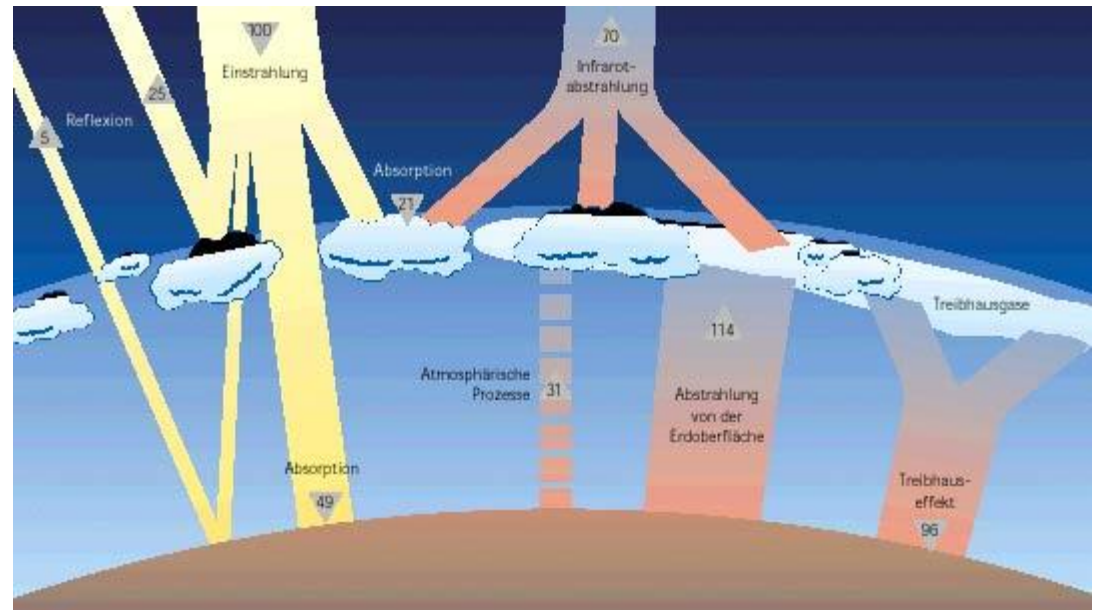


# Die Chemie des globalen Klimas und Global Change

## TEIL I: der nat. Treibhauseffekt

- Auswirkung chemischer Bestandteile der Atmosphäre auf das Klima
- Energiehaushalt
- Treibhausgase
- Das atmosphärische IR-Fenster
- GWPs



## Die Chemie des globalen Klimas und Global Change

### TEIL II: der anthropogene Treibhauseffekt

- Global Change
  - Science
  - Politics



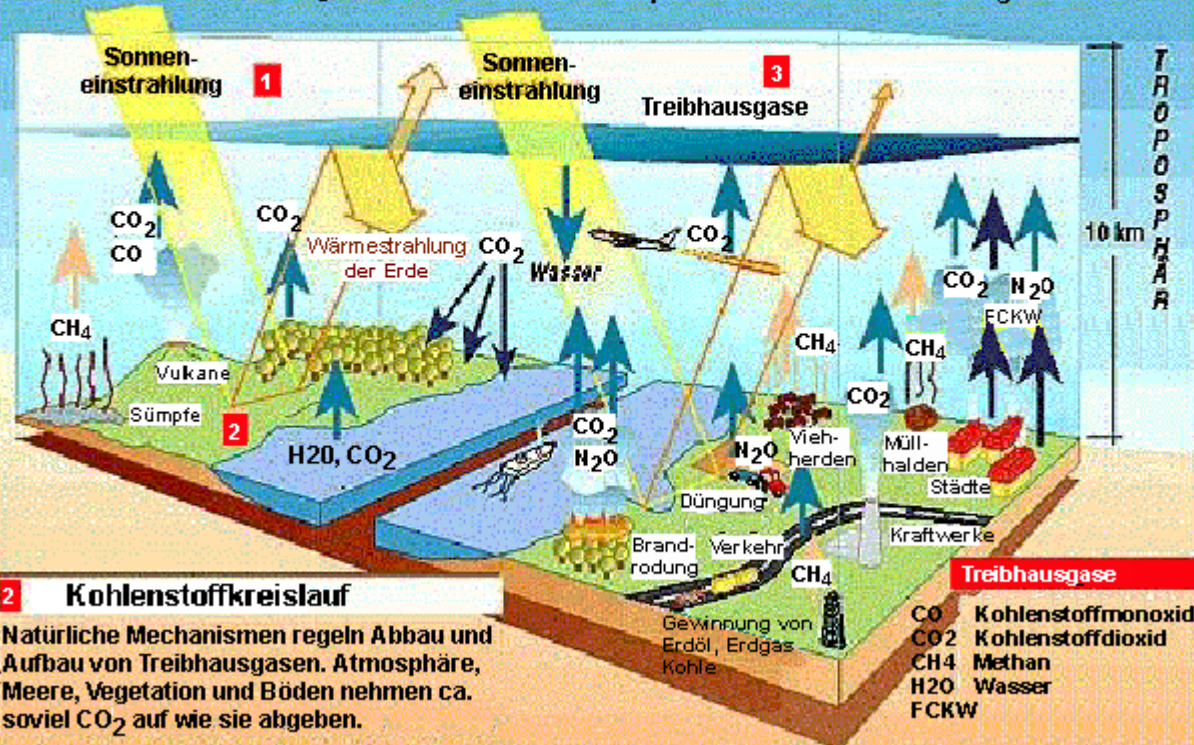
# Treibhaus Erde

## 1 natürlicher Treibhauseffekt

Kohlenstoffverbindungen und Wasserdampf in der Atmosphäre wirken wie die Scheiben eines Glashauses. Sie lassen Licht durch, verhindern aber teilweise die Wärmeabstrahlung in den Weltraum.

## 3 anthropogener Treibhauseffekt

Mit den gewaltigen Mengen an Treibhausgasen, die der Mensch freisetzt, geraten die natürlichen Regelprozesse aus dem Gleichgewicht. Der Treibhauseffekt wird verstärkt, die Temperatur an der Erdoberfläche steigt.

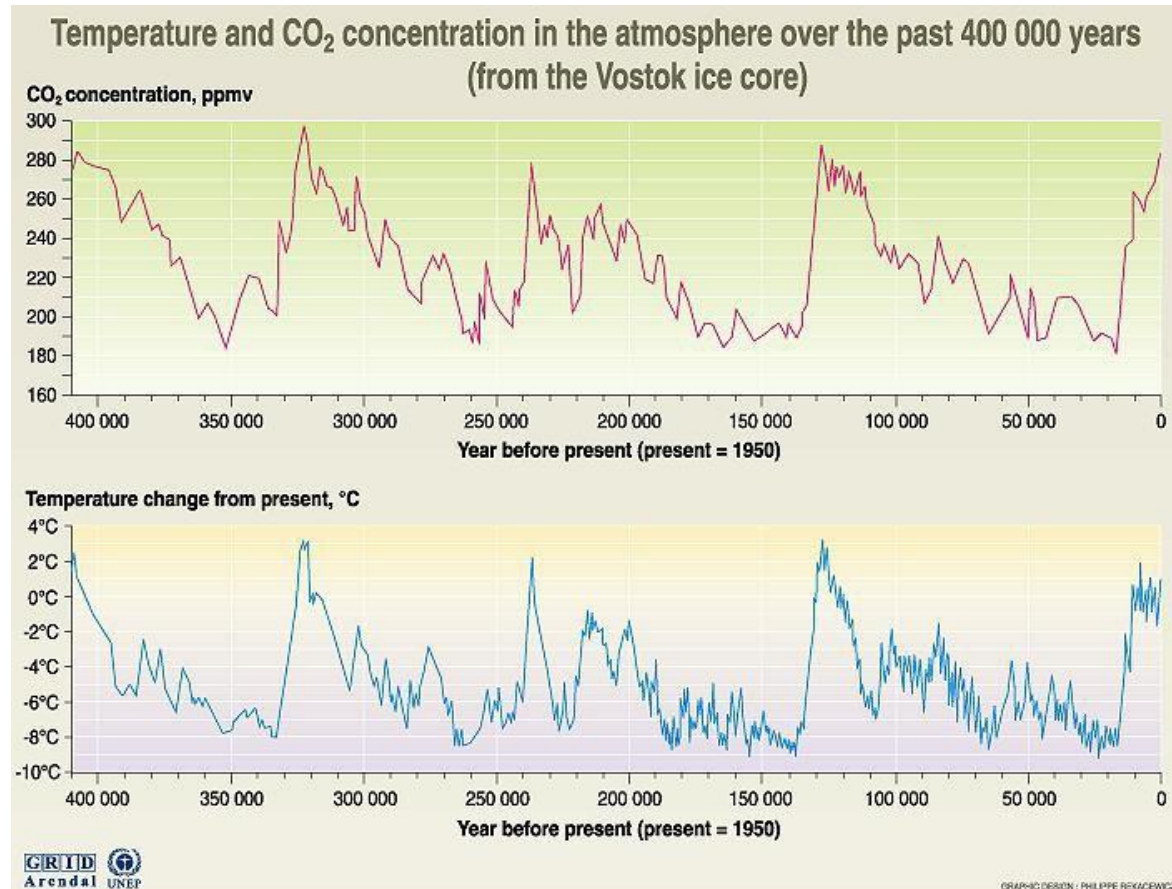


Grafik: R. Podolsky, Quelle: APA

APA

# Glazial-Interglazial Zyklus

- Klima als „mittleres Wetter“ über große Zeiträume und regionale Ausdehnung
- Weit mehr als nur Temperatur – auch Wind, Niederschlag,...

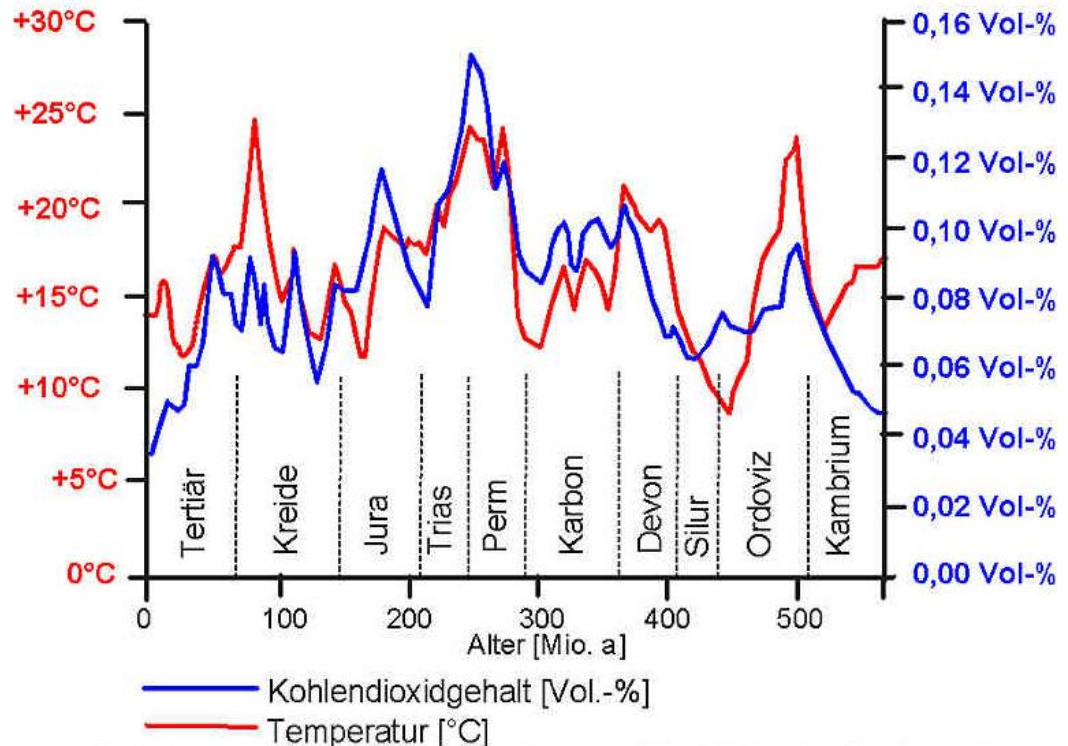


Eiskerndaten über die letzten 400,000 Jahre. Blaue Kurve zeigt die Temperatur, rote Kurve die CO<sub>2</sub> Konzentration. Vostok, Antarctic ice core.

## Glazial-Interglazial Zyklus

- Klima als „mittleres Wetter“ über große Zeiträume und regionale Ausdehnung
- Weit mehr als nur Temperatur – auch Wind, Niederschlag

- Im Trias-Perm CO<sub>2</sub> Konzentr. 4-5 fach höher als heute
- Danach Stabilisierung auf 280 ppm
- Seit Industrialisierung ansteigend
- Heute wahrscheinlich der höchste Wert in den letzten 15-20 Mio Jahre



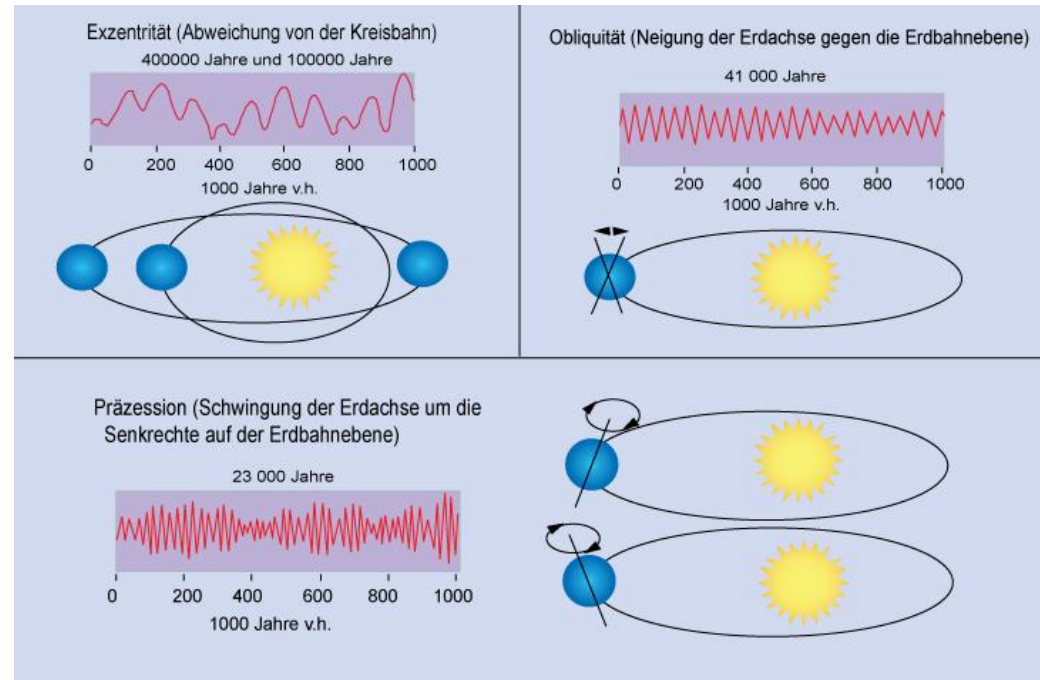
Beziehung zwischen den Temperaturen und den Kohlendioxidgehalten der Atmosphäre in der geologischen Vergangenheit; verändert nach einer Rekonstruktion in BERNER & STREIF (2001).

## Langperiodische Variationen der Solarkonstante (Milankovic Zyklen):

**Exzentrizität, Variation des Radius der Erdumlaufbahn um die Sonne**

**Erdschiefe, Veränderung des Neigungswinkels der Erdachse**

**Präzession der Erdrotationsachse  
„trudelnder Kreisel“**



Skizze der wesentlichen Änderungen in Position und Umlaufbahn der Erde mit den jeweiligen Periodendauern

### Wichtiger Klimafaktor Zusammensetzung der Troposphäre

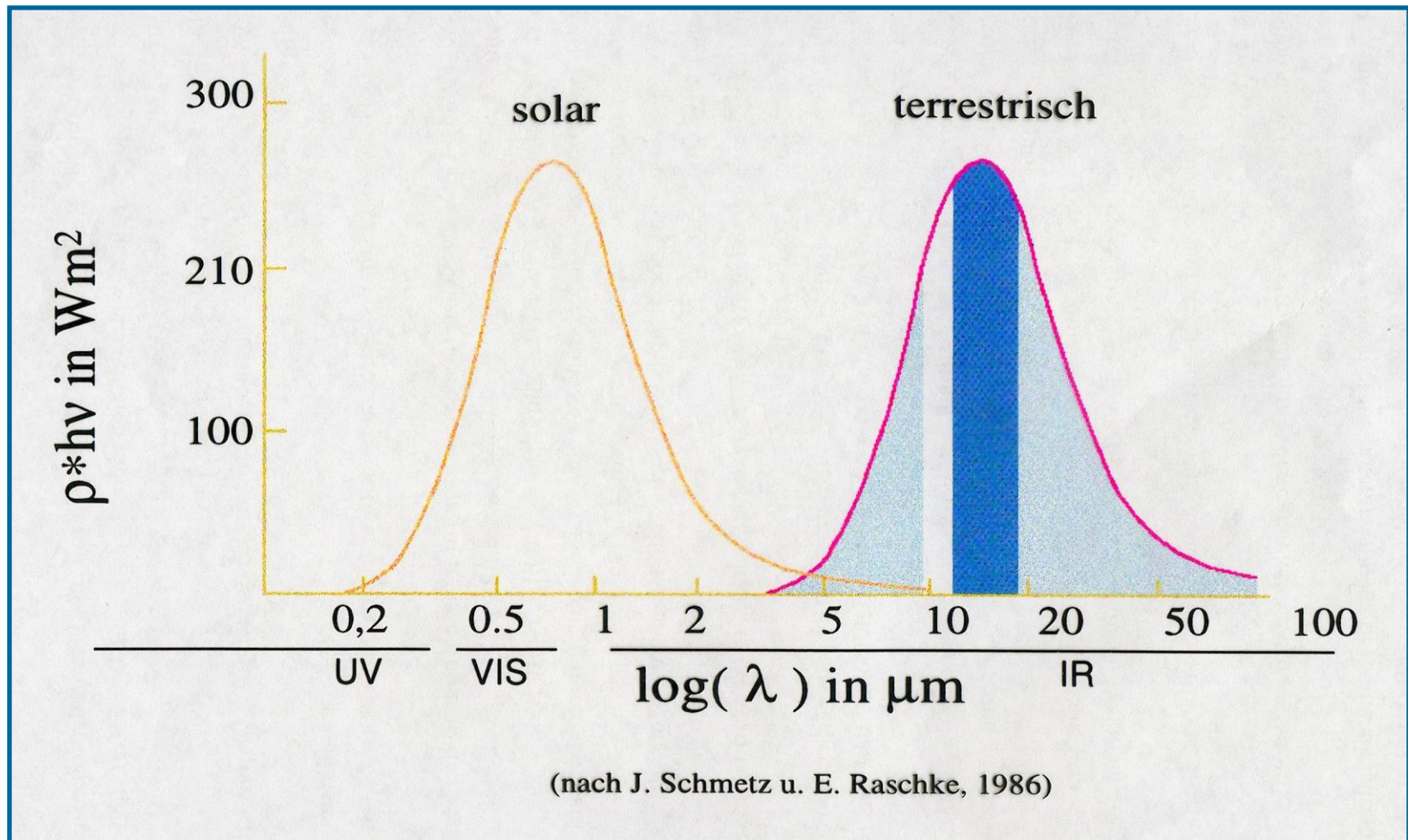
- Von besonderer Bedeutung sind die Konzentrationen der Nebenkompontenten

**Table 8.1** Average composition of the dry troposphere.

<b>Component</b>	<b>Mixing ratio</b>
Nitrogen	78.08%
Oxygen	20.95%
Argon	0.93%
Carbon dioxide	378 ppmv
Neon	18 ppmv
Helium	5 ppmv
Methane	1.77 ppmv
Hydrogen	0.53 ppmv
Nitrous oxide	0.31 ppmv

Mittlere Zusammensetzung der Atmosphäre, 2005

- Im Steady-State: Energieeinstrahlung = Energieabgabe



Spektrale Energiedichte der eingehenden solaren und abgestrahlten terrestrischen Energie



## Schwarzkörperstrahlung

Abgegeben Energie pro Einheit Wellenlänge und definierter Temperatur:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{(hc/kT\lambda)} - 1} \right)$$

$M_{\lambda}$  = abgegebene Energie  $W m^{-2}$

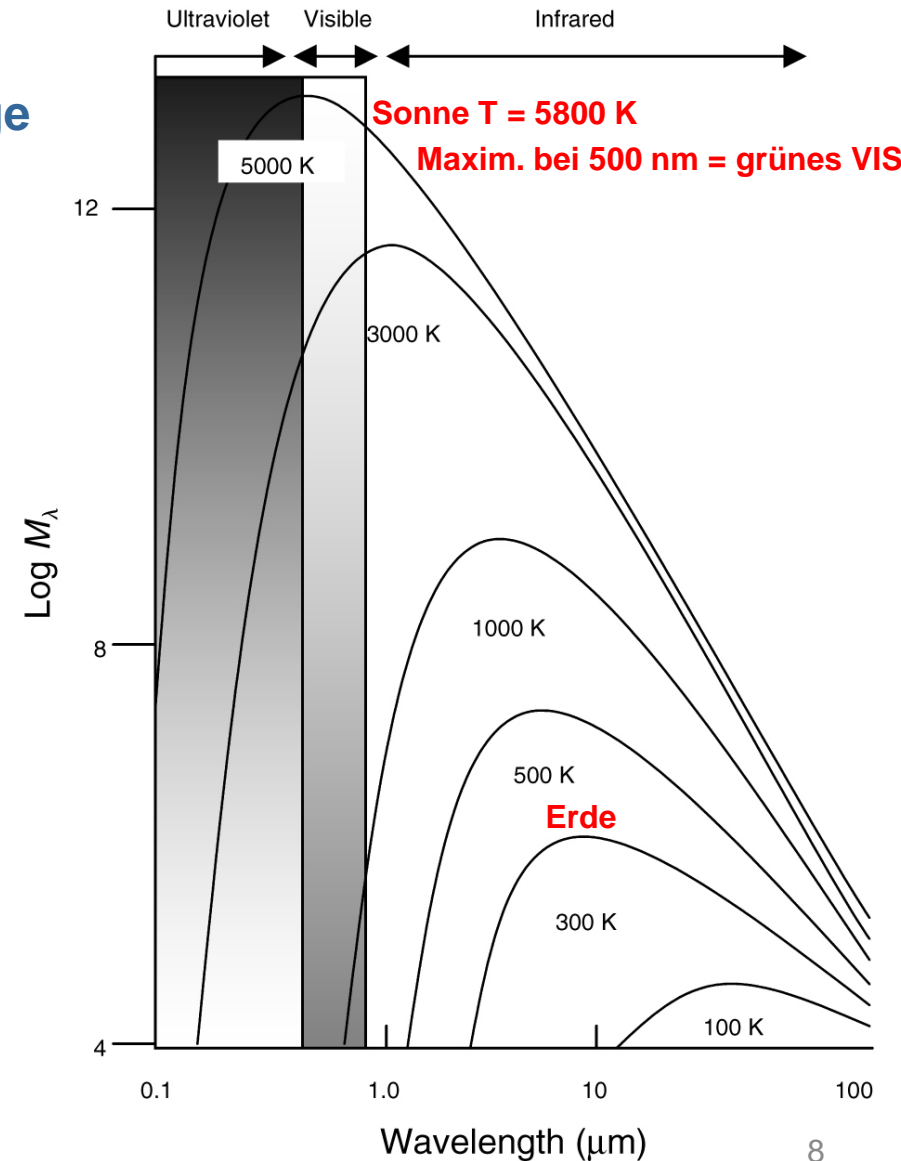
$h$  = Plank Konstante

$c$  = Lichtgeschwindigkeit

$\lambda$  = Wellenlänge

$k$  = Boltzmannkonstante

•Rule of thumb:  $\lambda_{\max} = 2880 / T$   
mit  $\lambda_{\max}$  in  $\mu m$  und T in K



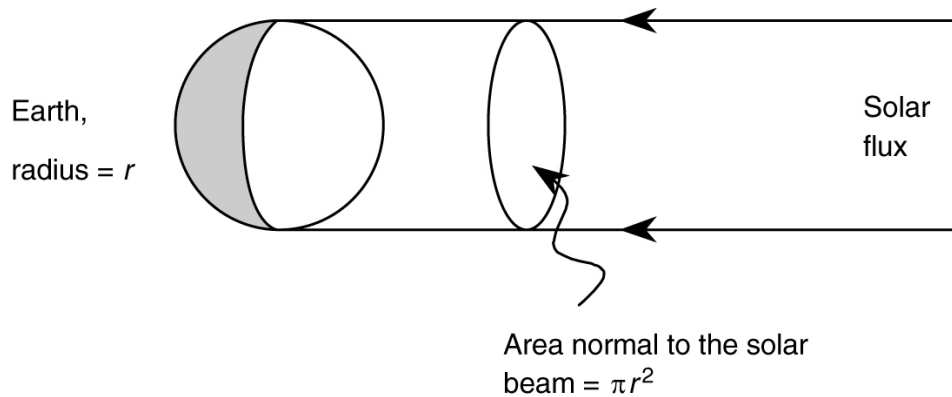
- **Solarer Fluss an Außengrenze der Atmosphäre  $F_S = 1368 \text{ W m}^{-2}$**

$$\text{Gesamtenergie} = F_S \pi r^2 \text{ [W]}$$

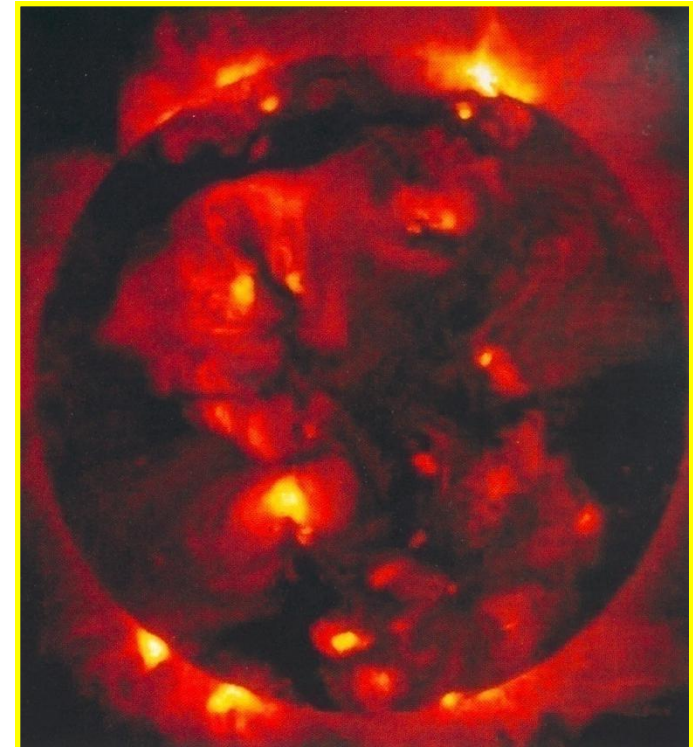
**Damit mittlere Einstrahlung auf der Erde**

$$F_S \pi r^2 / 4\pi r^2 \text{ Erdoberfläche [m}^{-2}\text{]}$$

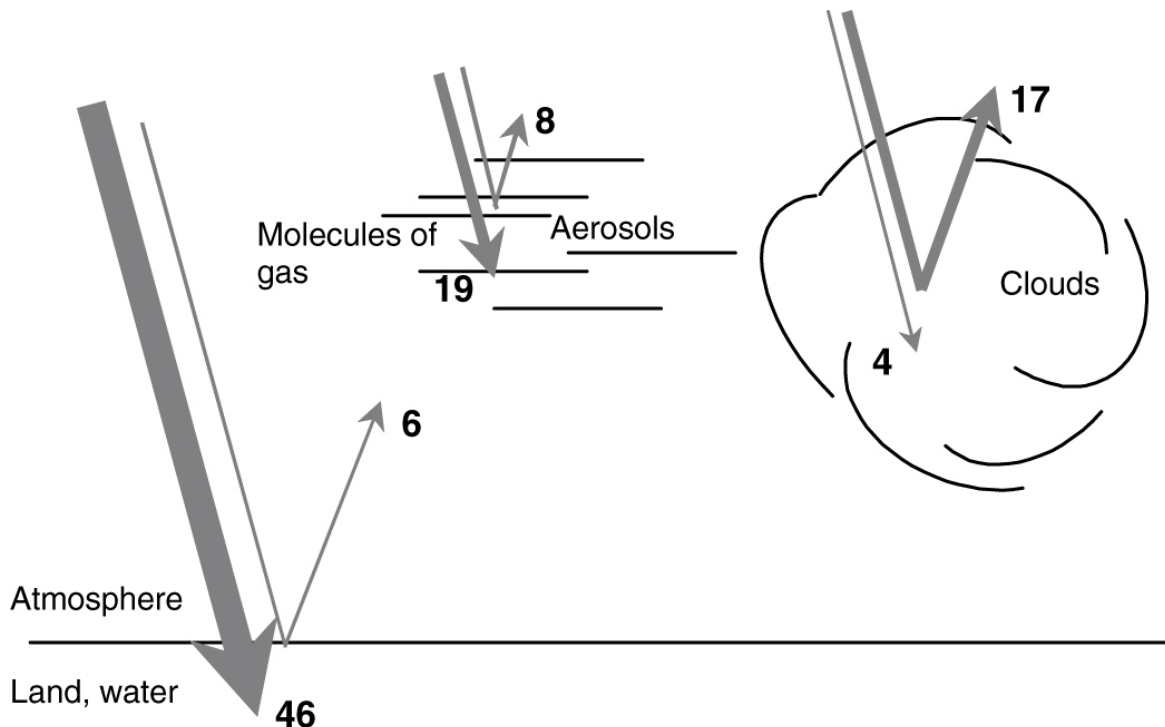
$$\frac{1}{4} F_S = 342 \text{ W m}^{-2}$$



Sonne aufgenommen vomYohkoh-  
Teleskop (Japan), radioaktive Strahlung  
sichtbar gemacht (1. Juni 2000)



- **Albedo (Rückstrahlvermögen) gesamt etwa 31 % ( $A = 0.31$ )**
- **Reflexion Erdoberfläche etwa 6%**
  - **Reflexion etwa 17 % an Wolken und etwa 8% an Aerosolen, Partikeln etc.**
- **Absorption etwa 19 % durch Aerosole, Ozon etc. und 4 % an Wolken**



Energieflüsse relativ zur eingestrahlichten Energiemenge an der äusseren Grenze der Atmosphäre

- **Mittlere Energieaufnahme durch Absorption durch die Erde damit**

$$F_{\text{Eabs}} = F_S/4 \times (1-A) = 236 \text{ W m}^{-2}$$

Im **Steady State** muss diese Strahlung von der Erde wieder abgegeben werden durch Emission einer „kälteren“ **Schwarzkörperstrahlung**

Wiensches Verschiebungsgesetz :

$$F_{\text{Eabs}} = F_e = \sigma T_e^4 = F_S/4 \times (1-A)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

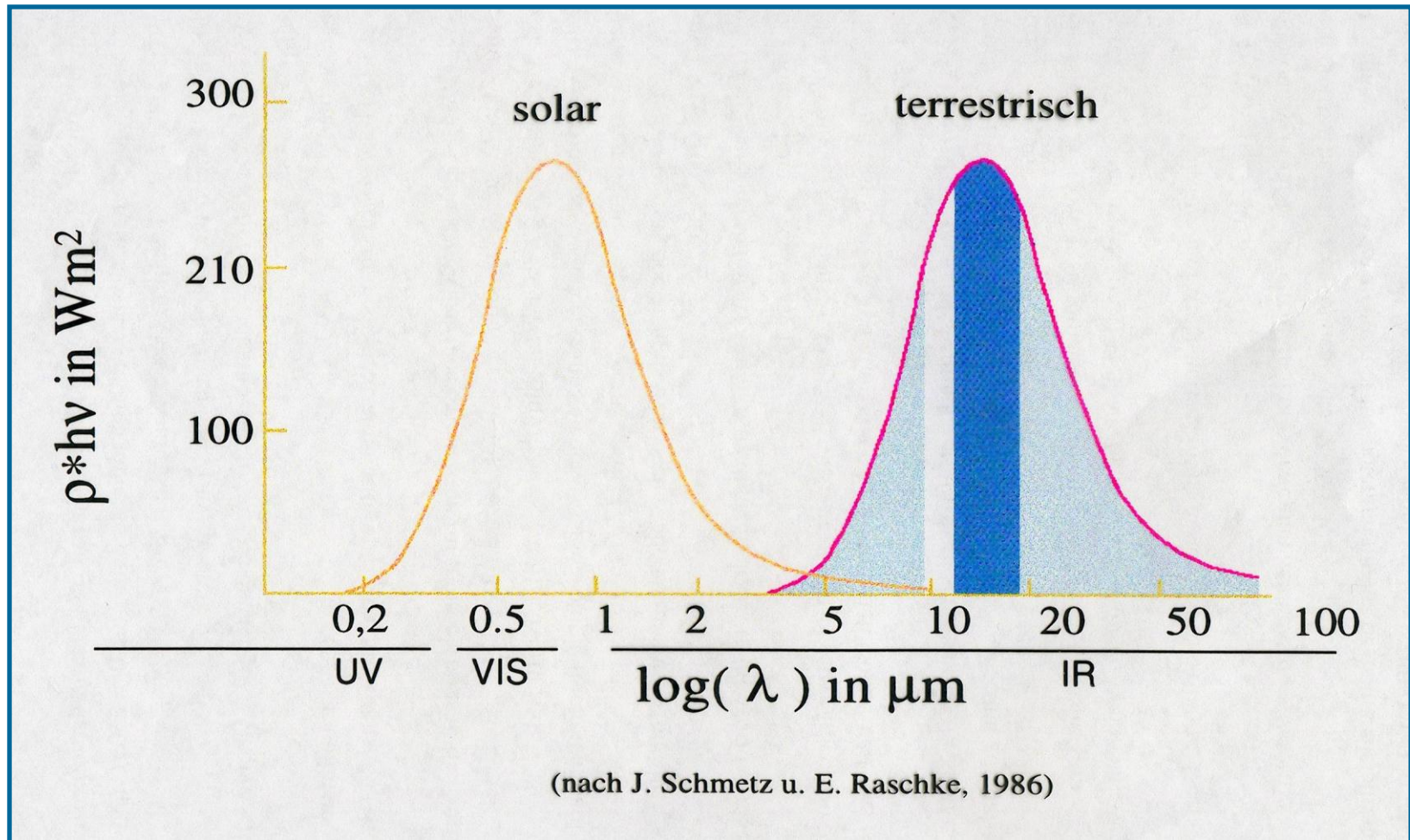
Damit **mittlere Temperatur der Erdatstrahlung:**

$$T_e = ((1-A) F_S/4\sigma)^{1/4} = 254 \text{ K} \sim -19^\circ \text{ C}$$

zum Vergleich: ganz ohne Atmosphäre:  $T_{e(A=0)} \sim -2^\circ \text{ C}$

**Annahme: Reflektivität = 10%**

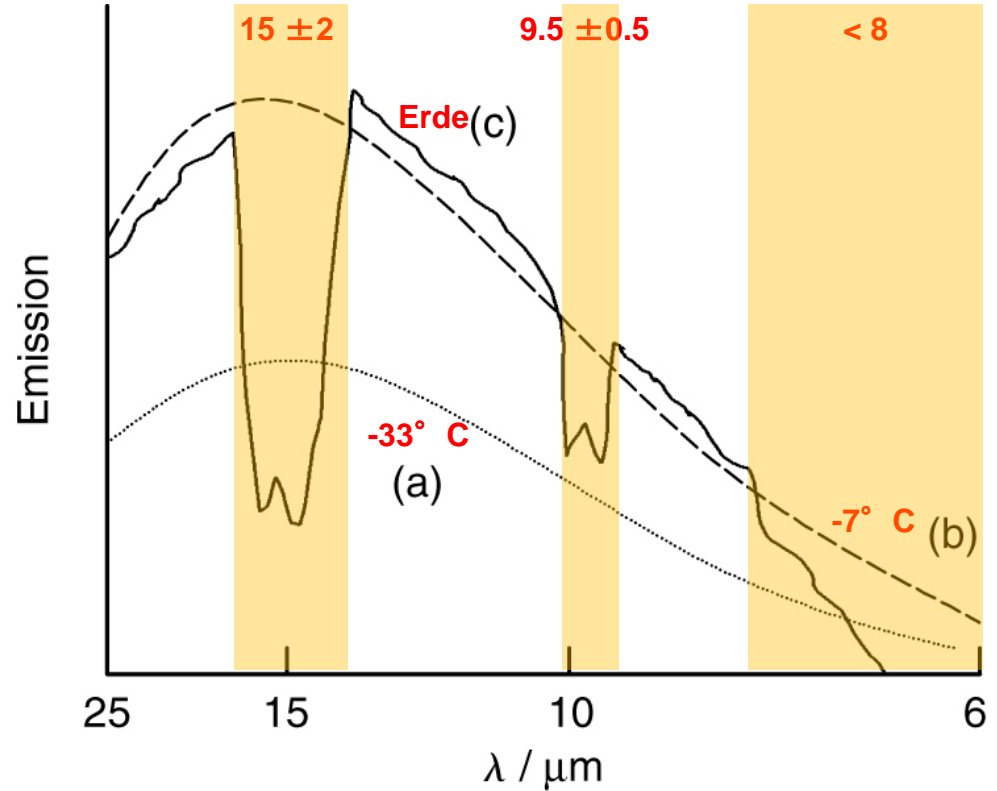
- Terrestrische Abstrahlung im „thermischen“ Infrarot,  $\sim 3 - 40 \mu\text{m}$



Spektrale Energiedichte der eingehenden solaren und abgestrahlten terrestrischen Energie

## Emissionsspektrum

- Deutlich gezeichnet von Absorptionsbanden aufgrund atmosphärischer Gase
- Absorption führt zu „Speicherung“ der Wärmestrahlung in der Atmosphäre
- IR Strahlung zu gering für photochemische Reaktionen
- Absorption erhöht die Schwingungs- und Rotationsenergie der Moleküle
- Überschüssige Energie wird durch molekulare Kollisionen als kinetische Energie (Wärme) an die Atmosphäre abgegeben
- Außerhalb dieser Höhe bei etwa 6 km Abstrahlung  $\sim -19^\circ \text{C}$



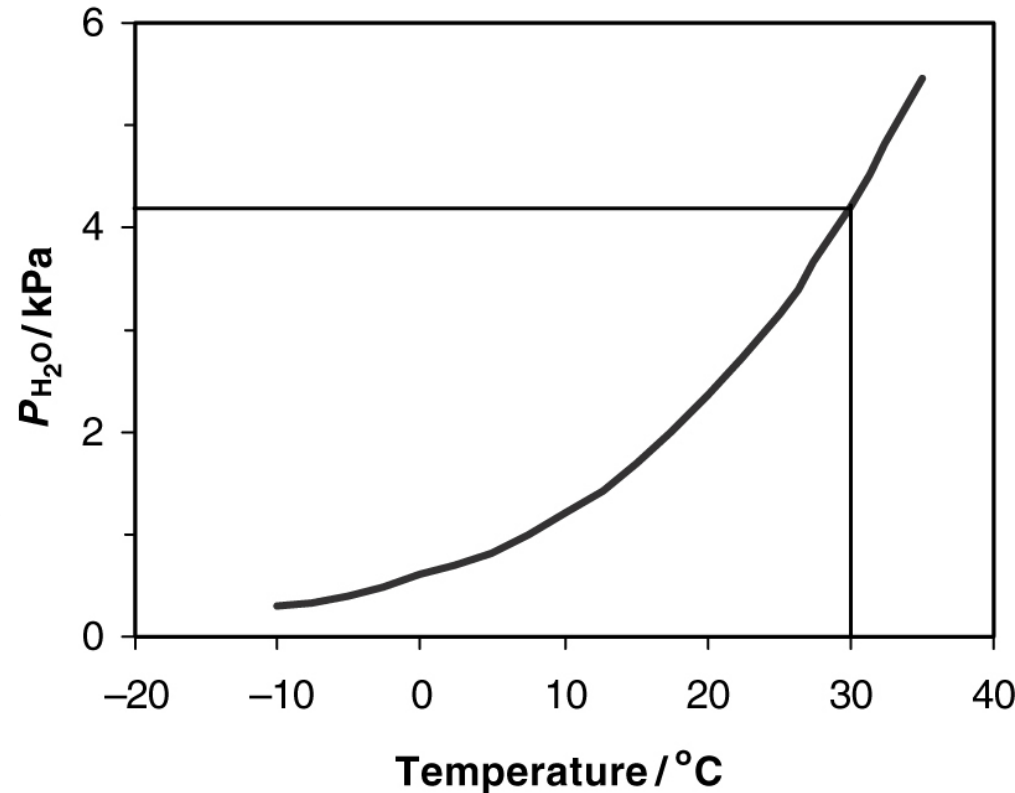
Infrarotemissionspektren für Schwarzkörperstrahlung bei (a) 240 K, (b) 280 K sowie für die Erde

- **Treibhauseffekt**
  - Auch ausgehende Strahlung mit Maximum im IR-Bereich unterliegt Absorption
  - Gemessene Temperatur an der Erdoberfläche  $T_{e(av)} = 17^\circ \text{ C}$
  - Differenz  $36^\circ \text{ C}$
  - Zum Vergleich: Mars und Venus, beide mit  $\text{CO}_2$  als relevantem Treibhausgas
  - Mars:  $p\text{CO}_2 = 0.6 \text{ kPa}$ ; Venus:  $9000 \text{ kPa}$

**Table 8.2** Temperatures at the surface of three planets where  $\Delta = T_{\text{actual}} - T_{\text{calculated}}$ .

Planet	Calculated $T / \text{K}$	Actual $T / \text{K}$	$\Delta / \text{K}$
Earth	254	290	+ 36
Mars	217	223	+ 6
Venus	227	732	+505

- Variable Konzentration von Wasserdampf (Lebenszeit 10 Tage)
- Maximaler Luftfeuchtigkeit gegeben durch Dampfdruck  $P_V$
- Starke T-Abhängigkeit  
 $P_V (30^\circ \text{ C}) = 4.24 \text{ kPa}$   
 $P_V (-10^\circ \text{ C}) = 0.26 \text{ kPa}$
- Relative Luftfeuchte ( $H_R$ ) = Wasserdampfgehalt als [%] des Dampfdrucks ( $P_{VH_2O}$ )  
$$(H_R / 100) \times P_{VH_2O} = P_{\text{real}(H_2O)}$$
- Stoffmengenanteil  $H_2O$  ist abhängig von T und  $H_R$
- Im Mittel ~ 1%  
d.h. häufiger als Argon



Wasserdampfsättigungskurve als  $f(T)$



- **1827:** Jean Baptiste Fourier recognizes the effect of IR absorbing gases and points out the similarity to a greenhouse
- **1860:** John Tyndall measures IR absorption of CO<sub>2</sub> and water vapor, he suggests that the cause of the ice ages might be a decrease in atmospheric CO<sub>2</sub>
- **1896:** Svante Arrhenius calculates the effect of rising greenhouse gas concentrations on temperature; estimates 5-6 ° C increase for a CO<sub>2</sub> doubling
- **1940:** G.S. Callendar does a first calculation on temperature increase due to the burning of fossil fuels
- **1957:** Roger Revelle and Hans Suess;” .. In the build-up of carbon dioxide in the ocean, human beings are carrying out a large-scale geophysical experiment”.

## Treibhauseffekt: Aufheizen der nahen Erdatmosphäre durch das Abfangen ausgehender IR-Strahlung über atmosphärische Gase

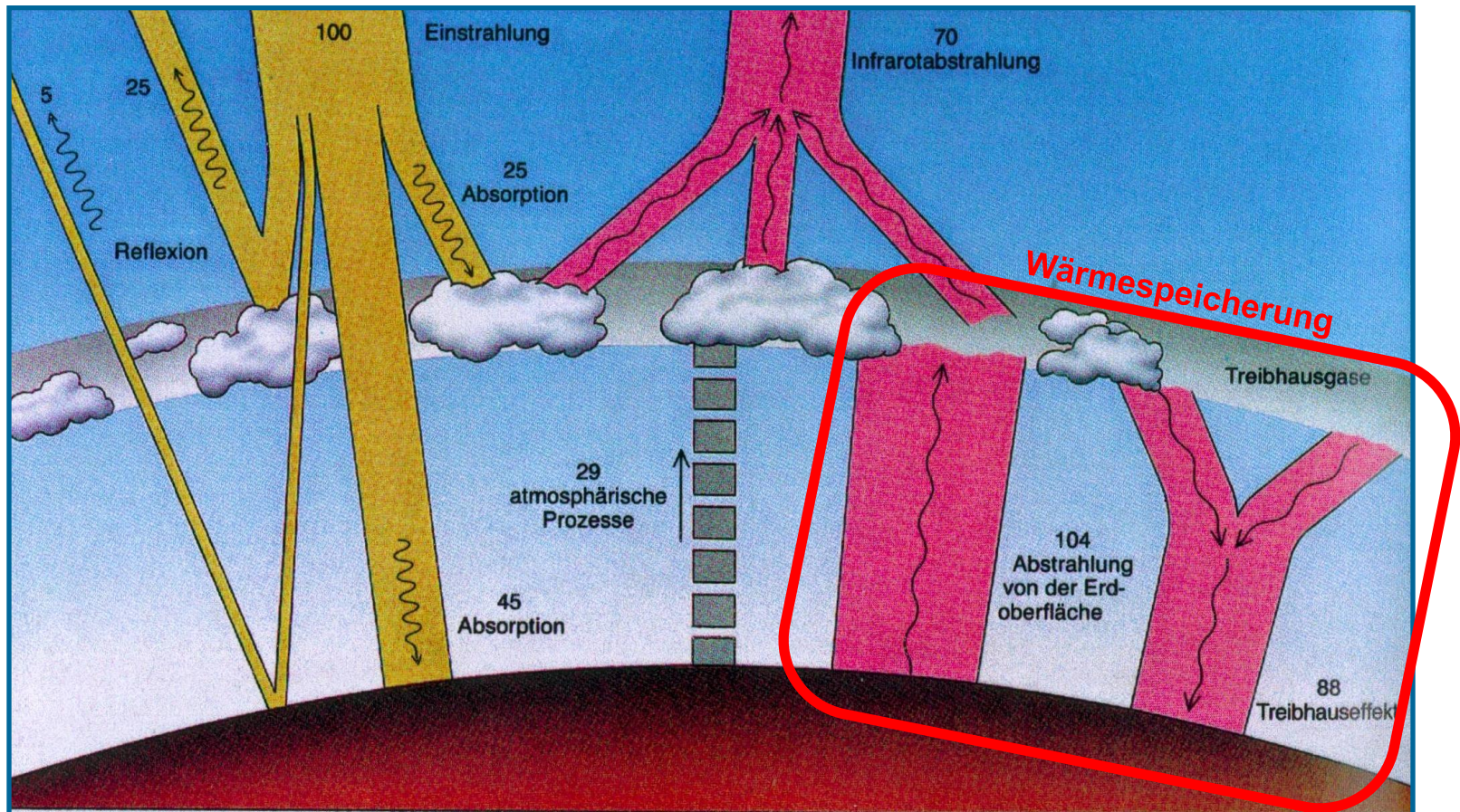
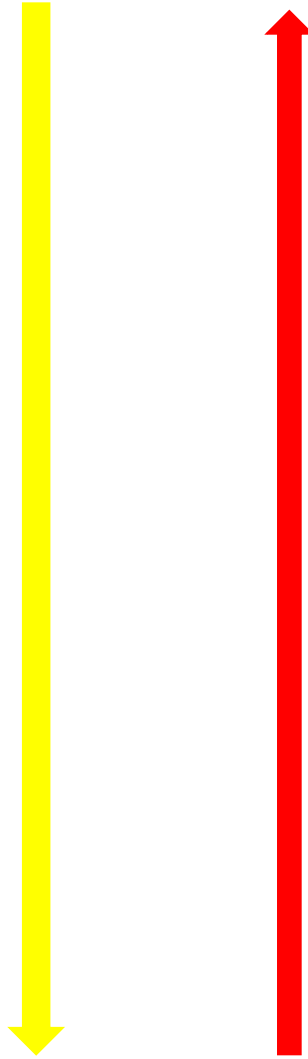
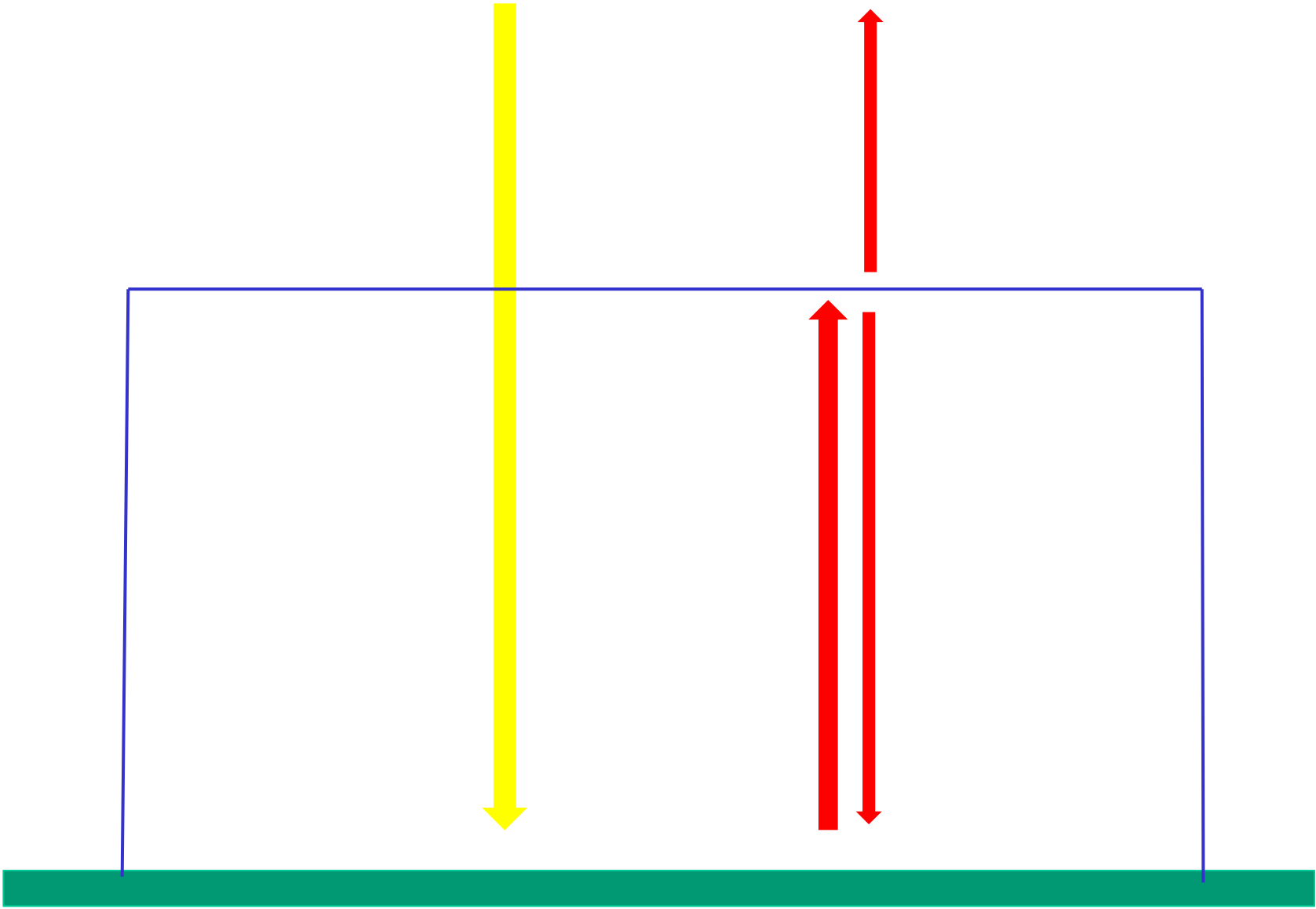
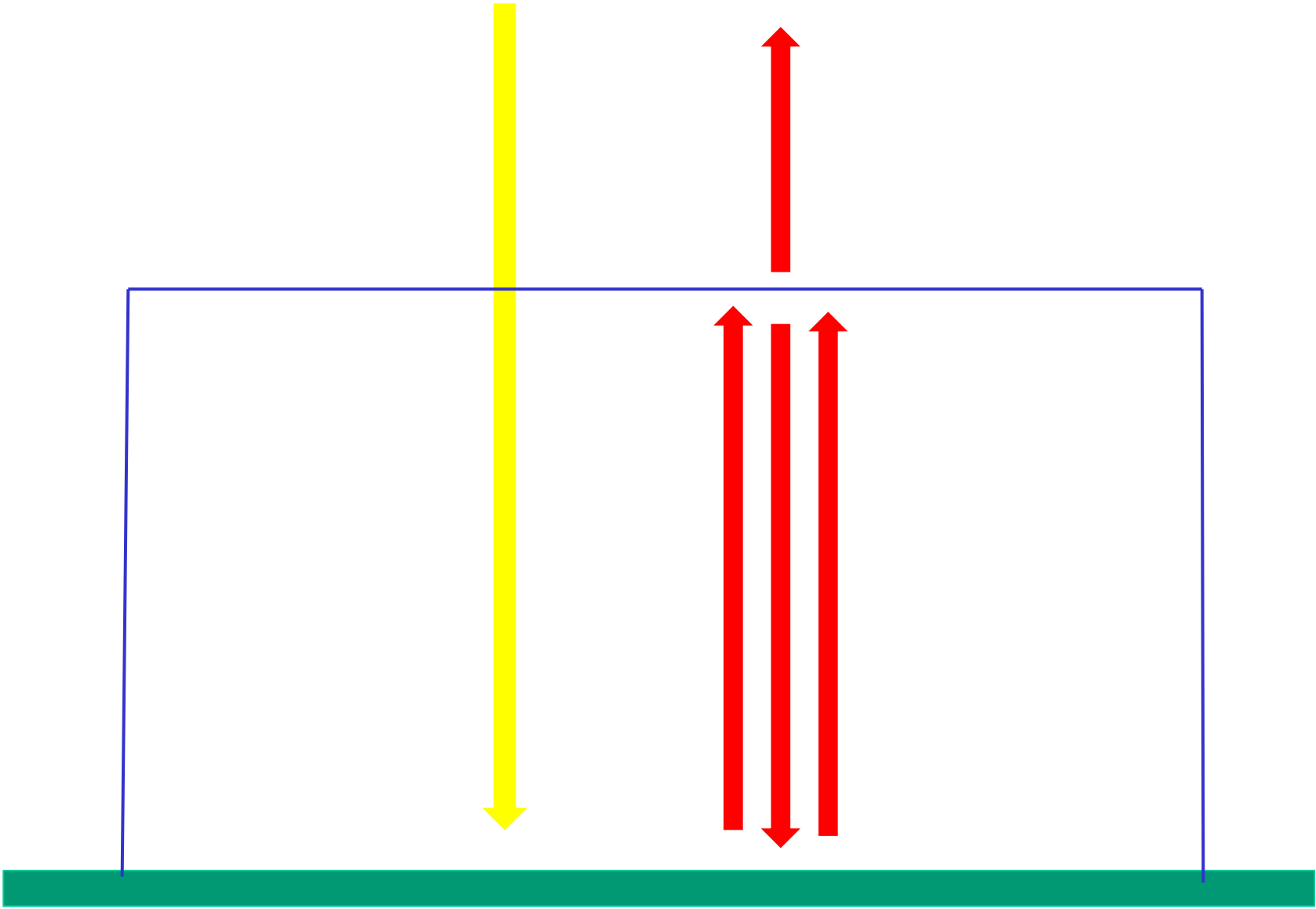


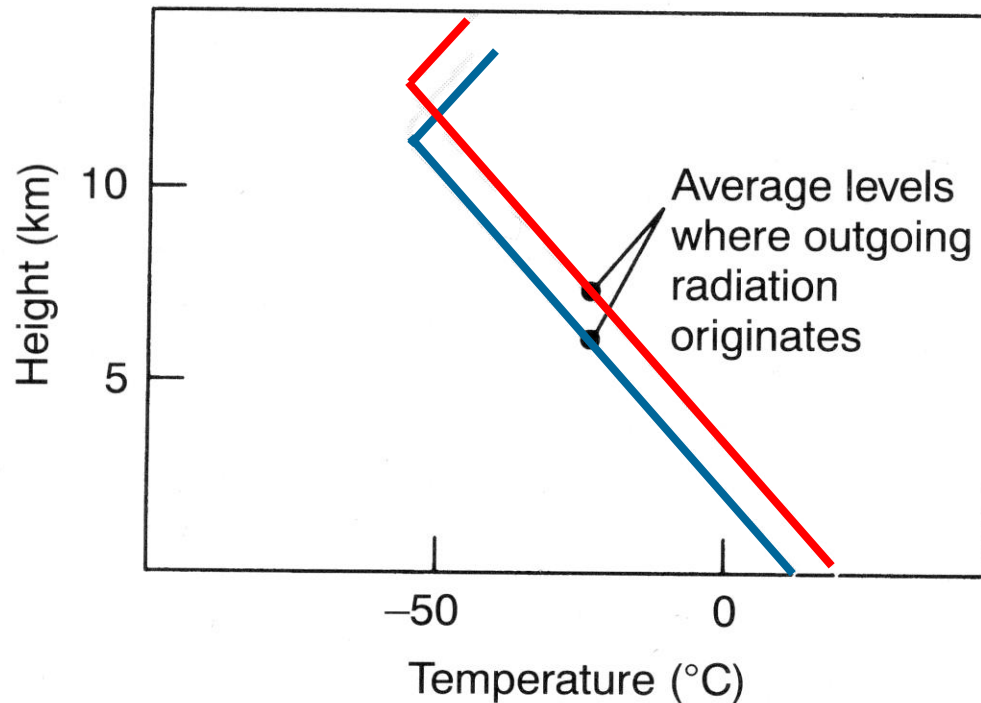
Bild 2: In der Energiebilanz der Erde ist der bedeutendste Posten die Wärmespeicherung in der Atmosphäre. Etwa 30 Prozent der einfallenden Sonnenenergie werden von den Wolken und den Partikeln in der Atmosphäre sowie von der Erdoberfläche reflektiert (links). Die verbleibenden 70 Prozent werden zunächst absorbiert; der von der Erdoberfläche eingefangene Anteil wird durch Strahlung und atmosphärische Prozesse wie

Konvektion und Wolkenbildung in die Atmosphäre transportiert. Letztlich wird die absorbierte Energie im infraroten Bereich in den Weltraum abgestrahlt (Mitte). Da der überwiegende Teil der vom Erdboden kommenden Strahlung zuvor von den Wolken und den Treibhausgasen absorbiert und zum Erdboden zurückgestrahlt wird (rechts), ist die Erdoberfläche um etwa 33 Grad wärmer, als sie ohne diesen Treibhauseffekt wäre.









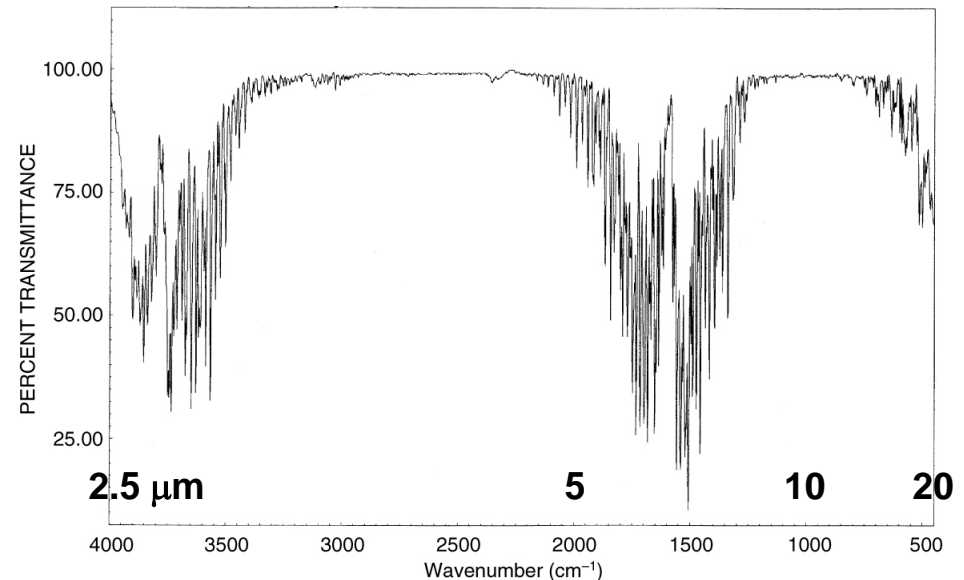
**Fig. 2.3**

The distribution of temperature in a convective atmosphere (full line). The dotted line shows how the temperature increases when the amount of carbon dioxide present in the atmosphere is increased (in the diagram the difference between the lines is exaggerated – for instance, for doubled carbon dioxide in the absence of other effects the increase in temperature is about 1.2 °C). Also shown for the two cases are the average levels from which thermal radiation leaving the atmosphere originates (about 6 km for the unperturbed atmosphere).

### WASSER

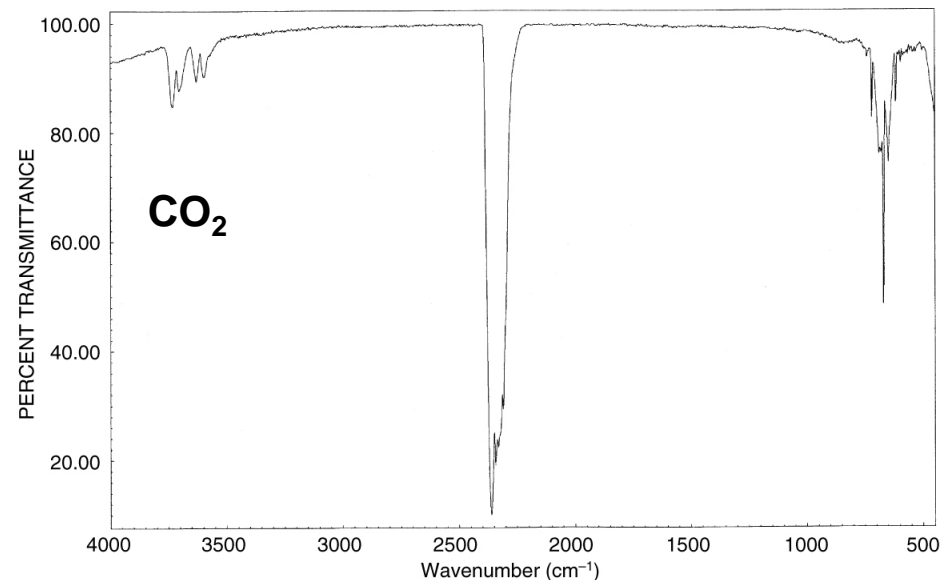
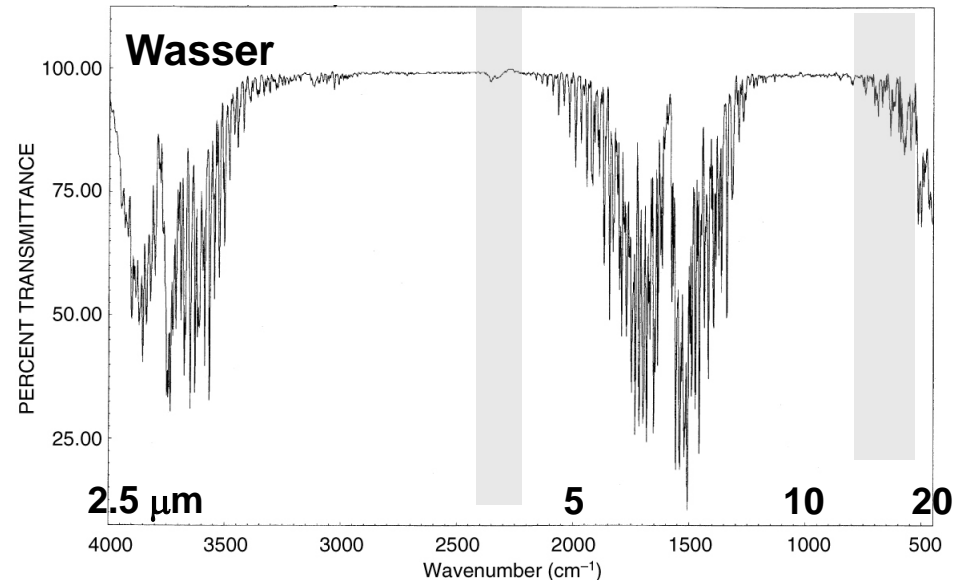
- Absorptionsbanden bei 2.5-3  $\mu\text{m}$ , 5 bis 8  $\mu\text{m}$ , und  $> 14 \mu\text{m}$
  - Stoffmengenanteil im Mittel um 1 %
  - Bisher keine Änderung des mittl. Wasserdampfgehaltes messbar (anthr. Aktivitäten)
  - **Pot. positiver Feedback:**  
Dampfdruck ist von Temperatur abhängig  $P_v = f(T)$
  - **Pot. negativer Feedback:**  
Wolkenbildung
- Anteil am Treibhauseffekt ca. **110  $\text{Wm}^{-2}$  (60%)**

Infrarotabsorptionsspektrum von Wasser  
Wellenzahl ( $\text{cm}^{-1}$ ) = 10.000/Wellenlänge ( $\mu\text{m}$ )



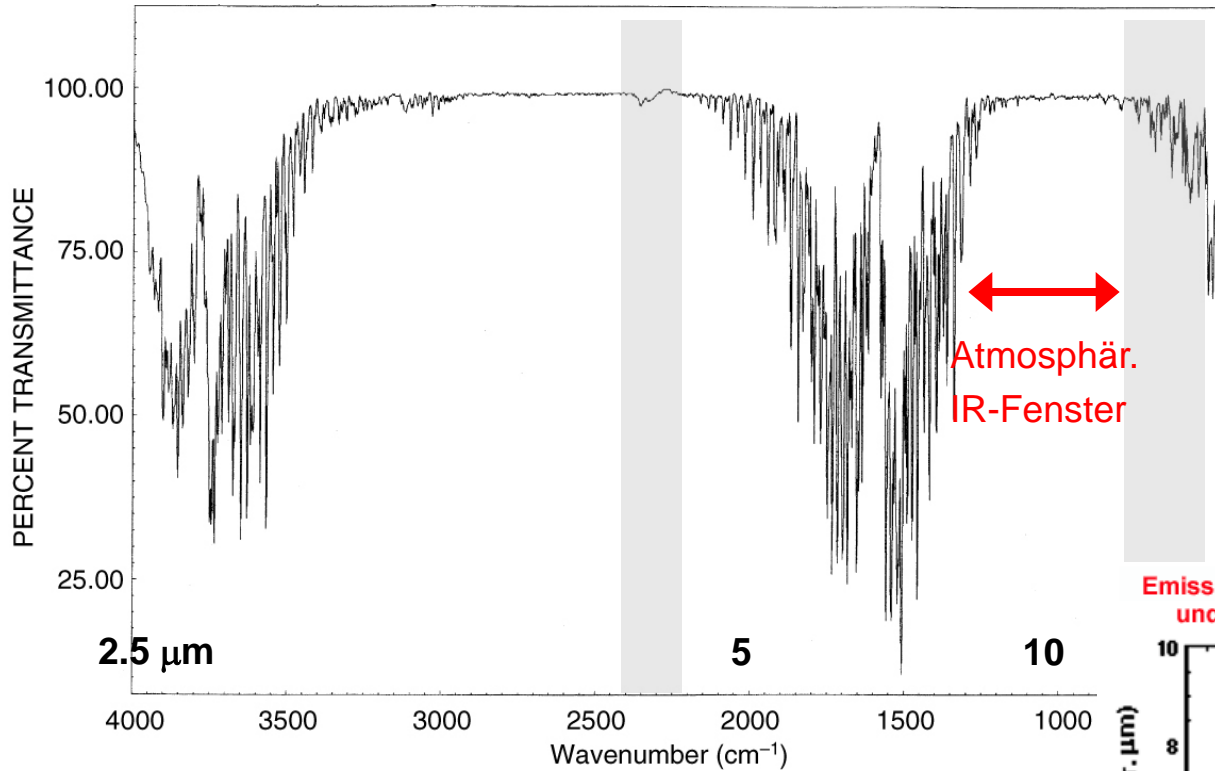
## KOHLENDIOXID

- Absorptionsbanden bei 15-16 $\mu\text{m}$ , 14-19  $\mu\text{m}$ , und stark bei 4 – 4.3 $\mu\text{m}$
- Natürliche Quelle im Wesentlichen Abbau organischer Substanz
- „ $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ “
- Prozesse unterschiedlich  
Respiration von Biomasse, natürliche Brände, etc., ozeanische Quellgebiete (aber im steady state durch Senken kompensiert)
- Senken: Photosynthese, ozeanische Aufnahme,
- Anthropogen: derzeit ca 8 GtC/yr, davon  $\frac{3}{4}$  fossile Brennstoffe, davon ca 3.3 GtC in Atmosphäre und 2.3 durch ozeanische Aufnahme
- Jährliche Zunahme z.Zt etwa 1.5 ppmV/a
- **Netto z. Zt  $\sim 50 \text{ Wm}^{-2}$**





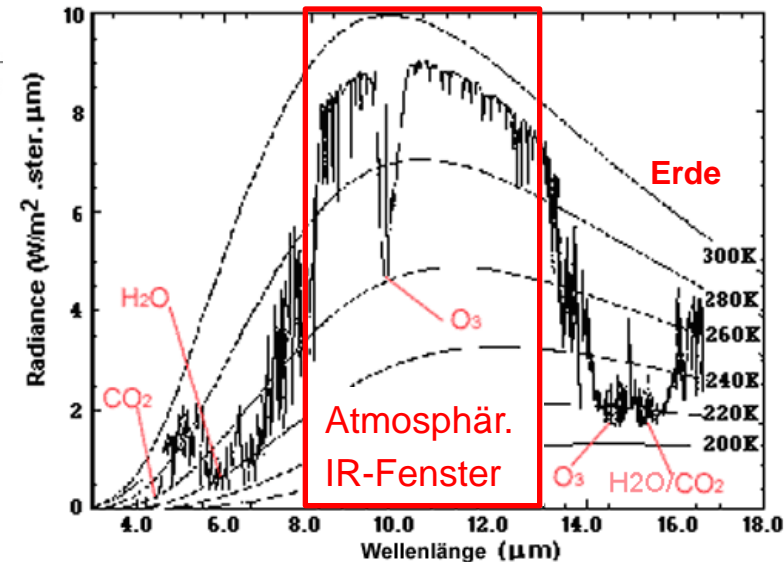
# Das IR-Fenster der Atmosphäre



Gute Abdeckung von  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  in den IR Regionen:  $< 7.7 \mu\text{m}$   
 $> 13 \mu\text{m}$

Abweichung von der Schwarzkörperstrahlung der Erde bedingt durch Absorption der Treibhausgase in der Atmosphäre

Emissionsspektrum Erdatmosphäre, terrestrische Strahlung und entsprechende Schwarzkörperstrahlung (Sahara)



## METHAN

• Absorptionsbanden bei 3 - 3.6  $\mu\text{m}$ ,  
- **8.3  $\mu\text{m}$** , und stark bei 4 - 4.3  $\mu\text{m}$  **7.1**

• Derzeit etwa 1800 ppbV,  
atmosphärische Lebenszeit etwa **12**  
Jahre

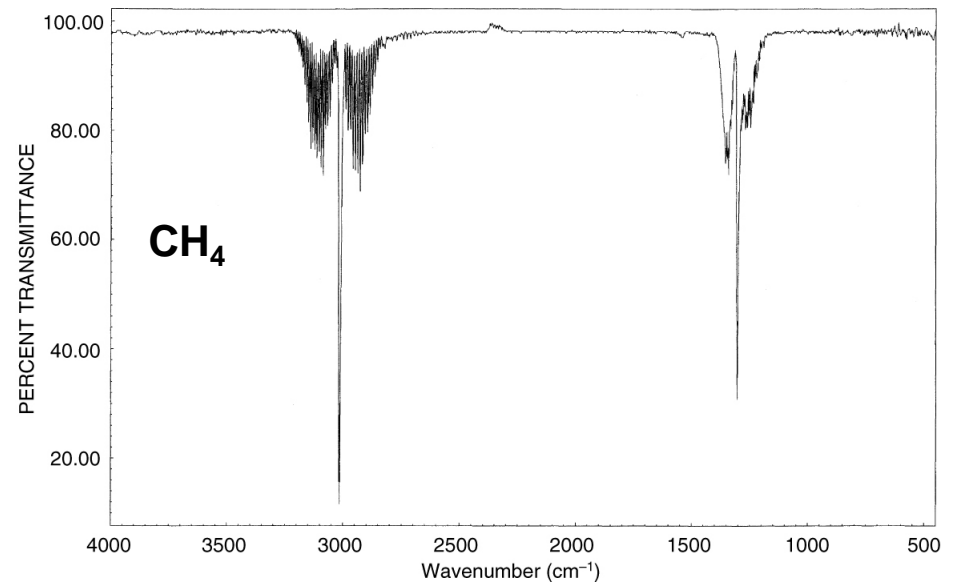
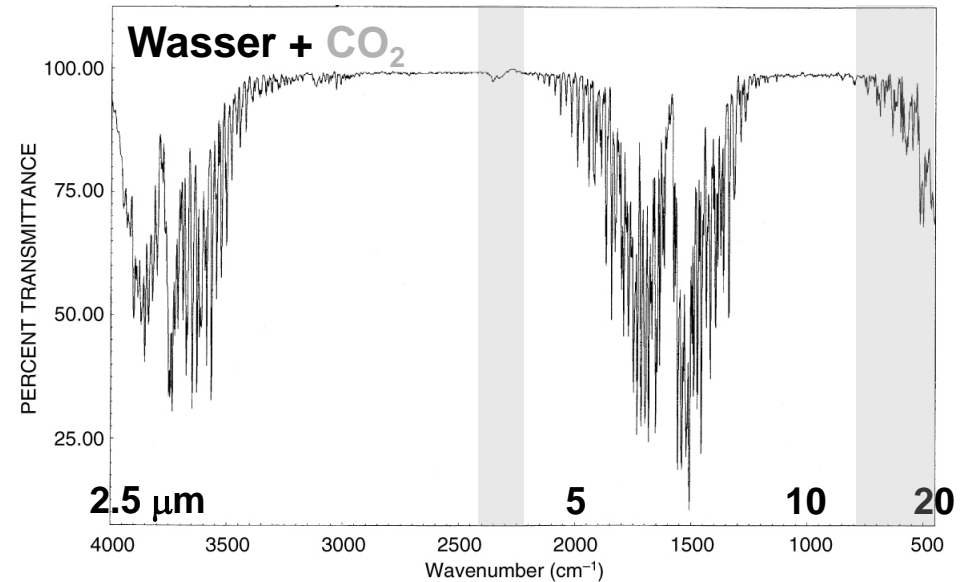
• Natürliche Quellen: mikrobielle  
Methanogenese in reduzierten  
Umgebungen (Feuchtgebiete (T-  
abhängig), Termiten, Wiederkäuer

• Anthropogene Quellen: Deponiegas,  
Erdgasgewinnung u. Transport,  
Grubengas

• Hauptabbaureaktion in Troposphäre  
über Hydroxylradikal, geringer Teil in  
Böden und Stratosphäre

➤ Anteil am Treibhauseffekt  
ca.  $1,7 \text{ Wm}^{-2}$   
+  $0,48 \text{ Wm}^{-2}$  seit 1750 (= RF

**CH<sub>4</sub>)**

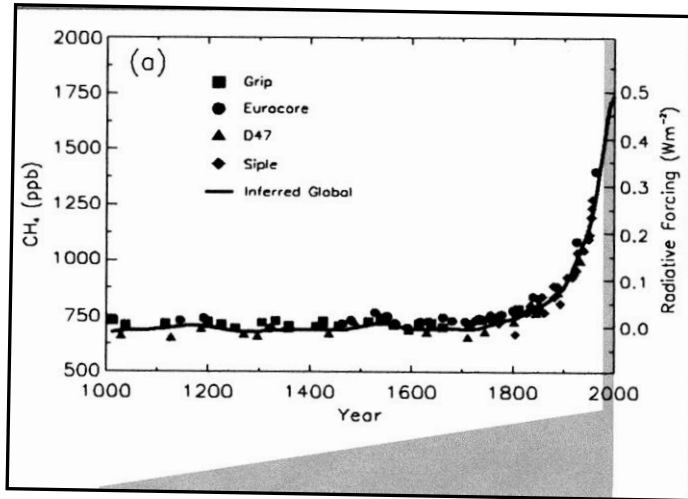


**Table 3.3**

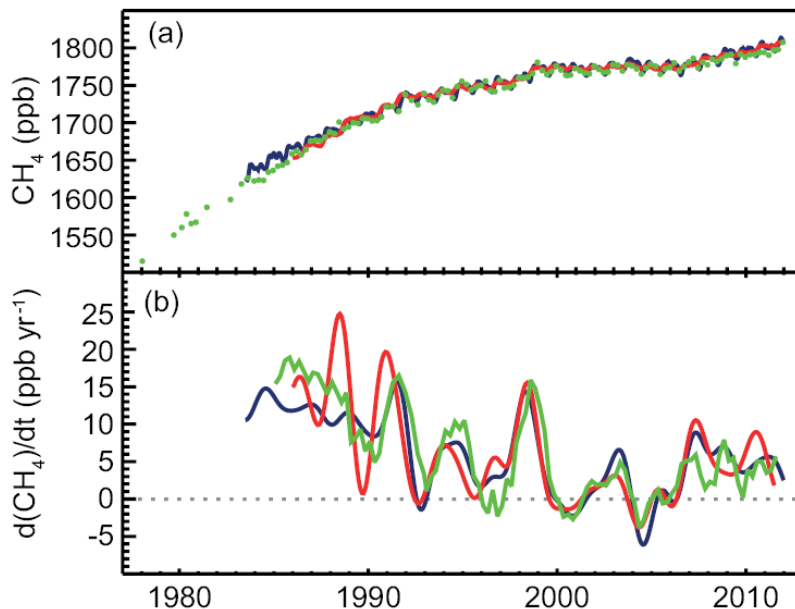
Estimated sources and sinks of methane in millions of tonnes per year<sup>20</sup>. The first column shows the best estimate from each source; the second column illustrates the uncertainty in the estimates by giving a range of values.

Sources		
NATURAL:		
Wetlands	115	(55–150)
Termites	20	(10–50)
Ocean	10	(5–50)
Other	15	(10–40)
HUMAN-GENERATED:		
Coal mining, natural gas, petroleum industry	100	(70–120)
Rice paddies	60	(20–100)
Enteric fermentation	85	(65–100)
Animal wastes	25	(20–70)
Domestic sewage treatment	25	(15–80)
Landfills	40	(20–70)
Biomass burning	40	(20–80)
Sinks		
Atmospheric removal	530	(440–625)
Removal by soils	30	(15–45)
Atmospheric increase	37	(35–40)

## Treibhausgase - Methan



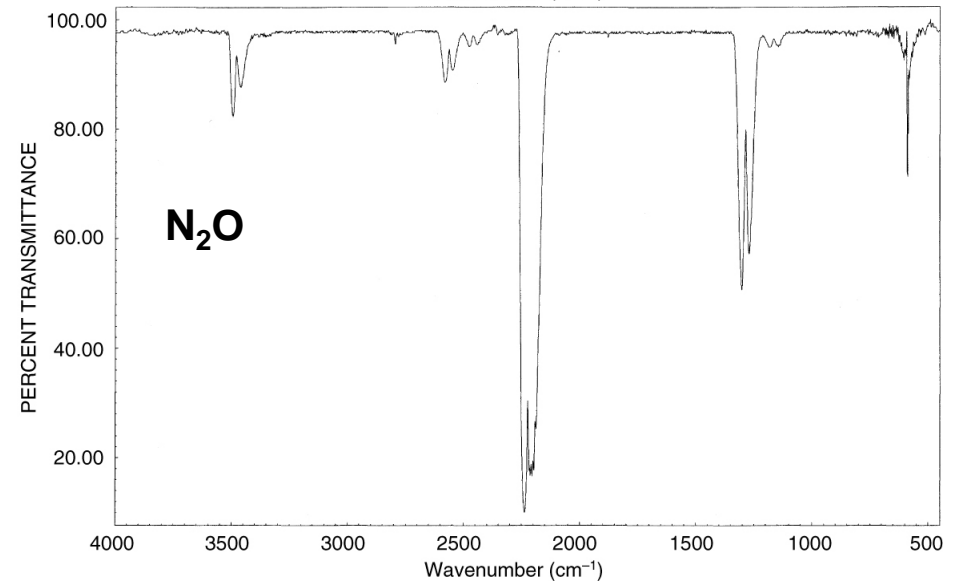
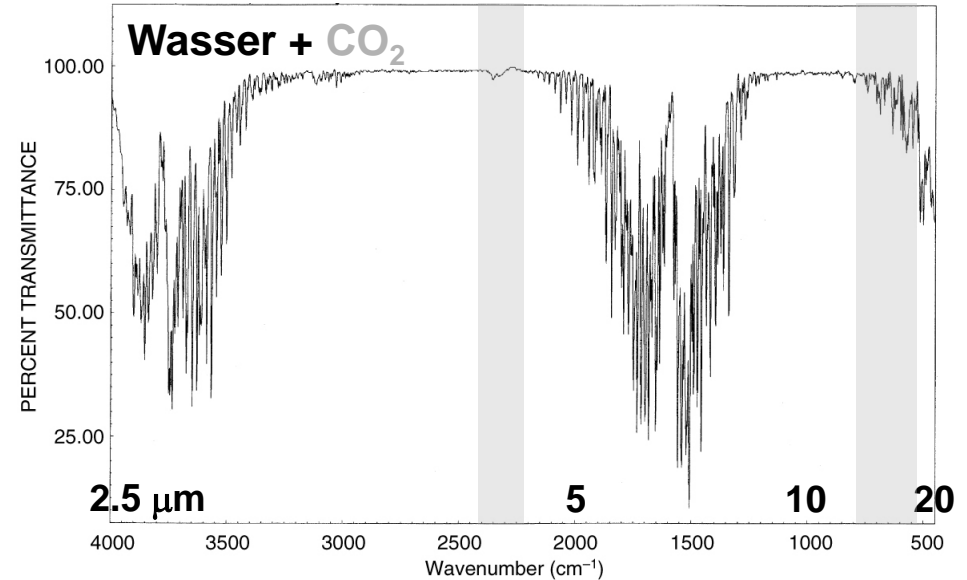
- Glazial-Interglazialwechsel von 300 ppmV – 700 ppmV
- Positiver Feedback durch Temperatur



- Anstieg von über 20 ppbV/yr zu nahezu Stagnation Ende des Millenniums bis 2006
- Jährliche Zunahme war rückläufig bis 2006 (Ostblock Gaswirtschaft)
- Danach leichter Anstieg ev. Methan-Freisetzung aus Permafrostgebieten
- Jetzt 1800 ppmV

## LACHGAS (N<sub>2</sub>O)

- Absorptionsbanden kleiner 5 μm und im Bereich zwischen **7.4 und 8.7 μm**
  - Derzeit etwa 320 ppbV
  - Anstieg etwa 0.3% yr<sup>-1</sup>
  - Hauptquelle aus Denitrifikation
  - An sich natürlich, aber durch Erzeugung von Stickstoffdünger anthropogen verstärkt
  - Lebenszeit etwa 120 yr
  - Abbau im Wesentlichen in der Stratosphäre
$$\begin{array}{l} \text{N}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{N}_2 + \text{O} \\ \text{N}_2\text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + \rightarrow 2\text{NO} \end{array} > \text{O}_3^-$$
- Abbau
- Positive Rückkopplung mit T
  - Anteil am Treibhauseffekt ca. 1.3 Wm<sup>-2</sup>  
+ 0.16 Wm<sup>-2</sup> seit 1750 (= RF N<sub>2</sub>O)

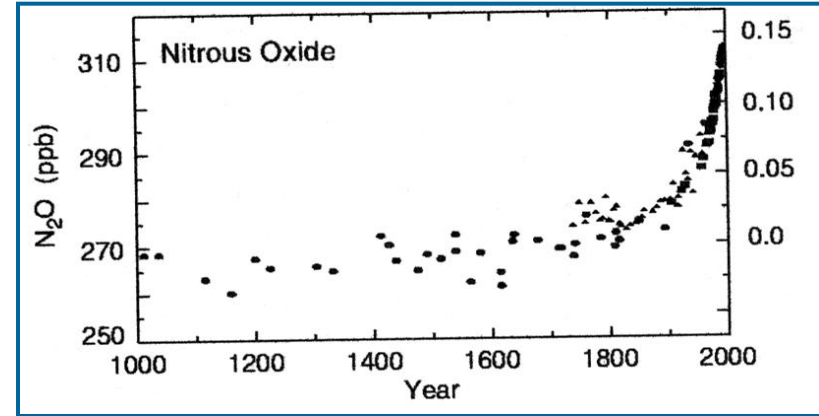
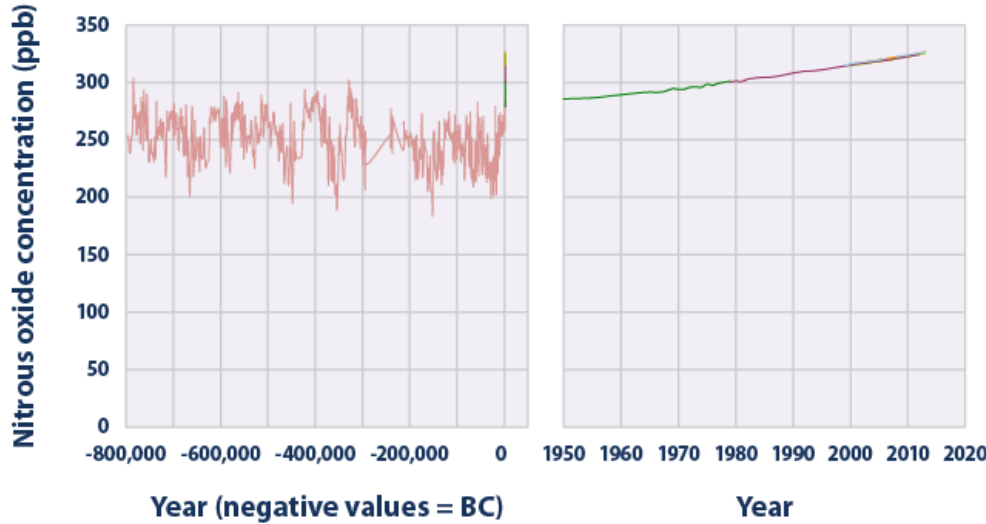


- Anstieg etwa  $0.3\% \text{ yr}^{-1}$

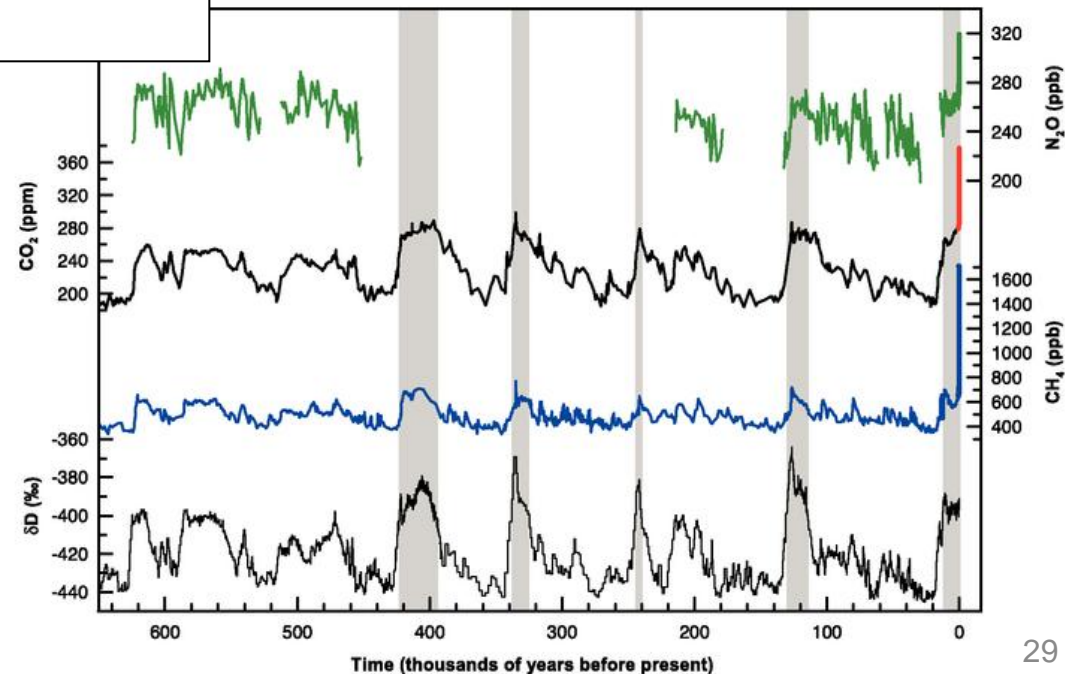
Global Atmospheric Concentrations of Nitrous Oxide Over Time

800,000 BC to 2013 AD

1950 to 2013 AD



GLACIAL-INTERGLACIAL ICE CORE DATA



- $\text{N}_2\text{O}$  Entwicklung zeigt gleichen Verlauf wie  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$
- Positiver Feedback
- Deuterium als Temperatur-Proxy für lokale Temperatur (ice core data)
- Graue Bänder zeigen Warmzeiten

## Menschlicher Eingriff in den Stickstoffkreislauf

### Natürliche N-Fixierung



versus

### Industrielle N-Fixierung (Haber-Bosch)



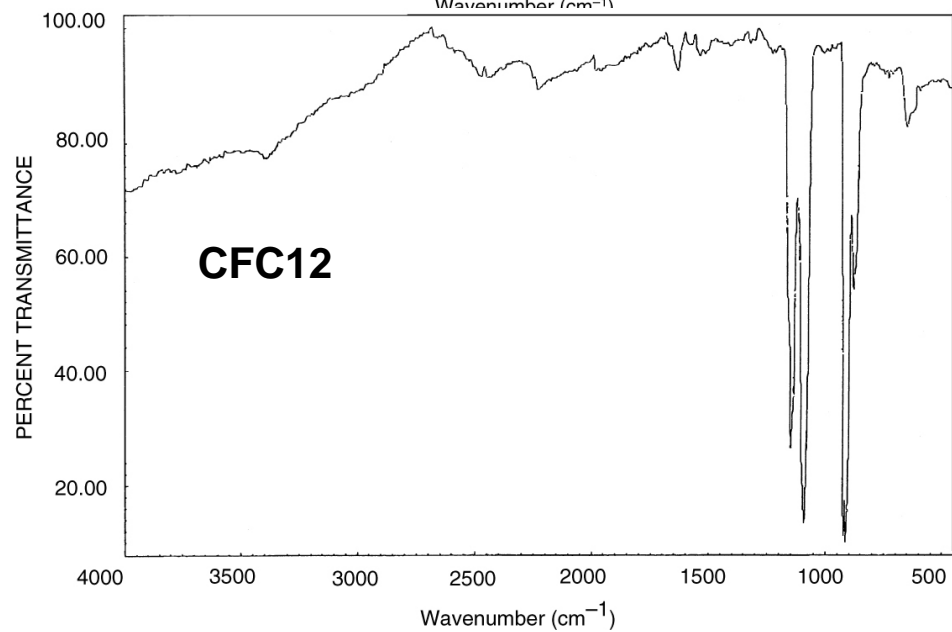
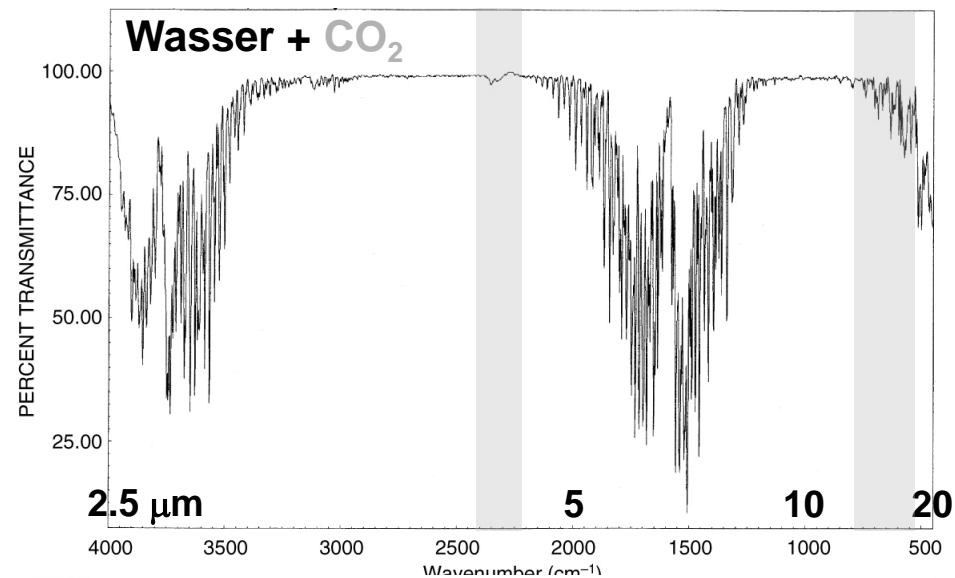
**Table 8.5** Some estimated global rates of important nitrogen transformations and some individual fluxes

	Rate, as N ( $10^6 \text{ t yr}^{-1}$ )	
	Sub-Totals	Totals
<i>Nitrogen fixation</i>		
Agricultural land	40	
Other land	100	
Fresh waters	4	
Total on land		144
Oceanic, pelagic	80	
Oceanic, benthic	15	
Total oceanic		95
<b>Total biological</b>		<b>238</b>
Lightning		3
<b>Industrial (Haber process, 1996)</b>	<b>93</b>	
Combustion	22	
Total direct by humans		115
Overall total		≈ 354
<i>Denitrification</i>		
In soils	Production of $\text{N}_2\text{O}$	10 – 17
	Production of $\text{N}_2$	107 – 233
In oceans	E. Tropical Pac. & Arabian Sea	60
	Total oceanic water column	91
In marine sediments		60
On continental shelves only		100
Overall total		≈ 368 – 500
<i>Various transports:</i>		
Rivers → sea	(all forms)	43
Sea spray → land	org. N	10 – 20
Rainfall on land	$\text{NH}_3$	91 – 186
	$\text{NO}_x$	32 – 83
Rainfall on sea	$\text{NH}_3$	19 – 50
	$\text{NO}_x$	11 – 33
	DON	28 – 84
$\text{N}_2\text{O}$ → stratosphere		10
$\text{NO}_x$ , from stratosphere downwards		0.5
Loss to marine sediments (burial)		10 – 38

Selected from Bowden 1983, Capone et al. 1997, Carpenter and Capone 1983, Codispoti and Christensen 1985, Cornell et al. 1995, Galloway et al. 1995, Holland 1978, Houghton et al. 1995, Logan 1983, Meybeck 1982, Schlesinger 1997, Seitzinger and Giblin 1996 and USGS 1997.

## Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)

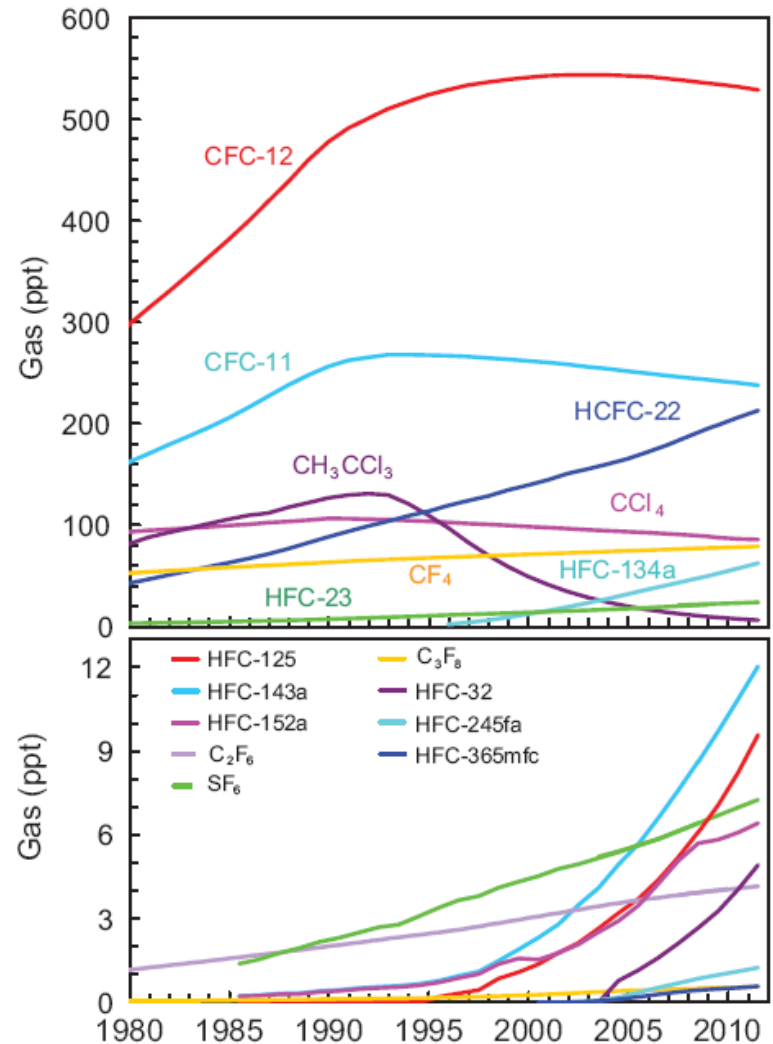
- Katalytischer Ozonabbau
- Absorptionsbanden zwischen **8** und **12  $\mu\text{m}$** , zB. CFC12 um 9.5 und 11.1, HCFCs ähnlich, aber Lebenszeit ( $\tau$ ) geringer





### Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)

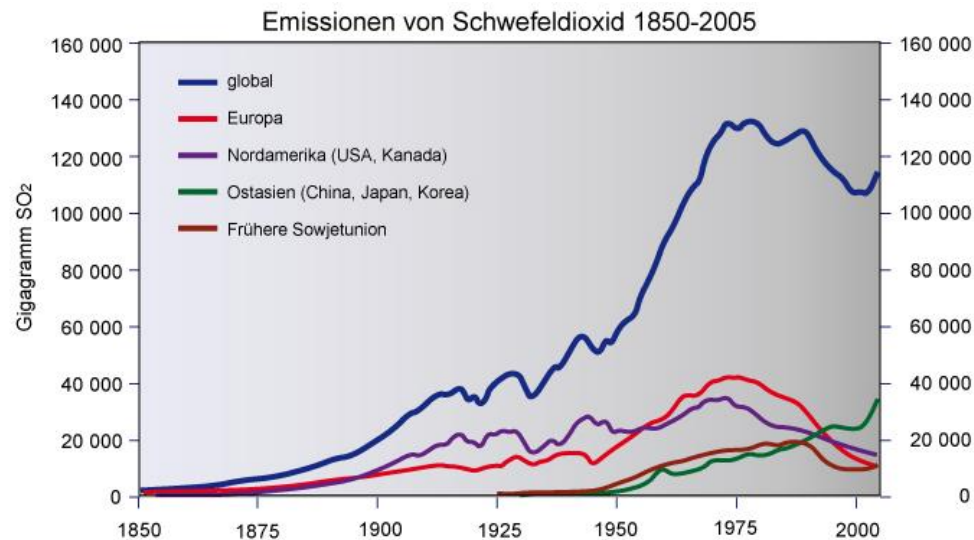
- Katalytischer Ozonabbau
- Absorptionsbanden zwischen **und 12  $\mu\text{m}$** , zB. CFC12 um 9.5 und 11.1, HCFCs ähnlich, aber Lebenszeit ( $\tau$ ) geringer
- CFC und HCFC gesamt um 2ppbV, bis Montreal-Protokoll mit Zuwachs von bis zu 5%  $\text{yr}^{-1}$
- Langfristig großes Problem mit den komplett fluorierten Verbindungen aufgrund der extrem langen Lebenszeit ( $\text{SF}_6$ )  
Metallveredelung: Al, Mg



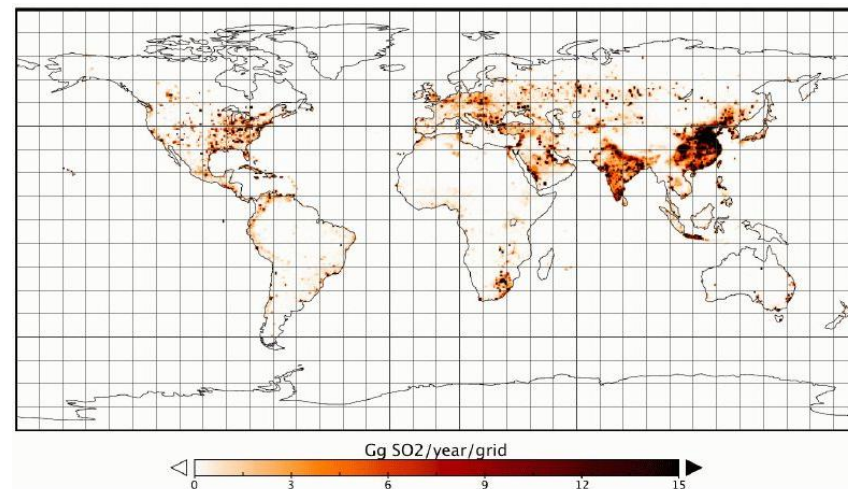
**Figure 2.4** | Globally averaged dry-air mole fractions at the Earth's surface of the major halogen-containing well-mixed GHG. These are derived mainly using monthly mean measurements from the AGAGE and NOAA/ESRL/GMD networks. For clarity, only the most abundant chemicals are shown in different compound classes and results from different networks have been combined when both are available.

## AEROSOLE

- Wolken sind die wichtigsten Aerosolansammlungen und beeinflussen Reflexion und Absorption
- Black Carbon (Ruß) > Erwärmung
- Schwefelaerosole wichtig als Rückstreuer und zur Wolkennukleation > Kühlung
- In Nordhemisphäre Schwefelaerosole anthropogen dominiert, in Südhemisphäre natürlich (DMS-Produktion)
- Gesamteffekt extrem komplex, und einer der größten Unsicherheiten in der Klimaprognose

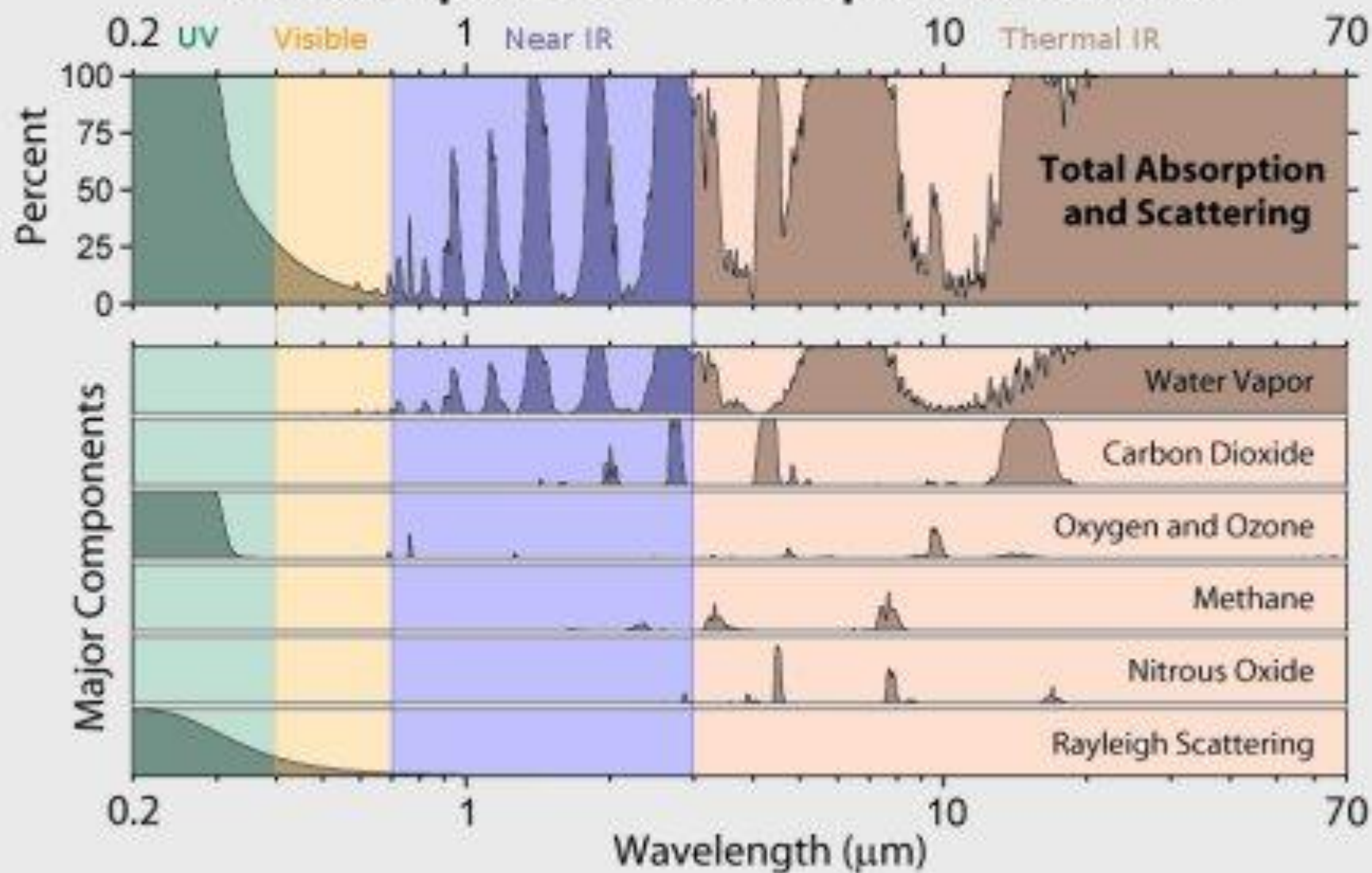


SO<sub>2</sub> als wichtigster Vorläufer zur Bildung von Sulfat-Aerosolen



Emission von anthropogenem SO<sub>2</sub>

# Atmospheric Absorption Bands



- **IR-absorbierende Gase**
  - **Wasser am wichtigsten, aber sehr variabel in der Verteilung**
  - **Zunahme einer Vielzahl IR-aktiver Spurengase aufgrund anthropogener Veränderung**
  - **Zusätzlich Emission natürlich nicht vorkommender Komponenten (CFC, SF<sub>6</sub>)**
  - **Direkter Effekt recht gut quantifizierbar**

**Table 8.3** Past and present greenhouse-gas concentrations in the troposphere, and their contribution to radiative forcing<sup>a</sup>.

Gaseous compound	Tropospheric concentration		Contribution to radiative forcing / W m <sup>-2</sup>
	Before 1750	At present	
Carbon dioxide	280 ppmv	387 ppmv	1.66
Methane	0.70 ppmv	1.774 ppmv	0.48
Nitrous oxide	0.27 ppmv	0.319 ppmv	0.16
Ozone	0.025 ppmv	0.034 ppmv	0.30 (net)
CFC-11	0 pptv	257 pptv	0.34 total for all halocarbons
CFC-12	0 pptv	544 pptv	
CFC-113	0 pptv	80 pptv	
Carbon tetrachloride	0 pptv	94 pptv	
Methyl chloroform	0 pptv	34 pptv	
HCFC-22	0 pptv	146 pptv	
HFC-23	0 pptv	14 pptv	
Perfluoroethane	0 pptv	3 pptv	0.002
Sulphur hexafluoride	0 pptv	4.8 pptv	
Aerosols			-1.2

<sup>a</sup> The contribution to greenhouse warming is usually referred to as increased radiative forcing; this describes the average additional energy in watts per square metre made available to the Earth associated with the increase in concentration of each gas. Radiative forcing values used in this book are for changes relative to pre-industrial conditions defined at 1750.

## Relative Bedeutung der einzelnen „Treibhausgase“

### „radiative forcing“

Kennziffer zur Einordnung der Wichtigkeit der verschiedenen Treibhausgase am Treibhauseffekt

abhängig von:

- Schon vorhandener Konzentration
- Wellenlänge der Absorption
- Absorptionsquerschnitt

➤ Beschreibt den spontanen Effekt auf den Wärmehaushalt der Erde durch eine Erhöhung der Menge eines Gases in der Atmosphäre

Oft relative zu CO<sub>2</sub> :  
RIRF – Index (relative instantaneous radiative forcing)

Gas	Residence time / y <sup>a</sup>	Relative instantaneous radiative forcing	
CO <sub>2</sub>	50–200 <sup>b</sup>	1	
CH <sub>4</sub>	12	43	
N <sub>2</sub> O	115	250	
CFC-11	45	15 000	Hoher RIRF, da Absorption im IR-Fenster
CFC-12	102	19 000	
HCFC-22	12	13 000	
CCl <sub>4</sub>	35		
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10 000		
SF <sub>6</sub>	3 200		

$$\text{RIRF} = \frac{\text{unmittelbarer Einfluss auf die IR-Absorption durch Zugabe eine Menge } x \text{ des Gases } i}{\text{unmittelbarer Einfluss auf die IR-Absorption durch Zugabe eine Menge } x \text{ des Gases } \text{CO}_2}$$

## GWP (Global-Warming Potential)

$$\text{GWP} = \frac{\int_0^t a_i(t)c_i(t) dt}{\int_0^t a_c(t)c_c(t) dt}$$

$a_i(t)$  instantaneuous rad. forcing

$c_i(t)$  verbleibende Konzentration des Gases  $i$  zur Zeit  $t$

$c$  Bezugswerte für  $\text{CO}_2$

- Maß für die Auswirkung der Zugabe auf die Strahlungsbilanz für einen Zeitraum  $t$

- heute (leider) in der Regel auf 100yr bezogen

- Problem bei der Einschätzung sehr langlebiger Komponenten

**Table 8.4** Greenhouse gas properties related to global warming.

Gas	Residence time / y <sup>a</sup>	Relative instantaneous radiative forcing	Global warming potential (GWP) <sup>c</sup>
$\text{CO}_2$	50–200 <sup>b</sup>	1	1
$\text{CH}_4$	12	43	23
$\text{N}_2\text{O}$	115	250	296
CFC-11	45	15 000	4 600
CFC-12	102	19 000	10 600
HCFC-22	12	13 000	1 700
$\text{CCl}_4$	35		1 800
$\text{C}_2\text{F}_6$	10 000		11 900
$\text{SF}_6$	3 200		22 200

<sup>a</sup> Most of the atmospheric lifetime values are taken from Additional Reading 1.

<sup>b</sup> Reported residence time values for carbon dioxide are highly variable. Differences are associated with the way in which oceanic uptake is measured, particularly whether the surface layer or the entire ocean is considered in the calculation.

<sup>c</sup> GWP values are obtained by integration over a 100 y period. Obtained from Blasing, T.J. and S. Jones, *Current greenhouse gas concentrations*, <[http://ediac.esd.ornl.gov/pns/current\\_ghg.html](http://ediac.esd.ornl.gov/pns/current_ghg.html)> (February 2004). These values relate to direct effects; interactions of CFCs with ozone in the lower stratosphere may reduce the amount of radiation into the lower atmosphere, contributing to a cooling effect. The GWP values would be correspondingly reduced.

**SF<sub>6</sub> Schwefelhexafluorid**  
 Verwendung als Schutzgas  
 bei der Herstellung von  
 Magnesium und als  
 Isoliergas in der  
 Hochspannungstechnik

**Table 3:** Direct Global Warming Potentials (GWPs) relative to carbon dioxide (for gases for which the lifetimes have been adequately characterised). GWPs are an index for estimating relative global warming contribution due to atmospheric emission of a kg of a particular greenhouse gas compared to emission of a kg of carbon dioxide. GWPs calculated for different time horizons show the effects of atmospheric lifetimes of the different gases. [Based upon Table 6.7]

Gas		Lifetime (years)	Global Warming Potential (Time Horizon in years)			
			20 yrs	100 yrs	500 yrs	
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	50 - 200	1	1	1	
Methane <sup>a</sup>	CH <sub>4</sub>	12.0 <sup>b</sup>	62	23	7	
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	114 <sup>b</sup>	275	296	156	
<b>Hydrofluorocarbons</b>						
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	260	9400	12000	10000	
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	5.0	1800	550	170	
HFC-41	CH <sub>3</sub> F	2.6	330	97	30	
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	5900	3400	1100	
HFC-134	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	9.6	3200	1100	330	
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	13.8	3300	1300	400	
HFC-143	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> F	3.4	1100	330	100	
HFC-143a	CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	52	5500	4300	1600	
HFC-152	CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> F	0.5	140	43	13	
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1.4	410	120	37	
HFC-161	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	0.3	40	12	4	
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	33	5600	3500	1100	
HFC-236cb	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	13.2	3300	1300	390	
HFC-236ca	CHF <sub>2</sub> CHFCF <sub>3</sub>	10	3600	1200	390	
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	220	7500	9400	7100	
HFC-245ca	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	5.9	2100	640	200	
HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.2	3000	950	300	
HFC-365mfc	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	9.9	2600	890	280	
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	15	3700	1500	470	
<b>Fully fluorinated species</b>						
SF <sub>6</sub>			3200	15100	22200	32400
CF <sub>4</sub>			50000	3900	5700	8900
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>			10000	8000	11900	18000
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>			2600	5900	8600	12400
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>			2600	5900	8600	12400
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>			3200	6800	10000	14500
C <sub>3</sub> F <sub>12</sub>			4100	6000	8900	13200
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>			3200	6100	9000	13200
<b>Ethers and Halogenated Ethers</b>						
CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>		0.015		1	1	<<1
HFE-125	CF <sub>3</sub> OCHF <sub>2</sub>	150	12900	14900	9200	
HFE-134	CHF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	26.2	10500	6100	2000	
HFE-143a	CH <sub>3</sub> OCF <sub>3</sub>	4.4	2500	750	230	
HCFE-235da2	CF <sub>3</sub> CHClOCHF <sub>2</sub>	2.6	1100	340	110	
HFE-245fa2	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	4.4	1900	570	180	
HFE-254cb2	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	0.22	99	30	9	
HFE-7100	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>	5.0	1300	390	120	
HFE-7200	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	0.77	190	55	17	
H-Galden 1040x	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OC <sub>2</sub> F <sub>4</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.3	5900	1800	560	
HG-10	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	12.1	7500	2700	850	
HG-01	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.2	4700	1500	450	

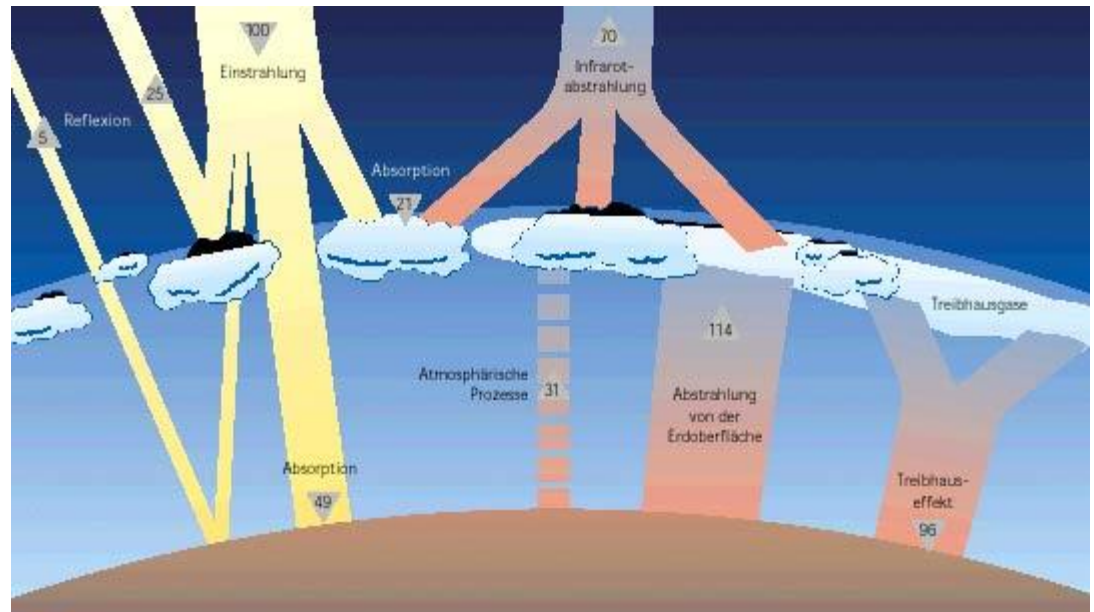
<sup>a</sup> The methane GWPs include an indirect contribution from stratospheric H<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub> production.

<sup>b</sup> The values for methane and nitrous oxide are adjustment times, which incorporate the indirect effects of emission of each gas on its own lifetime.

# Die Chemie des globalen Klimas und Global Change

## TEIL I: der nat. Treibhauseffekt

- Auswirkung chemischer Bestandteile der Atmosphäre auf das Klima
- Energiehaushalt
- Treibhausgase
- Das atmosphärische IR-Fenster
- GWPs



## TEIL II: der anthropogene Treibhauseffekt



### BRENNSTOFFE in der CO<sub>2</sub>-Bilanz

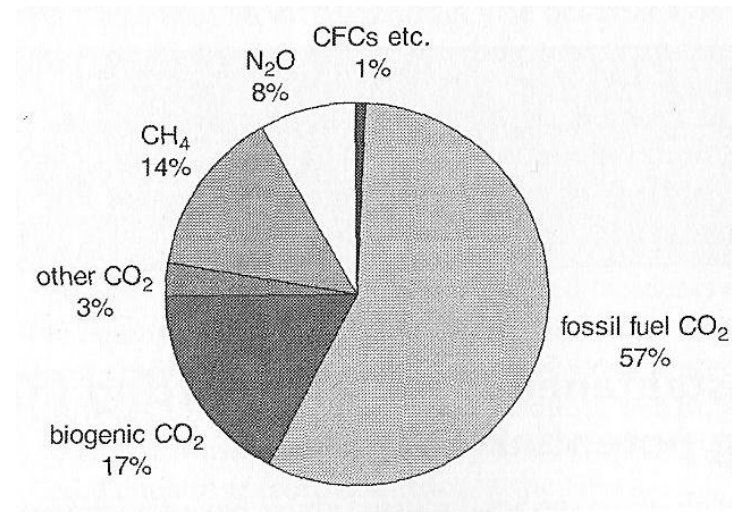


- Von 40% Energiebedarf in 3rd World countries bis zu 1% in Industriestaaten, global um 14%
- Aber Kompensation durch photosynthetische Aufbaureaktion
- Kein Nullsummenspiel und energetische Limitationen
  - Düngung
  - Leaching der Böden
  - Wirkungsgrad real < 1%

Zum Vergleich: Photovoltaik ~ 15% (GaAs-22%, derz. Rekord 31.4%)  
Solarthermie ~ 70%

## Anteil der verschiedenen anthropogenen Treibhausgas-Emissionen am Treibhauseffekt

•Berücksichtigt wird das „spontane radiative forcing“ und die Emission der einzelnen Komponenten im Jahr 2007.



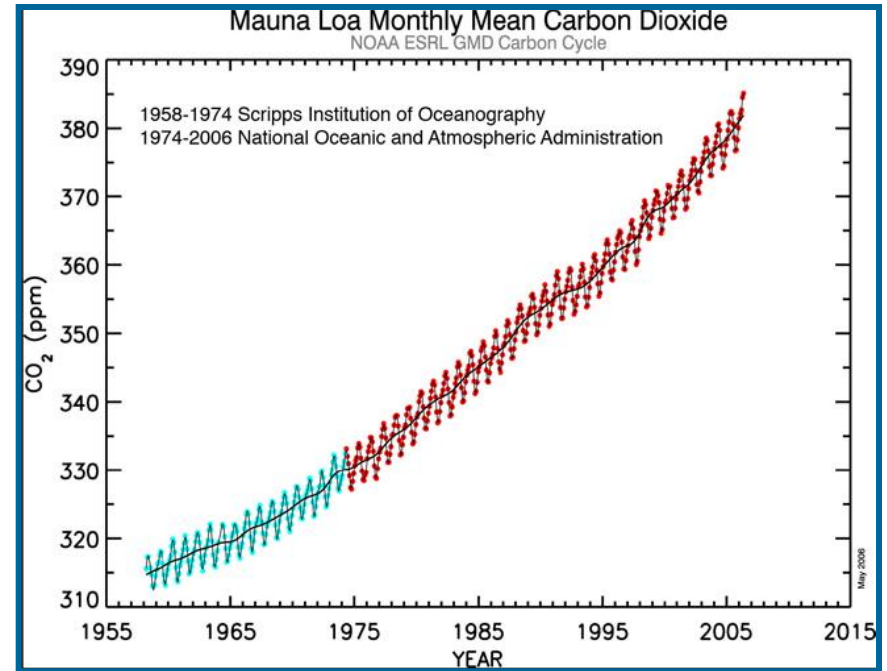
**Table 8.7** Annual commercial energy consumption in the regions of the world<sup>a</sup>.

Region	Energy consumption		Population / 10 <sup>6</sup>	Annual commercial energy consumption per capita / GJ y <sup>-1</sup>
	EJ y <sup>-1</sup>	% of total		
Africa	13.9	3.1	967	14
Asia Pacific	156	35.2	3690	42
Mid-East	24.5	5.5	266	92
Europe and Eurasia	116	26.2	877	132
Mexico, Central and South America	29.3	6.6	681	43
United States and Canada	103	23.3	334	307
World	443	100	6705	65

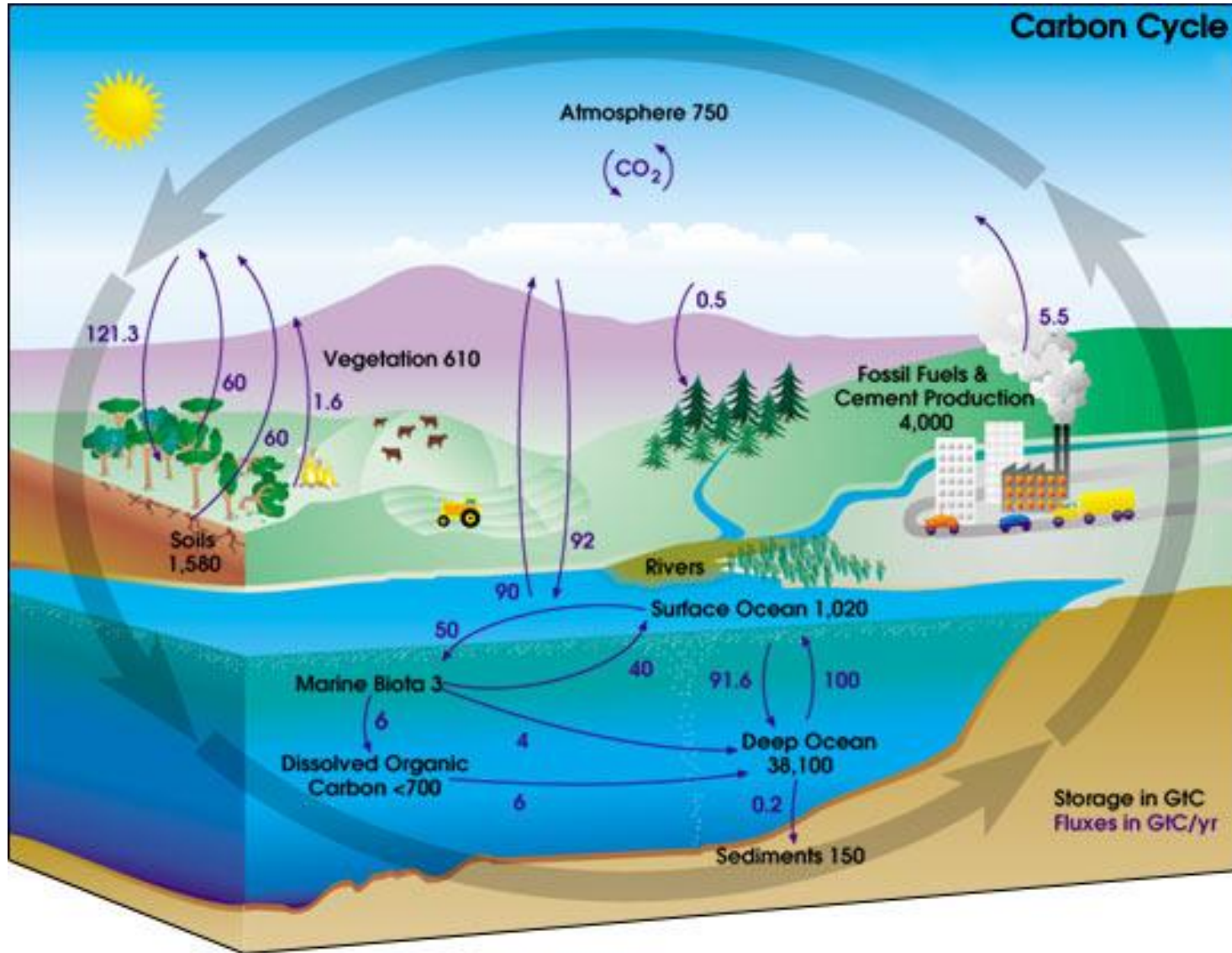
1 EJ = 10<sup>18</sup> J

## Der Kohlenstoffkreislauf

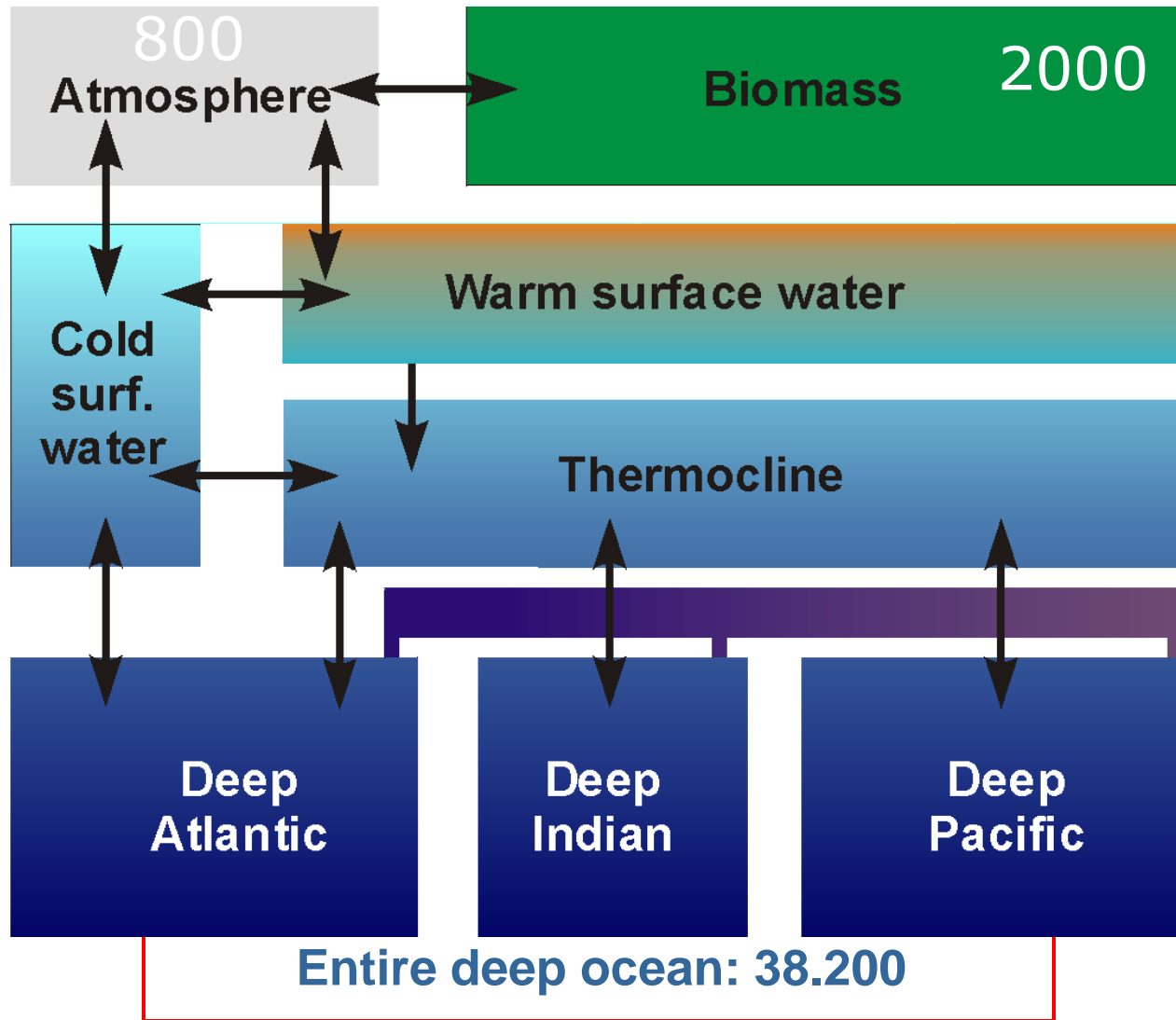
- Atmosphärischer Anstieg von vorindustriellen 280 ppmV bis auf 380 ppmV heute
- Entspricht nur etwa 50-60% der abgeschätzten Menge an emittiertem CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion (244 +/- 20 x 10<sup>15</sup> g von 1800 bis 1994)
- Etwa 116 +/- 19 x 10<sup>15</sup> g wurden von 1800 bis 1994 durch den Ozean aufgenommen (Sabine et al., 2004)
- **Wo bleibt auf welchen Zeitskalen der Kohlenstoff?**



# Der Kohlenstoffkreislauf

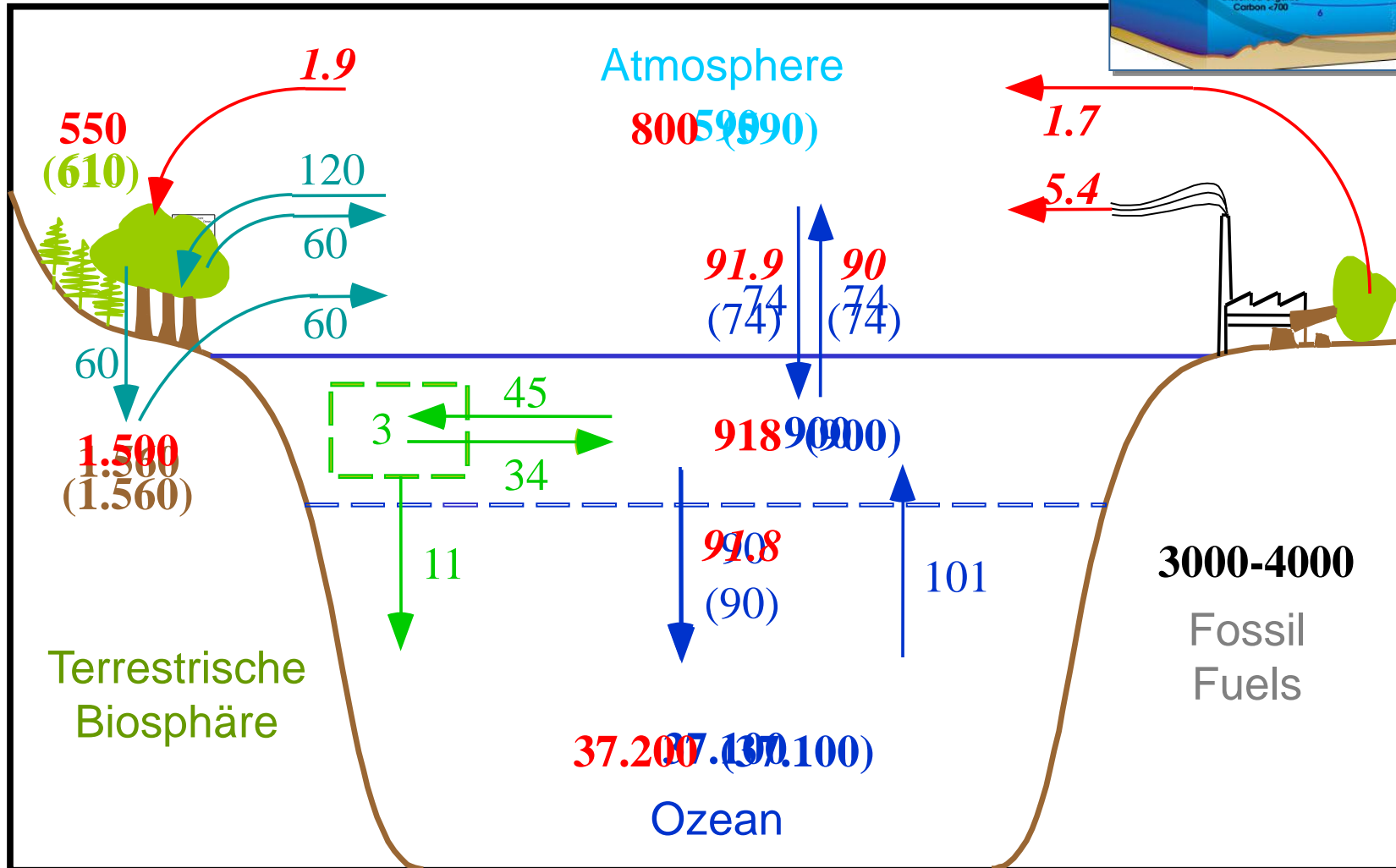
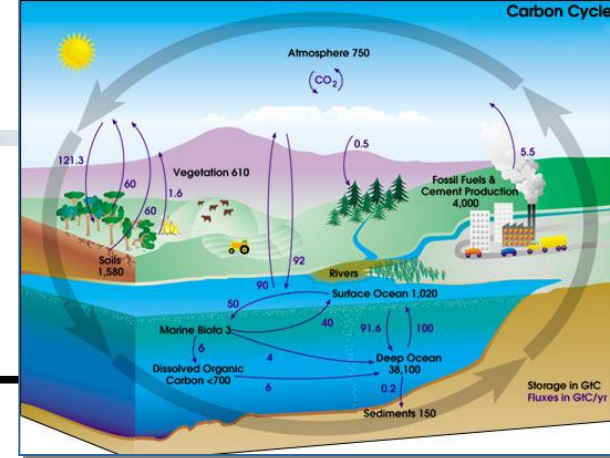


## Die schnell austauschenden Kohlenstoffreservoirs

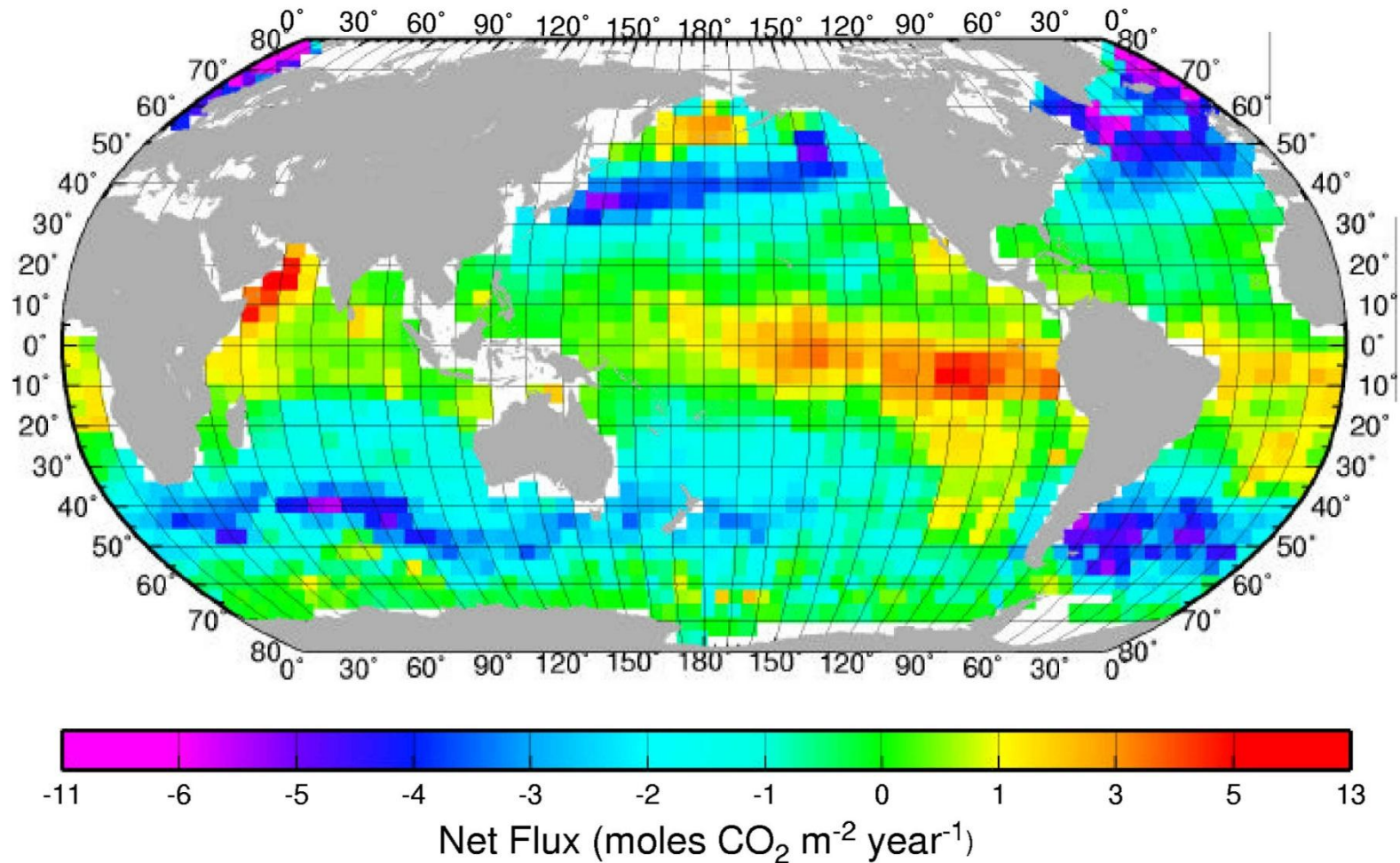


After Siegenthaler and Sarmiento, 1993.

# Die anthropogene Störung des Kohlenstoffkreislaufs



# Gasaustauschflüsse



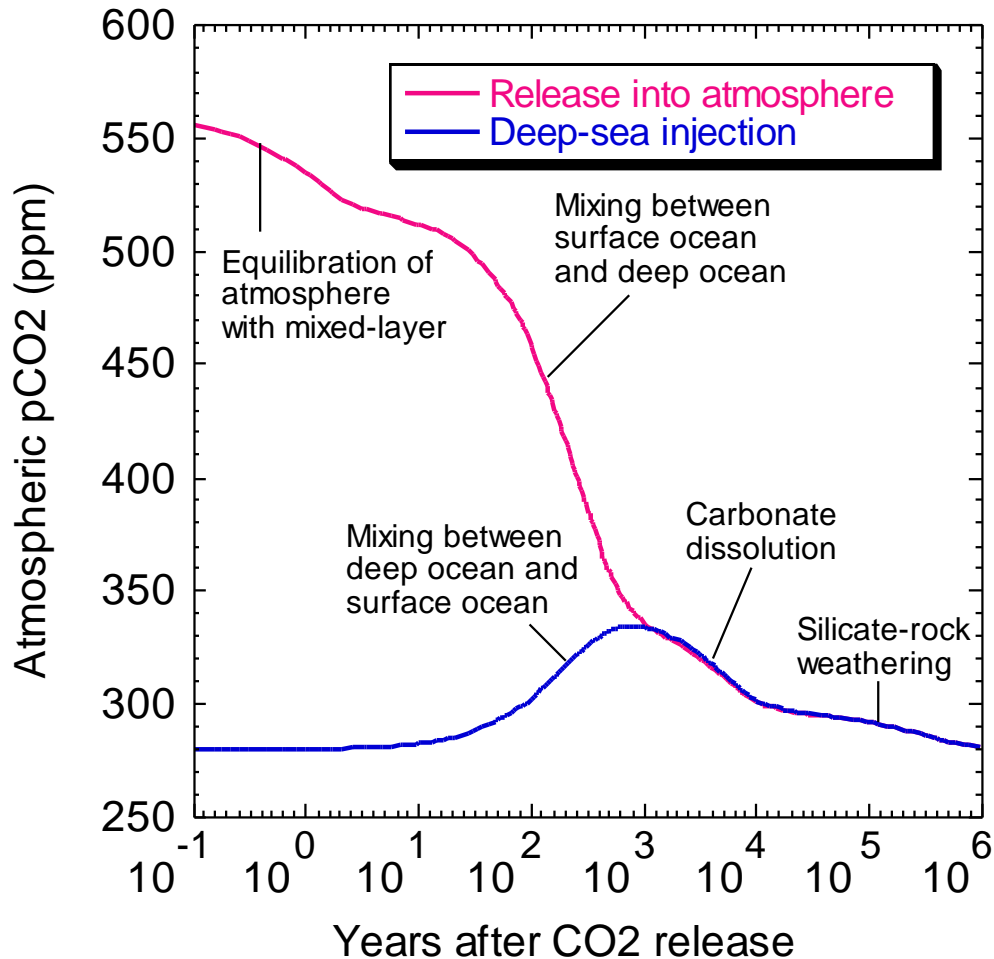
Global annual mean CO<sub>2</sub>-fluxes as a result of an integrated compilation (from Takahashi et al., DSR II, 2002).

## ***Some views of the role of the ocean for the uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub>***

- **So far, the ocean took up about 50% of the anthropogenic CO<sub>2</sub> released since the mid of the last century (i.e. Sabine et al., 2004)**
- **The ocean helps to diminish the effect of anthropogenic CO<sub>2</sub> on atmosphere and climate (the IPCC 2001 view)**
- **The ocean becomes more acidified, causing stress on marine biota; today, in particular in the upper ocean (The “ocean in a high CO<sub>2</sub> world, 2004” view)**
- **On the long run (>1000years), the ocean will be the major sink for anthropogenic CO<sub>2</sub> (~85%)**
- **The ocean would diminish the effect of anthropogenic CO<sub>2</sub> on atmosphere and climate stronger, if equilibration would not be that slow (the rationale to think about intentional marine storage)**



## Zeitskalen der Relaxation der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Störung



- Equilibration mit dem Oberflächenwasser auf einer Zeitskala < 10 yr
  - “Nadelöhr der GW-Einstellung mit dem Karbonatsystem des tiefen Ozeans (Zeitskala ~ 10<sup>3</sup> yr)
  - Entgeltige Entfernung durch ozeanische Karbonatlösung (~10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> Jahre und schliesslich Verwitterungszyklus (10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> yr)
- Idee der direkten Sequestration des CO<sub>2</sub> in die Tiefsee

Spontane Zugabe einer Menge CO<sub>2</sub>, die dem vorindustriellen Inventar der Atmosphäre entspricht, in die Atmosphäre bzw. in den tiefen Ozean (Courtesy of Ken Caldeira, LLML).

## Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC)

- Nobelpreis im Jahr 2007



## Organisation

- Von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) ins Leben gerufen

### Arbeitsgruppe 1

- Naturwissenschaftliche Ursachen des Klimawandels

### Arbeitsgruppe 2

- Verwundbarkeit von sozioökonomischen und natürlichen Systemen gegenüber dem Klimawandel und dessen Auswirkungen.
- Wege zur Anpassung des Menschen an den Klimawandel

### Arbeitsgruppe 3

- Politische und technische Optionen zur Verminderung des anthropogenen Klimas

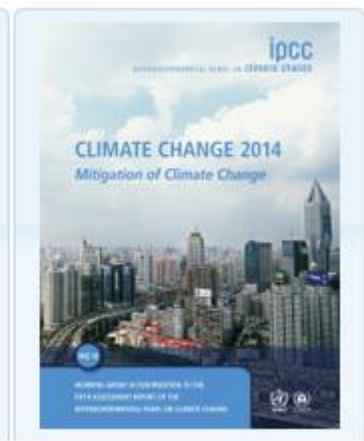
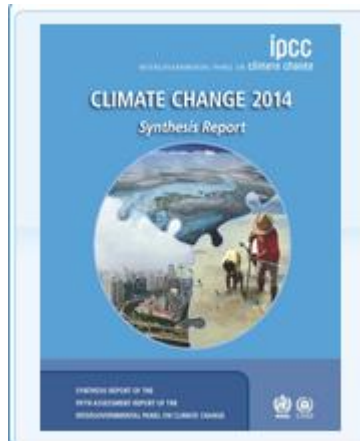
## Dienste

- liefert der Politik und Öffentlichkeit aktuelle Daten zum Klimawandel
  - Abschätzung der Folgen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft
  - Entwickelt Anpassungs- und Minderungsoptionen
  - Verfasst hierzu unpolitische Berichte (verabsch. von beteiligt. Regierungen)

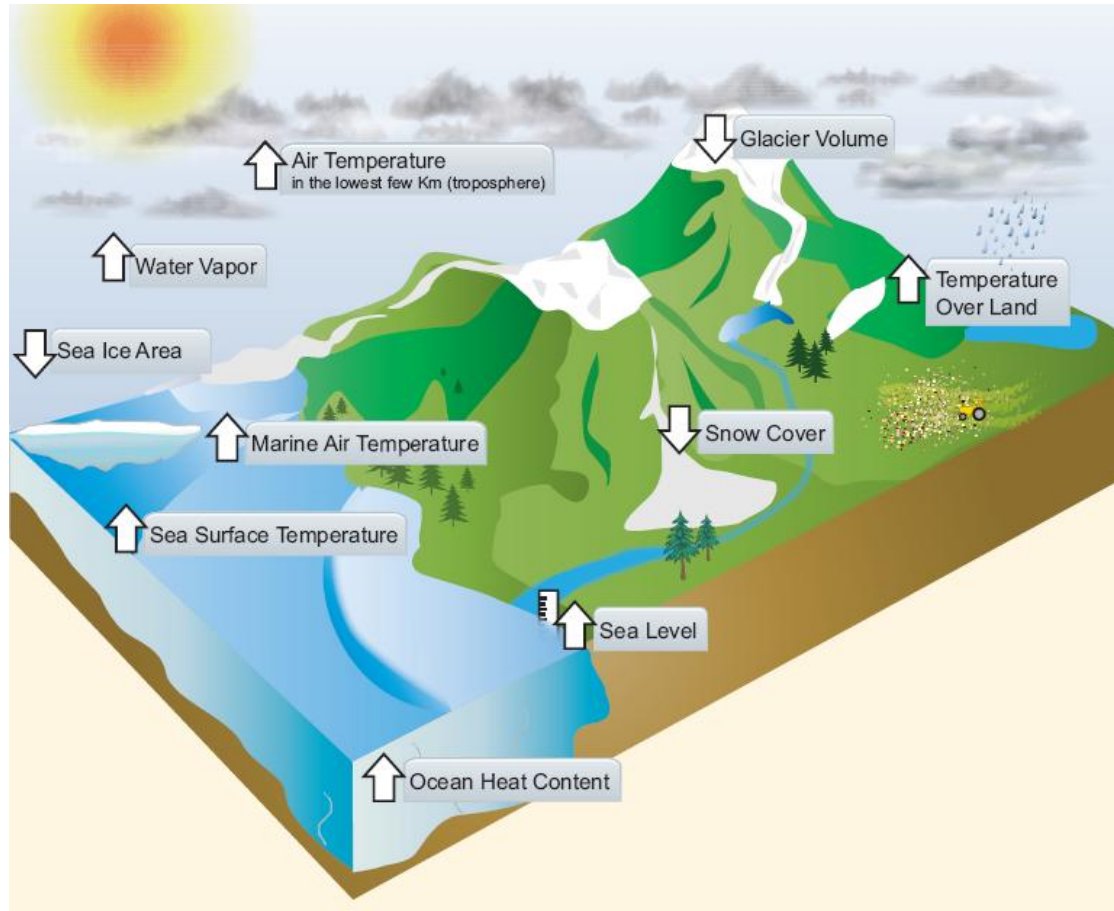
## Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC)

### Dienste

- liefert der Politik und Öffentlichkeit aktuelle Daten zum Klimawandel
  - Abschätzung der Folgen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft
  - Entwickelt Anpassungs- und Minderungsoptionen
  - Verfasst hierzu unpolitische Berichte (verabsch. von beteiligt. Regierungen)

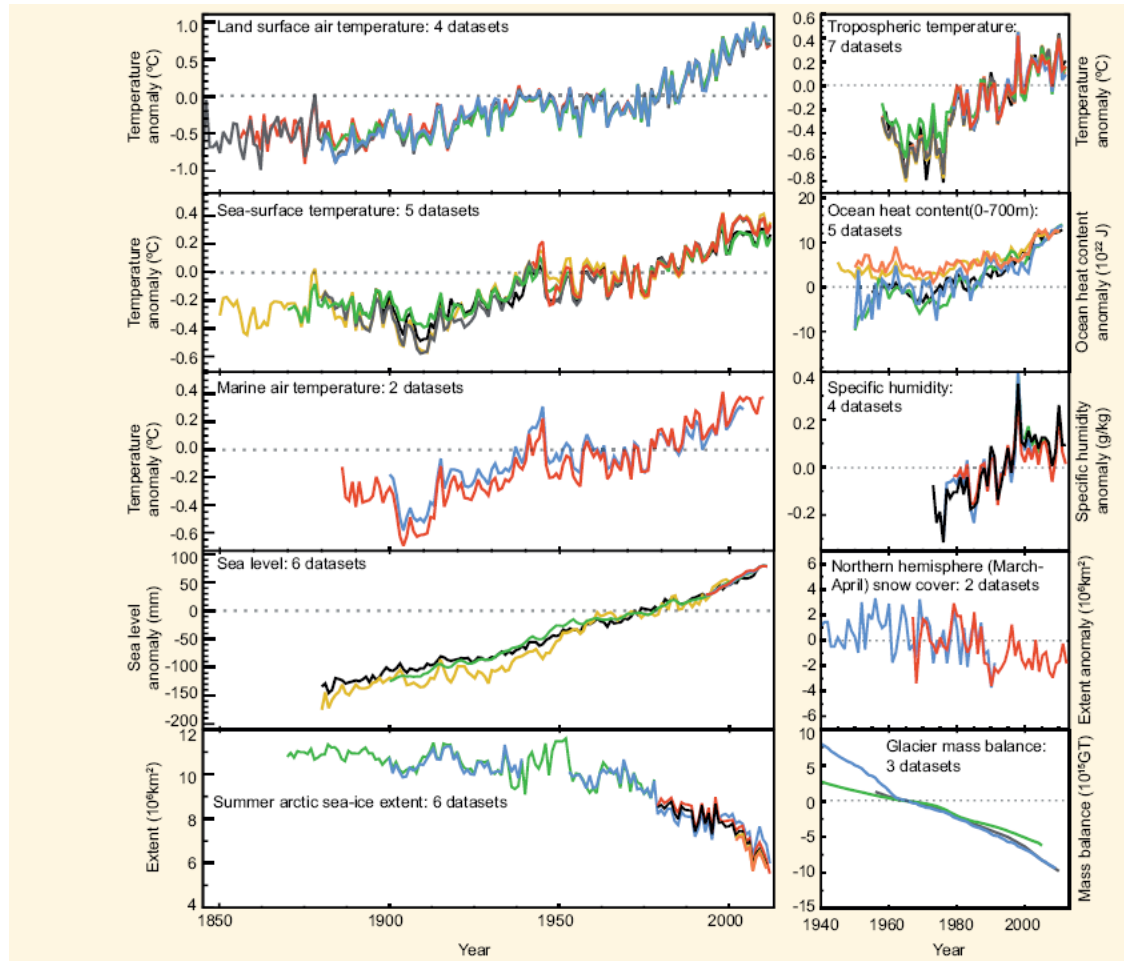


## Woher wissen wir, dass sich die Erde erwärmt hat?



## Die Betrachtung verschiedener Temperatur-Indikatoren sind eindeutig:

- Erwärmung der Troposphäre ist eindeutig und viele dieser seit 1950 beobachteten Veränderungen sind seit Jahrzehnten bis Jahrtausenden nicht aufgetreten
- Erwärmung des Ozeans dominiert den Zuwachs der im Klimasystem gespeicherten Energie
- Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs seit Mitte des 19. Jahrhunderts war größer als die in den vergangenen zwei Jahrtausenden
- Eisschilde und Gletscher haben an Masse verloren



FAQ 2.1, Figure 2 | Multiple independent indicators of a changing global climate. Each line represents an independently derived estimate of change in the climate element. In each panel all data sets have been normalized to a common period of record. A full detailing of which source data sets go into which panel is given in the Supplementary Material 2.SM.5.

## Menschlicher Beitrag durch Emission von Treibhausgasen eindeutig:

- Die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind auf Werte angestiegen, die seit mindestens den letzten 800000 Jahren noch nie vorgekommen sind.
- Kohlendioxid primär durch die Emission aus fossilen Brennstoffen und sekundär durch Netto-Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen.
- Der Ozean hat ungefähr 30% des emittierten anthropogenen Kohlendioxids aufgenommen und dadurch eine Versauerung erfahren

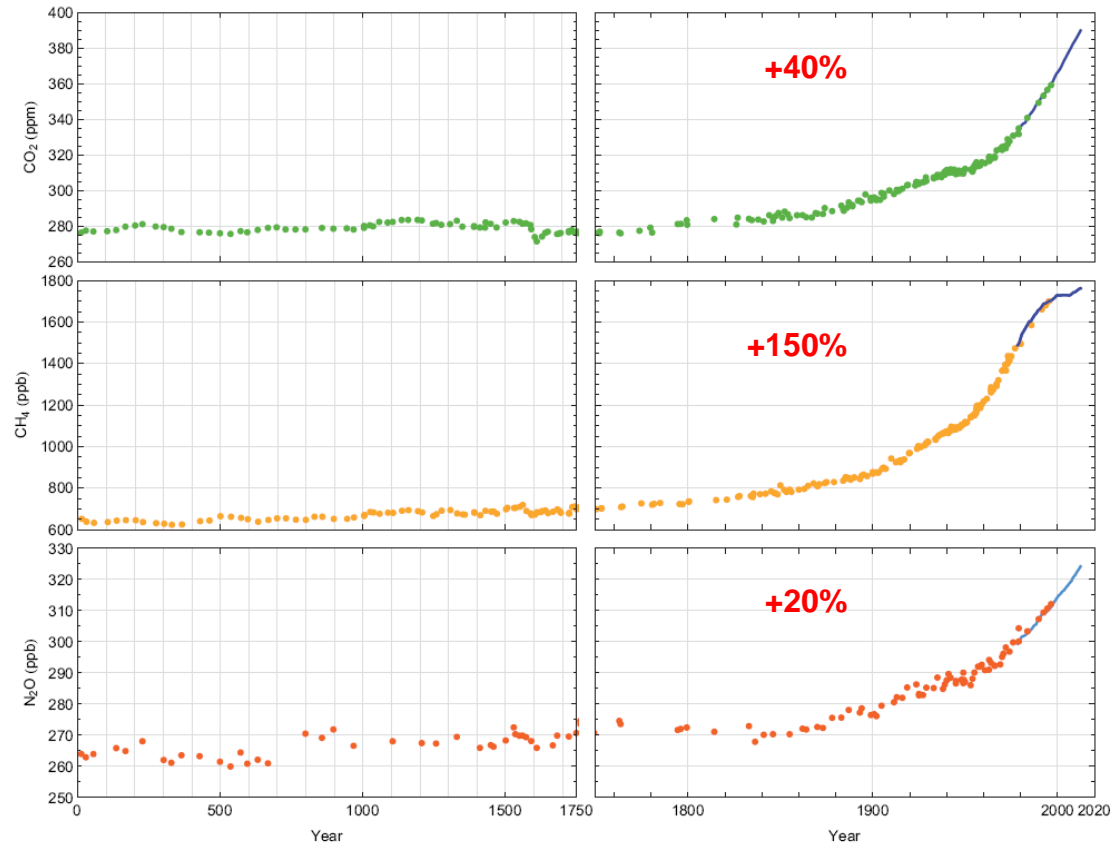
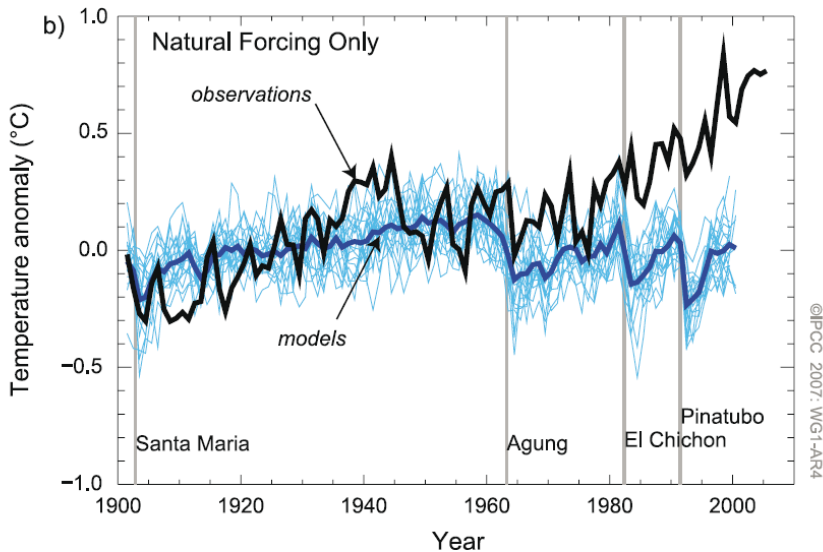
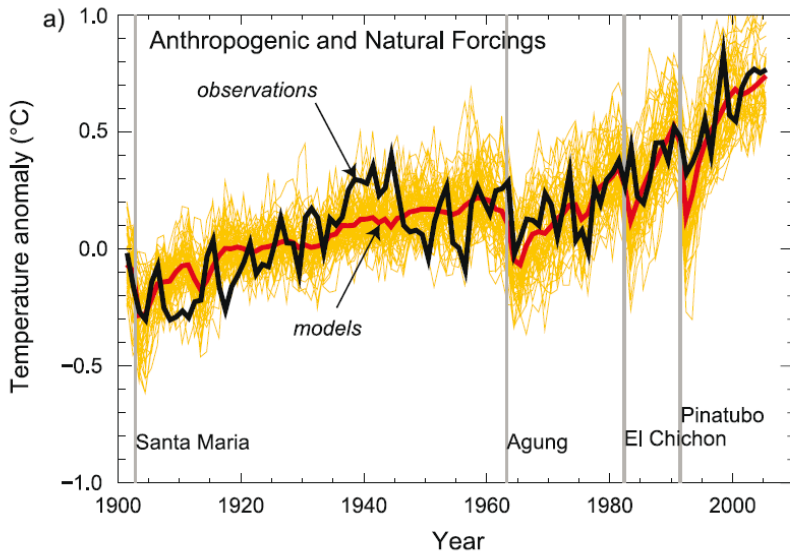


Figure 6.11 | Atmospheric CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O concentrations history over the industrial era (right) and from year 0 to the year 1750 (left), determined from air enclosed in ice cores and firn air (colour symbols) and from direct atmospheric measurements (blue lines, measurements from the Cape Grim observatory) (MacFarling-Meure et al., 2006).

### GLOBAL MEAN SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES



From IPCC (2007)

But does this mean the process understanding is right?

And does it mean we can venture projections into the future?

Are there consequences to be drawn from uncertainty?

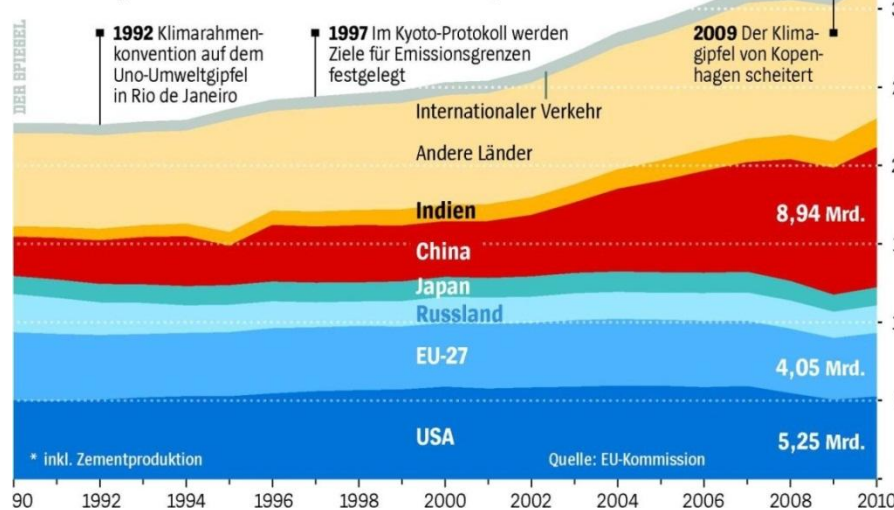
## Kernbotschaft:

### Minderungs- und Anpassungsoptionen

➤ In den von IPCC untersuchten Szenarien ist zur wahrscheinlichen Einhaltung der 2 ° C Obergrenze (bis 2100) eine Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen in allen Sektoren bis zum Jahr 2050 von 40 % bis 70 % gegenüber dem Jahr 2010 notwendig und Emissionen nahe null bzw. darunter im Jahr 2100.

### Hehre Ziele, wachsende Emissionen

Globale CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen\*, in Milliarden Tonnen



### Politische Ziele

- USA will bis zum Jahr 2025 den Ausstoß von Treibhausgasen um 26 bis 28 Prozent im Vergleich zum Jahr 2005 reduzieren.
- China kündigt an, bis zum Jahr 2030 den Anteil erneuerbarer Energien auf etwa 20 Prozent zu steigern.
- China will bis spätestens im Jahr 2030 den Höchststand im Ausstoß des klimaschädlichen CO<sub>2</sub> zu erreichen.
- Deutschland will bis 2020 den Ausstoß des Treibhausgases CO<sub>2</sub> um 40 Prozent im Vergleich zu 1990 verringern.



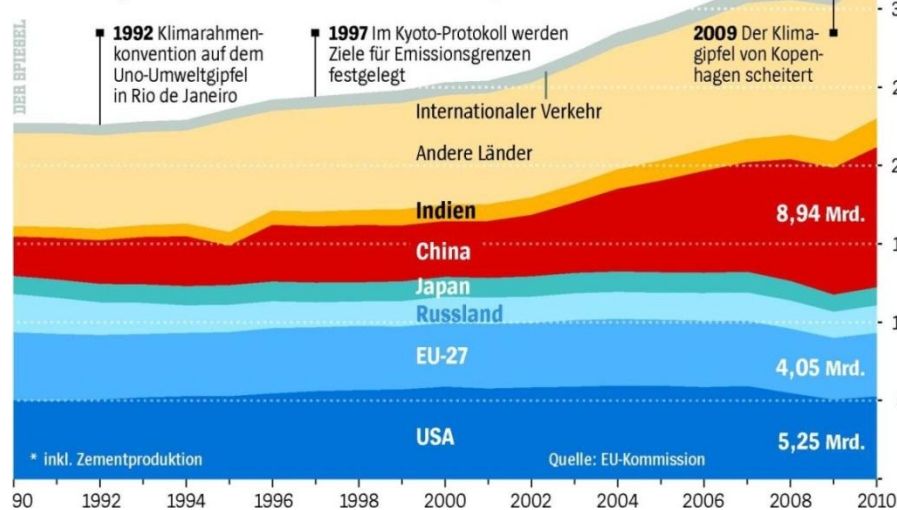
## Kernbotschaft:

### Minderungs- und Anpassungsoptionen

➤ In den von IPCC untersuchten Szenarien ist zur wahrscheinlichen Einhaltung der  $2^{\circ}\text{C}$  Obergrenze (bis 2100) eine Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen in allen Sektoren bis zum Jahr 2050 von 40 % bis 70 % gegenüber dem Jahr 2010 notwendig und Emissionen nahe null bzw. darunter im Jahr 2100.

### Hehre Ziele, wachsende Emissionen

Globale CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen\*, in Milliarden Tonnen

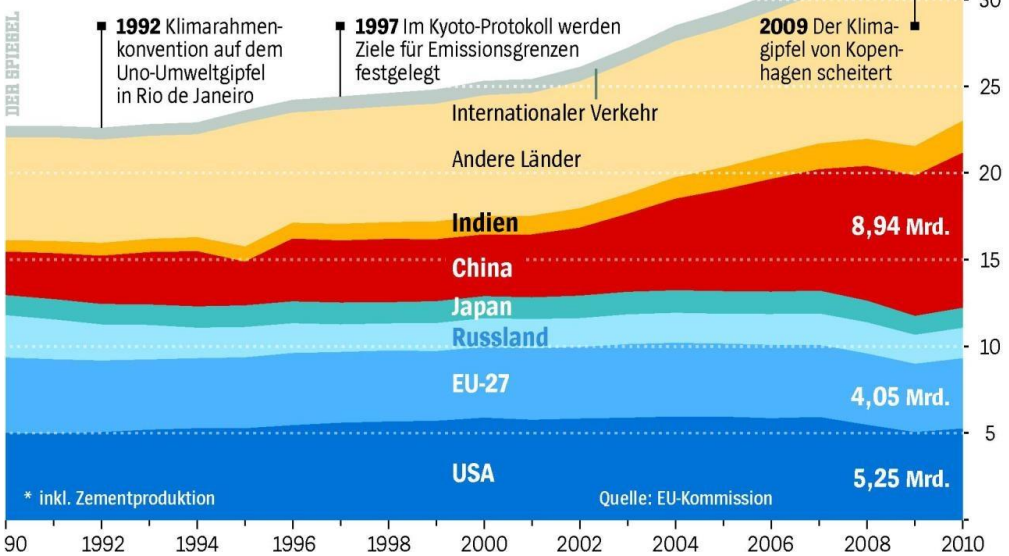


### Kosten zur Umsetzung der Ziele

- Auswirkung auf das Konsumwachstum
  - Ohne Klimaschutz Zuwachs 1.6 % – 3 %
  - Mit Klimaschutz Minderung 0.06 %

# Hehre Ziele, wachsende Emissionen

Globale CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen\*, in Milliarden Tonnen



Spiegel online, 2011

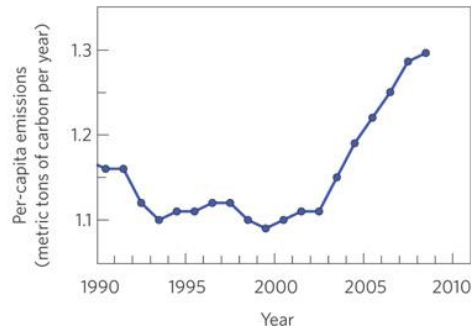
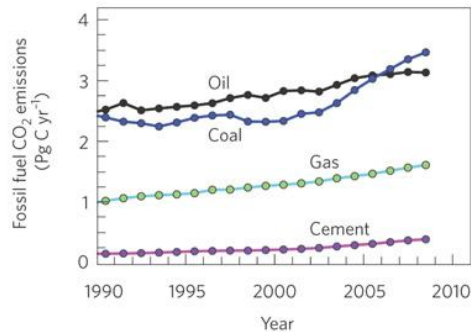
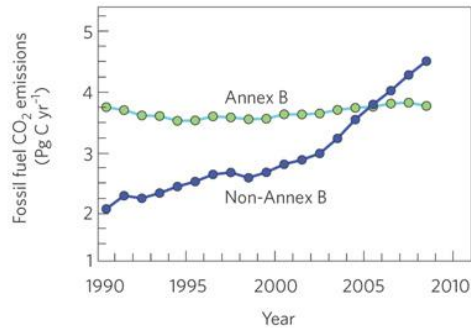
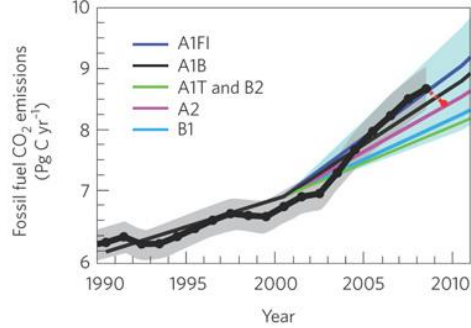
## Gedimmte Sonne

### Chinas Schwefelemissionen bremsen Klimawandel

Zwischen 1998 und 2008 blieben die globalen Durchschnittstemperaturen nahezu gleich, obwohl der menschliche Ausstoß von Treibhausgasen in diesem Zeitraum weiter anstieg. "Diese scheinbare Widerspruch könnte ein Grund sein, warum die Öffentlichkeit dem anthropogenen Klimawandel zunehmend skeptisch gegenüber steht", sagt das Team um die renommierten Klimaexperten Michael Mann und Robert Kaufmann von der Boston University.

In ihrer Analyse stellten die Forscher fest, dass der vorübergehende Stillstand der globalen Erwärmung durch drei Faktoren ausgelöst wurde: Zum einen gab es eine überproportional große Steigerung der Kohleverbrennung in China, die den Schwefelgas-Ausstoß in die Höhe schnellen ließ. Gleichzeitig verringerte sich die Sonneneinstrahlung auf die Erde durch eine geringe solare Aktivität. Und zusätzlich sorgte ein sogenannter La-Niña-Effekt im Pazifik für eine abkühlende Wirkung.



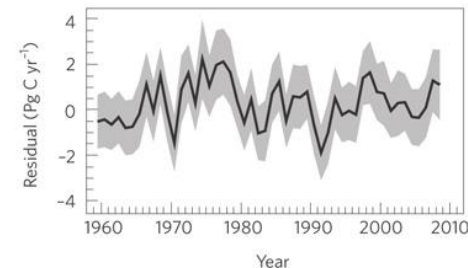
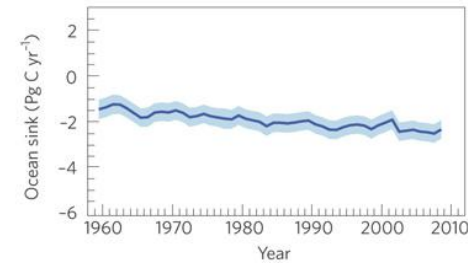
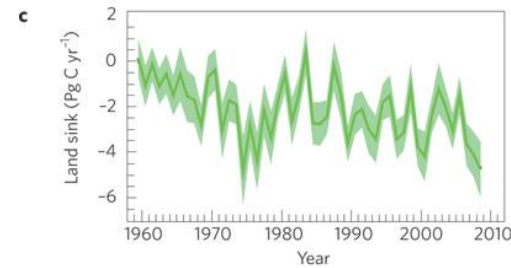
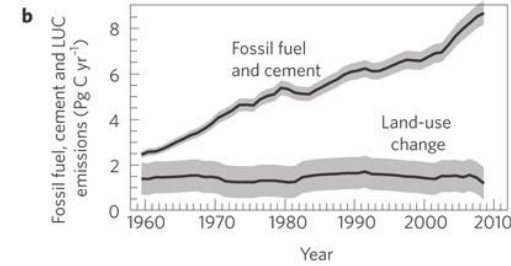
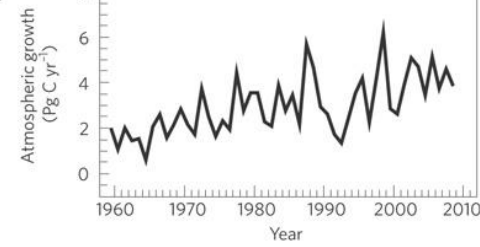


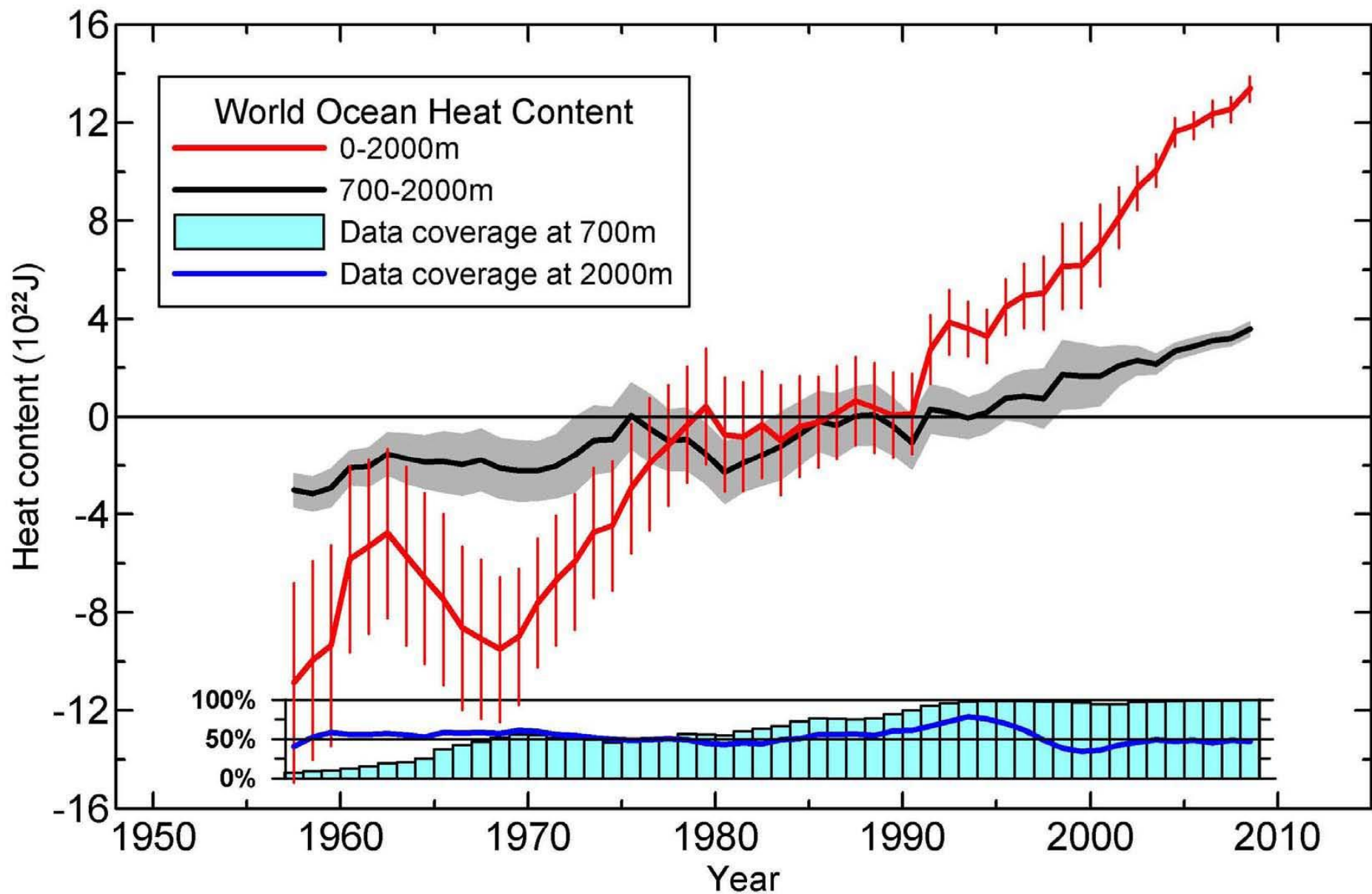
### Le Quéré et al, Nature Geosciences 2009

**a–c**, Fossil fuel emissions for the globe (**a**), Annex B countries (mostly advanced economies; green) and non-Annex B countries (mostly developing countries; blue) (**b**) and, specifically, coal (blue), oil (black), gas combustion (green) and cement production (purple) (**c**). The data in all panels are the annual mean data. Panel **a** also shows the projections averaged by scenario family from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (full coloured lines<sup>3</sup>), as in ref. [2](#). The grey shading in **a** is the uncertainty in emissions. The blue shading covers all CO<sub>2</sub> emissions scenarios used to project climate by the IPCC Fourth Assessment Report. The red dot and dashed line in **a** are the projected CO<sub>2</sub> emissions for 2009 (see text). **d**, Global per-capita emissions.

### Le Quéré et al, Nature Geosciences 2009

**a**, The atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate. **b**, CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel combustion and cement production, and from LUC. **c**, Land CO<sub>2</sub> sink (negative values correspond to land uptake). **d**, Ocean CO<sub>2</sub> sink (negative values correspond to ocean uptake). **e**, The residual sum of all sources and sinks. The land and ocean sinks (**c,d**) are shown as an average of several models normalized to the observed mean land and ocean sinks for 1990–2000 (refs [11,19](#)). The shaded area is the uncertainty associated with each component





## Das Klima der vergangenen 12 000 Jahre

Nach dem Ende der letzten Eiszeit erwärmt sich die Erde in kurzer Zeit um rund drei Grad. Eisschmelze und Temperaturanstieg ermöglichen die Sesshaftwerdung des Menschen, Ackerbau und Viehzucht. Selbst die vergleichsweise geringen Temperaturschwankungen der vergangenen 10 000 Jahre führen zu dramatischen Veränderungen für den Menschen. Auf Epochen der Hochkultur folgen Notzeiten mit großen Wanderungsbewegungen. Seuchenzüge und Missernten gehen häufig mit Kälteeinbrüchen einher.

**WÄRMER** ↑  
 Temperaturentwicklung auf der Nordhalbkugel (nach Auswertung grönländischer Eisbohrkerne)  
 0,5°C  
 ↓  
**KÄLTER**

**Während der Erwärmung:**  
 vorübergehender Temperatursturz durch Schwächung des Atlantikstroms in der Jüngeren Dryas

**Fruchtbare Sahara**



Wildtierjagd (steinzeitliche Felsmalerei aus Algerien)

Während des sogenannten Holozän-Klimaoptimums um 8500 v. Chr. wird die Sahara zur Savanne. Rund 5000 Jahre später beginnt ihre erneute Austrocknung.

Quellen: Barry Saltzman, „Dynamical Paleoclimatology“; vergangene 1000 Jahre: Mann, Bradley, Hughes, „Climate Change 2001: The Scientific Basis“

9000 v. Chr. 8000 7000 6000 5000 4000 3000 2000 1000 v. Chr.

DER SPIEGEL 19/2007

