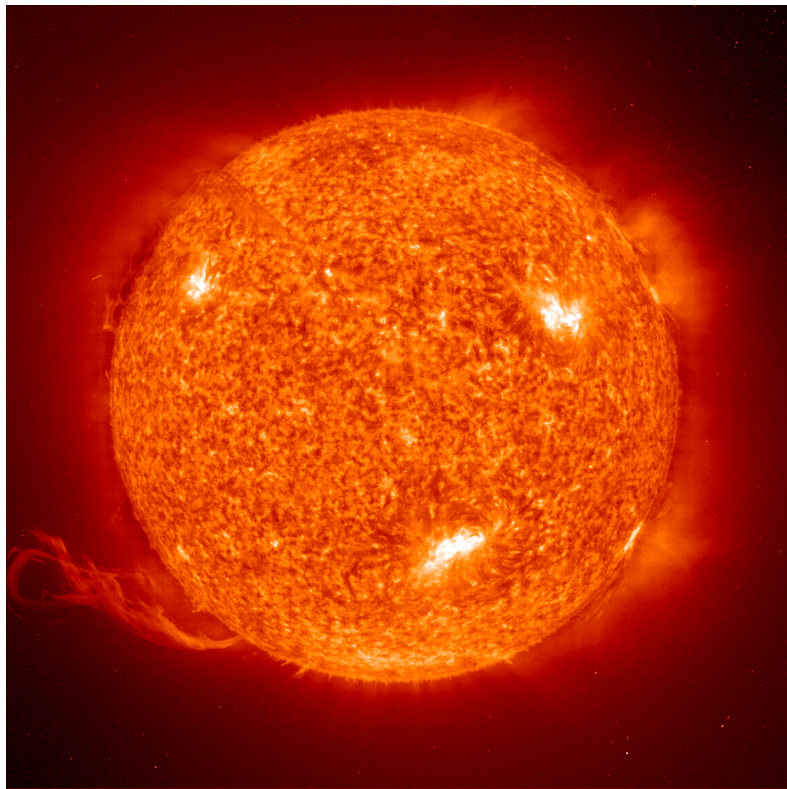


# Energie-Bilanz der Erde

## Physik des Klimas



„Licht“  
Energie



Manfred Sigrist, ETH Zurich

# Energie-Bilanz der Erde

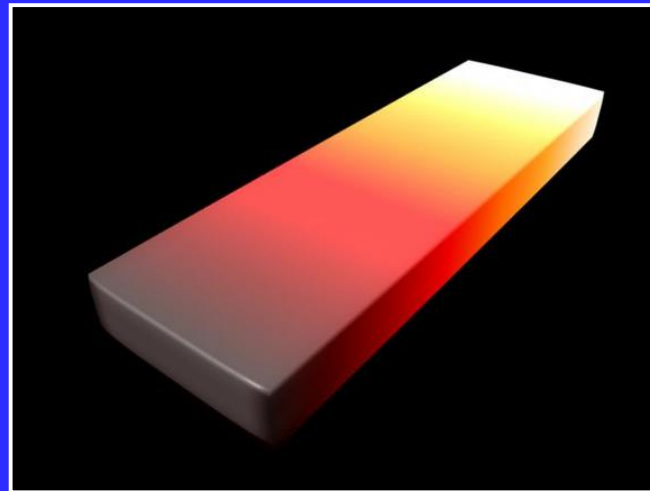
## Physik des Klimas



Manfred Sigrist, ETH Zurich

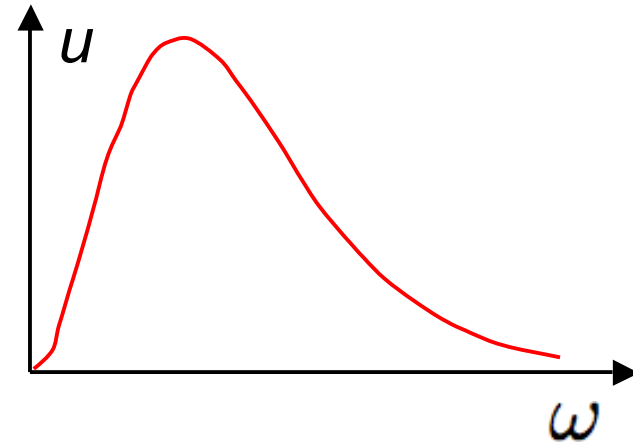
# Thermische Abstrahlung eines Körpers

Stefan-Boltzmann Gesetz



# Stefan-Boltzmann Gesetz

Planck:  $u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$



schwarzer Körper

Temperatur  $T$

$$u(\omega, T) = D(\omega) \underbrace{\frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}}_{\text{internal energy quantum harmonic oscillator}}$$

density of modes

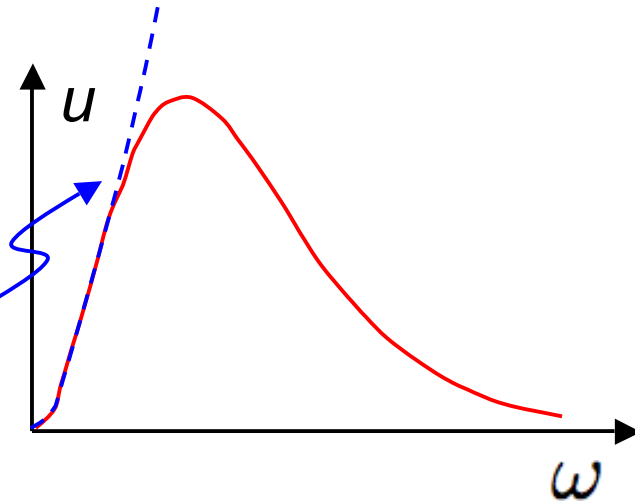
$$D(\omega) = \sum_{\vec{k}, \lambda} \delta(\omega - \omega_{\vec{k}}) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \quad \text{dispersion}$$

wave vector      polarization

$$\omega_{\vec{k}} = c |\vec{k}|$$

# Stefan-Boltzmann Gesetz

Planck:  $u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$



Rayleigh-Jeans  
classical

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} k_B T$$

schwarzer Körper

Temperatur  $T$

$$u(\omega, T) = D(\omega) \underbrace{\frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}}_{\text{internal energy quantum harmonic oscillator}}$$

density of modes

internal energy  
quantum harmonic oscillator

$$D(\omega) = \sum_{\vec{k}, \lambda} \delta(\omega - \omega_{\vec{k}}) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi}$$

wave vector      polarization

dispersion

$$\omega_{\vec{k}} = c |\vec{k}|$$

# Stefan-Boltzmann Gesetz

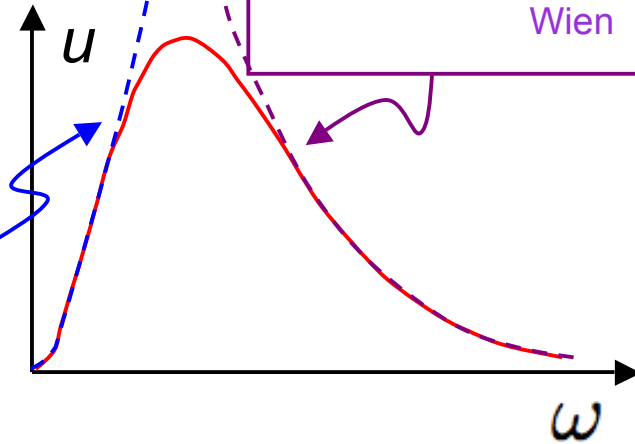
Planck: 
$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$$

Rayleigh-Jeans  
classical

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} k_B T$$

$$u(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{c^3 \pi} e^{-\hbar \omega / k_B T}$$

Wien



schwarzer Körper

Temperatur  $T$

$$u(\omega, T) = D(\omega) \underbrace{\frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}}_{\text{internal energy quantum harmonic oscillator}}$$

density of modes

internal energy  
quantum harmonic oscillator

$$D(\omega) = \sum_{\vec{k}, \lambda} \delta(\omega - \omega_{\vec{k}}) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi}$$

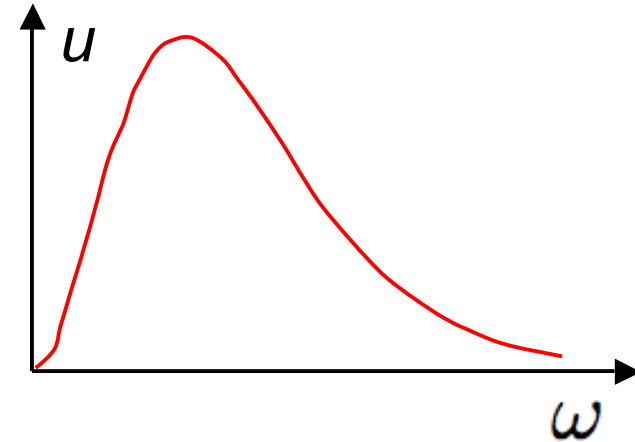
wave vector      polarization

dispersion

$$\omega_{\vec{k}} = c |\vec{k}|$$

# Stefan-Boltzmann Gesetz

$$\text{Planck: } u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$$



schwarzer Körper

## Schwarzer Körper:

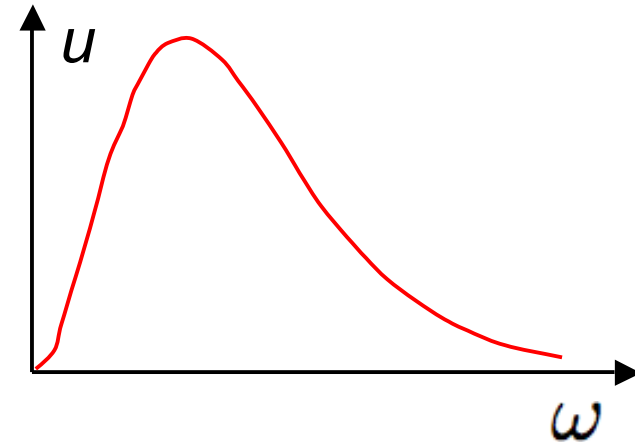
absorbiert („verschluckt“) auftreffende elektromagnetische Strahlung (Licht) vollständig

im Gleichgewicht: gibt Strahlung gemäss Planck-Verteilung ab

Temperatur  $T$

# Stefan-Boltzmann Gesetz

$$\text{Planck: } u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{c^3 \pi} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$$



## Stefan-Boltzmann

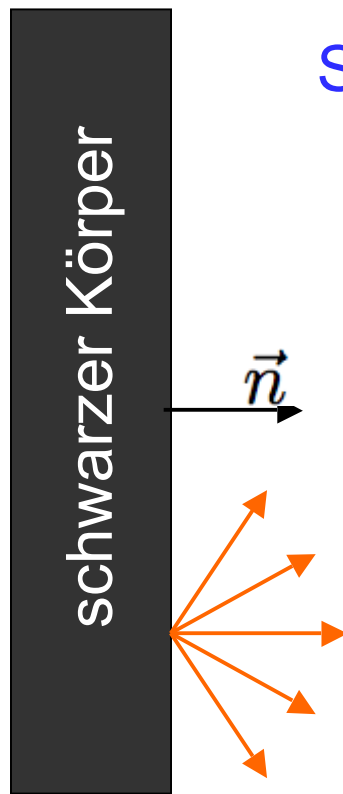
internal energy density

$$U(T) = \int d\omega u(\omega, T) = \frac{\pi^2}{15} \frac{(k_B T)^4}{(\hbar c)^3} \propto T^4$$

emission power

$$S(T) = U c \int \frac{d\Omega_{\vec{k}}}{4\pi} \frac{\vec{k} \cdot \vec{n}}{|\vec{k}|} = U \frac{c}{4} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

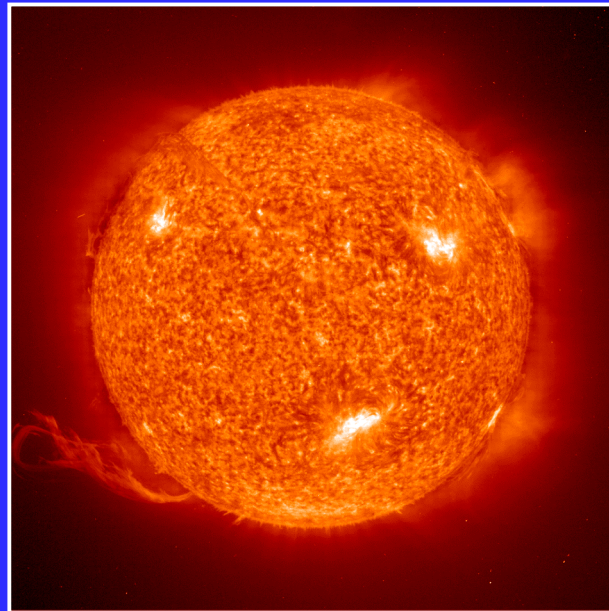


Temperatur  $T$

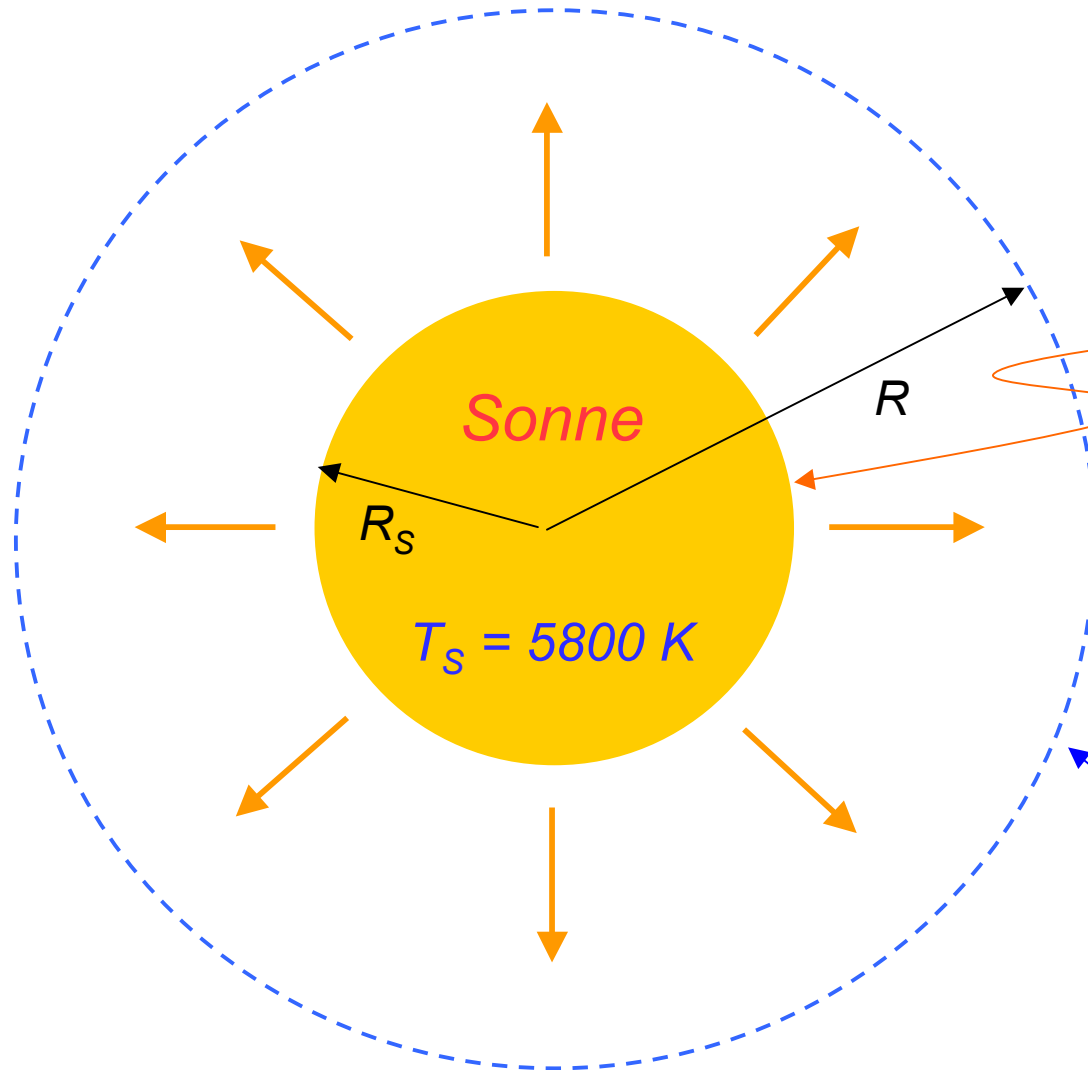


# Solarkonstante

Wärmestrom der Sonne



# Solarkonstante



Energiefluss der Strahlung:

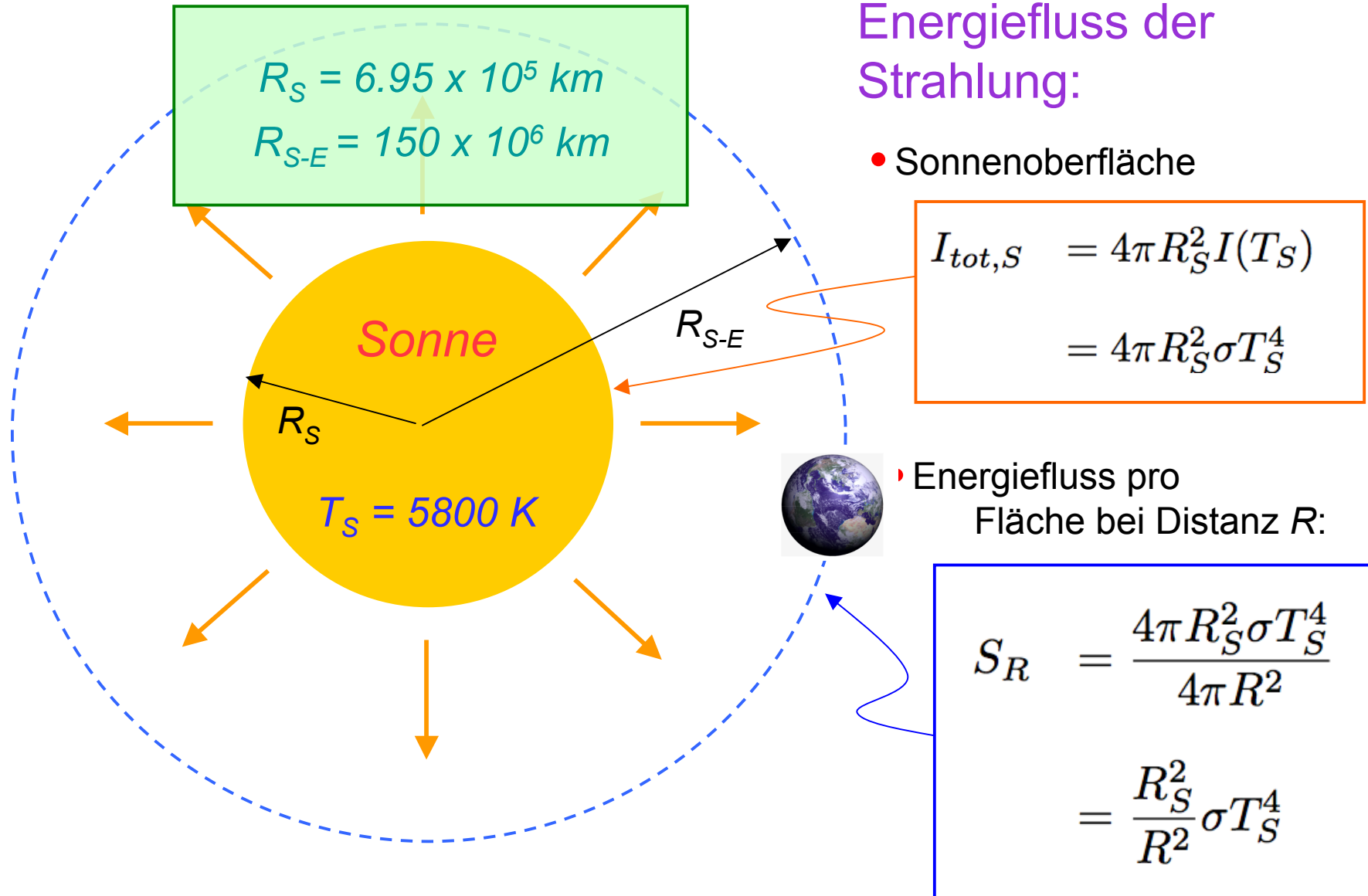
- Sonnenoberfläche

$$\begin{aligned} I_{tot,S} &= 4\pi R_S^2 I(T_S) \\ &= 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4 \end{aligned}$$

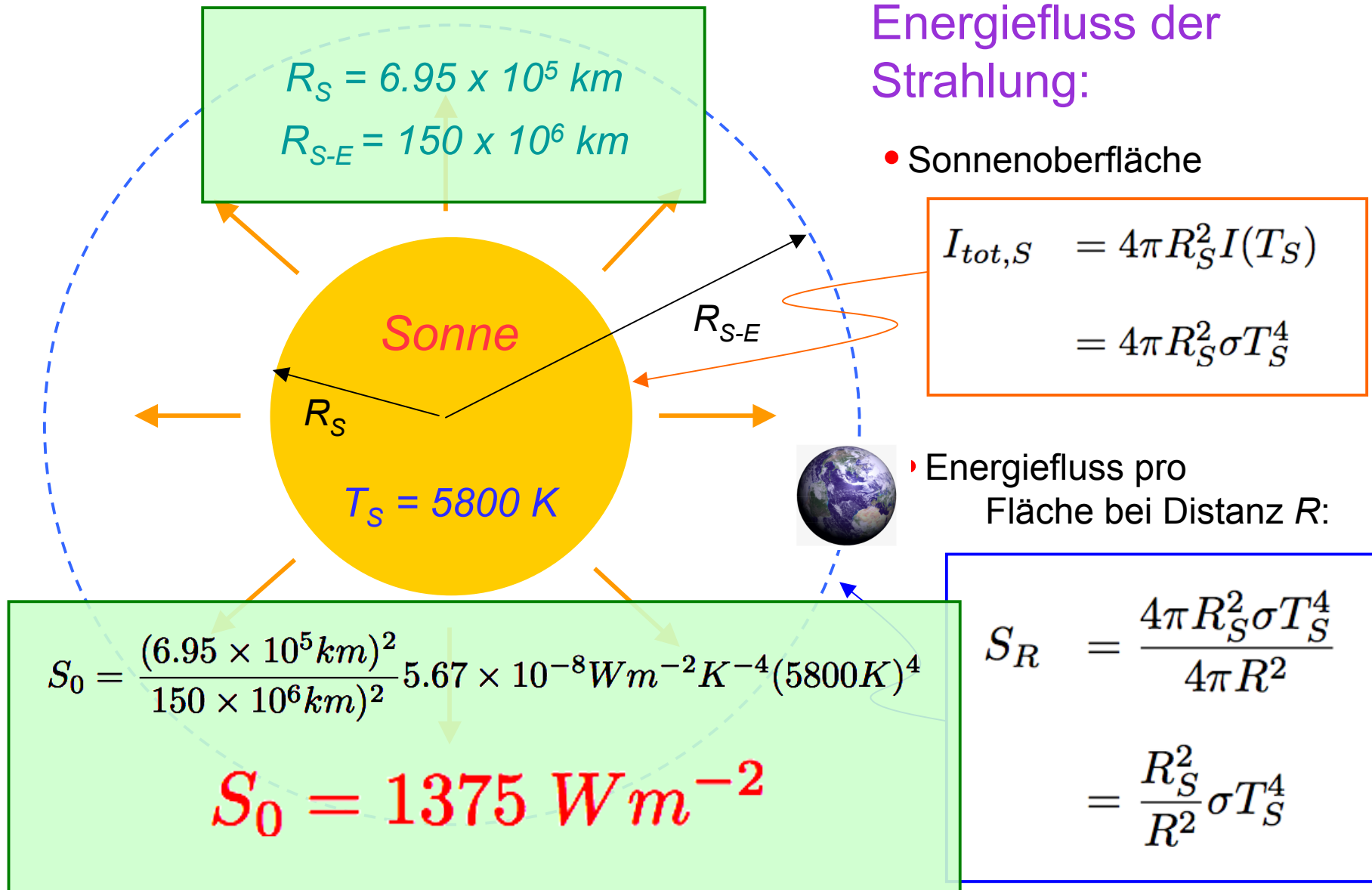
- Energiefluss pro Fläche bei Distanz  $R$ :

$$\begin{aligned} S_R &= \frac{4\pi R_S^2 \sigma T_S^4}{4\pi R^2} \\ &= \frac{R_S^2}{R^2} \sigma T_S^4 \end{aligned}$$

# Solarkonstante



# Solarkonstante



# Solarkonstante

$$S_0 = \frac{(6.95 \times 10^5 km)^2}{150 \times 10^6 km^2} 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} (5800 K)^4$$

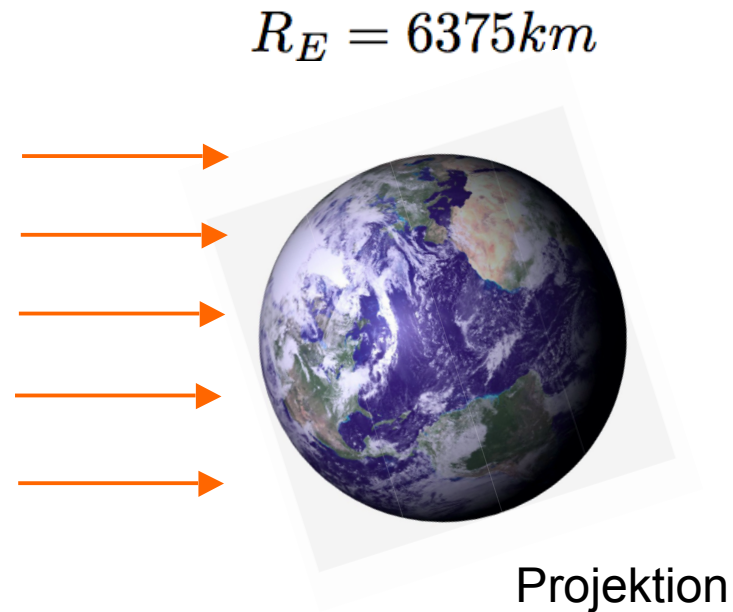
$$S_0 = 1375 W m^{-2}$$

Gesamtleistung:

$$\begin{aligned} P_0 &= S_0 \pi R_E^2 \\ &= 1375 W m^{-2} \times (6.375 \times 10^6 m)^2 \\ &= 1.66 \times 10^{17} W \end{aligned}$$

Energieumsatz der Erdbevölkerung

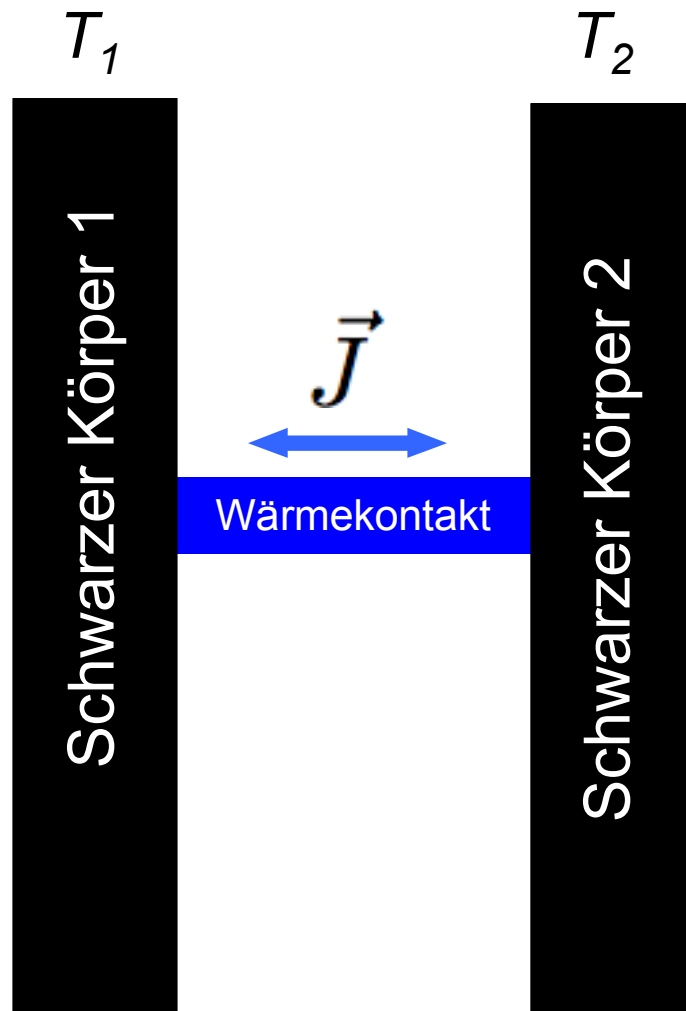
$$P^* \sim 1.5 \times 10^{13} W$$



# Energiebilanz und Gleichgewicht



# Kirchhoff'sches Gesetz - Energiebilanz



## Wärmeaustausch

Gleichgewicht wird über Wärmekontakt erreicht

Energiefluss

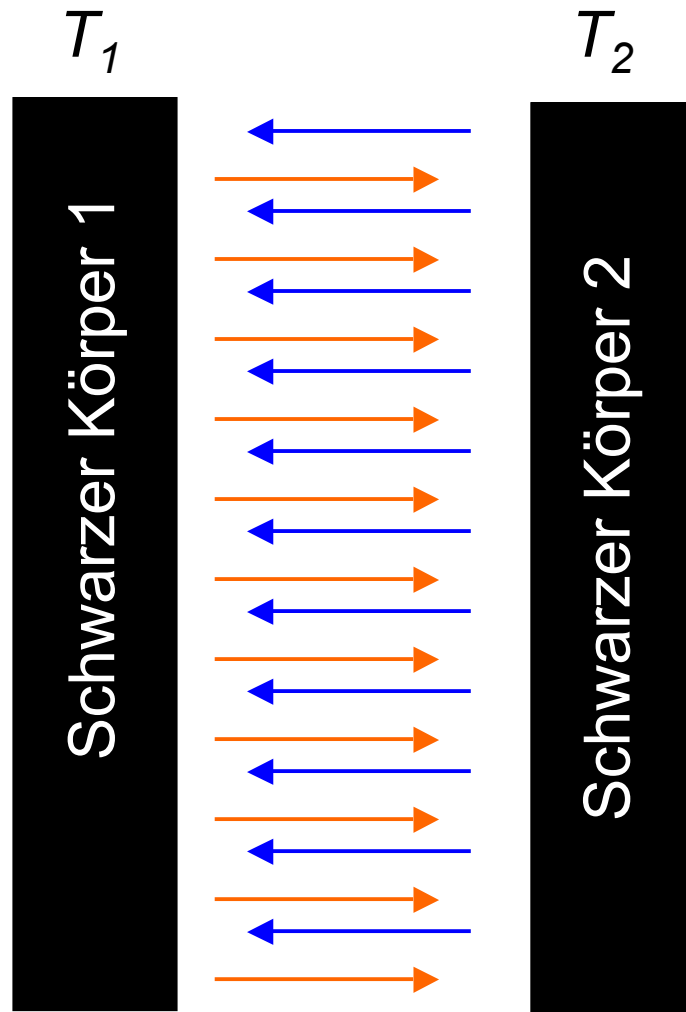
$$\vec{J} = -K \vec{\nabla} T(\vec{r})$$

Fick'sches Gesetz

Gleichgewicht:  $T_1 = T_2$

*Temperatur ist  
Gleichgewichtsvariable*

# Kirchhoff'sches Gesetz - Energiebilanz



## Wärmeaustausch

Gleichgewicht wird über Strahlung erreicht

Oberfläche strahlt Energie des Körpers ab

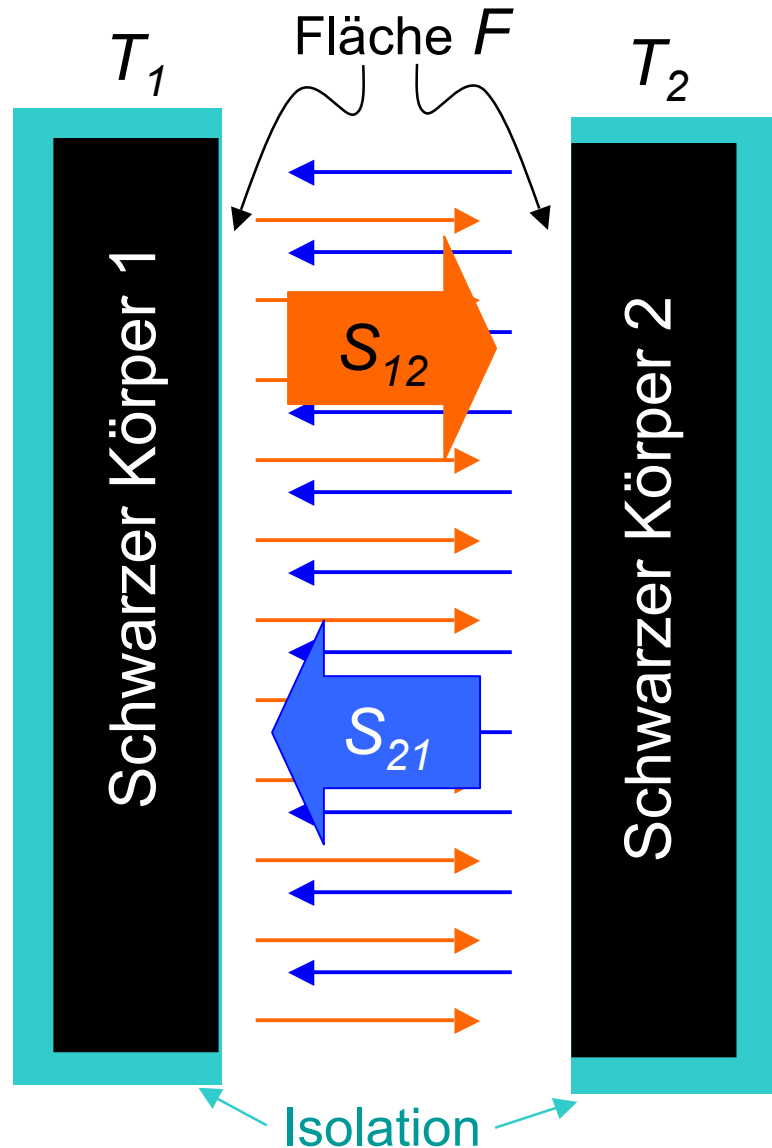
$$\frac{dE}{dt} = FS = F\sigma T^4$$

Energie-  
änderung

strahlende  
Fläche



# Kirchhoff'sches Gesetz - Energiebilanz



Energiefluss (abgeschlossenes System)

$$1 \rightarrow 2 \quad F S_{12} = F \sigma T_1^4$$

$$1 \leftarrow 2 \quad F S_{21} = F \sigma T_2^4$$

Netto Energiefluss:  $1 \rightarrow 2$

$$S_{12}^{(netto)} = S_{12} - S_{21} = F \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

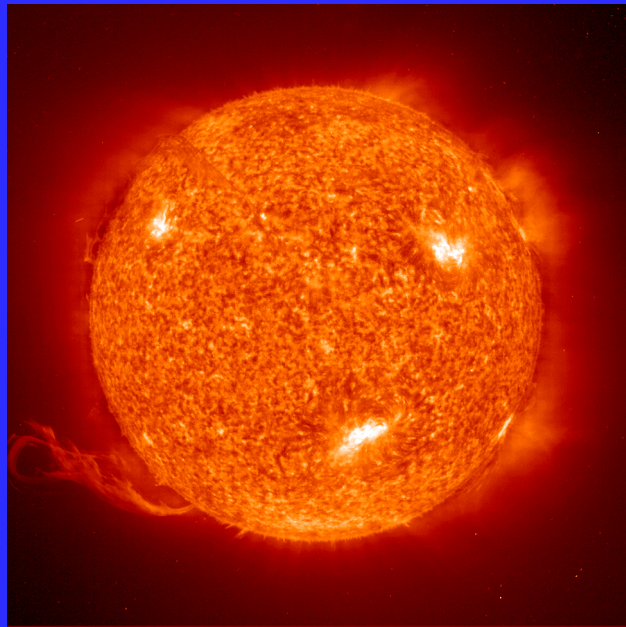
Gleichgewicht:  $S_{12}^{(netto)} = 0$

$$S_{12} = S_{21} \rightarrow T_1 = T_2$$

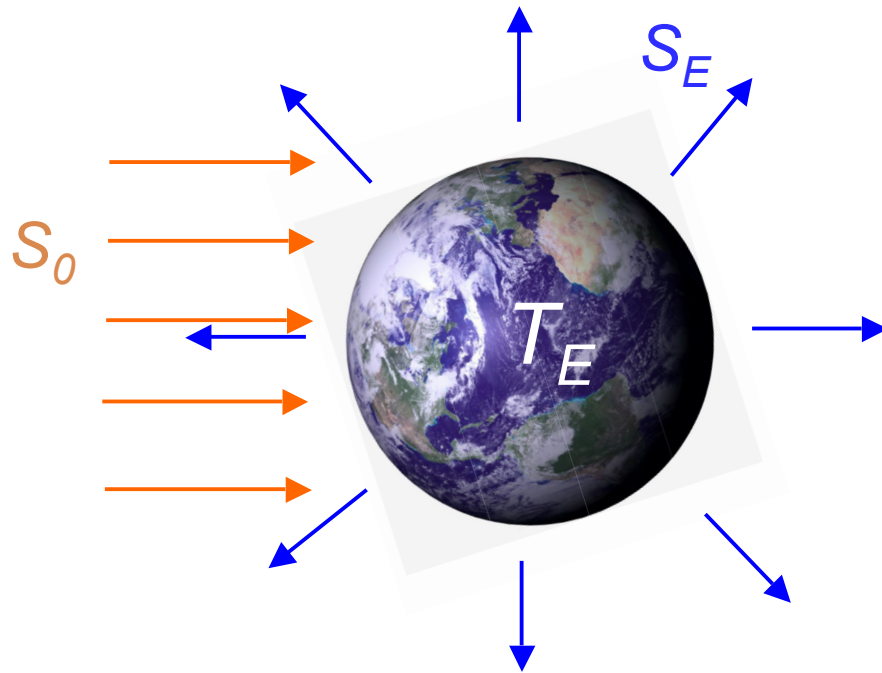
Temperatur als  
Gleichgewichtsvariable

# Solare Energie

## Erde als schwarzer Körper



# System: Sonne - Erde



Erde als offenes System

Energiequelle: **Sonne**

Energiesenke: **All**

## Energie-Bilanz der Erde

Modell: Erde als **schwarzer Körper**

Gleichgewicht

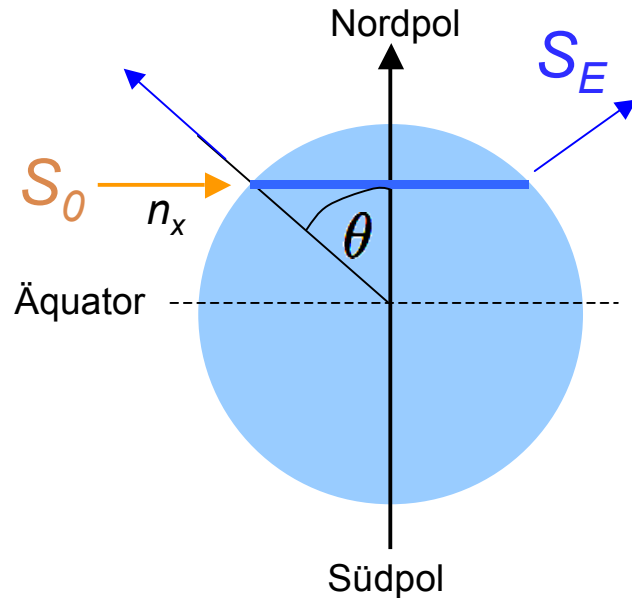
$$F_0 S_0 = F_E S_E$$

$$\underbrace{\pi R_E^2}_{\text{projizierte Fläche}} S_0 = \underbrace{4\pi R_E^2}_{\text{Erdoberfläche}} \sigma T_E^4$$

$$T_E^4 = \frac{S_0}{4\sigma}$$

$$T_E = 279K$$

# System: Sonne - Erde (leicht subtiler)



winkelaufgelöste Betrachtung

Sonne → Erde:

$$\begin{aligned}
 J_{S \rightarrow E}(\theta) d\theta &= \sin \theta d\theta \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\phi R_E^2 S_0 n_x \\
 &= \sin \theta d\theta \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\phi R_E^2 S_0 \cos \phi \sin \theta \\
 &= 2R_E^2 S_0 \sin^2 \theta d\theta
 \end{aligned}$$

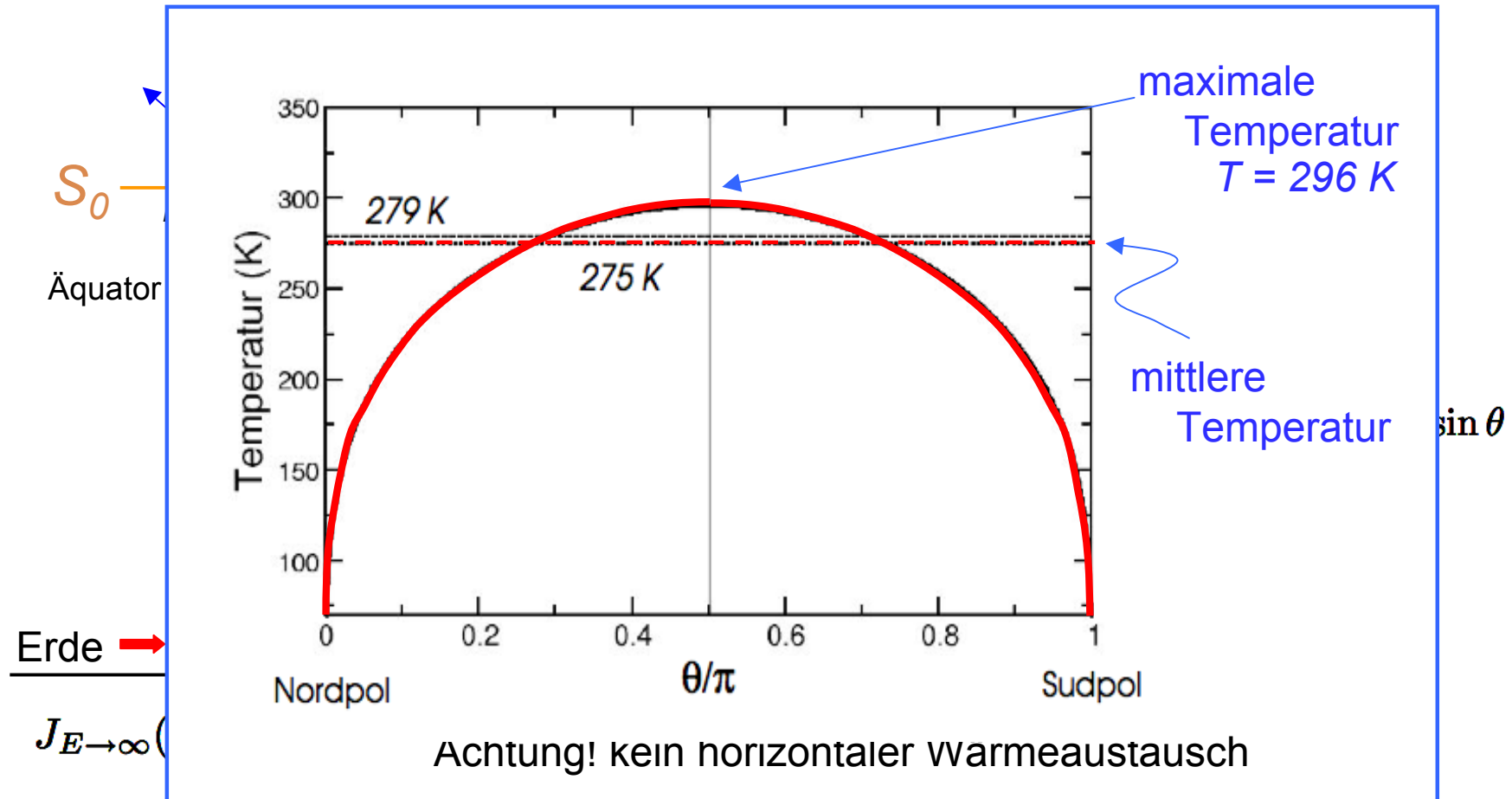
Erde → All:

$$J_{E \rightarrow \infty}(\theta) d\theta = \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi R_E^2 S_E = 2\pi R_E^2 S_E \sin \theta d\theta$$

Energiefluss im Gleichgewicht

$$J_{E \rightarrow \infty}(\theta) = J_{S \rightarrow E}(\theta) \quad \rightarrow \quad T(\theta) = [S_0 \sin \theta / \sigma]^{1/4}$$

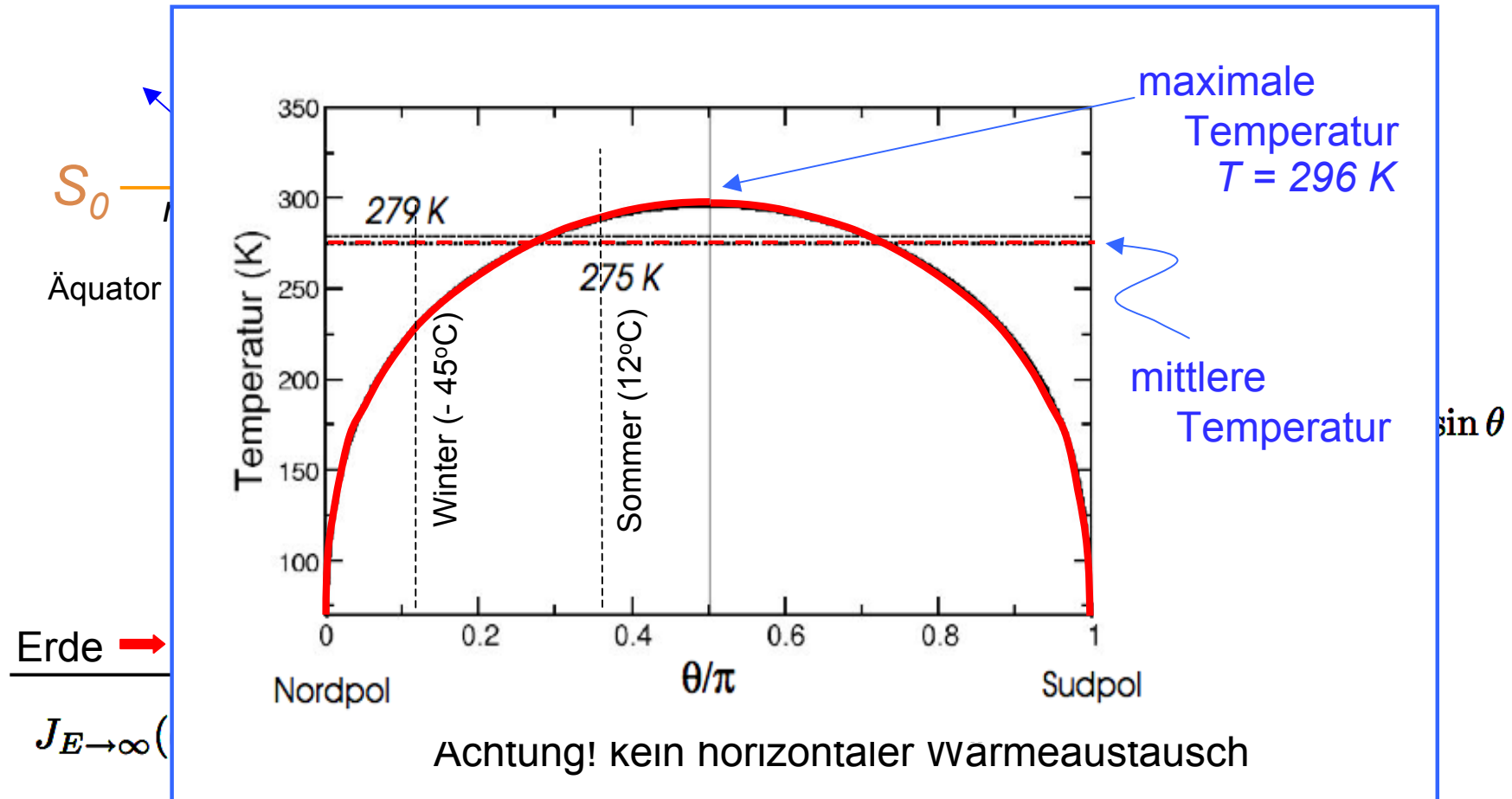
# System: Sonne - Erde (leicht subtiler)



Energiefluss im Gleichgewicht

$$J_{E \rightarrow \infty}(\theta) = J_{S \rightarrow E}(\theta) \quad \rightarrow \quad T(\theta) = [S_0 \sin \theta / \sigma]^{1/4}$$

# System: Sonne - Erde (leicht subtiler)

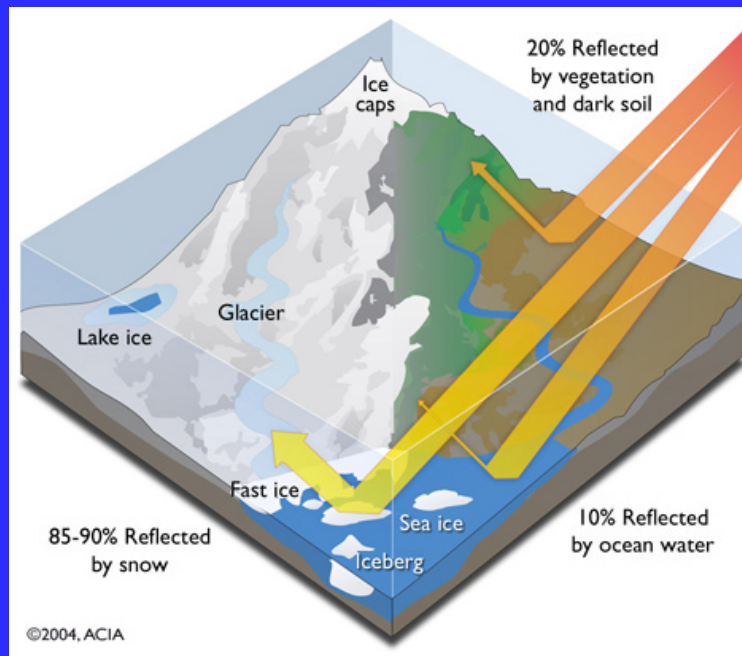


Energiefluss im Gleichgewicht

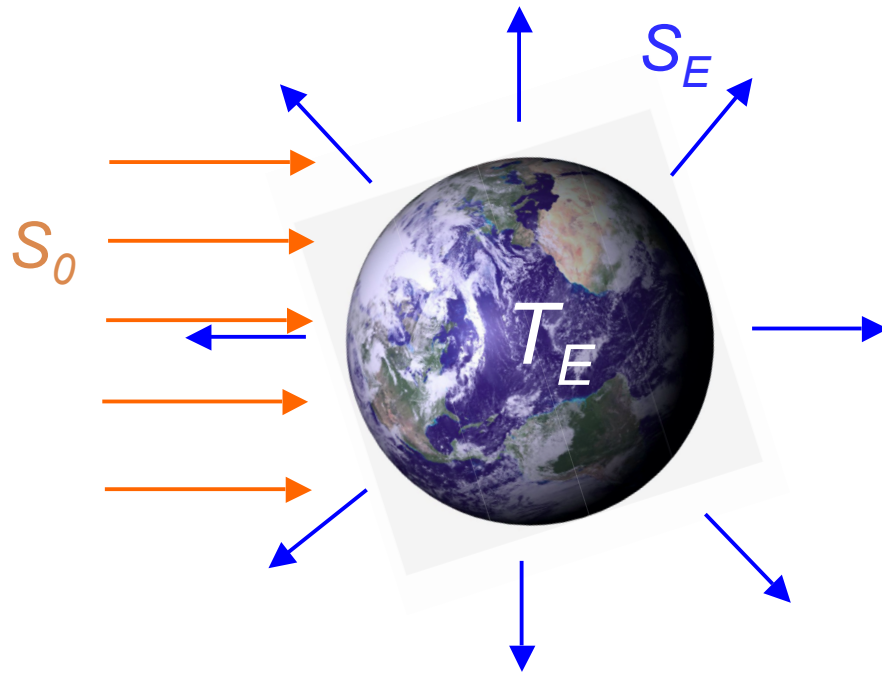
$$J_{E \rightarrow \infty}(\theta) = J_{S \rightarrow E}(\theta) \quad \rightarrow \quad T(\theta) = [S_0 \sin \theta / \sigma]^{1/4}$$

# Albedo

## Erde als grauer Körper



# System: Sonne - Erde



Erde als offenes System

Energiequelle: **Sonne**

Energiesenke: **All**

## Energie-Bilanz der Erde

Modell: Erde als **schwarzer Körper**

Gleichgewicht

$$F_0 S_0 = F_E S_E$$

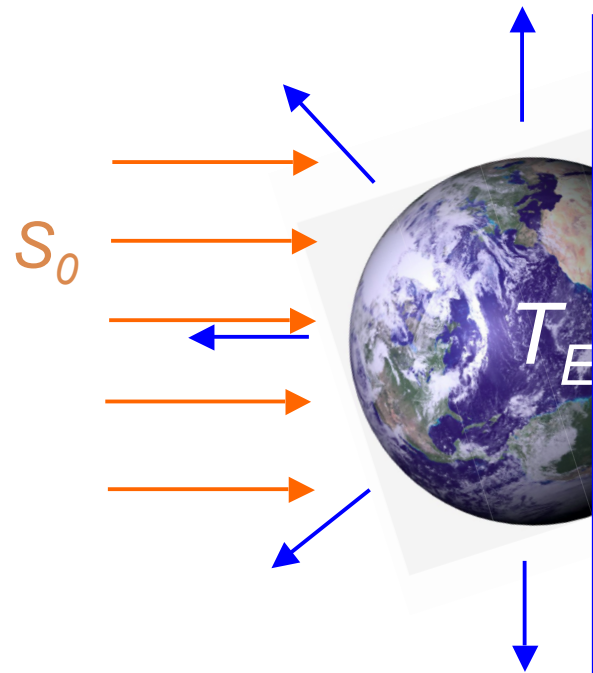
$$\underbrace{\pi R_E^2}_{\text{projizierte Fläche}} S_0 = \underbrace{4\pi R_E^2}_{\text{Erdoberfläche}} \sigma T_E^4$$

$$T_E^4 = \frac{S_0}{4\sigma}$$

$$T_E = 279K$$



# System: Sonne - Erde



Erde als offenes System

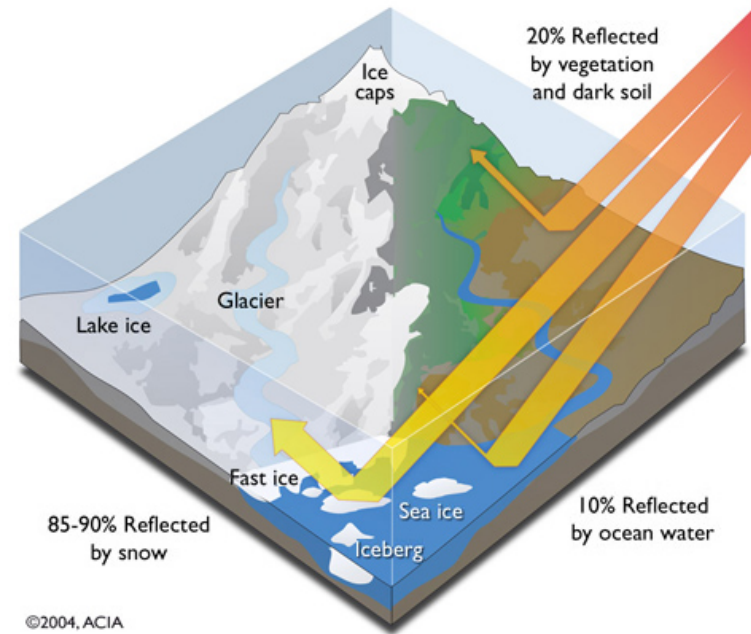
Energiequelle: Sonne

Energiesenke: All

## Albedo

Erde ist kein schwarzer Körper

Energie Bilanz der Erde

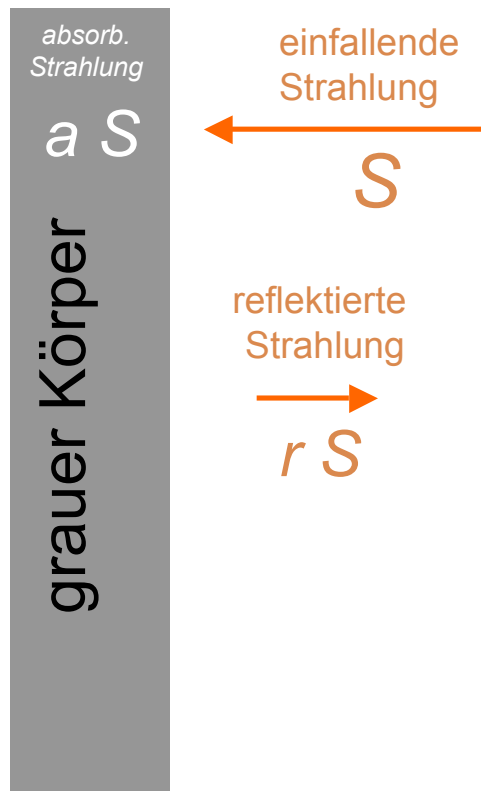


$$T_E^4 = \frac{S_0}{4\sigma}$$

$$T_E = 279K$$

# Energiebilanz

nur ein Teil der Strahlung  
wird absorbiert



$r$  : reflektierter Anteil

$$0 < r < 1$$

$a$  : absorbiertes Anteil

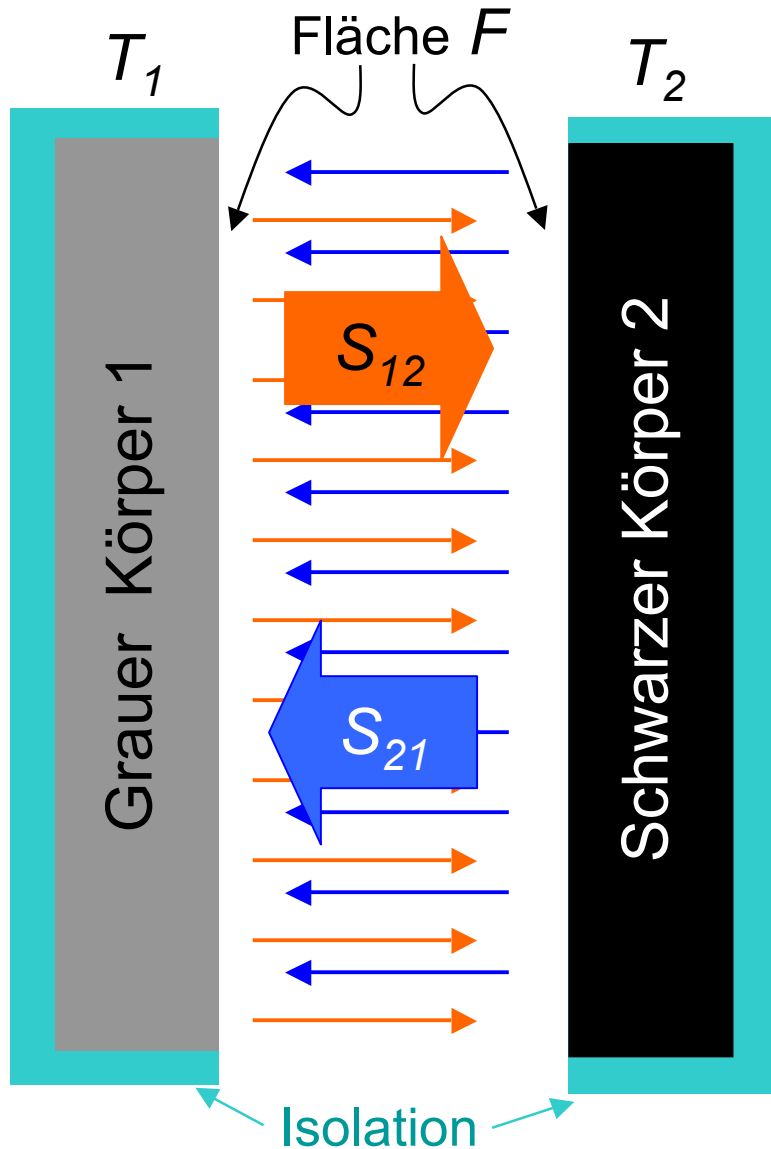
$$0 < a < 1$$

$$r + a = 1$$

Schwarzer Körper:

$$r = 0 \text{ und } a = 1$$

# Energiebilanz



## Energiefluss

$$1 \leftarrow 2 \quad F S_{21} = F \sigma T_2^4$$

$$1 \rightarrow 2 \quad F S_{12} = \overbrace{F r S_{21}}^{\text{reflektierter Teil}} + \overbrace{F y \sigma T_1^4}^{\text{abgestrahlter Teil}}$$

$$= F \sigma (r T_2^4 + y T_1^4)$$

$y$  : unbekannt

Gleichgewichtsbedingung

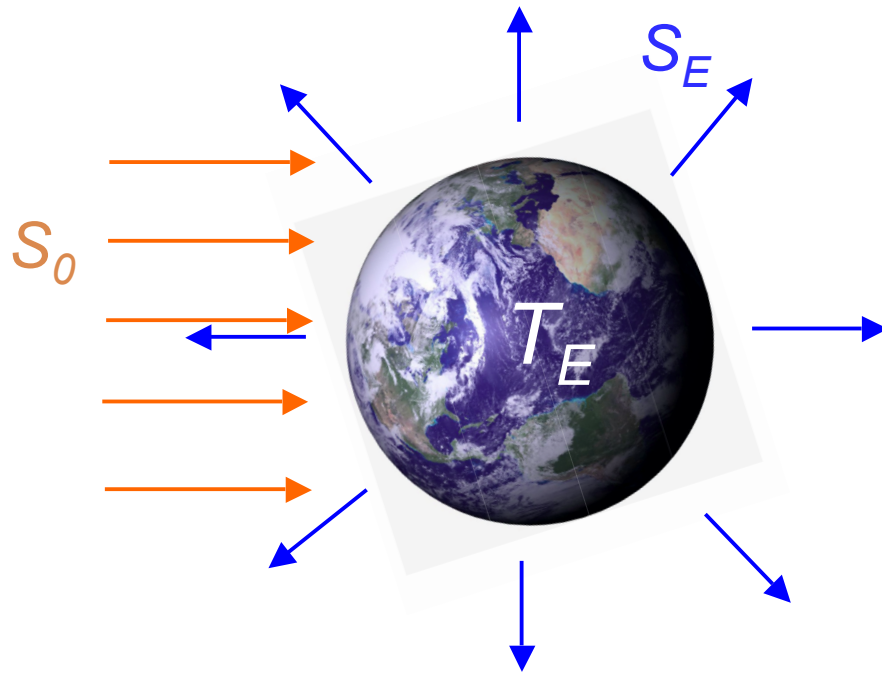
$$S_{12} = S_{21} \quad \longleftrightarrow \quad T_1 = T_2$$

$$\rightarrow \quad y = 1 - r = a$$

Abstrahlung von grauem Körper

$$S = a \sigma T^4$$

# System: Sonne - Erde



## Energie-Bilanz der Erde

Modell: Erde als **grauer Körper** im UV

Gleichgewicht

$$F_0 S_0 a = F_E S_E$$

$$\underbrace{\pi R_E^2}_{\text{projizierte Fläche}} S_0 a = \underbrace{4\pi R_E^2}_{\text{Erdoberfläche}} \sigma T_E^2$$

projizierte  
Fläche

Erdober-  
fläche

strahlt im IR als  
schwarzer Körper

Erde reflektiert Teil der  
Sonneneinstrahlung:

„Albedo“  $r \approx 0.3$

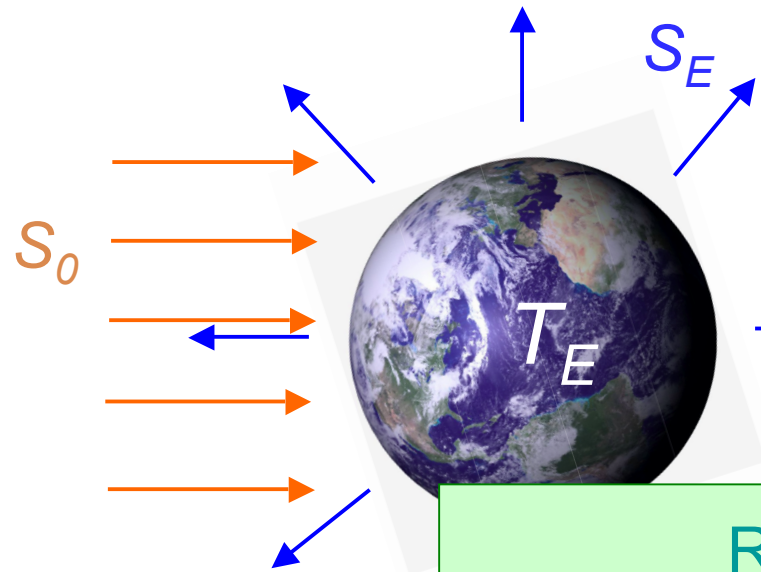
$a \approx 0.7$

$$T_E^4 = \frac{aS_0}{4\sigma}$$

$$T_E = 255K$$

$$T_E = -18^\circ C$$

# System: Sonne - Erde



## Energie-Bilanz der Erde

Modell: Erde als **grauer Körper** im UV

Gleichgewicht

$$F_0 S_0 a = F_E S_E$$

$$\pi R_E^2 a = 4\pi R_E^2 \sigma T_E^2$$

dober-  
fläche strahlt im IR als  
schwarzer Körper

Erde reflektiert  
Sonneneinstrahlung

„Albedo“

### Reflektivität

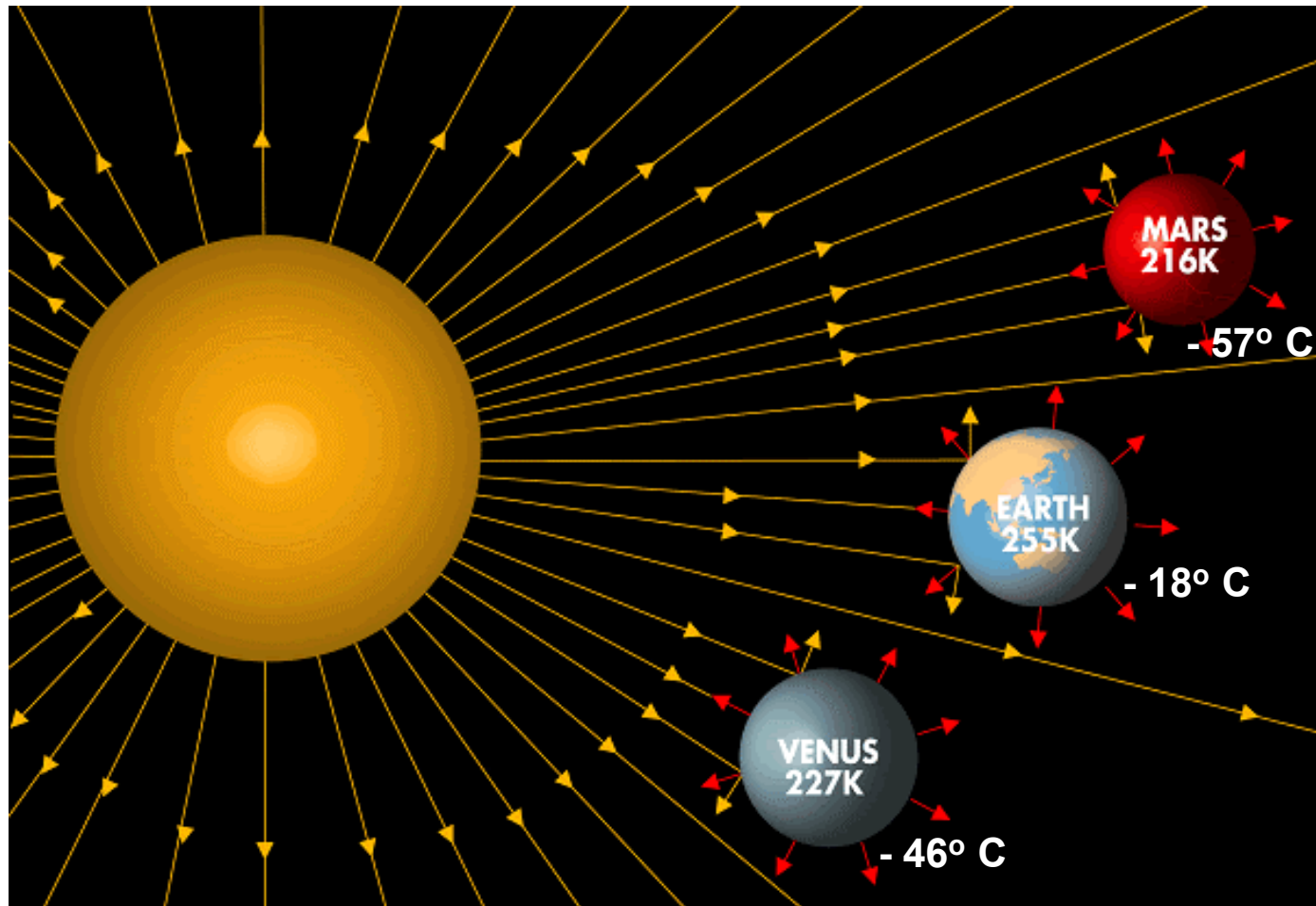
	$r_{UV}$	$r_{IR}$
Schnee	0.8-0.9	0.005
Wasser	0.02	0.04
Sand	0.3	0.1
Gras	0.25	0.02
Wald	0.05-0.2	-

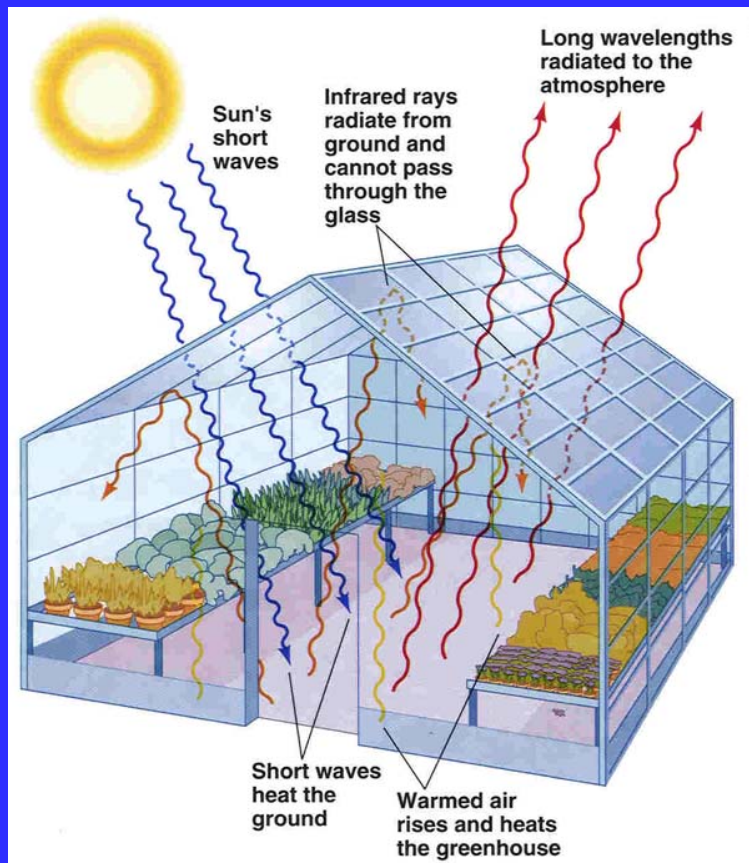
$$= 255K$$

$$= -18^\circ C$$

# Vergleich verschiedener Planeten

errechnete Temperatur inklusive Albedo ohne Treibhaus





# Treibhauseffekt

Rettung  
vor Unterkühlung

# Treibhaus-Effekt

Atmosphäre → Treibhaus-Effekt



Atmosphäre:

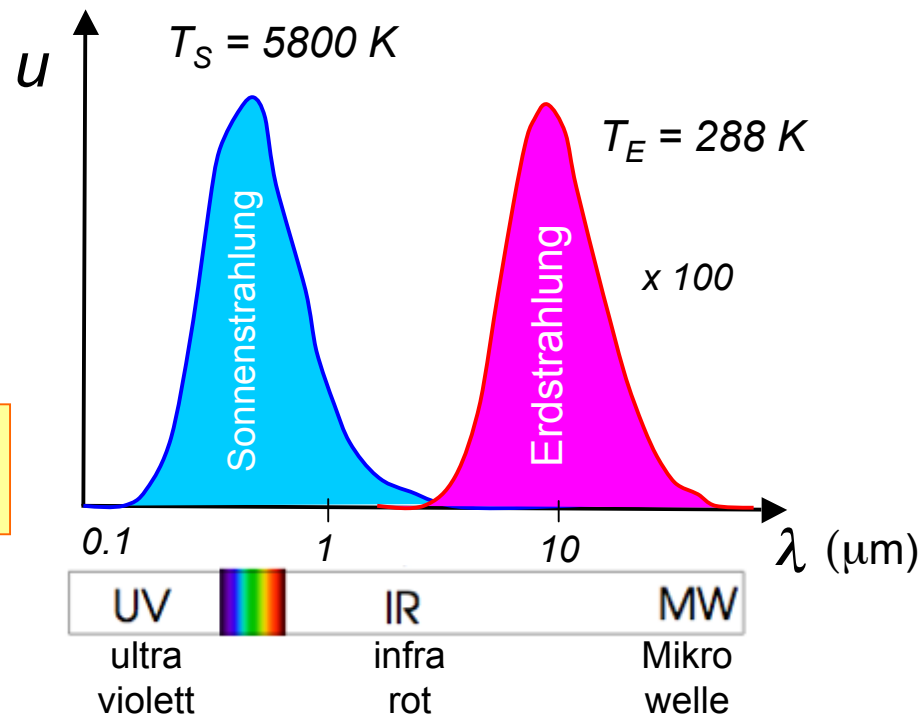
*transparent für Sonnenstrahlung*

*absorbierend für Erdstrahlung*

Wellenlänge maximaler  
Intensität:

$$\lambda_{max}(\mu m) \times T(K) = 2897$$

Wien'sches  
Verschiebungsgesetz





# Treibhaus-Effekt

Atmosphäre → Treibhaus-Effekt



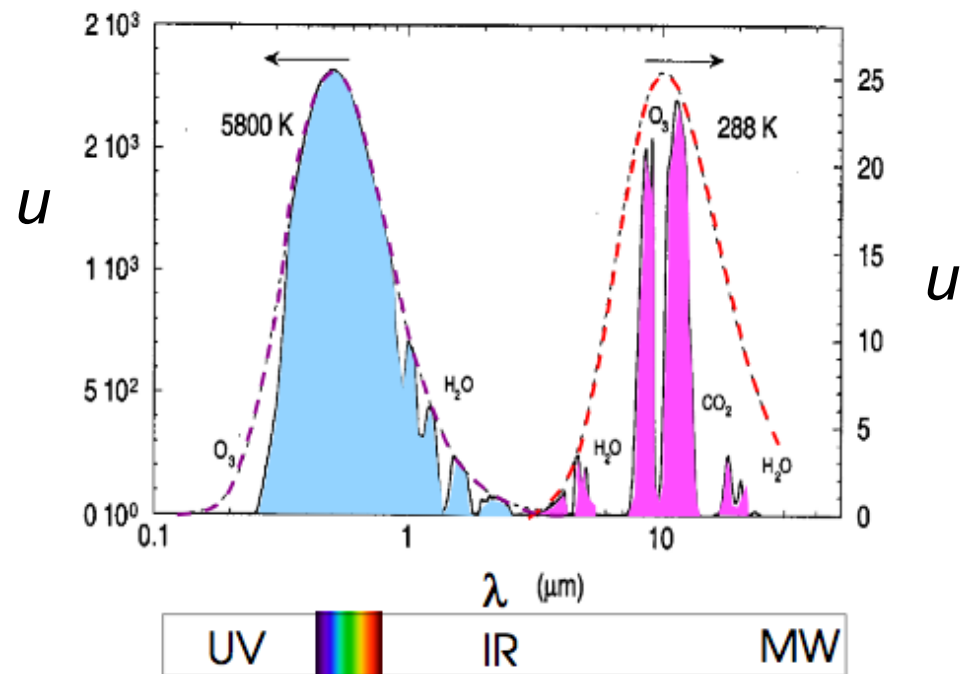
Atmosphäre:

transparent für Sonnenstrahlung  
absorbierend für Erdstrahlung wegen  
„Treibhausgasen“  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , ...

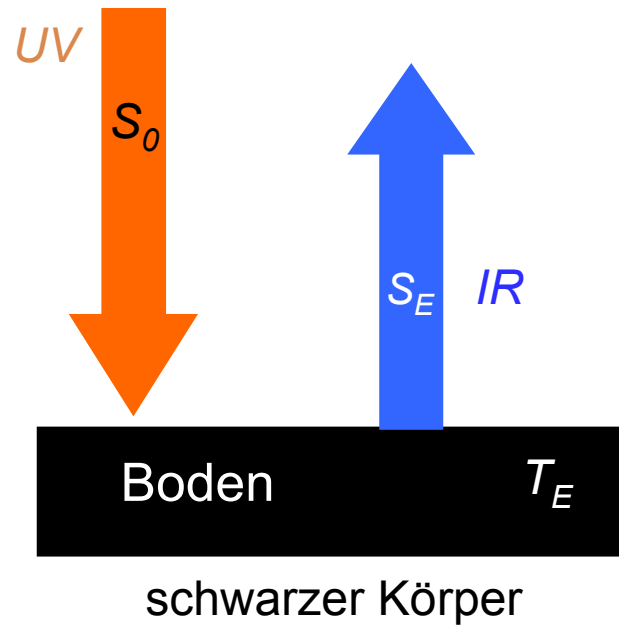
Wellenlänge maximaler  
Intensität:

$$\lambda_{max}(\mu m) \times T(K) = 2897$$

Wien'sches  
Verschiebungsgesetz



# Treibhaus-Effekt



Strahlung: von Sonne UV  
von Boden IR

Energie-Bilanz:

$$S_0 = S_E = \sigma T_E^4$$

# Treibhaus-Effekt

Strahlung: von Sonne UV  
von Boden IR

Glas   $T_G$

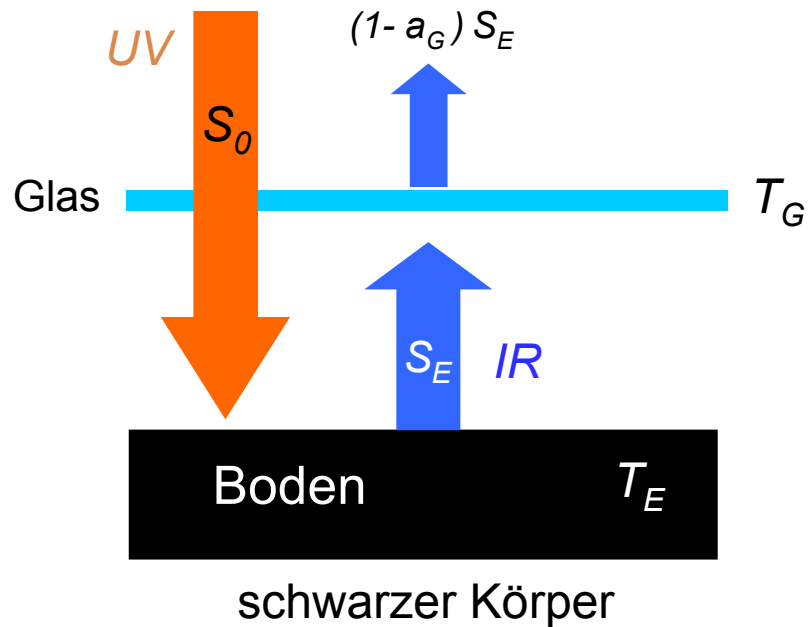
Boden  $T_E$

schwarzer Körper

ohne Glas

$$S_0 = S_E = \sigma T_E^4$$

# Treibhaus-Effekt



Strahlung: von Sonne UV  
von Boden/Glas IR

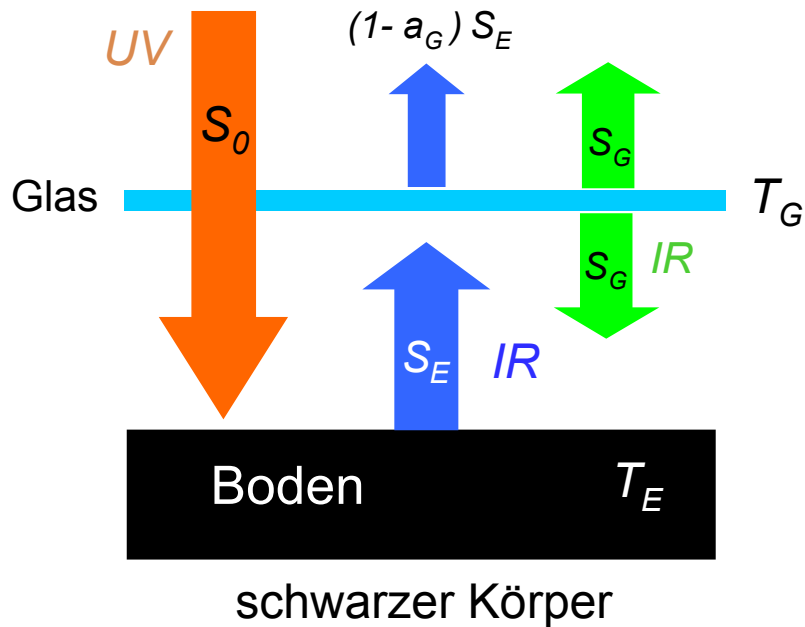
Glas: transparent für UV  
teilweise absorbierend im IR

$a_G S_E$  absorbiert  
 $(1 - a_G) S_E$  geht durch

ohne Glas

$$S_0 = S_E = \sigma T_E^4$$

# Treibhaus-Effekt



ohne Glas

$$S_0 = S_E = \sigma T_E^4$$

**Strahlung:** von Sonne  $UV$   
von Boden/Glas  $IR$

**Glas:** transparent für  $UV$   
teilweise absorbierend im  $IR$

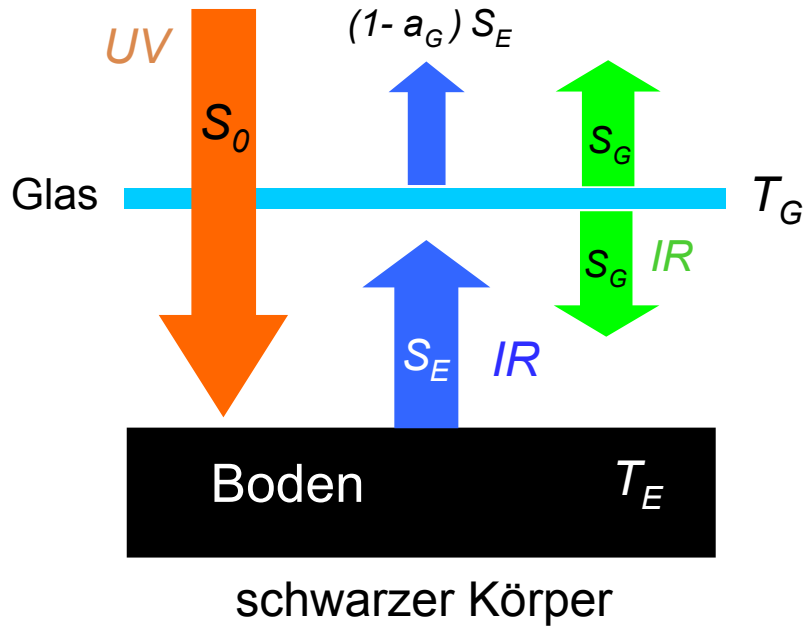
$a_G S_E$  absorbiert

$(1 - a_G) S_E$  geht durch

Emission von Glas:

$$S_G = \sigma T_G^4$$

# Treibhaus-Effekt



Energiebilanz:

Boden  $S_0 + S_G = S_E$   
 $S_0 + \sigma T_G^4 = \sigma T_E^4$

Glas  $a_G S_E = 2S_G$   
 $a_G \sigma T_E^4 = 2\sigma T_G^4$

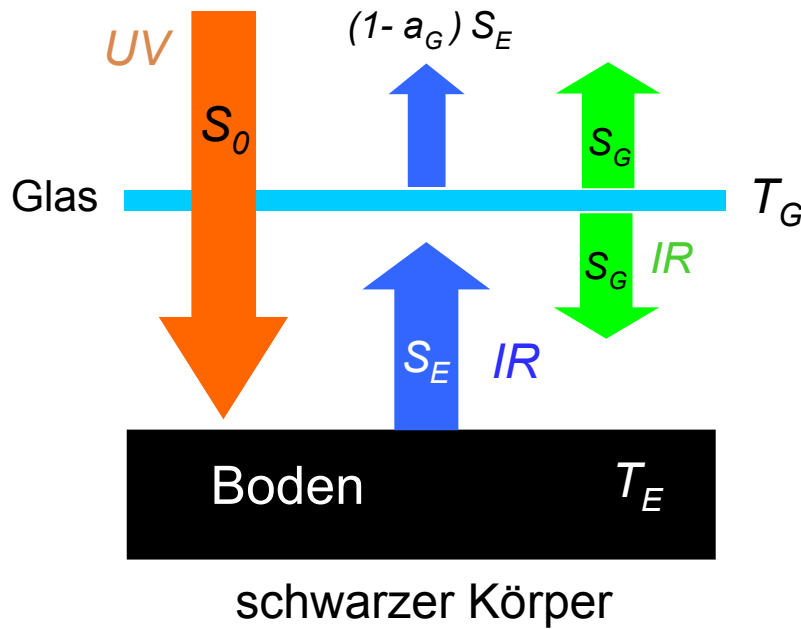
→

$$\begin{cases} T_E^4 = \frac{2S_0}{\sigma(2 - a_G)} \\ T_G^4 = \frac{a_G S_0}{\sigma(2 - a_G)} \end{cases}$$

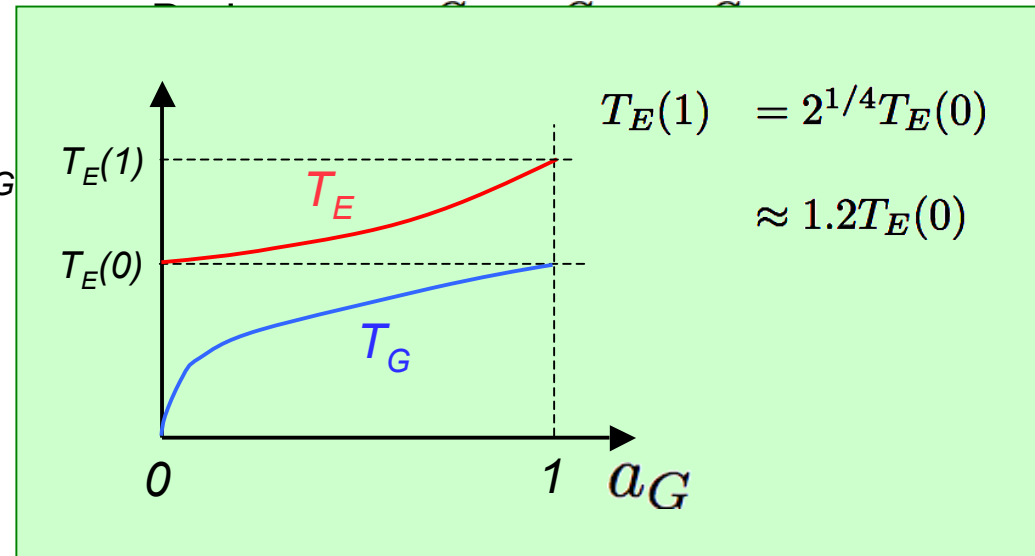
$T_E(a_G) = \frac{T_E(0)}{(1 - a_G/2)^{1/4}} \geq T_E(0)$ 
Anstieg der Temperatur

mit Glas  ohne Glas

# Treibhaus-Effekt



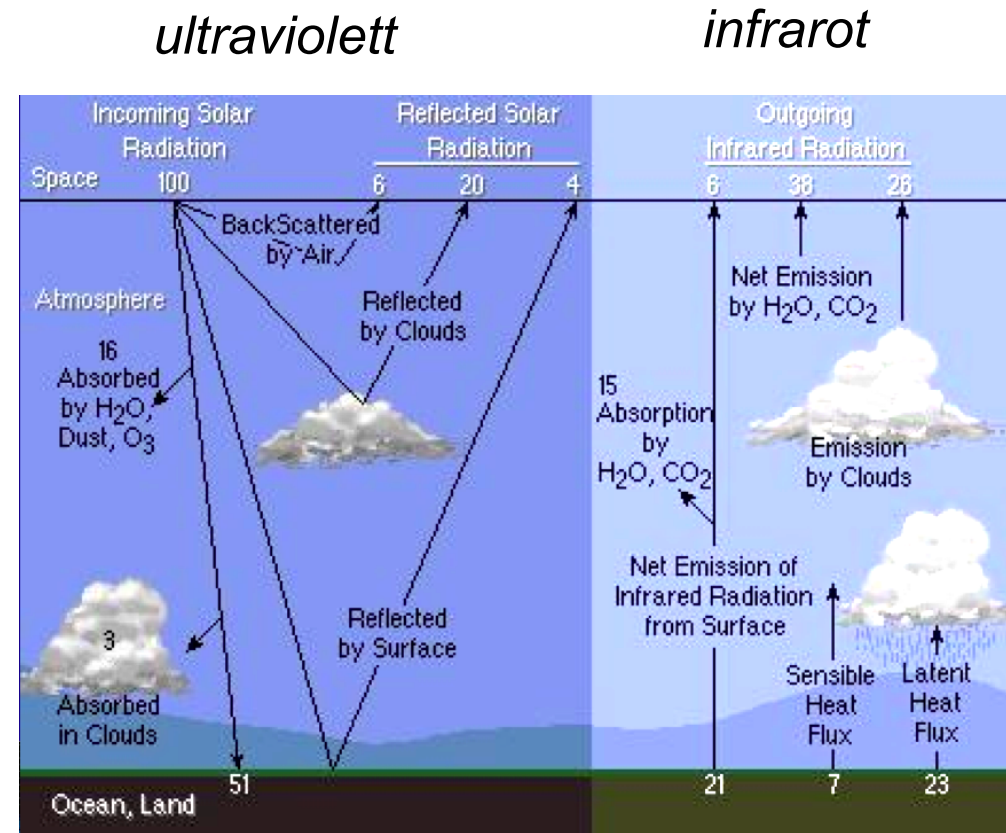
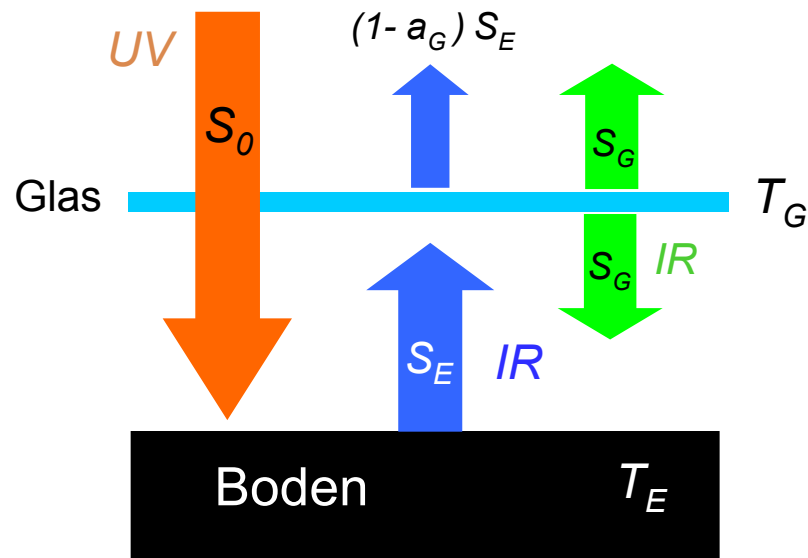
Energiebilanz:



$$T_G^4 = \frac{a_G S_0}{\sigma(2 - a_G)}$$

$$T_E(a_G) = \frac{T_E(0)}{(1 - a_G/2)^{1/4}} \geq T_E(0) \quad \text{Anstieg der Temperatur}$$

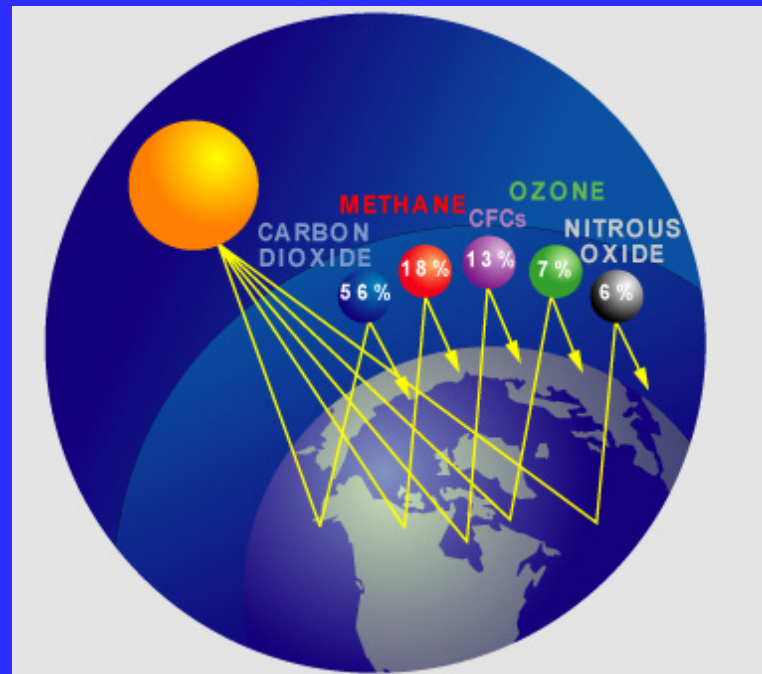
# Treibhaus-Effekt - Atmosphäre



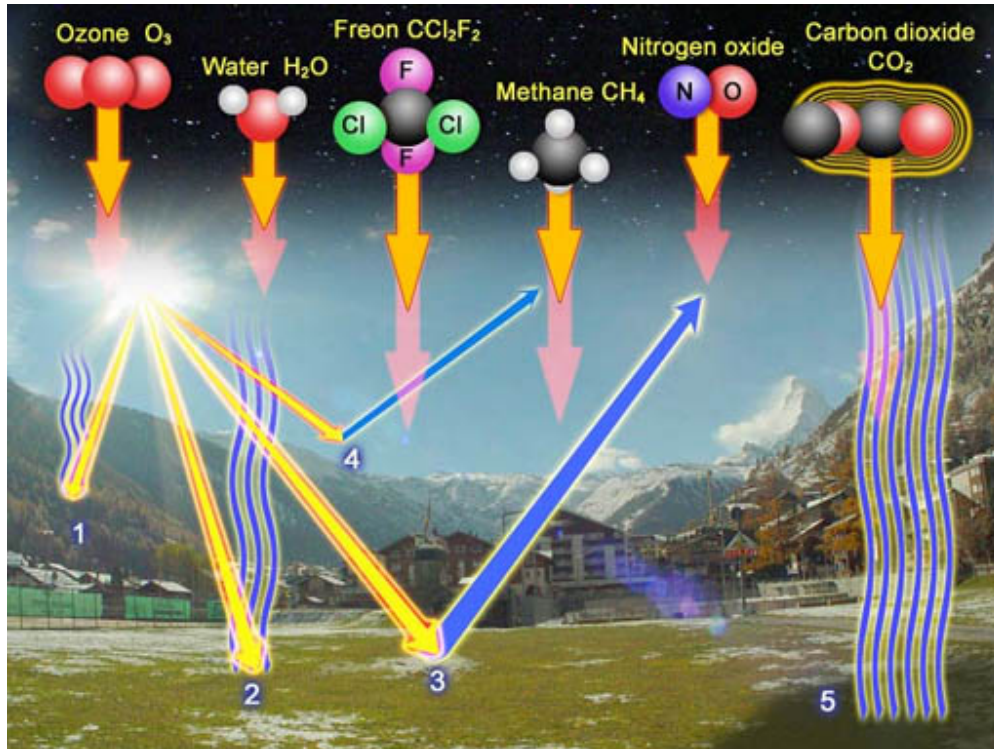
viele Komponenten spielen eine Rolle



# Treibhausgase



# Treibhausgas



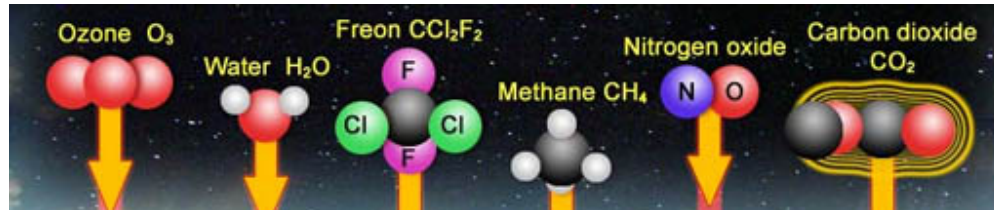
## Wasserdampf



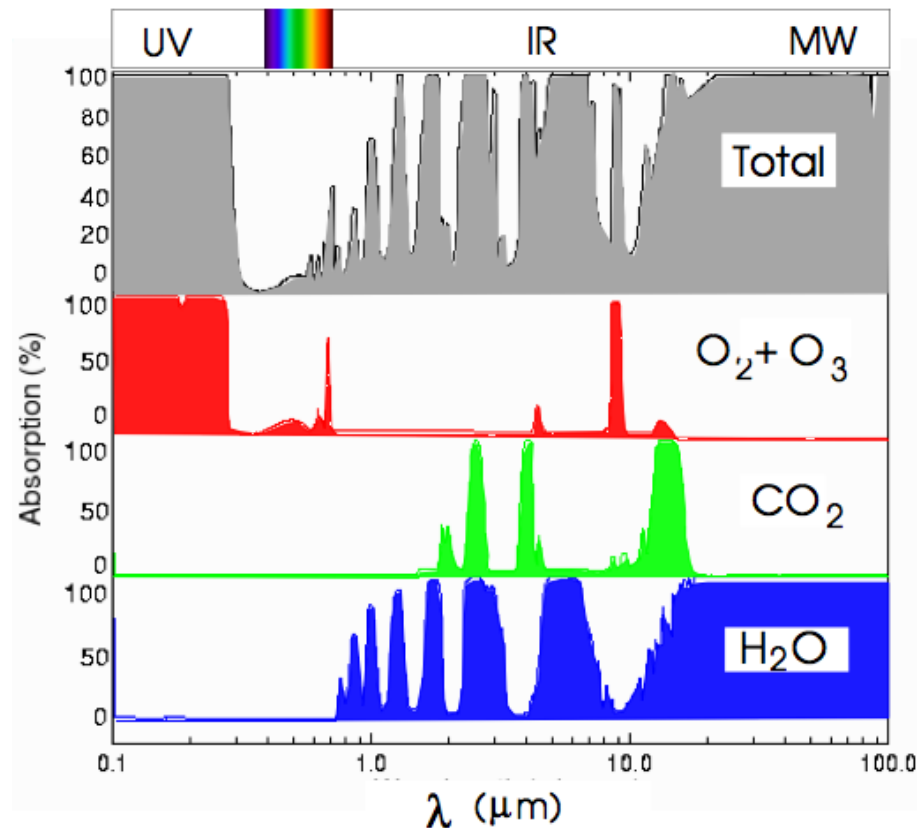
reflektierend / absorbierend

Ozon	O <sub>3</sub>
Stickstoff-Oxid	N <sub>2</sub> O
Methan	CH <sub>4</sub>
Freon (CFC)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>

# Treibhausgas



## Absorptionsspektrum



## Wasserdampf

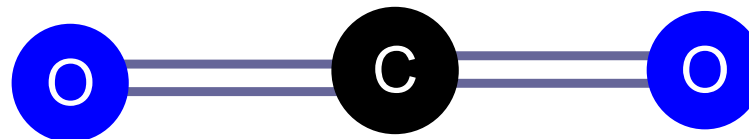


reflektierend / absorbierend

Ozon	$O_3$
Stickstoff-Oxid	$N_2O$
Methan	$CH_4$
Freon (CFC)	$CCl_2F_2$
Kohlendioxid	$CO_2$

# Treibhausgas

Beispiel:  $\text{CO}_2$

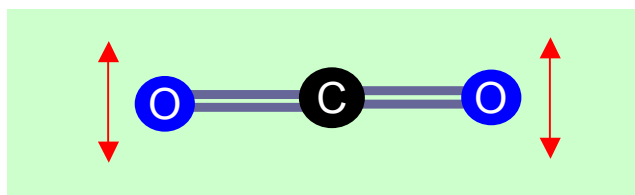


Wichtige Anregungen:

Rotationen (sehr kleine Energie)

Vibrationen

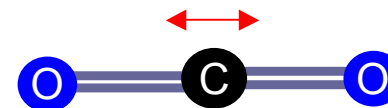
Knickschwingung



sym. Streckschwingung



antisym. Streckschwingung



Energie:

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 667 \text{ cm}^{-1} = k_B T = 464 \text{ K}$$

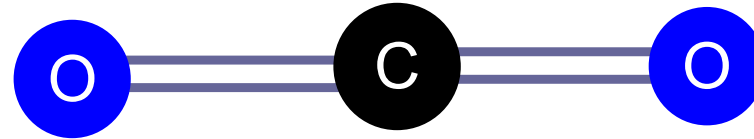


$$\lambda \approx 15 \mu\text{m}$$

infrarot

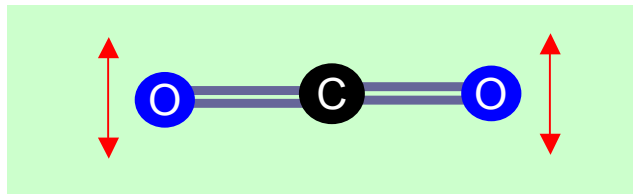
# Treibhausgas

Beispiel:  $\text{CO}_2$



Wichtige Anregung  
Rotationen  
Vibrationen

Knickschwingung



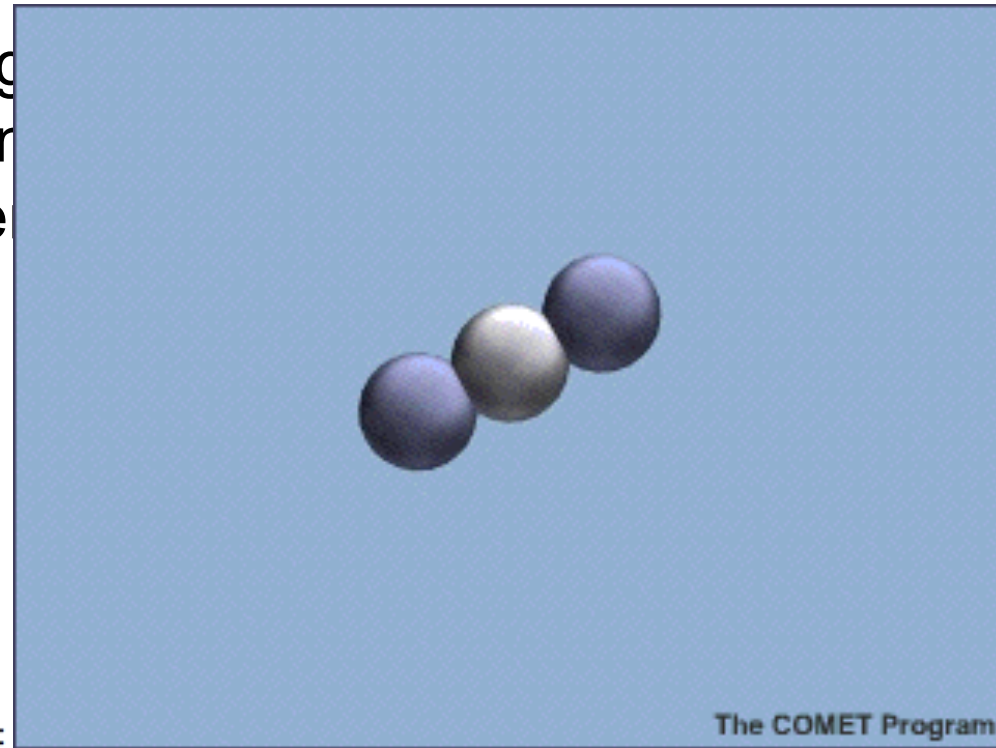
↓  
Energie:

$$h\nu =$$



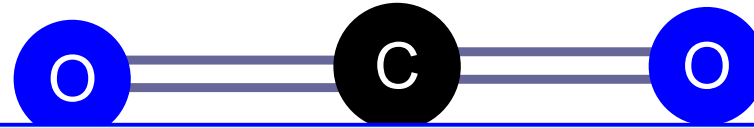
$$\lambda \approx 15 \mu\text{m}$$

infrarot

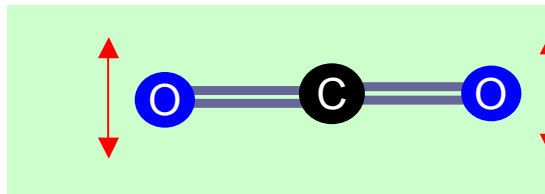


# Treibhausgas

Beispiel:  $\text{CO}_2$



Wichtige Anregung  
Rotations-  
Vibration

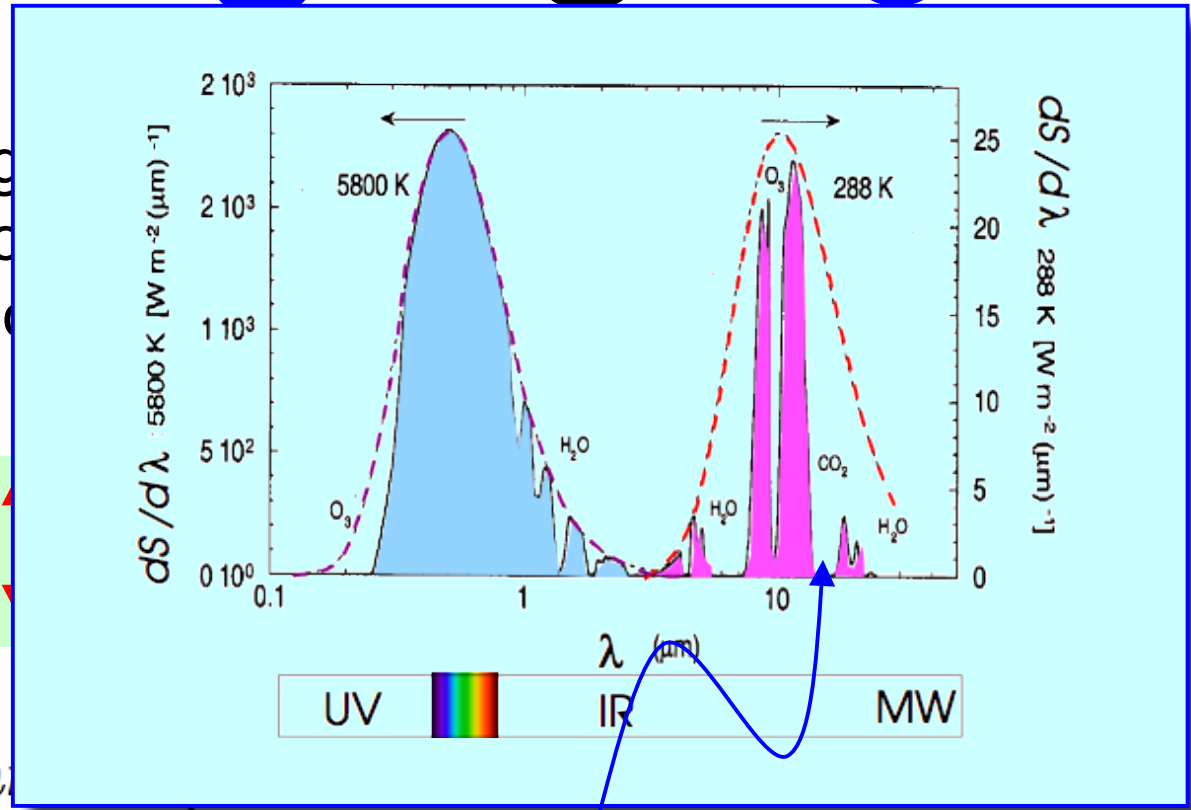


Energie:  $h\nu$

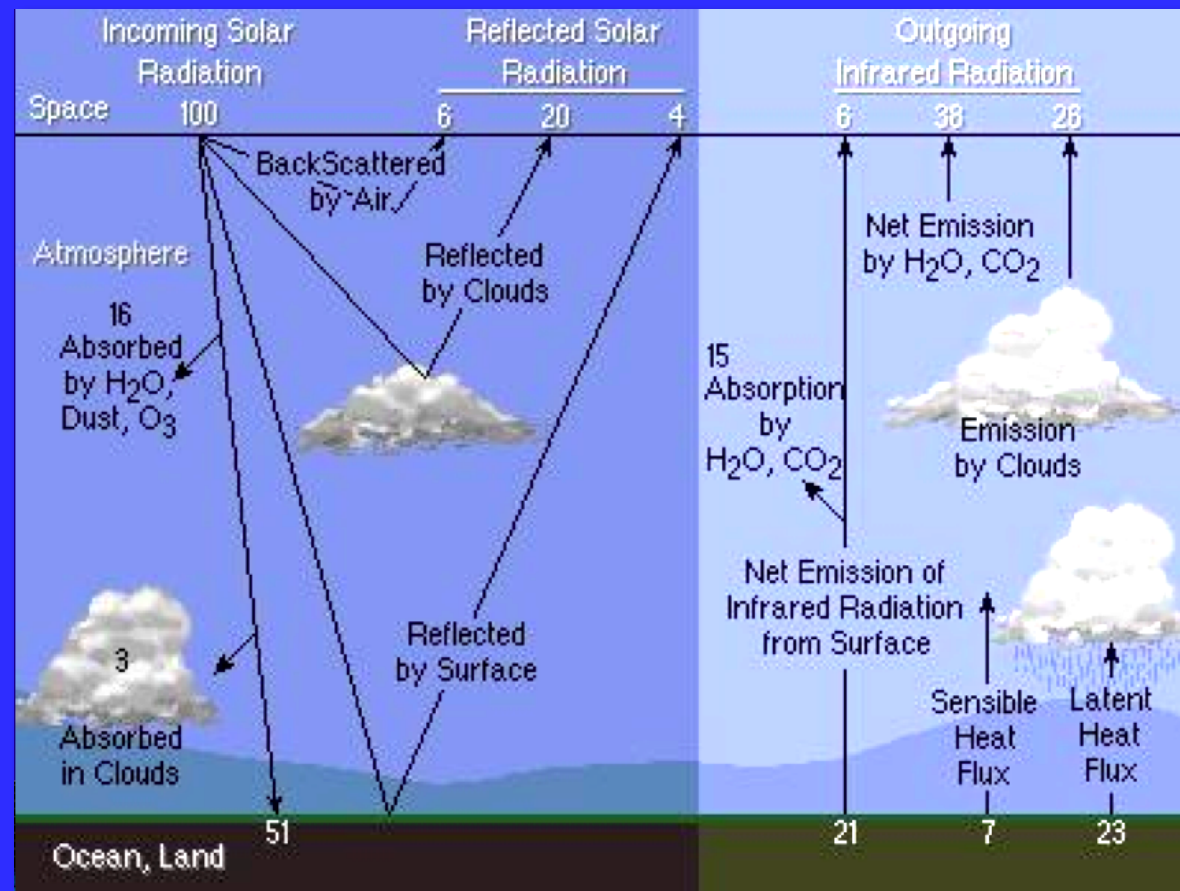
$h\nu$



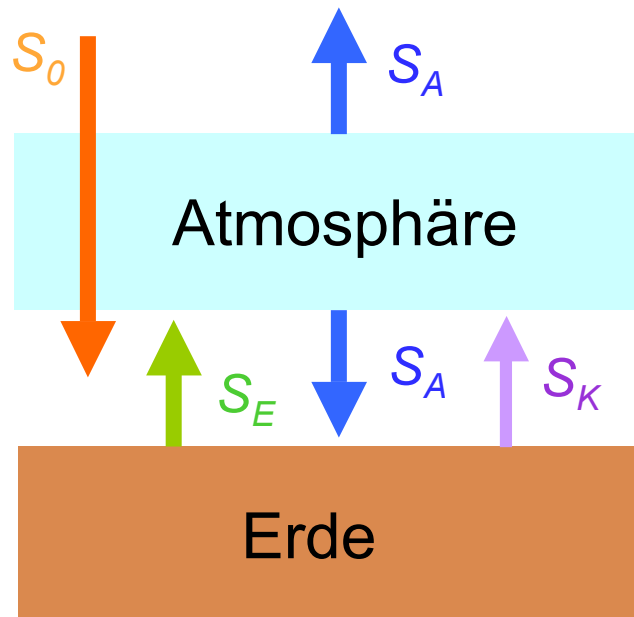
$\lambda \approx 15 \mu\text{m}$



# Einfaches Modell



# Zweischichten-Klima-Modell

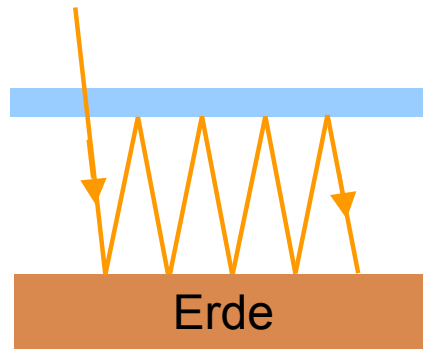


UV-Strahlung		IR-Strahlung	
Reflektivität	$r_A$	Absorptivität	$g_A$
Absorptivität	$a_A$	Absorptivität	$g_A$
Reflektivität	$r_E$	Absorptivität	$g_E$

Solarkonstante	$S_0/4$	UV
Erdabstrahlung	$S_E = g_E \sigma T_E^4$	IR
Atmosphärenabstrahlung	$S_A = g_A \sigma T_A^4$	
konvektiver Energiefluss	$S_K$	



# Gleichgewicht Erdoberfläche



Mehrfachreflexion

Absorption:

- $(1 - r_E)(1 - r_A)(1 - a_A) \frac{S_0}{4} [1 + r_E r_A + (r_E r_A)^2 + \dots]$   
 $= \frac{(1 - r_E)(1 - r_A)(1 - a_A) S_0}{1 - r_E r_A} \frac{1}{4} = S_0^* \quad \text{UV}$

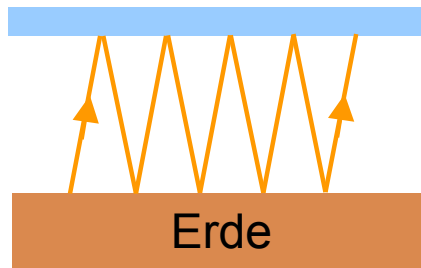
- $S_A \quad \text{IR}$

Emission:  $S_E + S_K \quad \text{IR}$



$$S_E + S_K = S_A + \Lambda_E \frac{S_0}{4} \quad \text{mit } \Lambda_E = \frac{(1 - r_E)(1 - r_A)(1 - a_A)}{1 - r_E r_A}$$

# Gleichgewicht Atmosphäre



Mehrfachreflexion

Absorption:

- $\frac{S_0}{4} a_A (1 - r_A)^2 (1 - a_A) r_E [1 + r_E r_A + (r_E r_A)^2 + \dots]$
- =  $\frac{a_A (1 - r_A)^2 (1 - a_A) r_E}{1 - r_E r_A} \frac{S_0}{4}$  UV

- $a_A (1 - r_A) \frac{S_0}{4}$

- $g_A S_E + S_K$  IR

Emission:  $2S_A$  IR



$$2S_A = g_A S_E + S_K + \Lambda_A \frac{S_0}{4} \quad \text{mit} \quad \Lambda_A = \frac{a_A (1 - r_A)^2 (1 - a_A) r_E}{1 - r_E r_A} + a_A (1 - r_A)$$

## Gleichgewicht Gesamtsystem

$$\begin{pmatrix} 2 & -g_A \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_A \\ S_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_A \frac{S_0}{4} + S_K \\ \Lambda_E \frac{S_0}{4} - S_K \end{pmatrix} = \frac{S_0}{4} \begin{pmatrix} \Lambda_A + h \\ \Lambda_E - h \end{pmatrix}$$

$$h = 4S_K/S_0$$

$$T_0^4 = S_0/4\sigma = 279K$$

$$\begin{pmatrix} T_A^4 \\ T_E^4 \end{pmatrix} = \frac{T_0^4}{2 - g_a} \begin{pmatrix} \Lambda_A + h + g_A(\Lambda_E - h) \\ \Lambda_A + h + 2(\Lambda_E - h) \end{pmatrix}$$

## Gleichgewicht Gesamtsystem

$$\begin{pmatrix} T_A^4 \\ T_E^4 \end{pmatrix} = \frac{T_0^4}{2 - g_a} \begin{pmatrix} \Lambda_A + h + g_A(\Lambda_E - h) \\ \Lambda_A + h + 2(\Lambda_E - h) \end{pmatrix}$$

Spezialfälle: Absorption der Atmosphäre

- $g_A = a_A \rightarrow 0$   
IR    UV

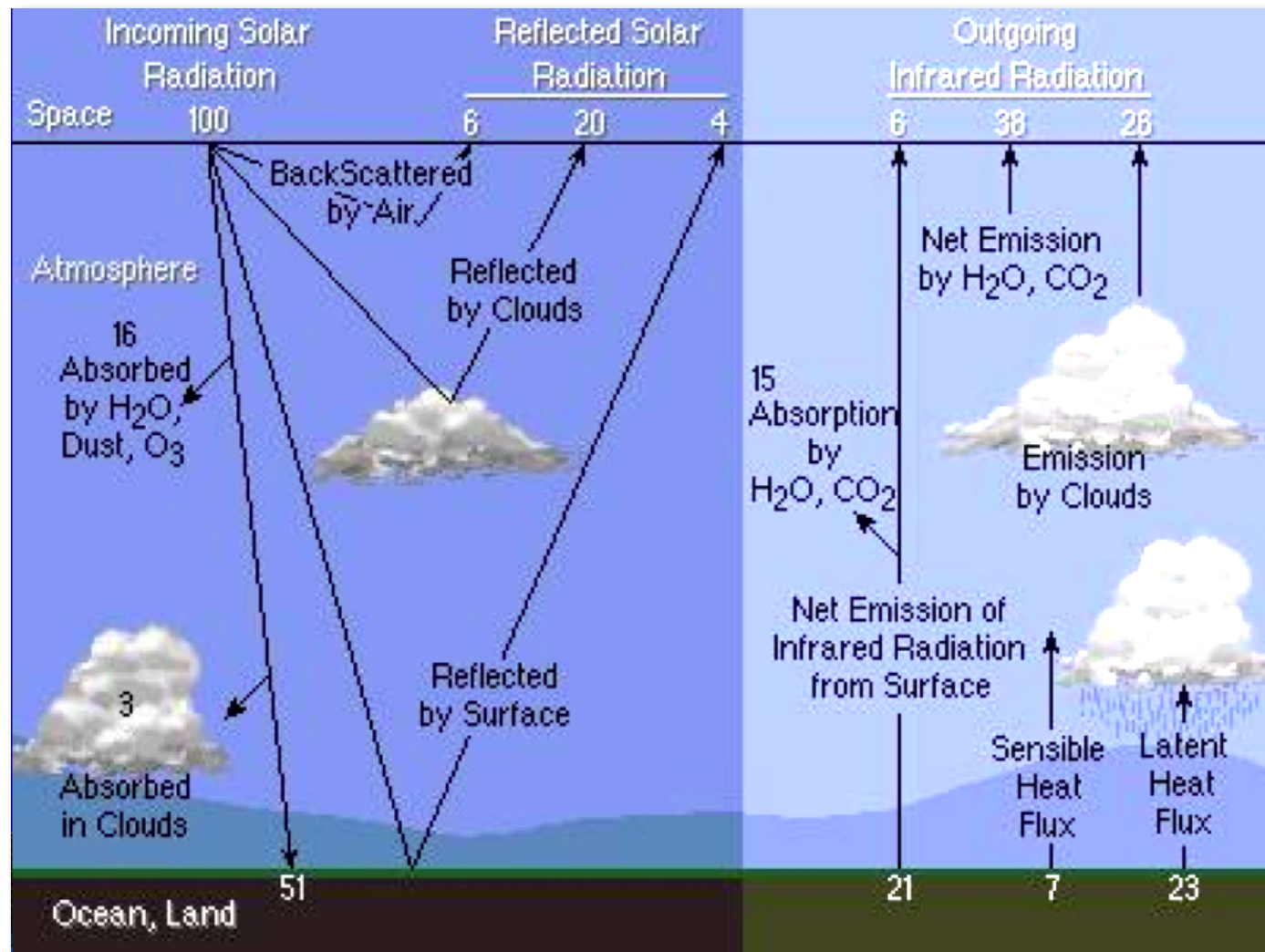
$$T_E^4(0) = T_0^4 \left\{ \underbrace{\frac{(1 - r_E)(1 - r_A)}{1 - r_E r_A}}_{< 1} - h \right\} < T_0^4$$

- $a_A \rightarrow 0$   
UV

$$T_E^4(g_A) = \frac{2T_0^4}{2 - g_A} \left\{ \frac{T_E^4(0)}{T_0^4} + \frac{h}{2} \right\} > T_E^4(0)$$

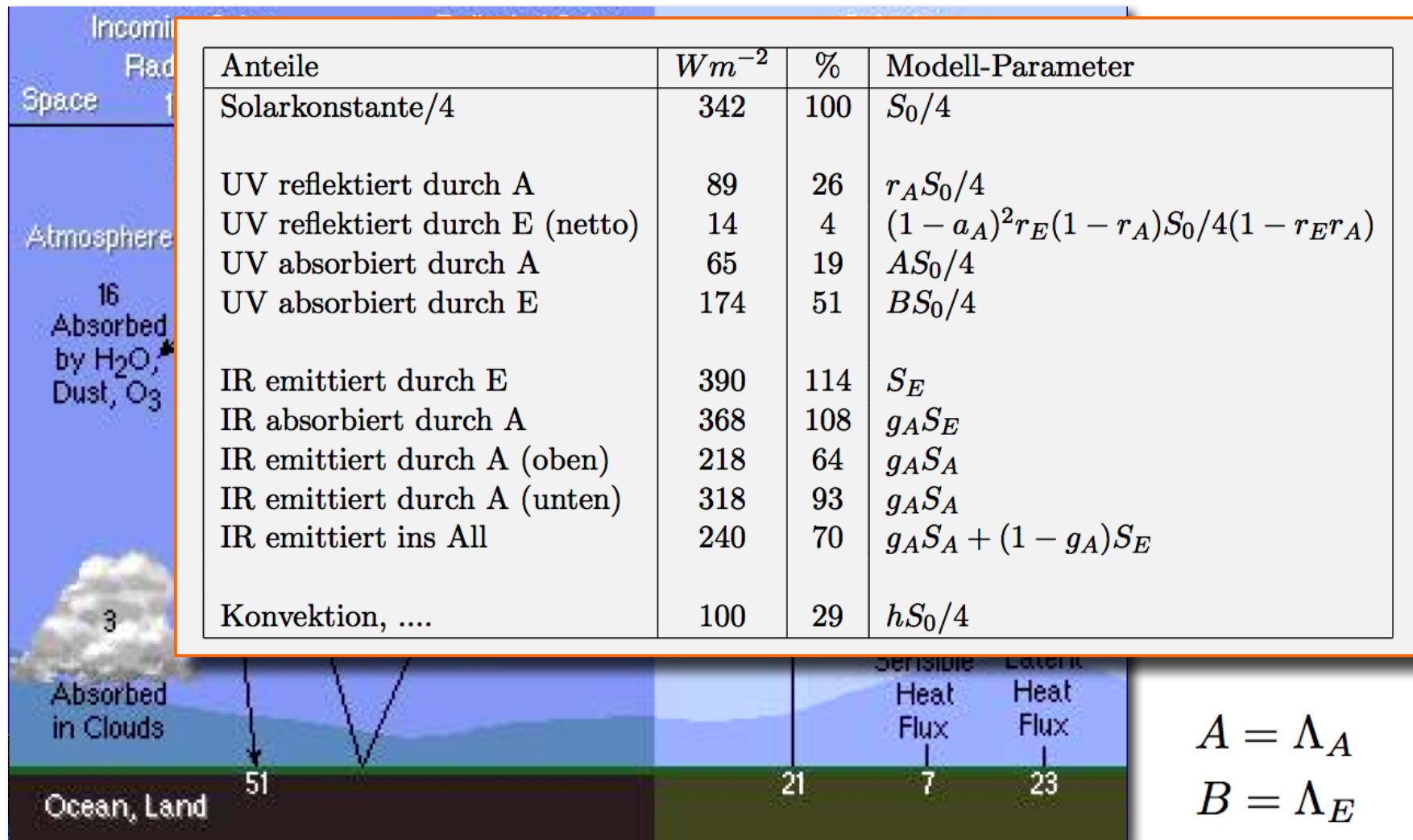
# Grenzen des Modells

## System-Parameter



# Grenzen des Modells

## System-Parameter



# Grenzen des Modells

## System-Parameter

	Incoming Solar	Reflected Solar	Outgoing
Space			
Atmosph			
16 Absorpt by H <sub>2</sub> Dust, O <sub>3</sub>			
3 Absorpt in Cloud			
Ocean			

Parameterwahl:  $T_E = 288 K$

Grösse	Standard-Modell	erweitertes Modell	maximale Erwärmung
$a_A$	0.08	0.09	0
$g_A$	0.89	0.965	1
$h$	0	0.117	0
$r_A$	0.255	0.270	0
$r_E$	0.160	0.10	0
$T_E$	288K	288K	331K
$T_A$	246K	252K	279K

# Trends

$g_A \nearrow \Rightarrow T_E \nearrow$  Zunahme Treibhausgase

$a_A \nearrow \Rightarrow T_E \searrow$  Aerosole (Vulkan, ...)

$r_A \nearrow \Rightarrow T_E \searrow$  Wolken, Aerosole, ...

$r_E \nearrow \Rightarrow T_E \searrow$  Schnee, Sand, Eis, ...

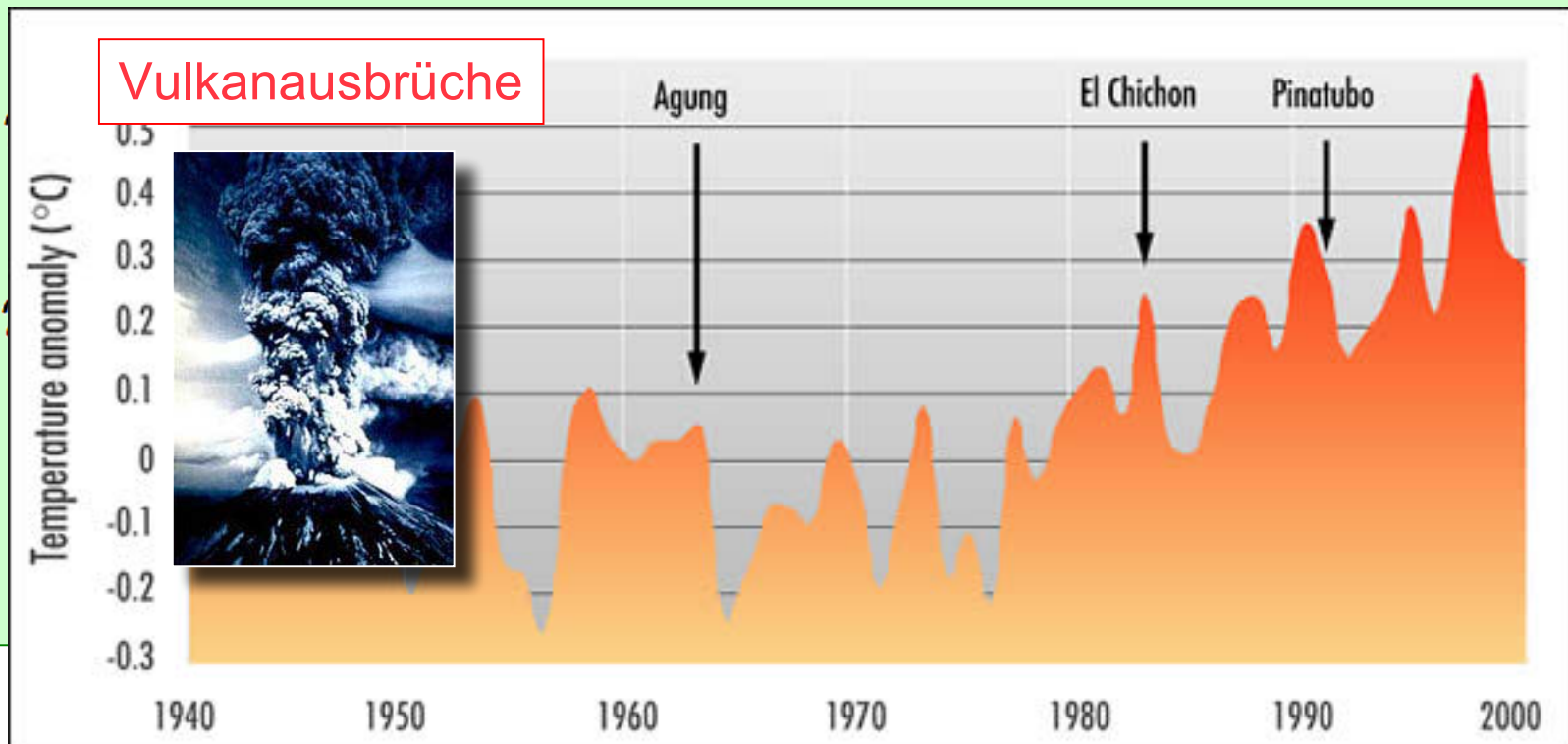
$h \nearrow \Rightarrow T_E \searrow$  Konvektion, ...



# Trends

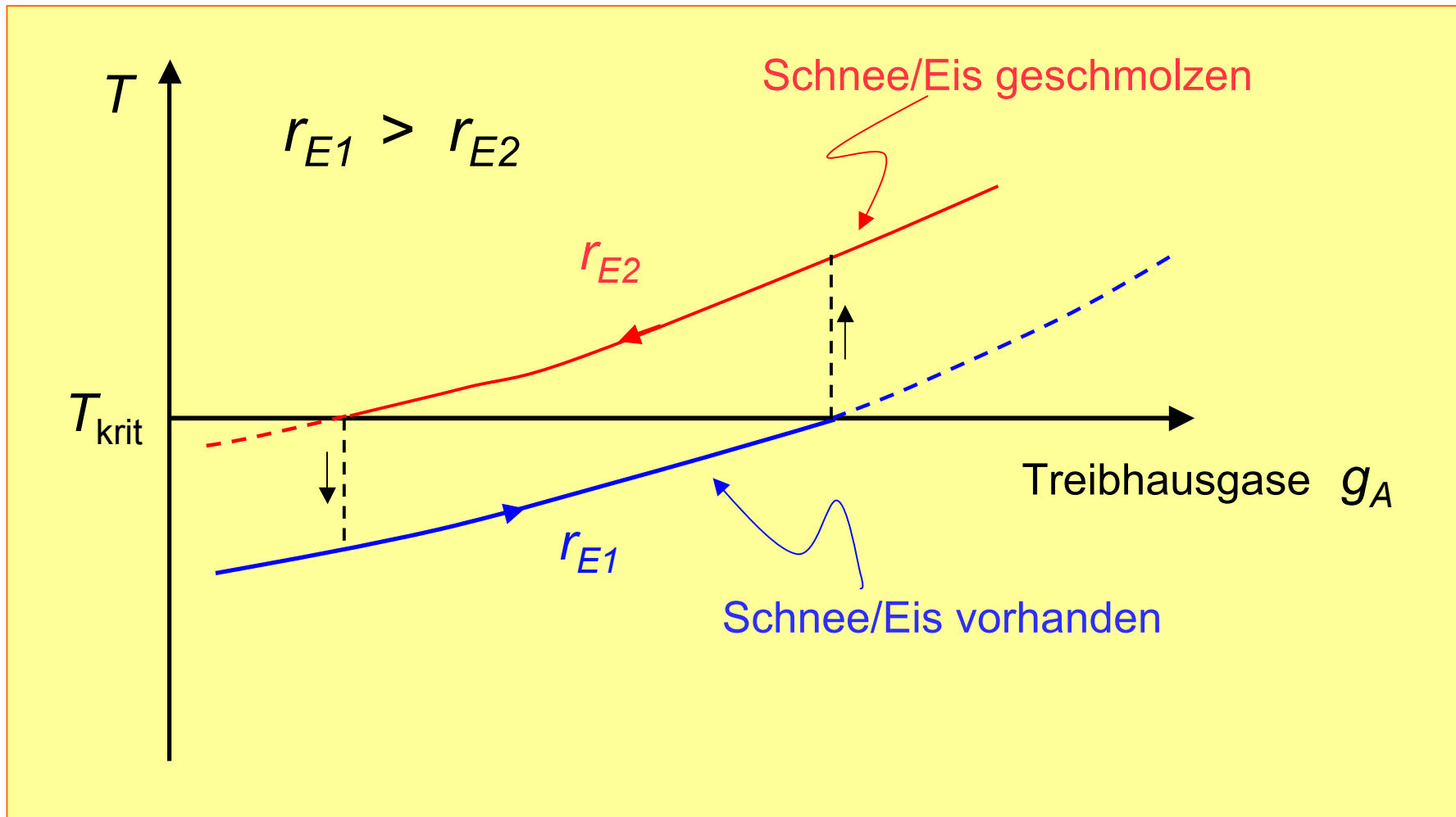
$g_A \nearrow \Rightarrow T_E \nearrow$  Zunahme Treibhausgase

$a_A \nearrow \Rightarrow T_E \searrow$  Aerosole (Vulkan, ...)



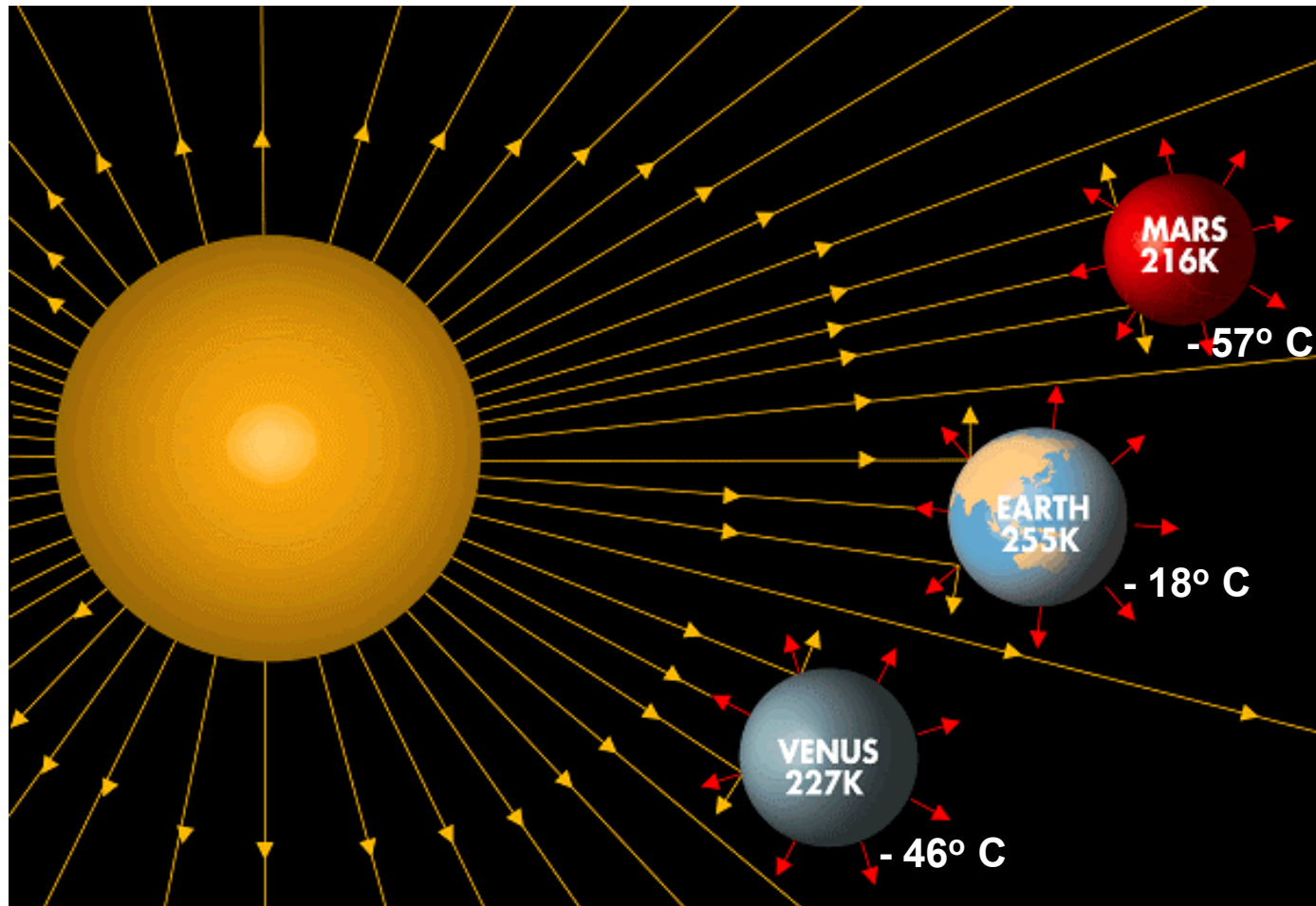
# Rückkopplungseffekte - nicht-lineares Verhalten

Beispiel: Schnee und Eis



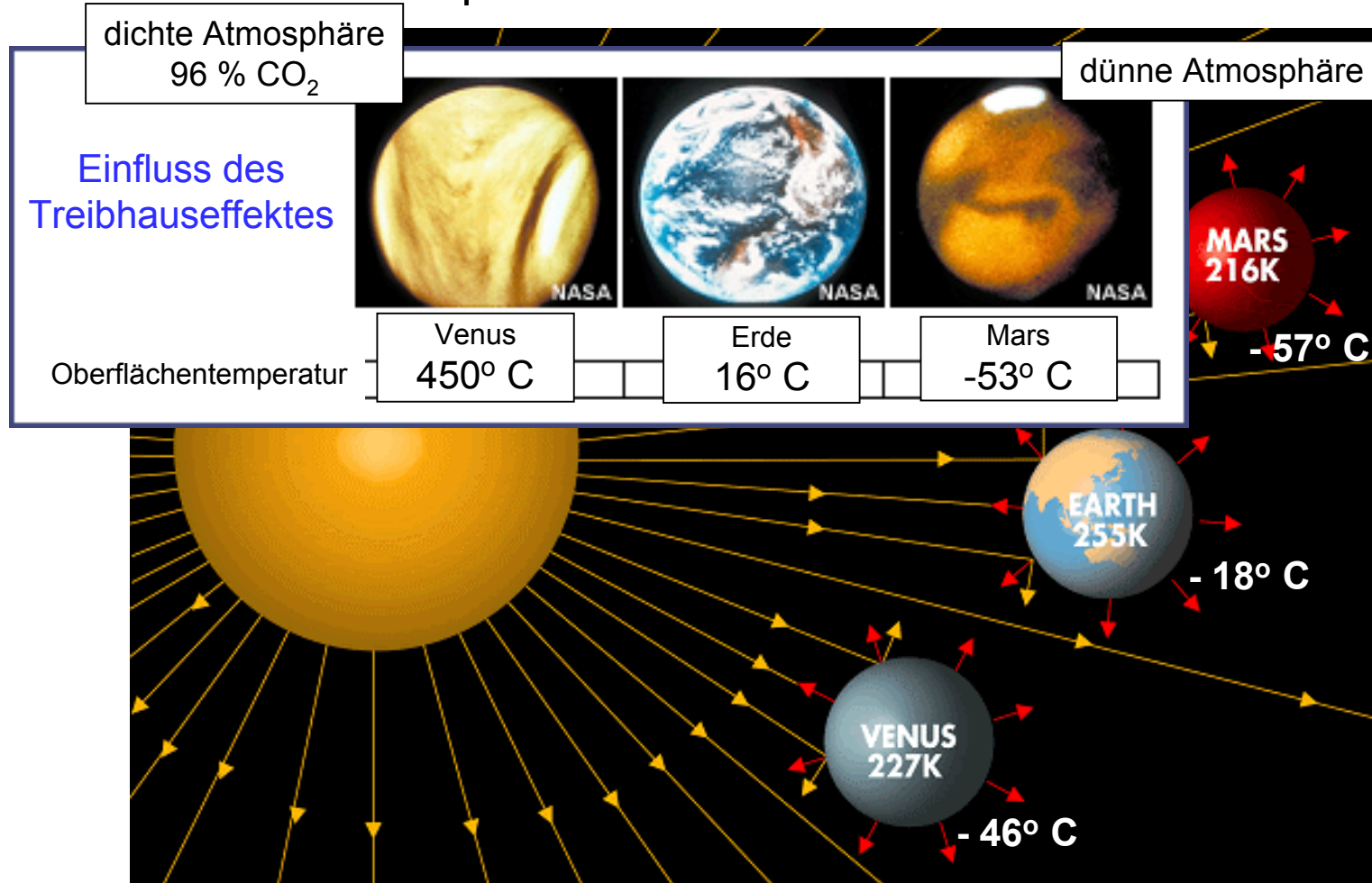
# Vergleich verschiedener Planeten

errechnete Temperatur inklusive Albedo ohne Treibhaus



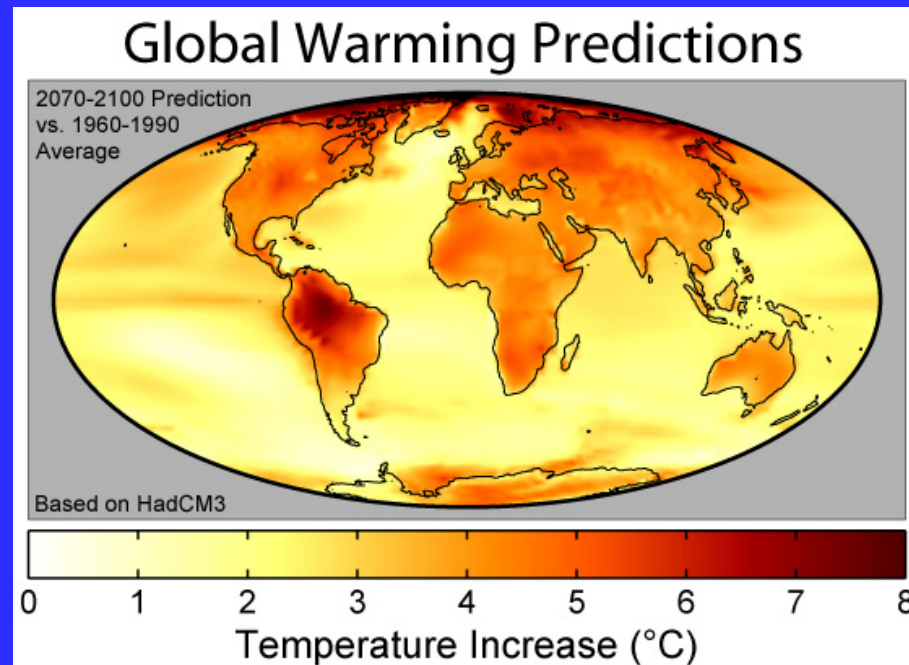
# Vergleich verschiedener Planeten

errechnete Temperatur inklusive Albedo ohne Treibhaus



# Klimaforschung

## Global warming



# Historisches

Effekte von Spurengase auf Klima

**Jean-Baptist Fourier:** Treibhauseffekt

**John Tyndall:** Rolle von Wasserdampf  
für Treibhauseffekt

# Historisches

Effekte von Spurengase auf Klima

Jean-Baptist Fourier: Treibhauseffekt

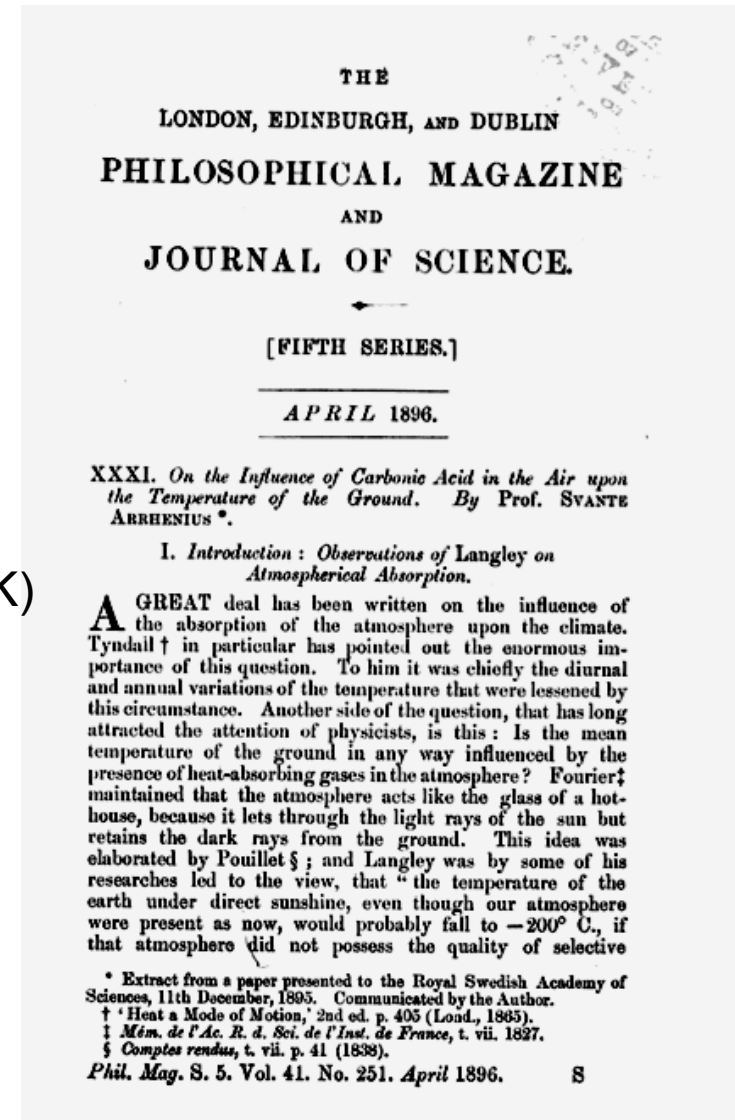
John Tyndall: Rolle von Wasserdampf für Treibhauseffekt

Svante Arrhenius:

CO<sub>2</sub> als Treibhausgas vorgeschlagen

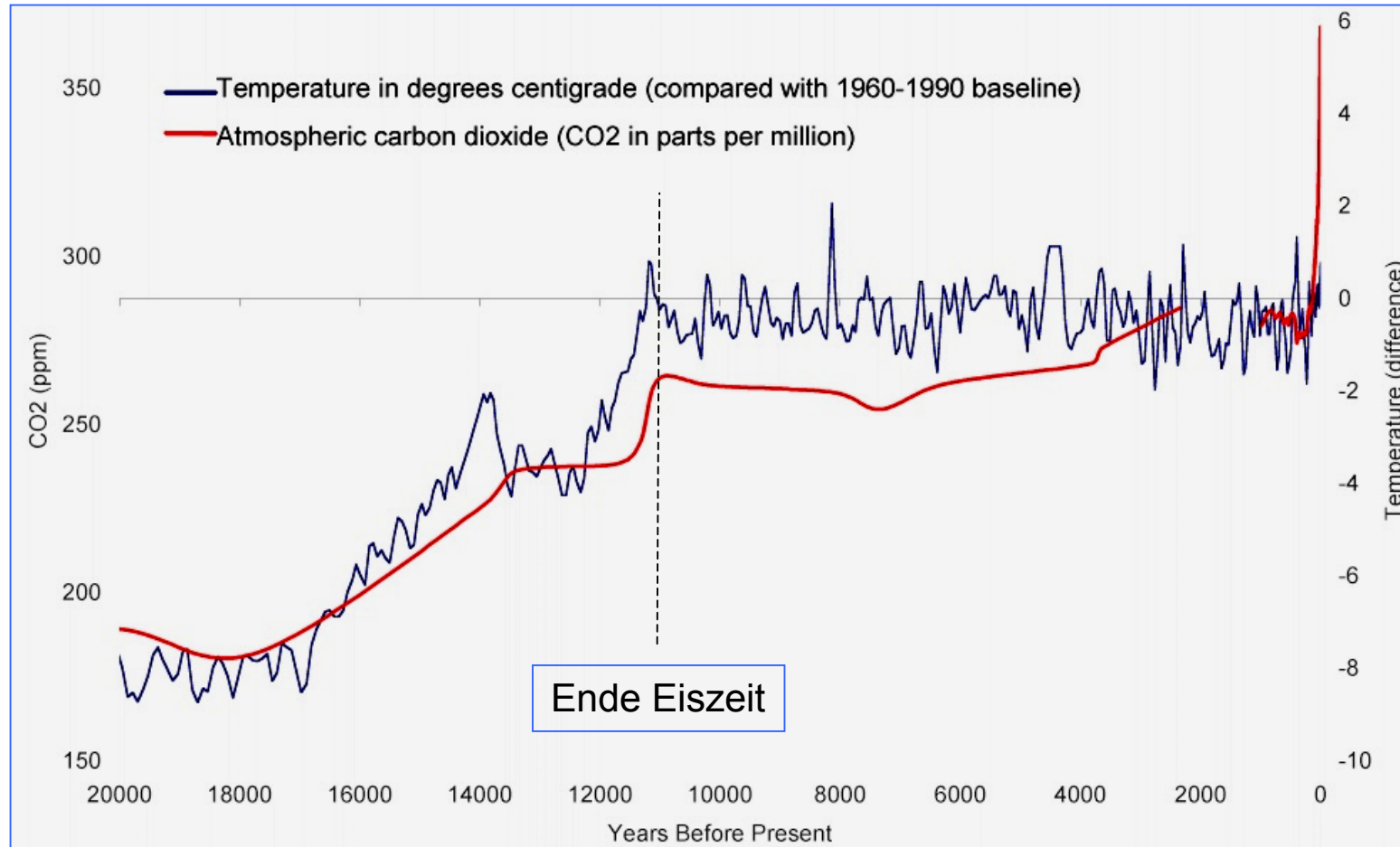
Verdoppelung von CO<sub>2</sub>-Konzentration

4 - 6 K Erwärmung (modern 1.5 - 4.5 K)



# Entwicklung der Temperatur

20000 Jahre

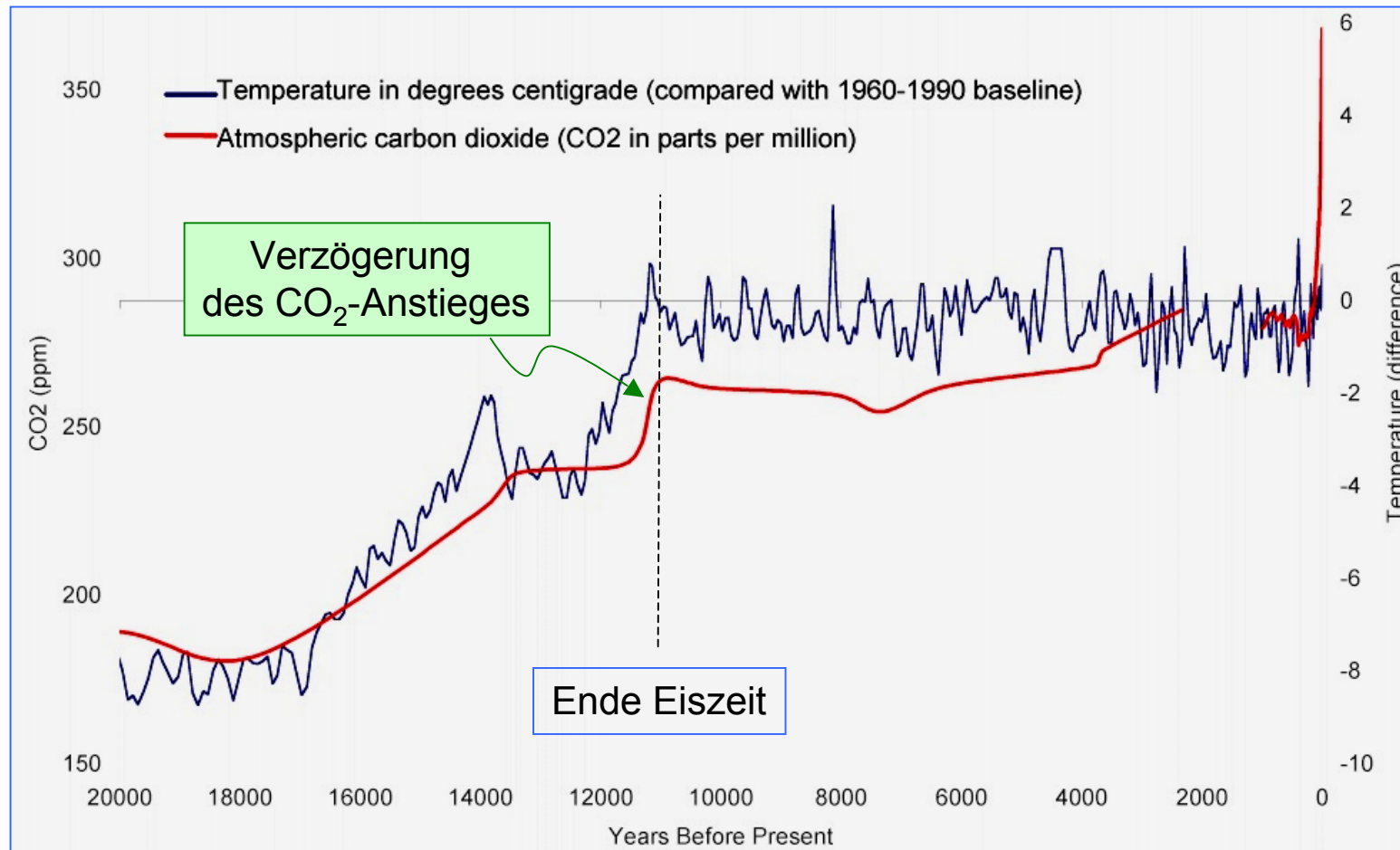


Quelle: [www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm](http://www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm)



# Entwicklung der Temperatur

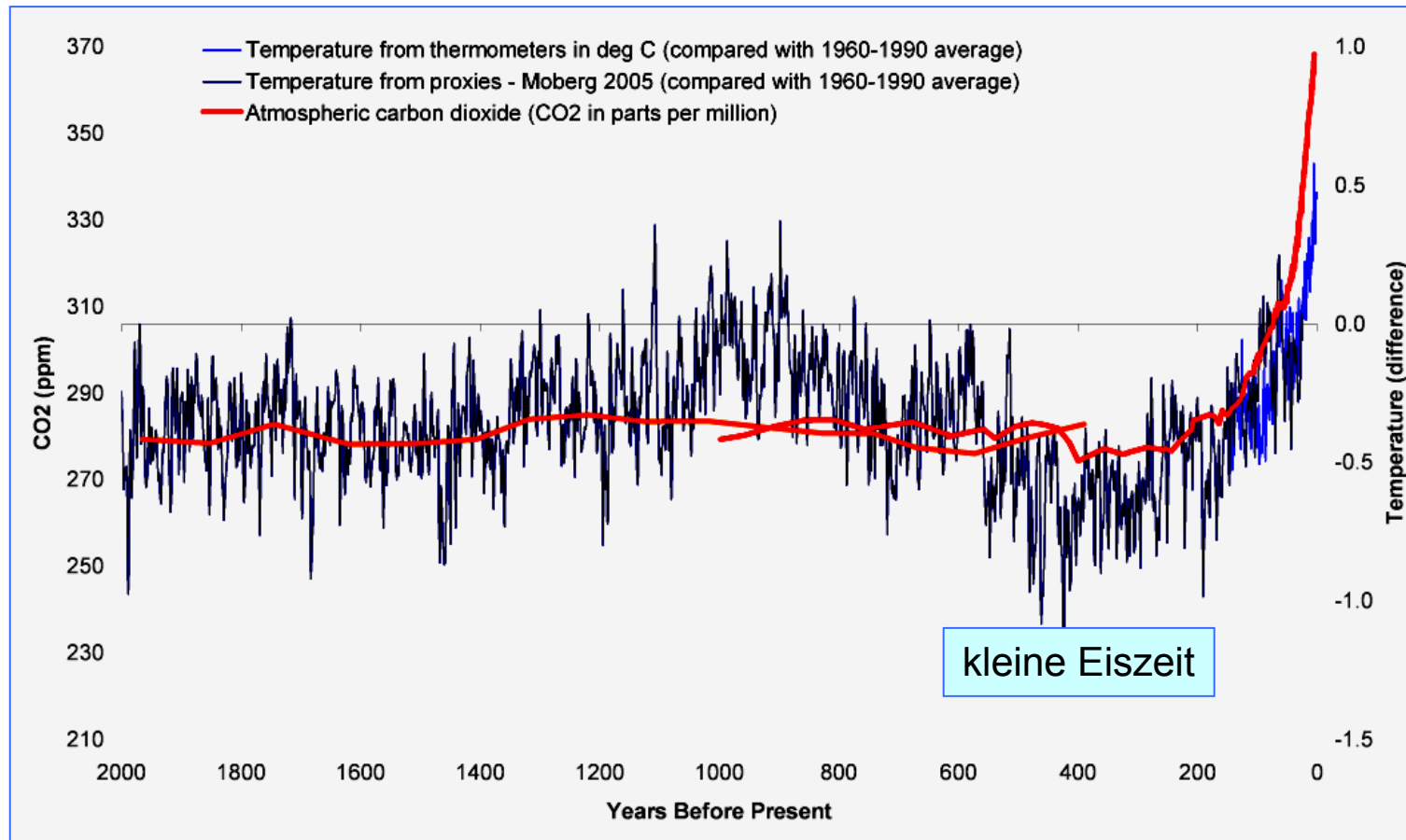
20000 Jahre



Quelle: [www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm](http://www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm)

# Entwicklung der Temperatur

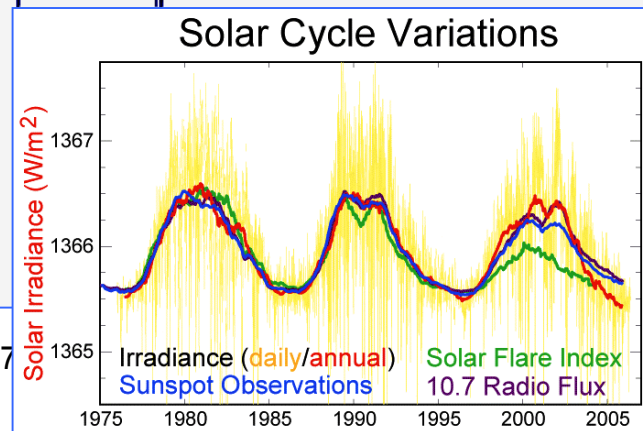
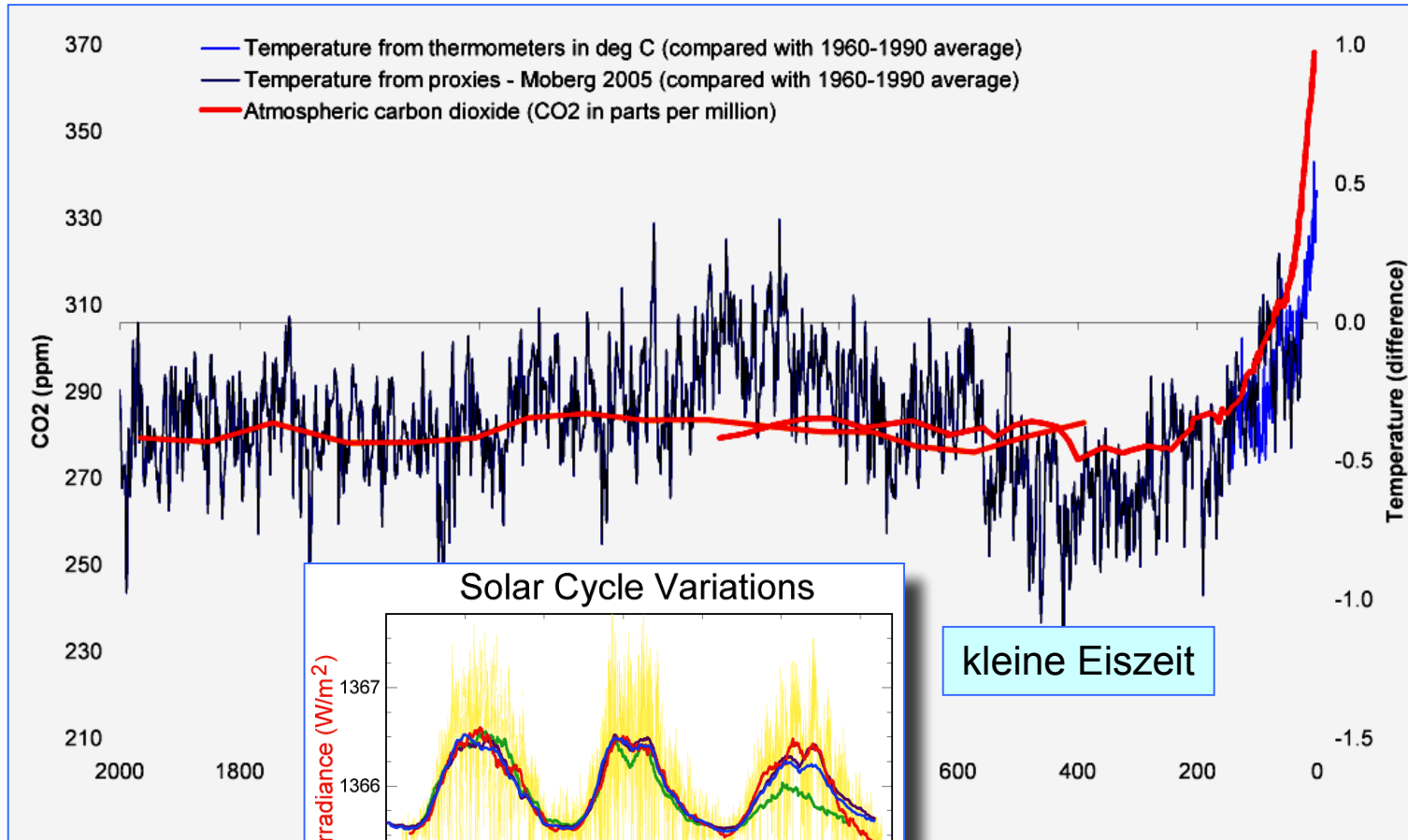
2000 Jahre



Quelle: [www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm](http://www.brighton73.freemove.co.uk/globalwarmingfaq.htm)

# Entwicklung der Temperatur

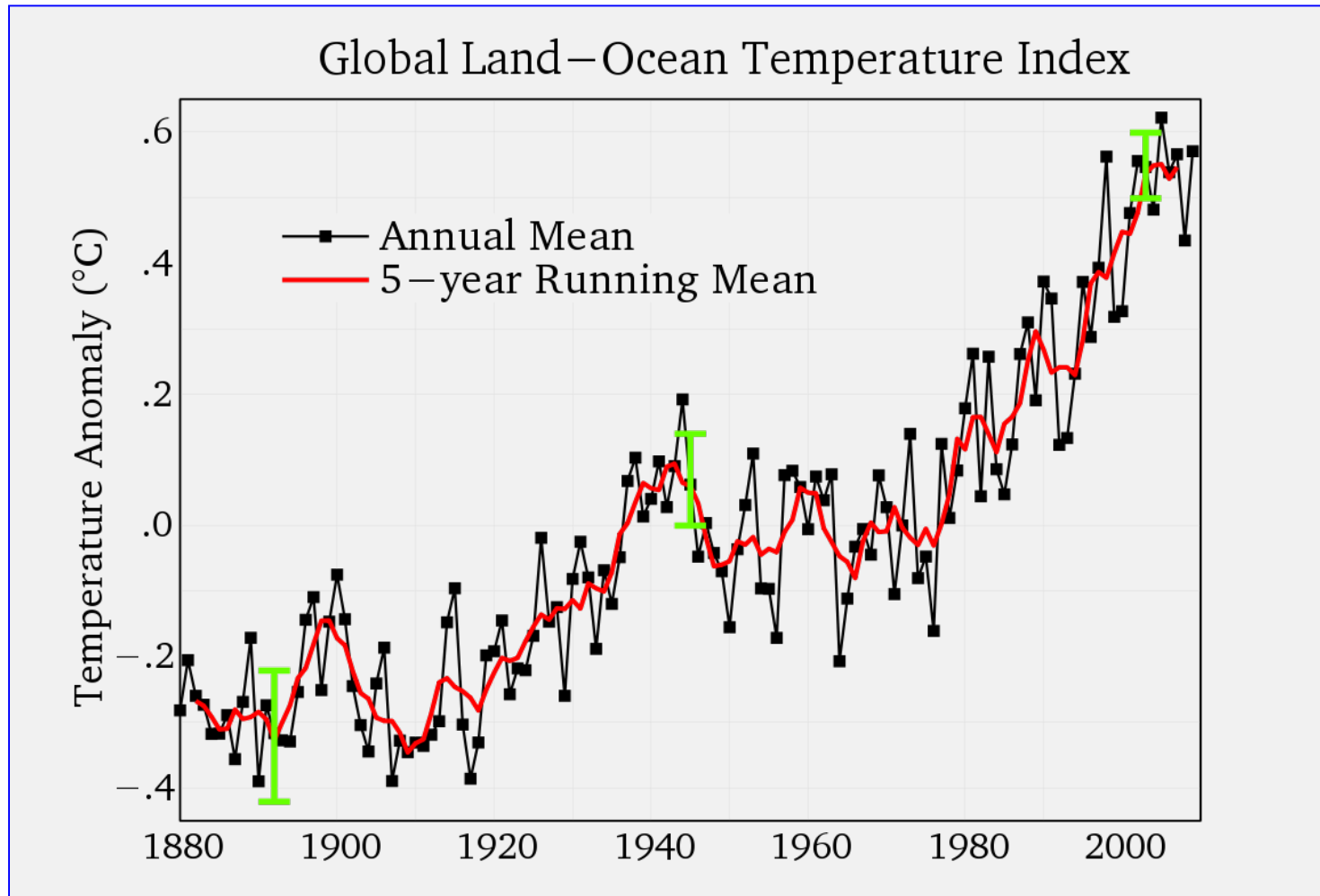
2000 Jahre



Quelle: [www.brighton7.com](http://www.brighton7.com)

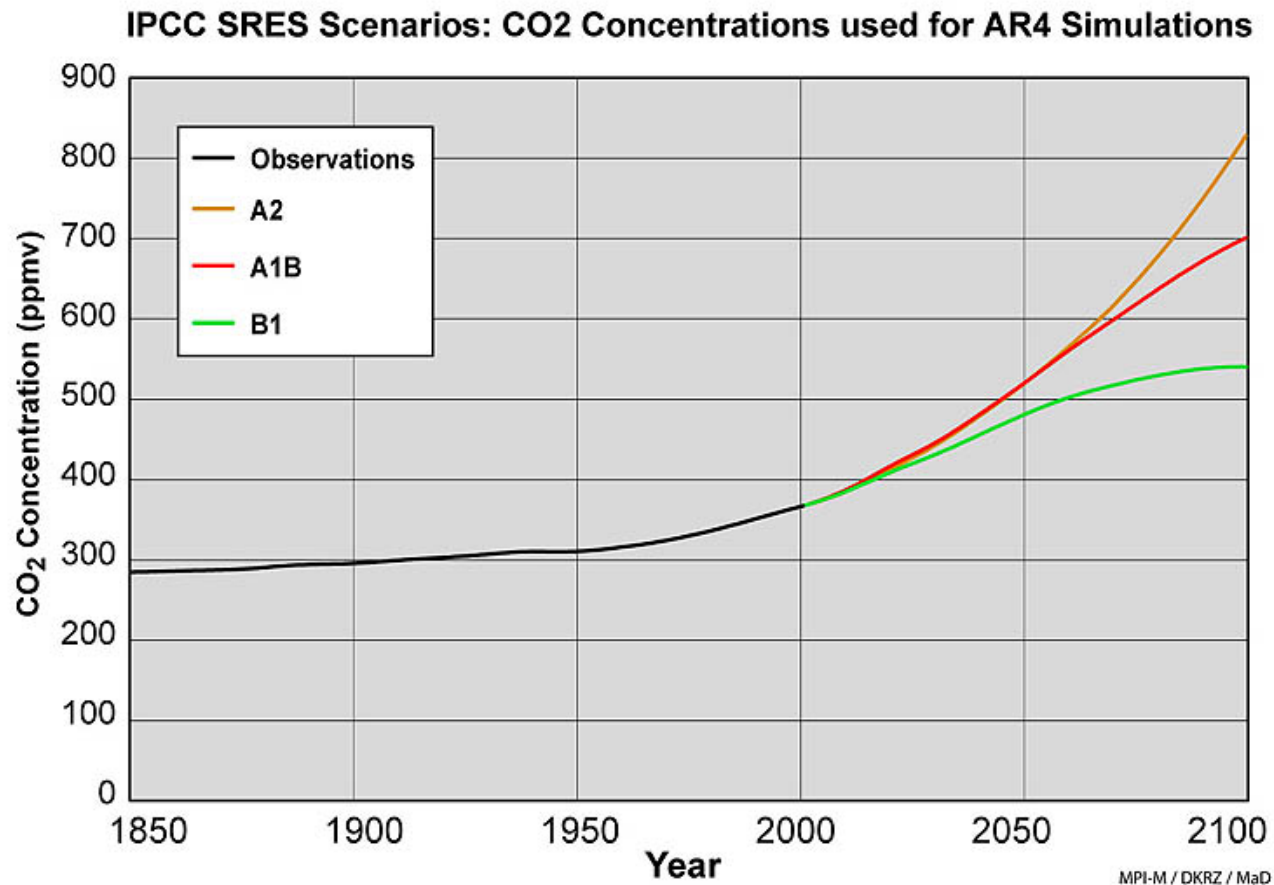
# Entwicklung der Temperatur

seit 1880



# Klima-Modell-Simulationen

## Szenarienvergleich



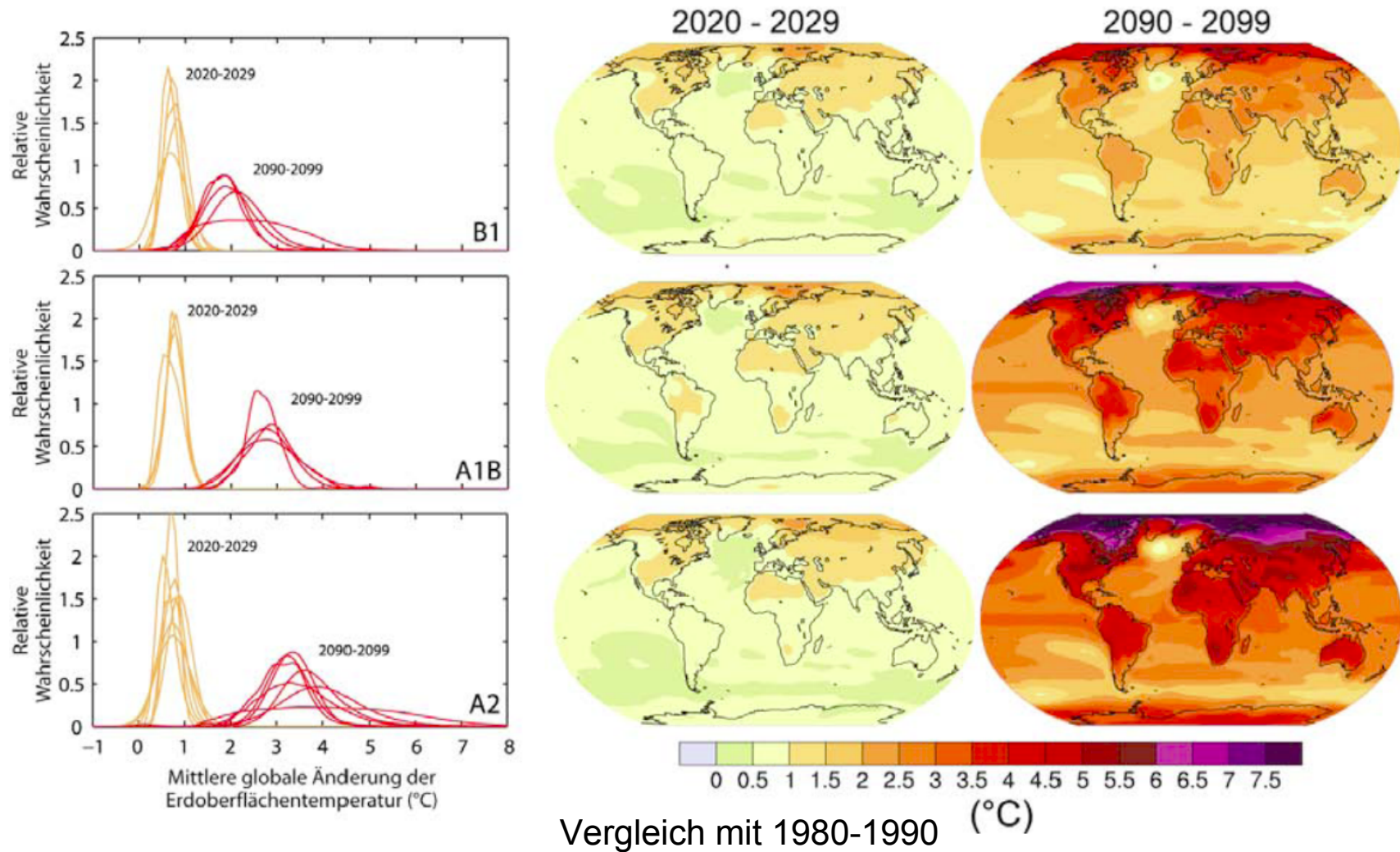
Educational Global Climate Model

“Columbia University” und dem “NASA Goddard Institute for Space Studies”

# Klima-Modell-Simulationen

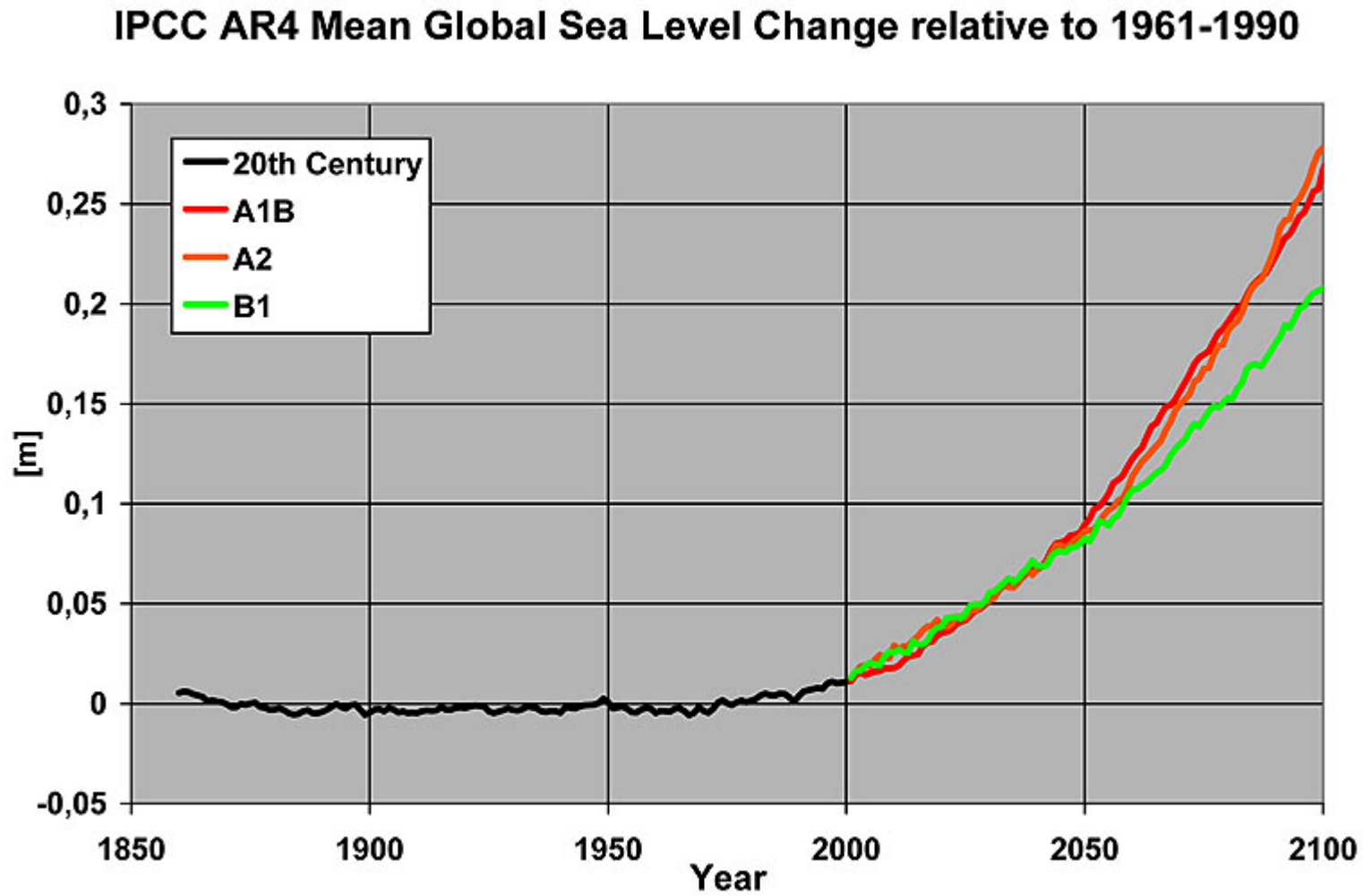
## Szenarienvergleich

Modellprojektionen der Erdoberflächentemperatur



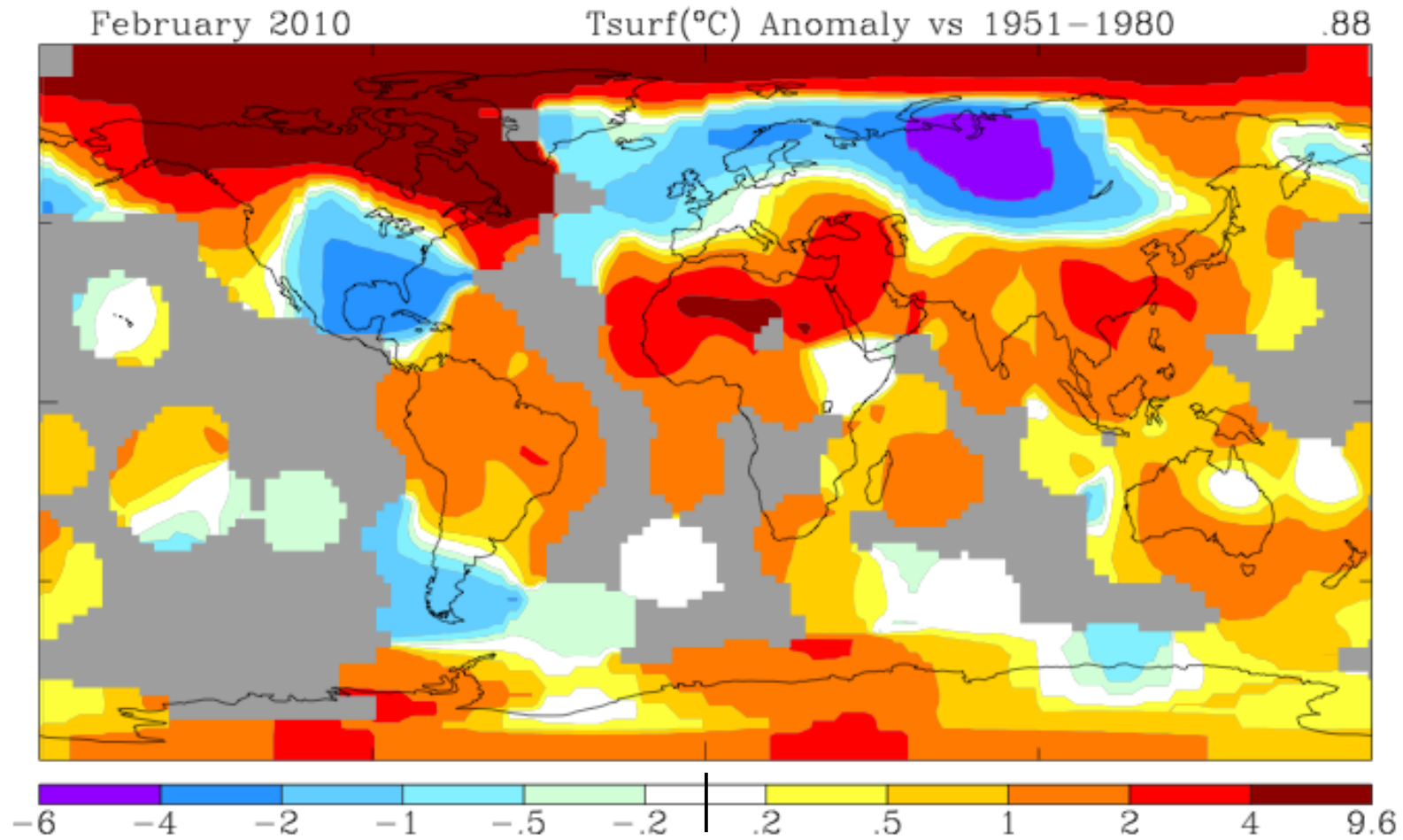
# Klima-Modell-Simulationen

## Szenarienvergleich



# Wie war den der Winter 2010 ?

## Temperatur-Vergleich



NASA Goddard Institute of Space Studies

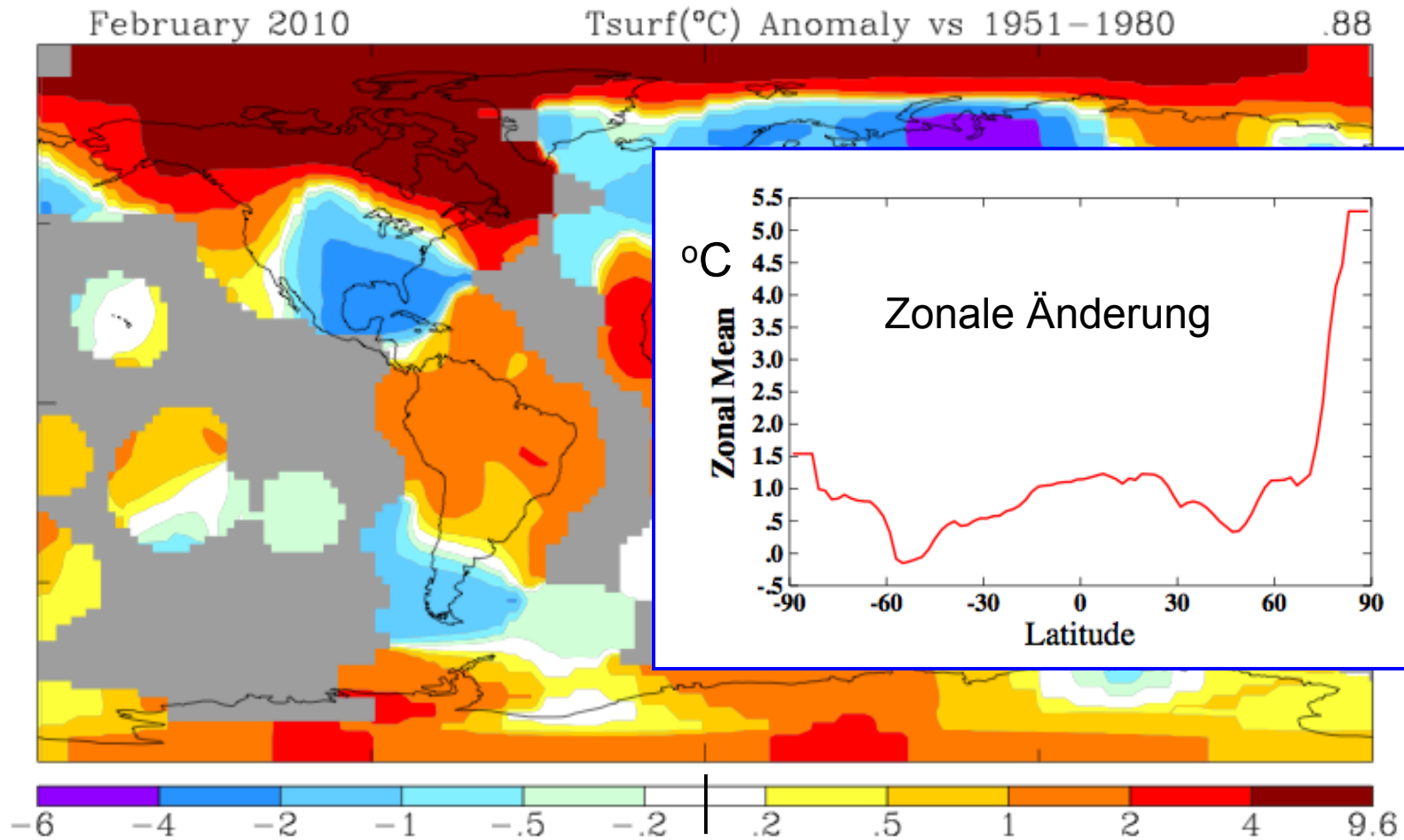
0

Temperatur-Änderung [°C]



# Wie war den der Winter 2010 ?

## Temperatur-Vergleich



# Sichtbare Auswirkungen der Erwärmung

## Rhonegletscher

