

# Die Bedeutung des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) für das Klima

Dr. Christina Endler

SÜDDEUTSCHES KLIMABÜRO / KIT-ZENTRUM KLIMA UND UMWELT

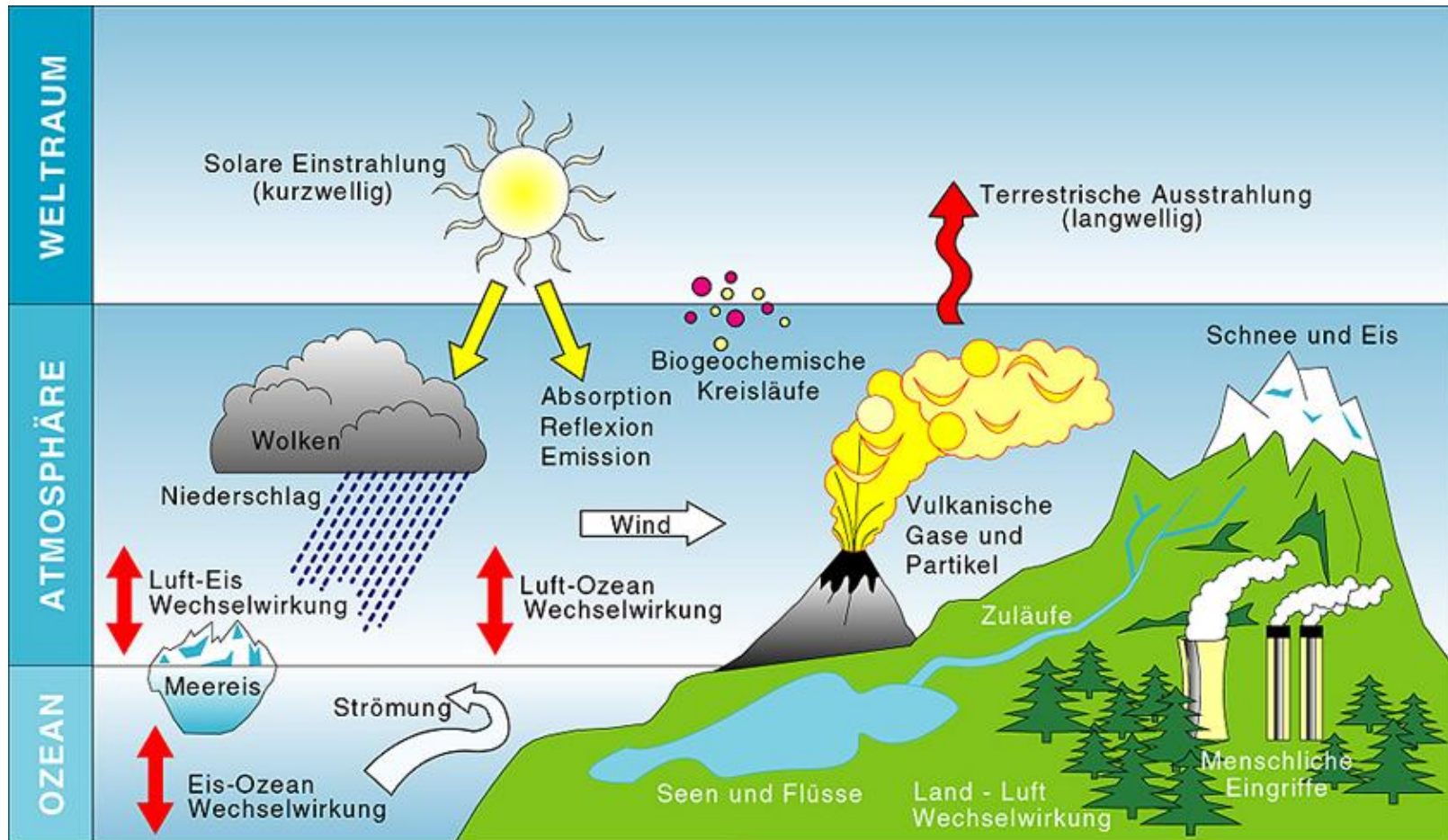


- Was macht das CO<sub>2</sub> in unserer Atmosphäre?
  - Wie hat sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Laufe der Jahrtausende entwickelt und warum?
    - Mit welchen Folgen/Risiken müssen wir rechnen?
      - Gibt es Möglichkeiten, diese Folgen/Risiken einzugrenzen?

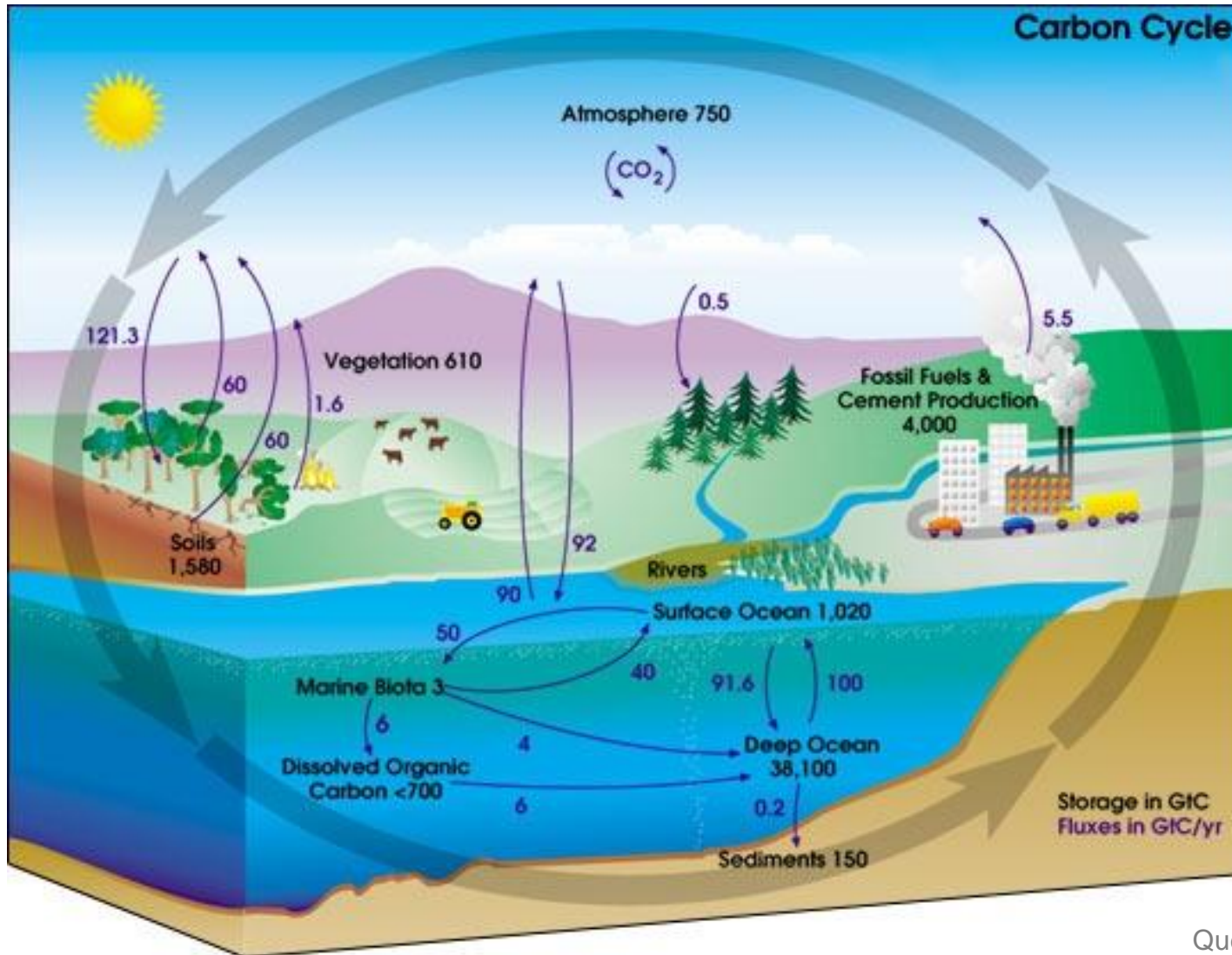


# Was ist überhaupt Klima?

*...ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Antriebsfaktoren*



# Kohlenstoffkreislauf



- 4 CO<sub>2</sub>-Hauptspeicher
- Atmosphäre
- Biosphäre
- Ozean
- Lithosphäre

Quelle: NASA Earth Observatory



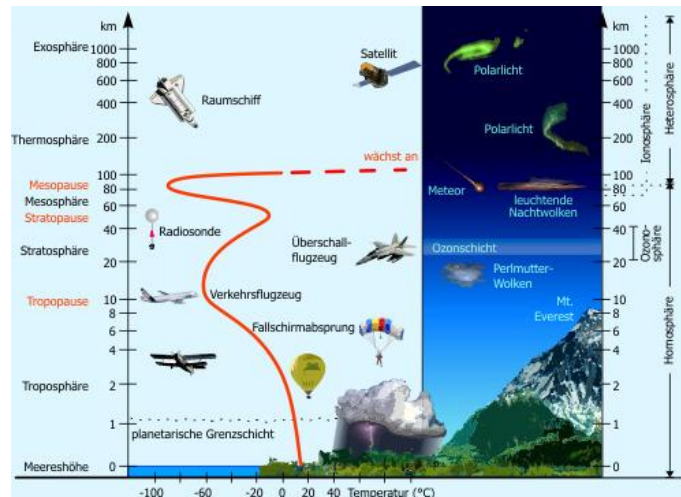
# Was macht das CO<sub>2</sub> in unserer Atmosphäre?



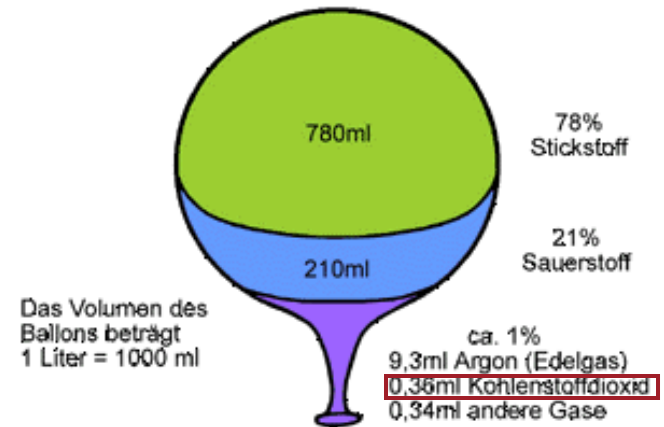
Foto: Bernhard Mühr

# CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre

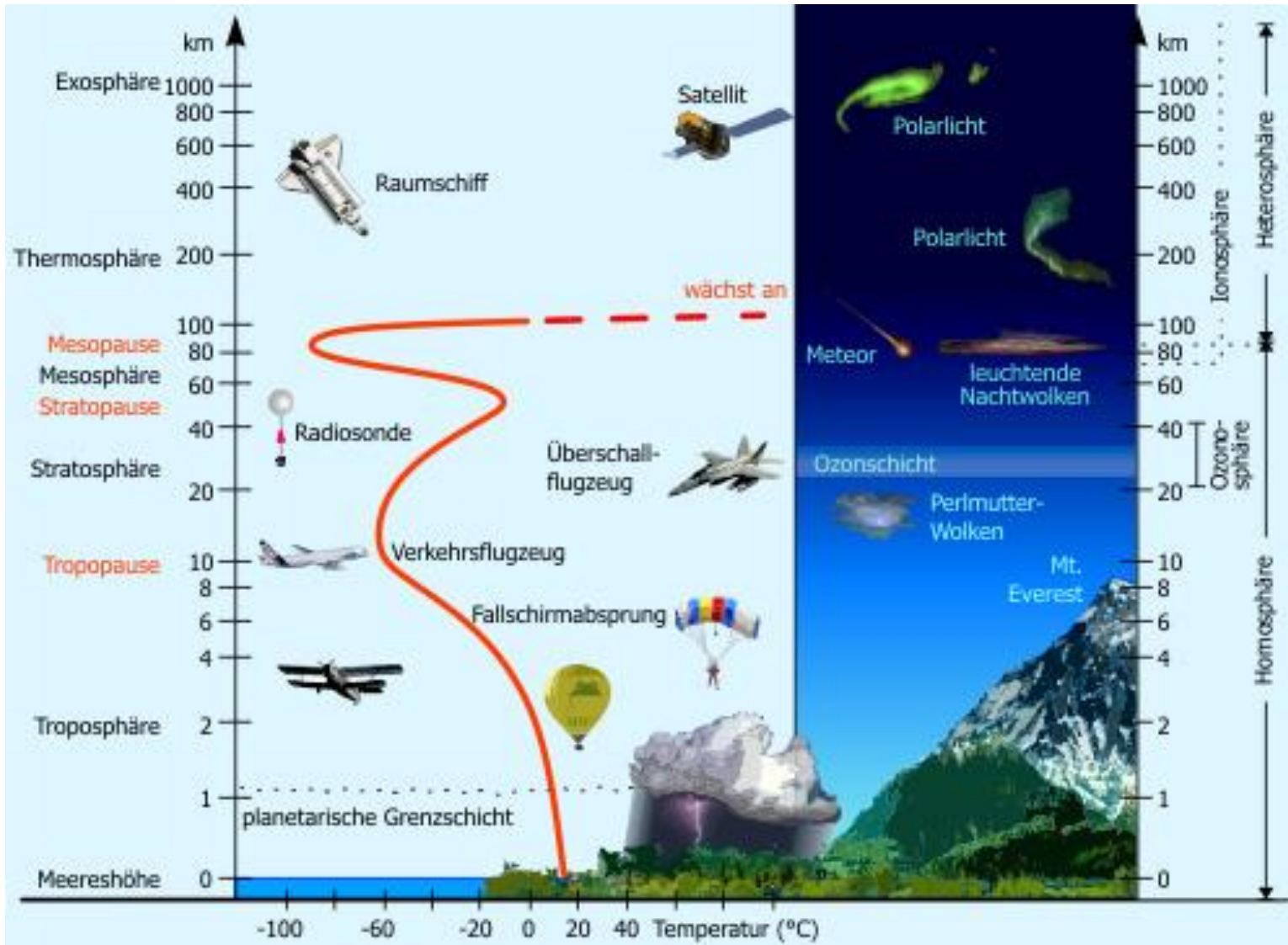
- Atmosphärisches Gas mit ~0,03 %-Anteil in der Luft
- Innerhalb der Atmosphäre gut durchmischt, mit einem derzeitigem Wert von 380 ppm
- Ein Treibhausgas
  - Natürlich
  - Anthropogen
- Einfluss auf Troposphäre und Stratosphäre



## Zusammensetzung der Luft



# Aufbau der Atmosphäre

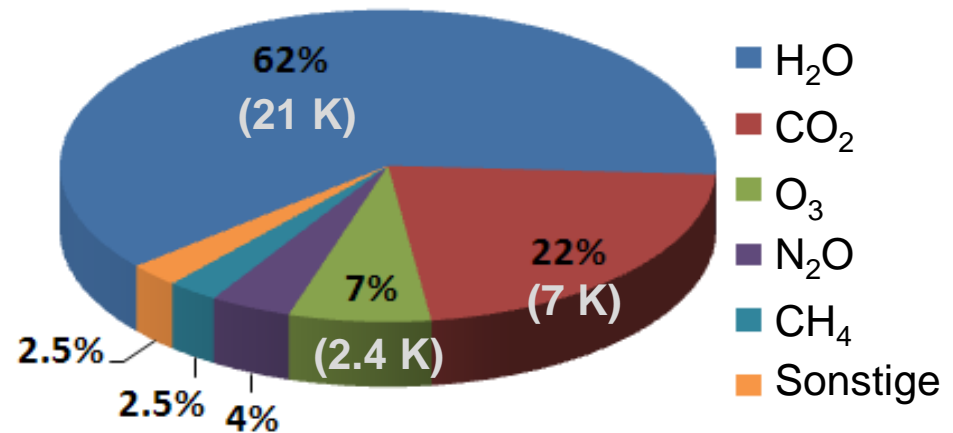


# Der natürliche Treibhauseffekt

$$\Delta T = +33K$$

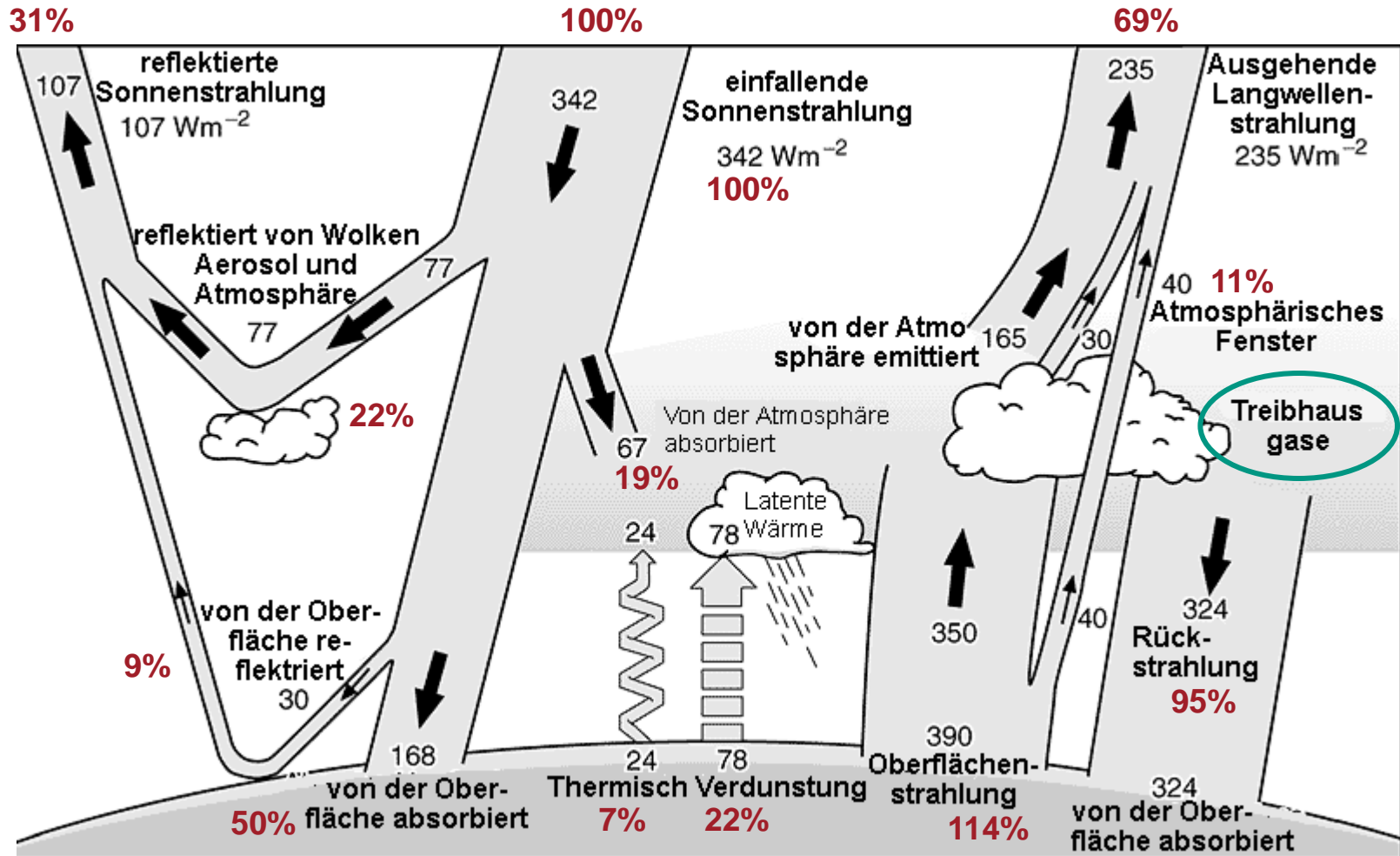


- Transmission solarer Strahlung
- Absorption terrestrischer Strahlung



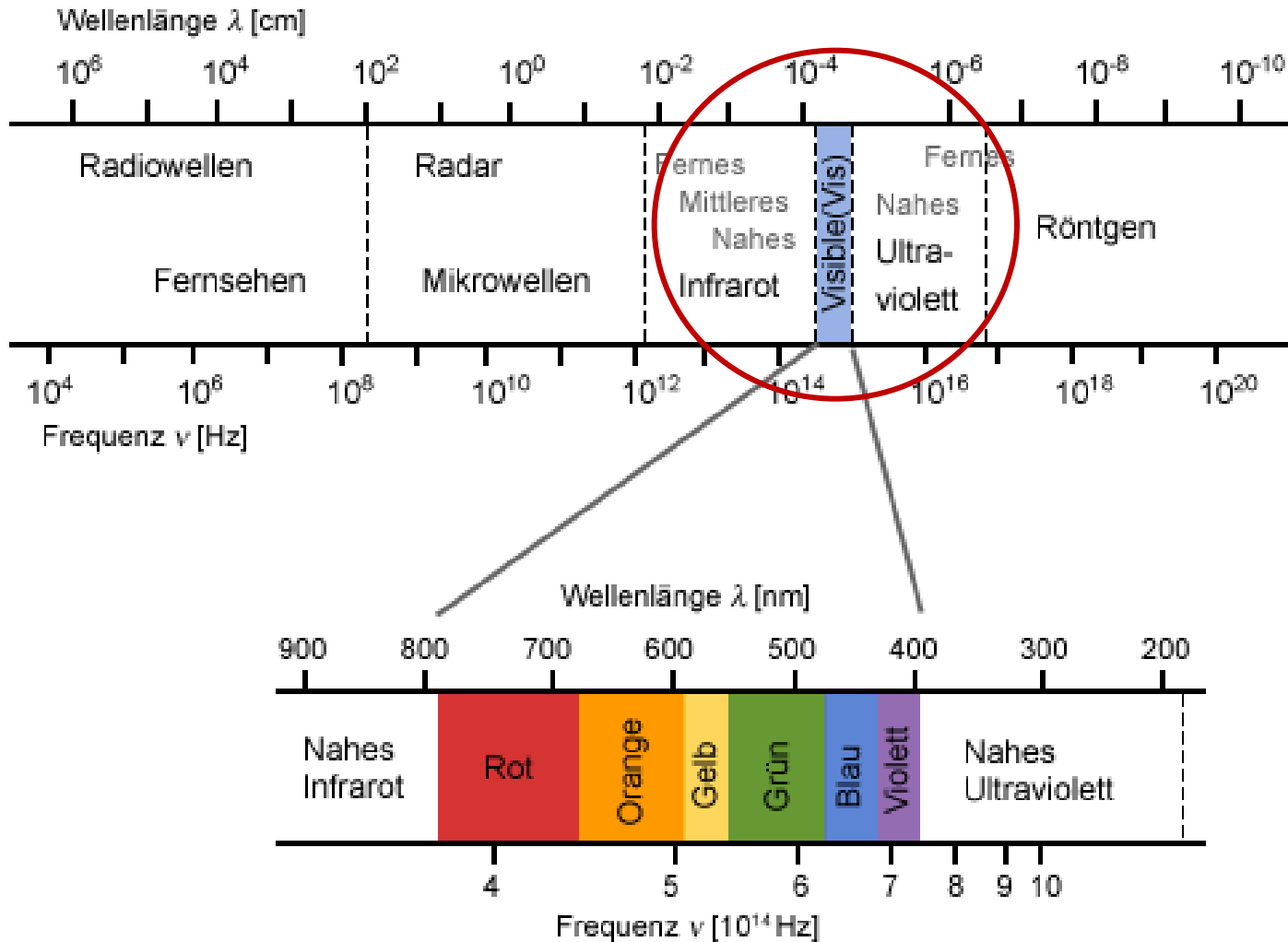


Treibhausgas	Vorkommen 1750	Vorkommen 2005	Verweil- dauer (a)	Treibhauspotenzial
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	280 ppm	379 ppm	50-200	1
Methan CH <sub>4</sub>	700 ppb	1774 ppb	12	25
Lachgas N <sub>2</sub> O	270 ppb	319 ppb	114	298

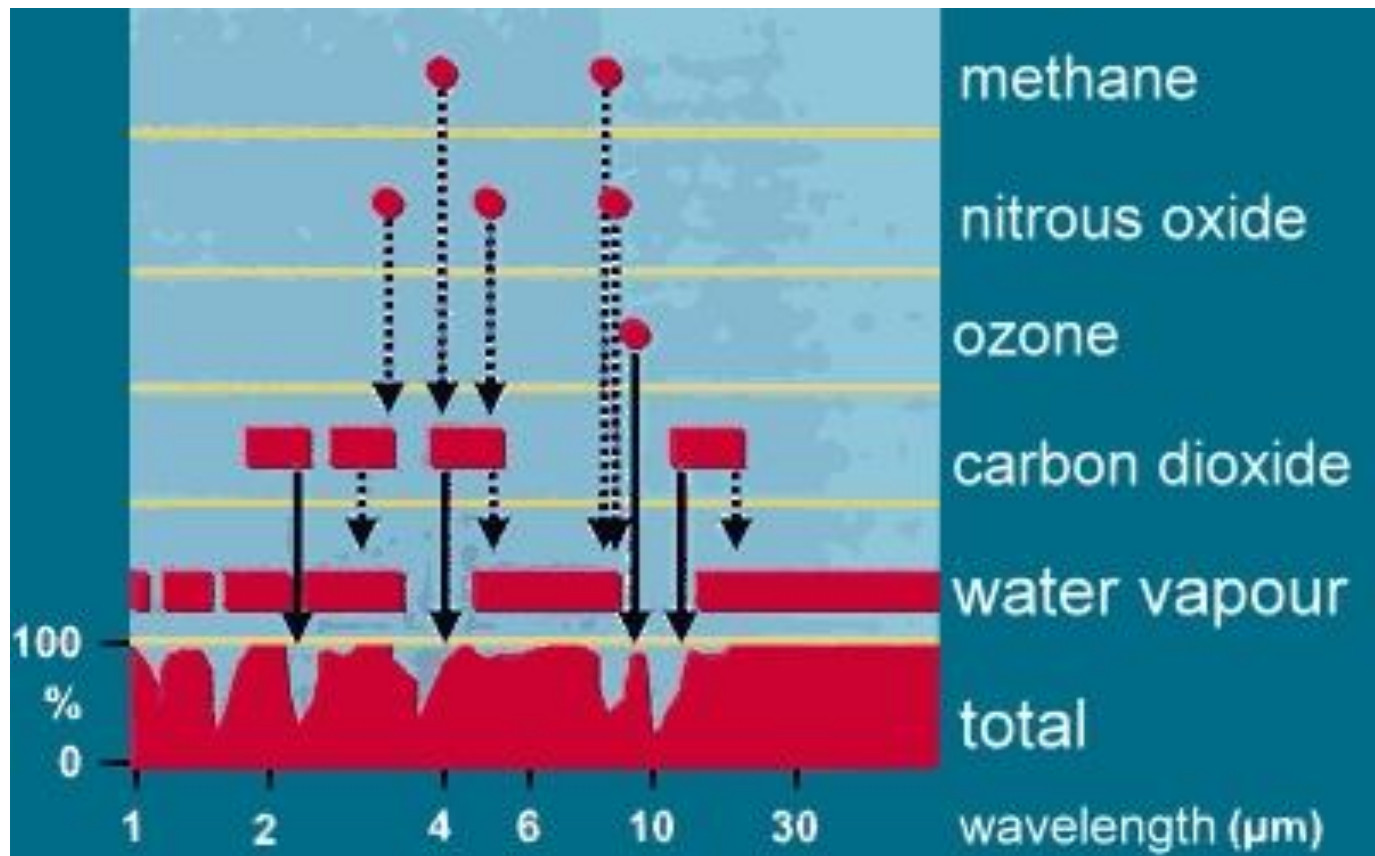
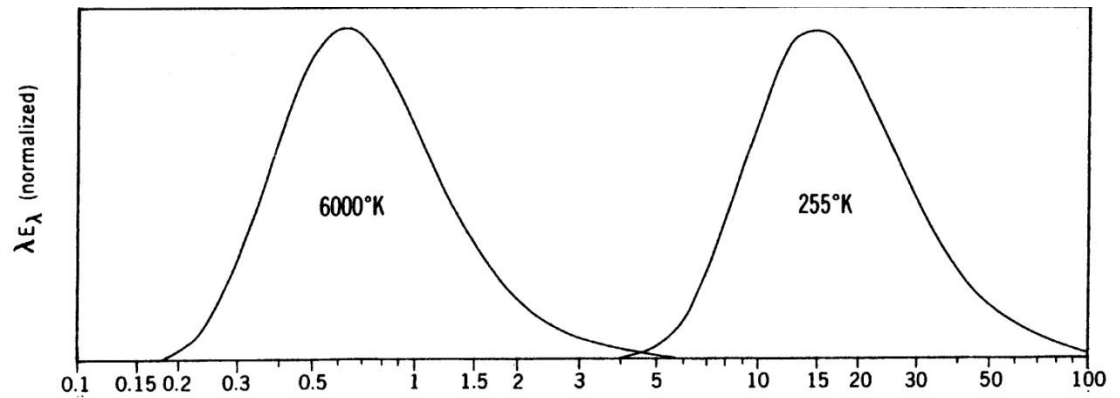


**Treibhausgase sind wie ein Pullover, d.h. sie produzieren nicht mehr Energie, sondern halten diese fest**

# Elektromagnetisches Spektrum



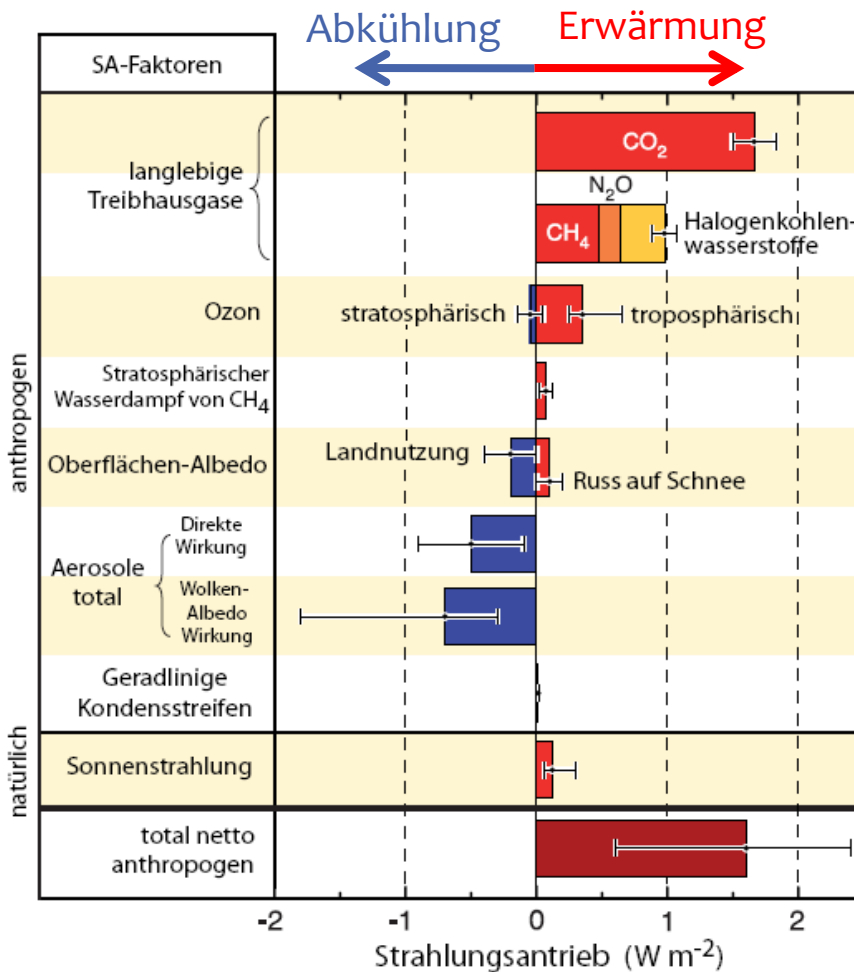
# Absorptionsbanden



Quelle: Klimawebseite des Deutschen Museums  
Peixoto und Oort (1992)



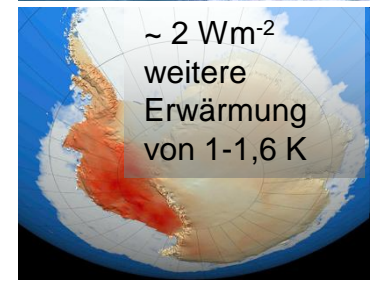
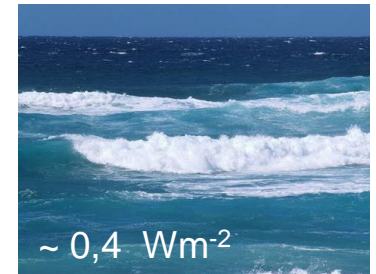
# Strahlungsantriebe



CO<sub>2</sub>: +1,66 Wm<sup>-2</sup>  
 CH<sub>4</sub>: +0,48 Wm<sup>-2</sup>  
 N<sub>2</sub>O: +0,16 Wm<sup>-2</sup>  
 Halogenkohlenwasserstoffe (auch FCKW): +0,34 Wm<sup>-2</sup>  
**+2,64 Wm<sup>-2</sup>**

...  
 Aerosole: -0,5 Wm<sup>-2</sup>  
 -0,7 Wm<sup>-2</sup>

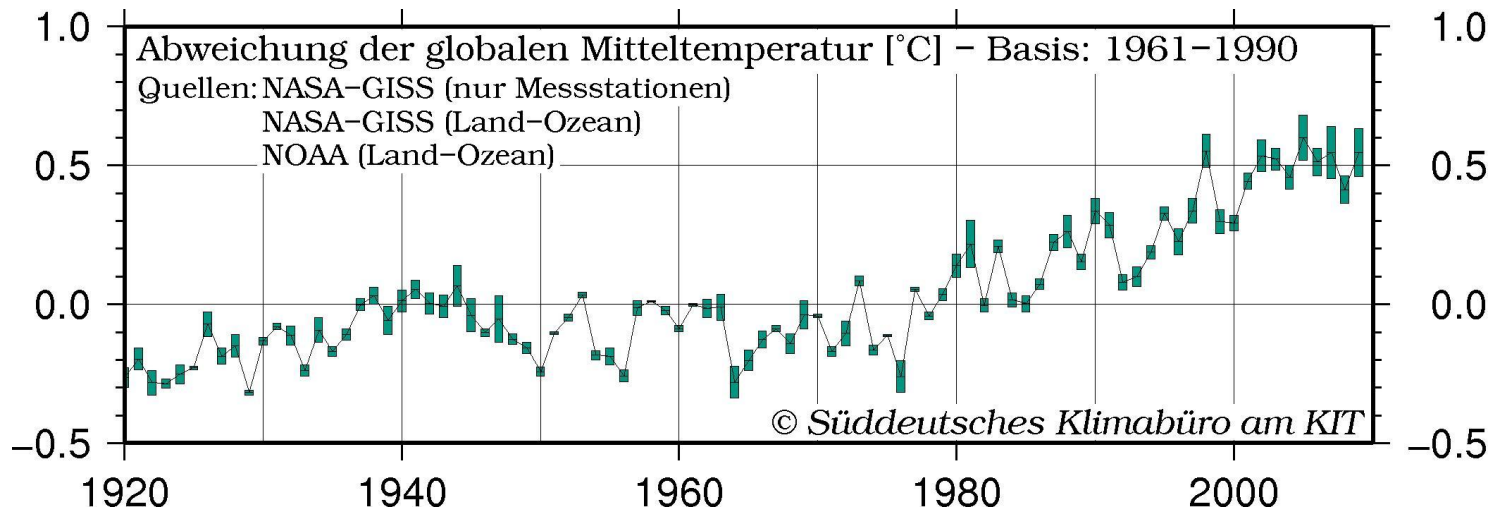
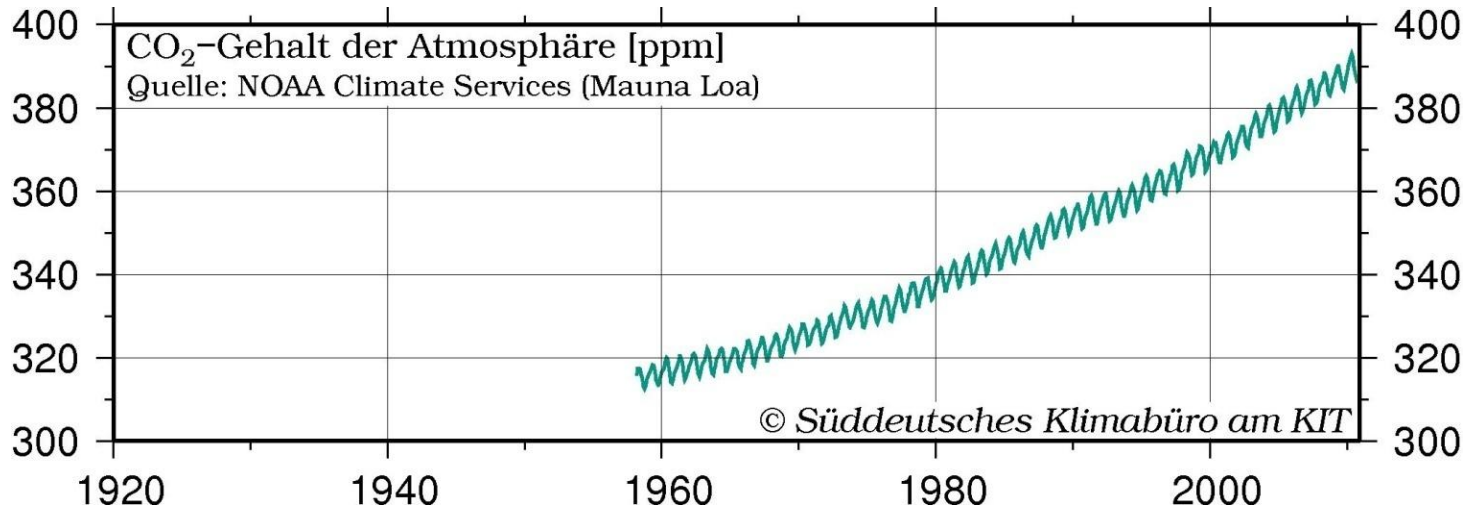
...  
 Sonne: +0,12 Wm<sup>-2</sup>  
 Σ: +1,6 Wm<sup>-2</sup>



Der **Strahlungsantrieb** ist ein Maßstab für den Einfluss, den ein einzelner Faktor auf die Veränderung des Strahlungshaushalts der Atmosphäre hat

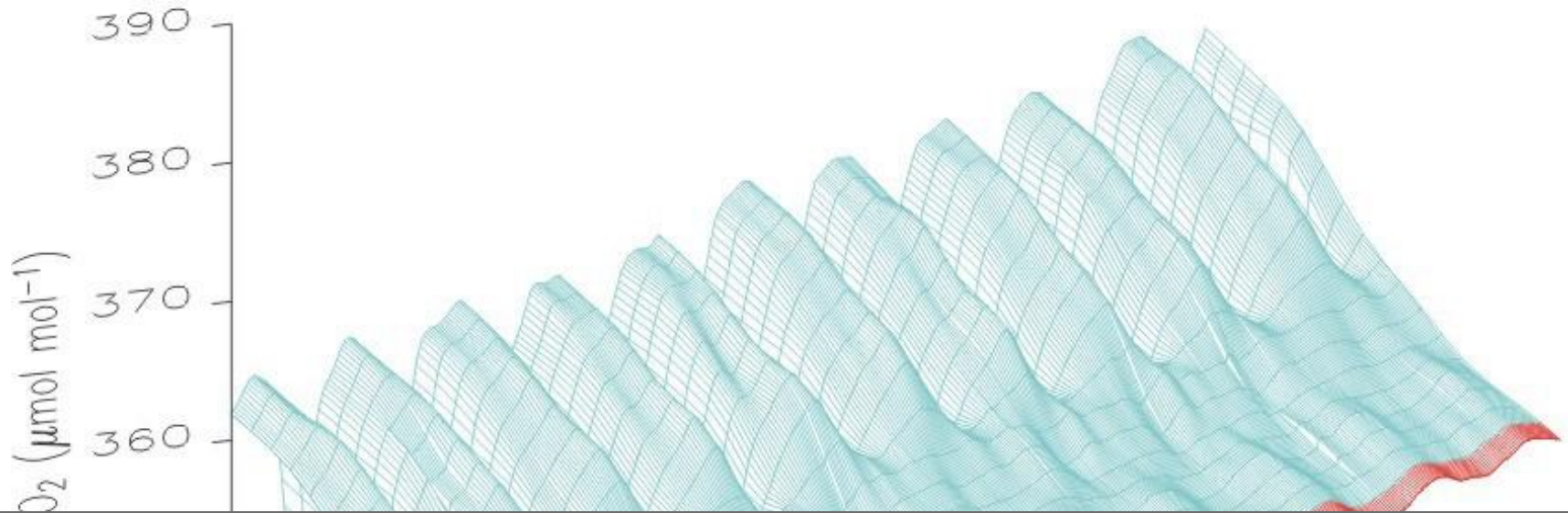
IPCC (2007)

# Entwicklung des CO<sub>2</sub> (1958-2000)

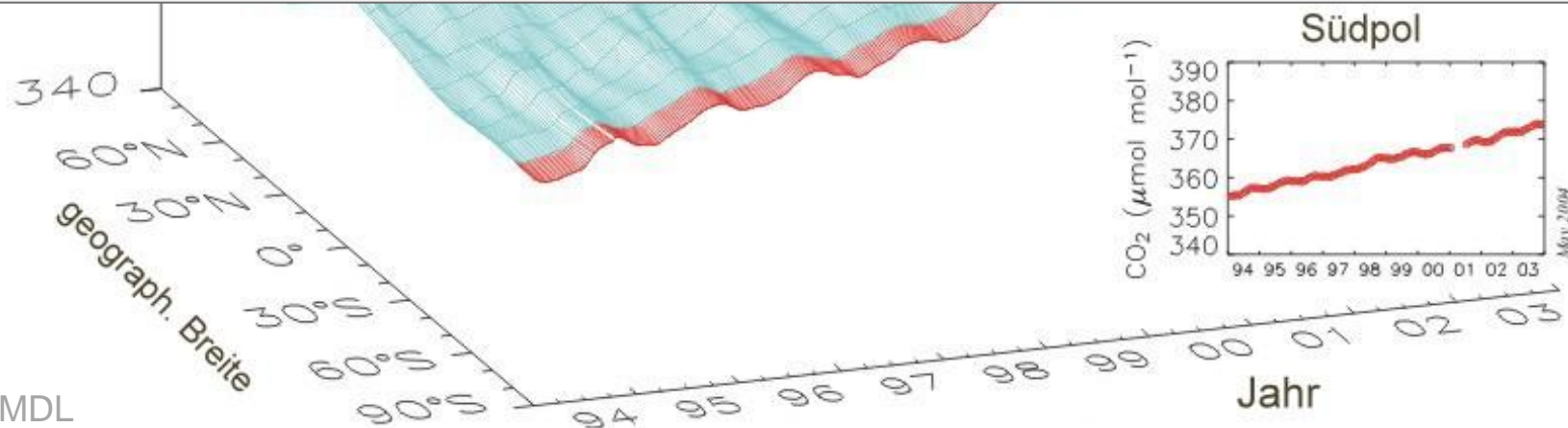


# Globale Verteilung von Kohlendioxid

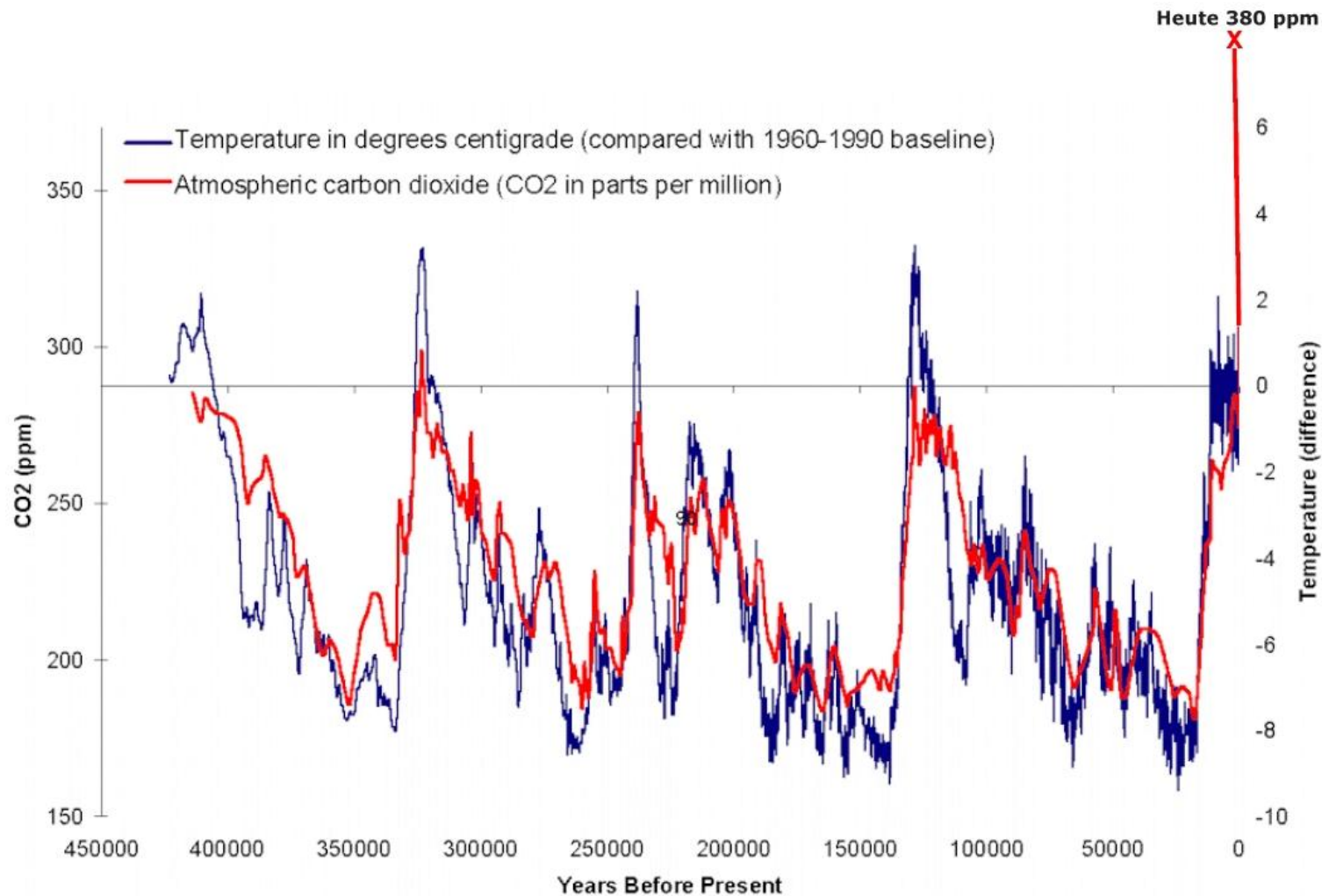
## NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases



Höhere Werte: Ende der Heizperiode + Wachstumspause der Pflanzen im Winter  
Niedrigere Werte: Ende der Wachstumsperiode (CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Pflanzen)



# Entwicklung des CO<sub>2</sub> (letzte 420.000 Jahre)

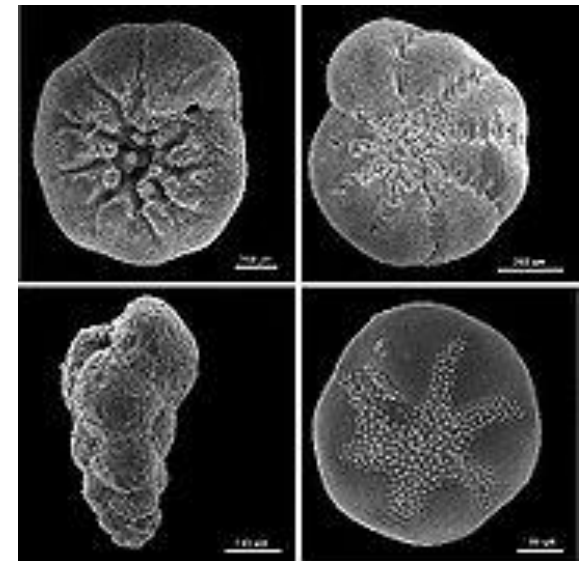
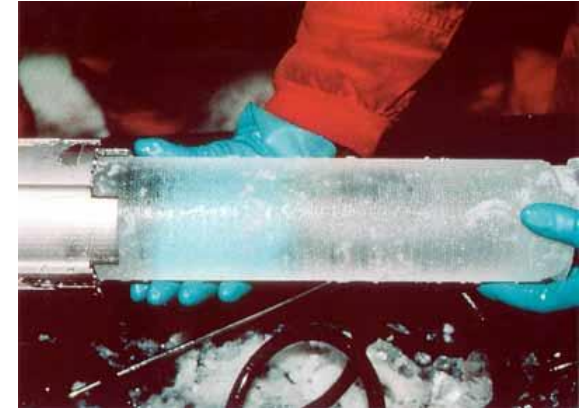


Quelle: World Data Center for Paleoclimatology, NOAA, Boulder



# Klimaarchive

- Eisbohrkerne (z.B. Vostok) – Dokumentation des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre
- Rekonstruktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration der letzten 420.000 Jahre
- Temperaturrekonstruktionen aus dem Sauerstoff-Isotopenverhältnis (<sup>16</sup>O zu <sup>18</sup>O)
  
- Rekonstruktion des CO<sub>2</sub> vor 420.000 Jahren mittels Kalkschalen von einzelligen Tieren (Foraminiferen, Borgehalt)



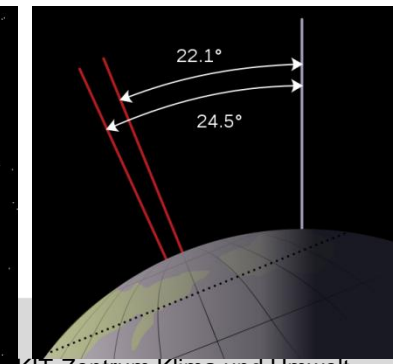
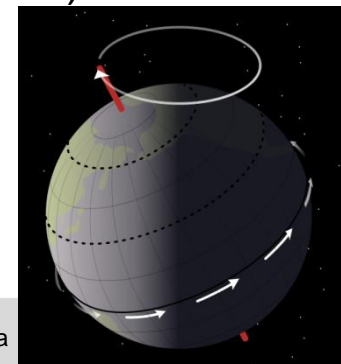
# Welche Ursachen können eine Rolle spielen?



Foto: Bernhard Mühr

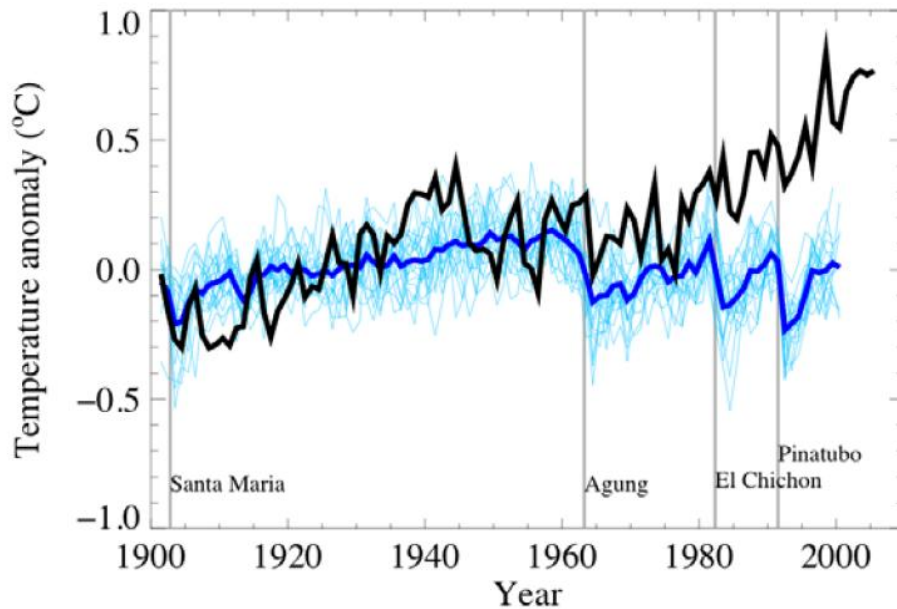
# Klimaänderungen in der Vergangenheit

- Schwankungen der globalen Mitteltemperatur in letzten Jahrmillionen zwischen 9 und 16 °C
  - Änderung der Erdbahnparameter (Milanković-Zyklen)
    - Exzentrizität (100.000 Jahre)
    - Neigung der Erdachse (41.000 Jahre)
    - Präzession der Erdrotationsachse (~26.000 Jahre)
  - Änderung der Solarkonstanten
  - Änderung der Erdoberfläche (Landnutzung, Kontinentaldrift)
  - Änderung des Stoffhaushaltes der Atmosphäre (z.B. Treibhausgaskonzentration, Aerosole)
  - Vulkanismus
  - Natürliche Klimaschwankungen (ENSO, NAO)

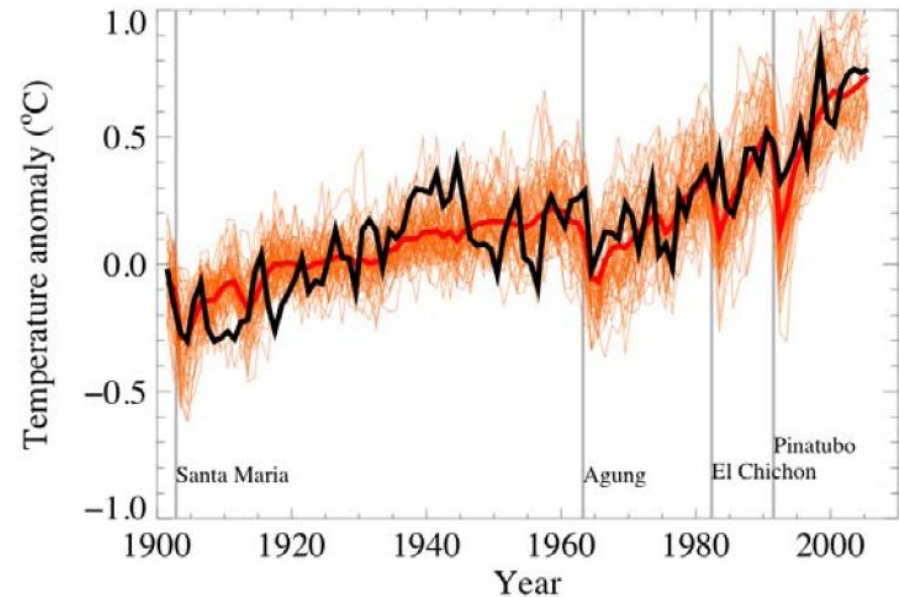


# Der anthropogene Treibhauseffekt

Simulationen mit natürlichem Antrieb



Simulationen mit natürlichem und anthropogenem Antrieb



Quelle: IPCC(2007)

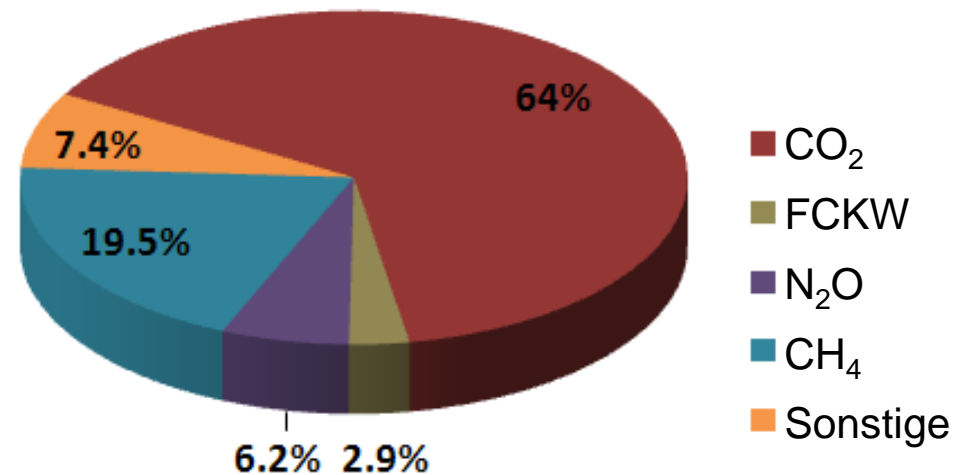


# Der anthropogene Treibhauseffekt

- Stetig steigende Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung
  - Verbrennung fossiler Energien
  - Entwaldung (→ Einfluss auf CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre)
  - Düngung (N<sub>2</sub>O)
  - Landwirtschaft (CH<sub>4</sub>, z.B. Kühe, Reisanbau)
  
- Seit 1750 bis zur Gegenwart:
  - Zunahme des CO<sub>2</sub> um 35 %
  - Zunahme des CH<sub>4</sub> um 148 %
  - Zunahme des N<sub>2</sub>O um 18 %

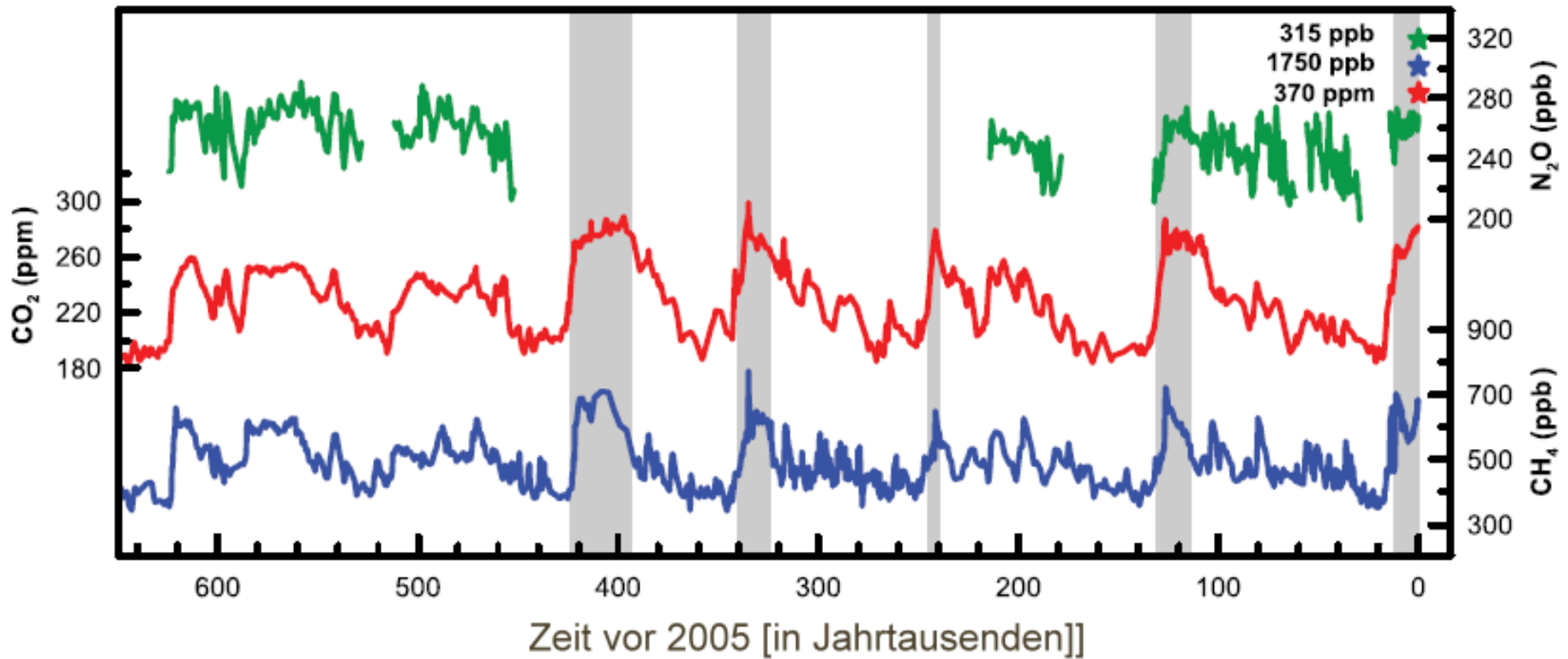


Veränderung in der Strahlungsbilanz  
Verstärkung des Treibhauseffektes



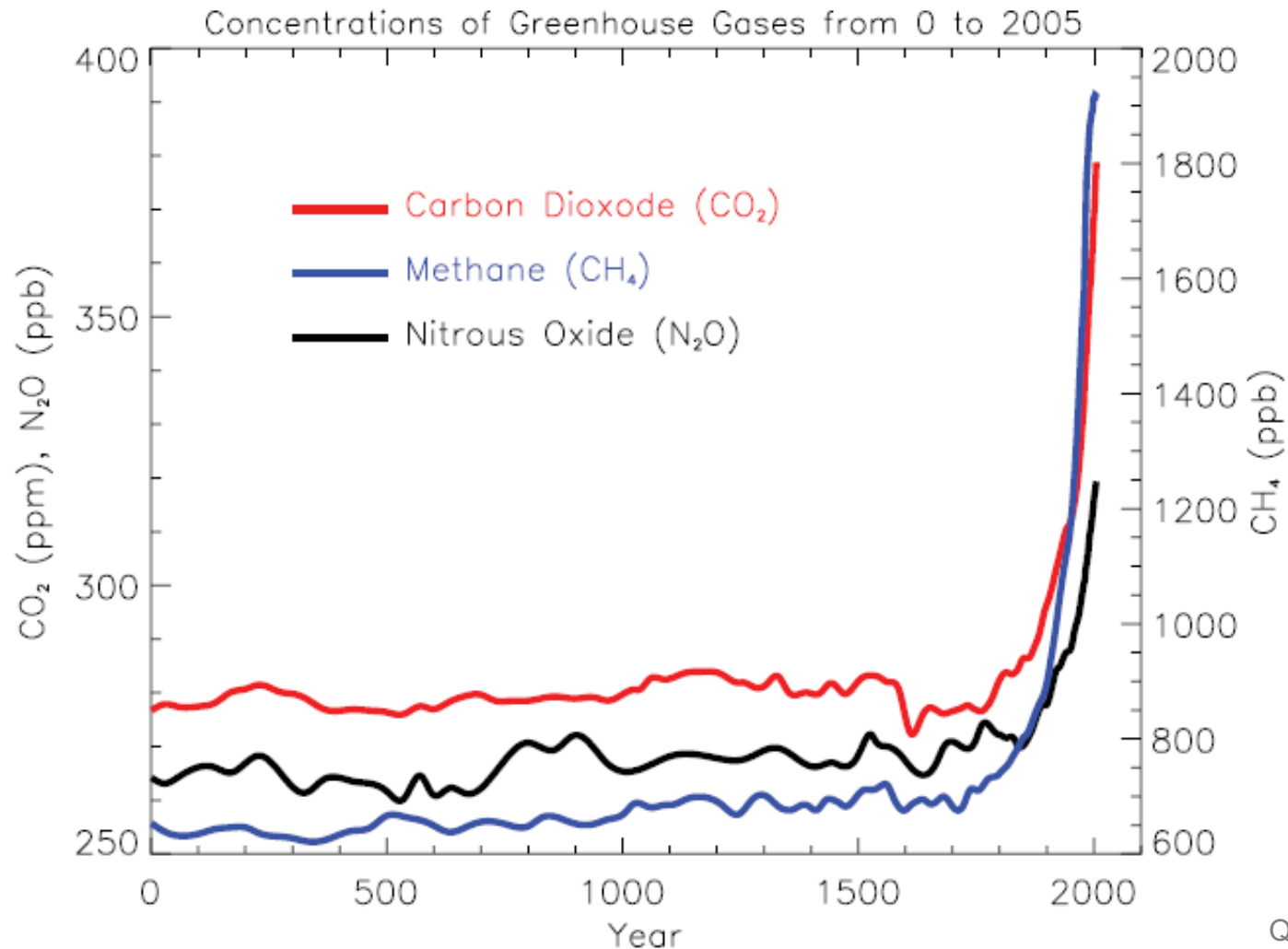
Quelle: BMU 2010  
IPCC 2007

# Entwicklung der Treibhausgase (letzte 650.000 Jahre)



Quelle: IPCC (2007)

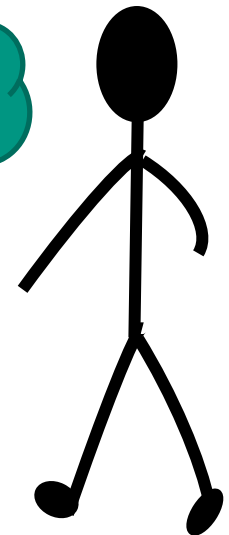
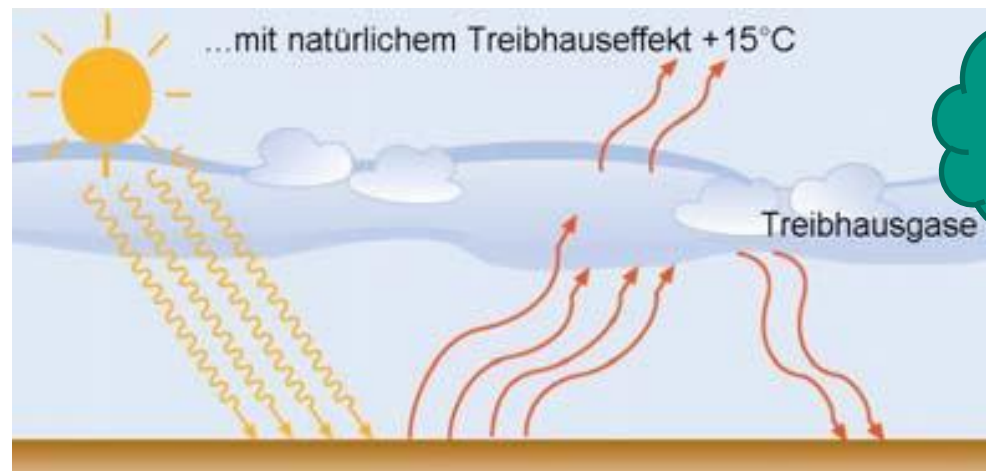
# Entwicklung der Treibhausgase (letzte 650.000 Jahre)



Quelle: IPCC (2007)

# Der anthropogene Treibhauseffekt

$$\Delta T = +33K$$



$$+0.7K$$

- Bei weiteren ungebremsten Entwicklung globaler Treibhausgase („business as usual“ ) mittlere Temperaturerhöhung bis zu 6 K bis 2100

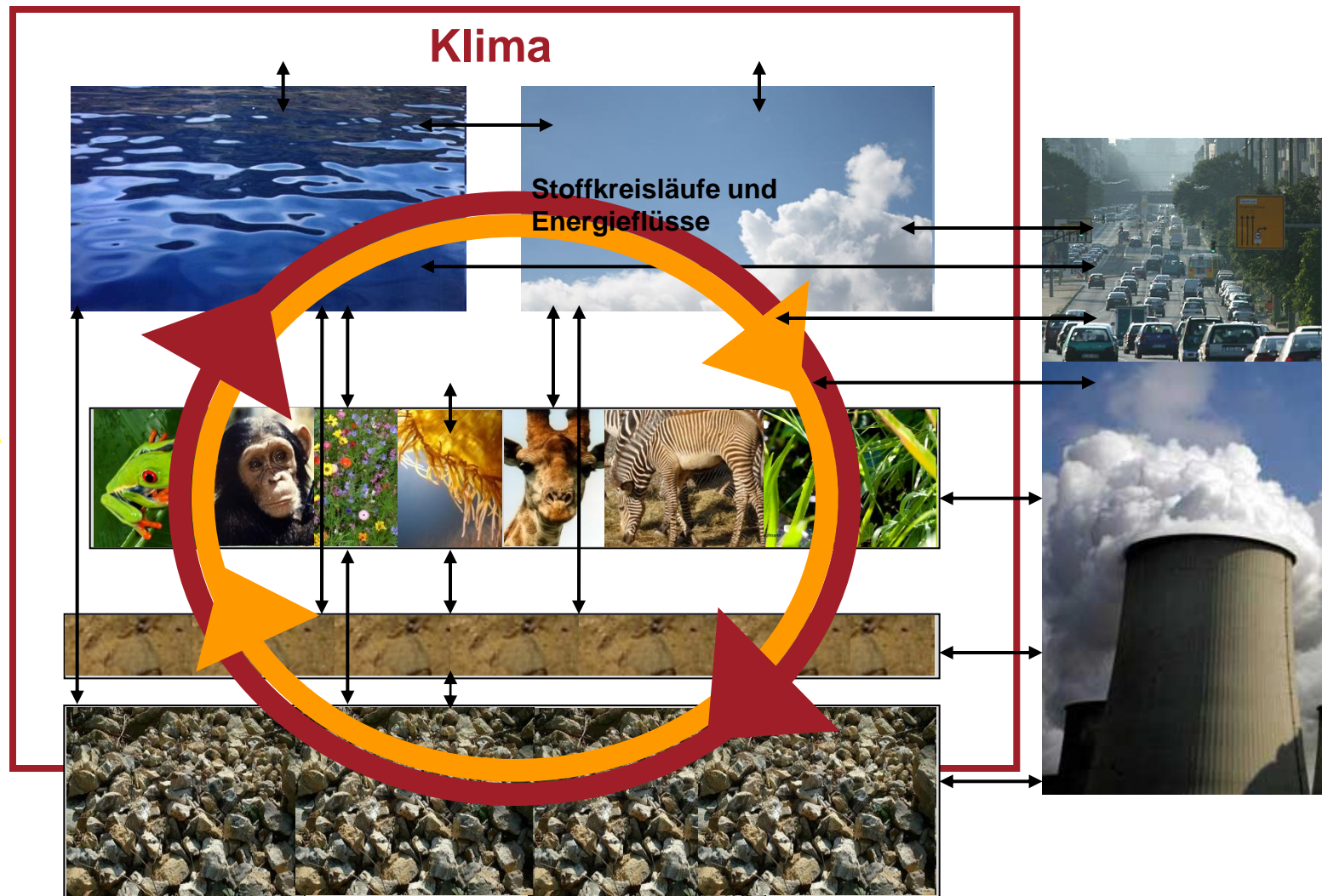
Quelle: IPCC (2007)

# Mit welchen Folgen/Risiken müssen wir rechnen?



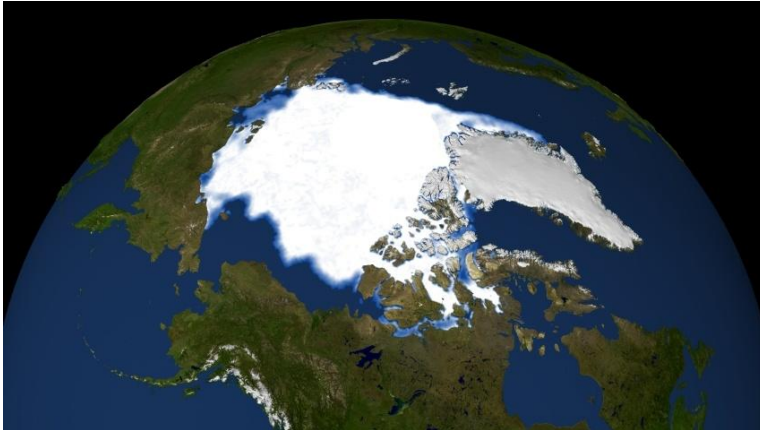
Foto: Bernhard Mühr



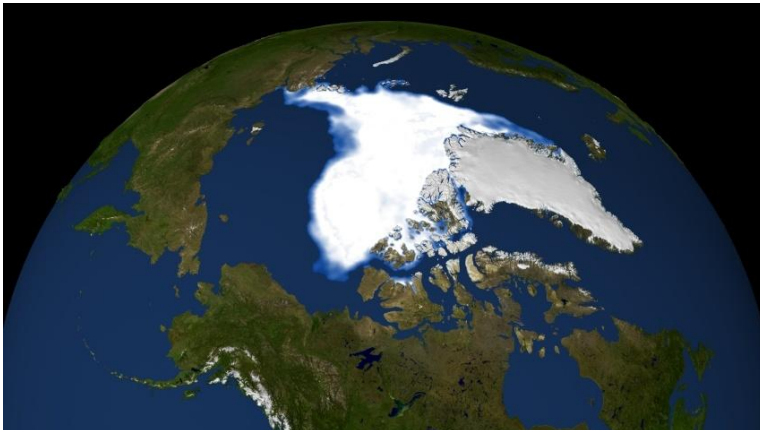


# Arktisches Meereis

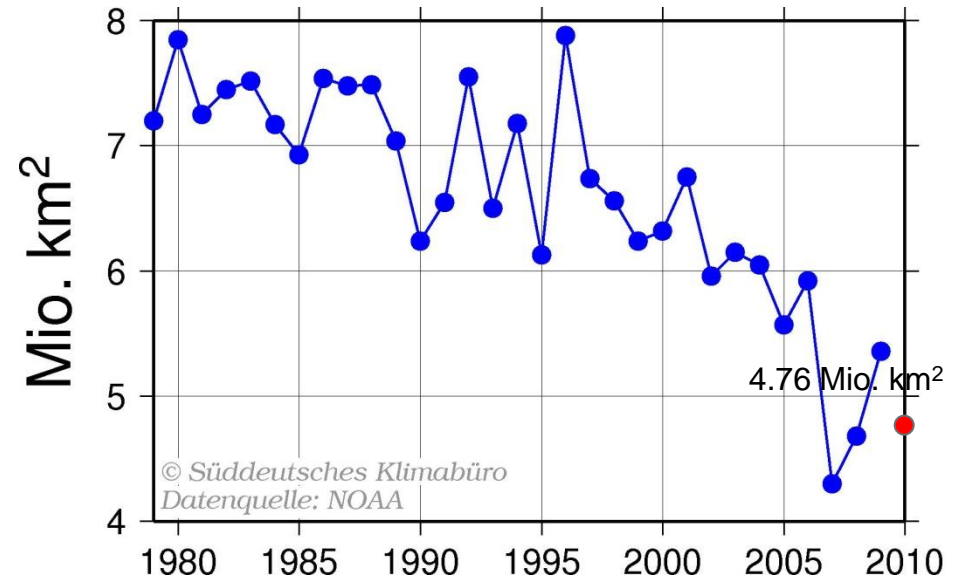
September 1979



September 2007



Meereisausdehnung in September

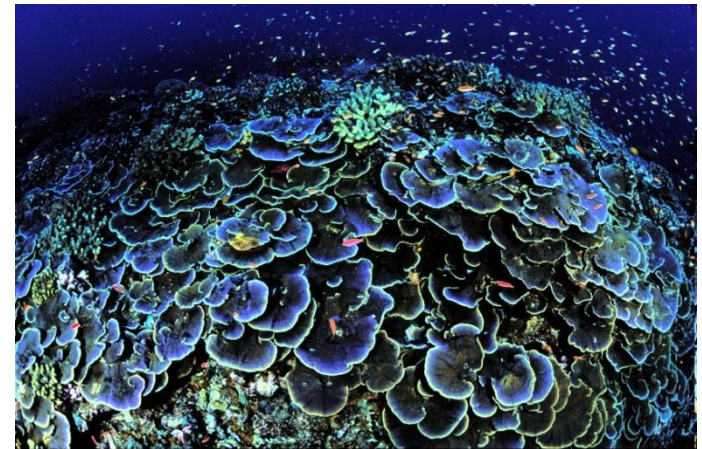


Eine Abnahme von **± 3 Mio. km<sup>2</sup>**

Das entspricht **3 Mal** der Landesfläche von **Deutschland und Frankreich** zusammen!

# Ozeane

- Meeresspiegelanstieg
  - 17 cm im 20. Jahrhundert
  - Seit Beginn der Satellitenmessungen (1993) mit doppelter Rate (3,4 cm/Jahrzehnt) zunehmend
- Veränderung der Ozean-Zirkulation, insbesondere Nordatlantik
- Abnahme der CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit
  - Südpolarmeer absorbierte seit 1981 pro Jahrzehnt 5-30 % weniger CO<sub>2</sub>
- Versauerung der Meere
  - Einfluss auf marine Ökosysteme
    - lösen beispielsweise Kalkschalen von Meeresbewohnern auf, besonders gefährdet: Kaltwasserkorallen





# Gletscher

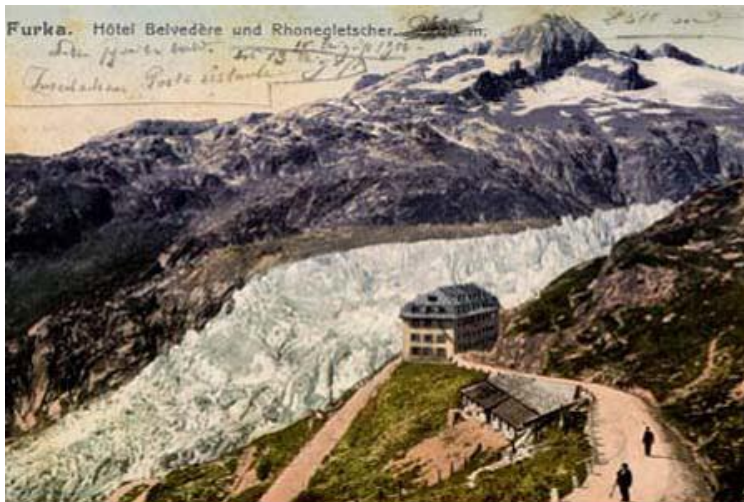


um 1900

Aletschgletscher (Schweiz)



2005



vor 1906

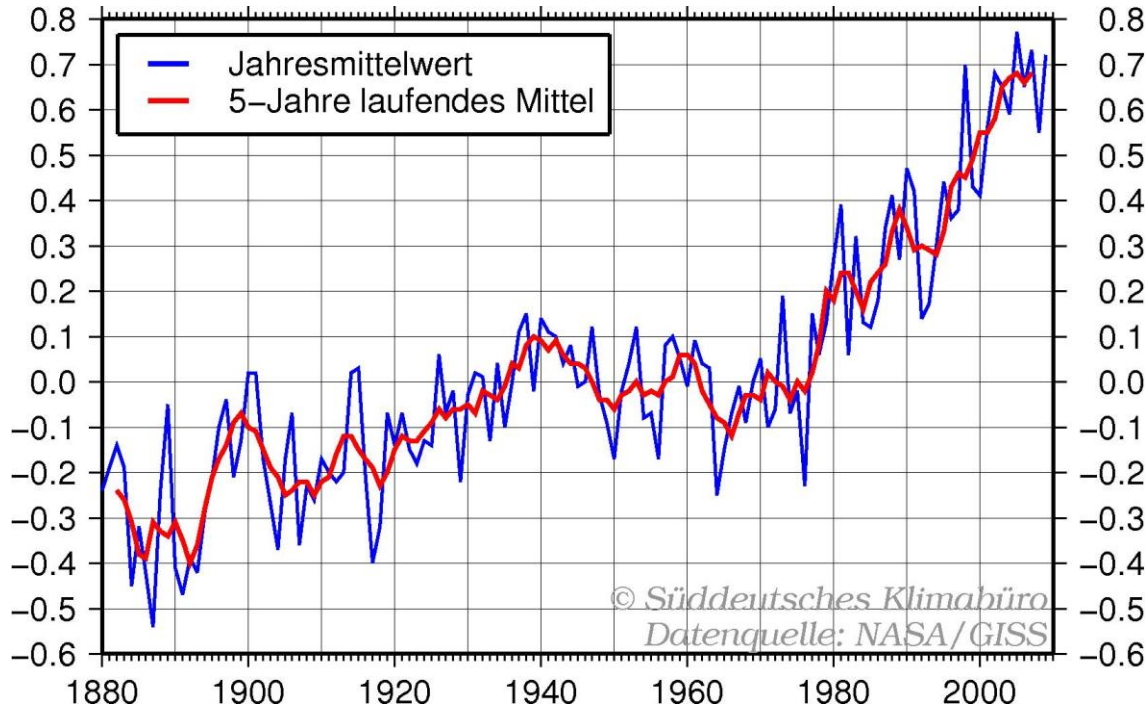
Rhonegletscher (Schweiz)

Quelle: [www.gletscherarchiv.de](http://www.gletscherarchiv.de)



2003

# Globaler Temperaturverlauf



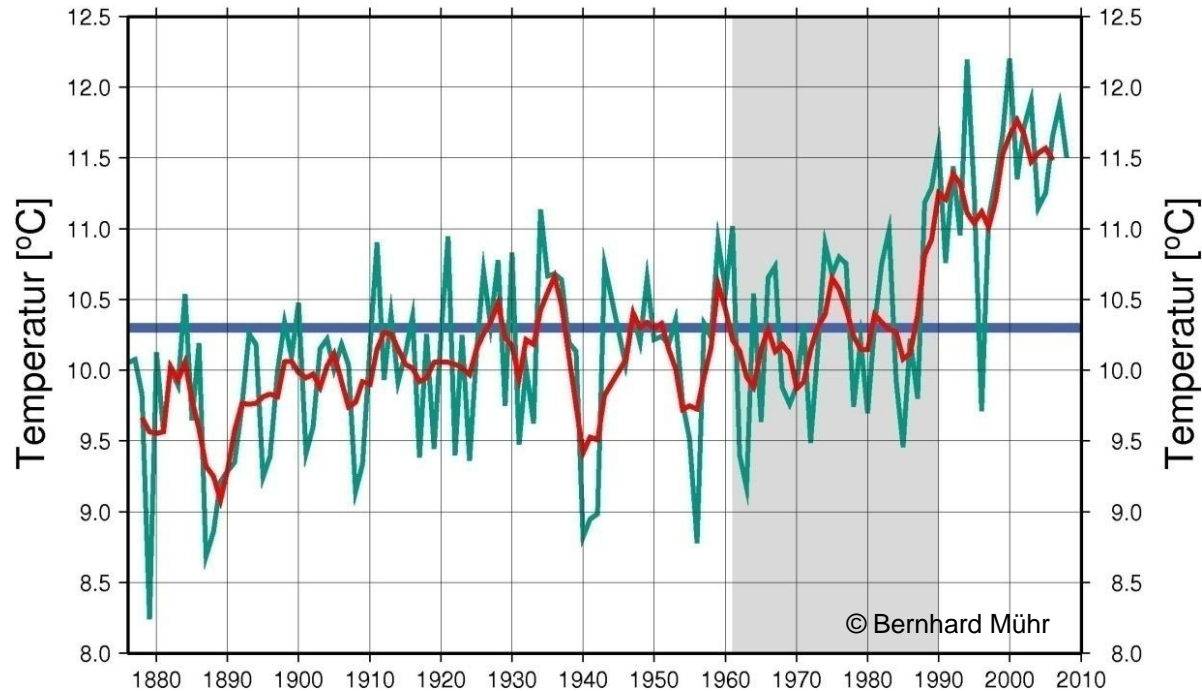
1	2005	+0,77
2	2007	+0,73
3	2009	+0,72
4	1998	+0,70
5	2002	+0,68
6	2006	+0,65
7	2003	+0,65
8	2004	+0,59
9	2001	+0,56
10	2008	+0,55

9 der 10 wärmsten Jahre seit 2000



# Karlsruher Temperaturverlauf

Jahresmitteltemperatur in Karlsruhe



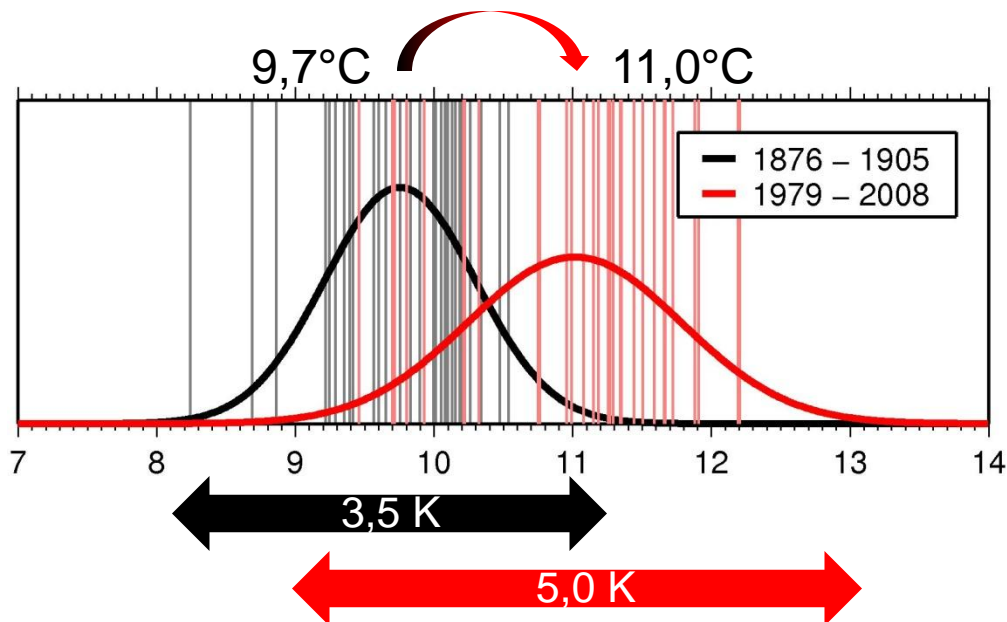
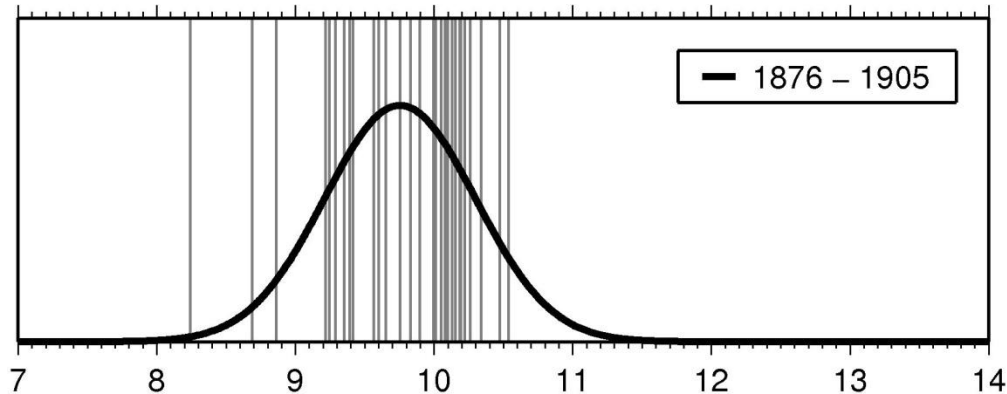
1961-1990: 10.3°C

1	2000	+1,90
2	1994	+1,89
3	2003	+1,61
4	2007	+1,58
5	2002	+1,42
6	1999	+1,36
7	2006	+1,36
8	1990	+1,29
9	2008	+1,20
10	1992	+1,14

6 der 10 wärmsten Jahre seit 2000

# Karlsruher Temperaturverlauf

Häufigkeitsverteilung



Was auffällt:

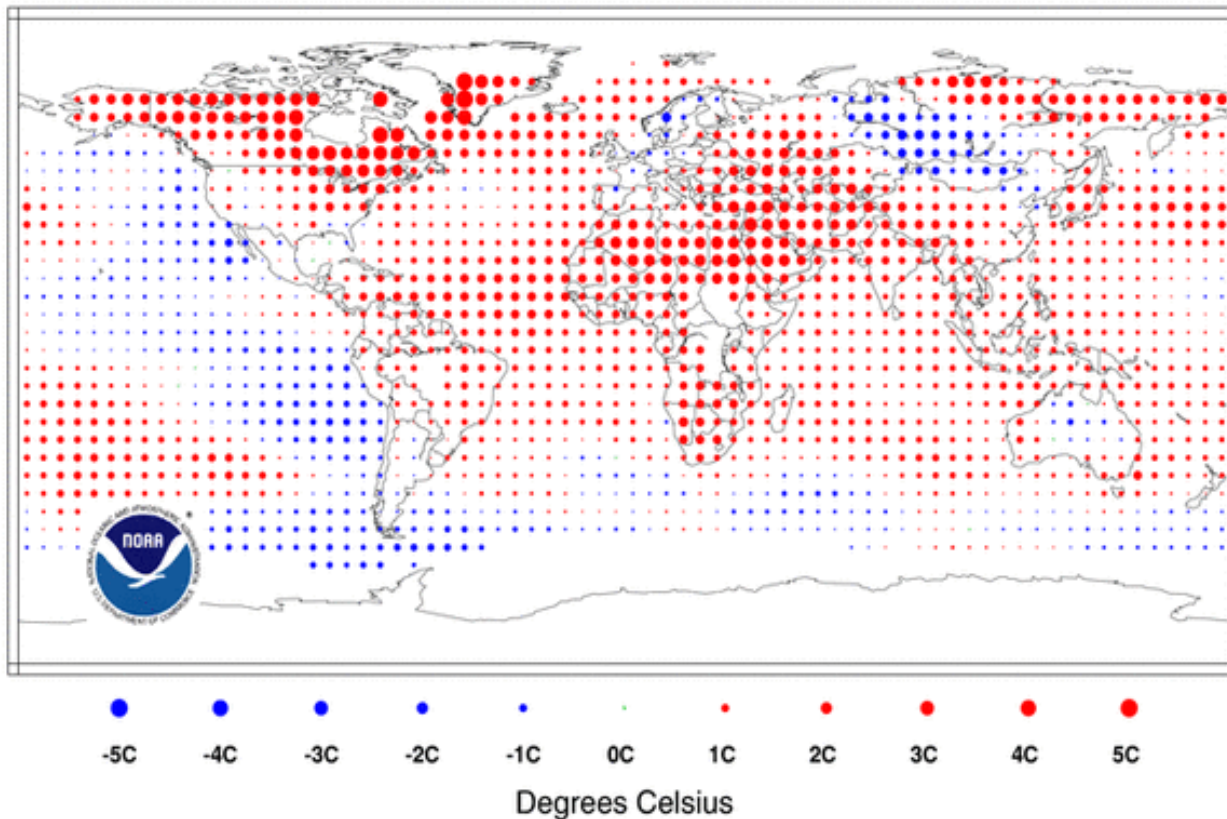
- Verschiebung der mittleren Temperatur ( $9,7^{\circ}\text{C} \rightarrow 11,0^{\circ}\text{C}$ )
- Größerer Schwankungsbereich zwischen Minimum- und Maximumtemperatur ( $3,5 \text{ K} \rightarrow 5,0 \text{ K}$ )

# Abweichung der globalen Durchschnittstemperatur von 2010

## Temperature Anomalies Jan-Nov 2010

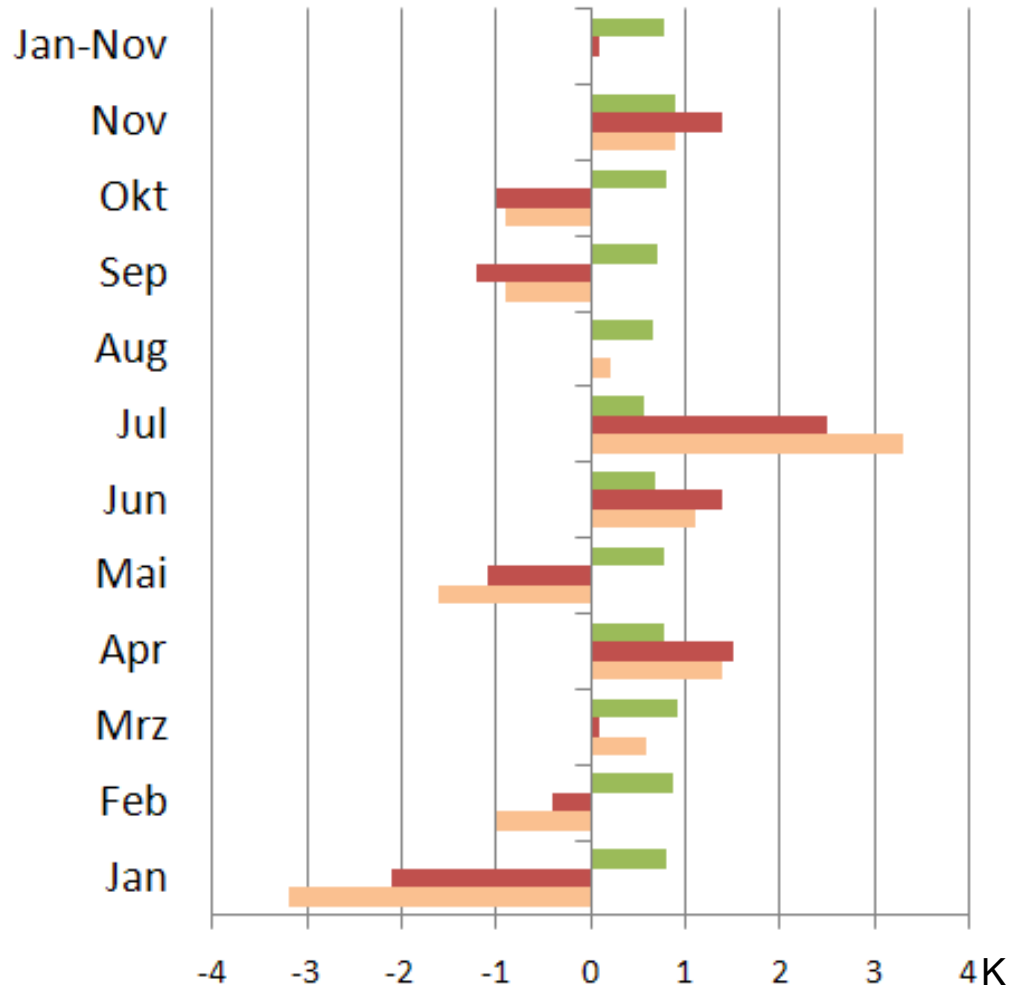
(with respect to a 1971-2000 base period)

National Climatic Data Center/NESDIS/NOAA



Global:  
Mai 2009-April 2010  
wärmste  
12-Monatsperiode  
seit Beginn der  
Datenaufzeichnung  
im Jahre 1880  
(NASA)

# Abweichung der Durchschnittstemperatur von 2010 (global und regional)



■ global  
■ Baden-Württemberg  
■ Deutschland

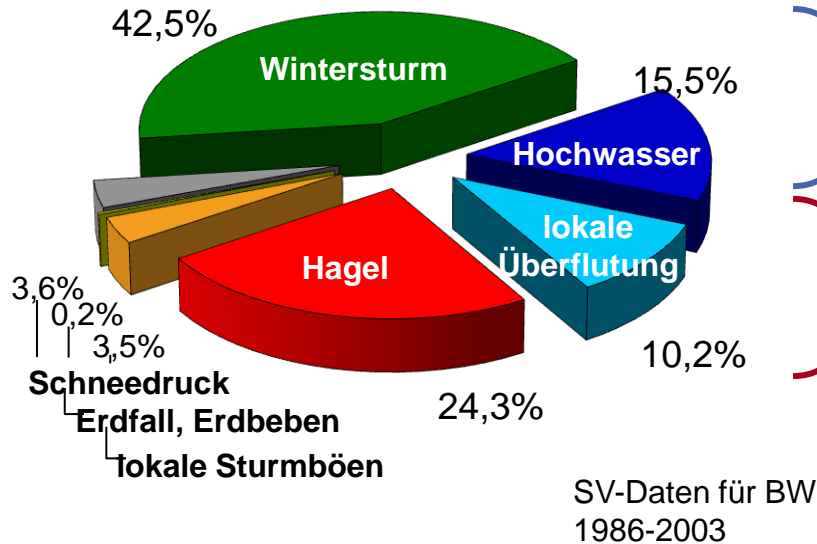
*Bezugszeitraum: 1961-1990*

Daten für Deutschland und Baden-Württemberg: DWD  
Daten global: NASA

# Wettergefahren

- Hitzewellen, Frost
- Hochwasser, Hagel, Dürre
- Winterstürme, Gewitterstürme

## Zuordnung der Schadensanteile zu Wettersystemen:



synoptisch-skalige  
Wettersysteme  
→ 62%  
Schadensumme

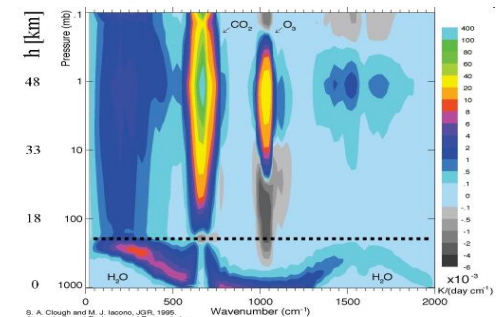
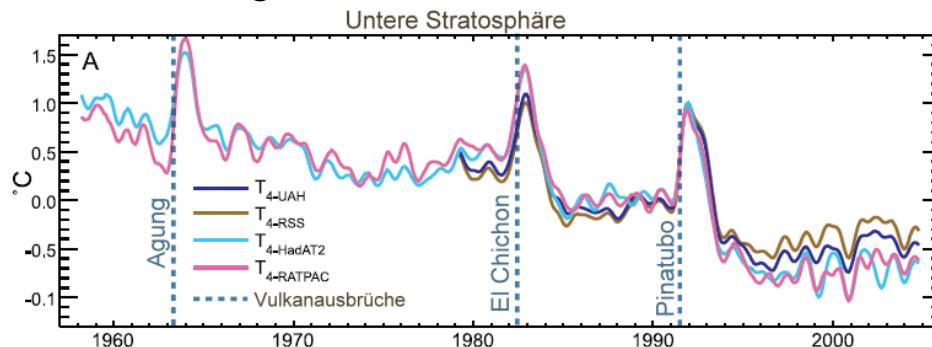
lokal-skalige  
Wettersysteme  
→ 38%  
Schadensumme





# Abkühlung der Stratosphäre

- Abbau des stratosphärischen Ozons
  - Weniger Ozon → geringere Absorption von UV-Strahlung
  - Ozon wirkt in unterer Stratosphäre auch als Treibhausgas
- Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub>
  - Starke Absorption auf 15 µm-Bande
    - Hauptteil der von Erde ausgehenden Infrarotstrahlung nahe der Erdoberfläche absorbiert
    - geringer Teil in oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre
  - Emission aufgefangener Wärmestrahlung Richtung Weltraum durch CO<sub>2</sub>
    - Höher in Stratosphäre als „Absorptionsenergie“
    - Netto-Energieverlust



Quelle: IPCC (2007)  
 Clough and Iacono (1995)

# Einfluss auf die Photosynthese



„Steigerung“ des  
Pflanzenwachstums

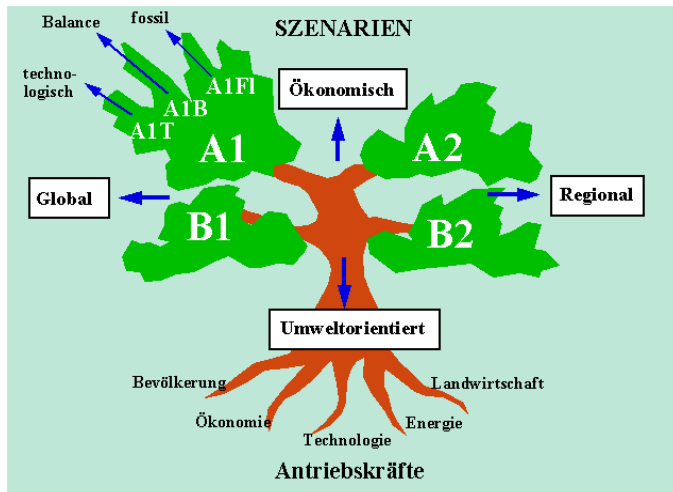
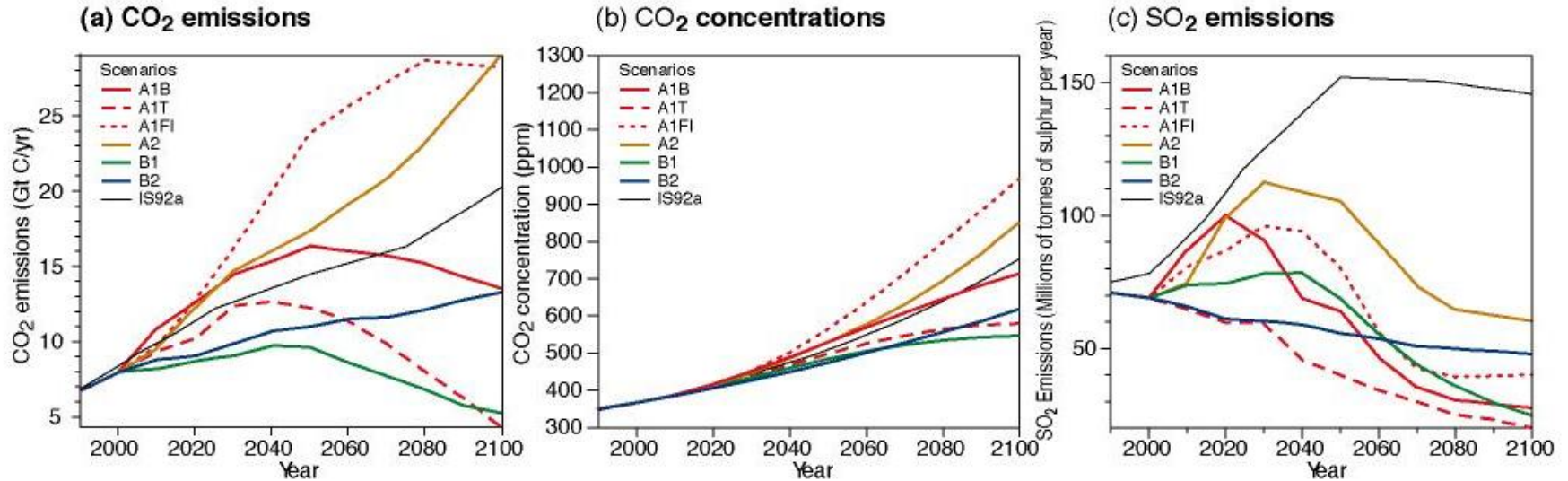
Verlängerung der  
Photosynthesezeiten

Anbaumöglichkeiten  
in trockeneren  
Gebieten



Stress

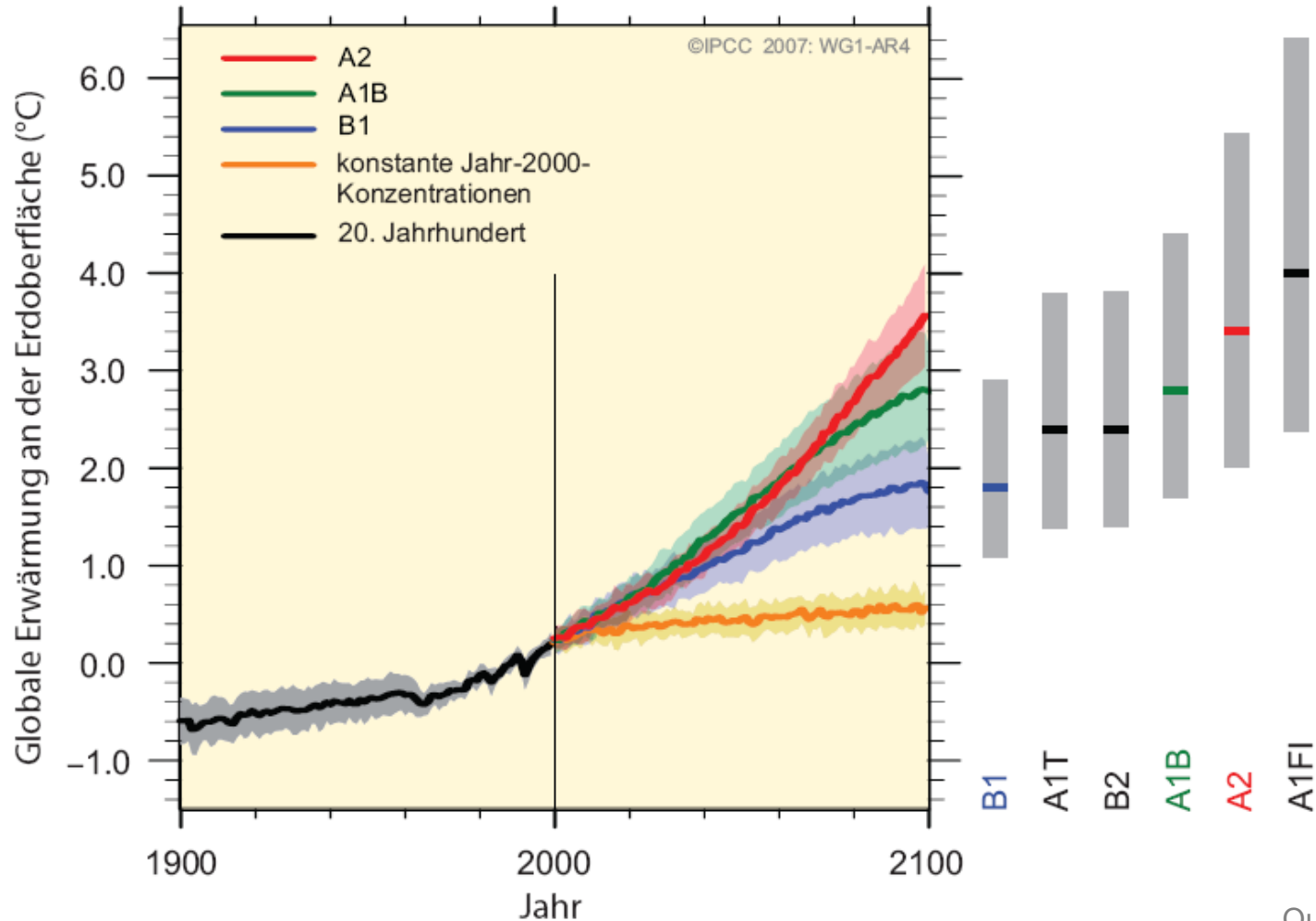
# Entwicklung des CO<sub>2</sub> (in der Zukunft)



Quelle: IPCC (2007)

# Globale Erwärmung – verschiedene Szenarien

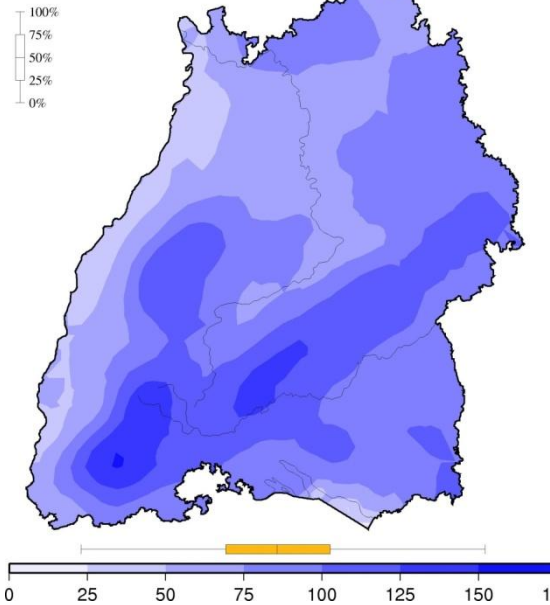
MULTIMODELL-MITTEL UND GESCHÄTZTE BANDBREITEN FÜR DIE ERWÄRMUNG AN DER ERDOBERFLÄCHE



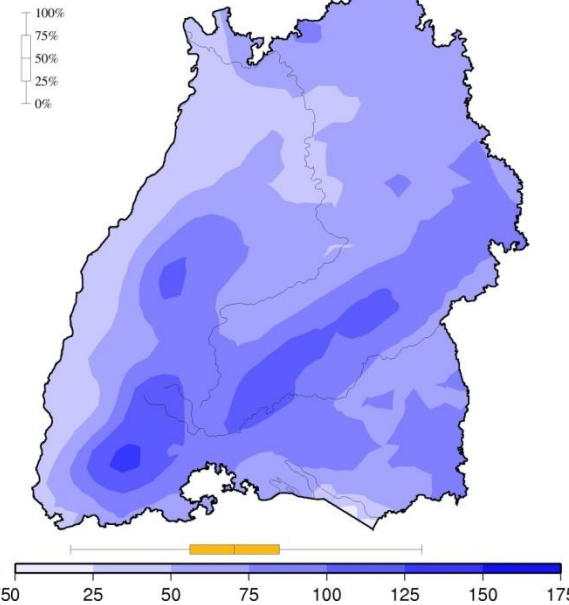
Quelle: IPCC (2007)

# Änderung der Frosttage

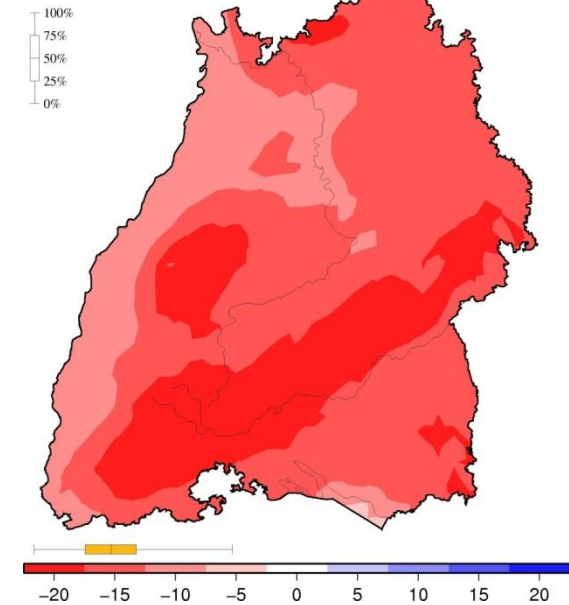
Zahl der Frosttage  
Mittel: 1971–2000  
(Datengrundlage: COSMO-CLM)



Zahl der Frosttage  
Mittel: 2011–2040  
(Datengrundlage: COSMO-CLM)



Zahl der Frosttage  
Differenz 1971–2000 zu 2011–2040  
(Datengrundlage: COSMO-CLM)



Quelle: IMK-TRO/KIT (2010) in Klimawandel in Baden-Württemberg

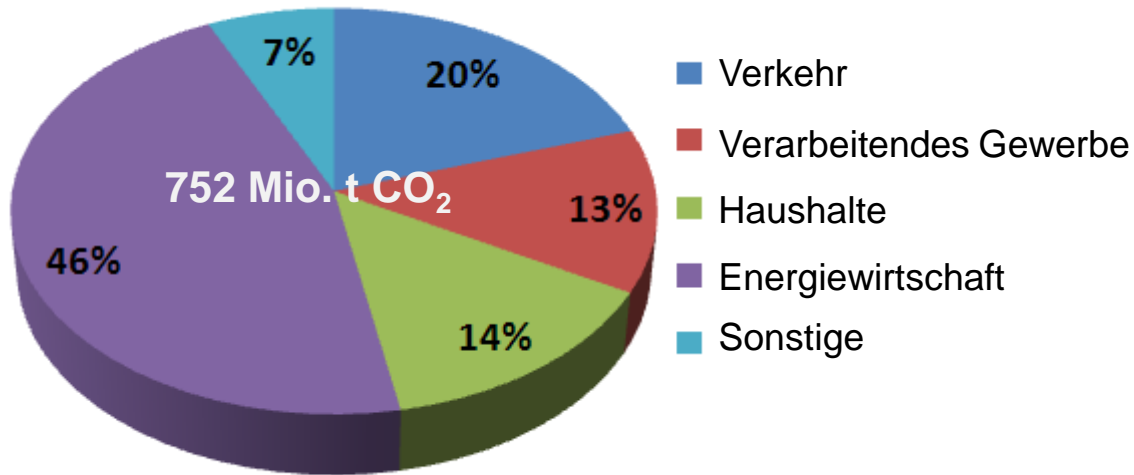


# Welche Möglichkeiten des Handelns gibt es?



Foto: Bernhard Mühr

# CO<sub>2</sub>-Emissionen, 2008



Quelle: BMWI-Energiedaten

## ...Handlungsoptionen

- Energieeinsparungen
  - Haushalt (Stromverbrauch, Raumheizung)
  - Verkehr
  - Bauwesen (Niedrigenergiehäuser etc.)
- Förderung von Erneuerbaren Energien
- Anpassungsmaßnahmen
- Geo- /Climate-engineering
  - Beeinflussung des Strahlungshaushaltes (Solar Radiation Management, SRM)
  - Entfernen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal)
    - CO<sub>2</sub>-Speicherung (Carbon Capture und Storage, CCS)
    - Aufforstung/nachhaltige Holznutzung
    - Eisendüngung der Ozeane
- ...

# Zusammenfassung

- CO<sub>2</sub>-Anteil am
    - Natürlichen Treibhauseffekt: ~ 20 %
    - Anthropogenen Treibhauseffekt: ~ 60 %
- } Verändert Strahlungshaushalt der Erde
- Erwärmung der Troposphäre und Abkühlung der Stratosphäre
  - Klimageschichte zeigt:
    - Auf Veränderungen in der Strahlungsbilanz hat die Erde stets empfindlich reagiert
  - Weitreichende Folgen

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

SÜDDEUTSCHES KLIMABÜRO / KIT-ZENTRUM KLIMA UND UMWELT

## Kontakt:

[christina.endler@kit.edu](mailto:christina.endler@kit.edu)

[klimabuero@kit.edu](mailto:klimabuero@kit.edu)

0721/603-42831

