

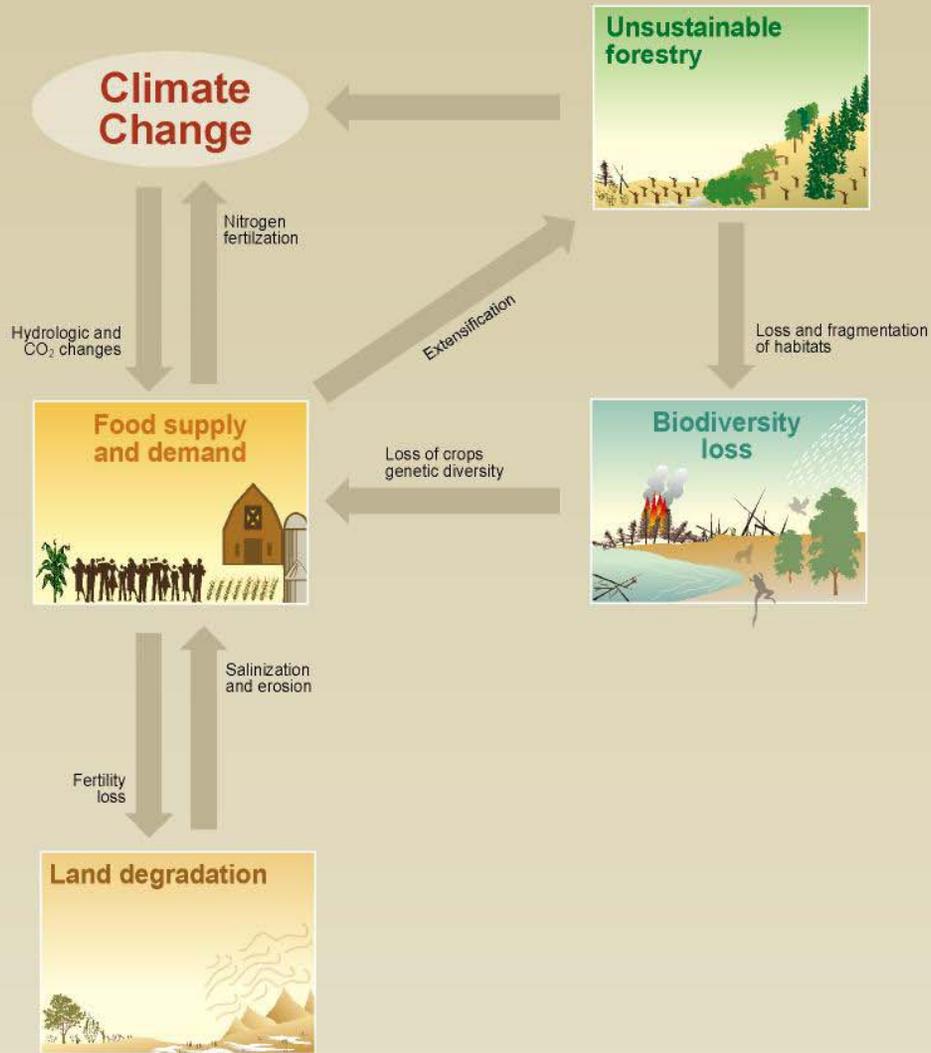
Strahlungshaushalt und -klima der Erde

Eberhard Reimer
Institut für Meteorologie
Freie Universität Berlin

Übersicht

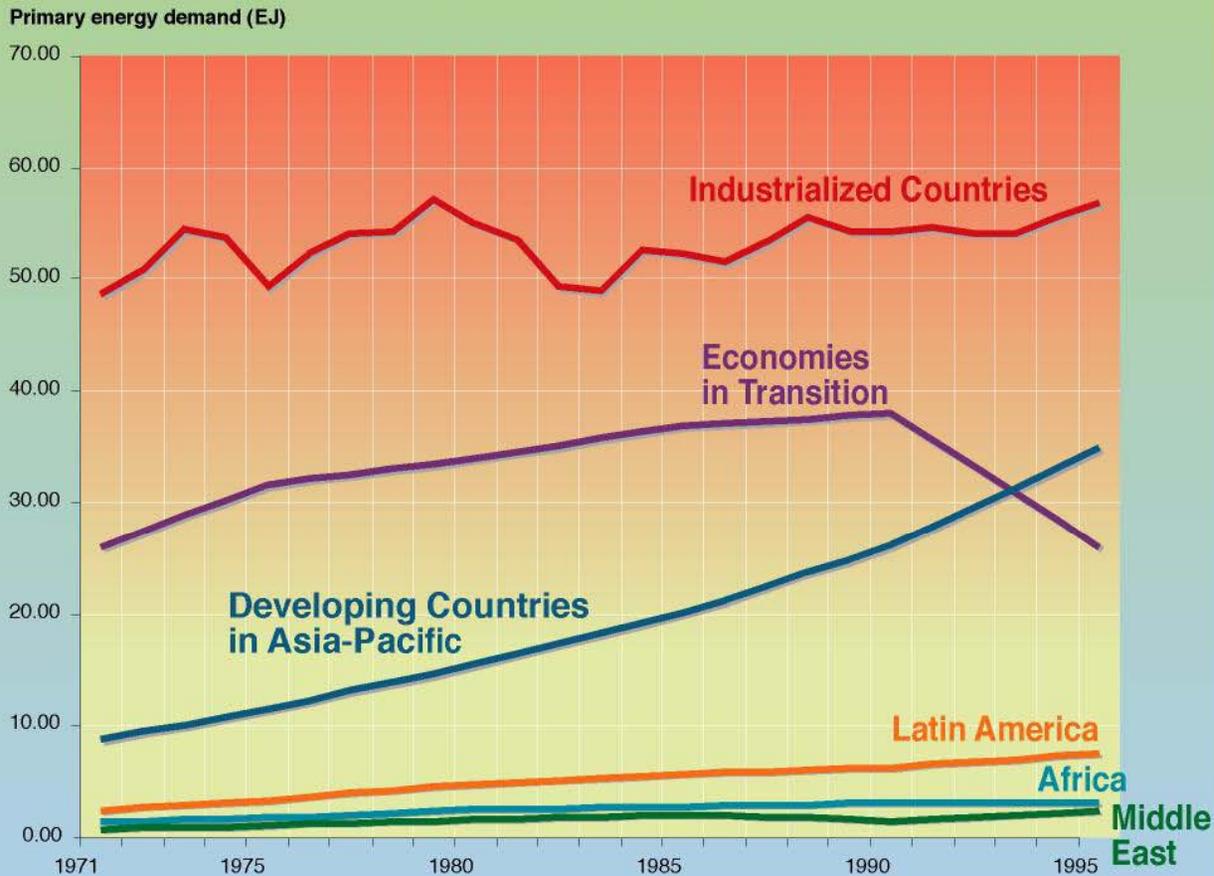
- 1. Allgemeine Betrachtung**
- 2. IPCC bisherige Klimaentwicklung**
- 3. Antrieb Strahlung**
- 4. Strahlungs-Forcing**
- 5. IPCC globale Entwicklung**

Climate change and food



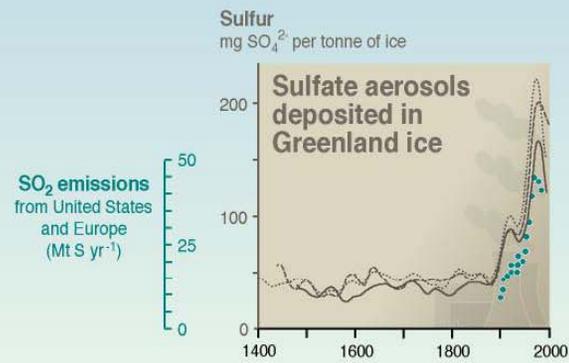
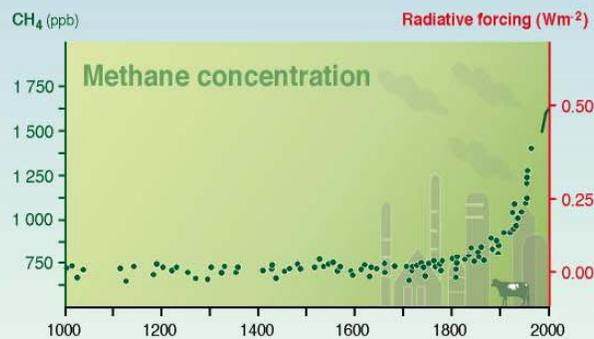
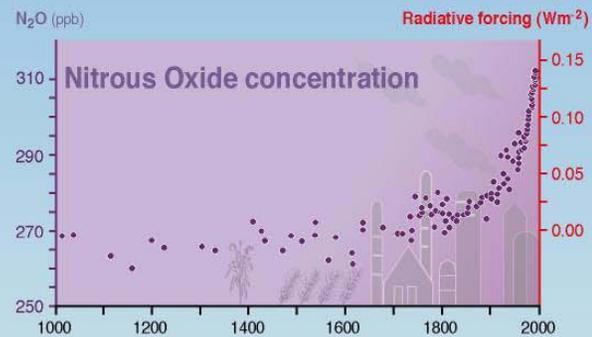
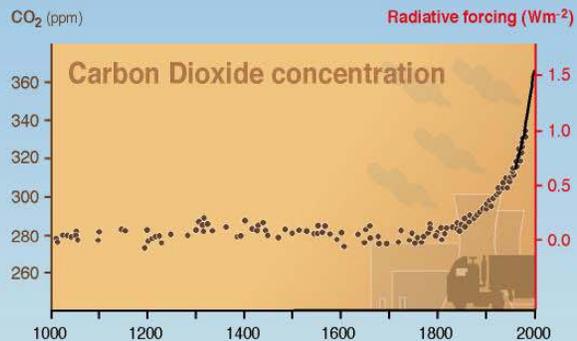
SYR - FIGURE 8-2

Development of industrial energy use in terms of primary energy



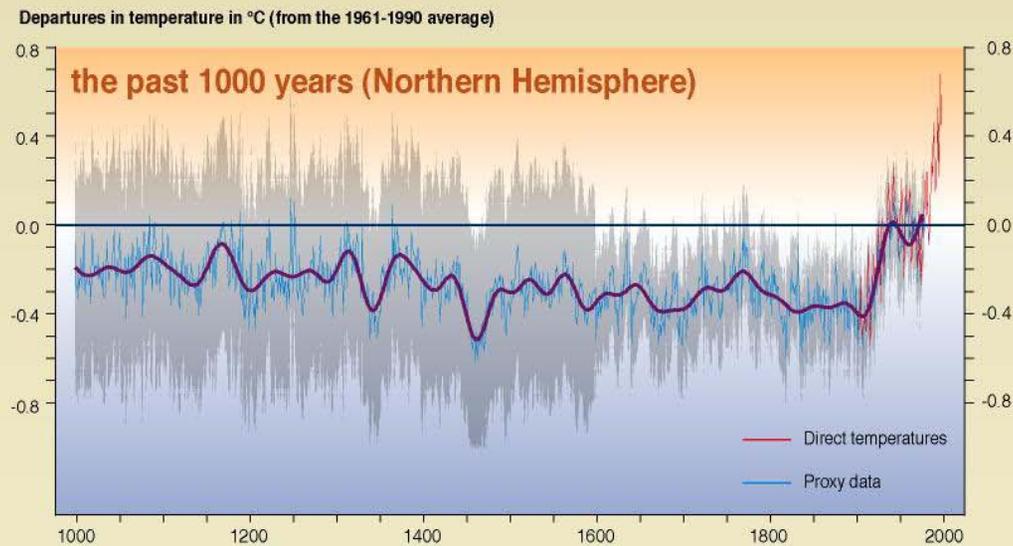
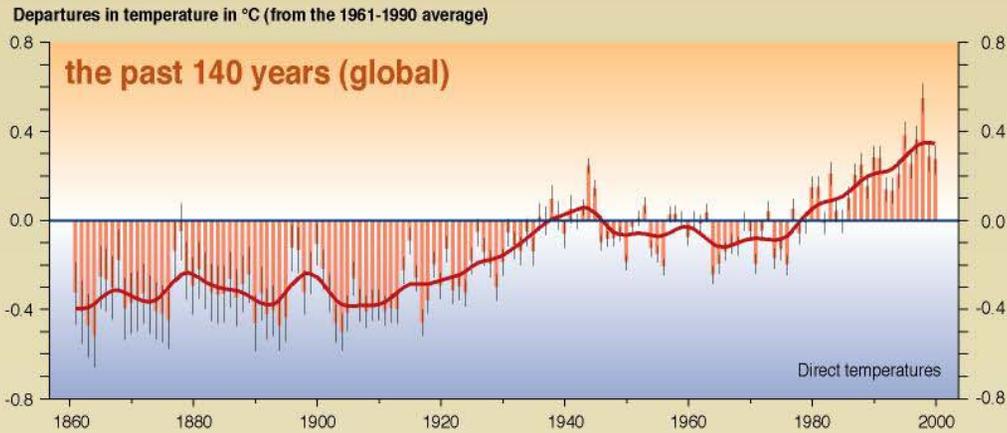
WG3 - TAR FIGURE 3.11

Indicators of the human influence on the atmosphere during the Industrial era



SYR - FIGURE 2-1
WG1 FIGURE SPM-2

Variations of the Earth's surface temperature for...

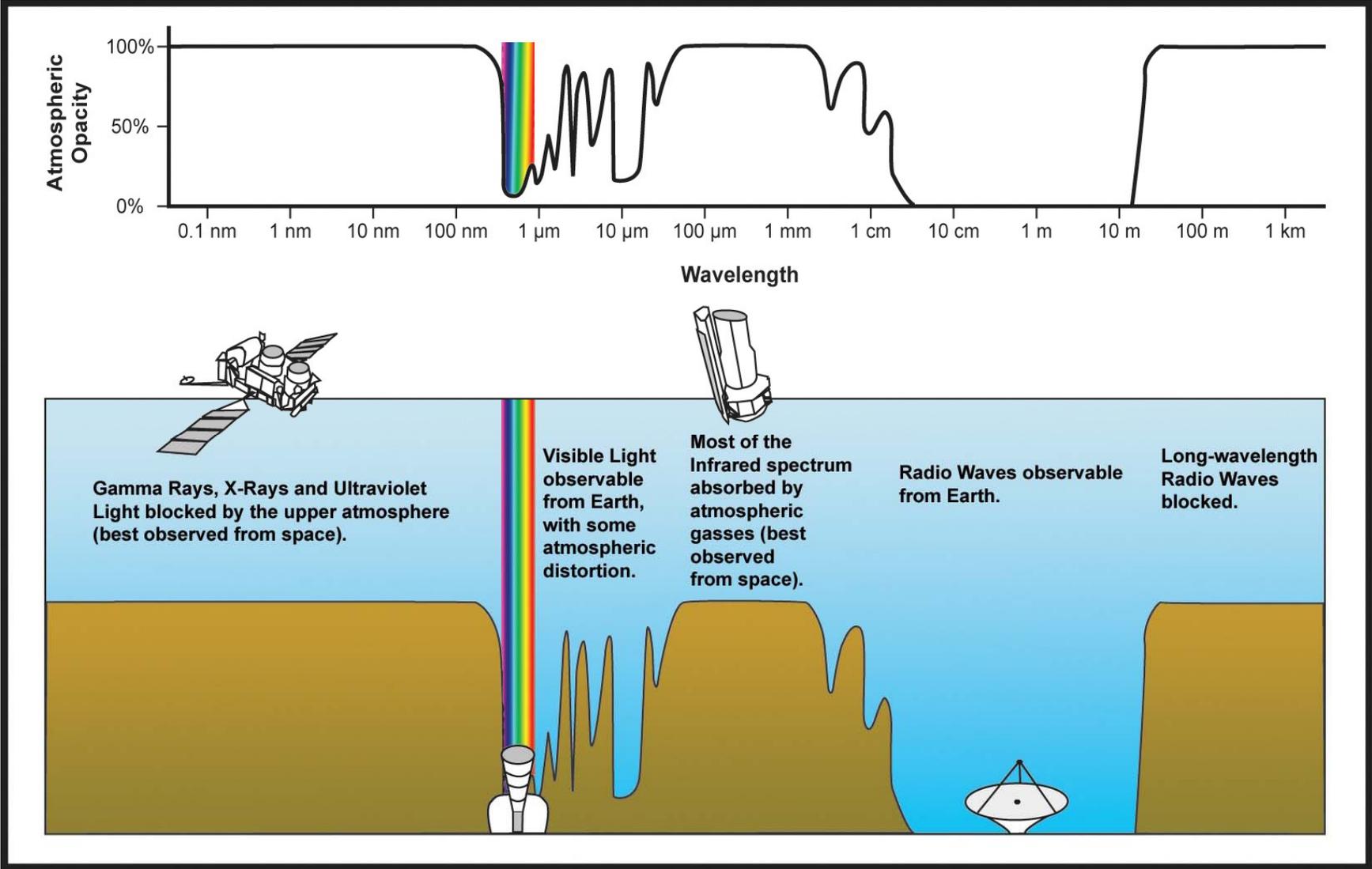


SYR - FIGURE 2-3

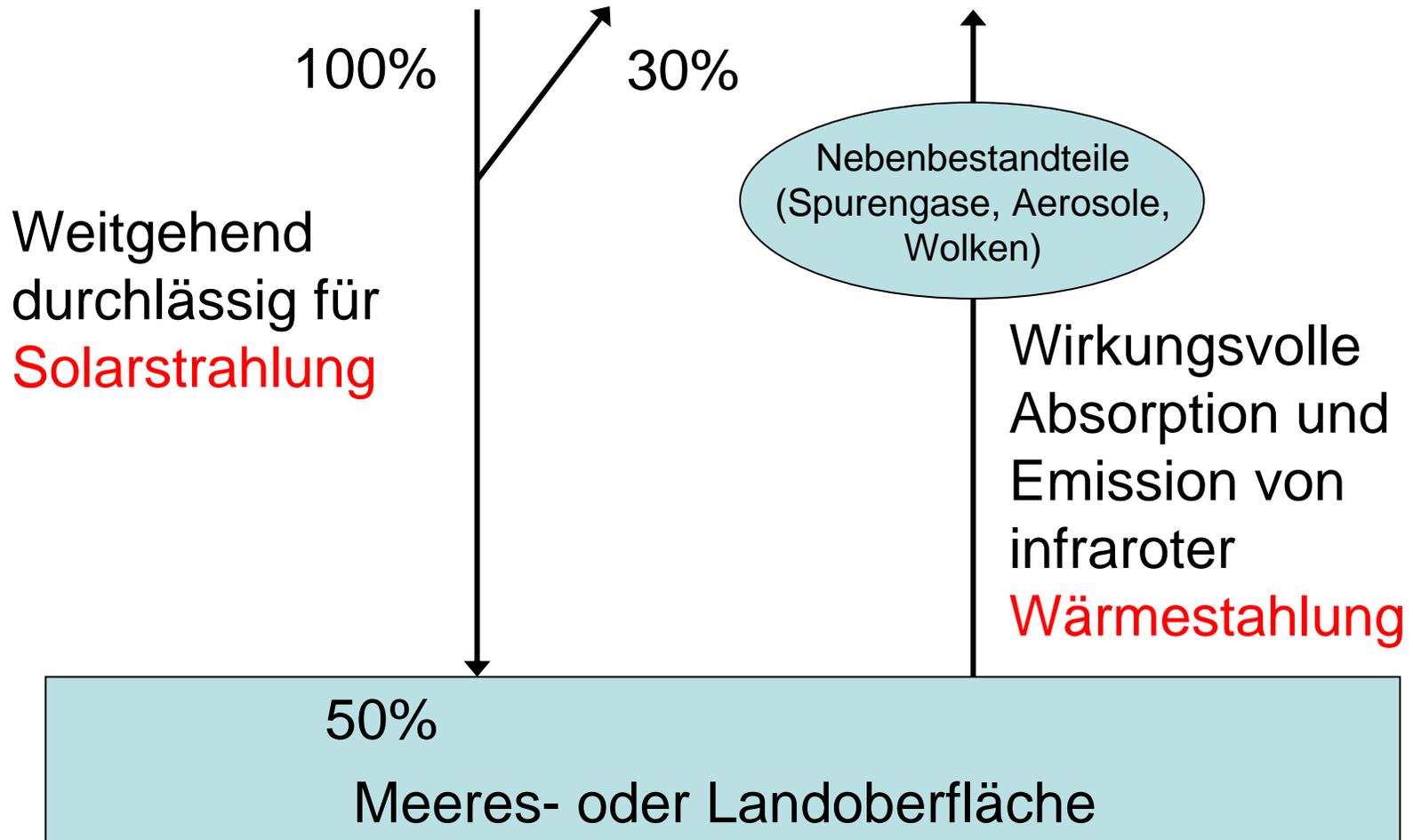
Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre

- Strahlung ist Energiefluß in Form elektromagnetischer Wellen mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/s
- Die Strahlungsarten werden hierbei nach Wellenlängen unterschieden,
- von extrem kurzwellig (UV-Strahlung)
- bis zu extrem langwelliger Strahlung (Infrarot).
- Im Bereich des sichtbaren Lichts mit Wellengängen von 0,2-4 μ m liegen und 99% der gesamten solaren Energie.

Atmosphärischer Filter



Photonen und „Nebenbestandteile“ der Luft



Natur elektromagnetischer Strahlung

- Welle-Teilchen-Dualismus:
elektromagnetischer Strahlung entweder als **Welle** oder als **Teilchen** aufgefasst
- **Geschwindigkeit** elektromagnetischer Strahlung im Vakuum:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} = \text{const.}$$

- Im Wellenbild:
 - **Streuung** von Licht an Teilchen und Oberflächen
- Im Teilchenbild:
 - **Absorption** und **Emission** von Strahlung

- Zusammenhang zwischen **Wellenlänge** λ und **Frequenz** ν :

$$c = \lambda \cdot \nu .$$

Hohe Frequenzen \Leftrightarrow kleine Wellenlängen

Niedrige Frequenzen \Leftrightarrow große Wellenlängen

Photonen

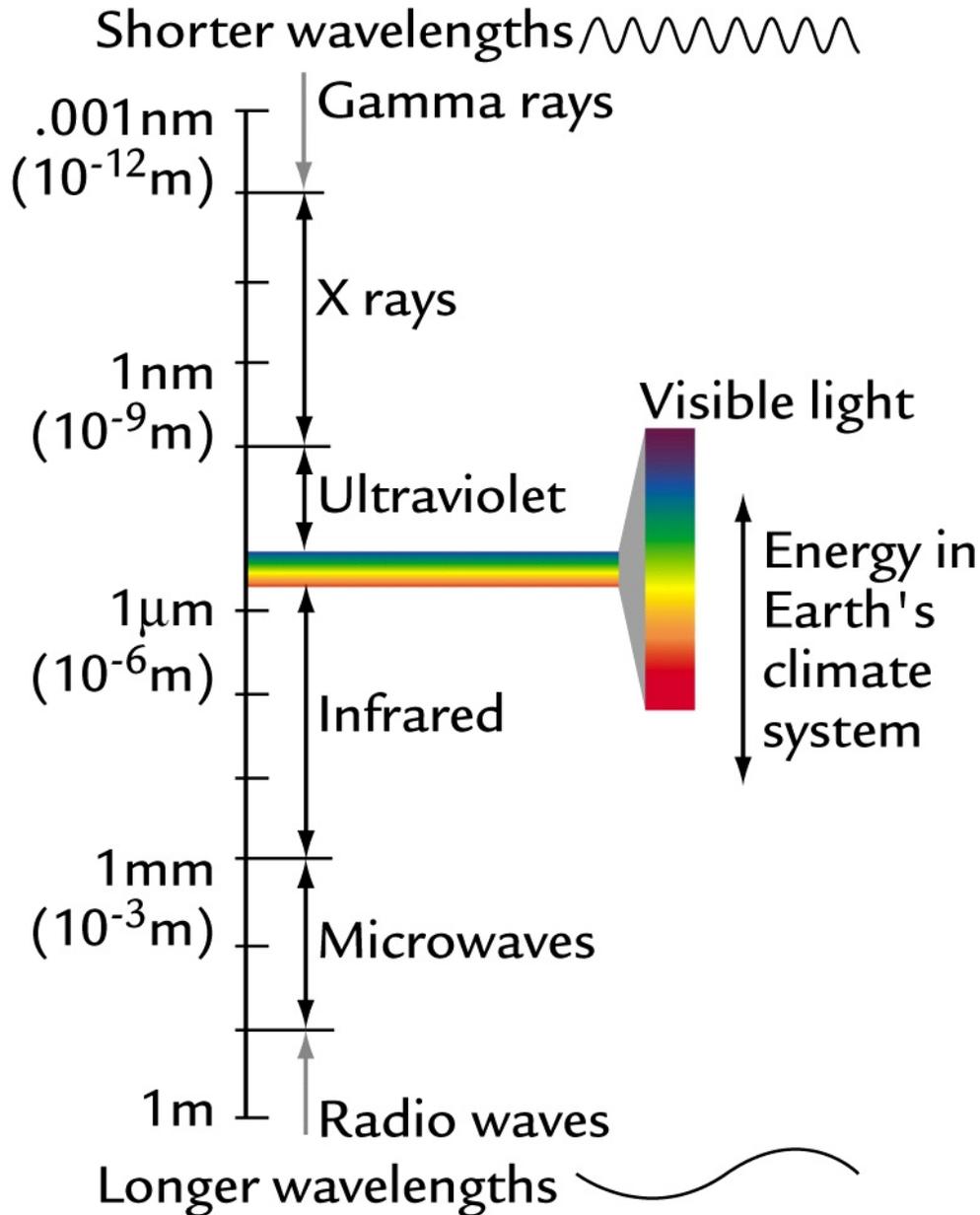
In seiner Erklärung des „photoelektrischen Effekts“ postulierte Einstein, dass Strahlungsenergie in Form von Quanten existiere und sich ausbreite.

- **Energie** eines Photons:

$$E = h \cdot \nu .$$

- Plancksches **Wirkungsquantum**:

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J s} .$$



Solarstrahlung:
 $\lambda = 100 \text{ nm} - 4 \mu\text{m}$

Terrestrische Strahlung:
 $\lambda = 4 \mu\text{m} - 200 \mu\text{m}$

Das **elektromagnetische Spektrum** [Abbildung 2.1 aus Ruddiman (2001)]

Beschreibung elektromagnetischer Strahlung

- **Strahldichte I_ν** : Energie pro Zeit-, Frequenz- und Raumwinkeleinheit
- **Spektrale Flussdichte F_ν** : Energie pro Zeit-, Flächen- und Frequenzeinheit
- **Flussdichte F** : Energie pro Zeit- und Flächeneinheit

Schwarzkörper- oder Hohlraumstrahlung

- Schwarzer Körper
 - **absorbiert** Strahlung jeder Wellenlänge vollständig
 - **emittiert** Strahlung einer gegebenen Frequenz mit einer Intensität, die **nur von der Temperatur** abhängig ist und stehenden Wellen im Hohlraum zugeschrieben werden kann

Plancksches Strahlungsgesetz

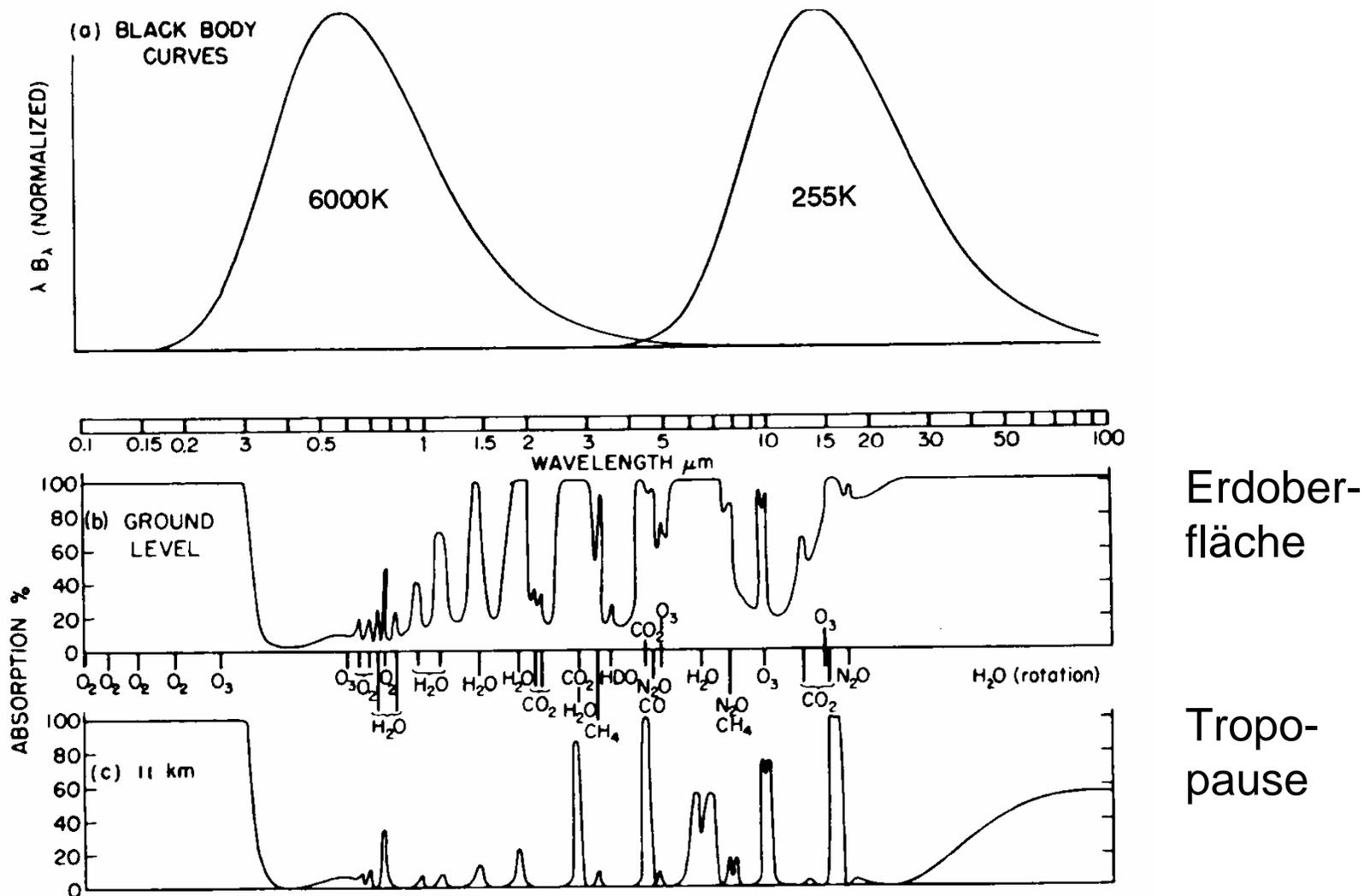
- ein **schwarzer Körper** der **Temperatur T** emittiert Strahlung der **Frequenz ν** mit der Intensität

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot$$

Solare und terrestrische Strahlung

- 99 % der bei $\sim 6000 \text{ K}$ emittierten Strahlung liegen zwischen 0.22 und $5 \mu\text{m}$
 - Solare oder kurzwellige Strahlung
- 99 % der bei $\sim 255 \text{ K}$ emittierten Strahlung liegen zwischen 4 und $100 \mu\text{m}$
 - Terrestrische oder langwellige Strahlung

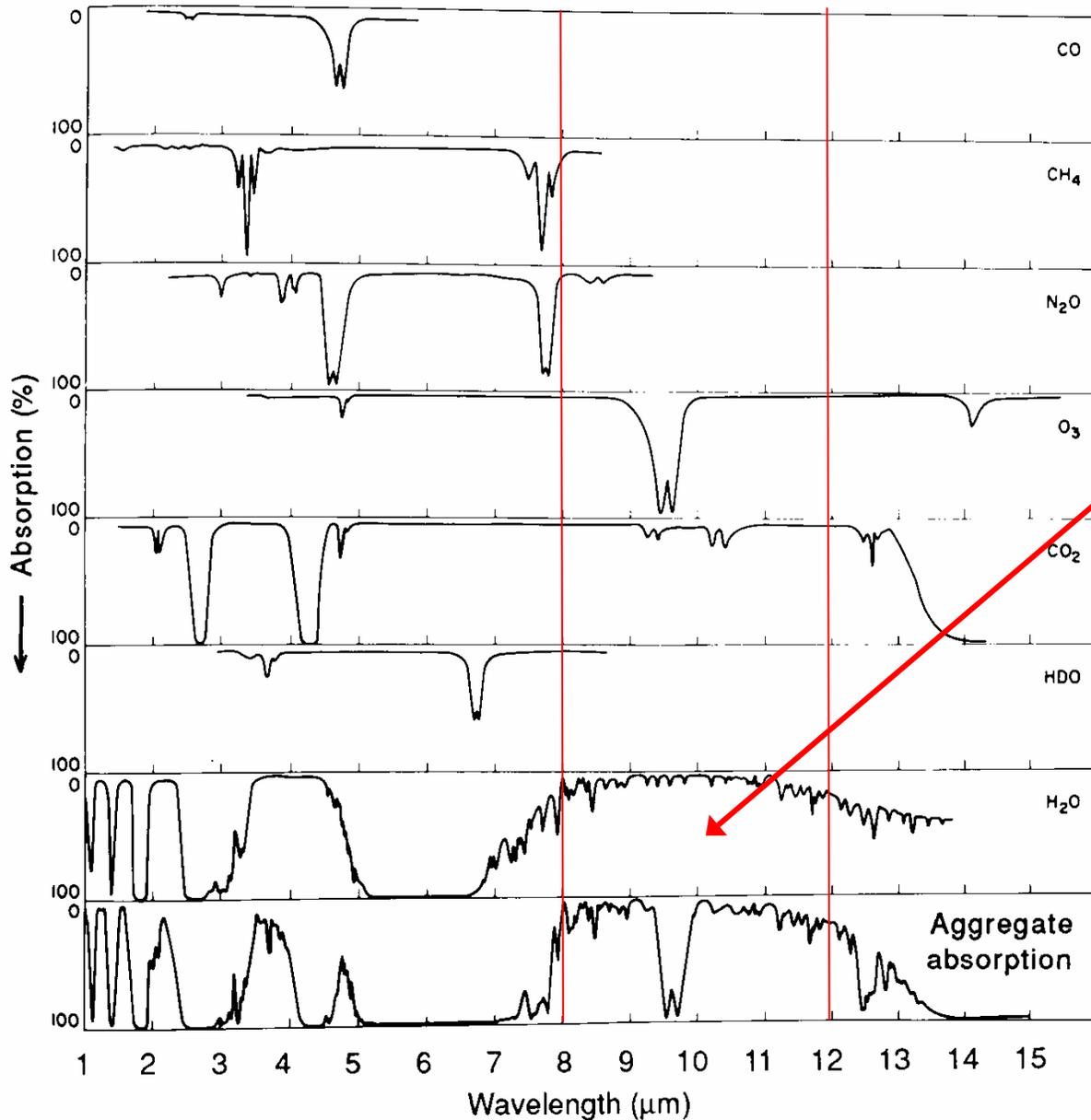
→ nur kleiner Überlapp bei 4 bis $5 \mu\text{m}$



Normierte **Schwarzkörperemissionsspektren** für **Sonne** (6000 K) und **Erde** (255 K) als Funktion der Wellenlänge (oben). Absorption zwischen Erdoberfläche und Außenrand der Atmosphäre (Mitte). Absorption zwischen Tropopause und Außenrand der Atmosphäre (unten) [Abbildung 3.2 aus Hartmann (1994)].

Selektive Absorption und Emission durch atmosphärische Gase

- Atmosphäre verhältnismäßig durchlässig für solare Strahlung, nahezu undurchlässig für terrestrische Strahlung
- Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie wichtig für Treibhauseffekt



atmosphärisches Fenster

Absorptionsspektren
 im Infrarot für
 verschiedene
 atmosphärische
 Gase [Abbildung 3.4
 aus Hartmann
 (1994)].

- Wechselwirkung mit **infraroter Strahlung**
 - Nahes Infrarot: 0.78-2.5 μm
 - Mittleres Infrarot: 2.5-50 μm
 - Fernes Infrarot: 50-1000 μm
- Energie reicht nicht aus, um elektronische Übergänge zu induzieren
- Absorption beschränkt auf Moleküle mit **kleinen Energieunterschieden** in den möglichen **Schwingungs- und Rotationszuständen**

Photodissoziation

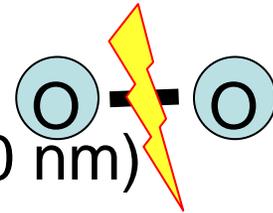
- Bei Wellenlängen kürzer als $\sim 1 \mu\text{m}$

- Aufbrechen molekularer Bindung

- molekularer Sauerstoff (O_2 , bei $\sim 200 \text{ nm}$)

- Ozon (O_3 , bei $200\text{-}300 \text{ nm}$)

- Wichtig für Ozonproduktion in der Stratosphäre



Elektronische Anregung

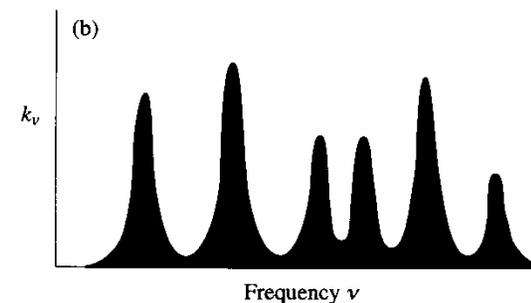
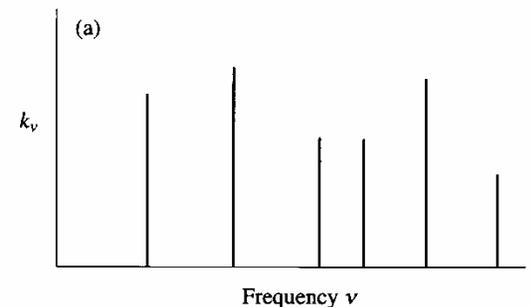
- Bei Wellenlängen von $1 \mu\text{m}$, **Anregung äußerer Elektronen** von z. B. Sauerstoff oder Ozon

Photoionisation

- Bei Wellenlängen unter ungefähr 100nm

Absorptionslinien und Linienverbreiterung

- Häufung von **Absorptionslinien** in einem Frequenzbereich heißt **Absorptionsbande**
 - Vibrations- und Rotationsübergänge am Wichtigsten für terrestrische Strahlung
 - Wasserdampf ($6.3 \mu\text{m}$, $> 12 \mu\text{m}$), O_3 ($9.6 \mu\text{m}$), CO_2 ($15 \mu\text{m}$)
- **Linienverbreiterung** durch
 - **Unschärferelation**
 - **Druck-** oder **Stoßverbreiterung**
 - **Doppler-Effekt**



Hypothetisches
Linienpek-
trum
(a) vor (b) nach
Linienverbrei-
terung
[Abbildung 3.5
aus Hartmann
(1994)].

Warum ist der Himmel blau?

- Warum ist der Himmel blau?
- Warum sind Wolken weiß?
- Warum ist die Sonne, von der Erde aus gesehen, eine gelbe Scheibe an einem blauen Himmel, vom Mond aus gesehen aber eine weiße Scheibe an einem schwarzen Himmel?

Streuung

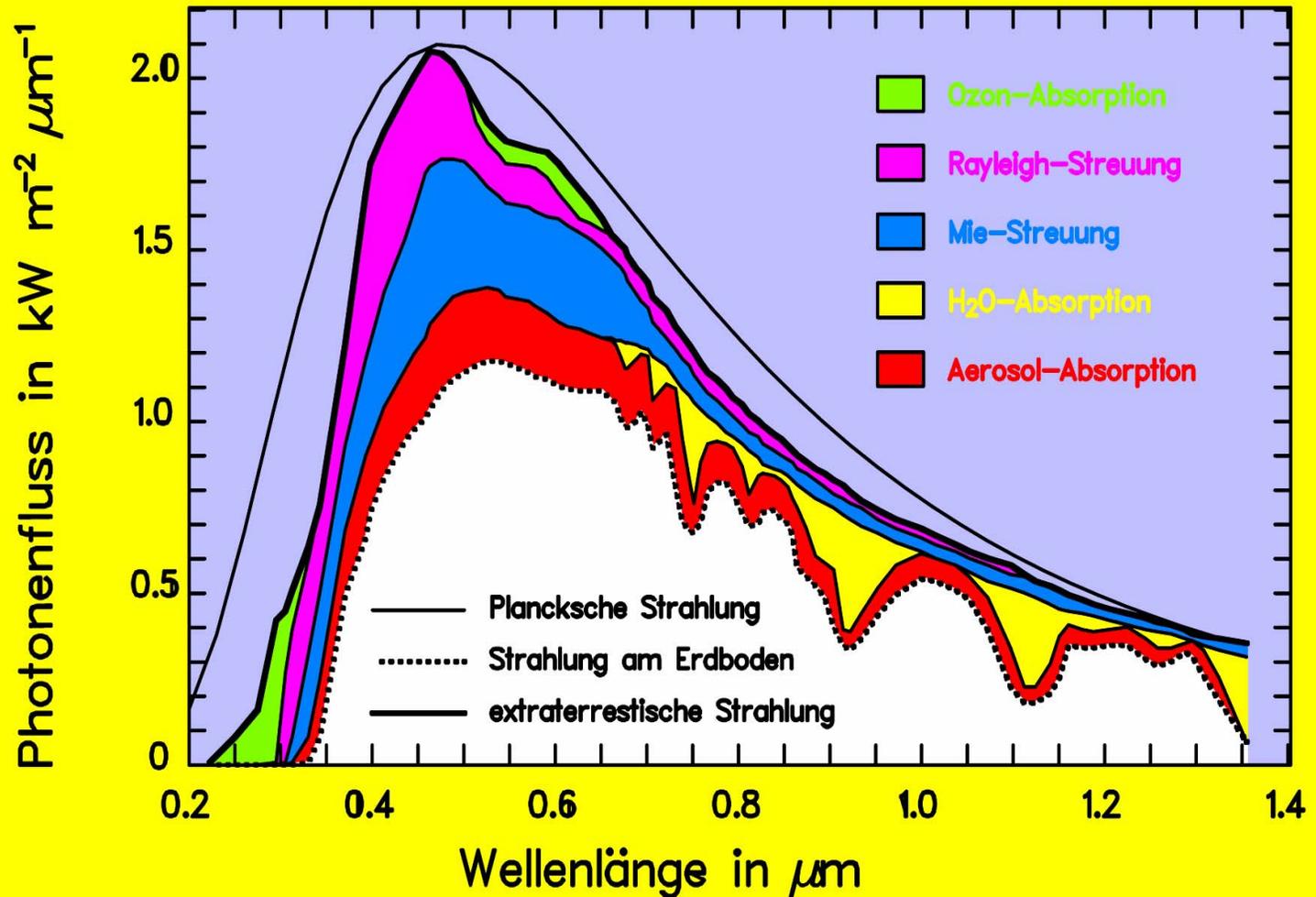
- **Rayleigh**-Streuung: an Luftmolekülen
- **Mie**-Streuung: an Wassertröpfchen/Wolken

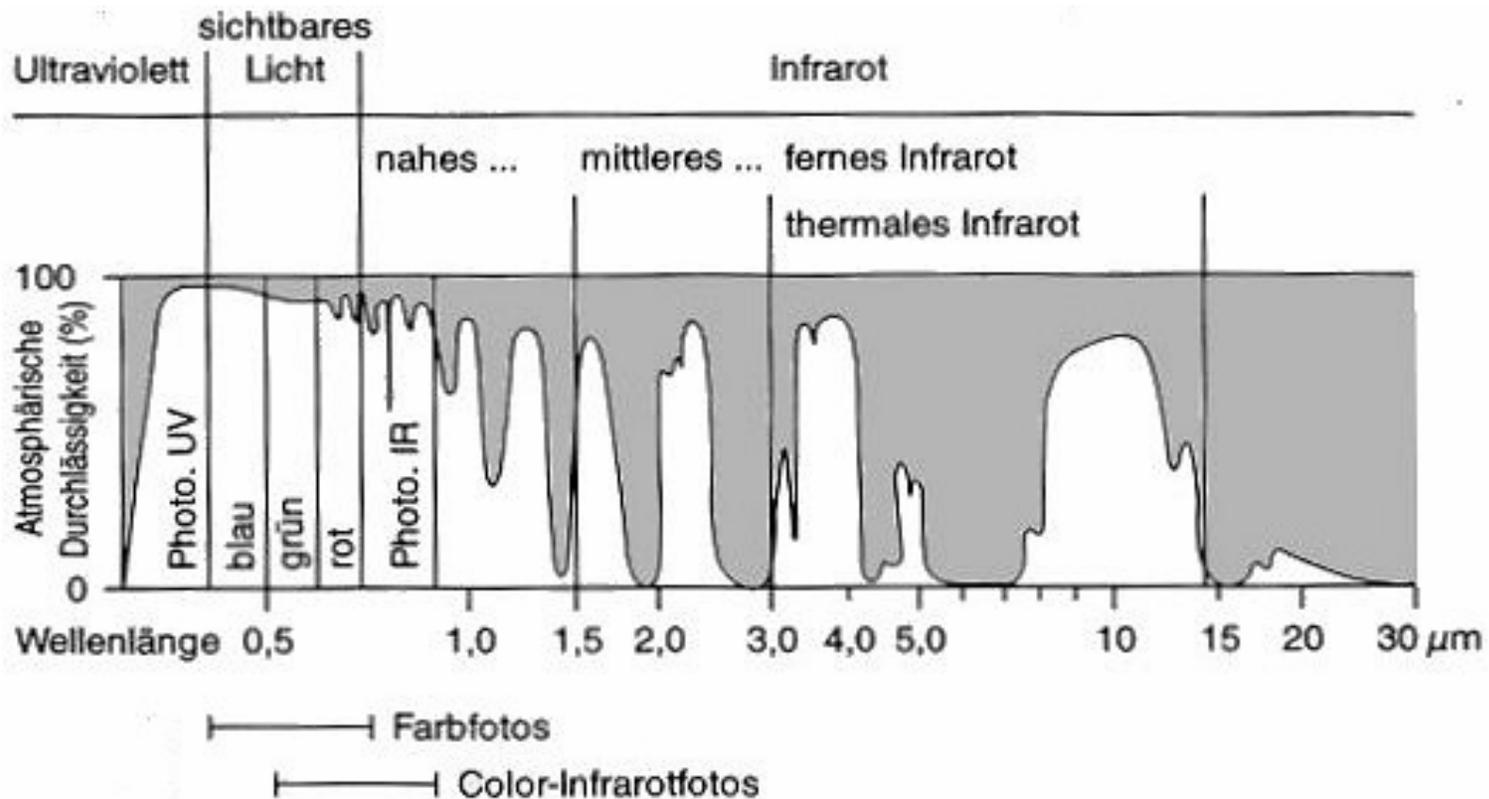
- **Absorption** – Aufnehmen von Strahlung in einem Medium und Umwandlung in innere Energie
- **Streuung**
Richtungsänderung von Strahlung an Partikeln
- *Extinktion* (extinction)
 - Schwächung der Strahlung in einem Medium
 - Zusammenfassung von Absorption und Streuung

$$\beta_e = \beta_a + \beta_s$$

β_e	Extinktions-Koeffizient [m ⁻¹]
β_a	Absorptions-Koeffizient [m ⁻¹]
β_s	Streuungs-Koeffizient [m ⁻¹]

Die Strahlung der Sonne auf ihrem Weg durch die Atmosphäre.

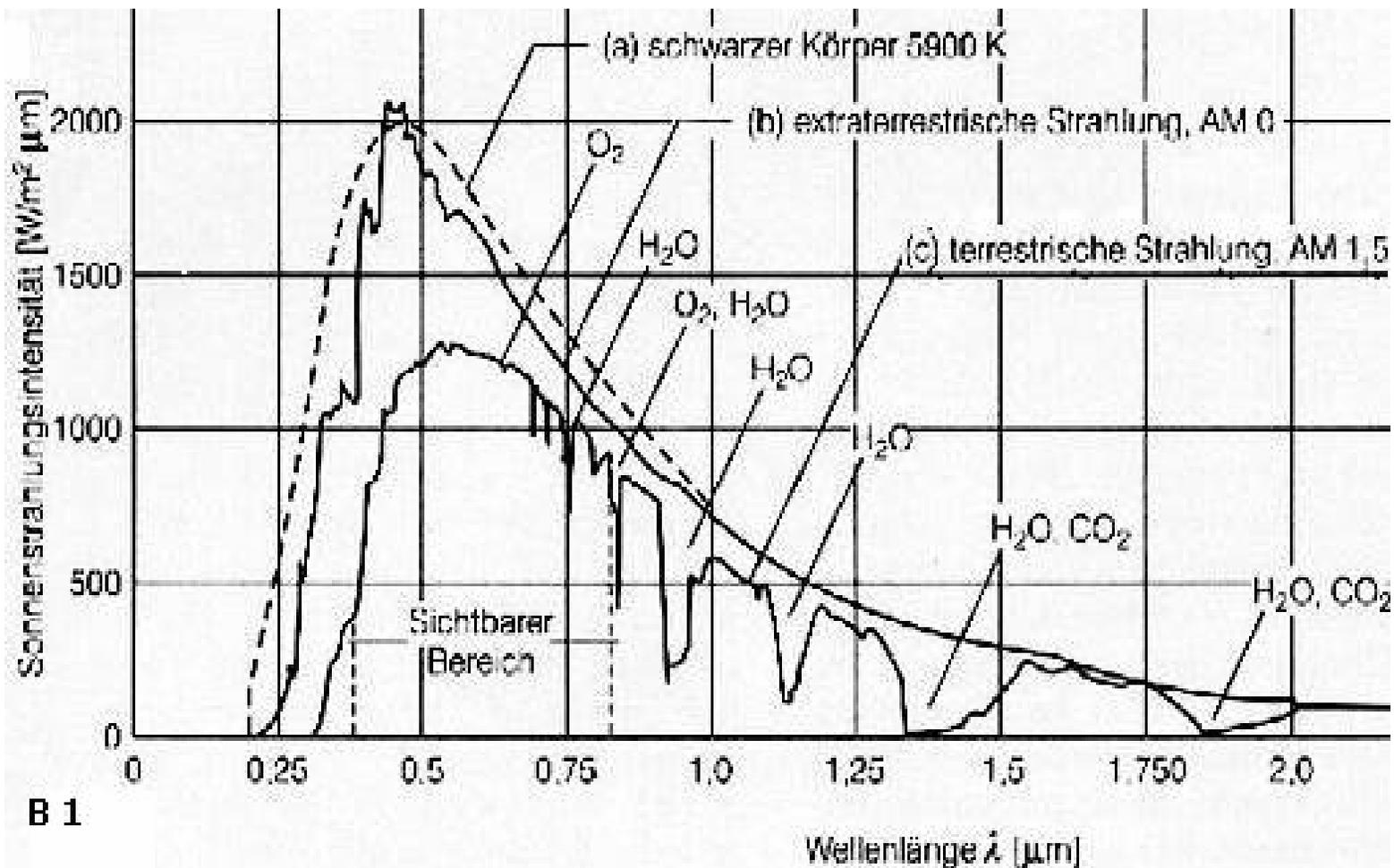




Die einfallende Strahlung wird beim Durchgang der Atmosphäre beeinflusst:

- durch Extinktion (Filterung)
- durch Verringerung der Einstrahlung durch diffuse Reflexion
- selektive Absorbtion

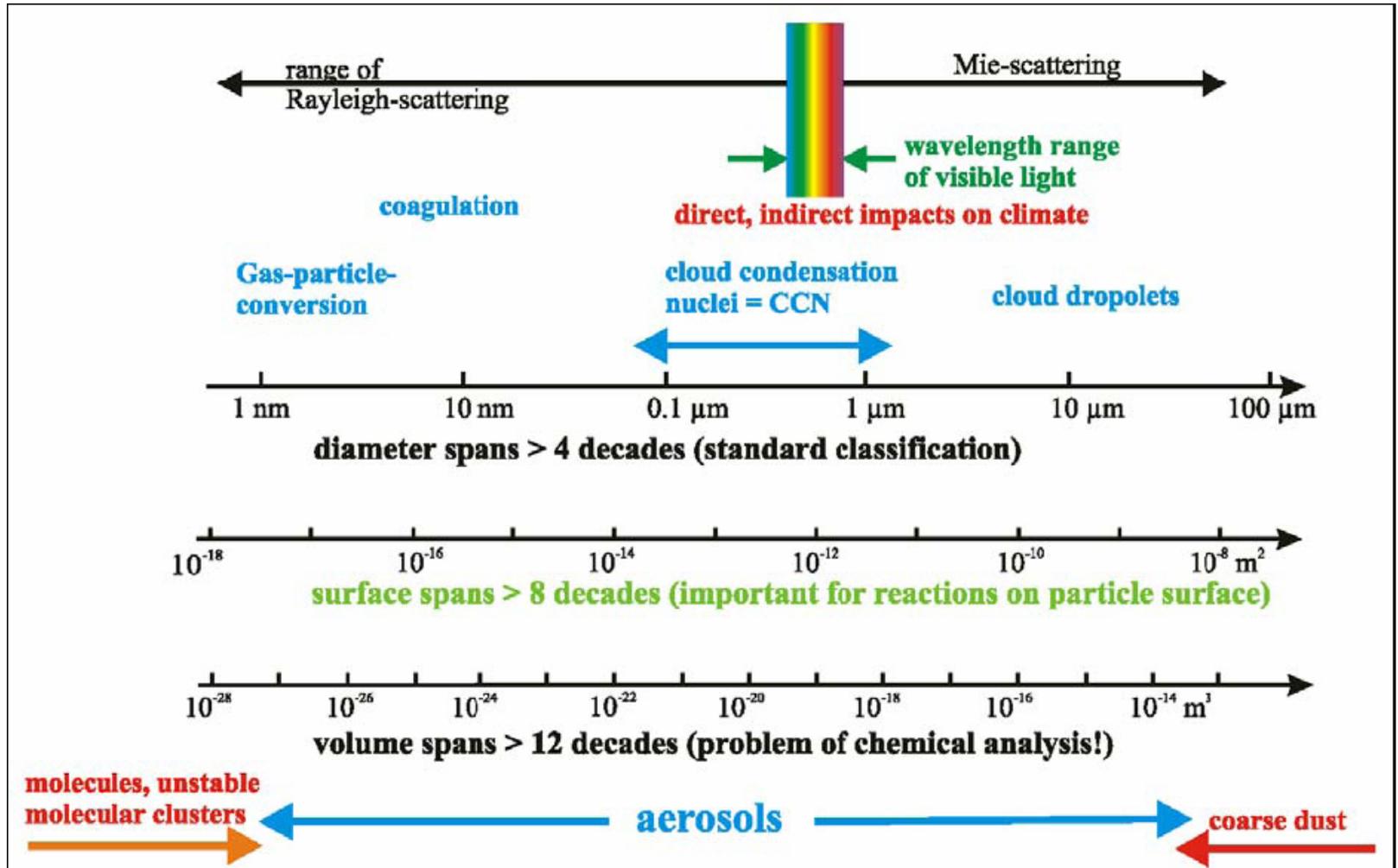
- diffuse Reflexion und Streuung des Sonnenlichts an verschiedenen Substanzen (Luftmoleküle, Staub, Gase), Wasserdampf, Wolken, Nebel und Dunst.
- Dabei bleibt die Strahlung an sich erhalten. Durch unterschiedliche Reflektion der verschiedenen Wellenlängen (verschiedene Farben) ergeben sich optische Effekte (blauer Himmel oder das Abendrot).
- Bei der selektiven Absorption wird Strahlungsenergie vom absorbierendem Körper aufgenommen.
- Das betrifft stoffabhängig nur bestimmte Wellenlängenbereiche,
- Es werden bestimmte Spektralbereiche geschwächt oder fast völlig entfernt (Absorptionsbanden).
- Diese Absorptionsbanden werden verursacht z.B. durch Ozon (als UV-Filter), Kohlendioxid und Wasserdampf (IR-Strahlung).
- Diffuse Reflexion findet im sichtbaren Bereich statt, die selektive Absorption hingegen im UV- bzw. Infrarotbereich.

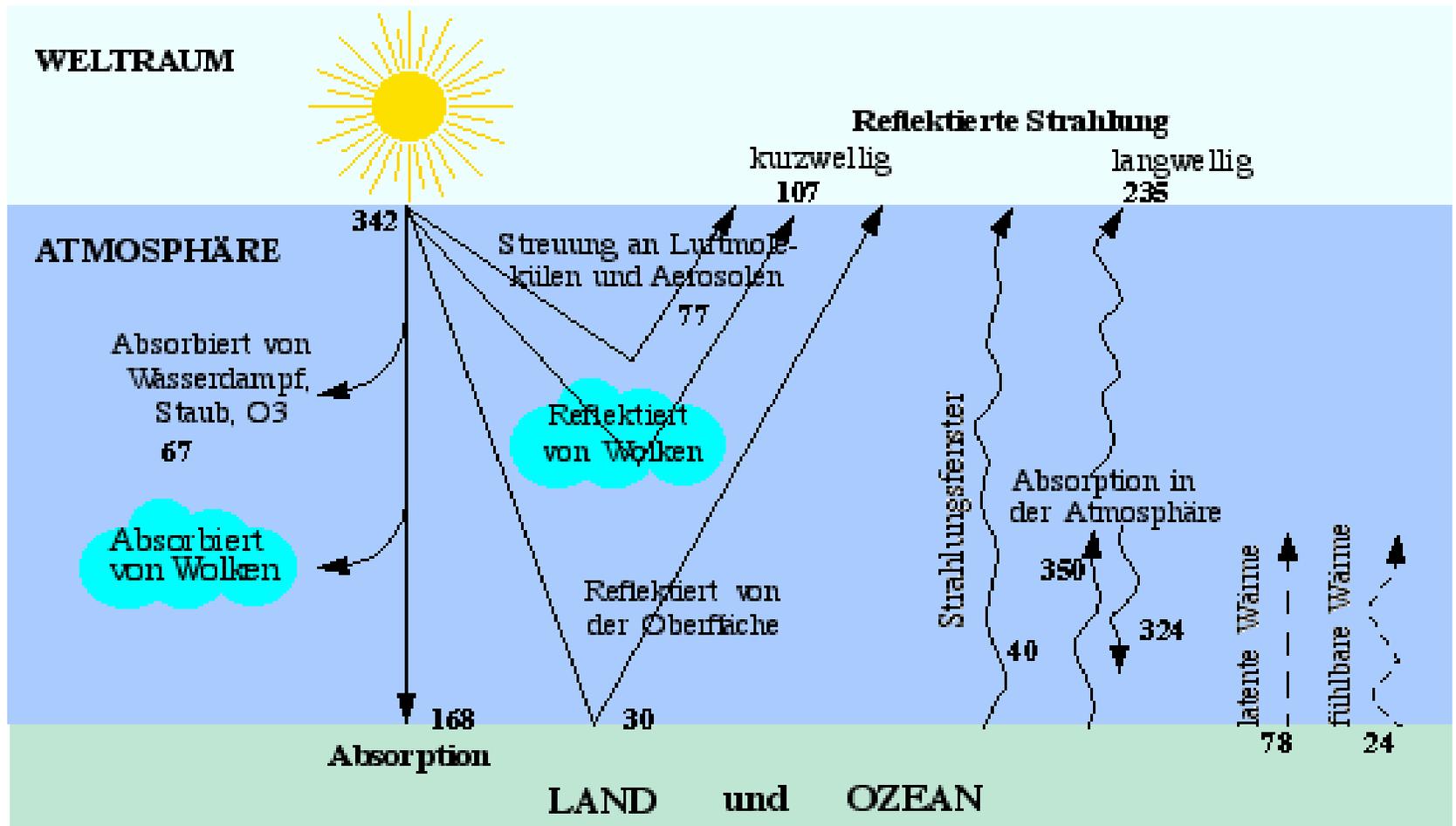


B 1

Spektrale Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Wellenlänge des Sonnenlichts

Aerosol: Größenverteilung und Effekte





Generelle Strahlungsbilanz der Atmosphäre, Werte in Watt/m²

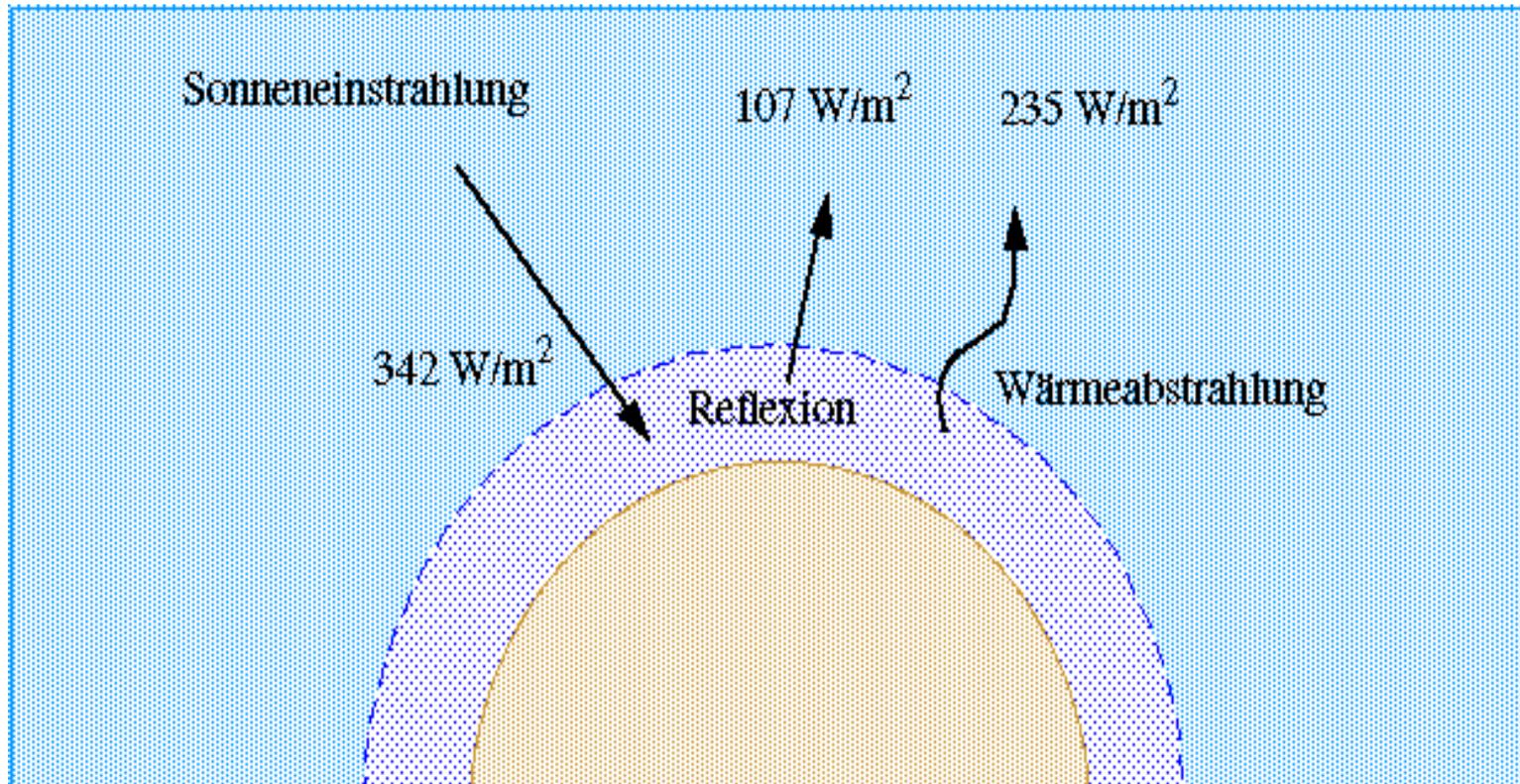
- Rückstrahlung ist abhängig von der Albedo der Körper.
- So hat Schnee die hohe Albedo mit 75-95% Reflexion
- Schwarzerde nur 5-15% Reflexion
- Globalstrahlung (langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche).
- Wolken und andere Luftbeimengungen geben einen komplizierten Beitrag
 - durch Gegenstrahlung zum Erdboden hin
 - durch Ausstrahlung zur Atmosphärenobergrenze.

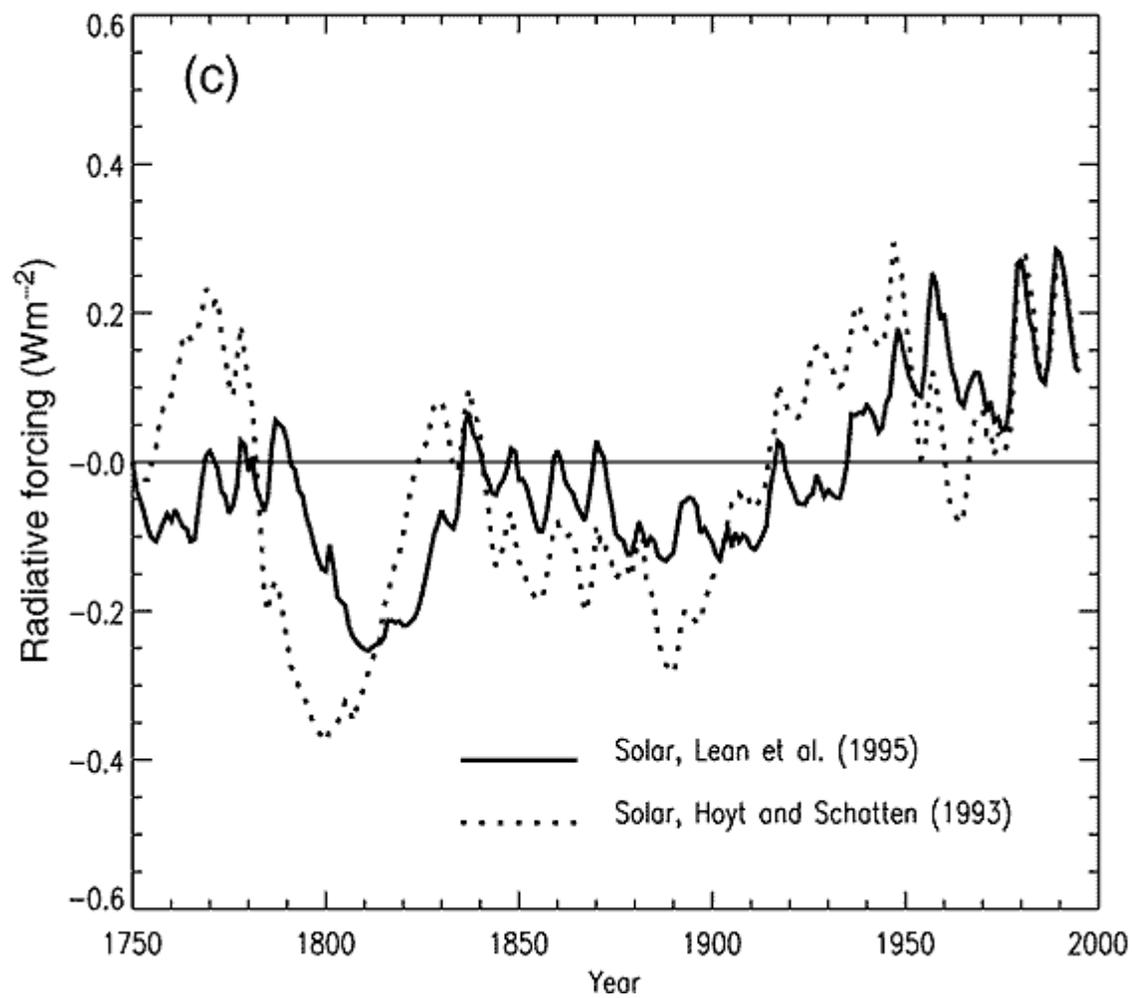
Antrieb: Strahlungshaushalt der Atmosphäre

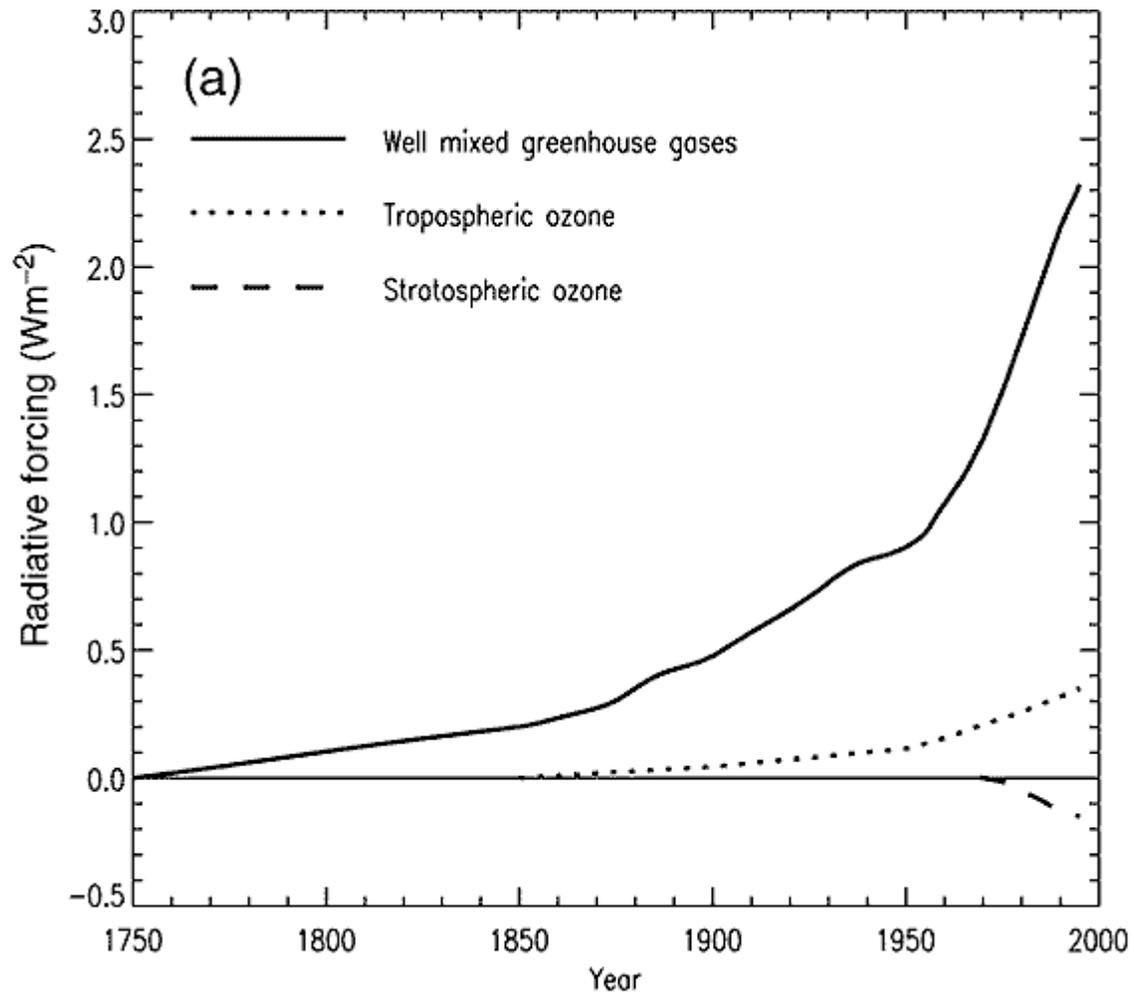
- Strahlung ist Energiefluß in Form elektromagnetischer Wellen
- Die Strahlungsarten können hierbei nach Wellenlängen unterschieden werden,
 - extrem kurzwellig (UV-Strahlung)
 - bis zu extrem langwelliger Strahlung (Infrarot).
- Feststellung:
 - Der vom Menschen verursachte oder anthropogene Treibhauseffekt ist eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts.
 - Ohne die natürliche Treibhauswirkung der Atmosphäre würde die globale Mitteltemperatur der Erde gegenwärtig nicht bei +15 °C, sondern bei -18 °C liegen.

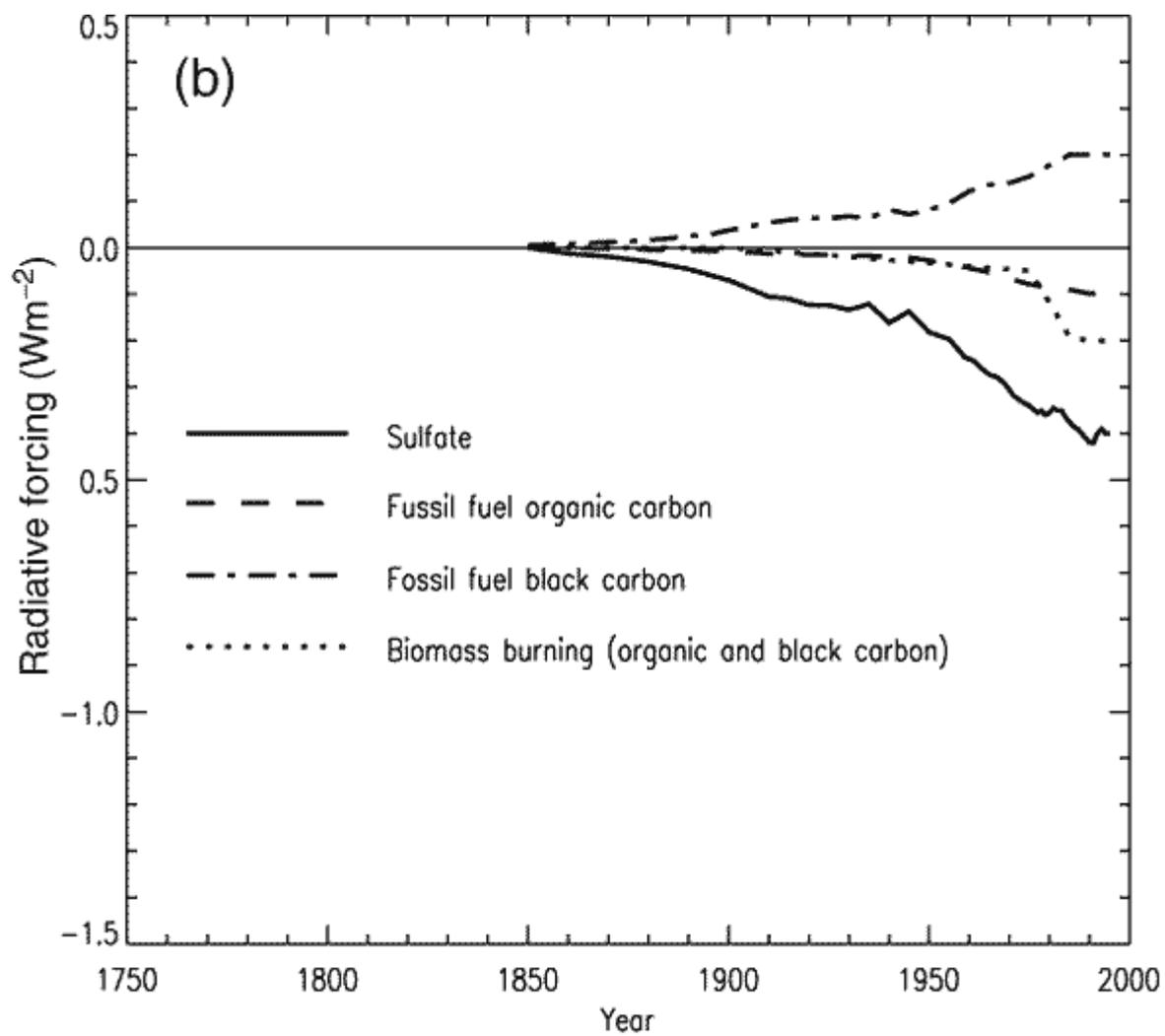
Das System Erde-Atmosphäre

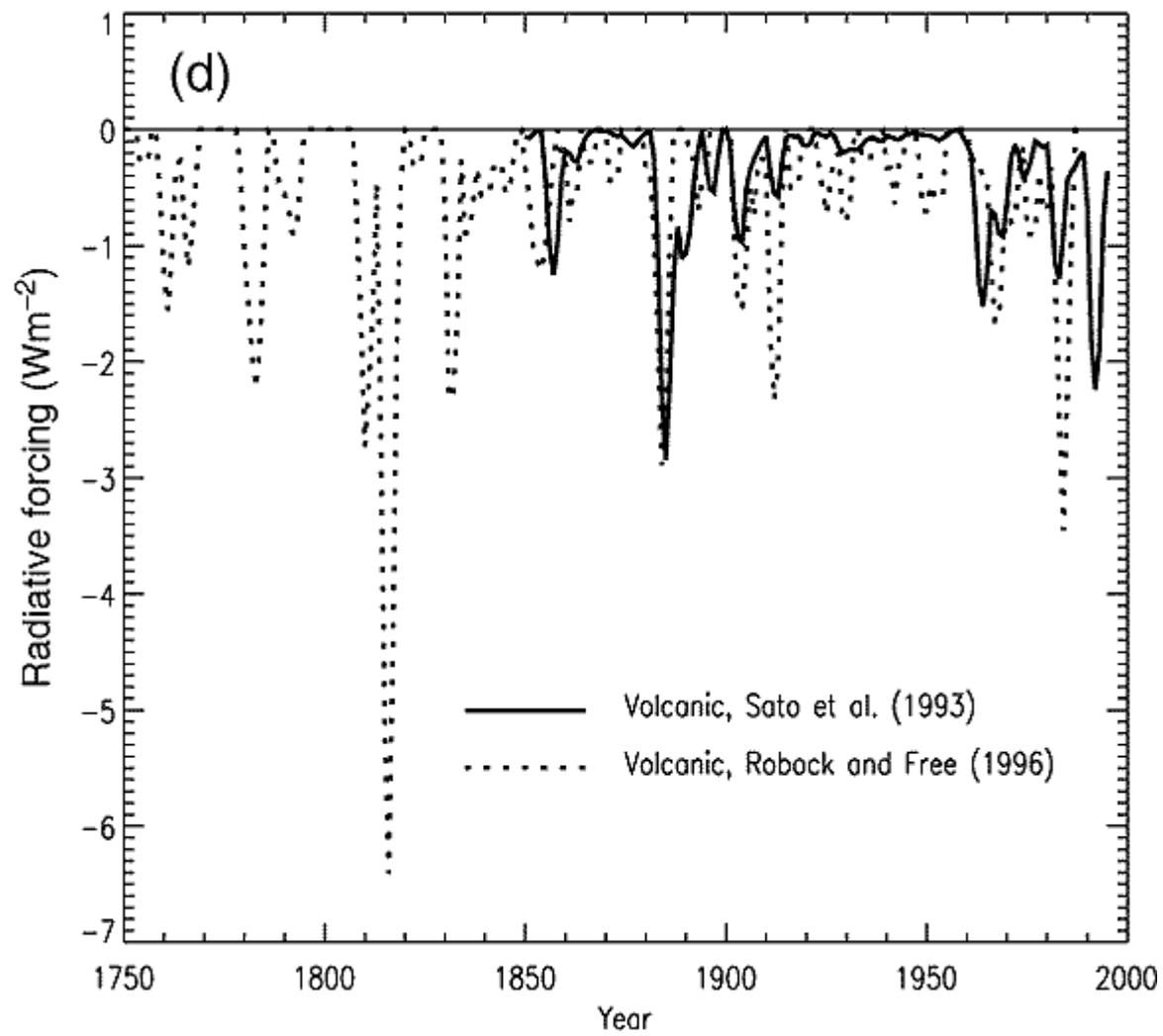
- nimmt kurzwelligere Strahlung auf
- strahlt langwelligere Energie ab (geringere Temperatur)
- die Bilanz an der Atmosphärenoberfläche ist nur annähernd ausgeglichen



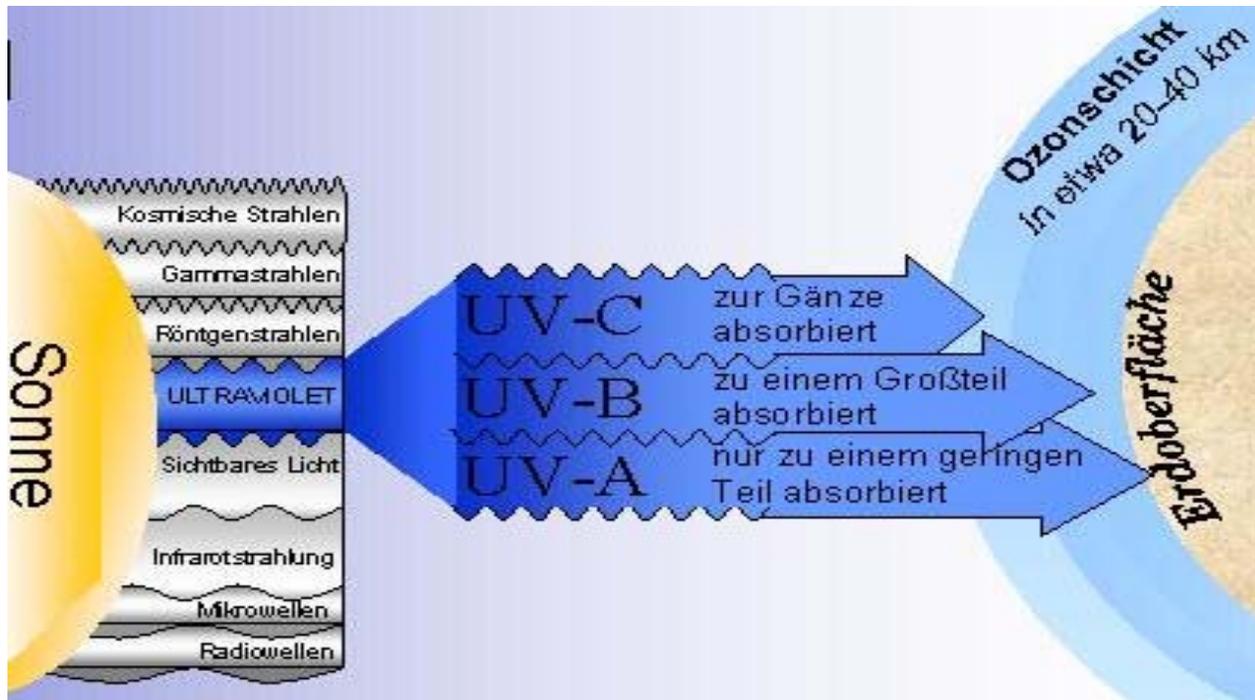








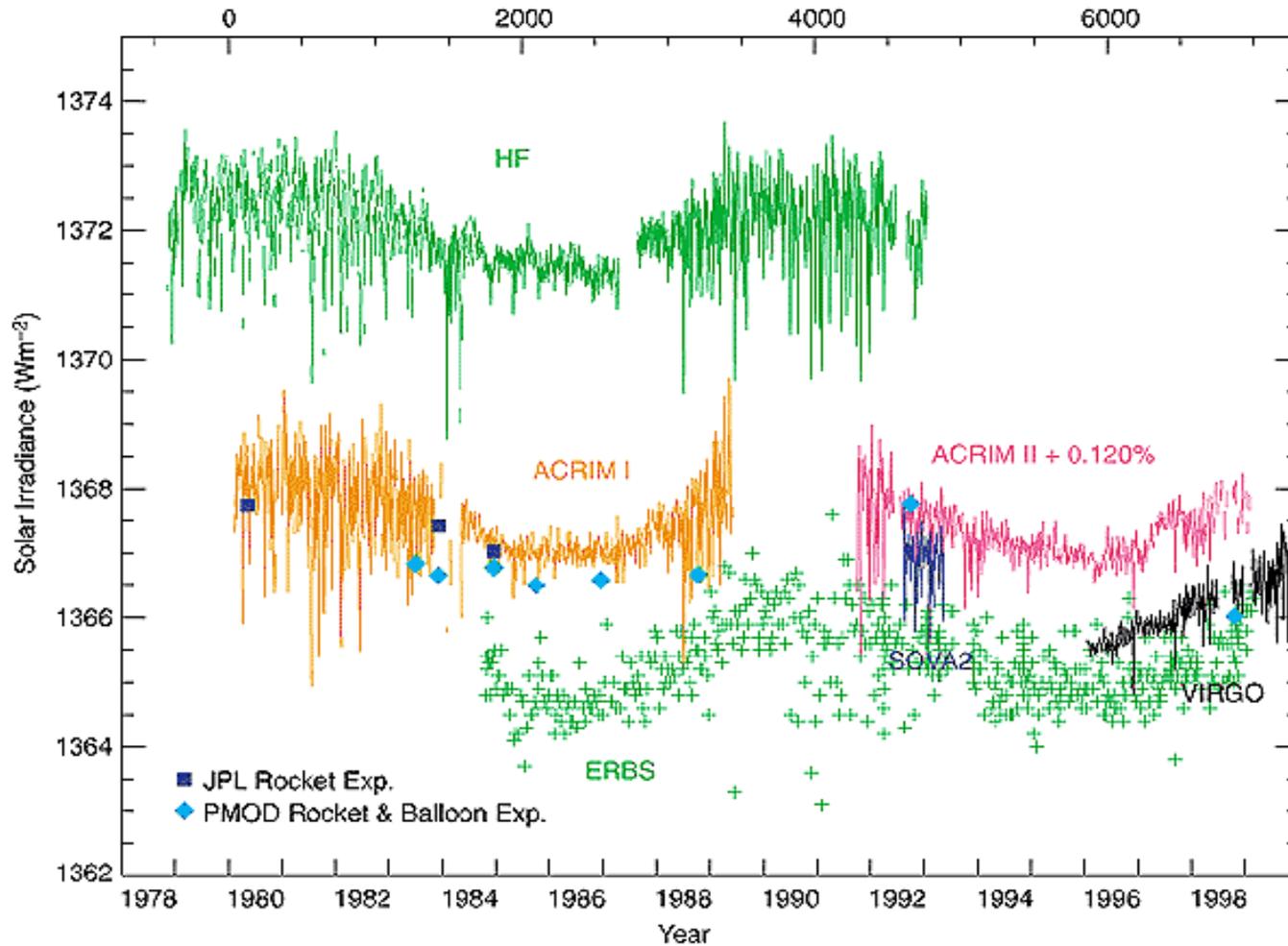
Bemerkung zu UV-Strahlung



Die Kurzwellige Strahlung wird durch Spurenstoffe, wie z.B. Ozon, stark beeinflusst.

Trotz starker Reduzierung werden in Bodennähe relevante Prozesse im Ozon/Stickstoff-Kreislauf bewirkt.

Variabilität der Solarstrahlung

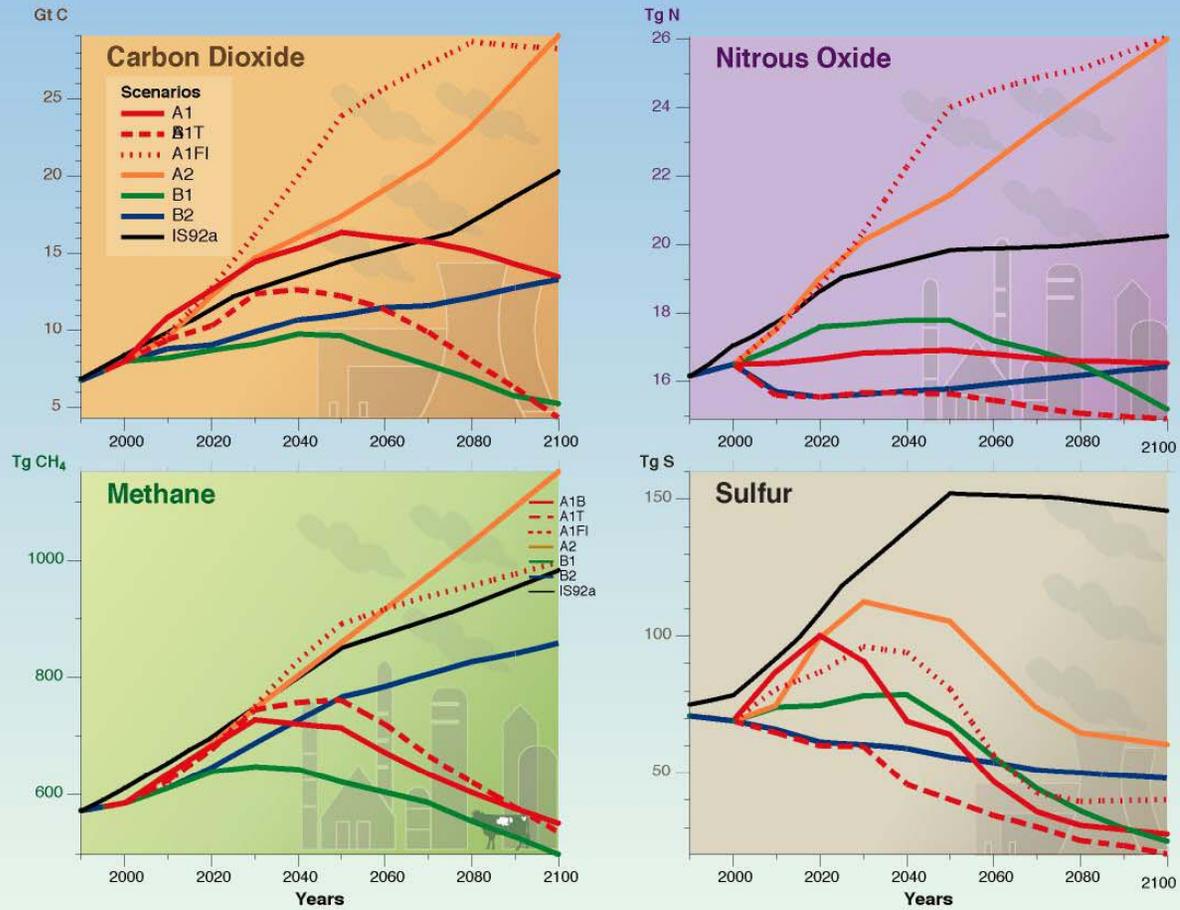


Frage

Wie wirken sich die anthropogenen
Veränderungen der Luftzusammensetzung aus

- Auf die Strahlungsbilanz
- Auf das globale und lokale Klima

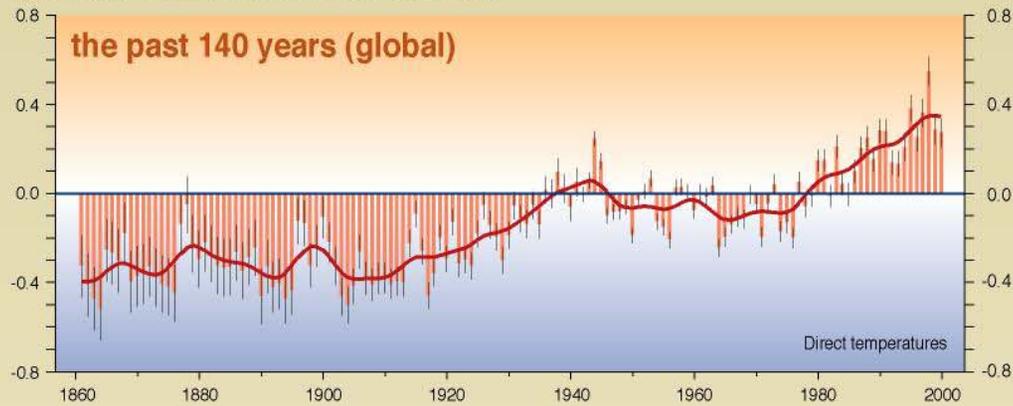
Anthropogenic emissions of CO₂, CH₄, N₂O and SO₂ for the six SRES scenarios



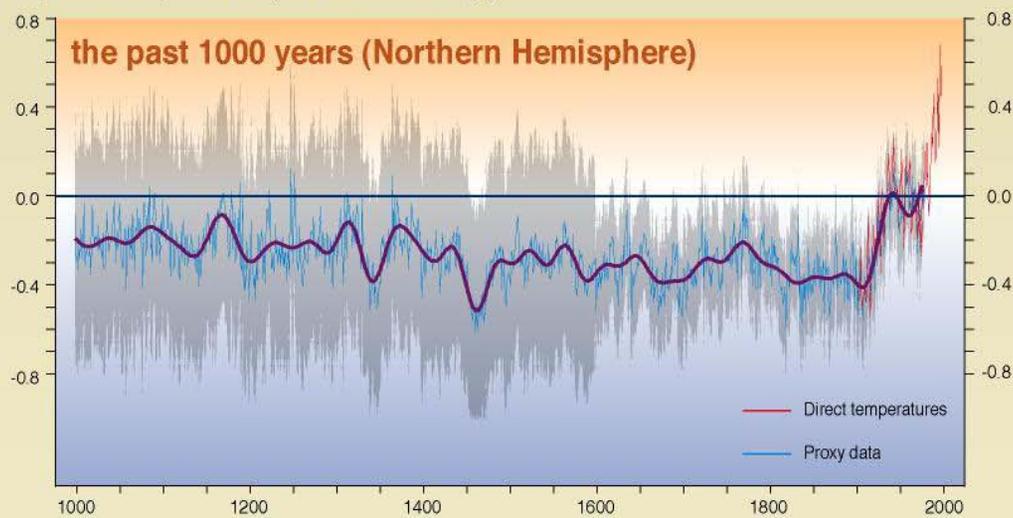
WG1 TS FIGURE 17

Variations of the Earth's surface temperature for...

Departures in temperature in °C (from the 1961-1990 average)

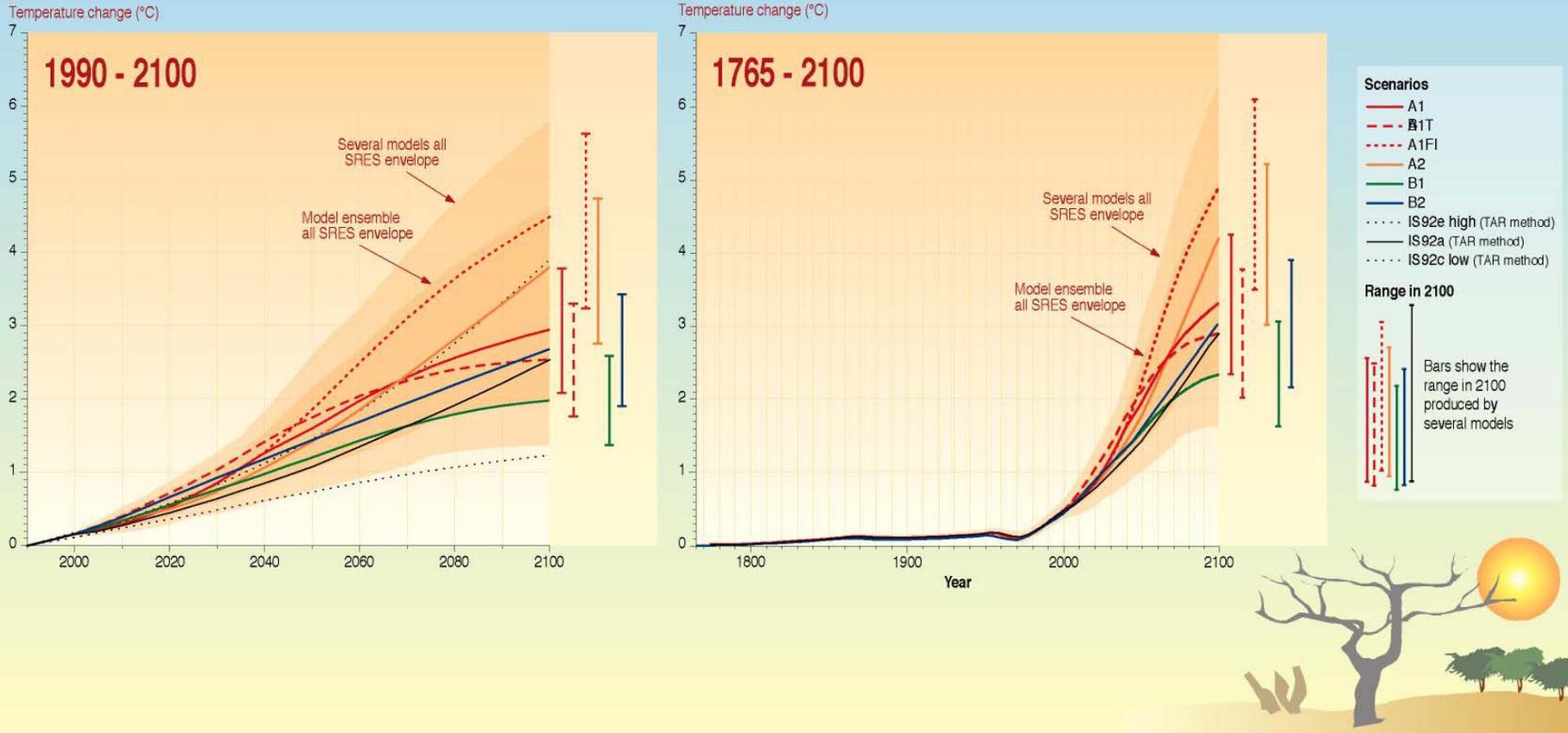


Departures in temperature in °C (from the 1961-1990 average)



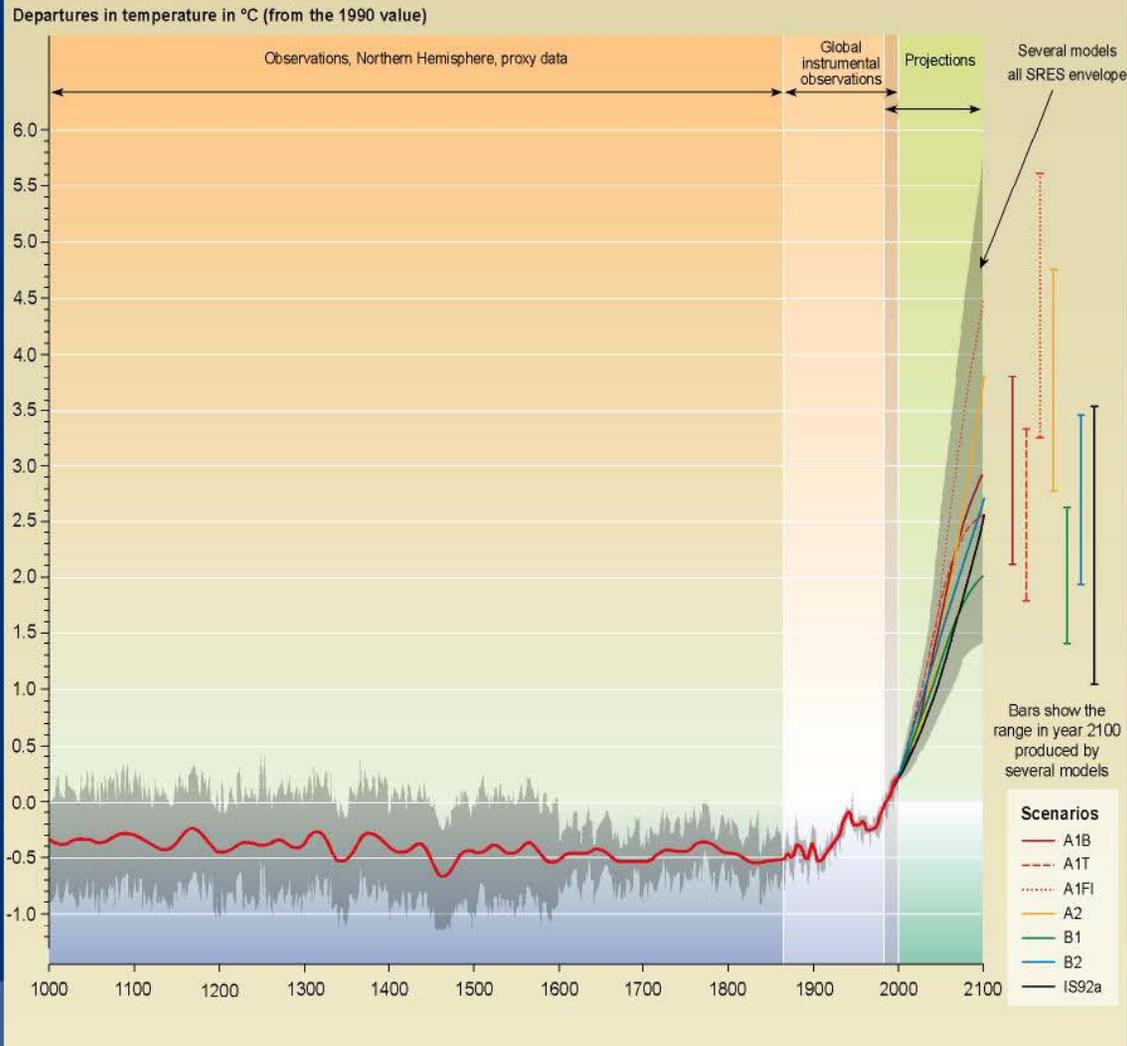
SYR - FIGURE 2-3

Temperature change (1760 - 2100)



WG1 TS FIGURE 22

Variations of the Earth's surface temperature: year 1000 to year 2100

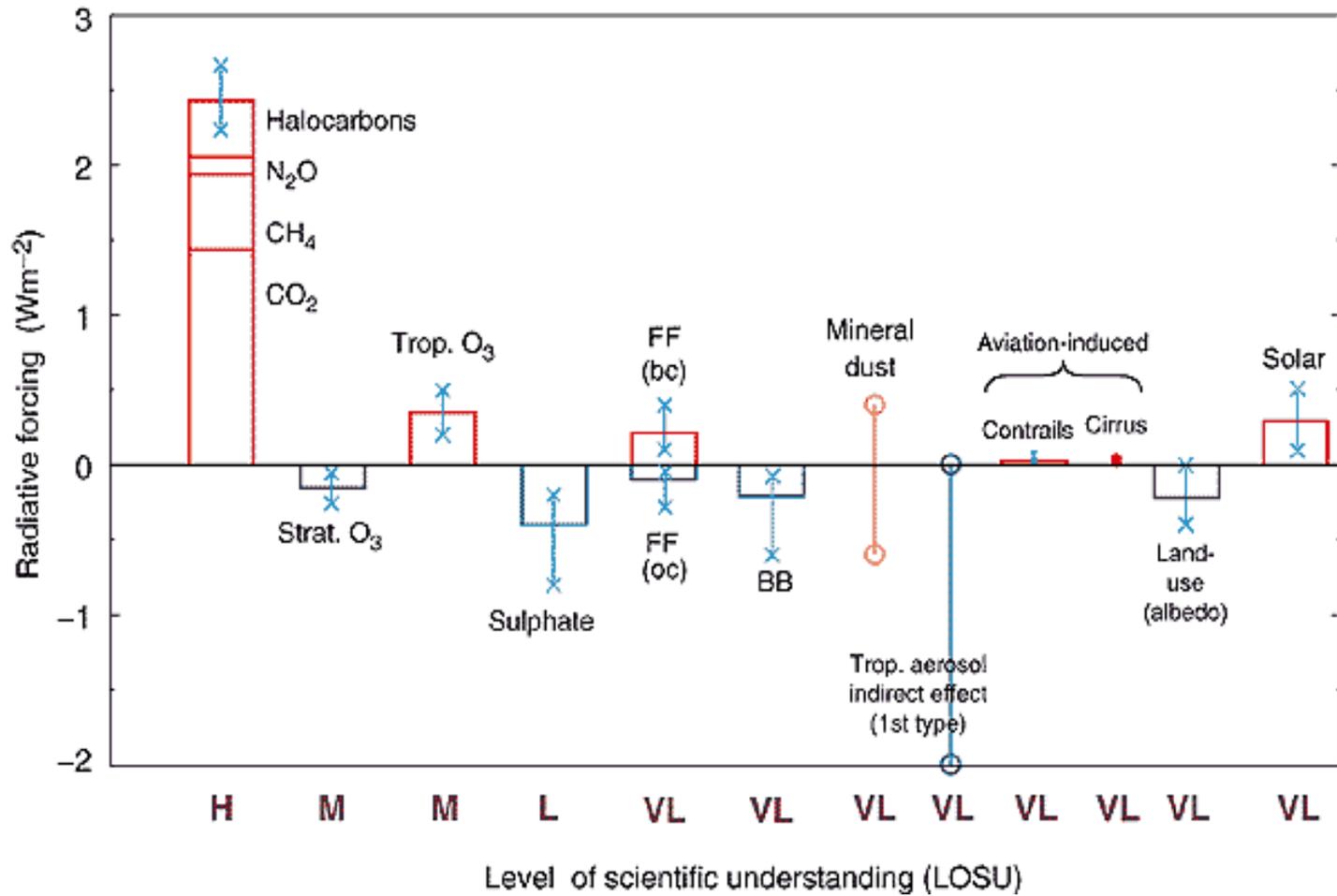


SYR - FIGURE 9-1b

Strahlungs-Forcing

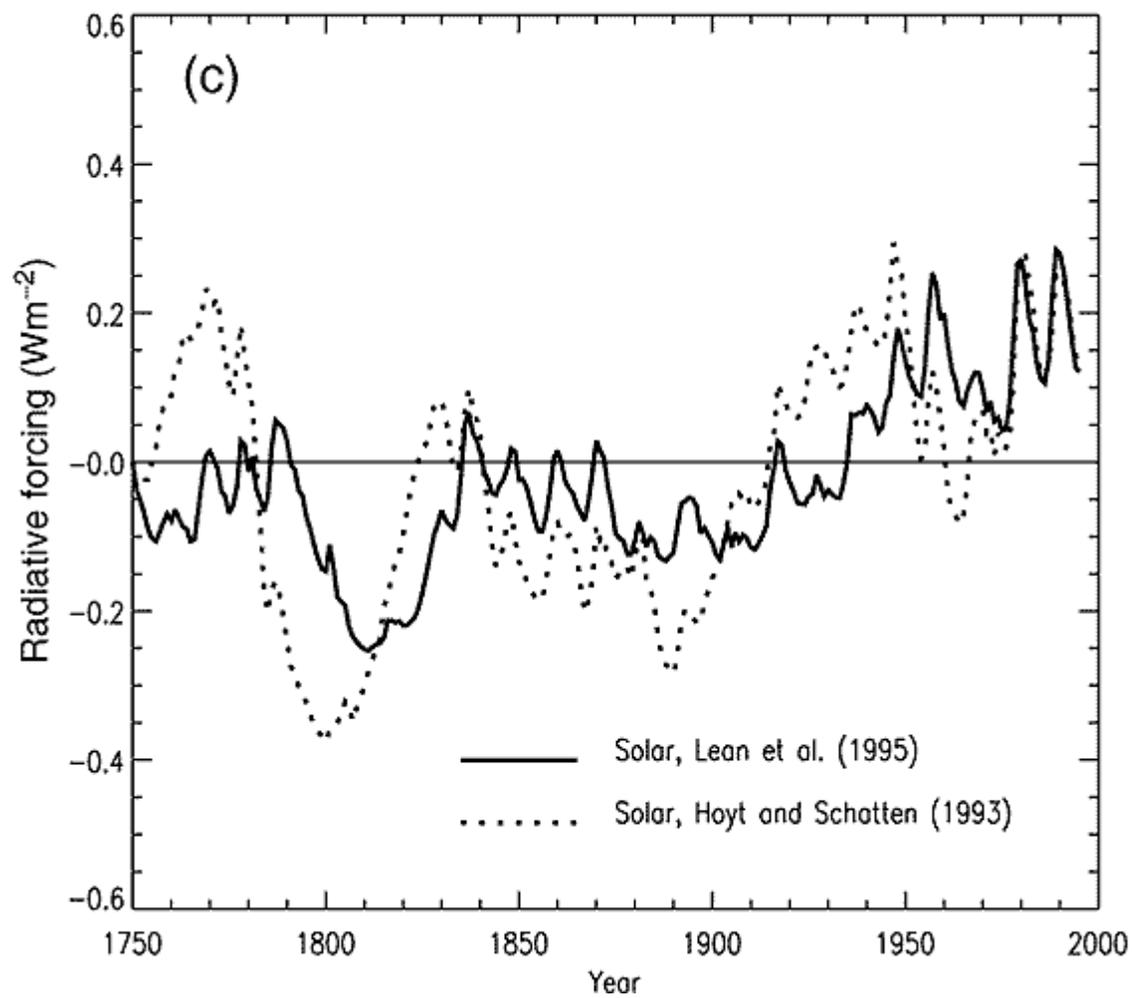
- Anhand von Beobachtungen und Modellrechnungen wird die Variabilität des Klimas untersucht (IPCC).
- Der Begriff des Forcing wird im Vergleich zwischen verschiedenen Referenzzuständen verwendet.
- Einwirkung der Strahlungsprozesse in der Atmosphäre im Vergleich zum Oberrand.
- Vergleich des Zustands zu verschiedenen Zeiten (vorindustriell oder eiszeitlich – gegenwärtigen Klima)
- Hier speziell Bemerkungen zum Strahlungsforcing

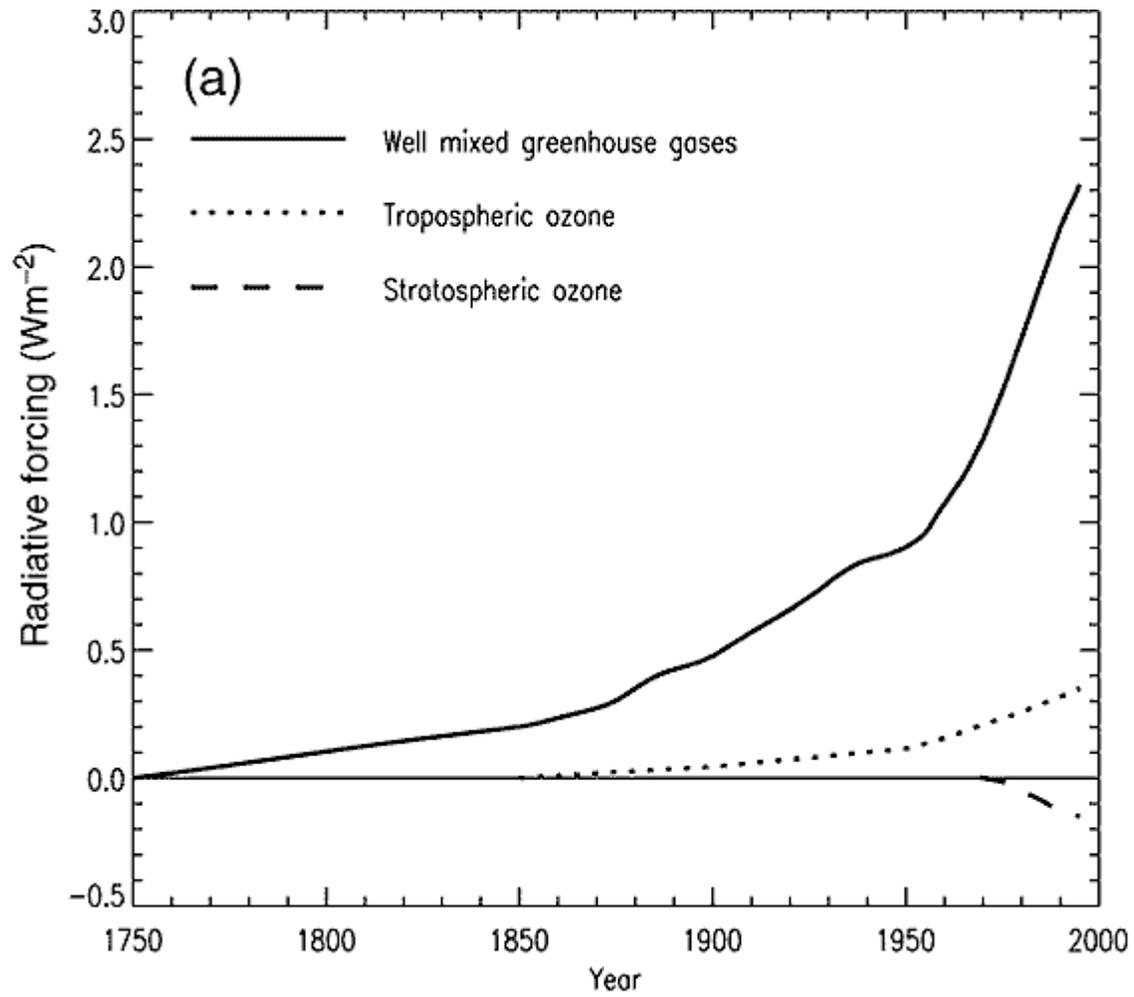
Global and annual mean radiative forcing (1750 to present)

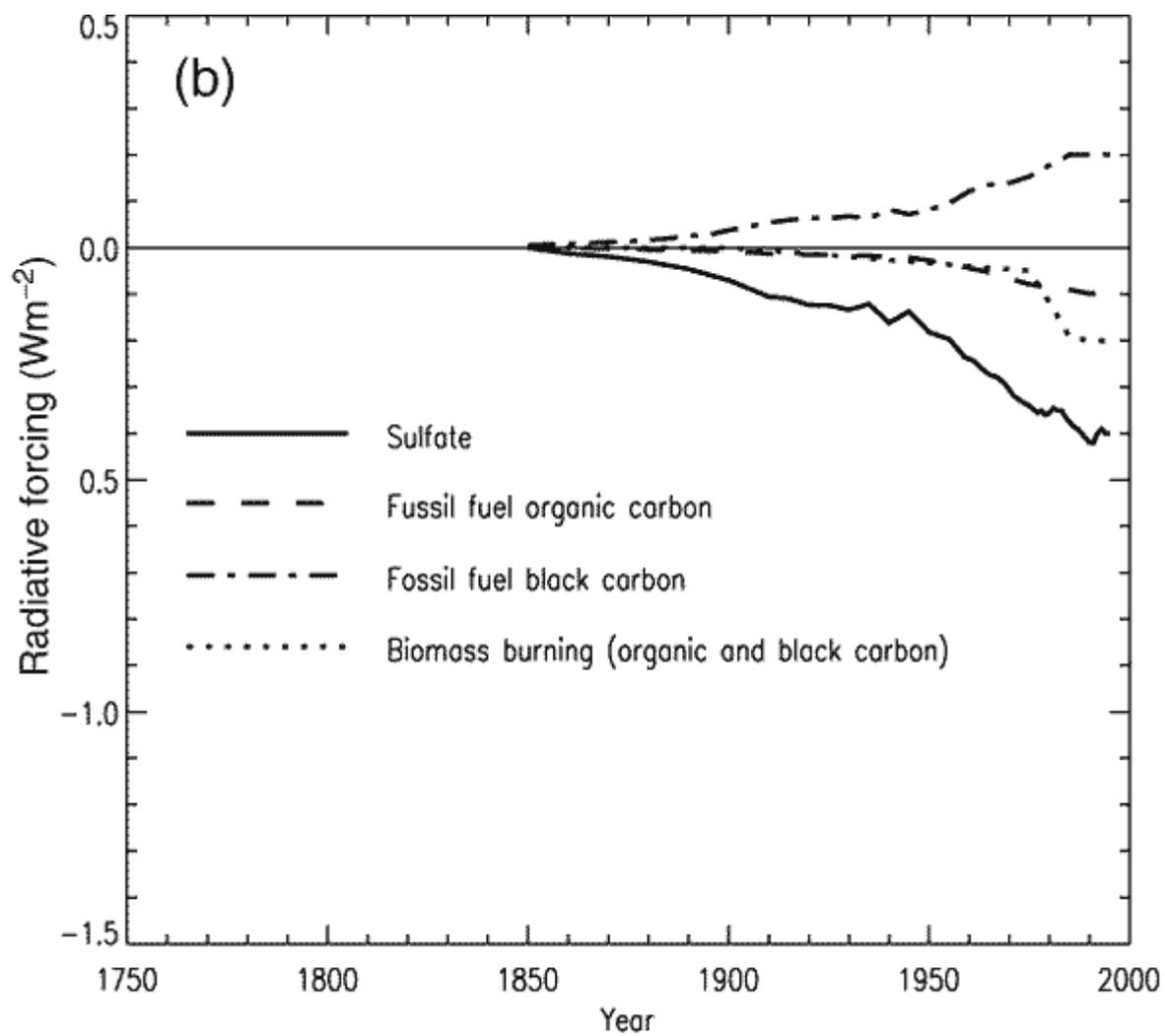


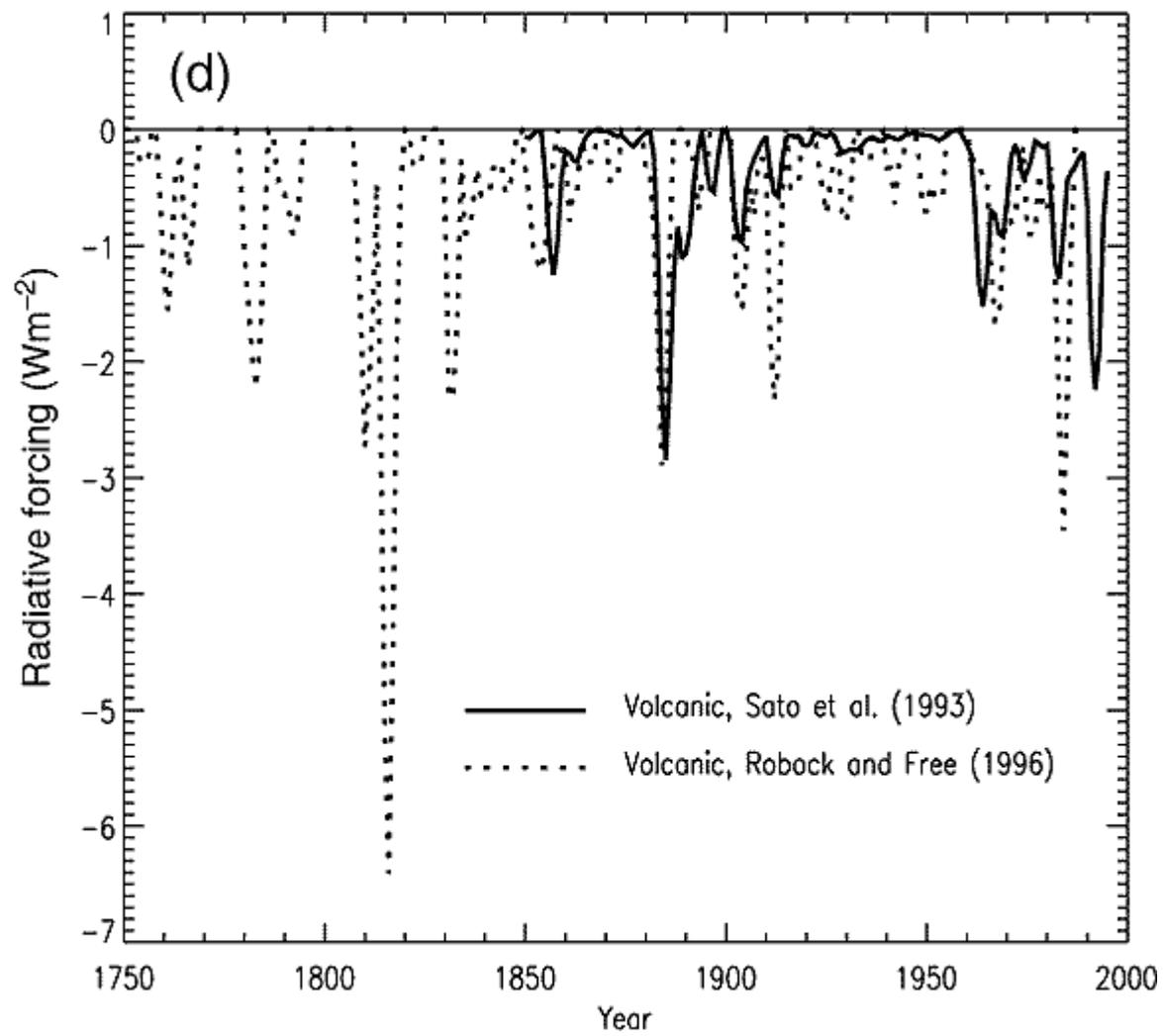
Modellgestützte ausführliche Abschätzungen existiert über das Strahlungs- Forcing für den Zeitraum 1750 -2000 durch

- Greenhouse Gase (CO₂ ,CH₄ ,N₂O, CFC-11 and CFC-12
- Abbau des stratosphärischen Ozons
- Zunahme des troposphärischen Ozons
- direkte Auswirkung von Sulfat Aerosolen
- elementaren und organischen Kohlenstoff aus Biomassenverbrennung, Verwendung fossiler Brennstoffe,
- anthropogene Staubemissionen
- indirekte Effekte durch Sulfat-Aerosole (Wolkenbildung)
- Änderung der Oberflächen-Albedo
- Solare Variabilität

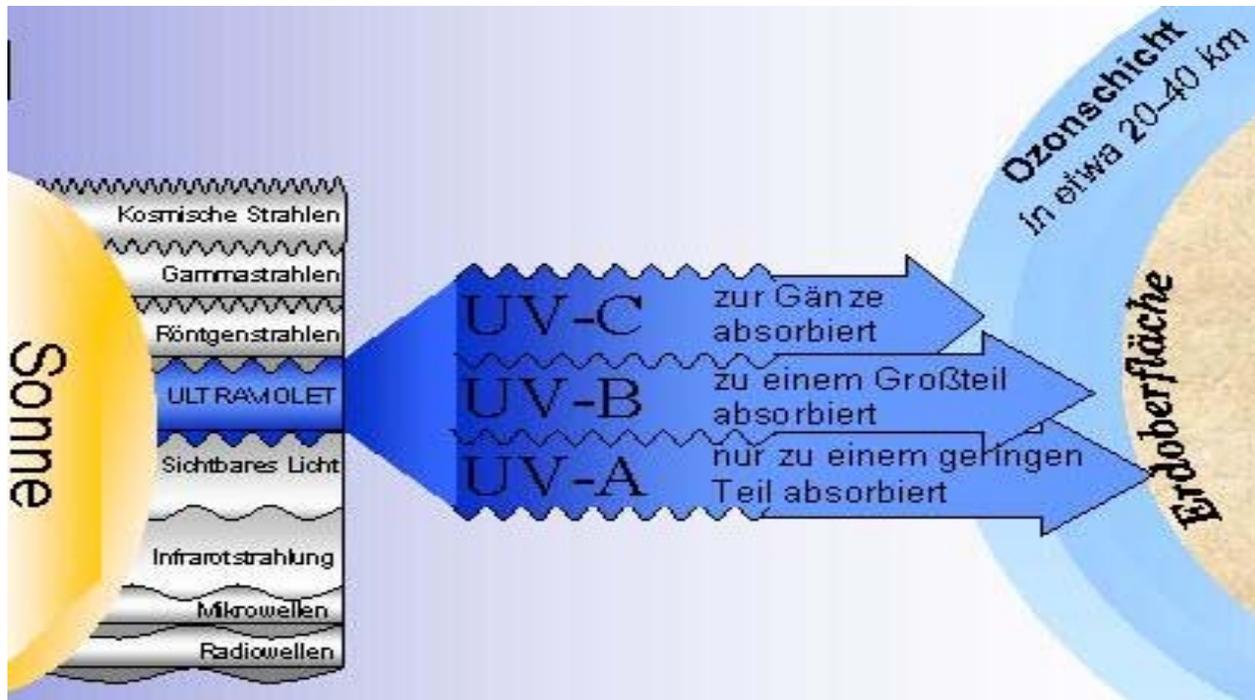








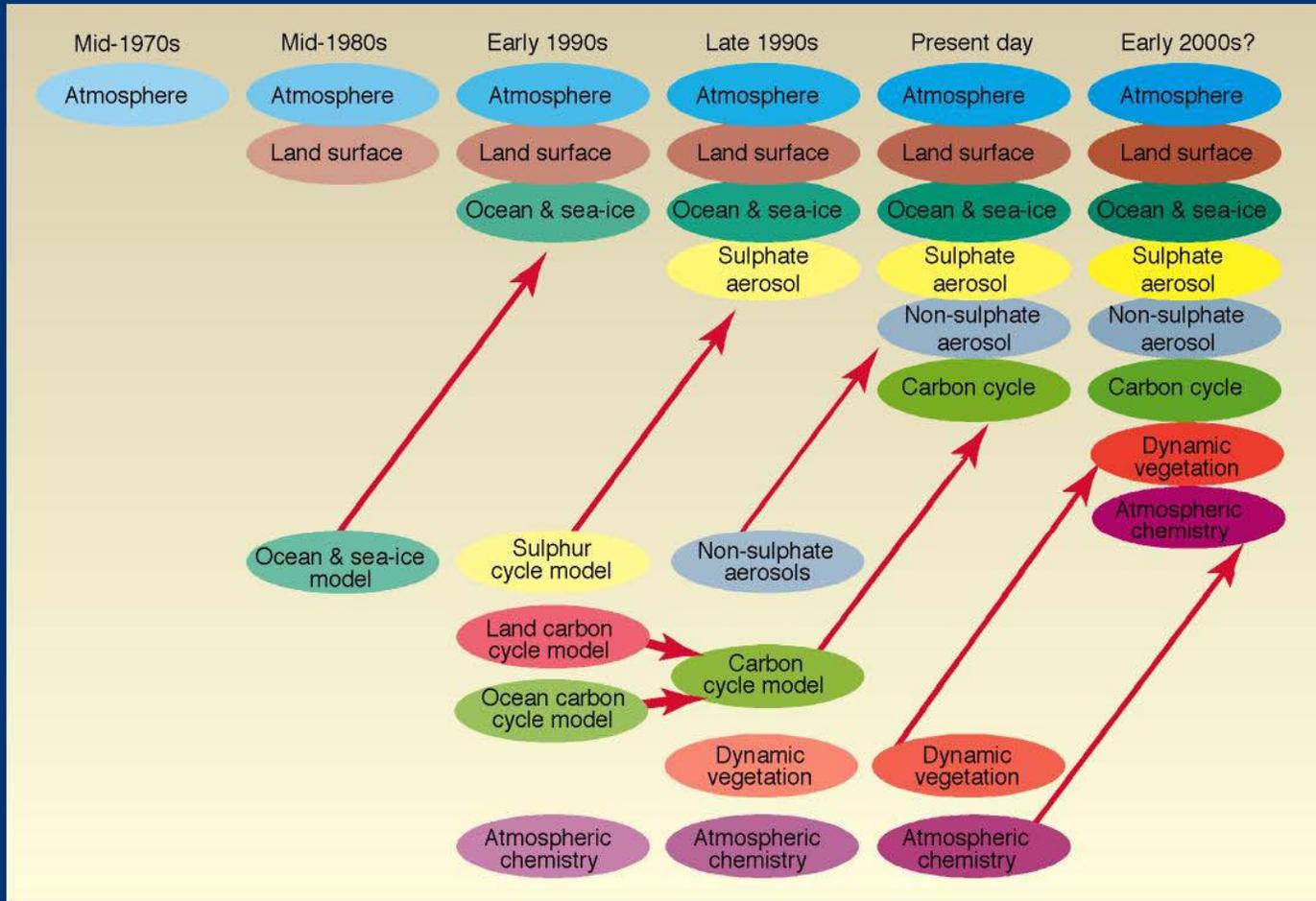
Bemerkung zu UV-Strahlung



Die Kurzwellige Strahlung wird durch Spurenstoffe, wie z.B. Ozon, stark beeinflusst.

Trotz starker Reduzierung werden in Bodennähe relevante Prozesse im Ozon/Stickstoff-Kreislauf bewirkt.

The development of climate models, past, present and future



WG1 - TS BOX 3
FIGURE 1

Abschließende Bemerkungen

- Die Auswirkung der Veränderungen der lokalen oder globalen Strahlungsbilanz auf die zukünftige Klimaentwicklung (Temperatur und Niederschlagsentwicklung) ist durch die komplexe Wirkung von Spurenstoffen schwierig.
- Eine thermische anthropogene Energiezunahme ist generell beobachtbar,
- Aber z.B. im sog. Schwarzen Dreieck sind die Kohlenstoff und Schwefelemissionen zwar stark zurückgegangen, aber durch die Kompensation des Forcing durch Ruß- und Sulfat-Aerosole ist keine wesentliche Veränderung der bodennahen Strahlungsbilanz zu beobachten.
- Ebenso zeigt die UV-Strahlung an Boden in Europa unterschiedliche Veränderungen, da die Abnahme des stratosphärischen Ozons durch die Zunahme anthropogener Emissionen kompensiert wird.
- Die Weiterentwicklung der Prozessmodellierung ist wesentlich.