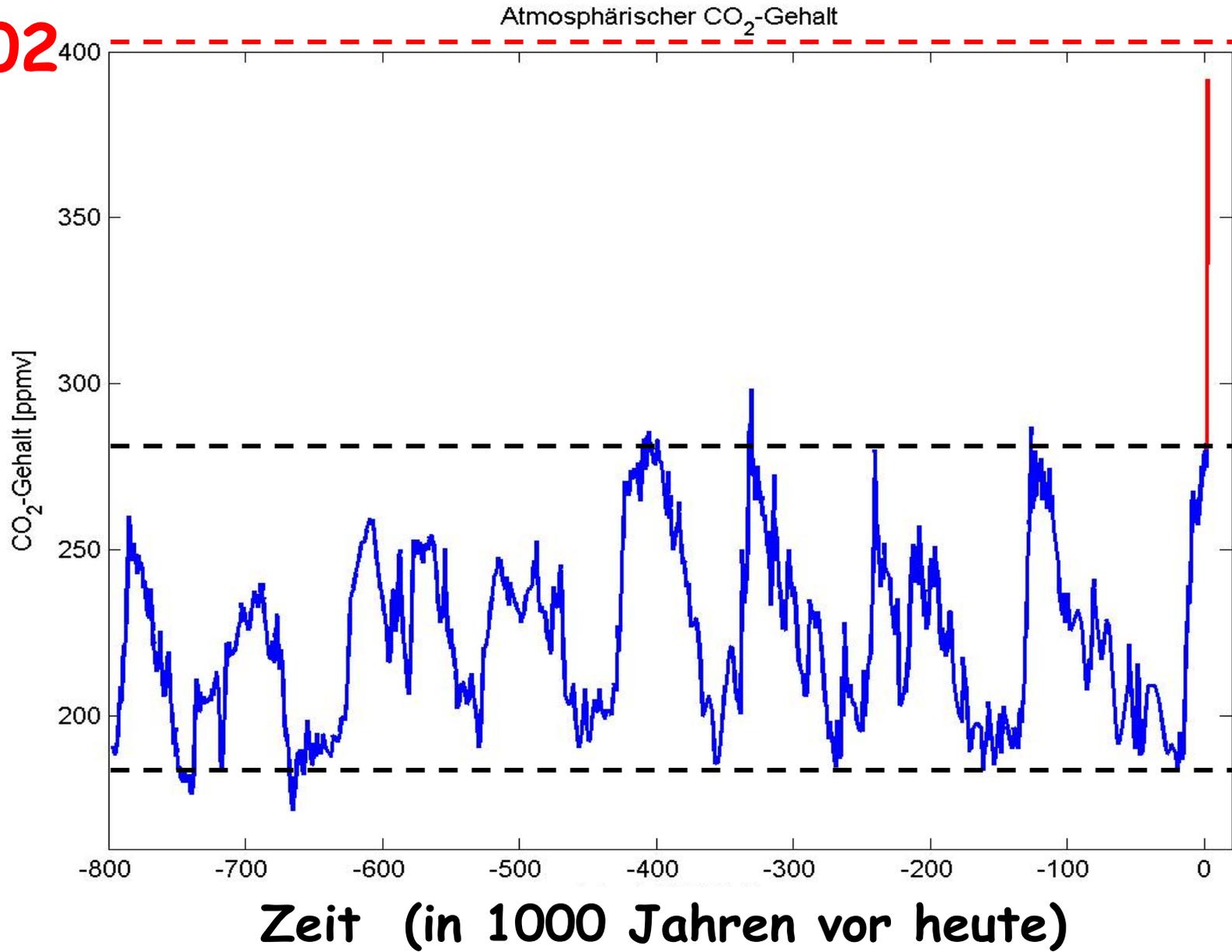
Inhalt

1. Was ist das Problem?
2. Was wird beobachtet?
3. Was bringt die Zukunft?
4. Und was tun wir?

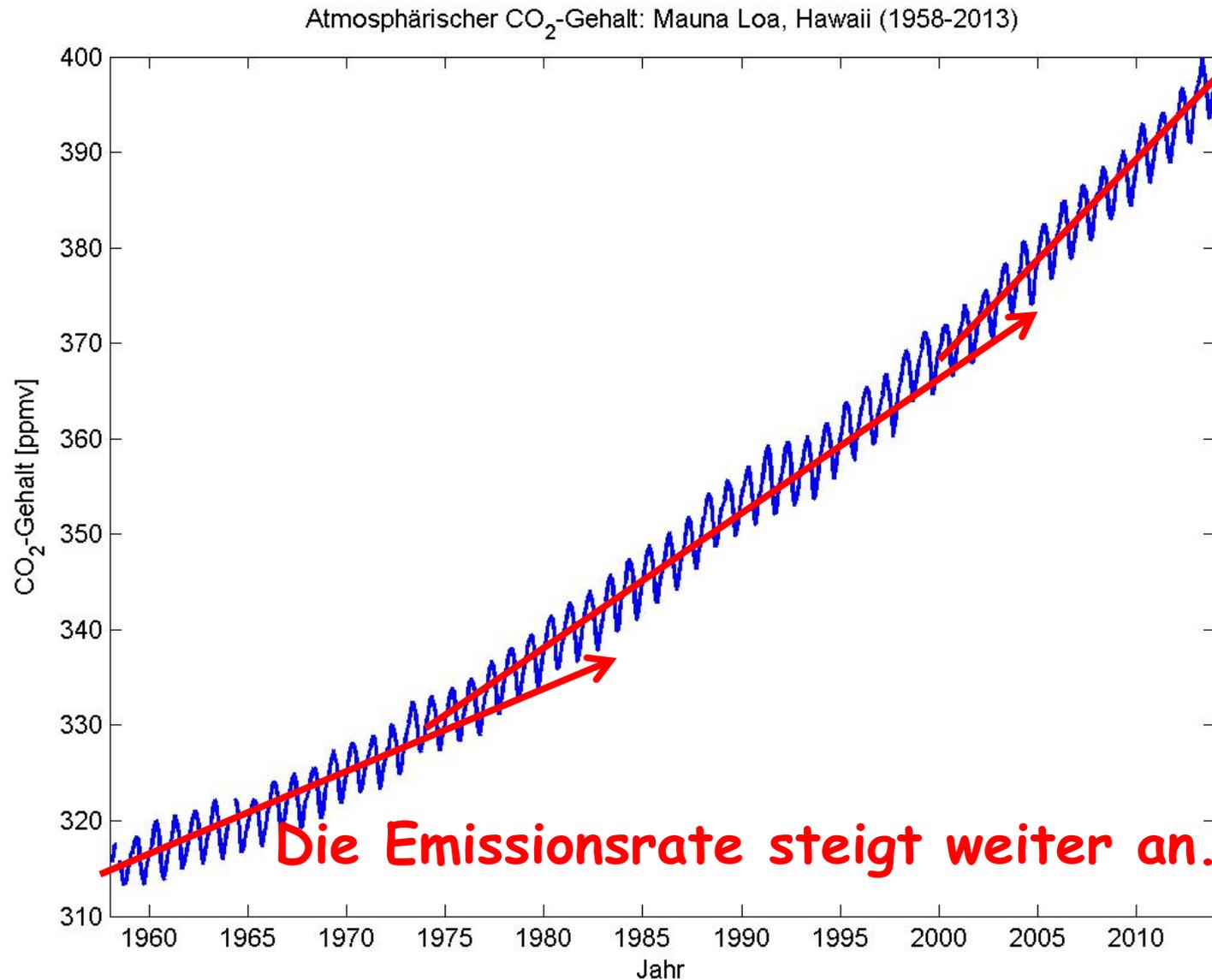


Atmosphärische Gaskonzentrationen aus Eiskernen

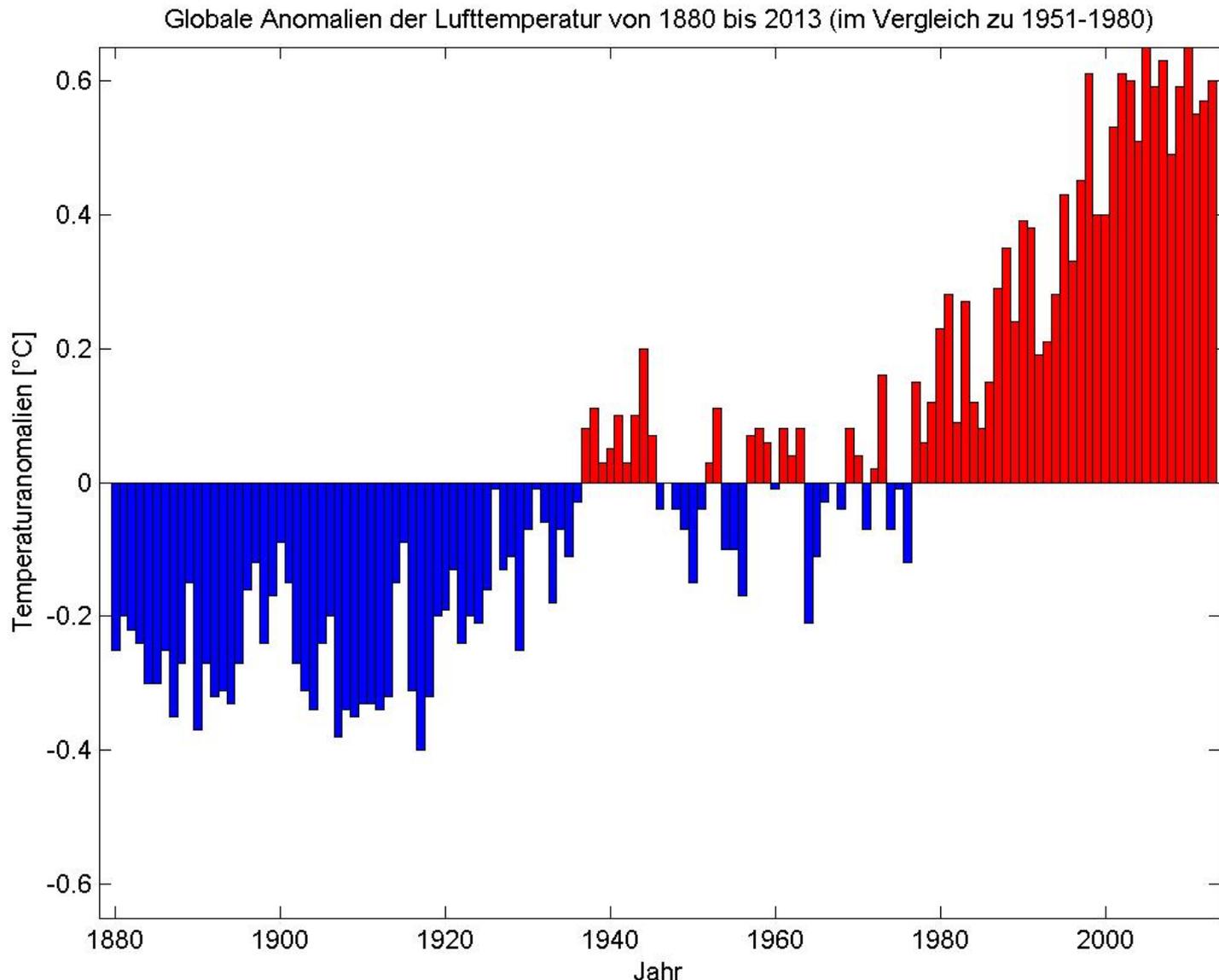
402



Atmosphärischer CO_2 -Gehalt: Mauna Loa (1958-2013)

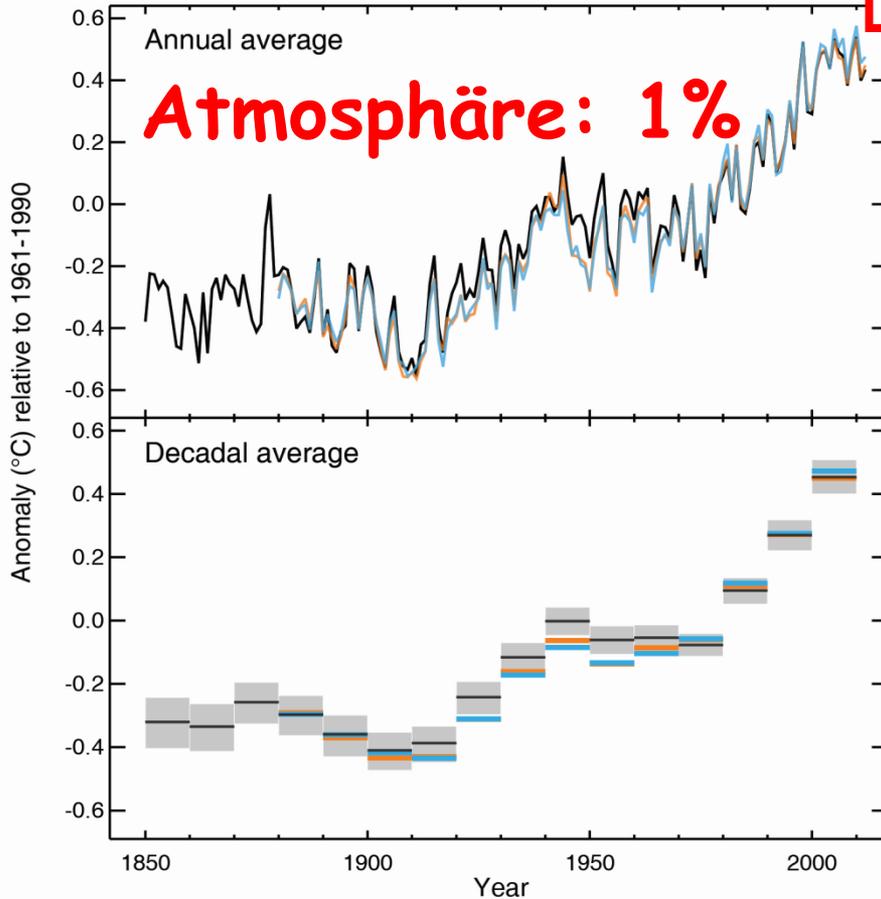


Global gemittelte Temperaturen steigen deutlich an

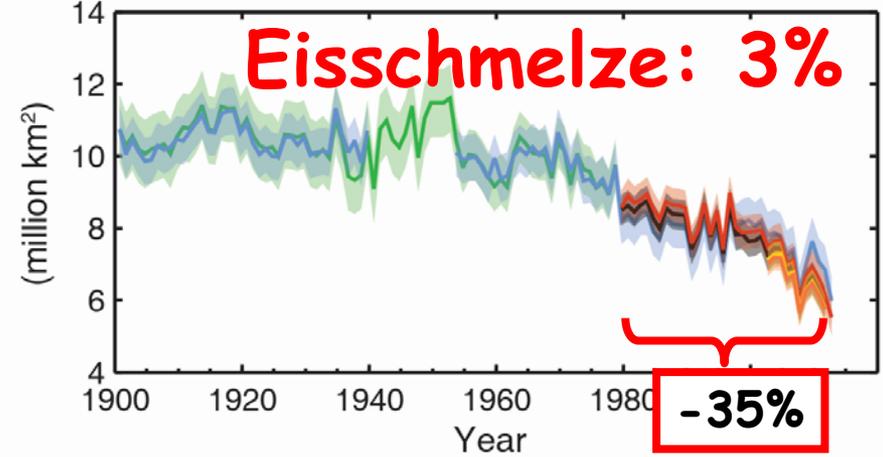


Globale Erwärmung ist eindeutig

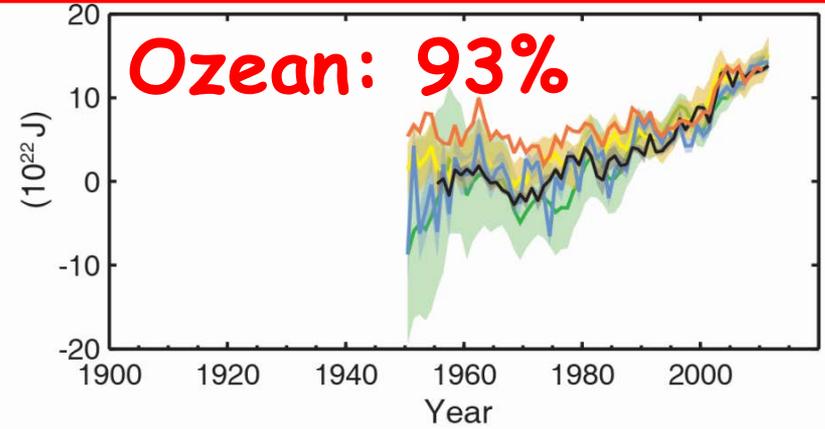
(a) Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly 1850–2012



Arktisches Meereis im Sommer



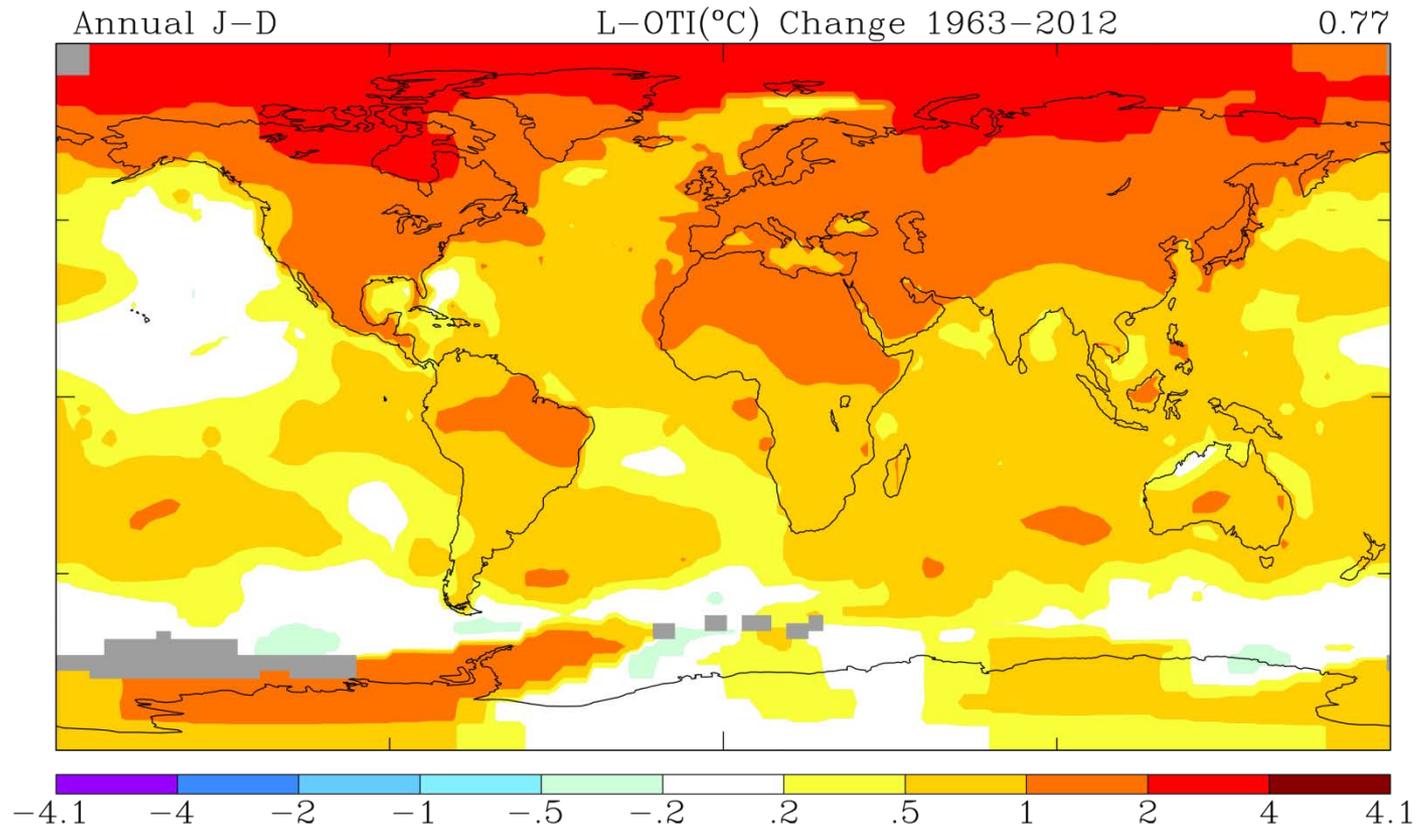
Oberer Ozean: Wärmehinhalt



Lufttemperatur am Boden

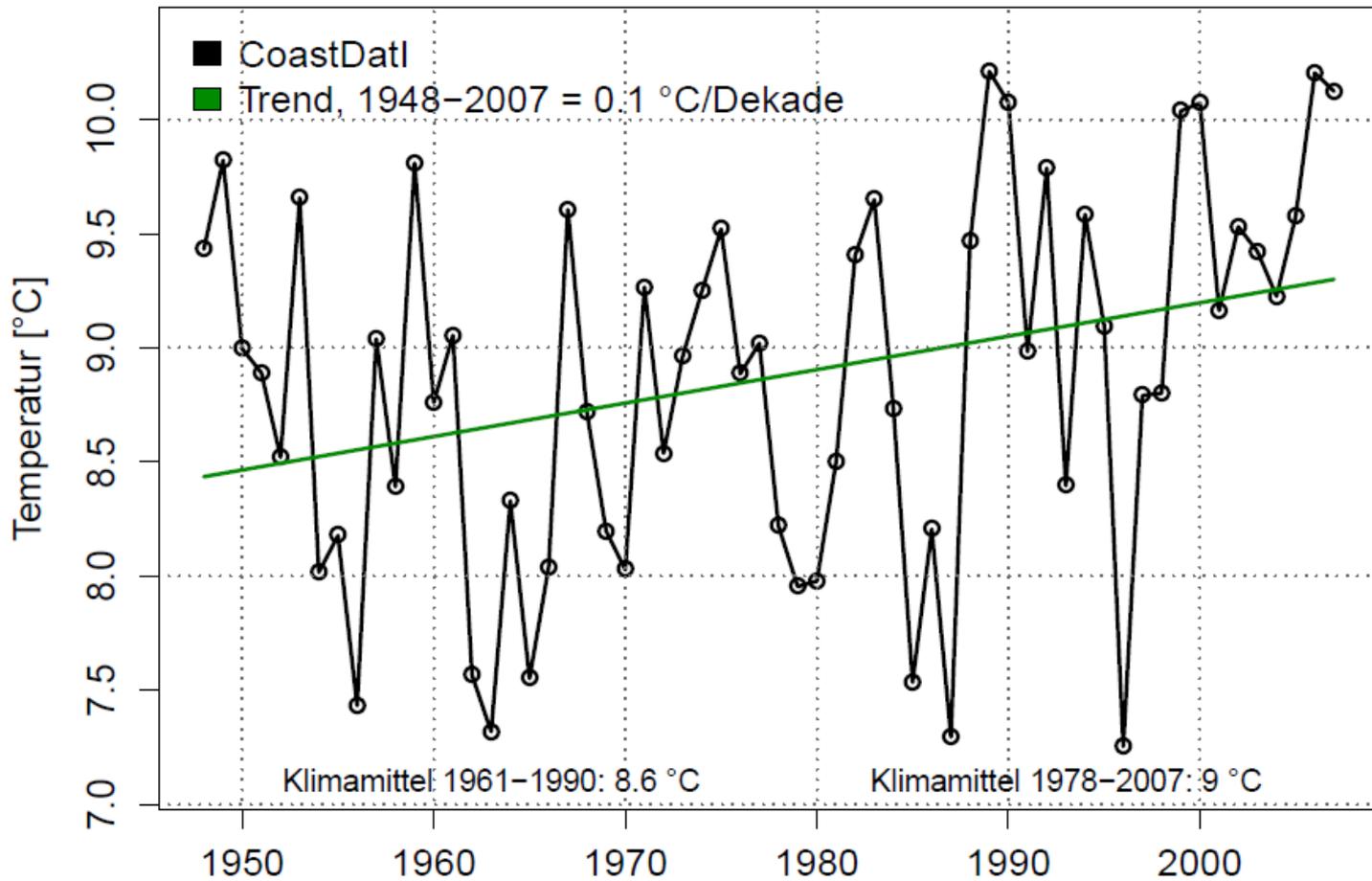
Temperatur-Trend seit 1963

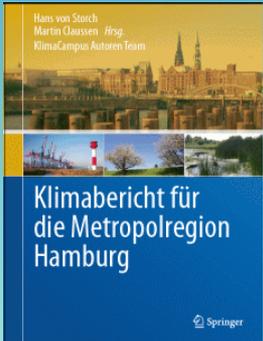
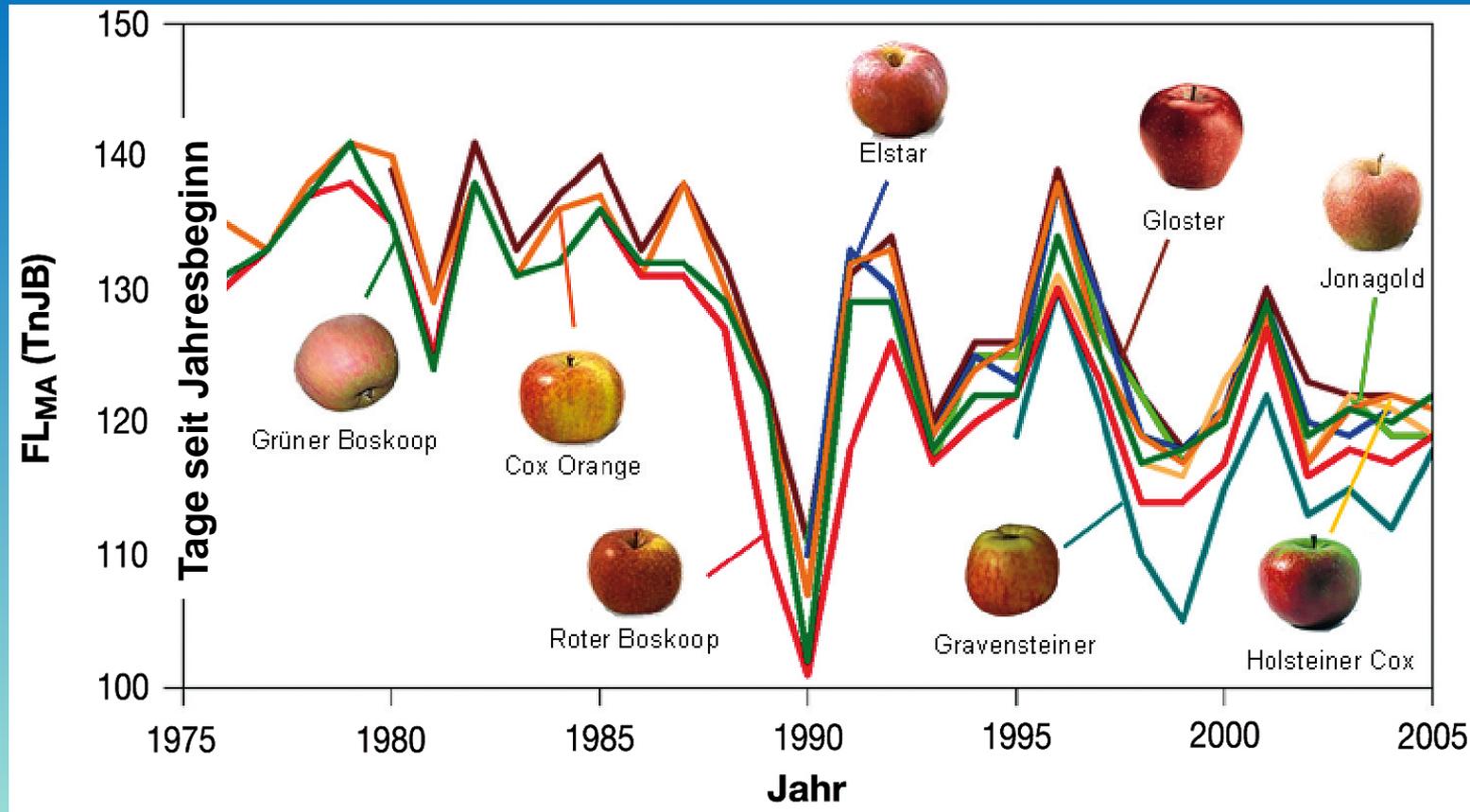
Trends in Annual Surface Air Temperature GISS 1963-2012



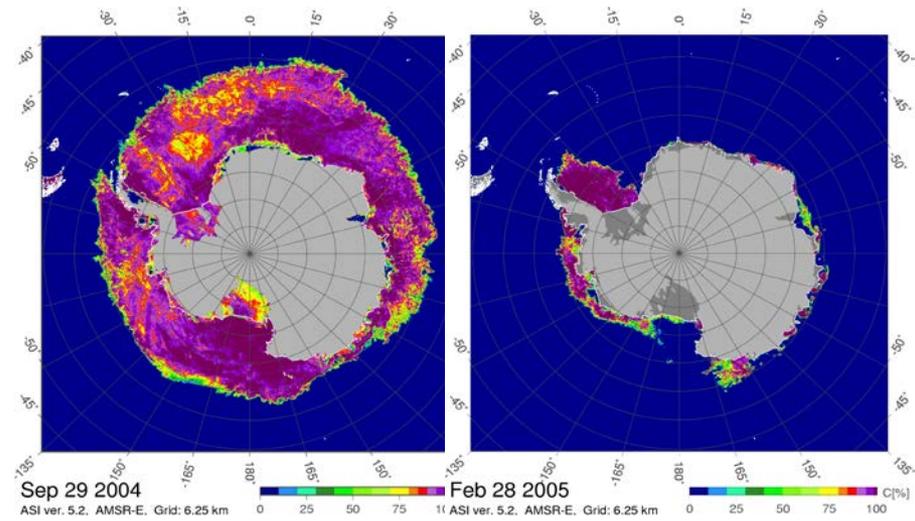
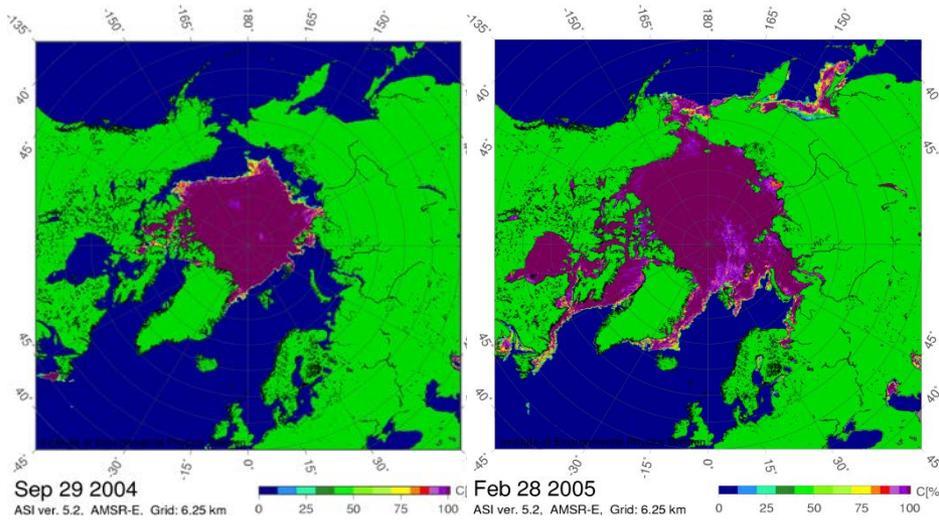
Auch Norddeutschland hat sich erwärmt

Temperatur, Norddeutschland (Jahresmittel)

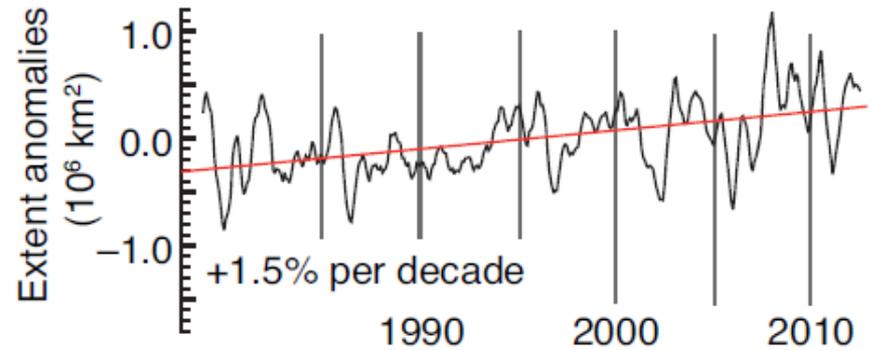
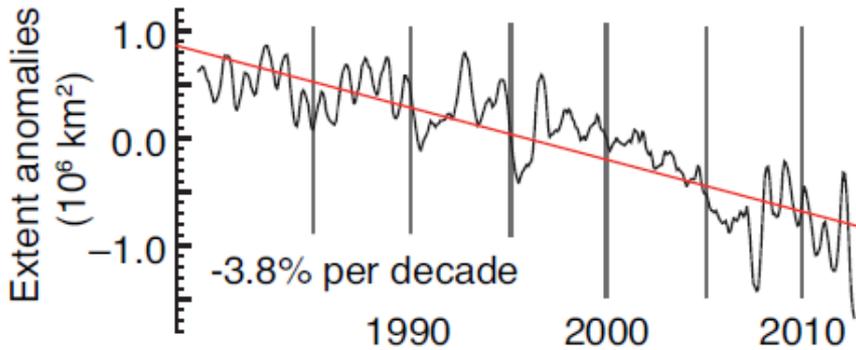




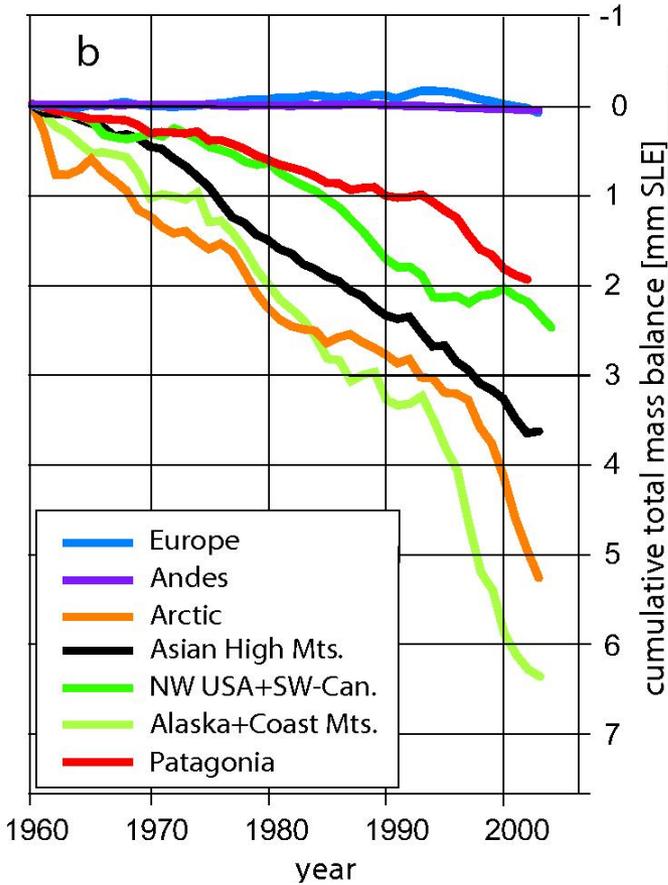
Meereis-Ausdehnung



NH Trend: -3.8% pro Dekade; SH Trend: +1.5% pro Dekade



Beitrag von Gletschern zum Meeresspiegelanstieg seit 1961



1911



2001



Morteratsch Gletscher

Massenverlust von Gletschern und Eiskappen:

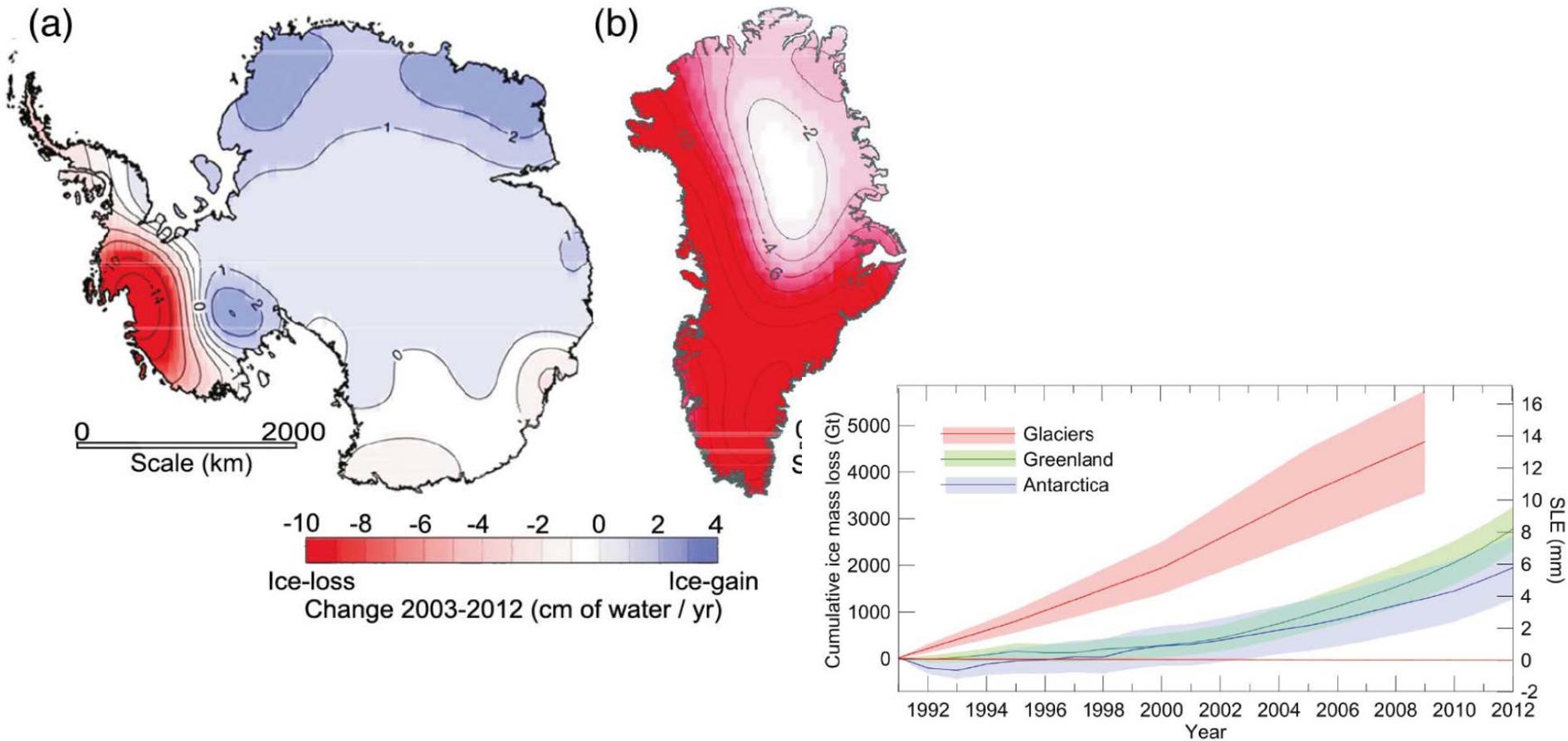
❖ $0.37 \pm 0.16 \text{ mm yr}^{-1}$, 1961-1990

❖ $0.77 \pm 0.22 \text{ mm yr}^{-1}$, 1991-2004

Neu (2013): 0.8 mm yr^{-1}

Verstärkter Gletscherrückgang seit Beginn der 1990er

Massenbilanz der Eisschilde



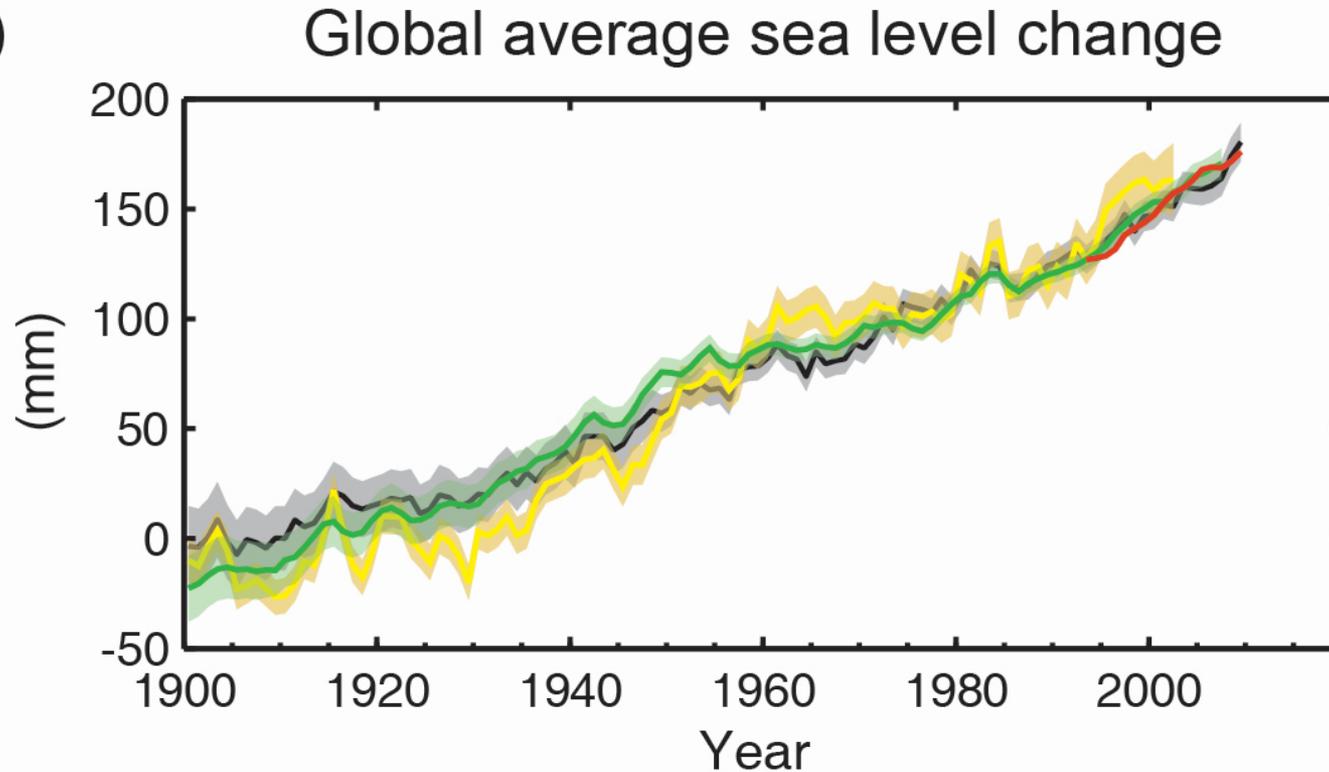
Eismassenverluste 2003-2012

Grönland 0.6 mm/a

Antarktis 0.4 mm/a

Meeresspiegelanstieg

(d)



Zeitraum 1901 - 2010

Meeresspiegelanstieg: 0.19 m

Mittlerer Anstieg: 1.7 mm/year

Gegenwärtiger Anstieg: 3.2 mm/year

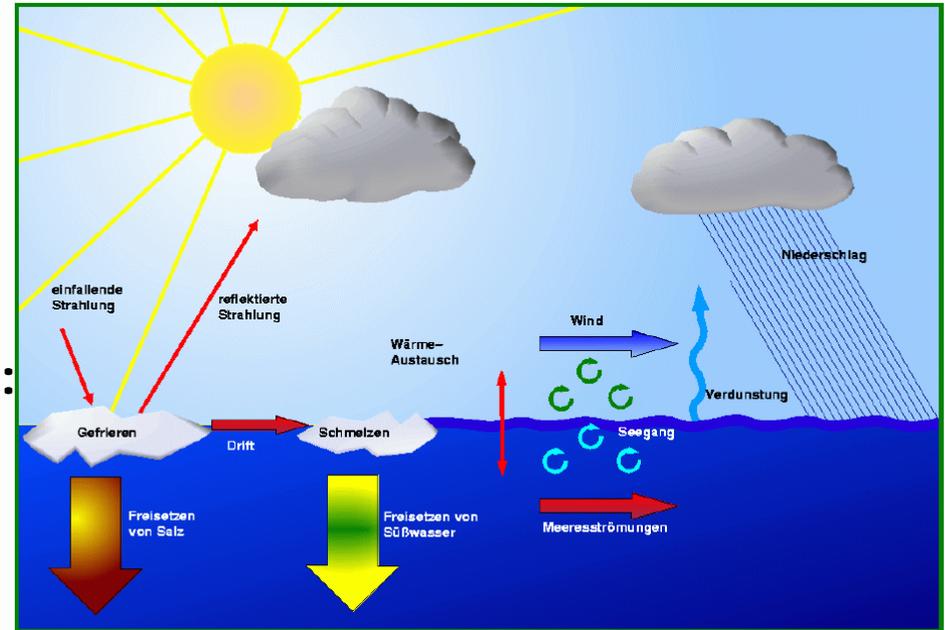
Inhalt

1. Was ist das Problem?
2. Was wird beobachtet?
3. Was bringt die Zukunft?
4. Und was tun wir?

Modelle für Atmosphäre und Ozean

Zustandsvariablen:

Temperatur	T
Salzgehalt, Feuchte	S, q
Druck	p
Strömung, Wind	u, v, w



1. Massenerhaltung (Wasser, Luft):

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{u}$$

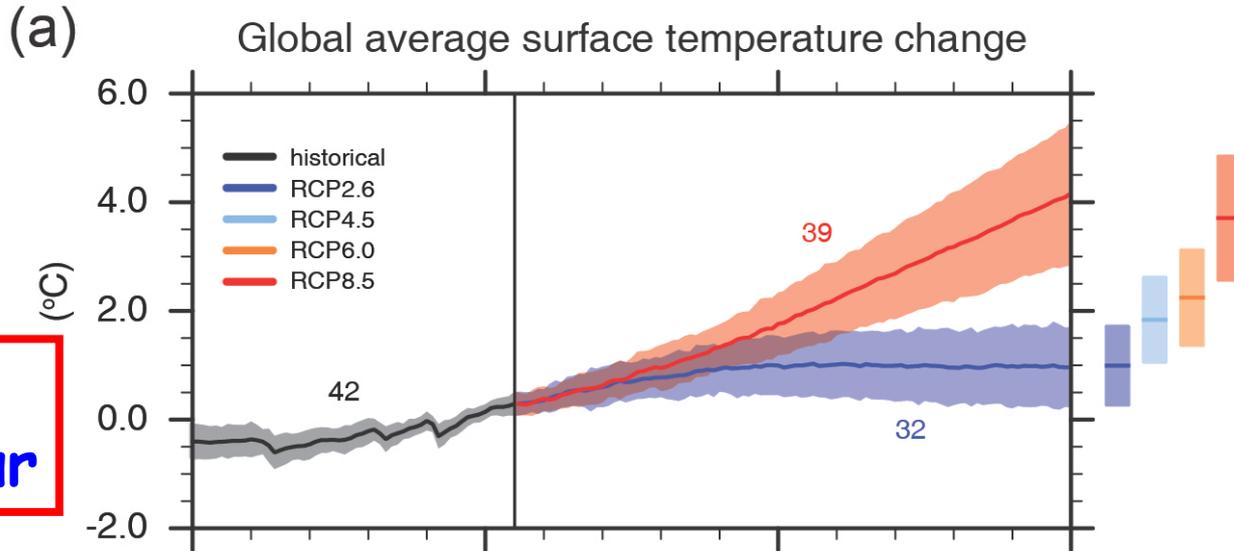
2. Massenerhaltung für Salz/Wasserdampf

3. Energieerhaltung

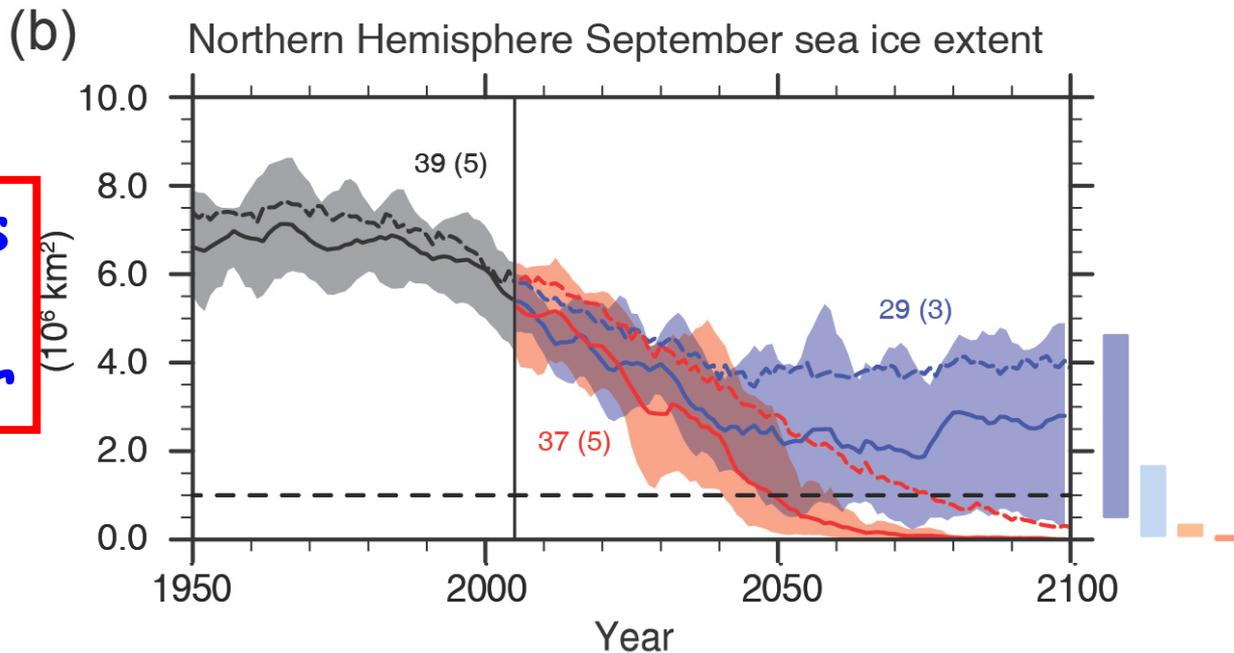
4. Impulserhaltung (3):

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

Klimaprojektionen

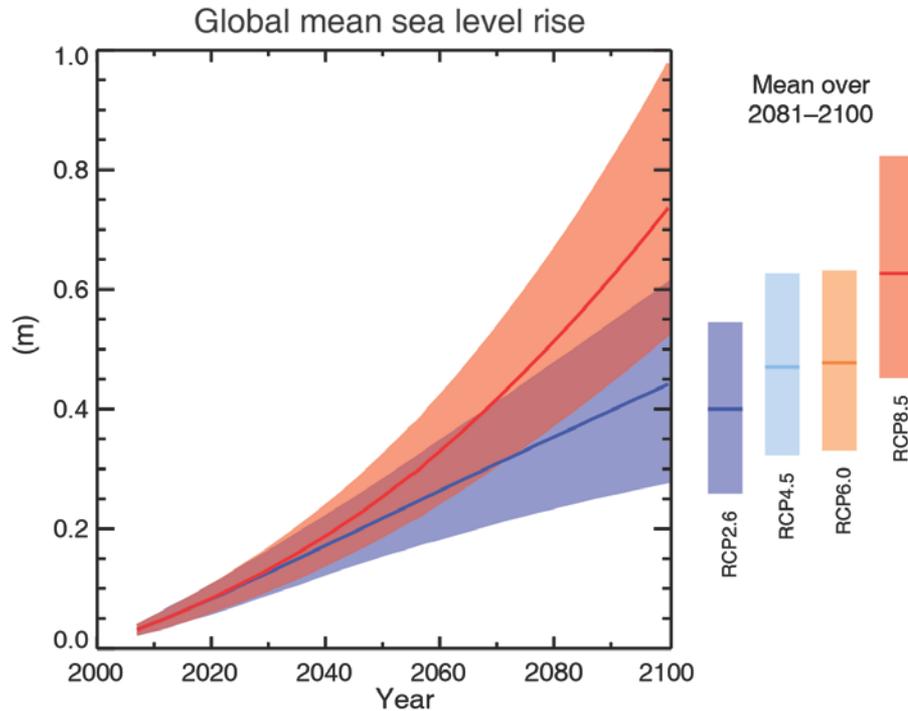


Globale
Temperatur



Arktisches
Meereis
im Sommer

Szenarien für die Entwicklung des Meeresspiegels



IPCC, AR5, 2013

Projektionen (2081-2100) sind höher als in AR4 (0.2-0.6)

RCP 2.6: **0.4m** (0.26-0.55) (rel. zu 1986-2005)

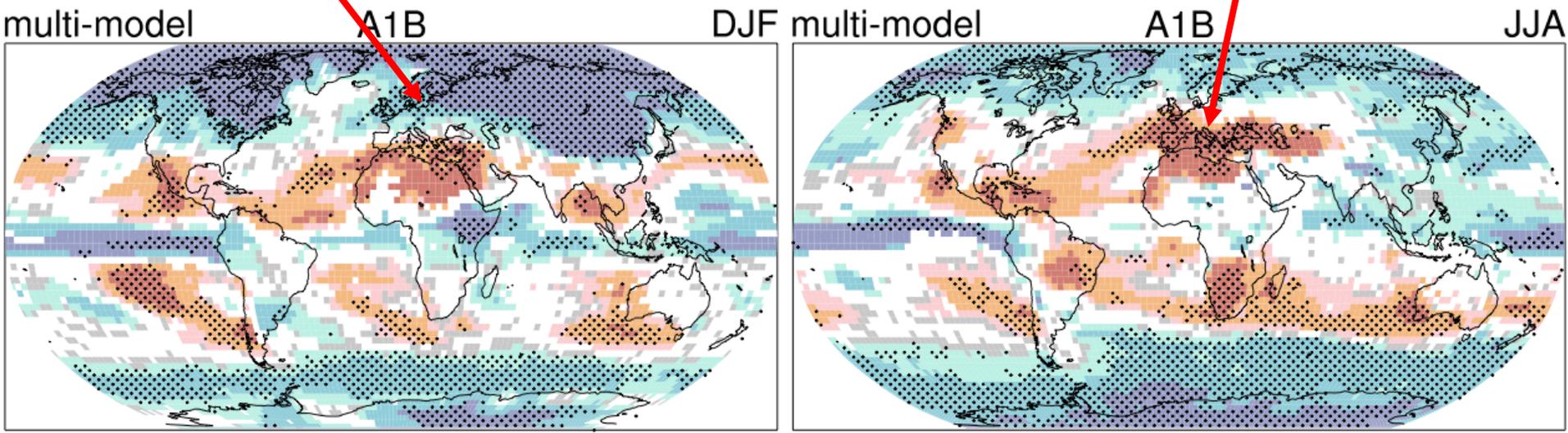
RCP 8.5: **0.6m** (0.45-0.82)

Projizierte Änderung der Niederschlagsverteilung

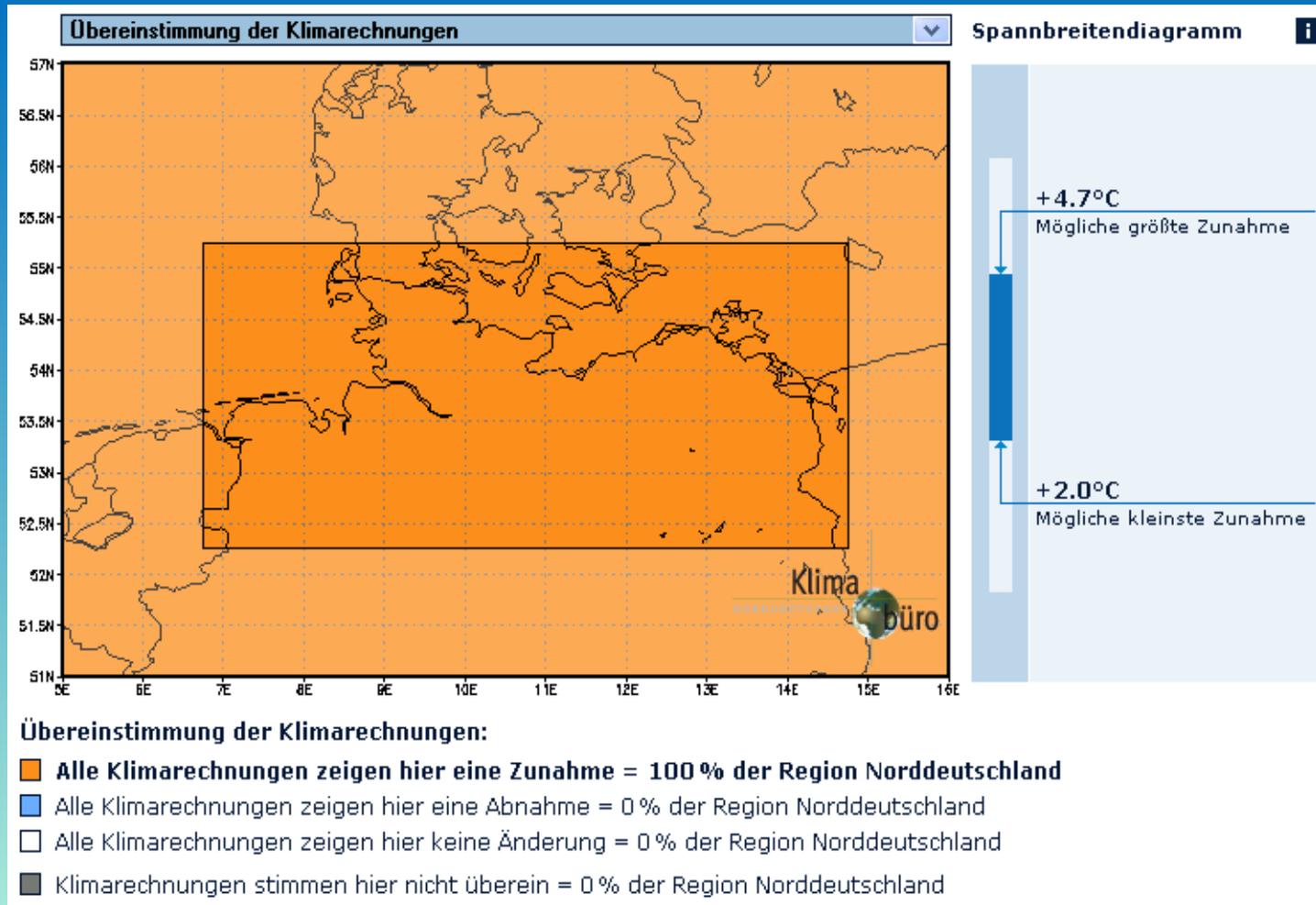
nasser Winter

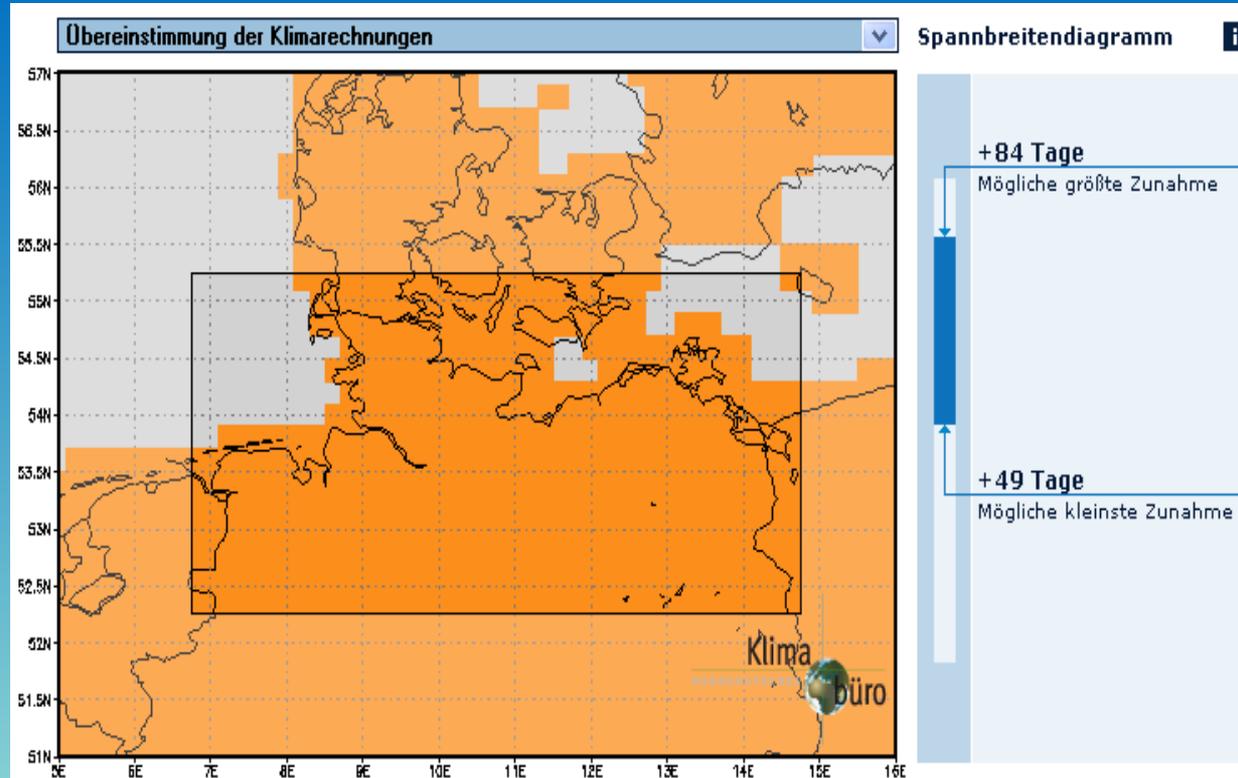
trockener Sommer

Projected Patterns of Precipitation Changes



Bis Ende des
Jahrhunderts
kann es
2,0-4,7°C
wärmer
werden.





Vegetationsperioden
können sich bis
2100 um 7-12
Wochen verlängern

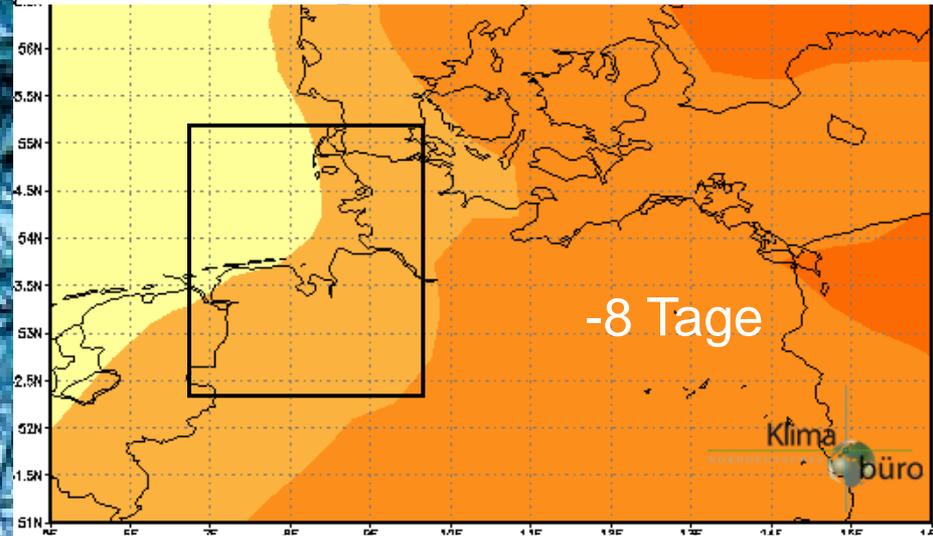
Übereinstimmung der Klimarechnungen:

- Alle Klimarechnungen zeigen hier eine Zunahme = 100 % der Region Norddeutschland
- Alle Klimarechnungen zeigen hier eine Abnahme = 0 % der Region Norddeutschland
- Alle Klimarechnungen zeigen hier keine Änderung = 0 % der Region Norddeutschland
- Klimarechnungen stimmen hier nicht überein = 0 % der Region Norddeutschland

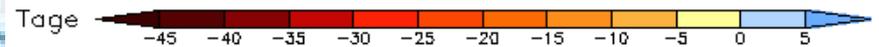
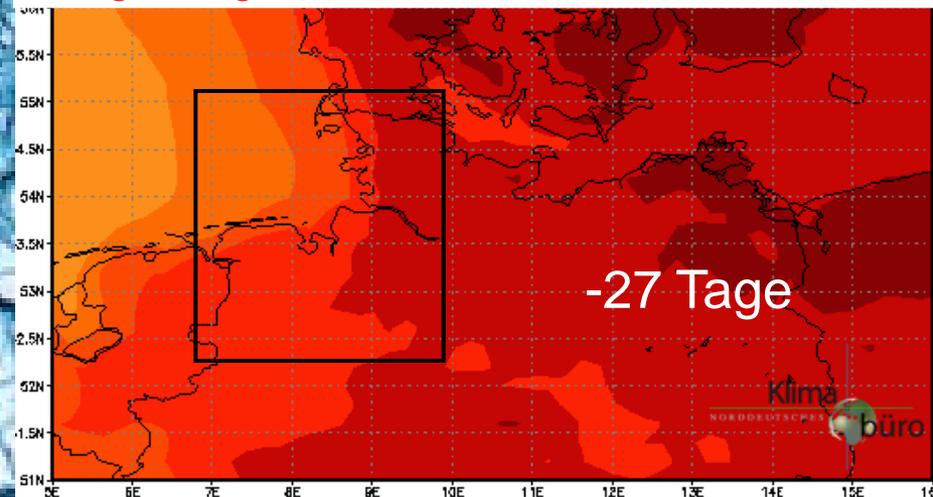


Im Winter kann es
Ende des
Jahrhunderts
8-27 Frosttage
weniger geben

Mögliche kleinste Abnahme



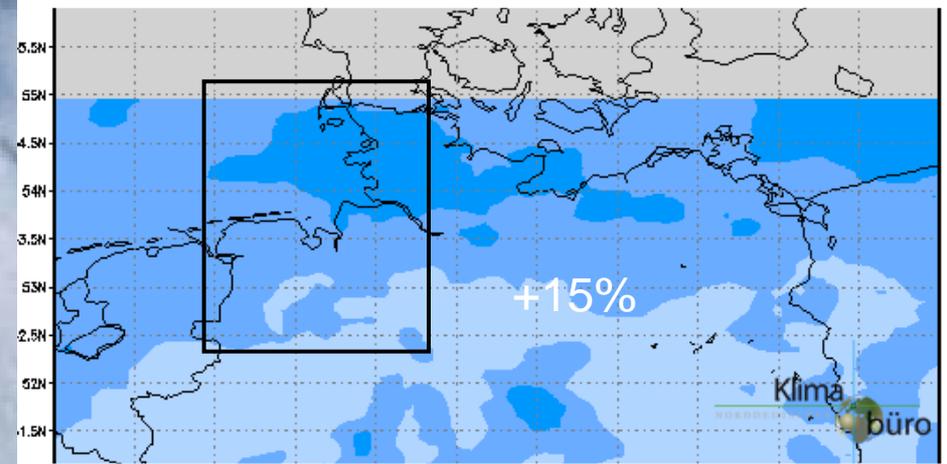
Mögliche größte Abnahme



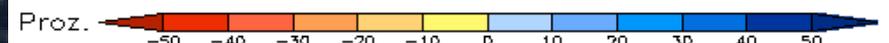
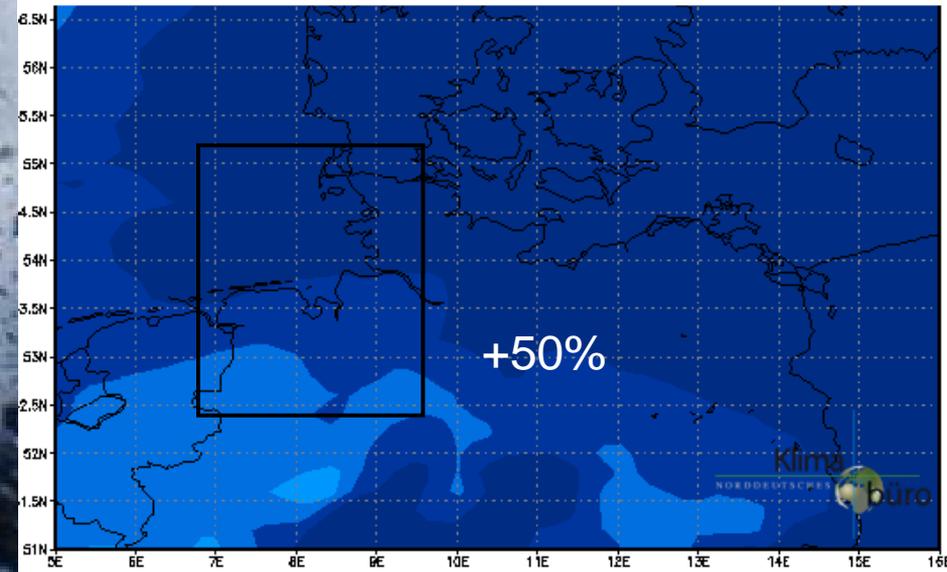


Im Winter kann es
Ende des
Jahrhunderts
15-50% mehr regnen

Mögliche kleinste Zunahme



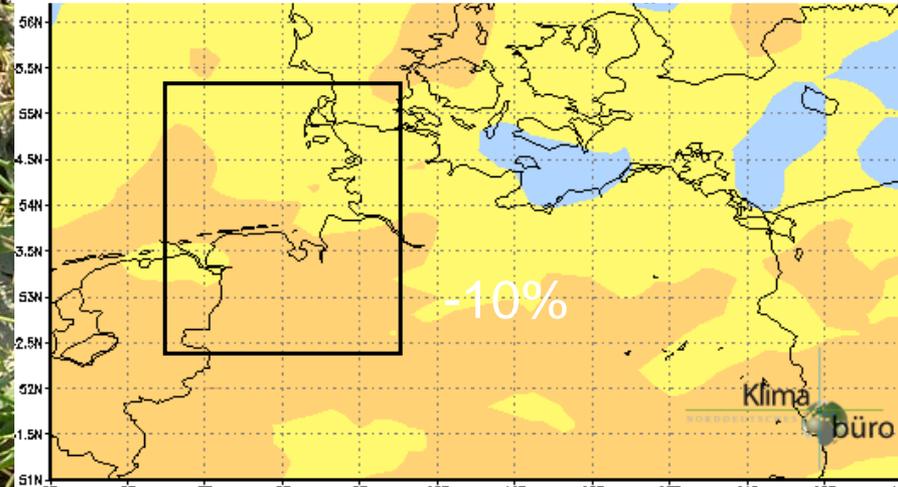
Mögliche größte Zunahme



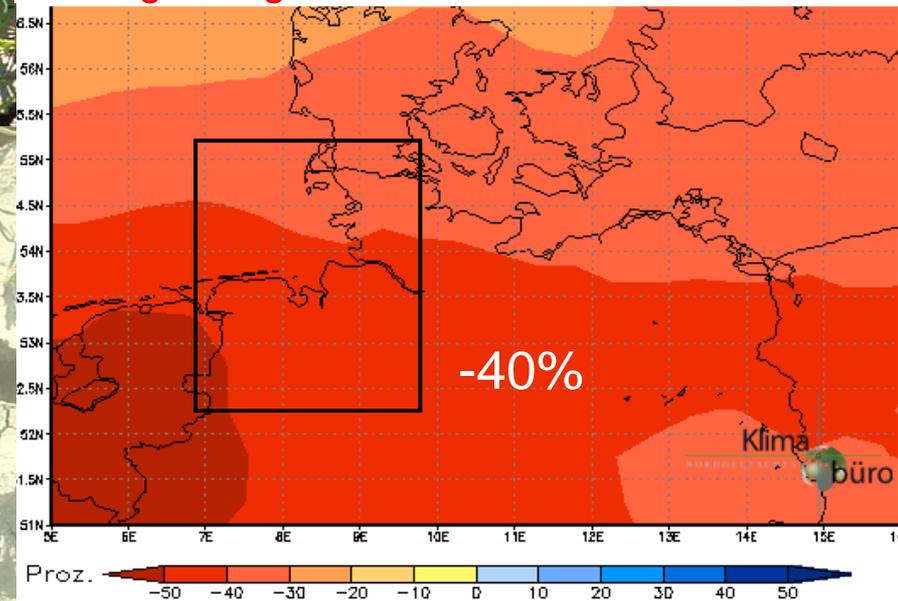


Im Sommer kann es
Ende des Jahrhunderts
10 - 40% weniger
regnen.

Mögliche kleinste Abnahme



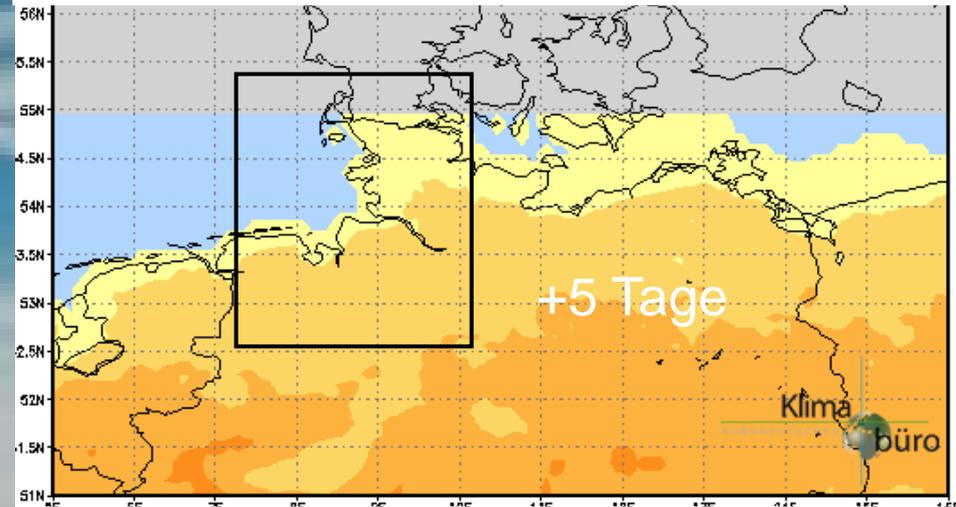
Mögliche größte Abnahme



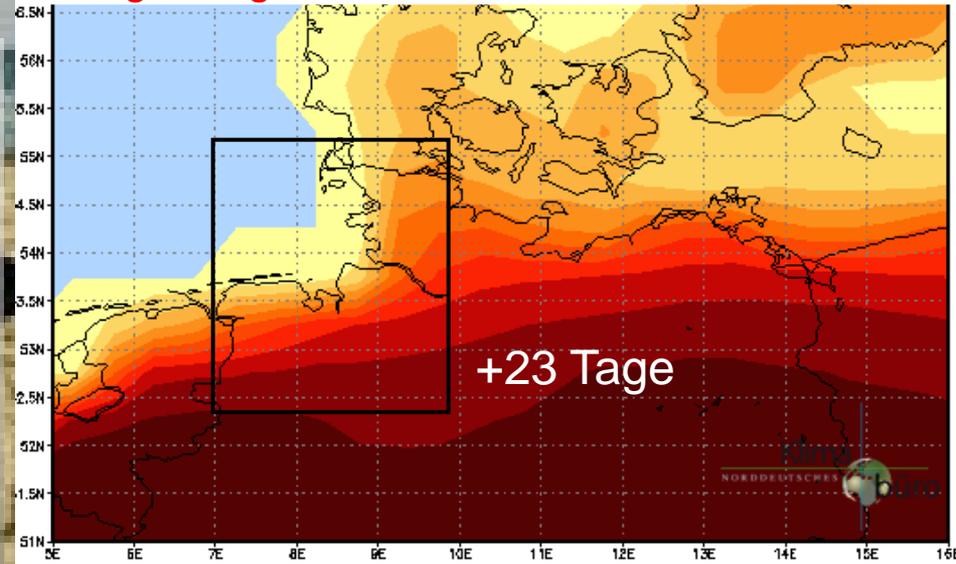


Im Sommer kann es
bis zum Ende des
Jahrhunderts
5-23 Sommertage
($T > 25^{\circ}\text{C}$) mehr geben

Mögliche kleinste Zunahme



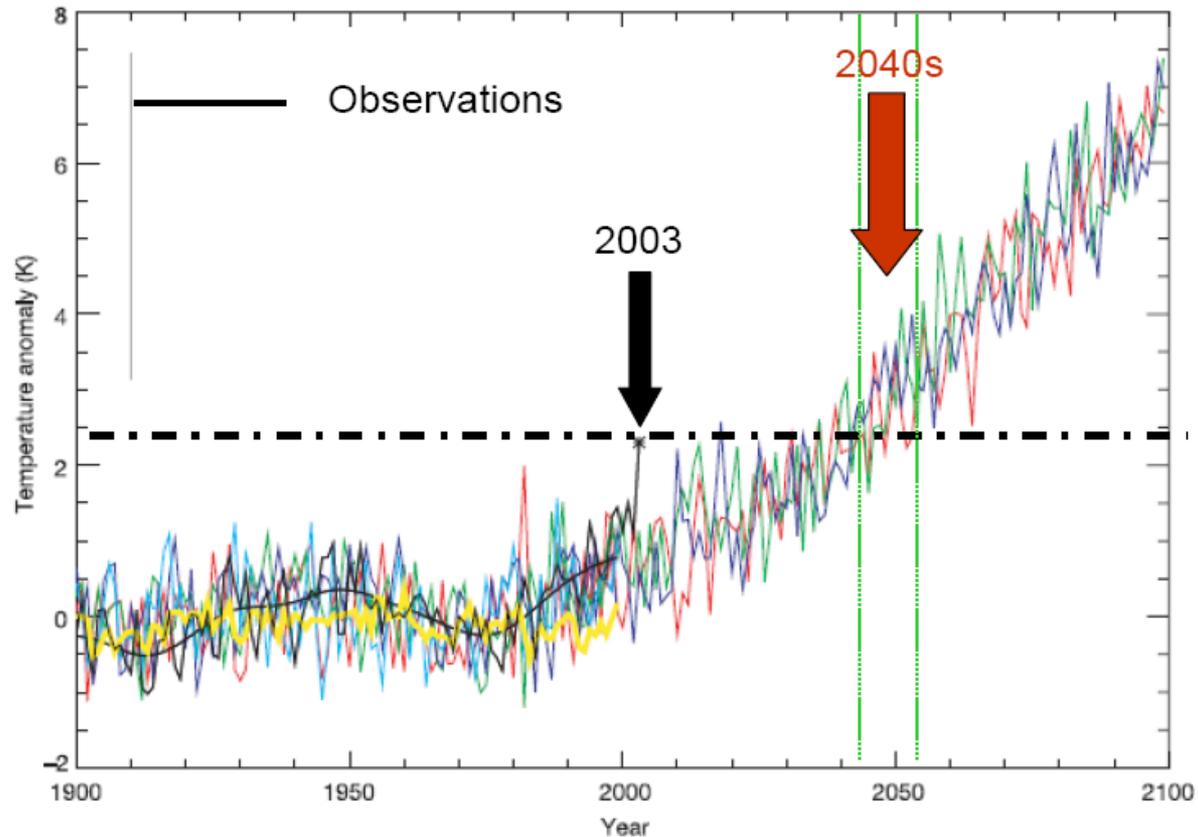
Mögliche größte Zunahme



Heißer Sommer 2003 - normal in 2050, kühl in 2070?

Extremely Hot Summer 2003 in Europe:
Normal in 2050, cool in 2070?

letters to nature



Source:
Stott et al.,
2004

Figure 1 June–August temperature anomalies (relative to 1961–90 mean, in K) over the region shown in inset. Shown are observed temperatures (black line, with low-pass-filtered temperatures as heavy black line), modelled temperatures from four HadCM3 simulations including both anthropogenic and natural forcings to 2000 (red, green, blue and turquoise lines), and estimated HadCM3 response to purely natural forcings

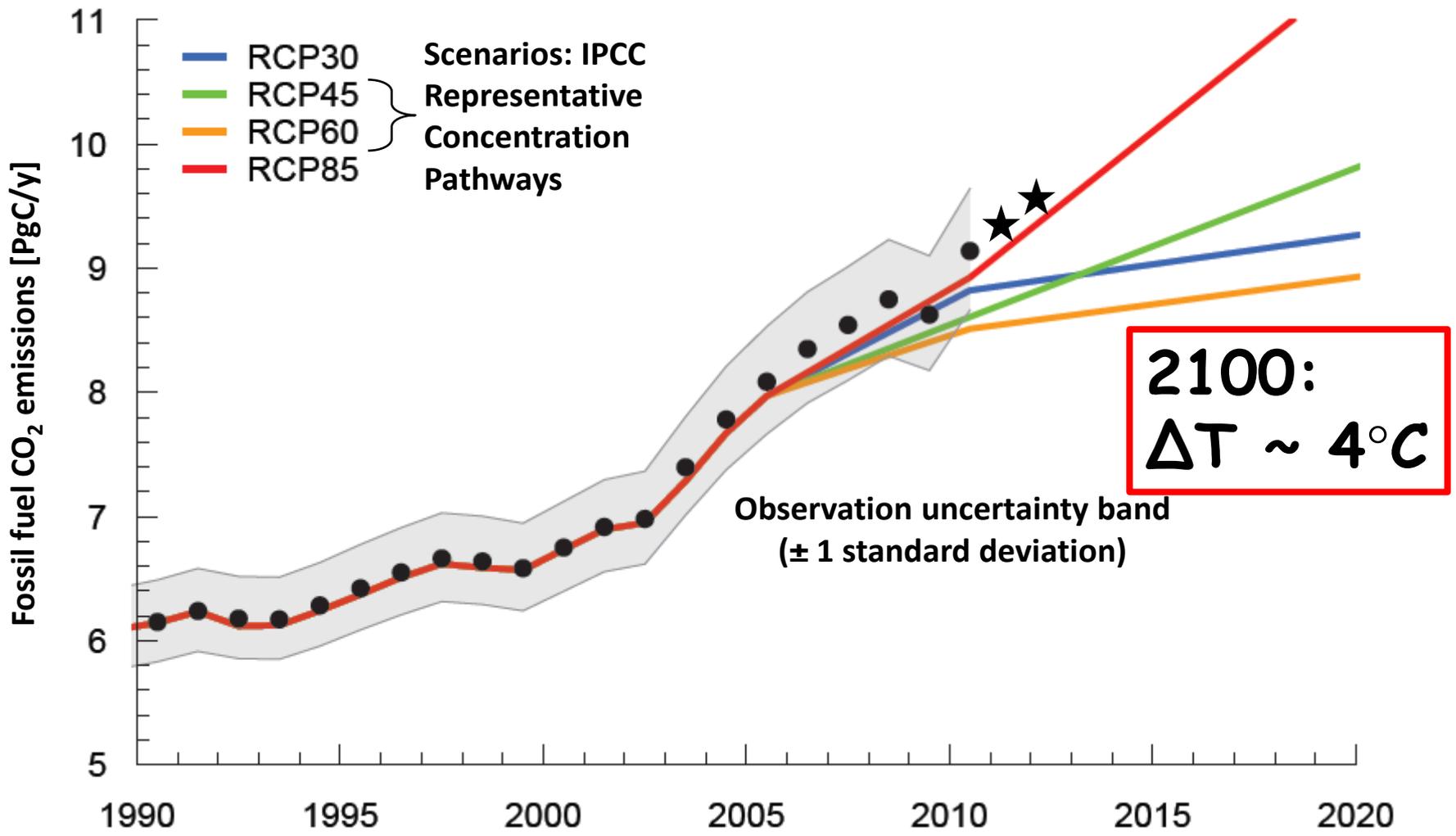
(yellow line). The observed 2003 temperature is shown as a star. Also shown (red, green and blue lines) are three simulations (initialized in 1989) including changes in greenhouse gas and sulphur emissions according to the SRES A2 scenario to 2100²². The inset shows observed summer 2003 temperature anomalies, in K.

Inhalt

1. Was ist das Problem?
2. Was wird beobachtet?
3. Was bringt die Zukunft?
4. Und was tun wir?

CO₂ Emissionen (Milliarden Tonnen Kohlenstoff/Jahr)

... liegen in der Nähe des schlimmsten Szenarios des IPCC



Data: CDIAC (preliminary for 2009, 2010)
Figure: Raupach et al (in prep, Dec 2011)

Citation for data: Peters, G.P., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J.C. and Michael R. Raupach (2011). Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008-2009 Global Financial Crisis. Nature Climate Change 1 (doi:10.1038/nclimate1332)

Unsere Herausforderung:



Wissenschaft:
Problem erkannt,
Lösungswege
ermittelt.

Problemlösung:
erfordert politische,
sozio-ökonomische,
und persönliche
Umsetzung.

**die nachhaltige Nutzung eines
sich stetig wandelnden Planeten**

Herausforderungen

Anpassung:

- ❖ Meeresspiegelanstieg - Deiche erhöhen
- ❖ Schutz gegen Überschwemmungen
- ❖ Katastrophenschutz (Extremwetter)
- ❖ Hitzewellen

Vermeidung

- ❖ Energieeinsparungen
- ❖ CO₂-Vermeidung (CCS)
- ❖ Alternative Energietechnologien

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Wir sollten nicht vergessen...

... dass die Zukunft zur Gegenwart wird und die Gegenwart zur Vergangenheit und dass sich die Vergangenheit in ewige Reue verwandelt, wenn man nicht früh genug plant.
Tennessee Williams (Amanda zu Tom in: Die Glasmenagerie):