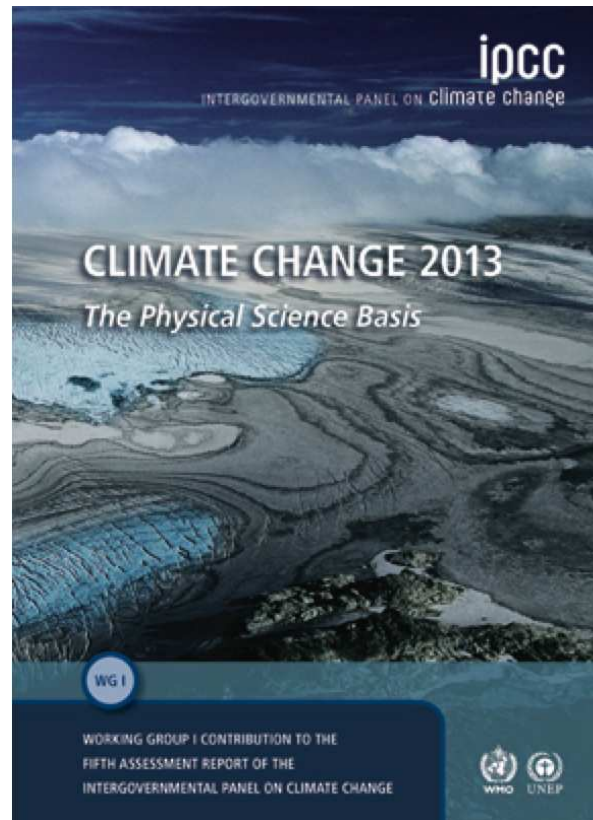
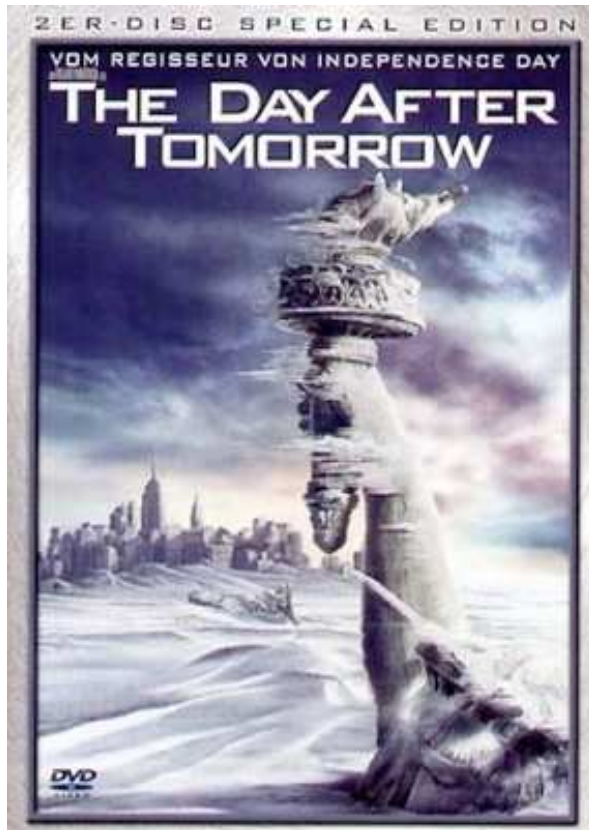


# Wie kontrolliert das atmosphärische Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) unser Klima?



Martin Heimann

Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Germany

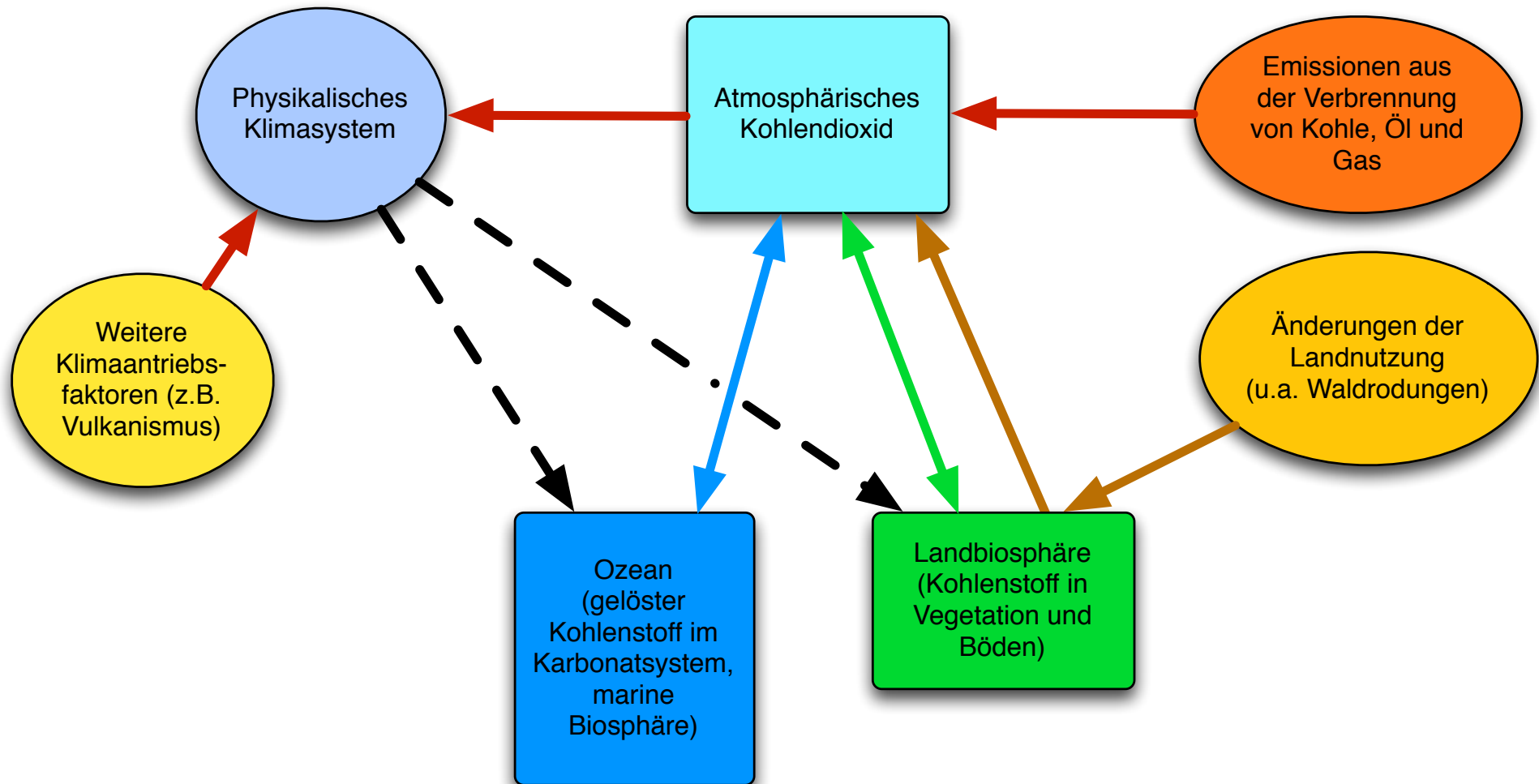
[martin.heimann@bgc-jena.mpg.de](mailto:martin.heimann@bgc-jena.mpg.de)

# Kohlenstoffkreislauf im globalen Klimasystem

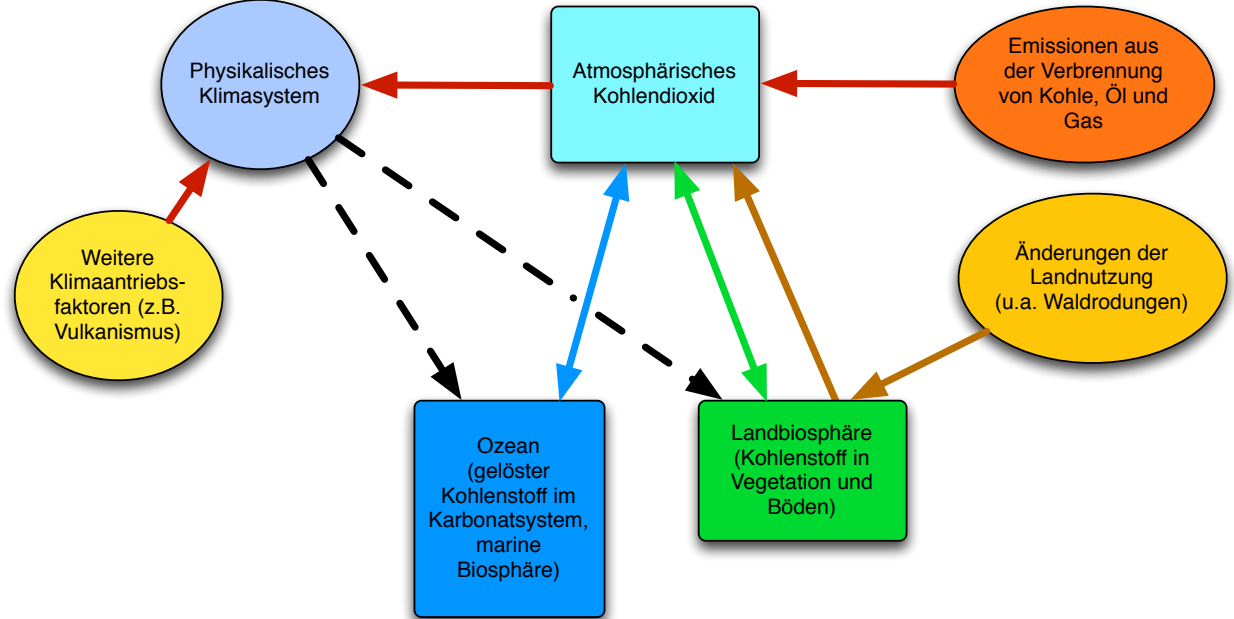
Klimasystem

Kohlenstoffkreislauf

Anthroposphäre



# Inhalt

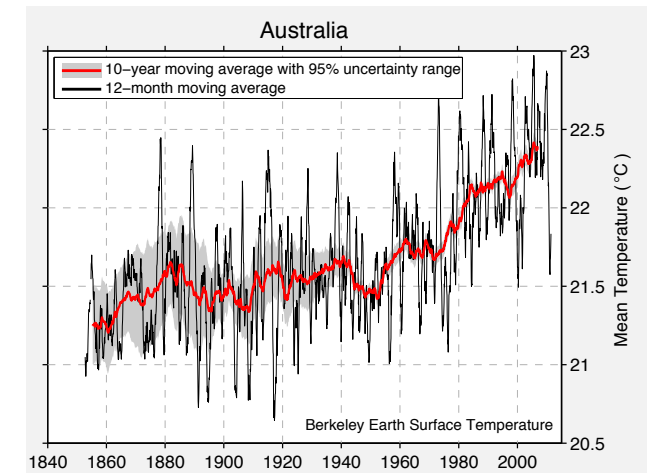
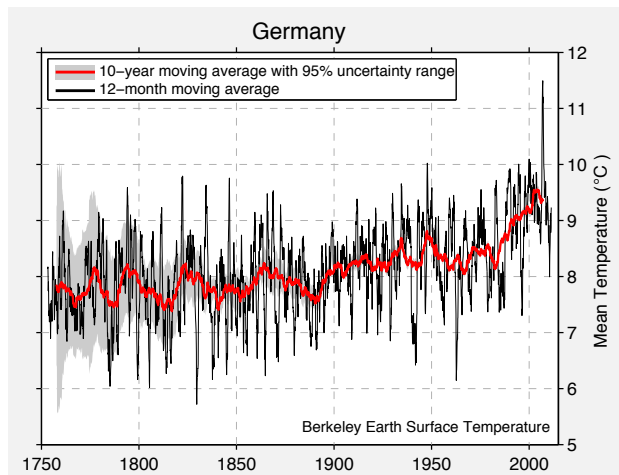
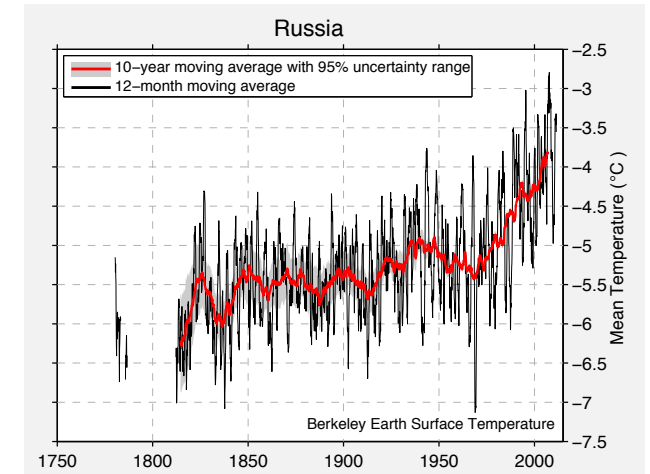
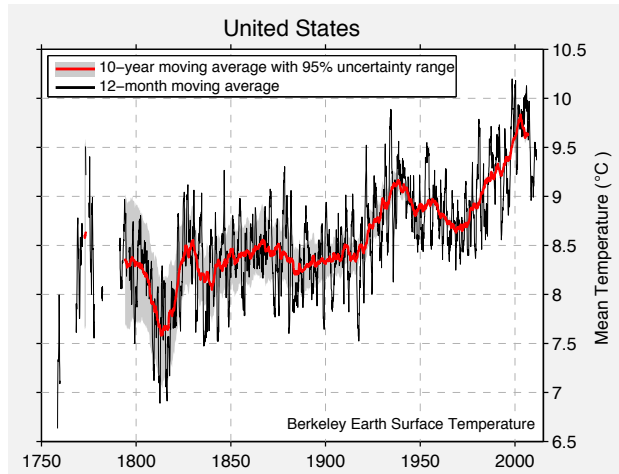


1. Die Erde erwärmt sich
2. Massive Zunahme der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase
3. Ein wesentlicher Anteil der Erwärmung lässt sich auf anthropogene Faktoren zurückführen
4. Projektionen des zukünftigen Klimawandels
5. Kohlenstoffkreislauf - Prozesse und Unsicherheiten

# Fakt I: Die Erde erwärmt sich seit Beginn der Industrialisierung

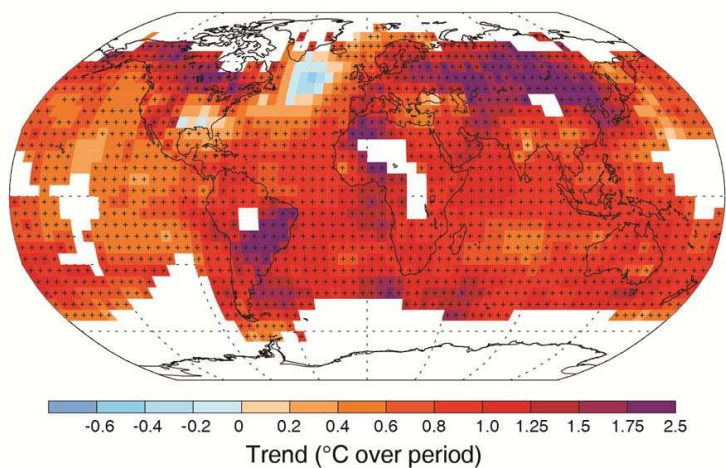
# Analysen der Aufzeichnungen von Wetterstationen.

## Lufttemperaturen steigen weltweit



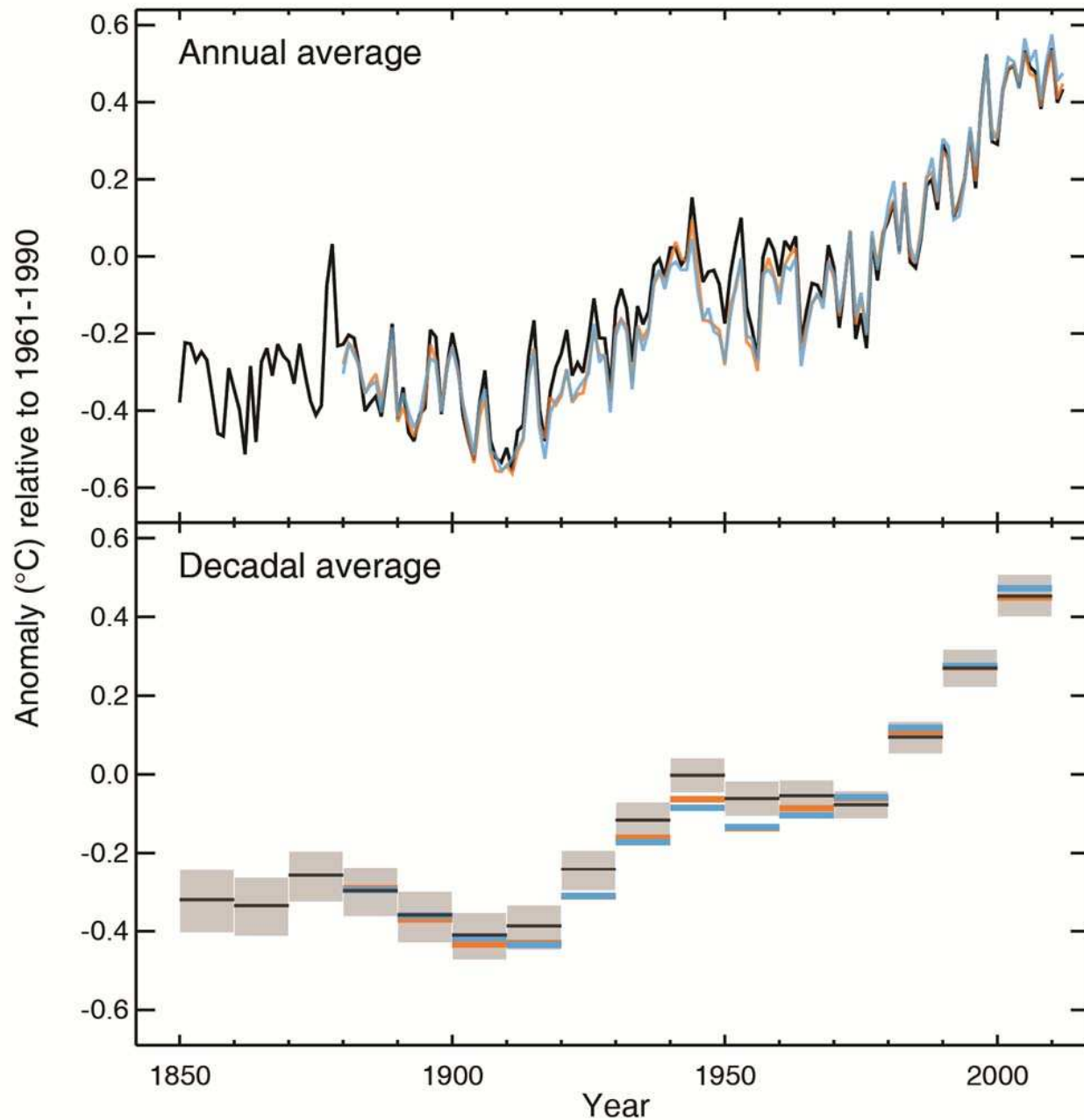
# Synthese

Observed change in average surface temperature 1901–2012



(a)

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

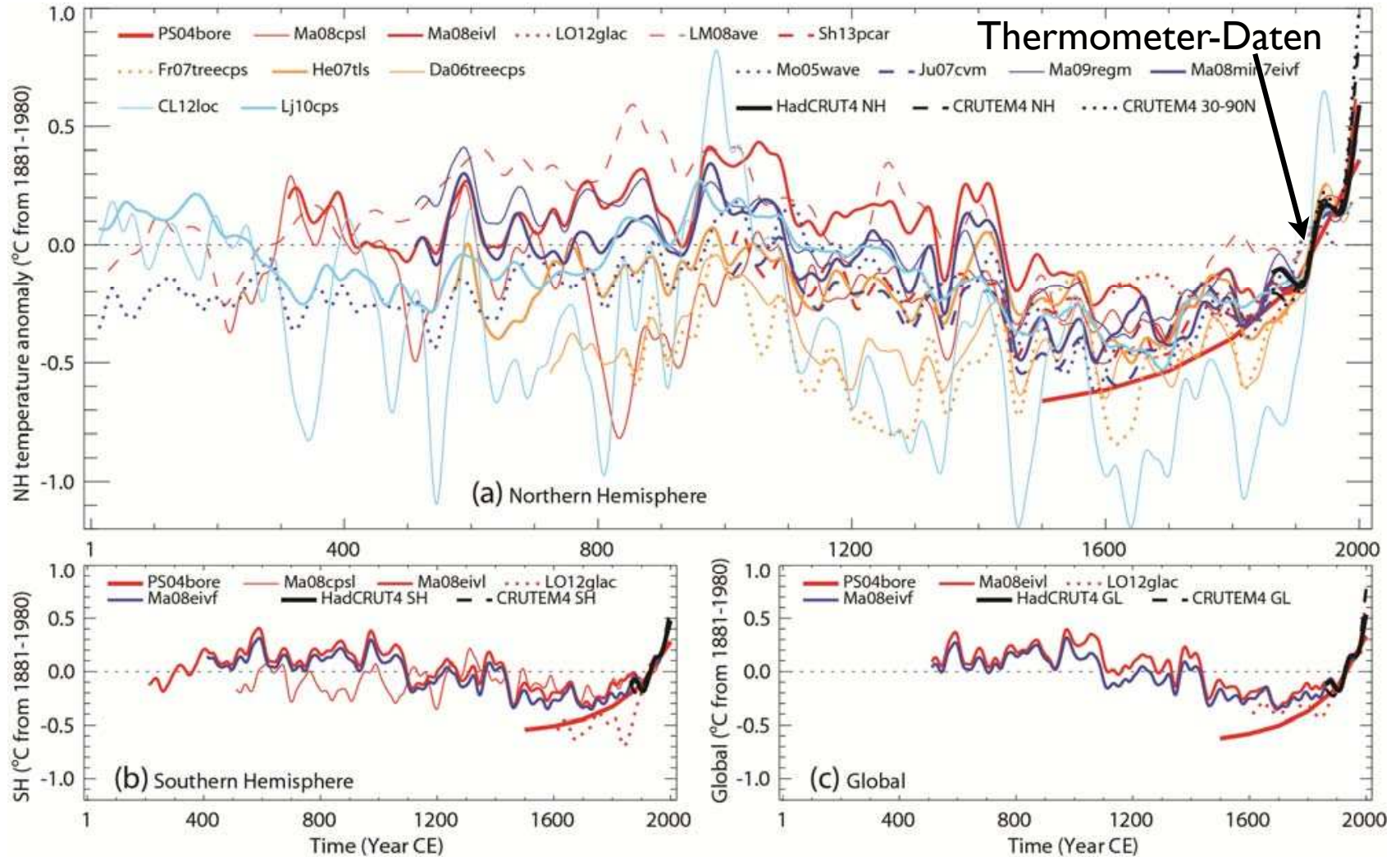


# Klimaänderungen während der letzten 2000 Jahre basierend auf Proxy-Daten

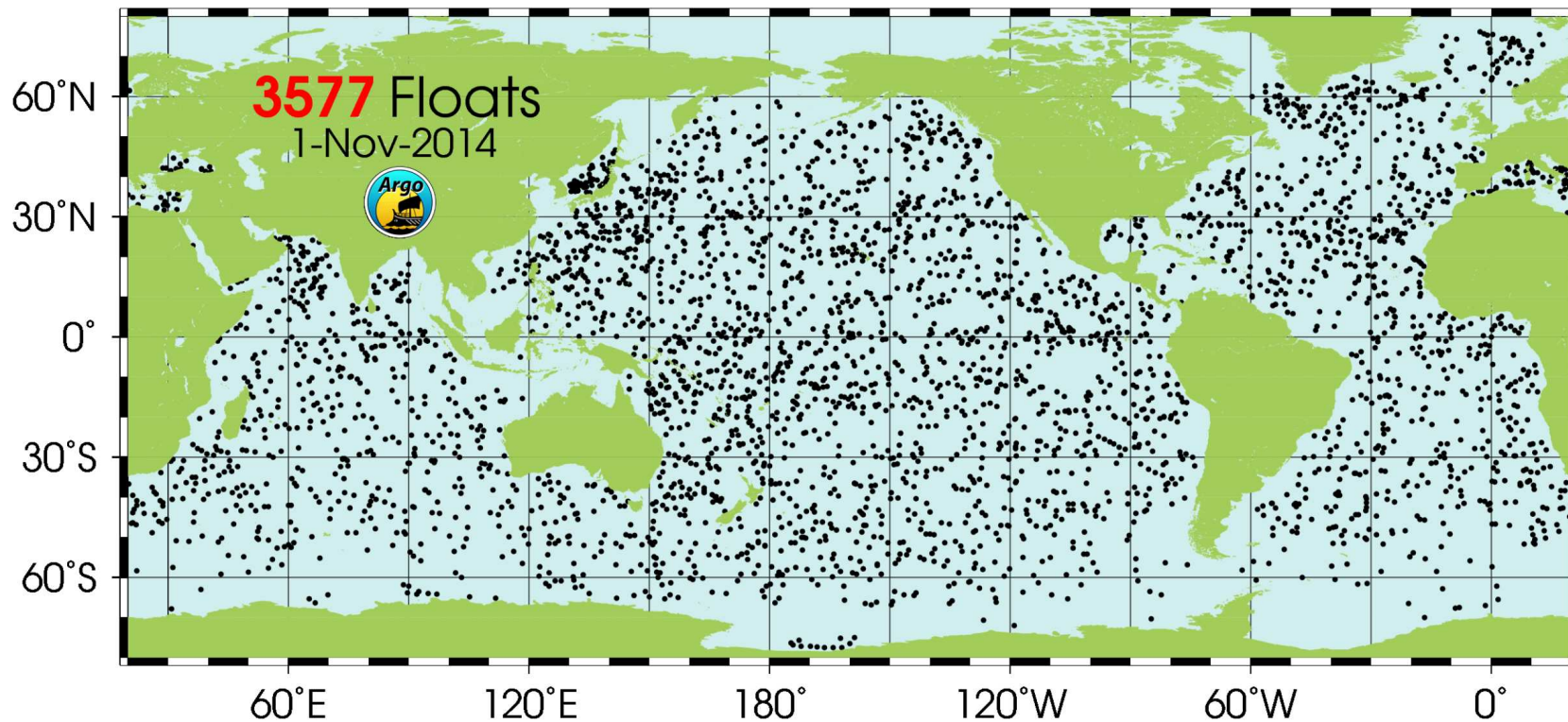
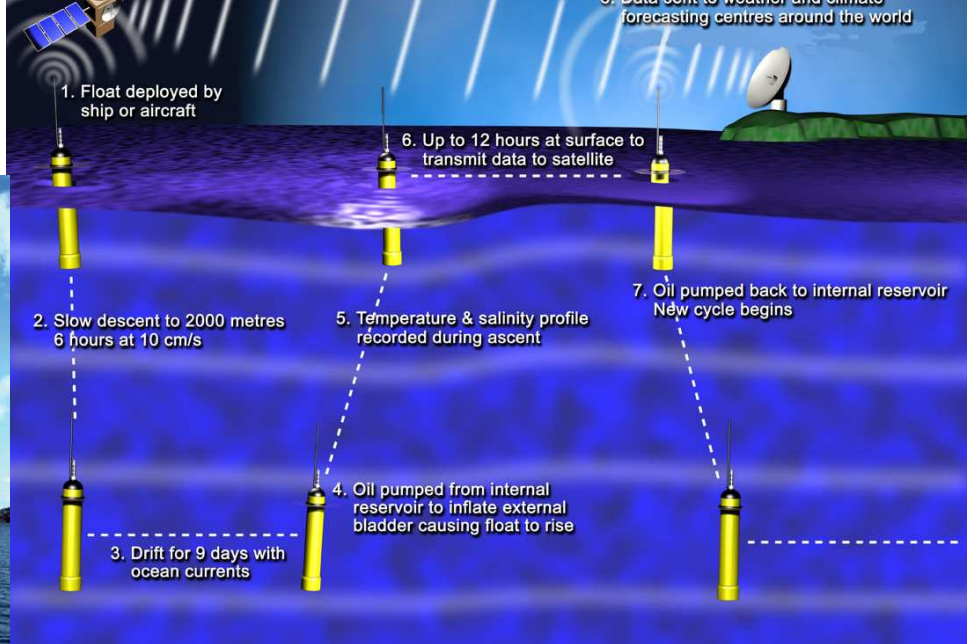


Proxy Daten:

Baumringe,  
Varven,  
Isotopen-  
Verhältnisse,  
Bohrloch-  
temperaturen  
u.a.

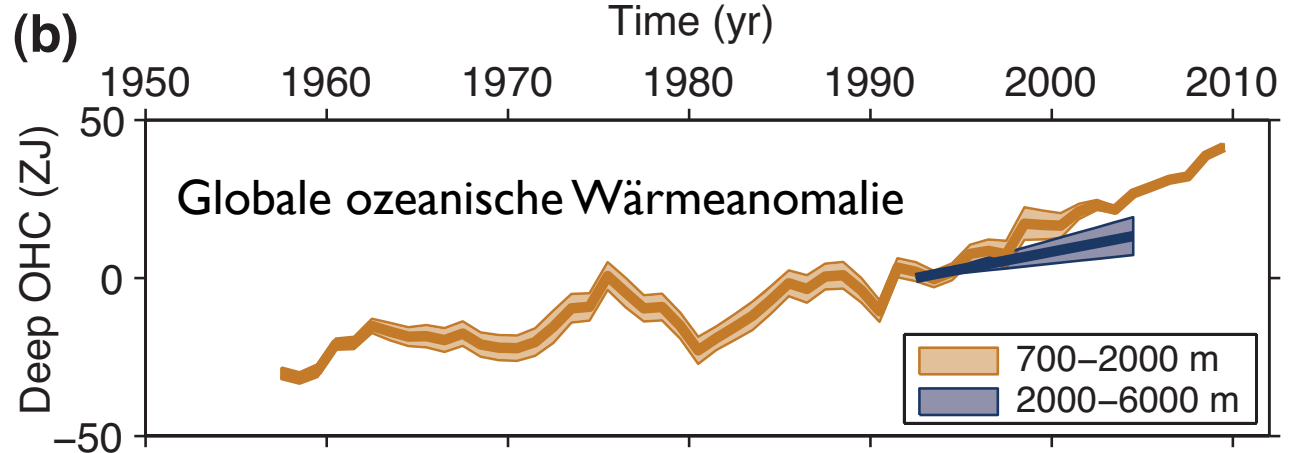
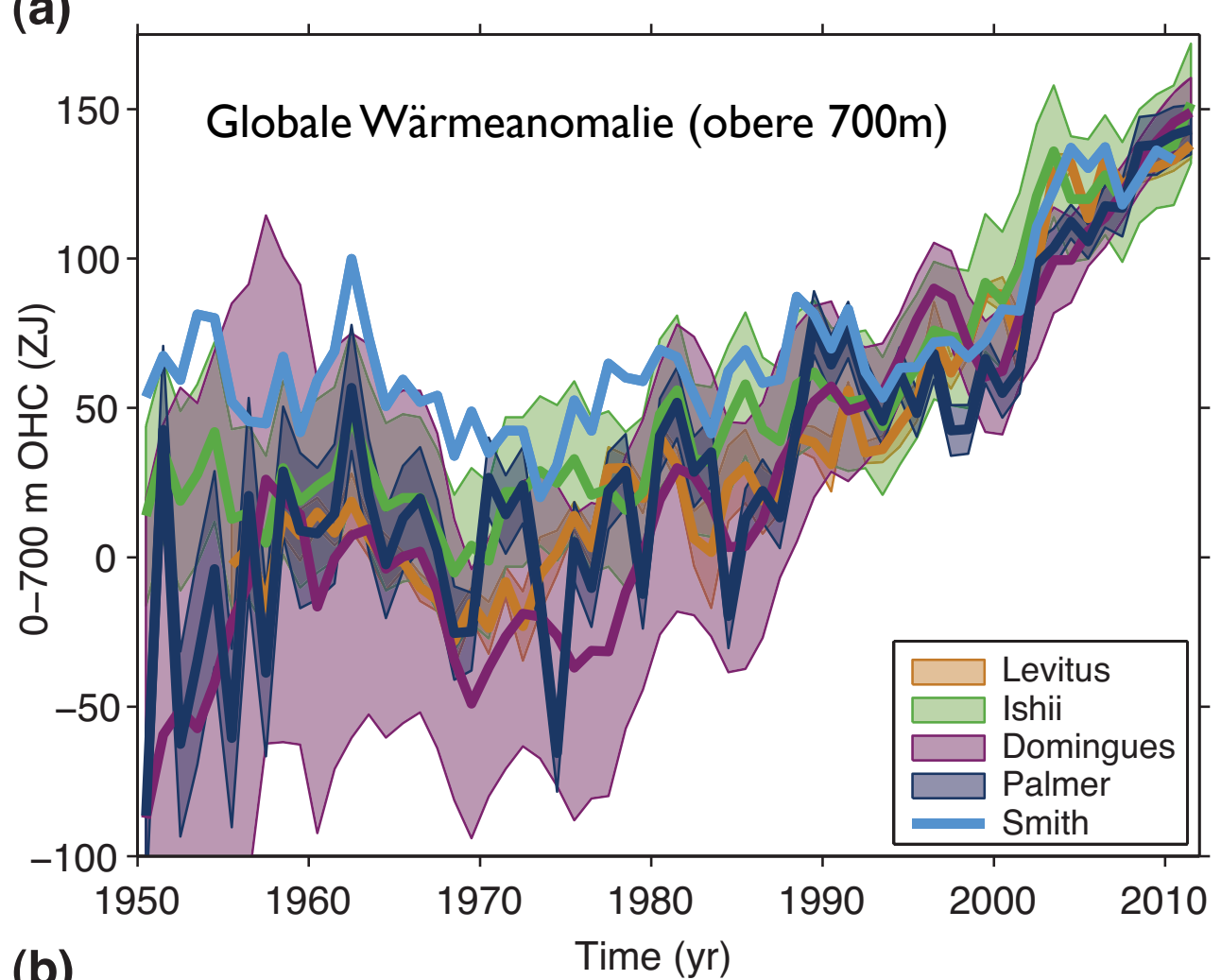


# Ozeanische "Wetterstationen": autonome ARGO Bojen

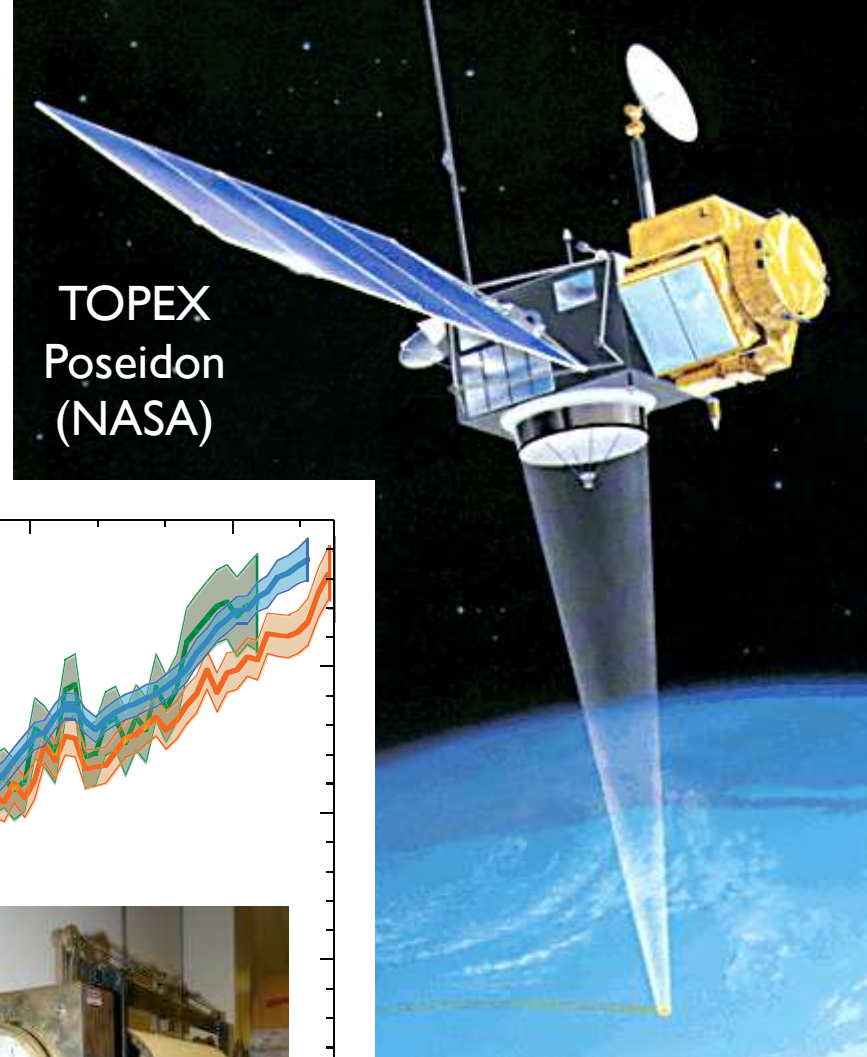




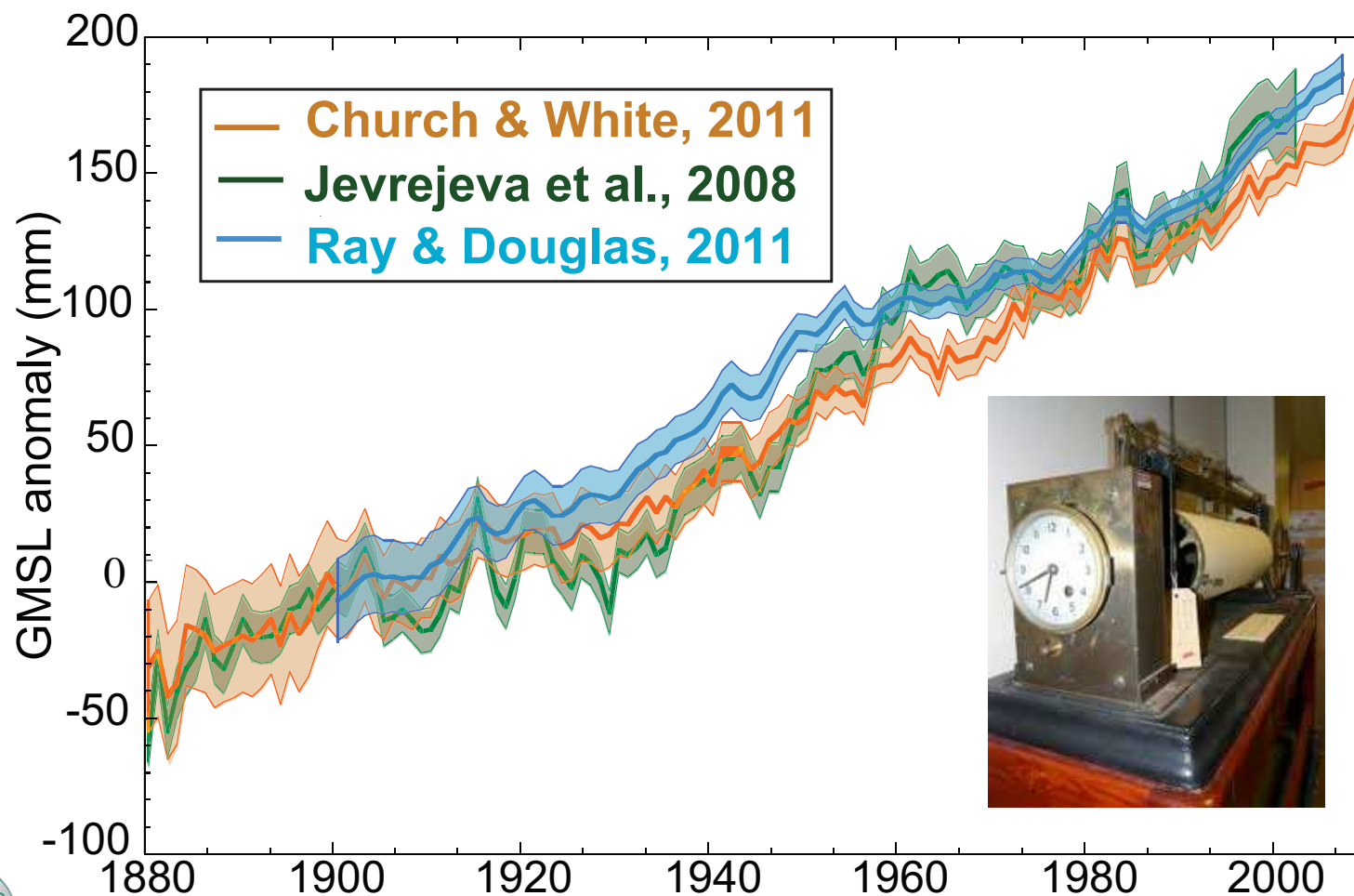
Der Ozean erwärmt sich:  
Zunahme des Wärmeinhaltes



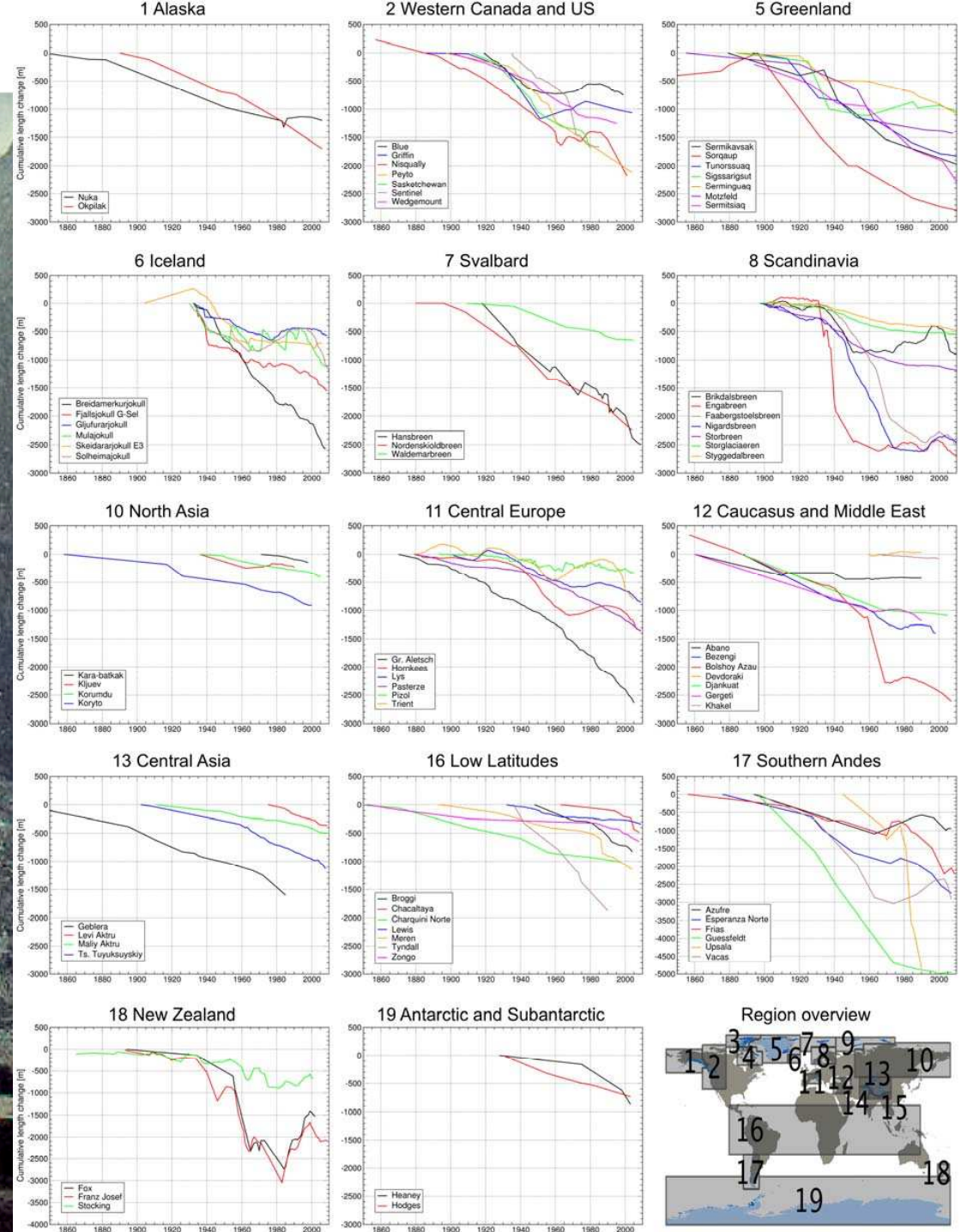
# Anstieg des Meeresspiegels: Gezeitenmesser, Satelliten-Altimeter



TOPEX  
Poseidon  
(NASA)



# Rückzug der Gletscher



## Fakt II:

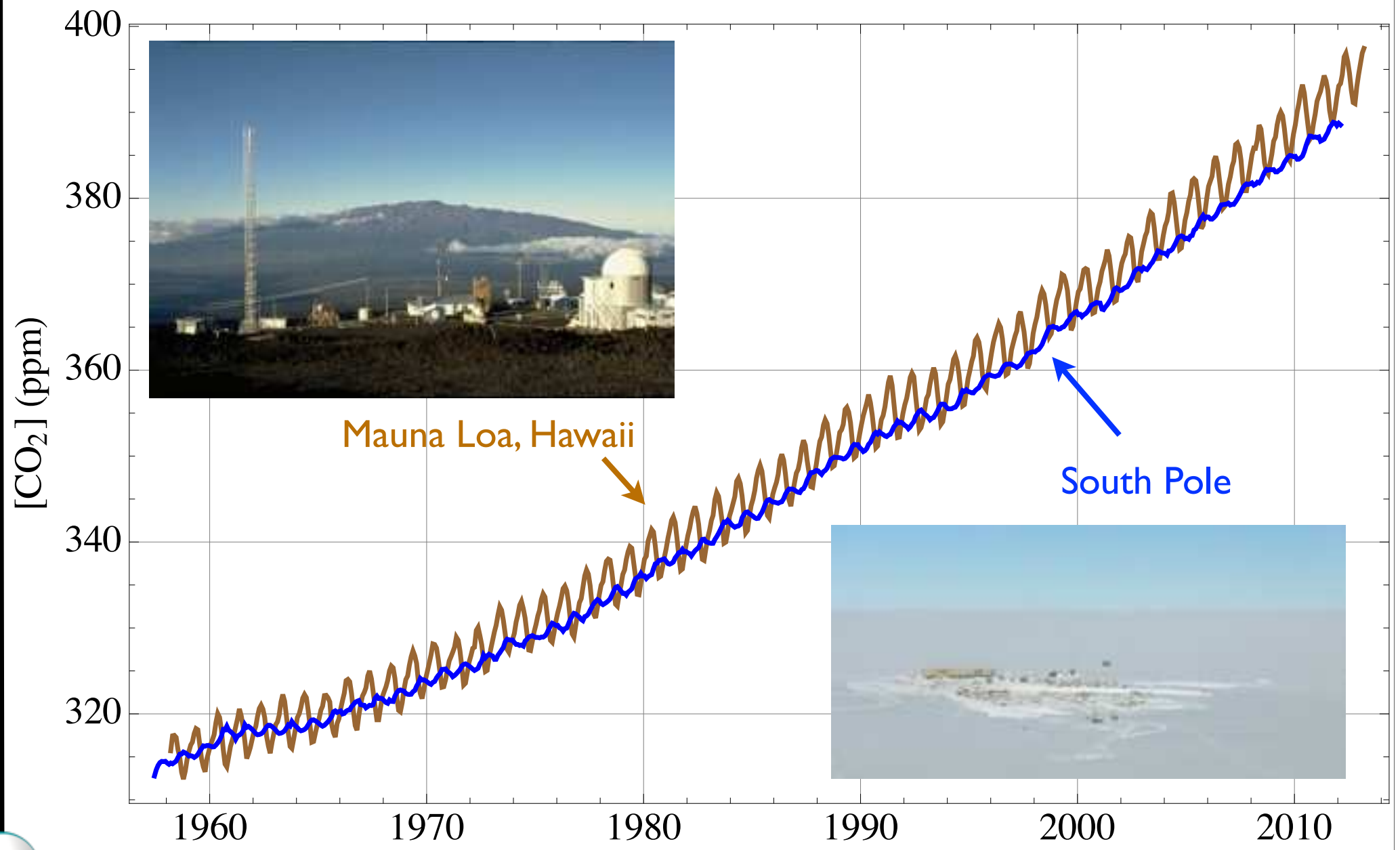
Seit 1750 nehmen die Konzentrationen wichtiger Treibhausgase zu:

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ): + 40%

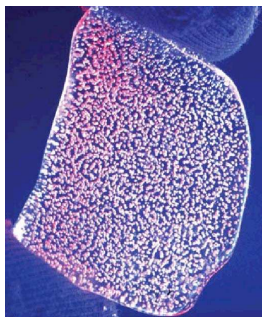
Methan ( $\text{CH}_4$ ): +150%

Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ): +20%

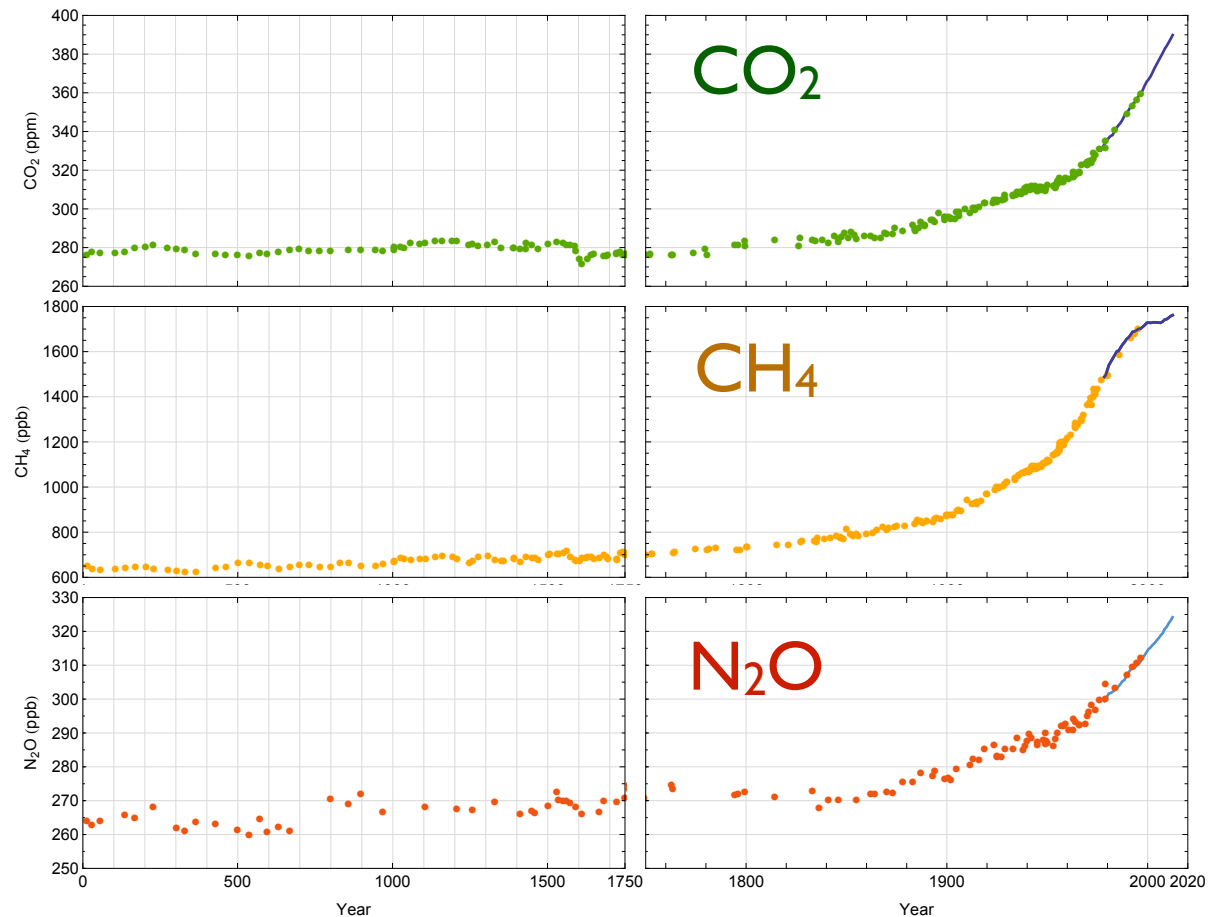
# Zunahme des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre - direkte Messungen



# Konzentration der Treibhausgase während der letzten 2000 Jahre (Messungen an Luftbläschen in Eiskernen aus der Antarktis)



ca. 1 cm



# CO<sub>2</sub> und der Treibhauseffekt



Svante Arrhenius  
1859-1927

THE  
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS \*.

I. *Introduction: Observations of Langley on Atmospheric Absorption.*

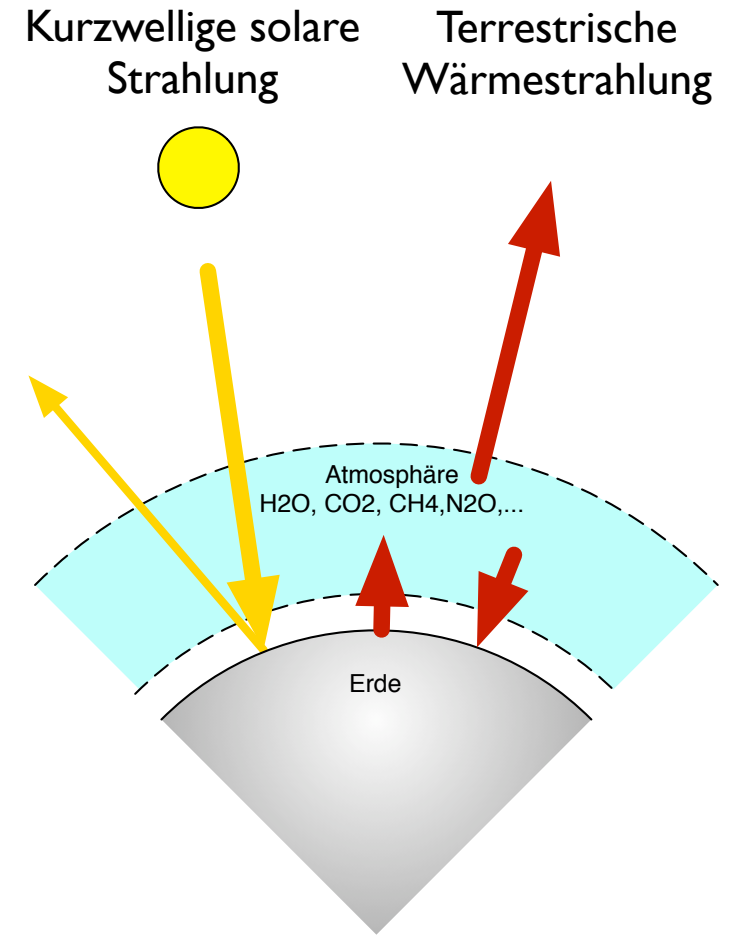
A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall † in particular has pointed out the enormous im-



Arvid Gustaf Högbom  
1857-1940

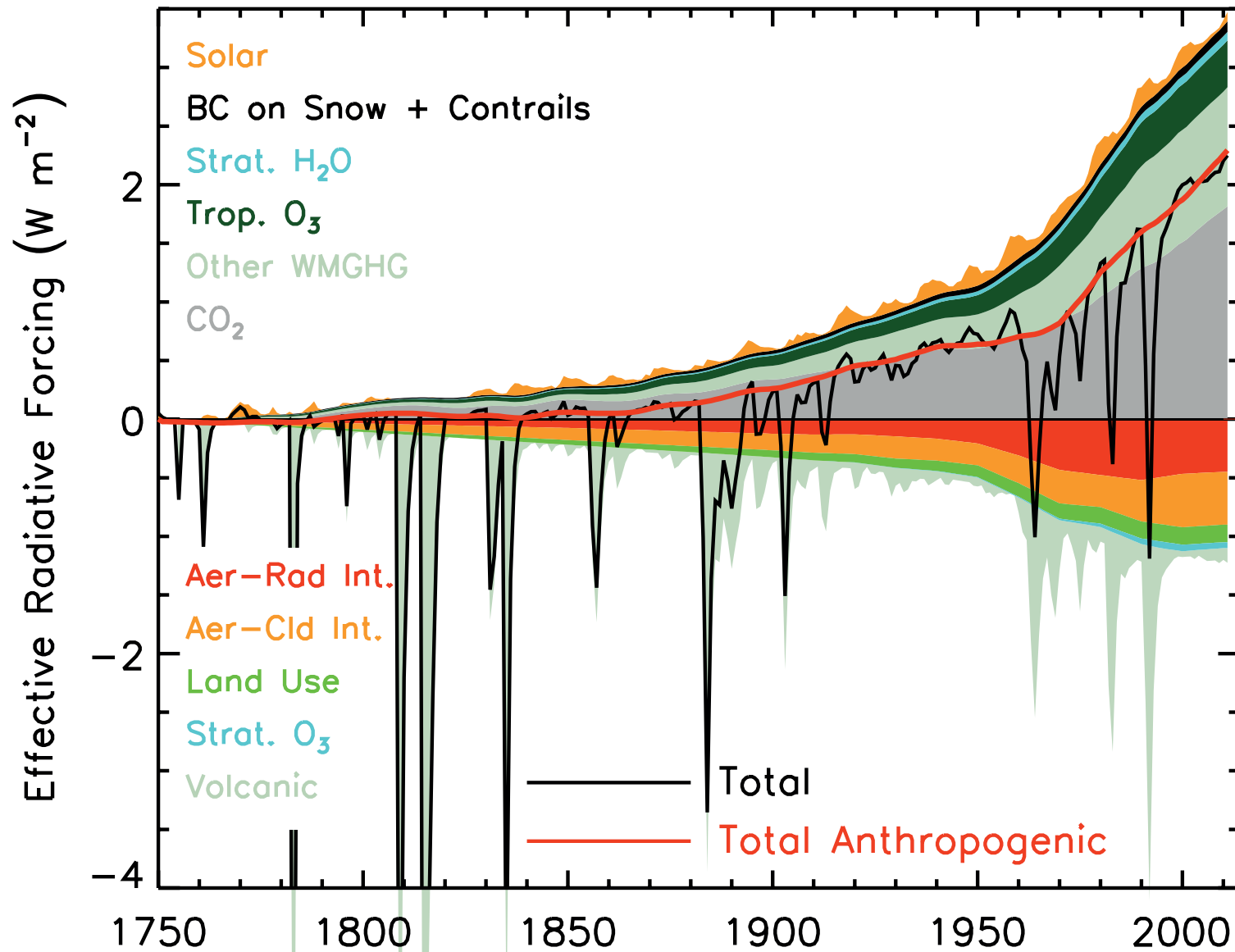
S.Arrhenius, Phil. Mag. R.S. 5, 41, 237, 1896

S.Arrhenius, Lehrbuch der kosmischen Physik. Hirzel, Leipzig. 1903.



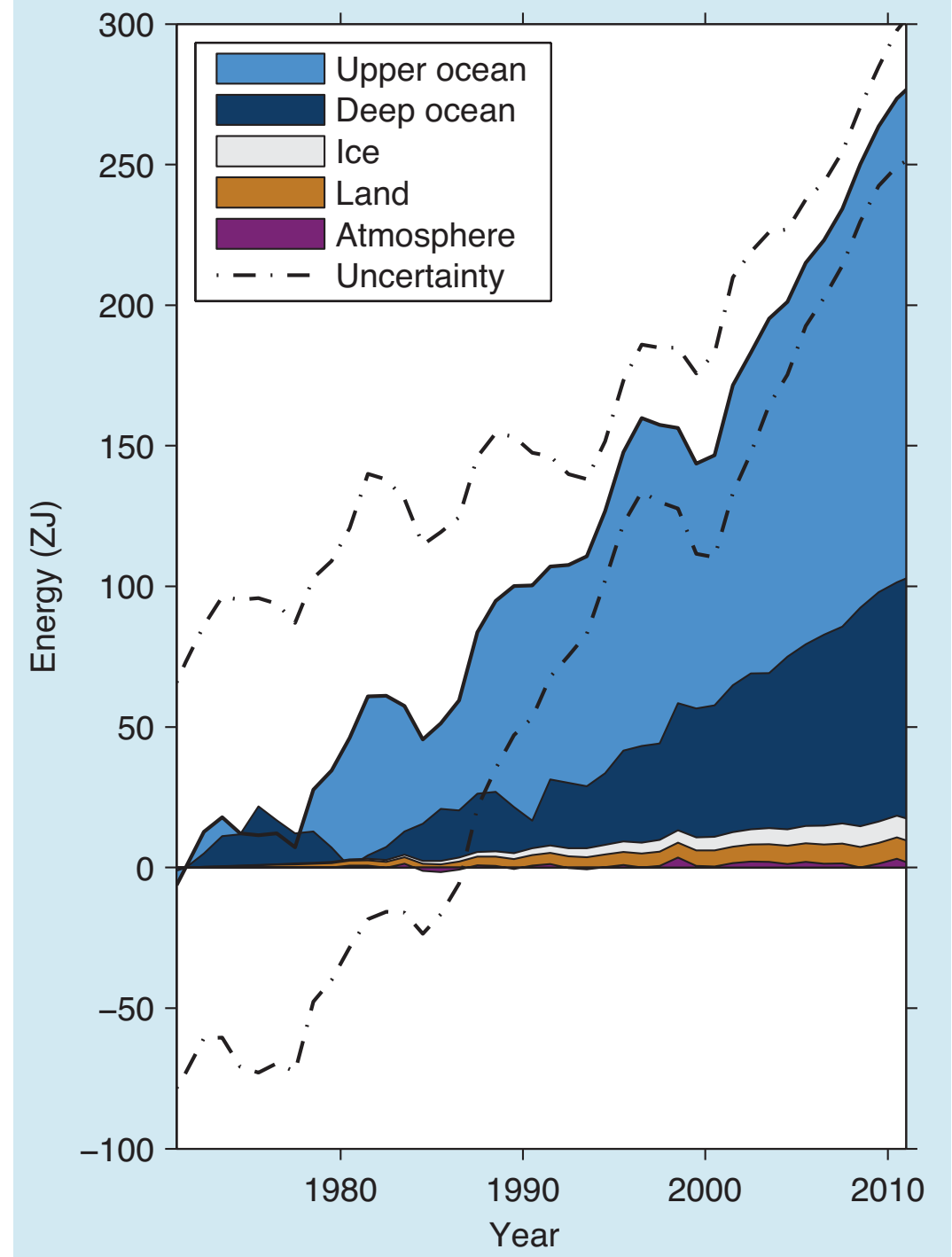
Vereinfachte Darstellung

# Anderungen im globalen Strahlungsantrieb: natürliche und anthropogene Beiträge





# Globale Energiebilanz



# Kausaler Zusammenhang zwischen Zunahme der Treibhausgase und globaler Erwärmung

IPCC (AR5):

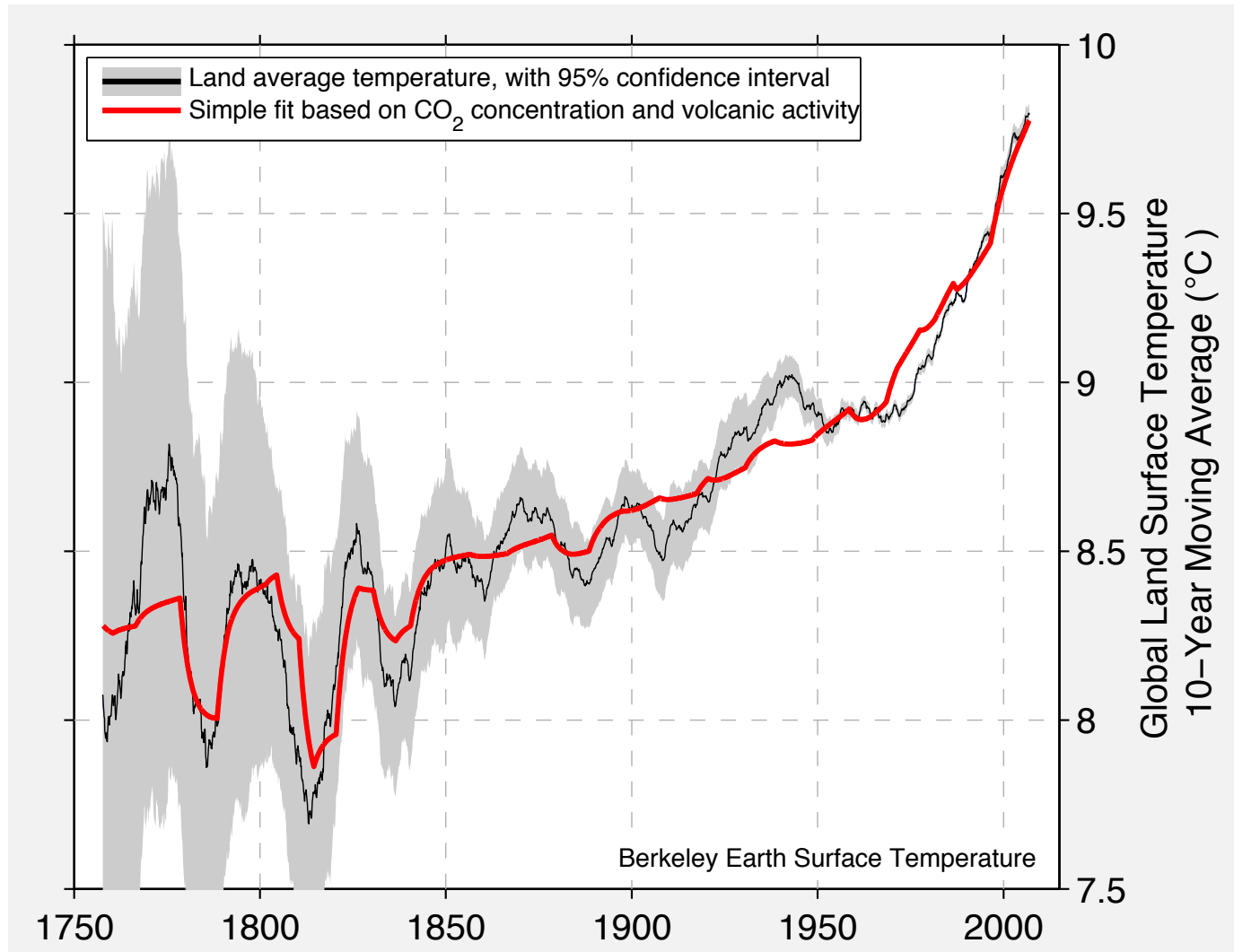
It is *extremely likely* that *more than half* of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together.

“*extremely likely*”: Wahrscheinlichkeit >95%

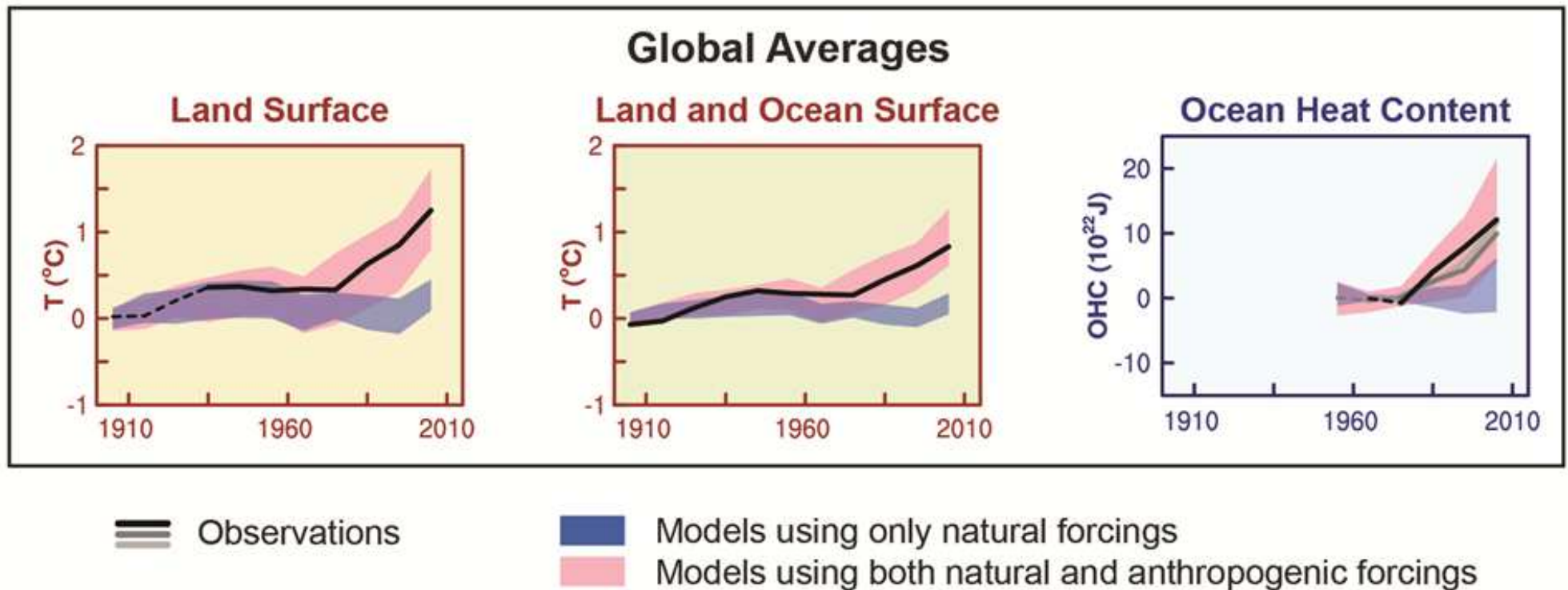
1. Elementare Physik
2. Statistische Analyse
3. Vergleich mit Klimamodell-Simulationen (Fingerabdruck-Methode)

# Empirischer Vergleich zwischen Temperaturzunahme und

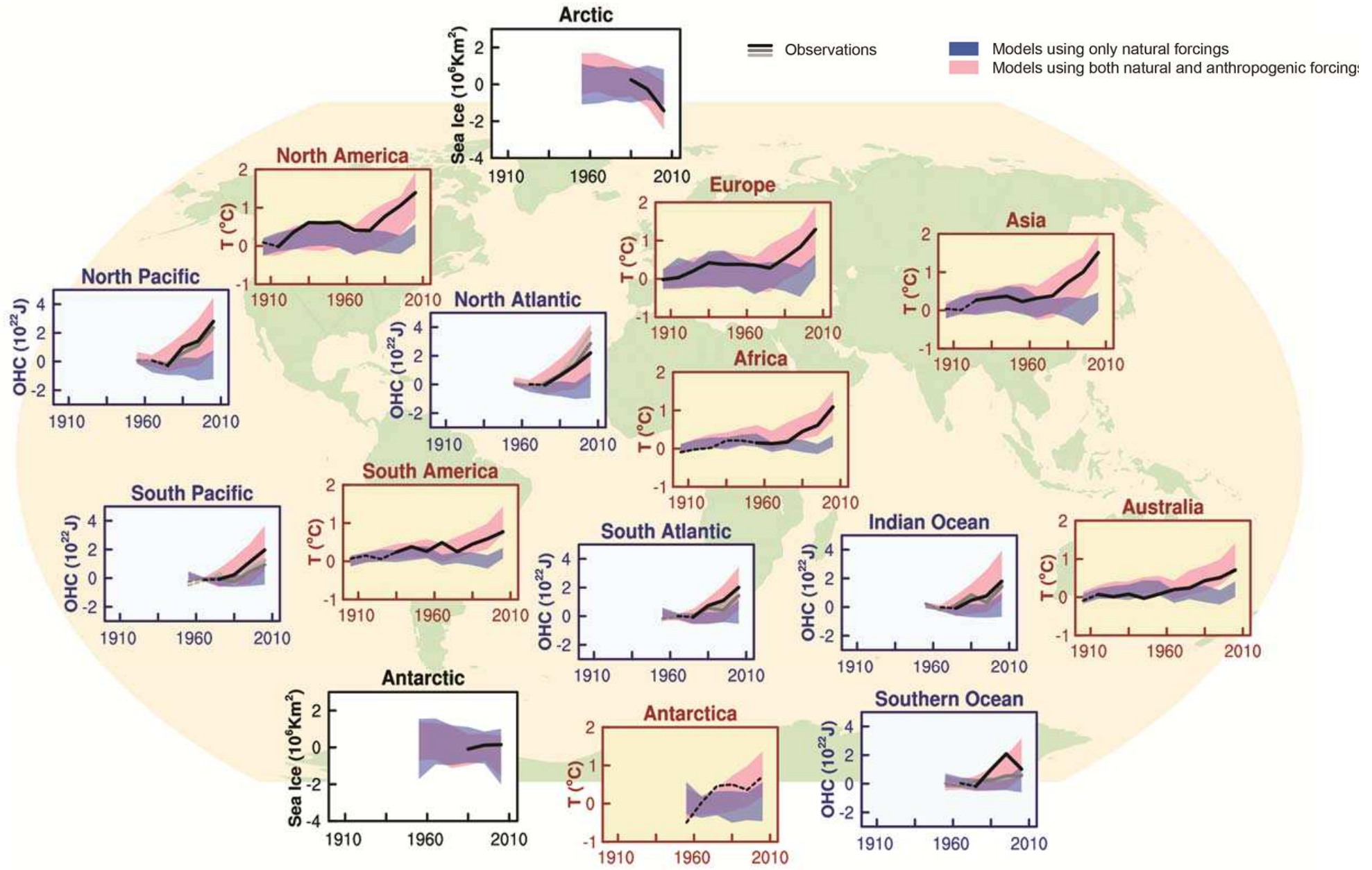
$$C \frac{dT}{dt} = -\lambda T + \Delta F$$



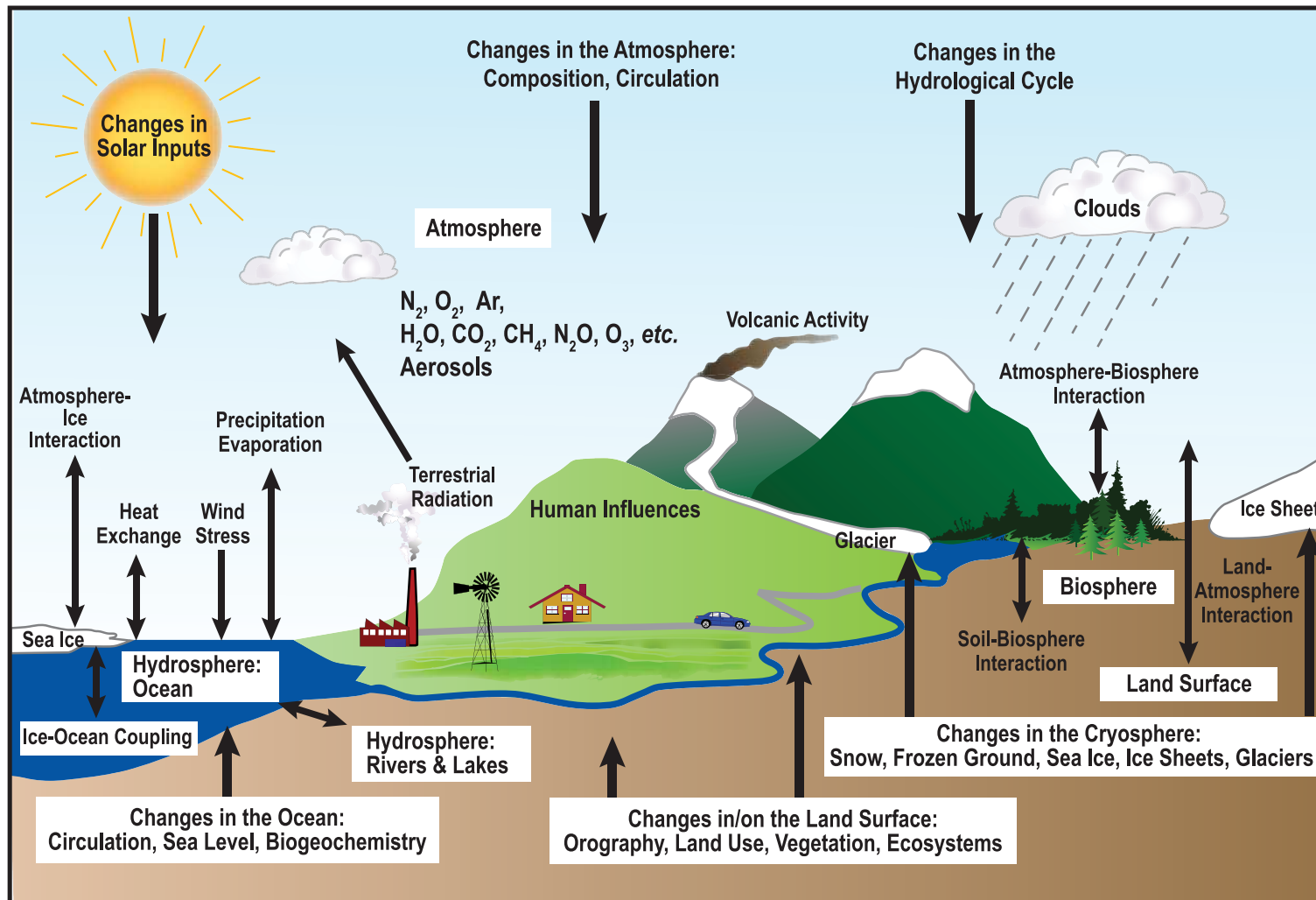
# Die beobachtete Erwärmung kann nur durch die Zunahme der anthropogenen Treibhausgase erklärt werden



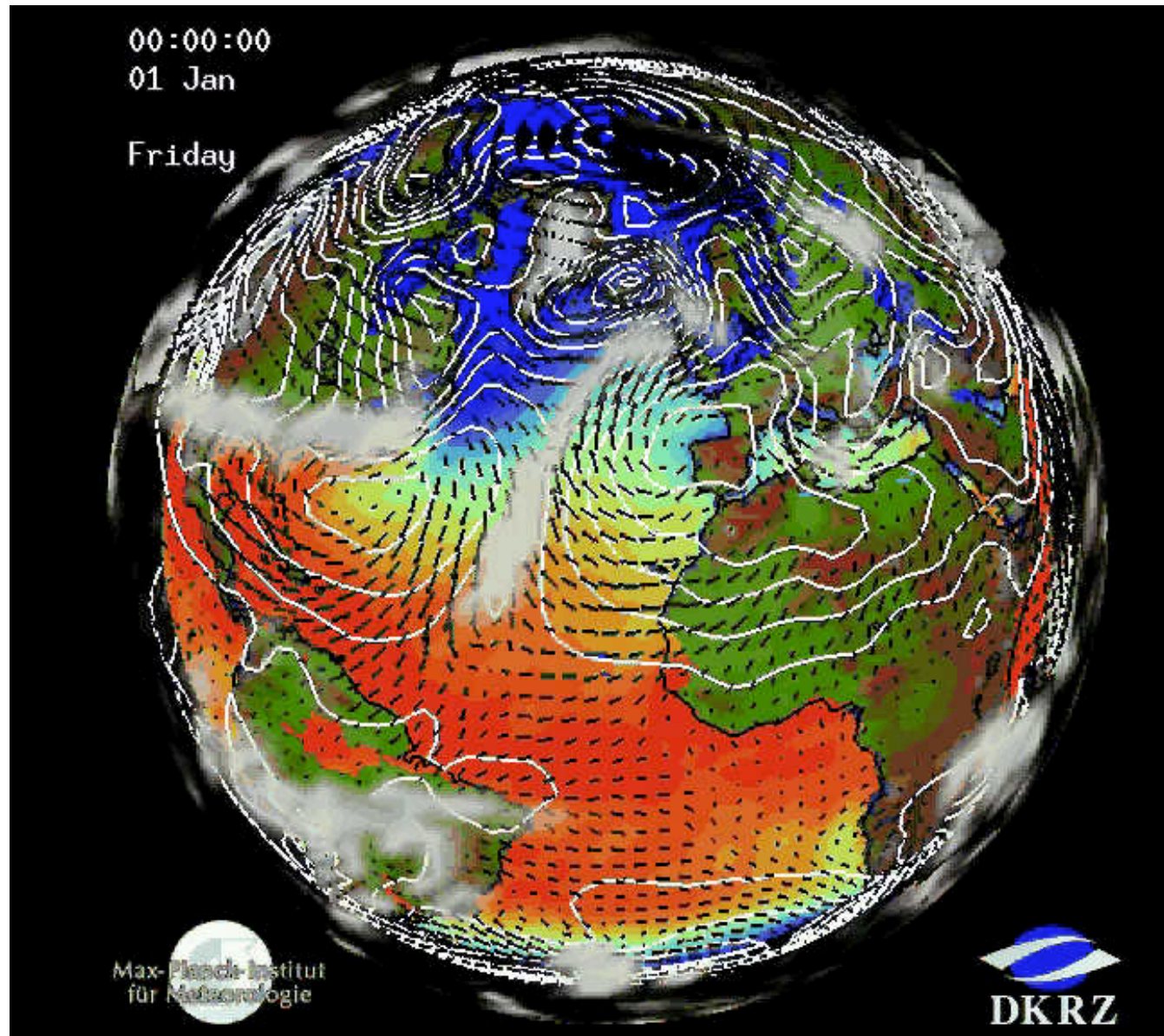
# Regionale Ergebnisse von Simulationen mit und ohne anthropogenes Forcing



# Komponenten eines Erdsystemmodells

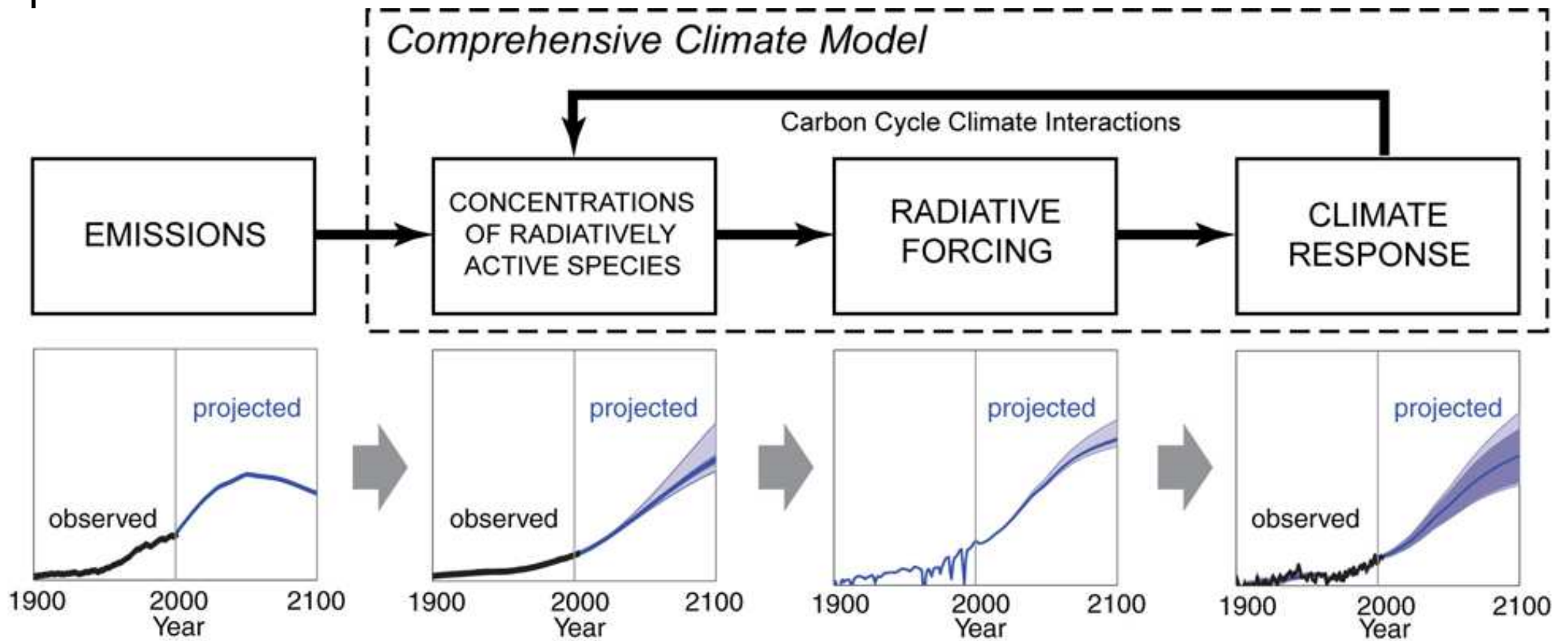


# Beispiel einer Erdsystem-Modellsimulation (Klimamodell ECHAM 5)



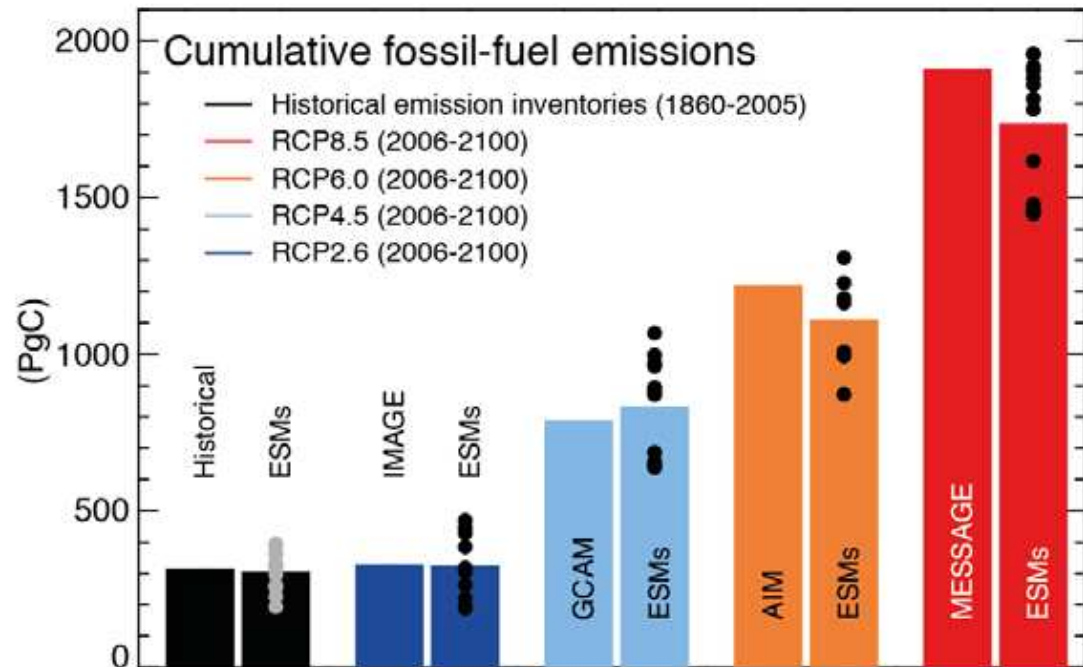
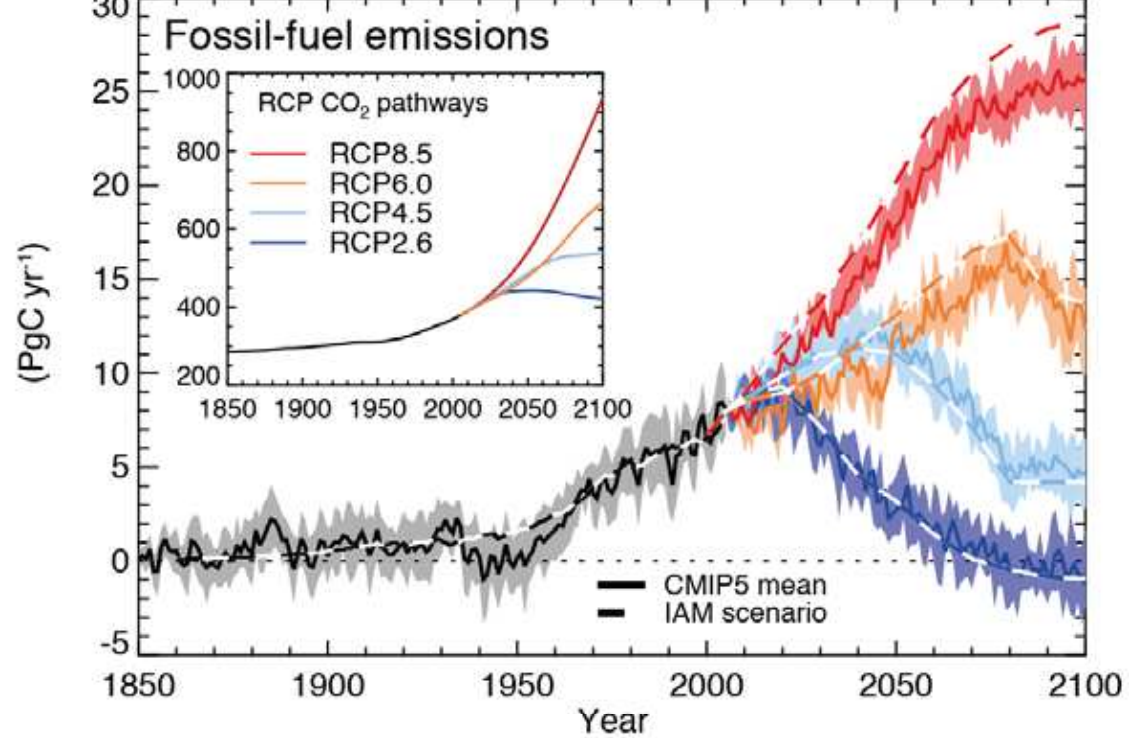
# Elemente einer Klima-Projektion

Keine “Prognosen” sondern “Wenn - dann - Aussagen”



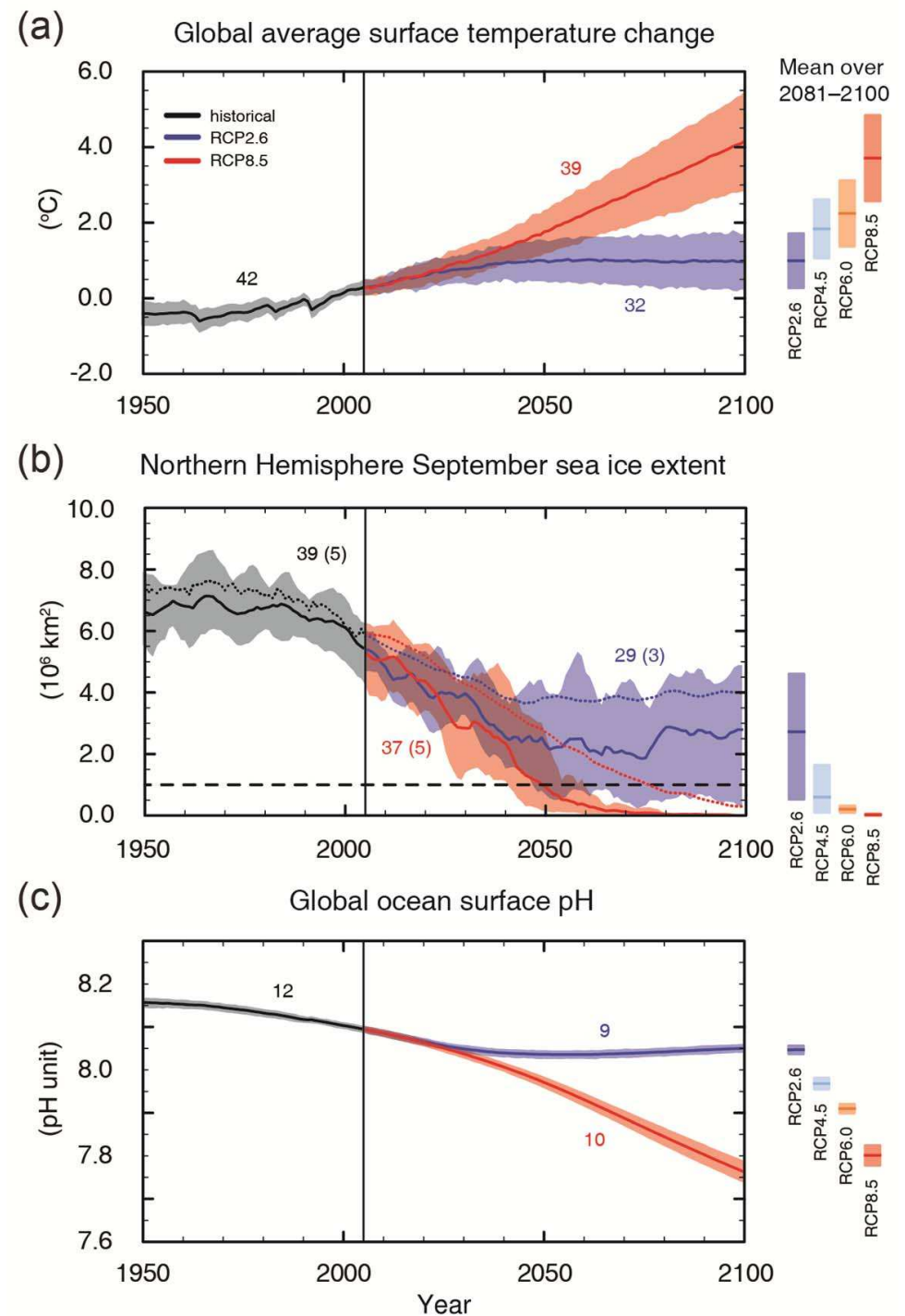


# Emissions-Szenarien

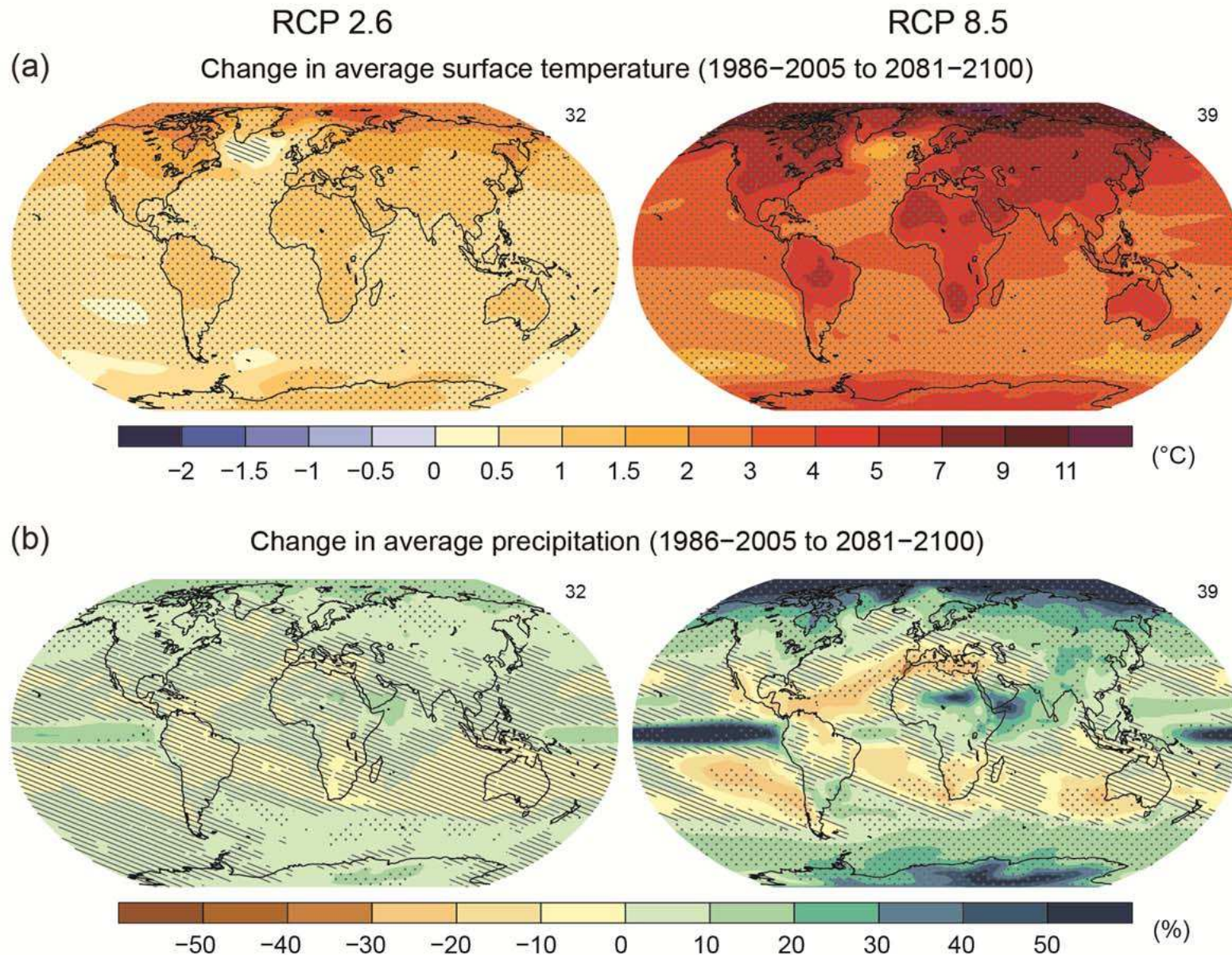


Zunehmende Emissionen führen zu einer weiteren Erwärmung.

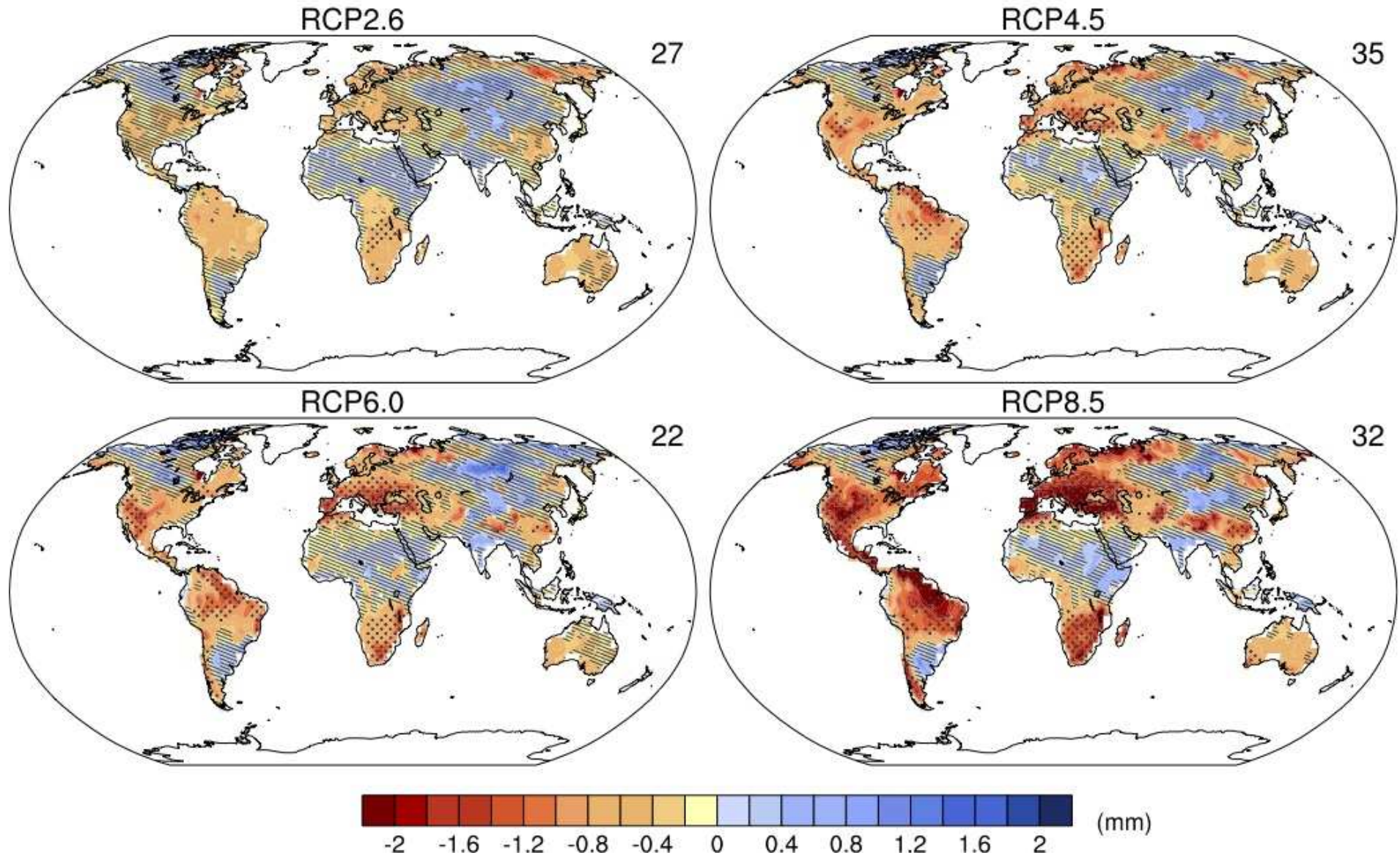
Das exakte Ausmass hängt ab von dem gewählten Szenarium der Emissionen



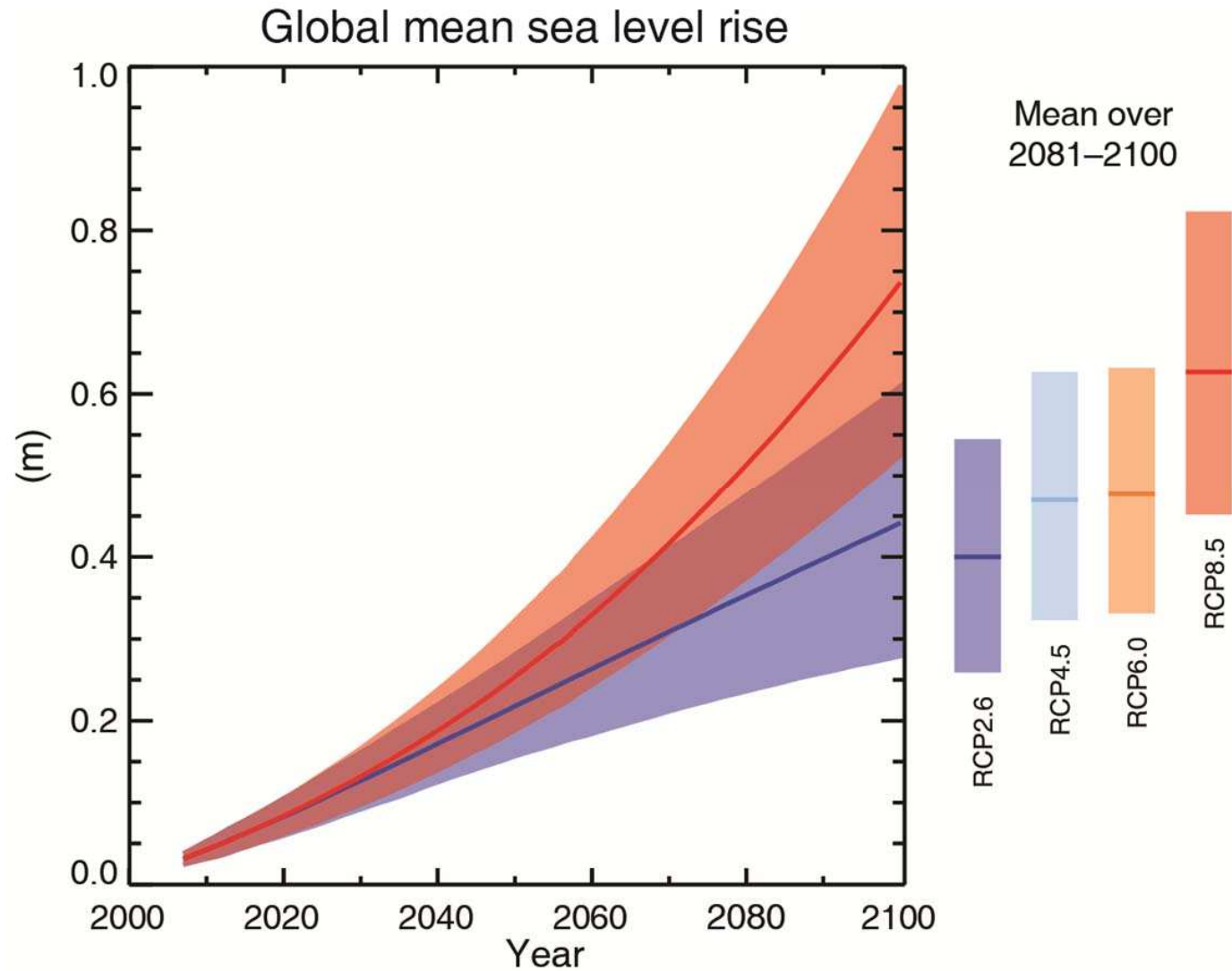
# Berechnete Änderungen der Temperatur und des Niederschlages bis zum Ende dieses Jahrhunderts



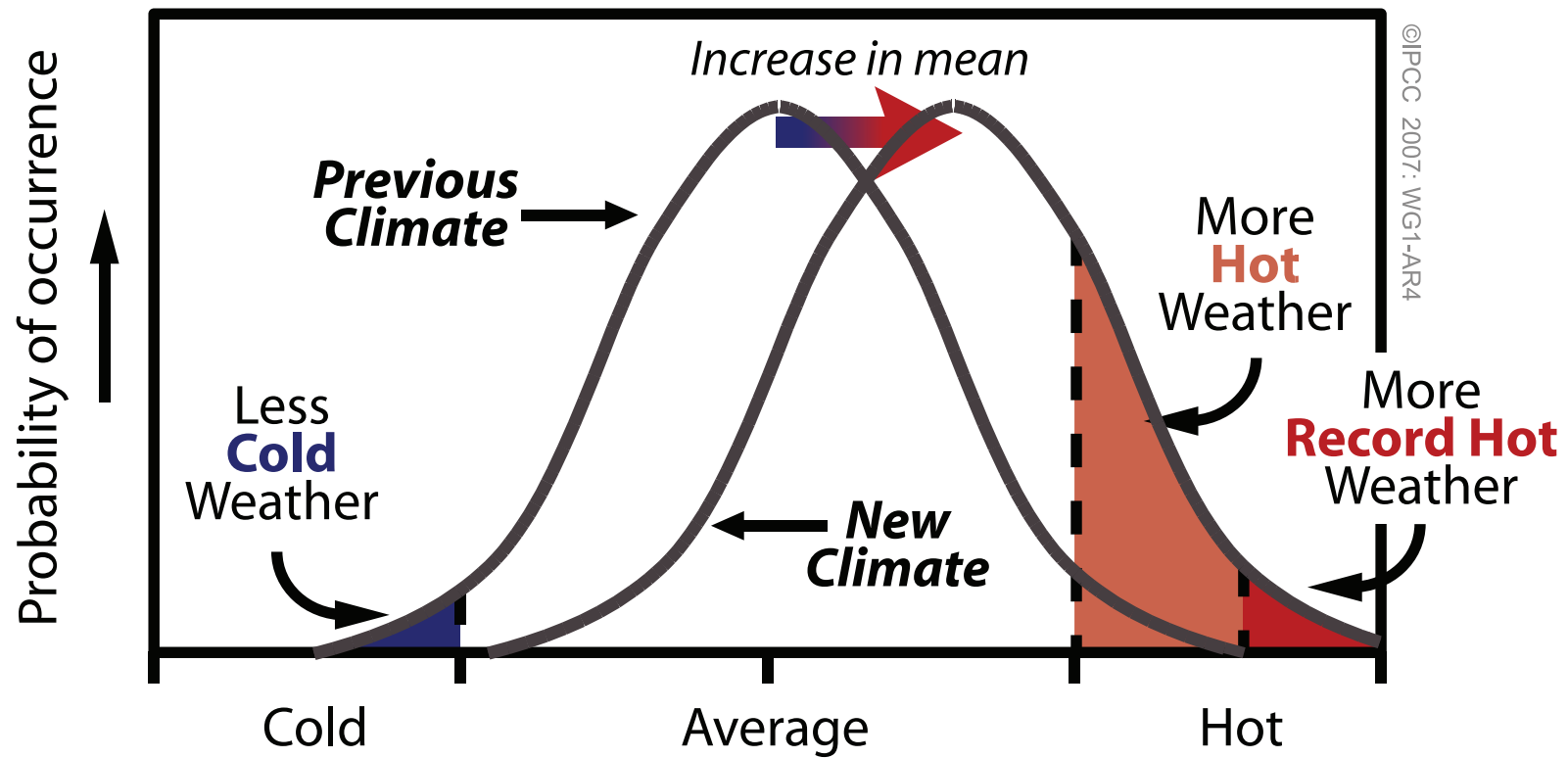
# Berechnete Änderungen der Bodenfeuchte 2081-2100 relativ zu 1981-2000



# Zunahme des Meeresspiegels



# Änderungen der Extrema?



# Extrema

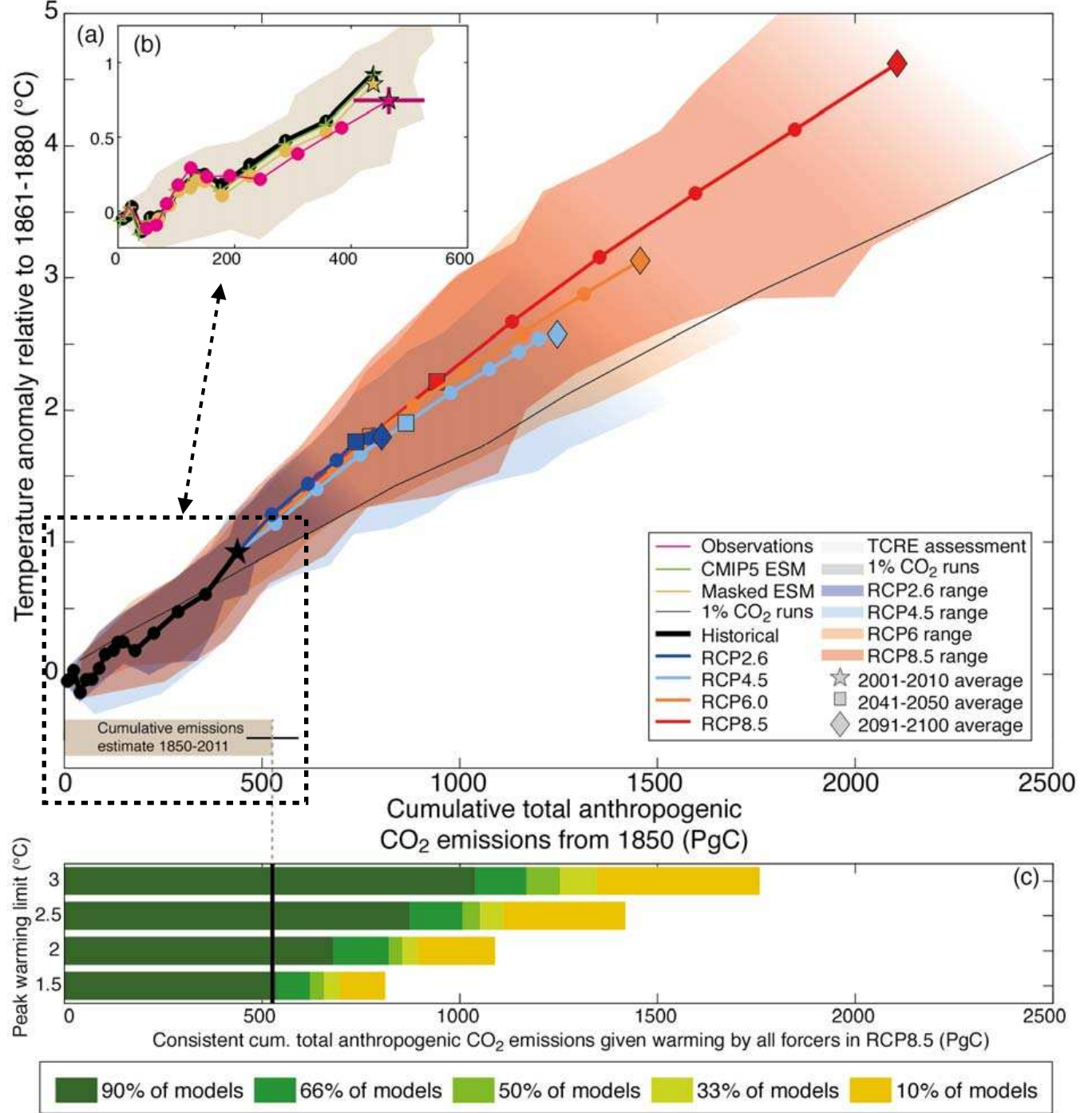
- It is *virtually certain* that there will be more frequent hot and fewer cold **temperature extremes** over most land areas on daily and seasonal timescales as global mean temperatures increase. It is *very likely* that **heat waves** will occur with a higher frequency and duration. Occasional cold winter extremes will continue to occur.
- **Extreme precipitation events** over most of the mid-latitude land masses and over wet tropical regions will *very likely* become more intense and more frequent by the end of this century, as global mean surface temperature increases.
- It is *likely* that the global frequency of occurrence of **tropical cyclones** will either decrease or remain essentially unchanged, concurrent with a *likely* increase in both global mean **tropical cyclone maximum wind speed** and **precipitation rates**.

“**virtually certain**”: Wahrscheinlichkeit >99%

“**very likely**”: Wahrscheinlichkeit >90%

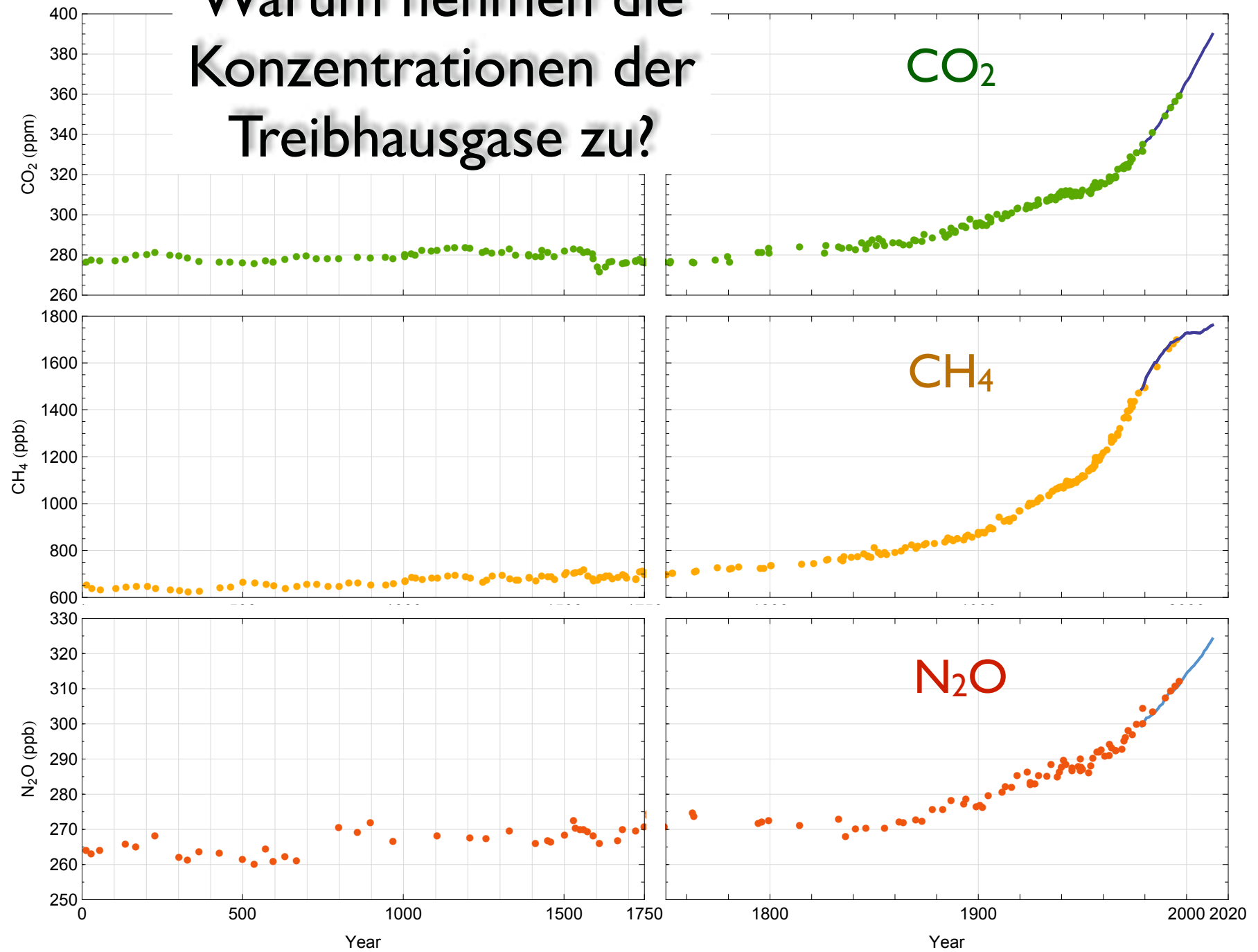
“**likely**”: Wahrscheinlichkeit >66%

# Kumulative CO<sub>2</sub> Emissionen bestimmen die erwartete globale Erwärmung in diesem Jahrhundert

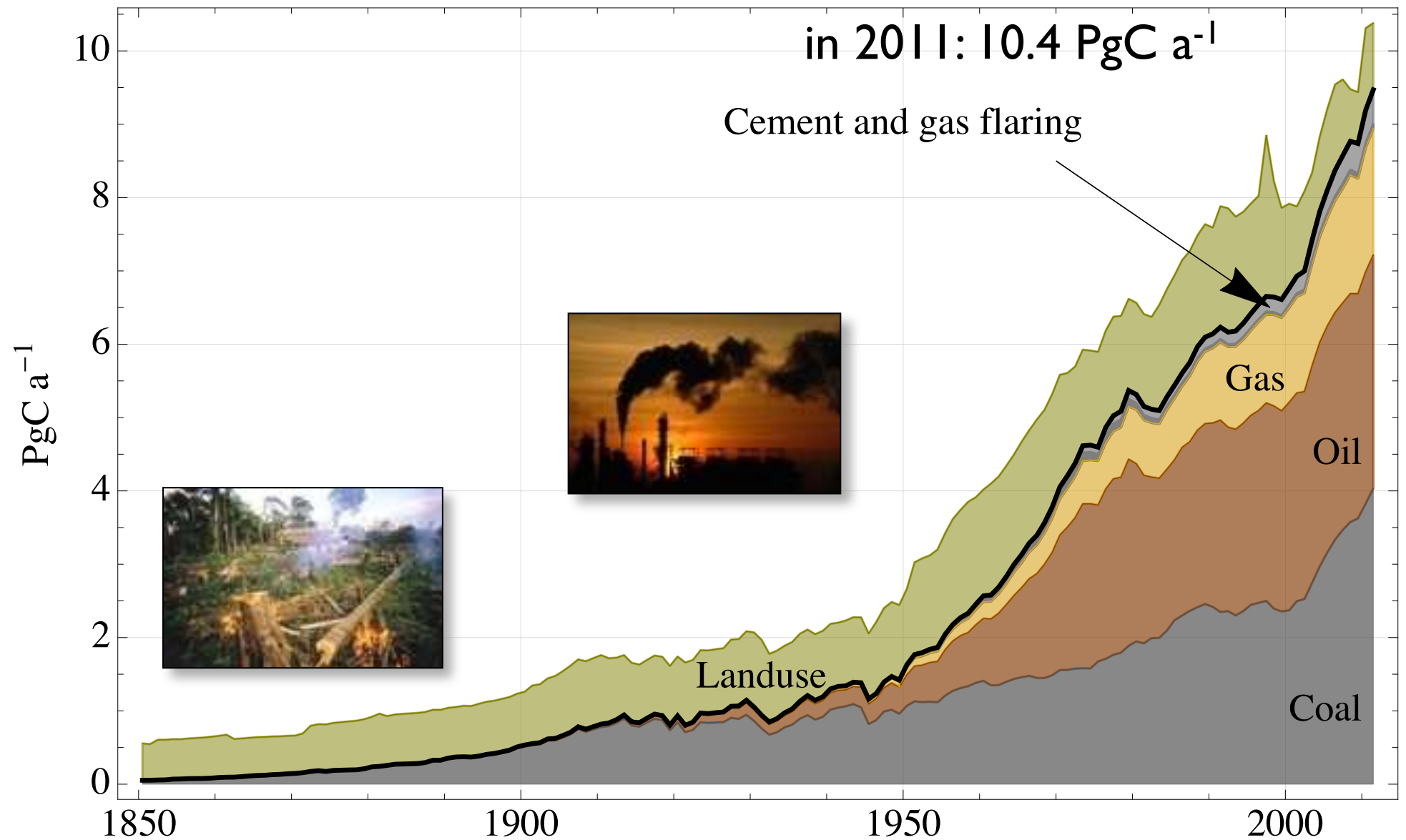




# Warum nehmen die Konzentrationen der Treibhausgase zu?



# Anthropogene Emissionen des CO<sub>2</sub>

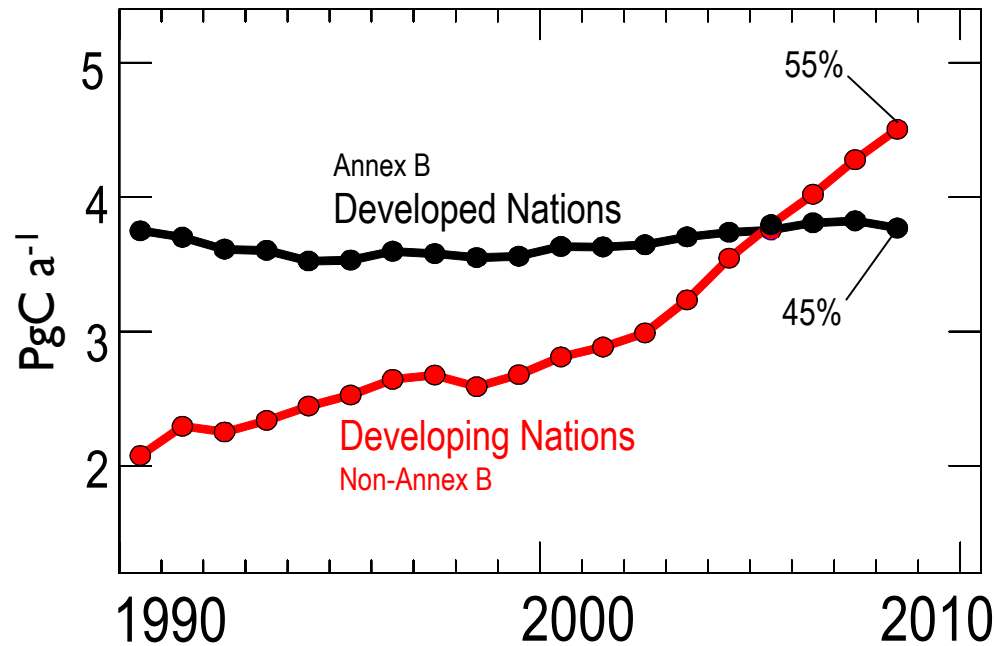


10 PgC = 10 × 10<sup>15</sup> gC = 37 Mrd Tonnen CO<sub>2</sub>

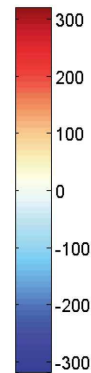
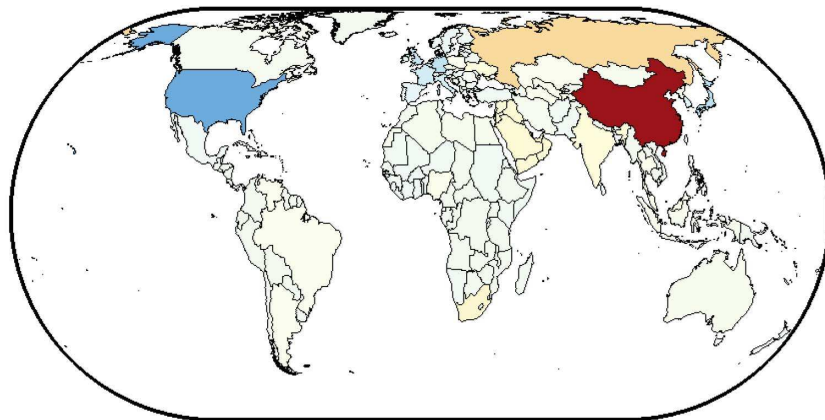
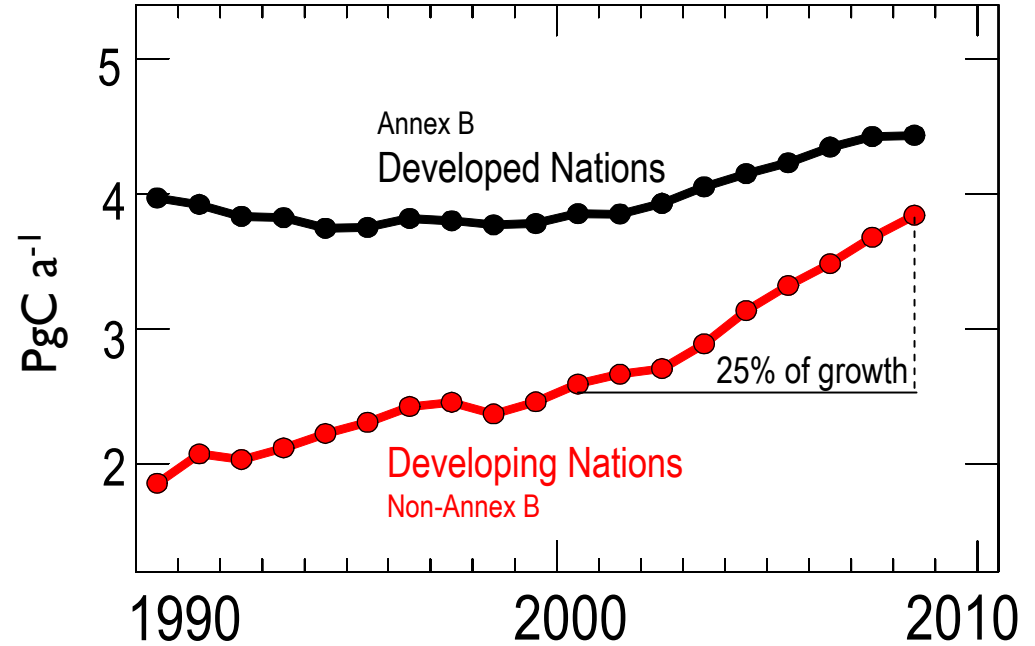
# CO<sub>2</sub> emissions:

## Effects of outsourced production of industrial goods

Reported emissions

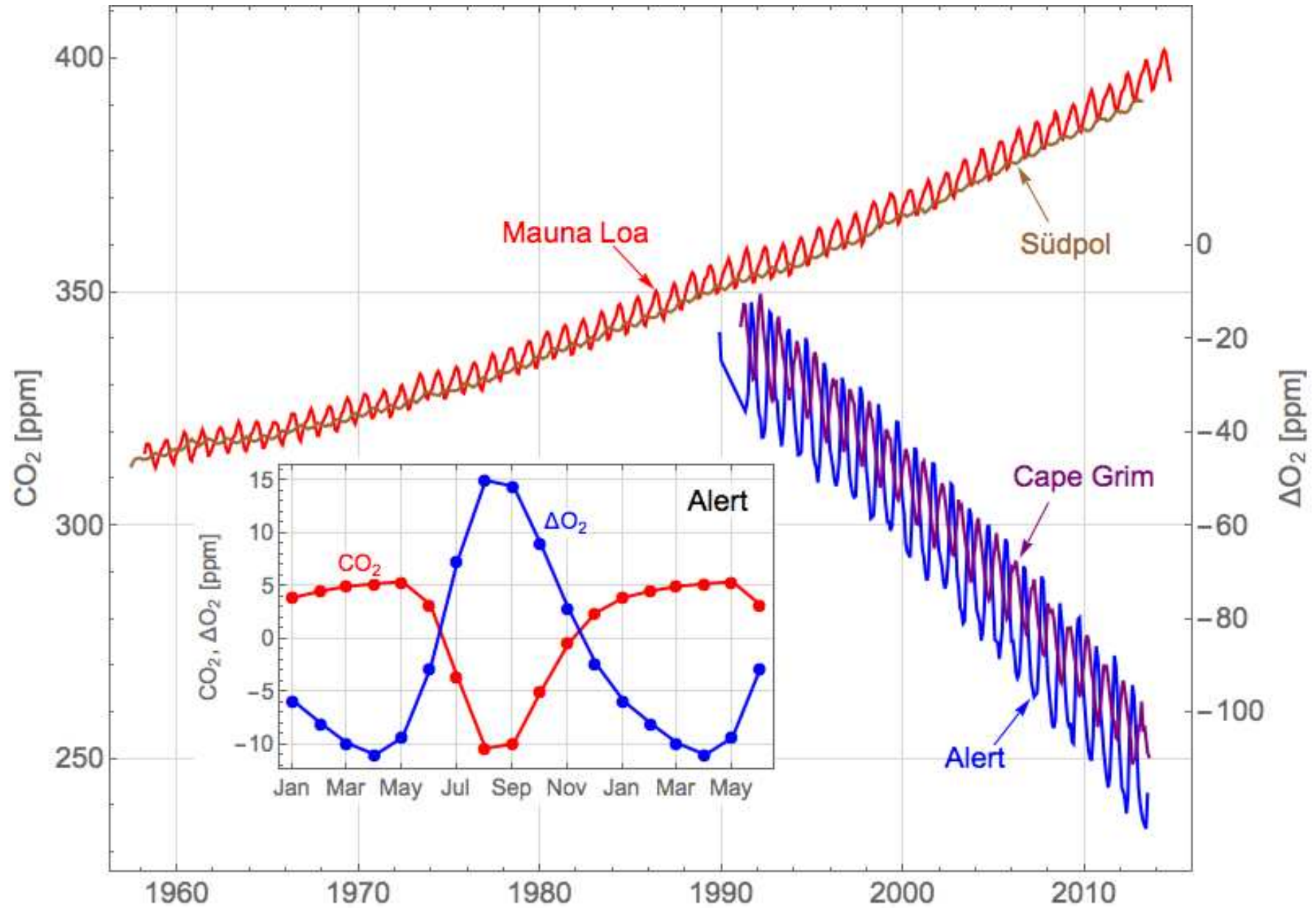


Corrected for exported emissions



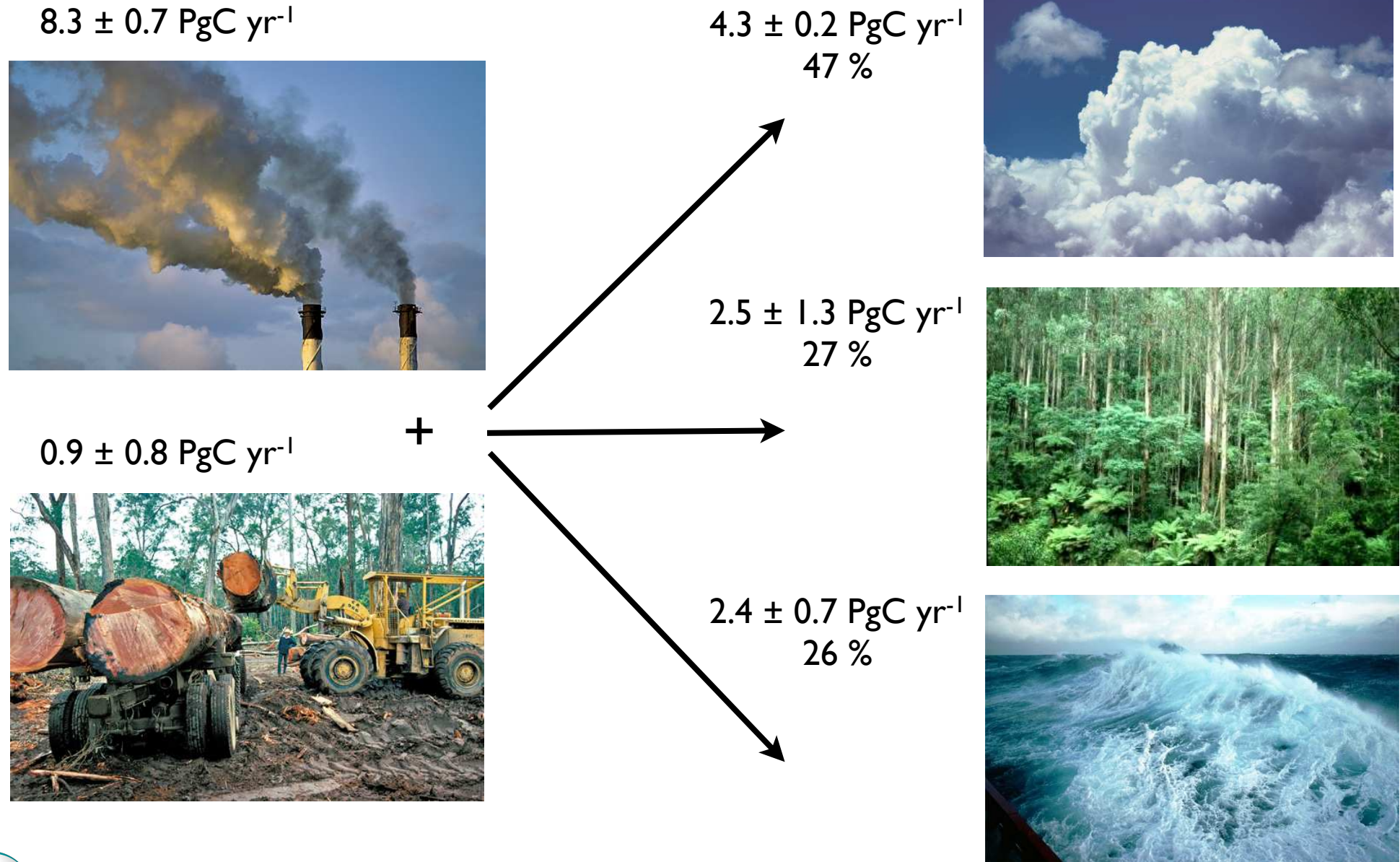
made in  
China  
Thailand  
India...

# Anderungen des CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> in Nord- und Südhemisphäre



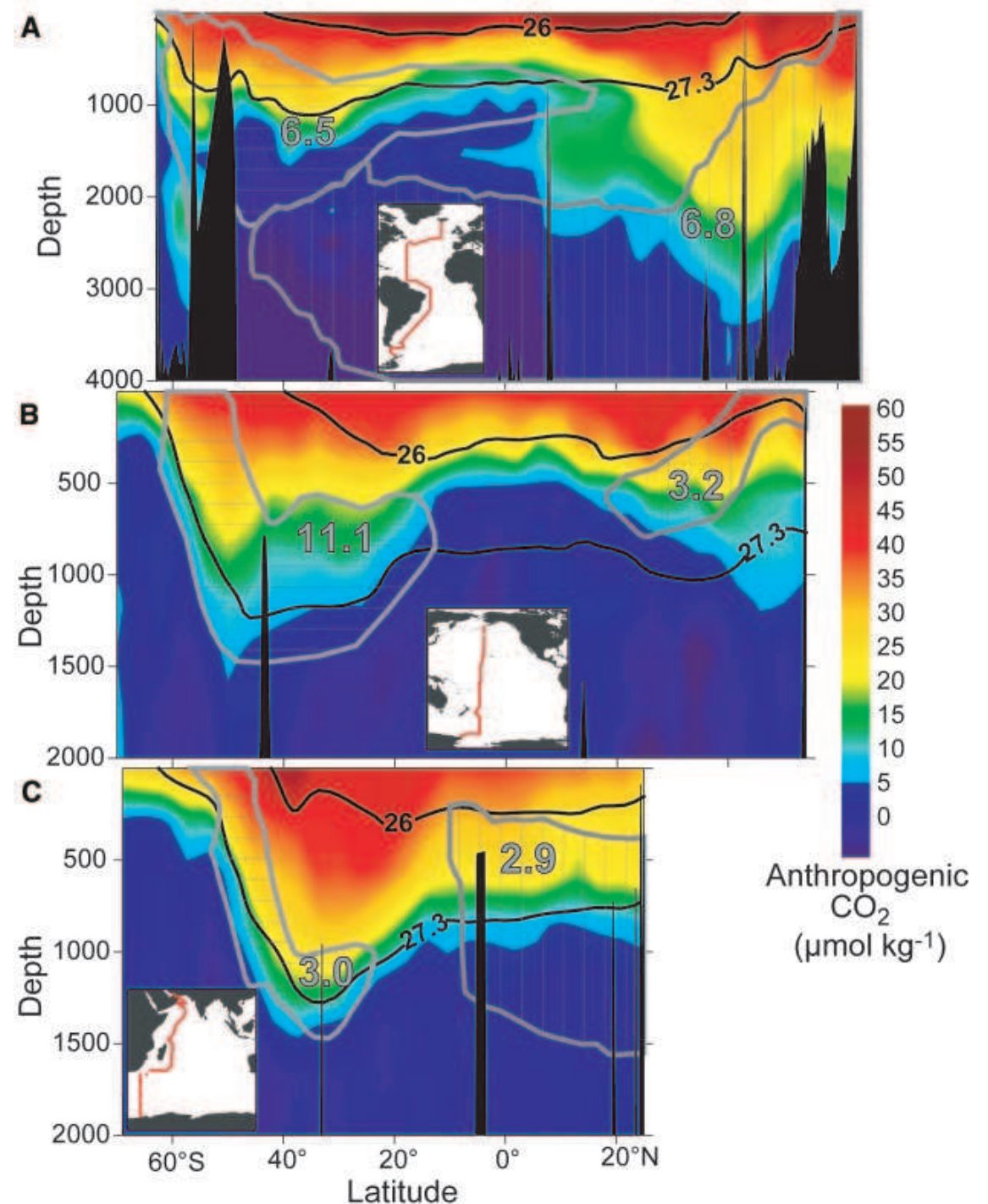
Abweichung vom Standard (~21%)

# Globale CO<sub>2</sub> Bilanz - 2002-2011



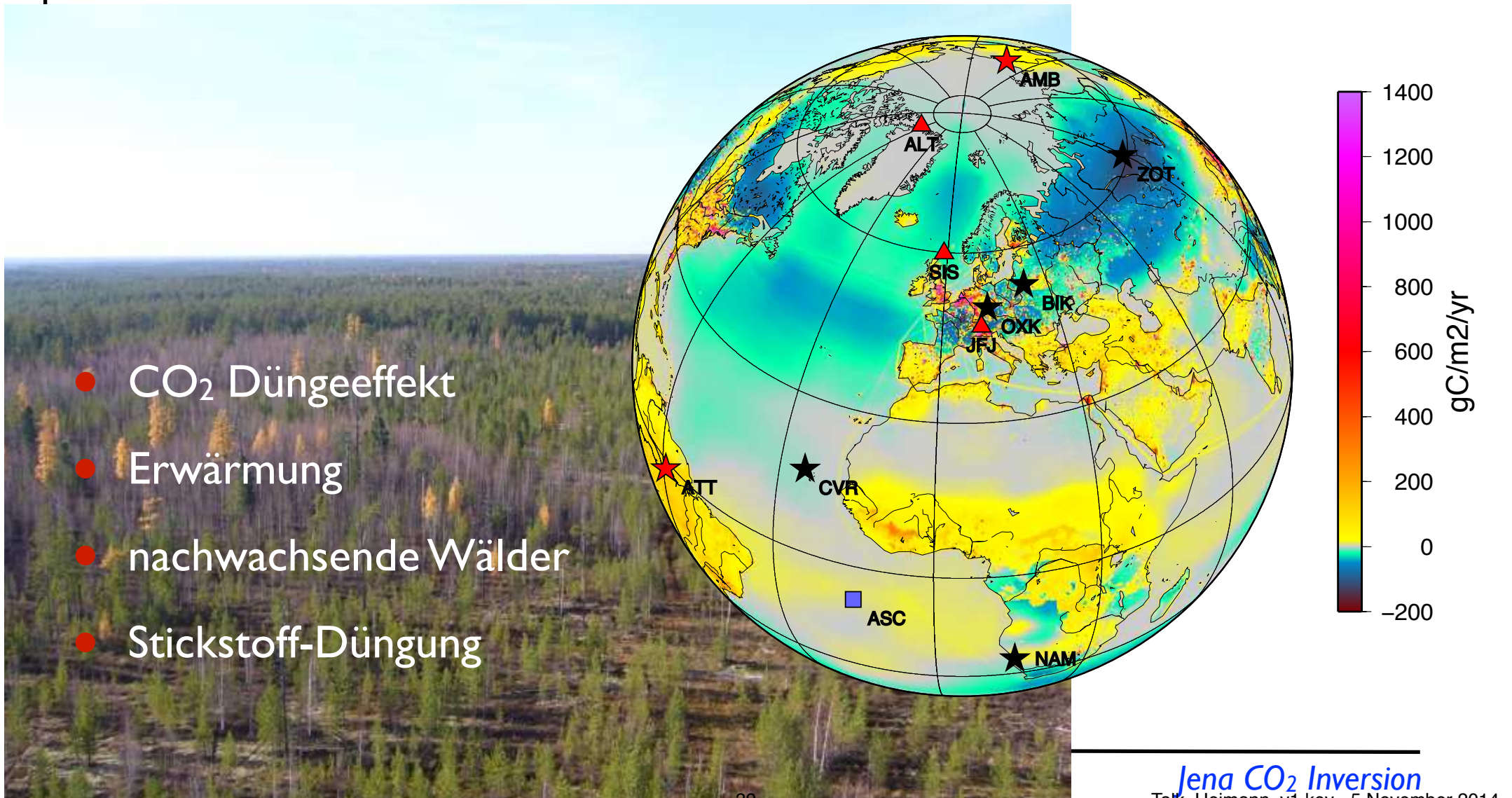
# Ozeanaufnahme des anthropogenen CO<sub>2</sub>

Der Hauptanteil des anthropogenen CO<sub>2</sub> befindet sich in den oberen 500m



# Terrestrische Senkenprozesse

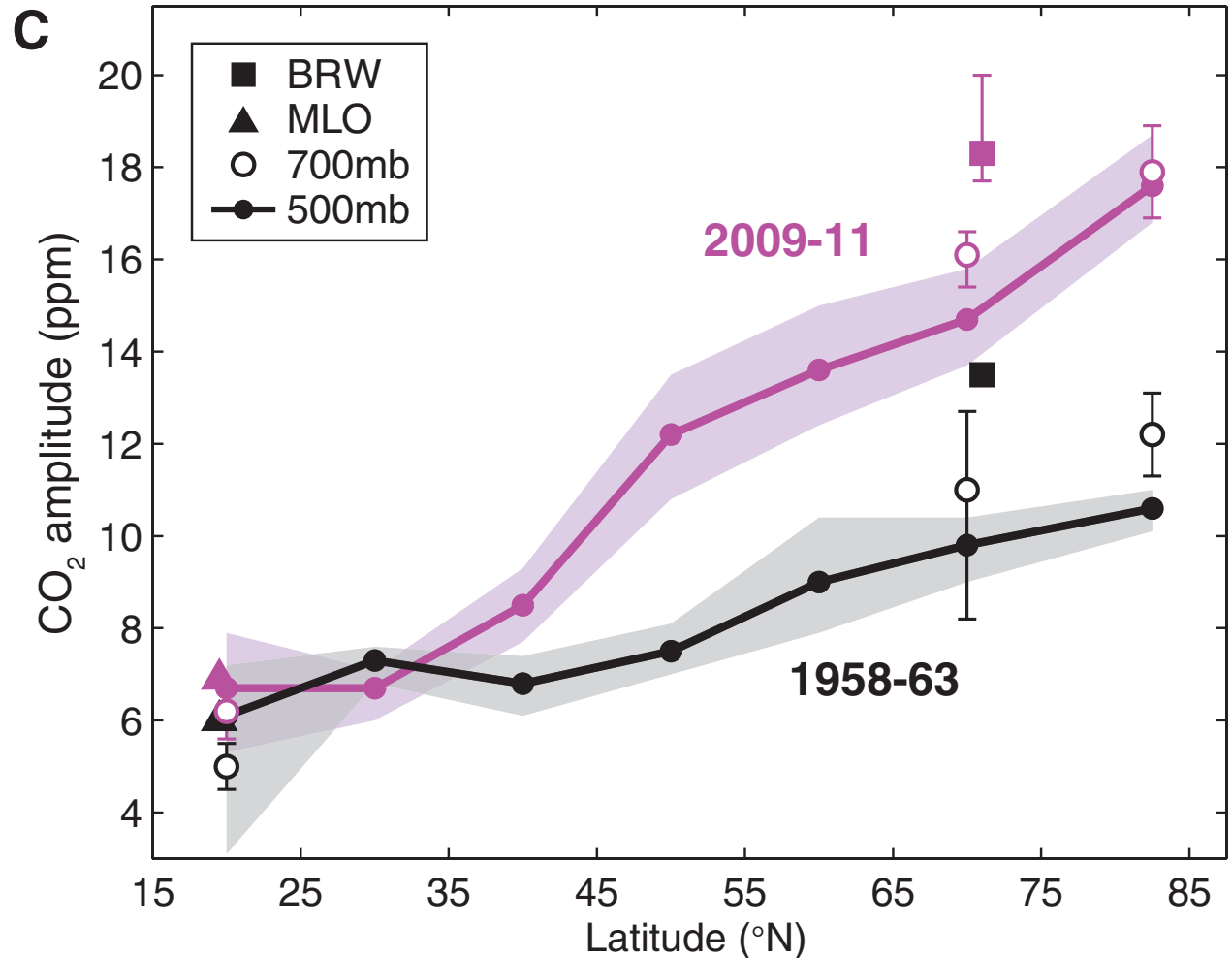
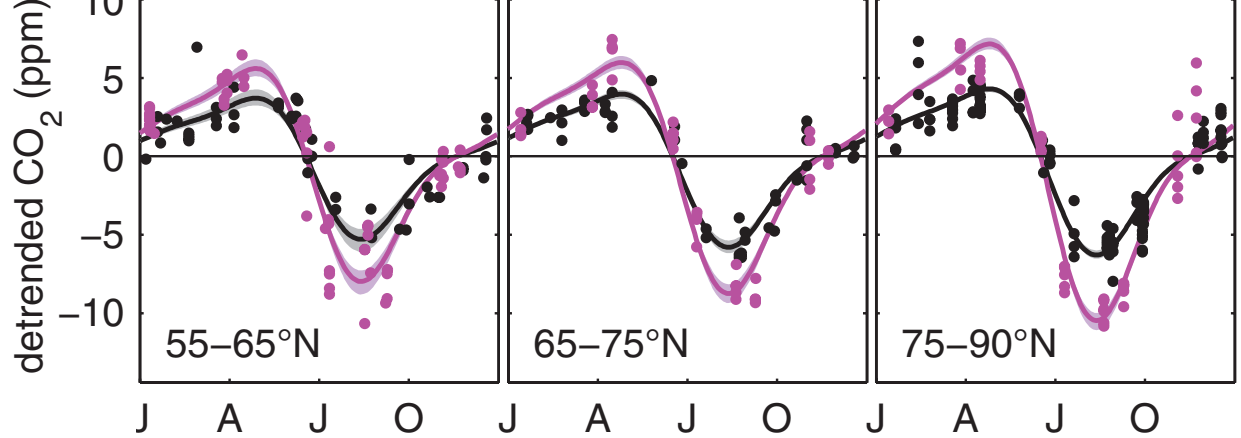
## Heutige Quellen und Senken des CO<sub>2</sub>



- CO<sub>2</sub> Düngeeffekt
- Erwärmung
- nachwachsende Wälder
- Stickstoff-Düngung

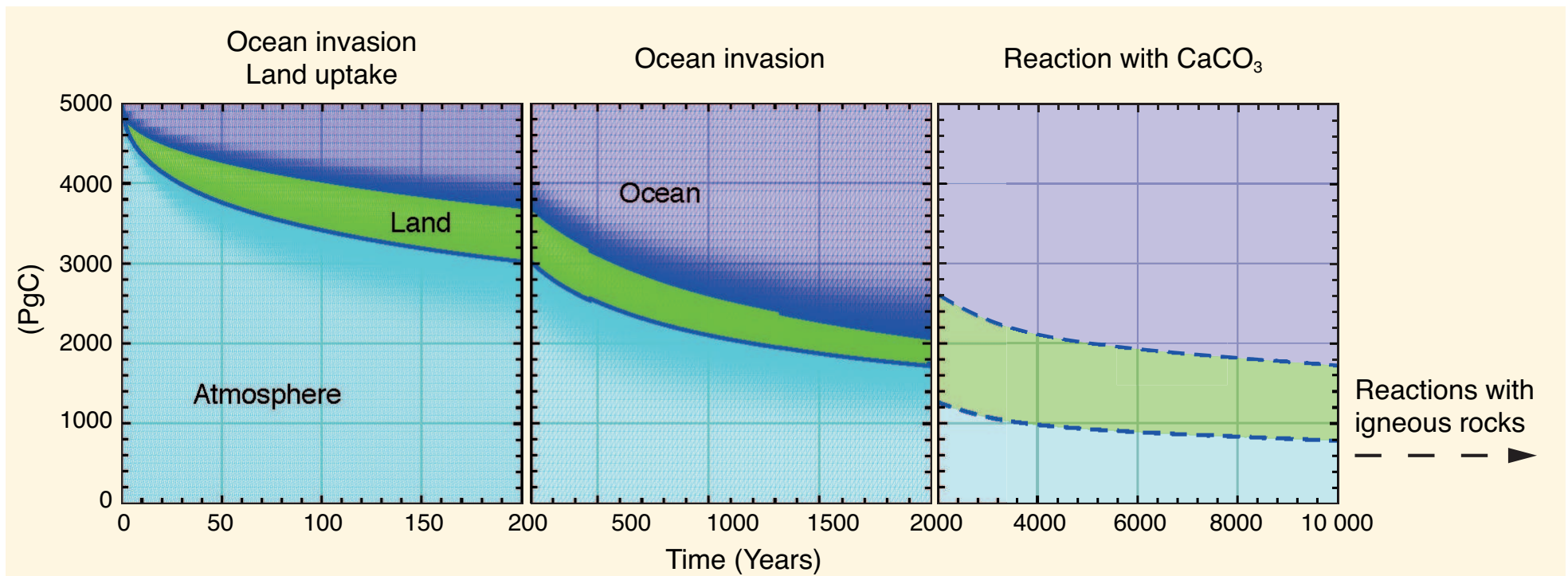
# Atmen der Landbiosphäre:

Zunahme des Jahresgangs des atmosphärischen CO<sub>2</sub> nördlich von 50N um fast 50% während der letzten 50 Jahre





# Wie lange verbleibt das emittierte CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre?

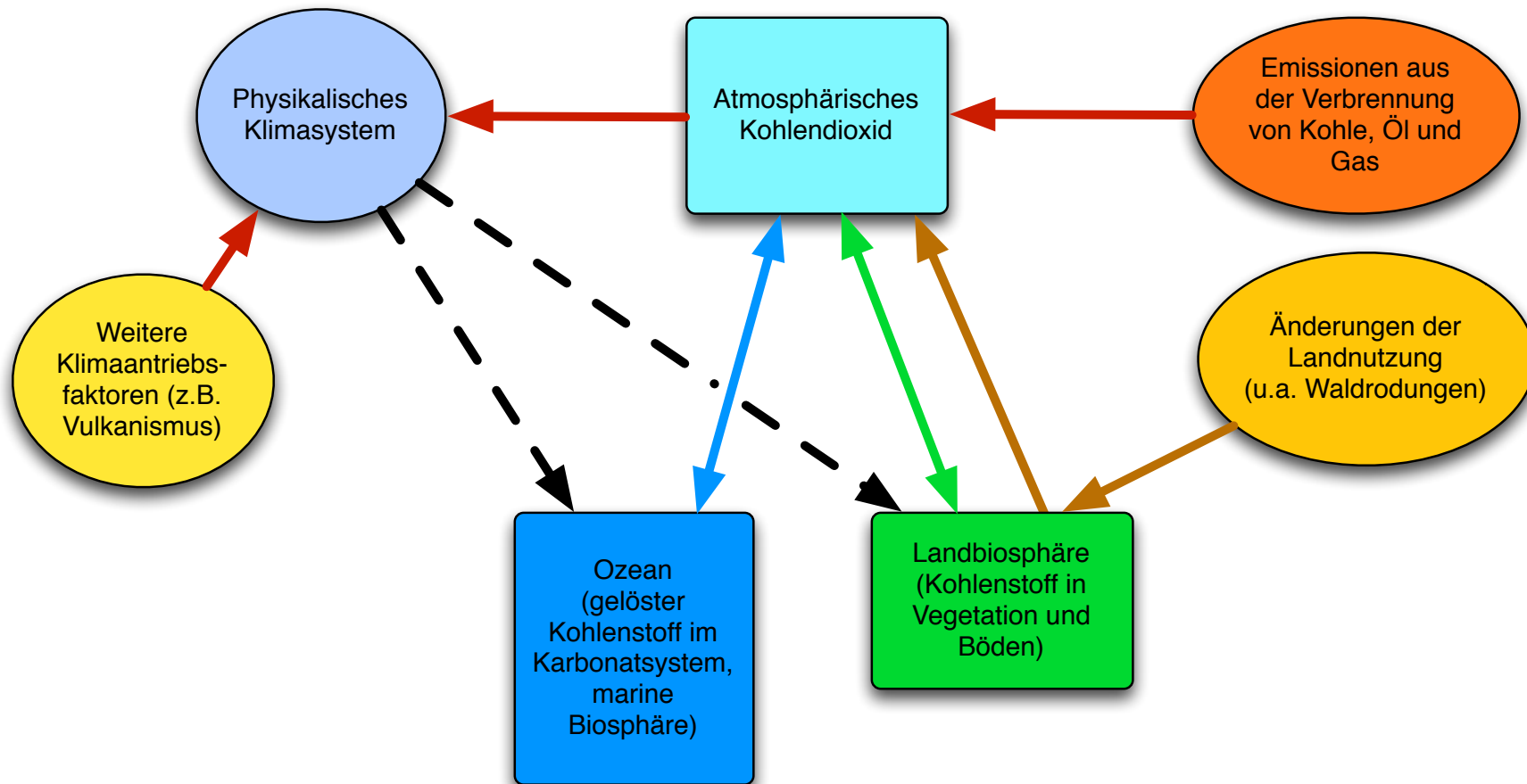


# Rückkopplung Klimasystem - globaler Kohlenstoffkreislauf

Klimasystem

Kohlenstoffkreislauf

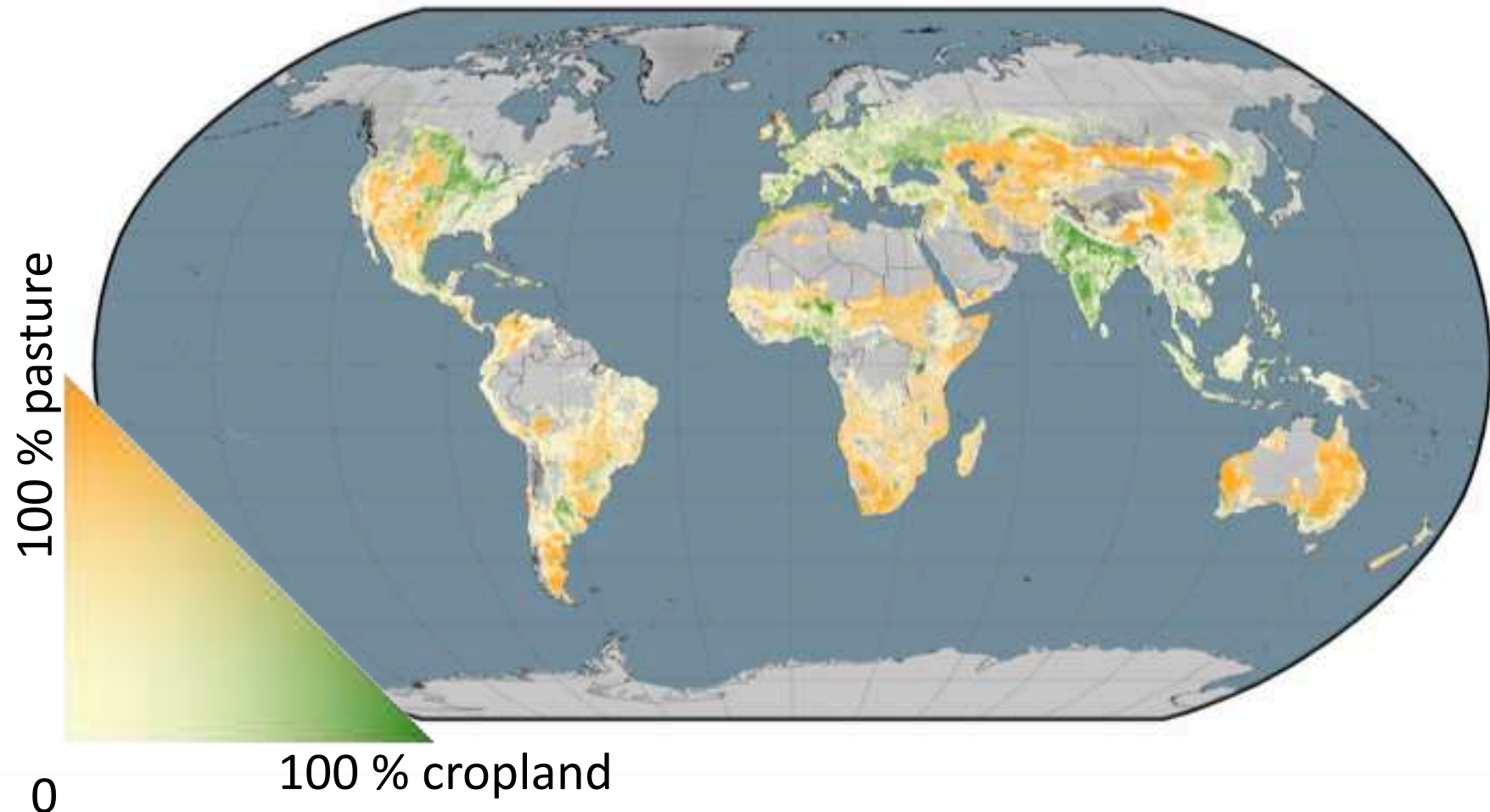
Anthroposphäre



# Einfluss des Menschen auf die terrestrischen Ökosysteme

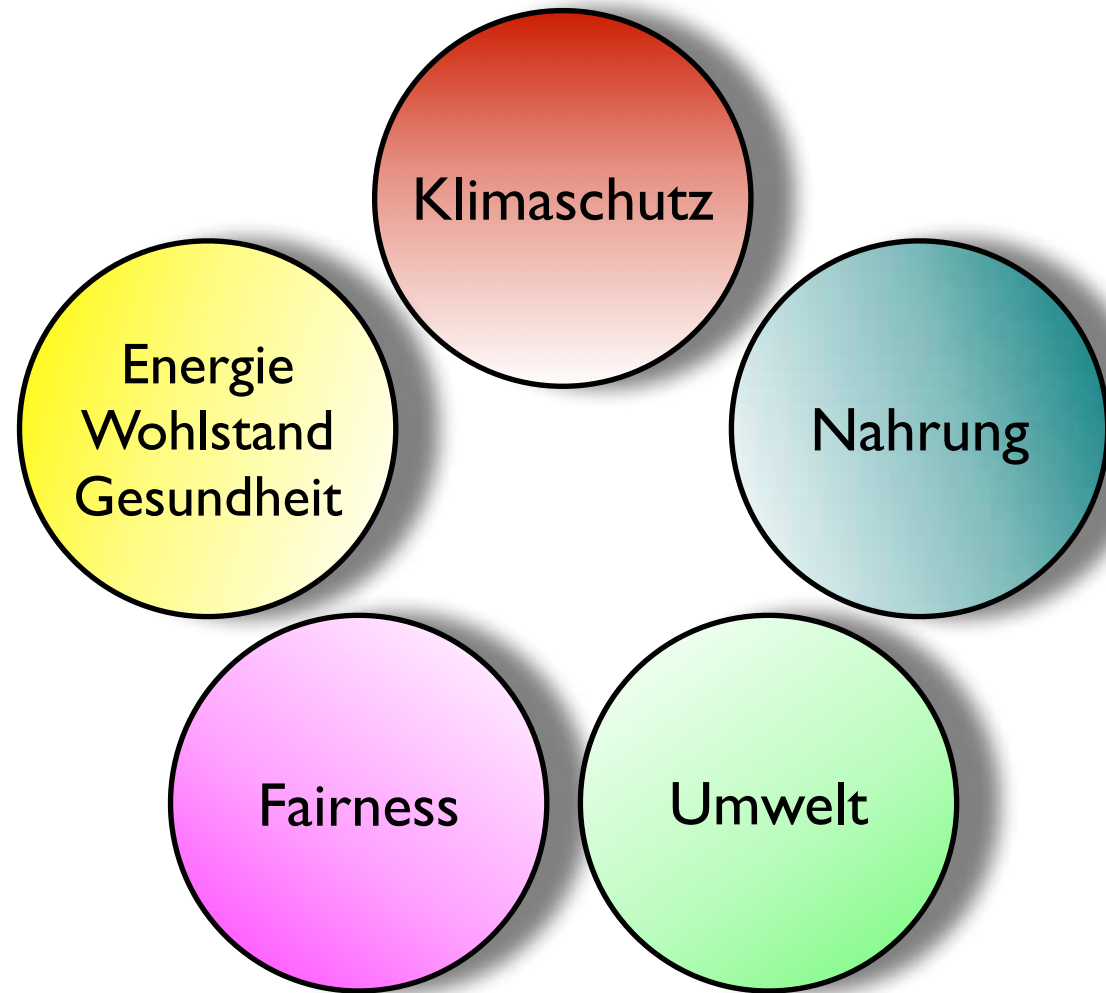
38% der globalen eisfreien  
Landoberflächen werden heute für  
Ackerbau und Weide genutzt

Weniger als 15% sind noch “naturnah”



# Klimaschutz und Kohlenstoff-Management können nicht in Isolation gesehen werden

Bedürfnisse einer  
wachsenden  
globalen  
Bevölkerung



Wissenschaftler, “Honest Brokers”, können nur Fakten und  
Konsequenzen erläutern,  
Lösungen müssen von allen gesucht und getragen werden!