

# Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

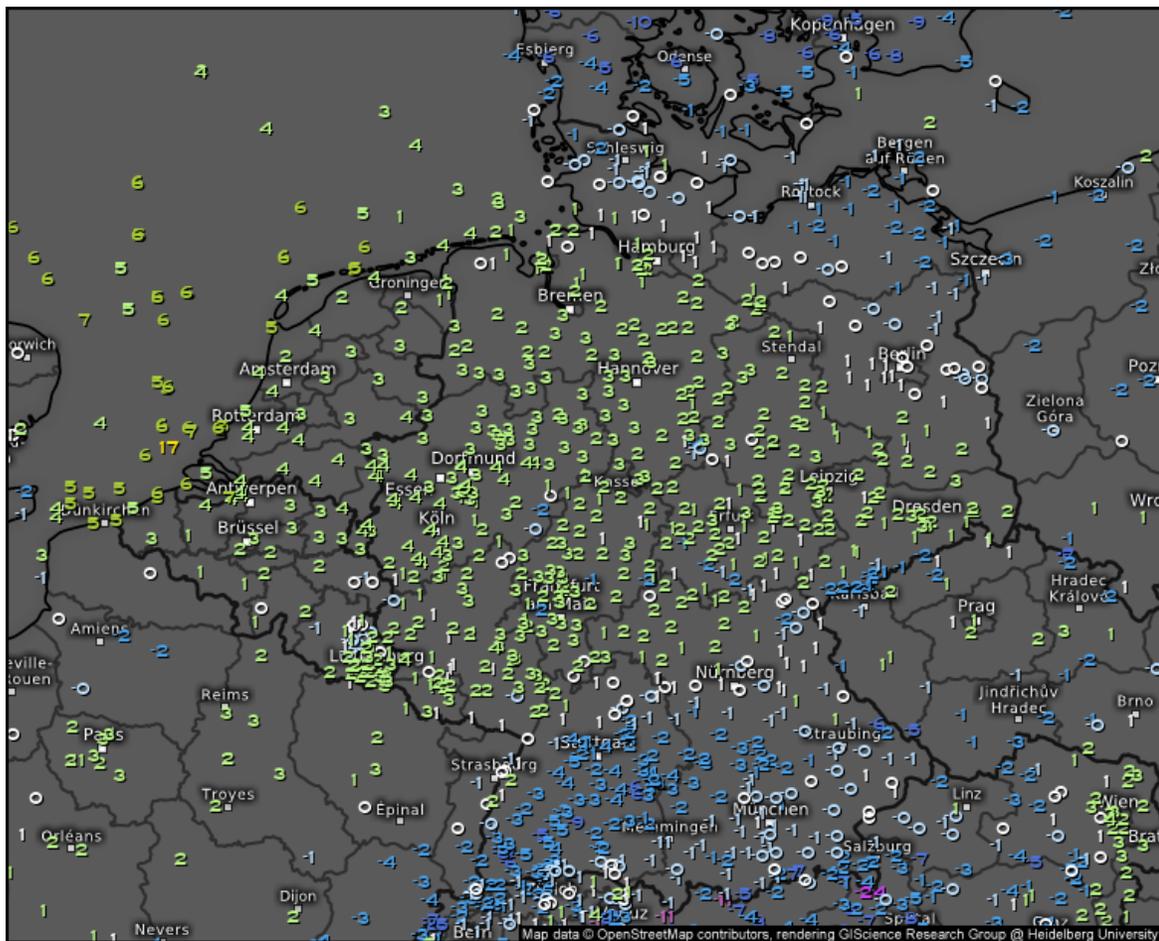
Prof. Michael Kunz



# Das Wetter...



# Beobachtungen aktuell



Temperatur 2m (°C)

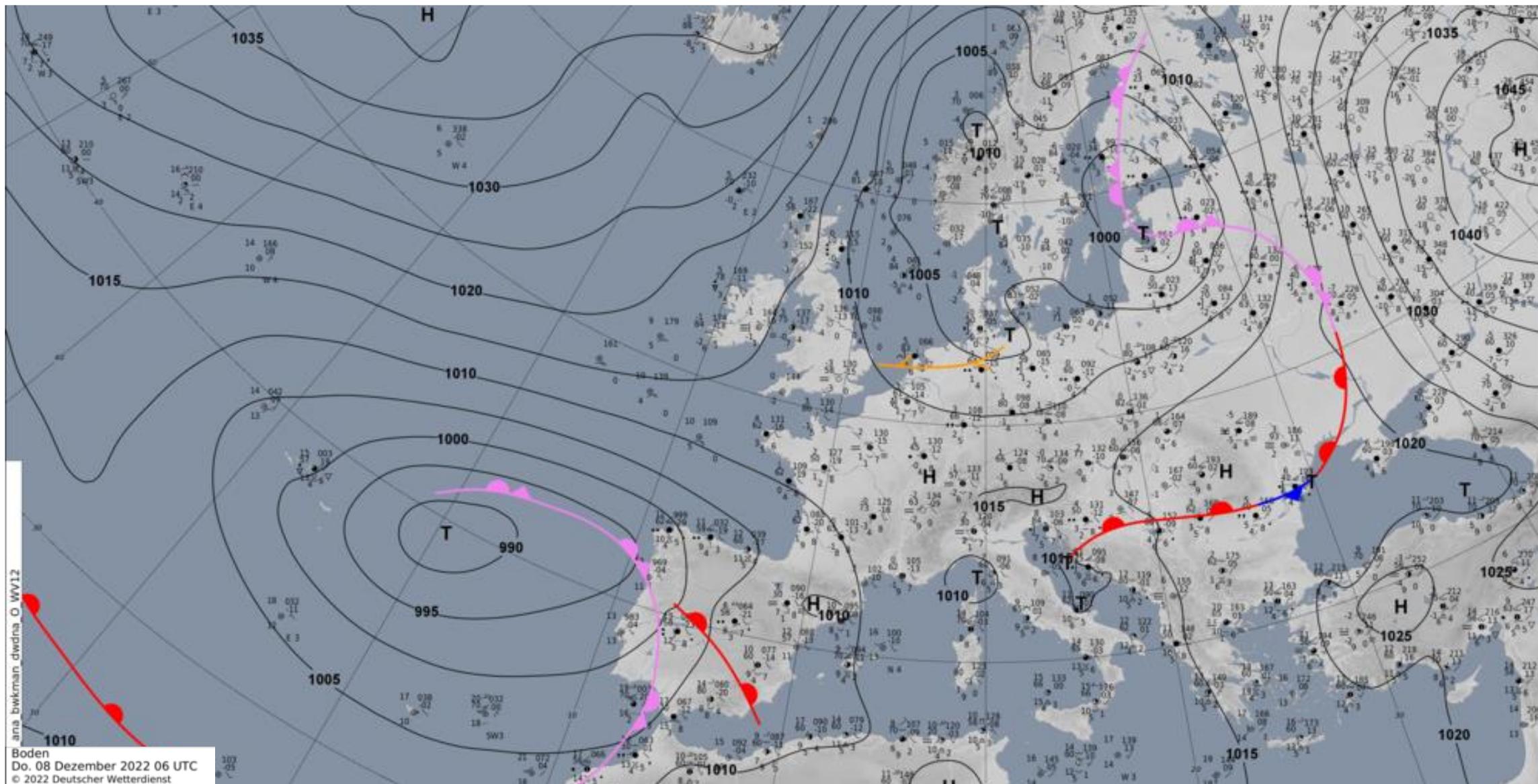
Do. 08.12.2022, 06:00 Uhr MEZ



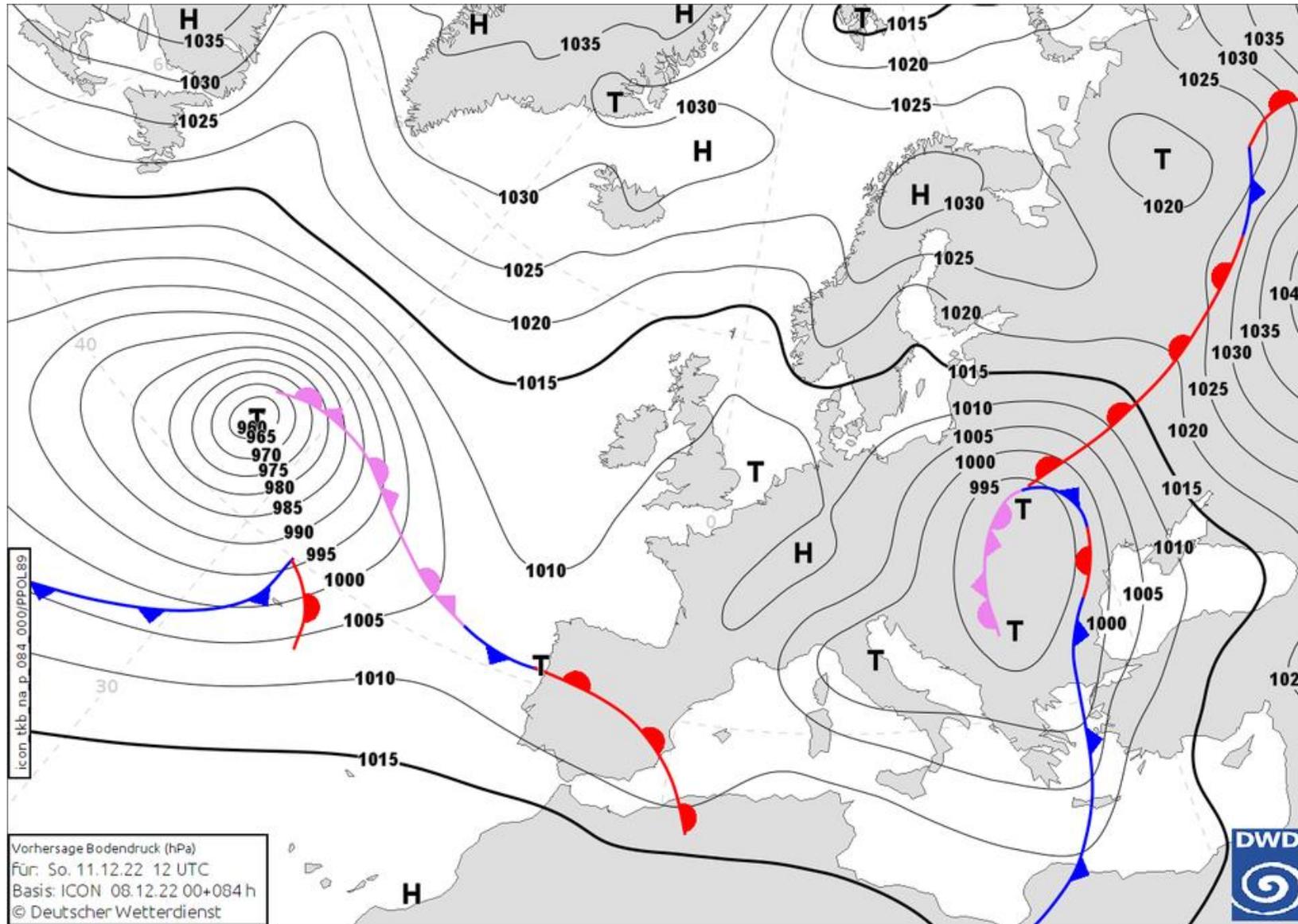
Deutschland, 1.338 Stationen im Kartenausschnitt



(c) Kachelmann GmbH, DWD



# Vorhersage



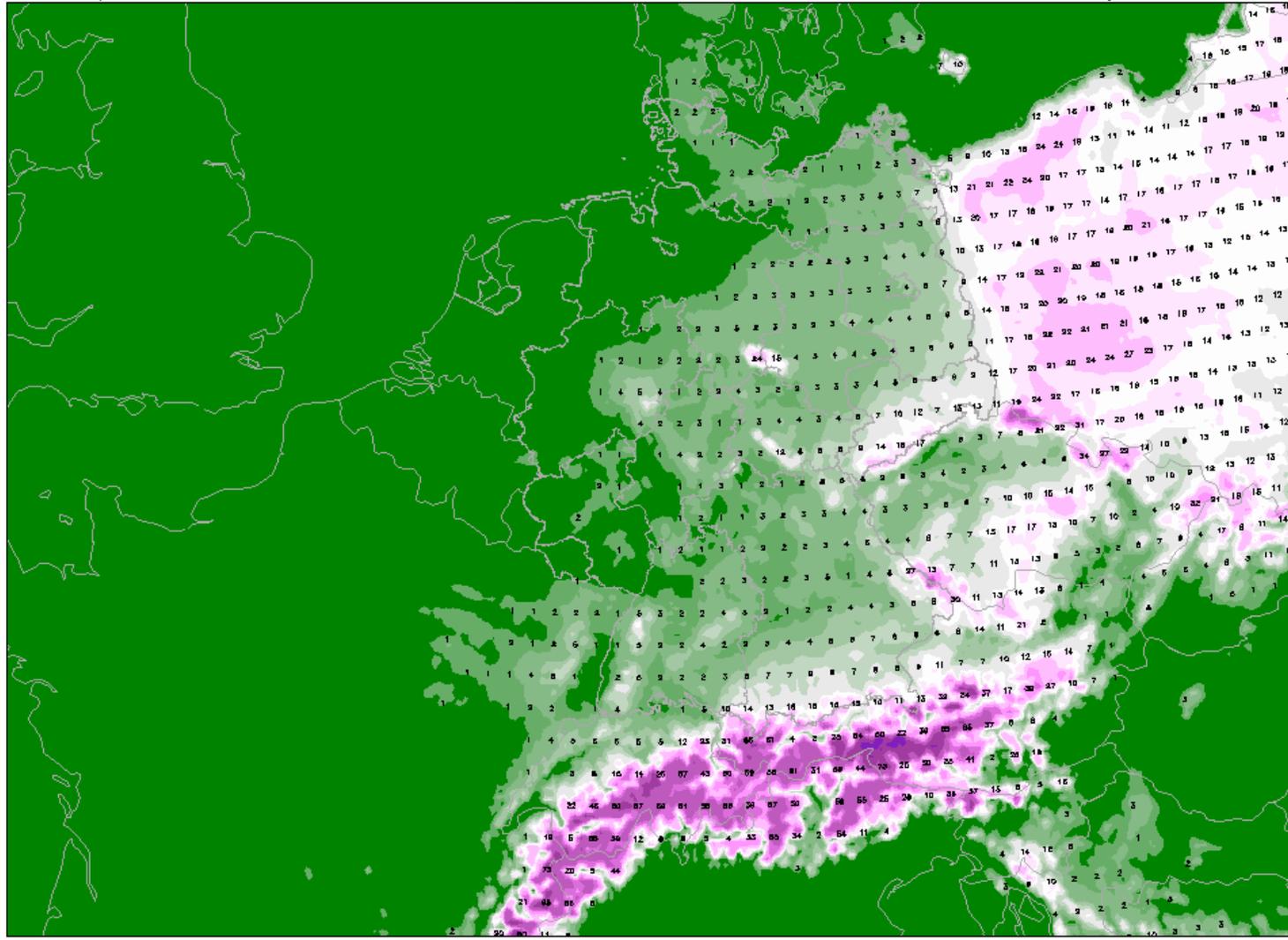
*Hochnebeldecke vorz, aber  
Niederschlag mgl*

# Vorhersage

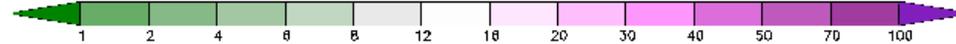
Init: Thu,08DEC2022 06Z

Schneedecke in cm

Valid: Tue,13DEC2022 06Z



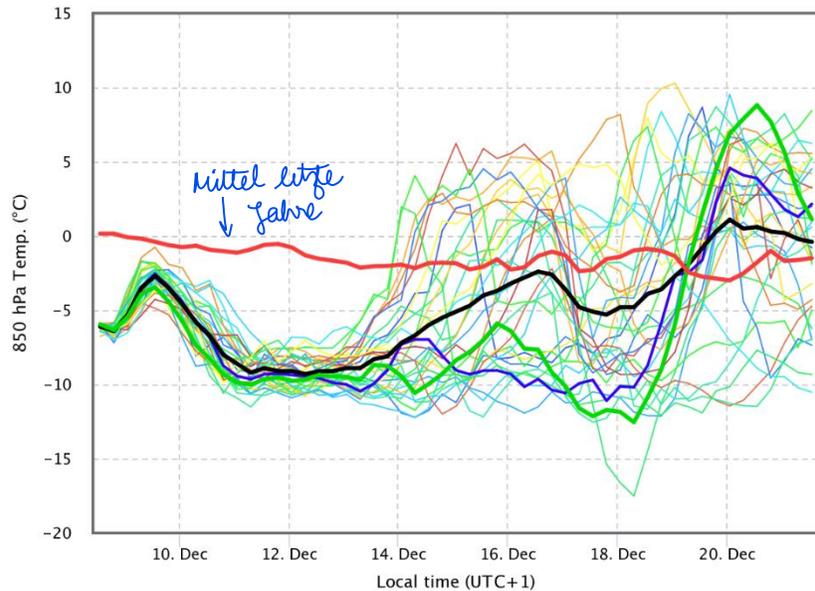
Data: ICON OPER 0.062°  
WWW.WETTERZENTRALE.DE



# Vorhersage: Ensembles

- Modell GFS (Global Forecast System) des amerik. Wetterdienstes NOAA
- 30 Ensemble Läufe
- Gitterpunkt Karlsruhe

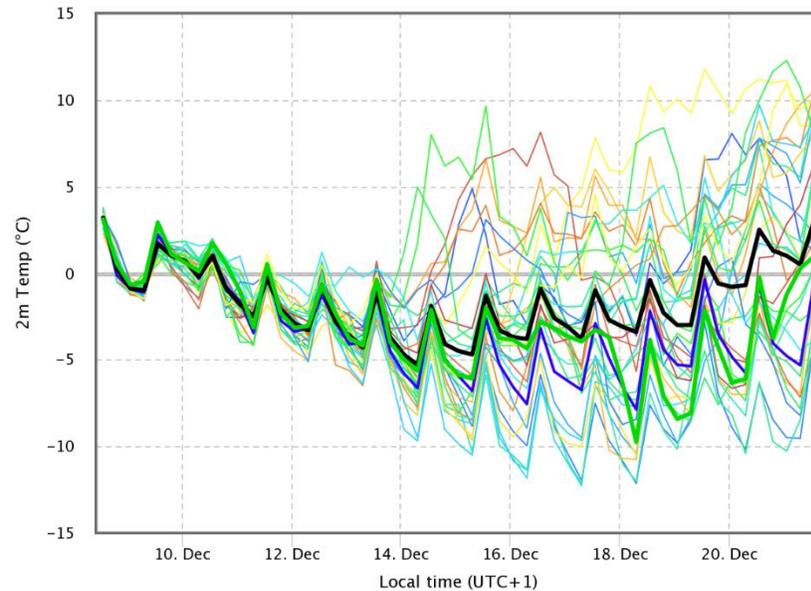
## T850



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08  
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16  
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24  
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG  
 OPER LT MEAN 1981-2010

wetterzentrale.de

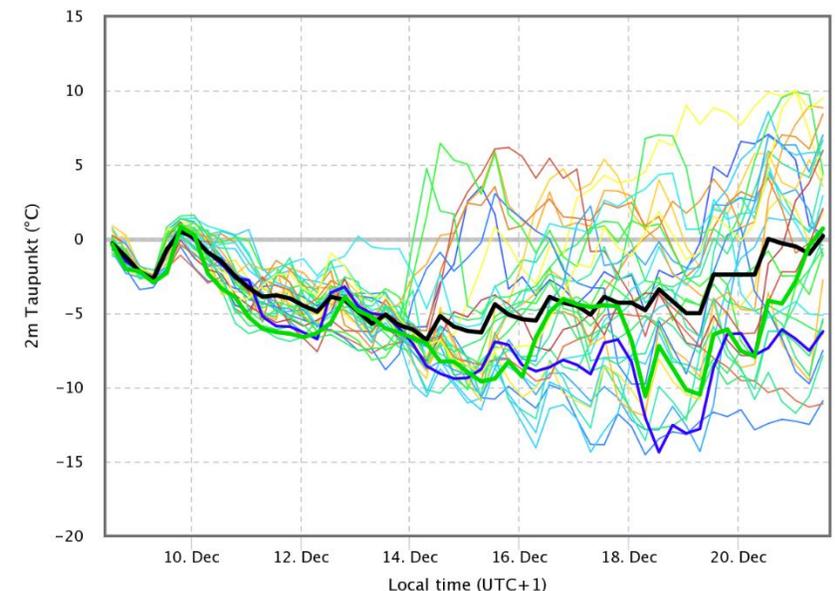
## T 2m



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08  
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16  
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24  
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG  
 OPER

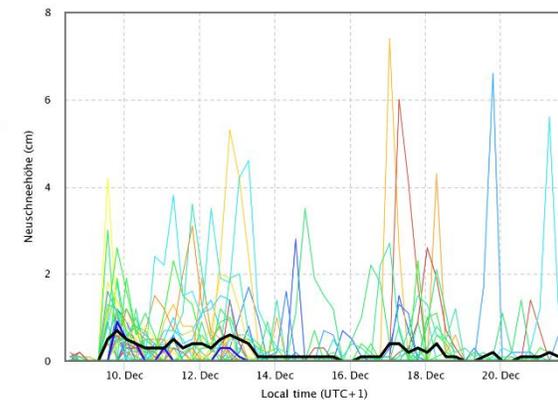
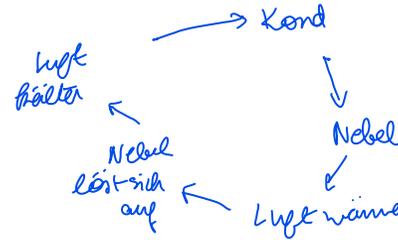
wetterzentrale.de

## $\tau$ 2m



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08  
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16  
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24  
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG  
 OPER

wetterzentrale.de



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08  
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16  
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24  
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG  
 OPER

wetterzentrale.de

# Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

## Kapitel 6: Strahlung



# Letzte Vorlesung...

- **Strahler** Atmosphäre: Sonne, Erde, Gase, Wolken, Niederschlag, Aerosole
- **Linienpektren** (Gase); **kontinuierliches** Spektren (thermische Körper)
- Spektrum elektromagnetischer Wellen; **Sichtbar**: 0,38 – 0,78 μm

- **Strahlungsflussdichte  $F$** : Energie / (Zeit x Fläche); W m<sup>-2</sup>
- **Strahldichte  $B$** : Energie / (Zeit x Fläche x Raumwinkel); W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>
- Strahlungsflussdichte  $F \sim 1/R^2$  (senkrechte Flächenorientierung)

- Plancksches Strahlungsgesetz: spektrale Strahldichte  $B_\lambda$  (W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)  
→ berücksichtigt Quantennatur

$$\Delta E = h\nu$$

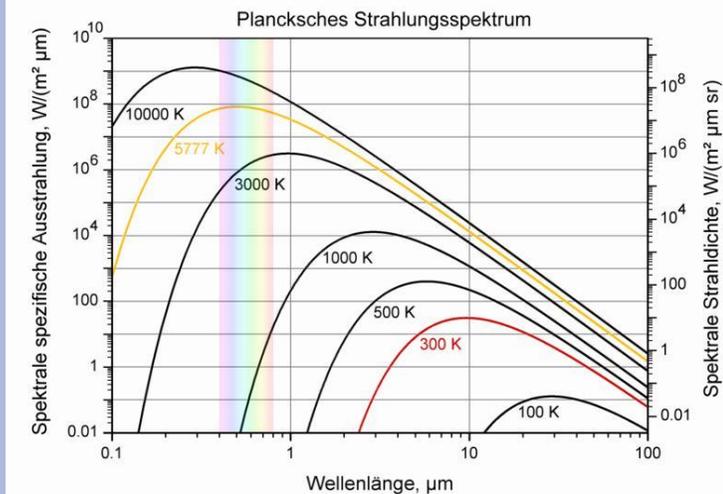
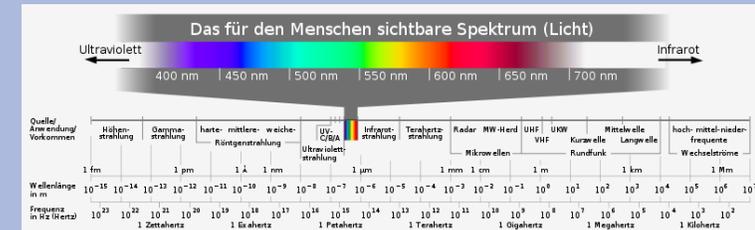
- **Integration** Planck über alle Wellenlängen und über Halbraum (= π)

$$F(T) = \int_{\Omega} \int_0^{\infty} B_\lambda(T) \cos \vartheta d\lambda d\Omega$$

→ **Stefan-Boltzmann Gesetz**

$$F(T) = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

$$c = \lambda\nu \quad k = \frac{1}{\lambda} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$



## 6 Strahlung

6.1 Einführung und Definitionen

6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

6.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz

6.2.2 Stefan-Boltzmann-Gesetz

**6.2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz**

**6.2.4 Graue Körper – Kirchhoffs Gesetz**

**6.3 Solare Strahlung**

**6.3.1 Solarkonstante**

**6.3.2 Albedo**

**6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle**

**6.3.4 Streuung**

6.3.5 Absorption

6.3.6 Extinktionsgesetz nach Beer / Bouguer-Lambert

6.3.7 Globalstrahlung

6.4 Terrestrische Strahlung

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

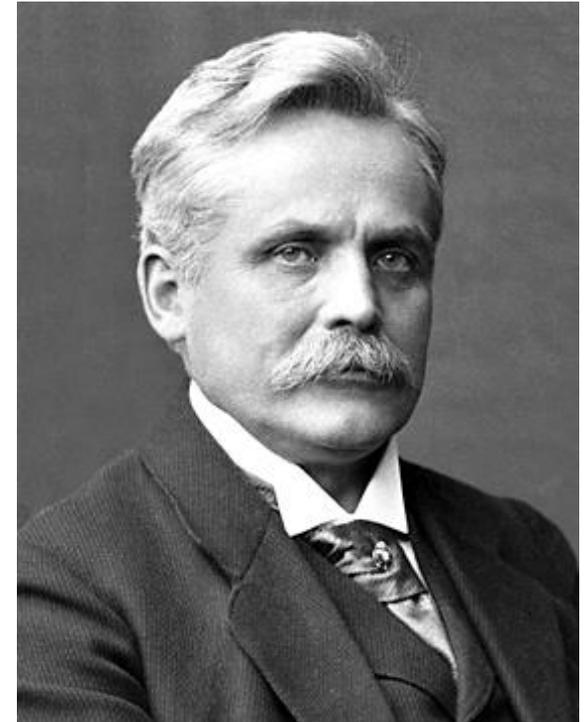
6.6 Geometrische Strahlungsgesetze und optische Phänomene

## 6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

### Wiensches Verschiebungsgesetz

- Berechnung der Maxima der spektralen Verteilung
- Ansatz: Bestimmung Maximum der Planck-Kurve

$$\frac{dB_{\lambda}(T)}{d\lambda} = 0$$



Wilhelm Carl Werner Otto Fritz  
Franz Wien (1864-1928); dt.  
Physiker; 1911 Nobelpreis

## 6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

$B_\lambda$ : spektrale Strahldichte  
 $c$ : Lichtgeschwindigkeit  
 $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum  
 $k$ : Boltzmann-Konstante  
 $\lambda$ : Wellenlänge

Wiensches Verschiebungsgesetz  $\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0$

Planck mit Näherung  $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( \underbrace{e^{\frac{hc}{kT\lambda}}}_{\gg 1} - 1 \right)} \approx \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right)$

Ableitung:  $\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0 = -\frac{5 \cdot 2hc^2}{\lambda^6} \cdot \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right) + \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{hc}{kT\lambda}\right) \frac{hc}{kT\lambda^2}$

(Produkt und Kettenregel!)

$$\Rightarrow 5 = \frac{hc}{kT\lambda} \Rightarrow T \cdot \lambda = \frac{hc}{5k} = 2898 \mu\text{m K}$$

$$\Leftrightarrow \lambda_{max} = \frac{2898 \mu\text{m K}}{T}$$

→ **Maximum** Emissionsenergie verschiebt sich mit höherer Temperatur zu kürzeren Wellenlängen

*Sonne wärmer = blau...*

## 6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

### Wiensches Verschiebungsgesetz

- Abschätzung Temperatur Strahlungsquelle

*worum nur für  
Str. Quelle?*

- Bsp: Temperatur Sonne  $\lambda_{\max} = 0,475 \mu\text{m}$

$$T = \frac{2898 \mu\text{m K}}{\lambda_{\max}} = \frac{2898 \text{ K}}{0,475} = 6100 \text{ K}$$

- Wegen **Asymmetrie des Schwarzkörperspektrums** erscheint Sonne nicht blau-grün, sondern gelb
- Sterne, die kälter als die Sonne sind, emittieren Strahlung bei größeren Wellenlängen und erscheinen rötlich (und umgekehrt)
- **Solare Strahlung**: ultraviolett – sichtbar – Infrarot
- Strahlung **Erde und Atmosphäre**: Infrarot

## 6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

### Kirchhoffsches Gesetz

- Graue Strahler: Absorptionsvermögen  $\varepsilon(\lambda) < 1$
- Für eine gegebene Wellenlänge und gegebene Temperatur steht die Emission  $E_\lambda(T)$  eines Körpers in einem ganz bestimmten Verhältnis zu seinem Absorptionsvermögen  $\varepsilon$ , wobei dieses **Verhältnis** unabhängig vom Material des Körpers und gleich der Schwarzkörperemission ist



Gustav Robert Kirchhoff  
(1824-1887); dt. Physiker

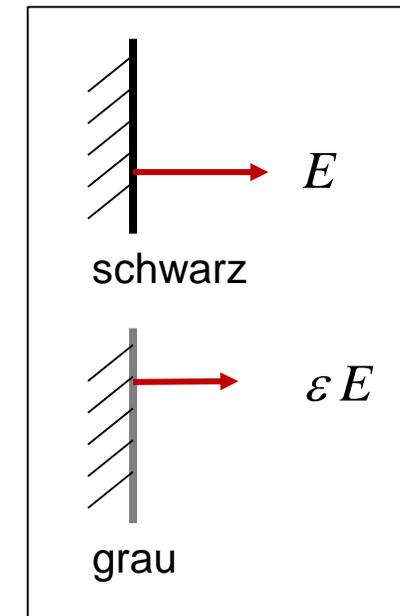
## 6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

### Kirchhoffsches Gesetz

- Graue Strahler: Absorptionsvermögen  $\varepsilon(\lambda) < 1$
- Für eine gegebene Wellenlänge und gegebene Temperatur steht die Emission  $E_\lambda(T)$  eines Körpers in einem ganz bestimmten Verhältnis zu seinem Absorptionsvermögen  $\varepsilon$ , wobei dieses **Verhältnis** unabhängig vom Material des Körpers und gleich der Schwarzkörperemission ist

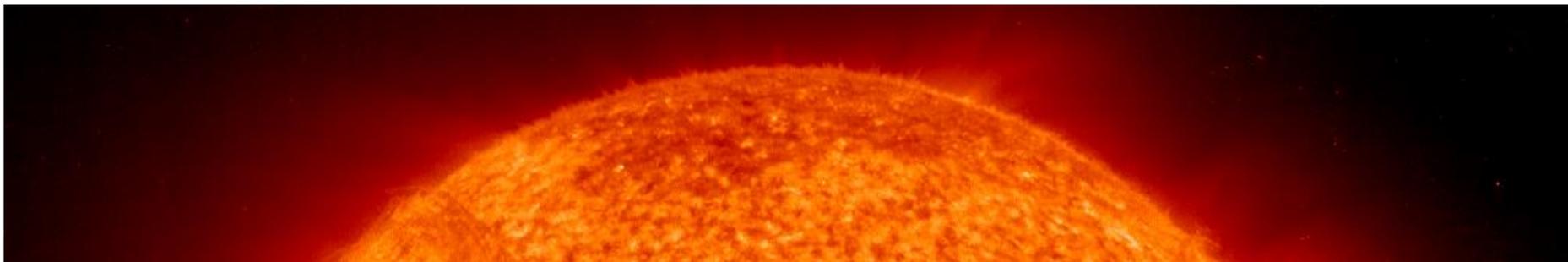
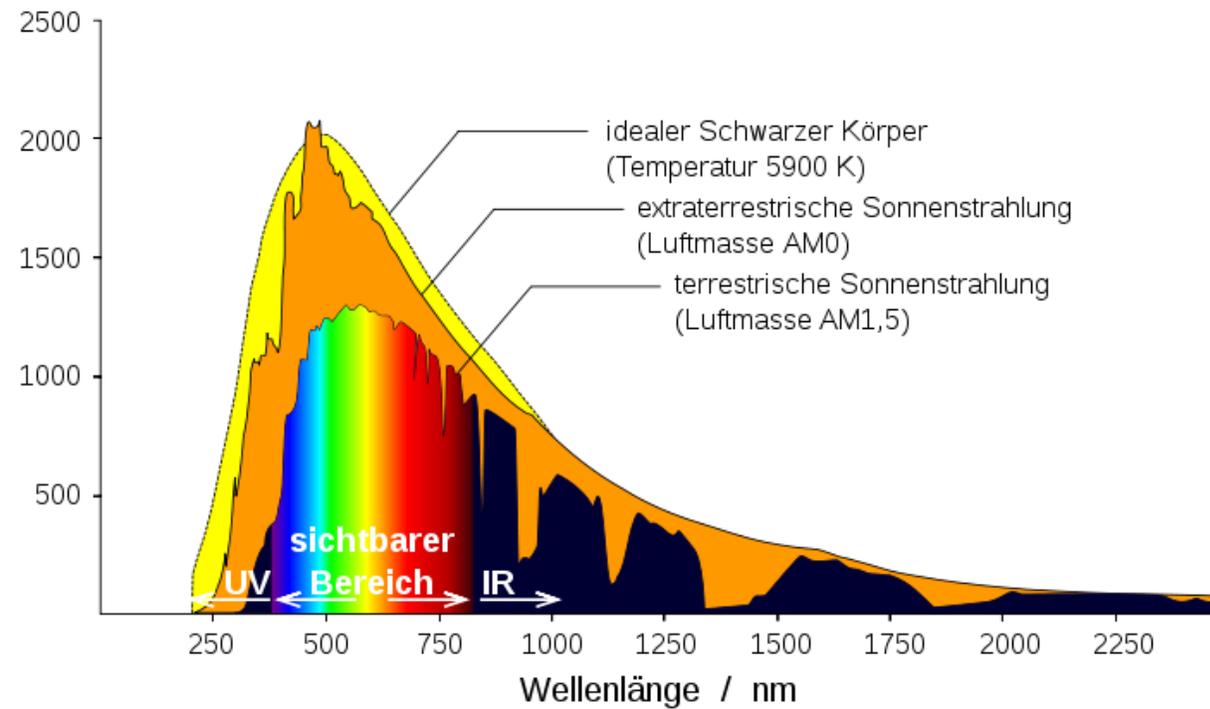
$$\frac{E_\lambda(T)}{\varepsilon(\lambda)} = B_\lambda(T)$$

spektraler Strahlungsfluss grauer Körper (unabh. von Material)      spektraler Strahlungsfluss schwarzer Körper



- Daraus folgt auch:  $\varepsilon(\lambda) = a(\lambda)$ 
  - spektrales Emissionsvermögen = Absorptionsvermögen

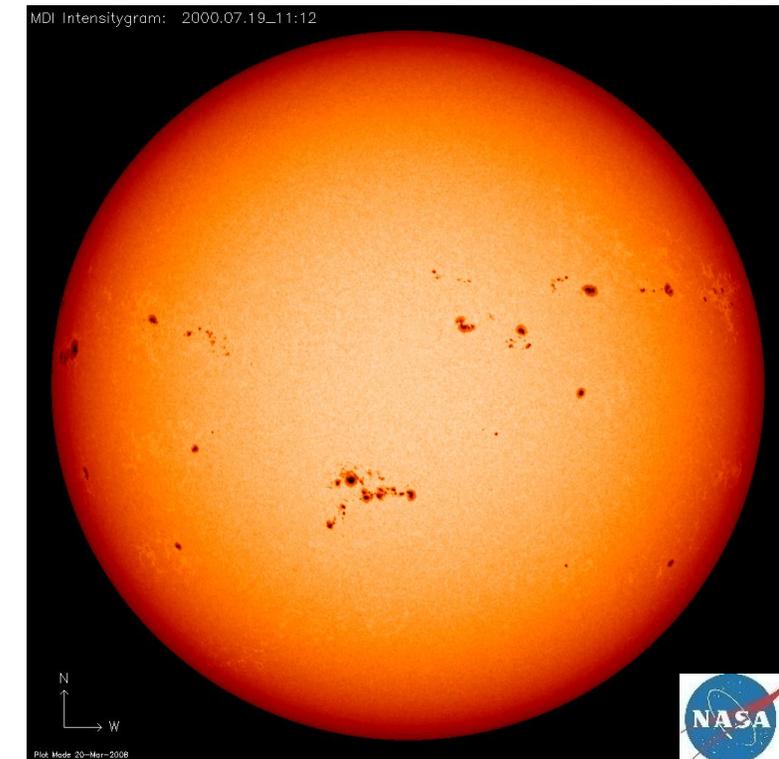
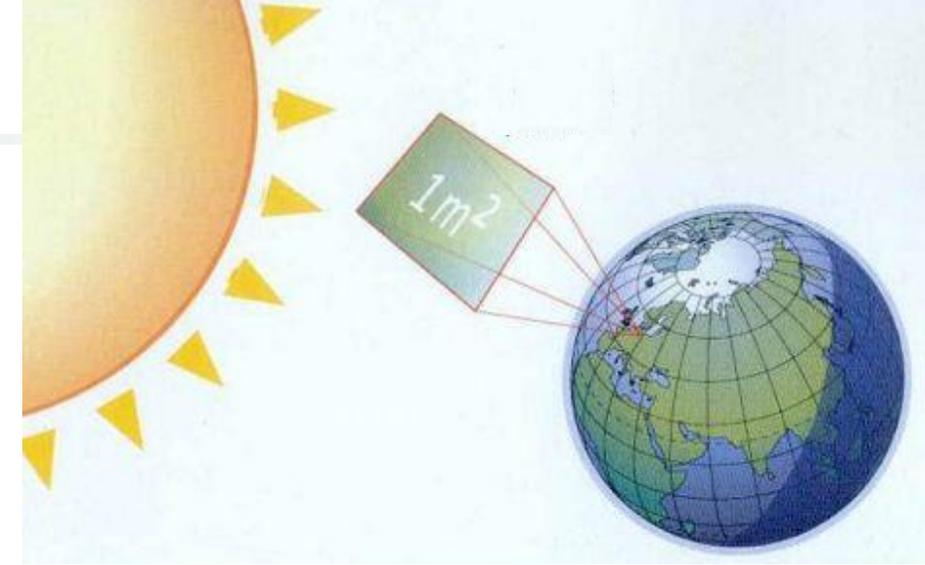
## 6.3 Solare Strahlung



## 6.3.1 Die Solarkonstante

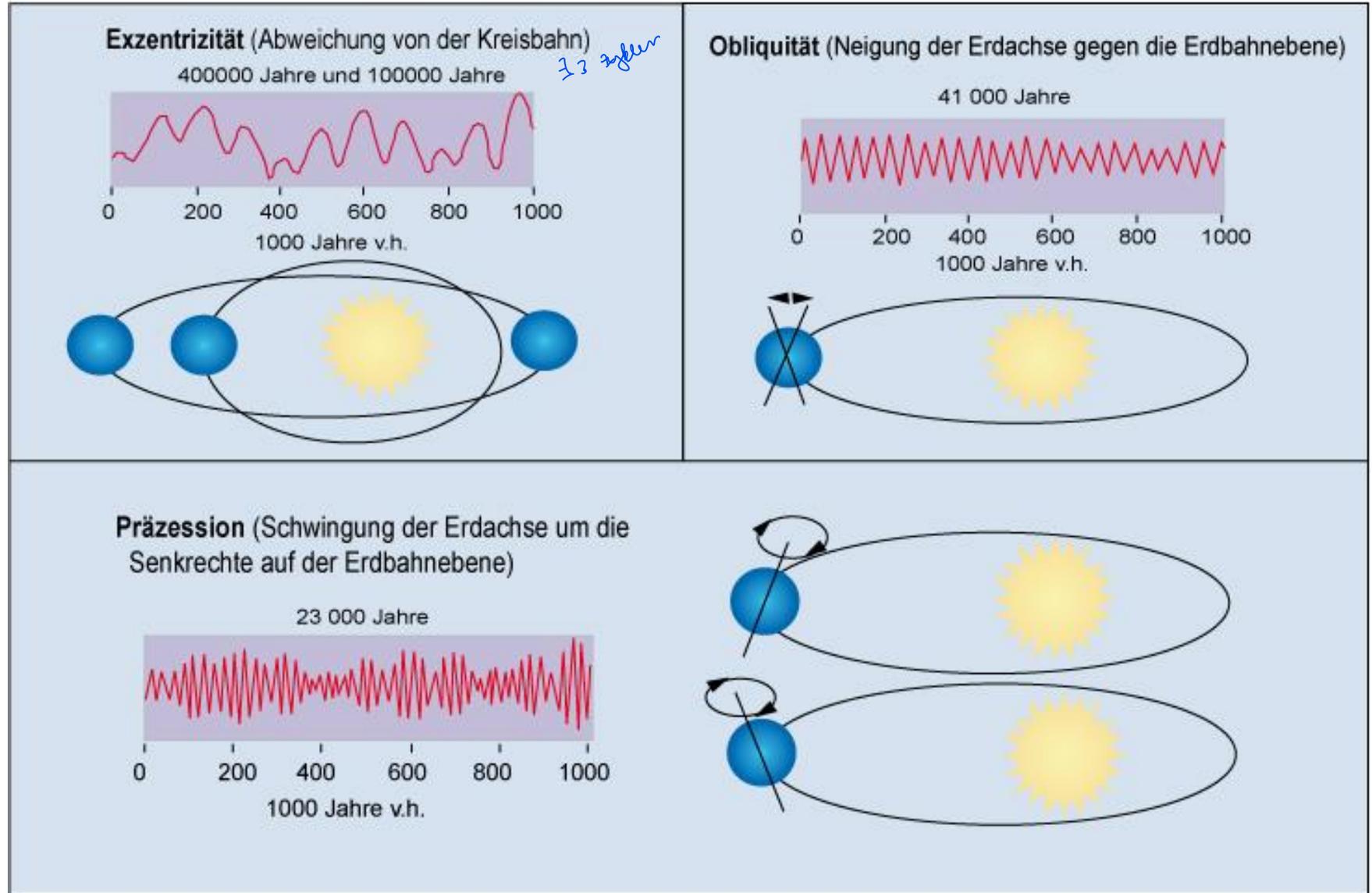
### Solarkonstante

- Sonne: annähernd Plank'sches Schwarzkörperspektrum
- **Solarkonstante  $S_0$** : solare Strahlungsflussdichte, die am „Oberrand“ der Atmosphäre auf einer senkrecht orientierten Einheitsfläche ( $1 \text{ m}^2$ ) ankommt (keine Extinktion) beim mittlerem Abstand Sonne – Erde ( $1,496 \times 10^8 \text{ km}$ )  
*(elliptisch)*
- **Schwankungen:**
  - (Jahreszeiten Perihel / Aphel:  $1413 / 1321 \text{ W m}^{-2}$ )
  - Sonnenfleckenzyklus (v.a. 11 Jahre, teilw. länger)  
*periodisch*
  - Abstand Sonne – Erde (Milanković-Zyklen)



# 6.3.1 Die Solarkonstante

## Milanković-Zyklen



wiki.bildungsserver.de

# 6.3.1 Die Solarkonstante

## Berechnung Solarkonstante

- Annahme: emittierter Strahlungsfluss Gesamtfläche Sonne = ankommender Strahlungsfluss auf Kugelschale Abstand Erde (keine Extinktion = Absorption + Streuung)
- Anwendung Stefan-Boltzmann Gesetz mit Integration über Oberfläche

$$4\pi R_{So}^2 \sigma T_{So}^4 = 4\pi \overline{R}_{So-Erde}^2 S_0$$

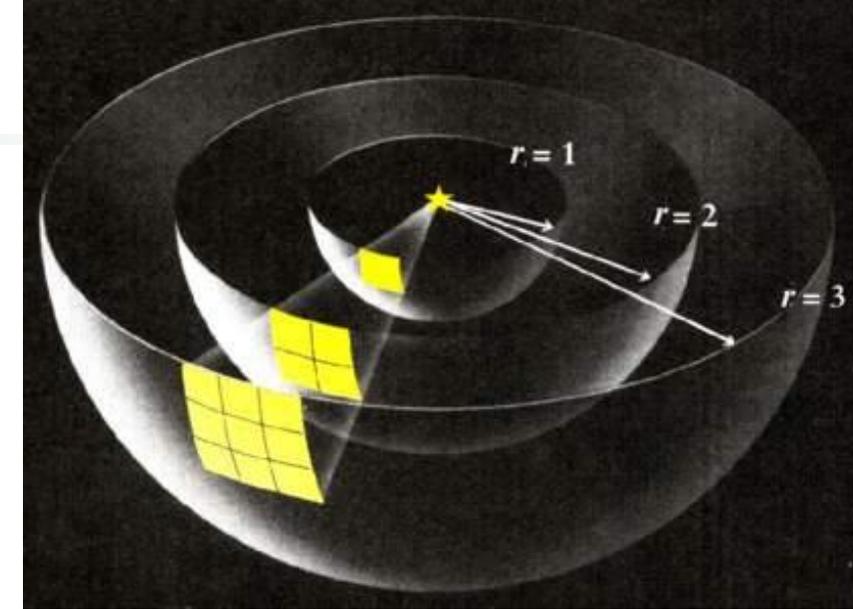
emittierter Strahlungsfluss Sonne ( $R_{So}$  : Radius Sonne)  
*aus Gesamtfläche Kugel*

Ankommender Strahlungsfluss Kugelschale Abstand Sonne-Erde

$$\Rightarrow S_0 = \frac{R_{So}^2}{\overline{R}_{So-Pl}^2} \sigma T_{So}^4 = \left( \frac{6.96 \cdot 10^8}{1496 \cdot 10^8} \right)^2 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 5778^4 \text{ W m}^{-2}$$

$$S_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$$

Effektive Strahlungstemperatur Sonne



# Fragen über Fragen...

■ Schätzen Sie: welchen Anteil der einfallenden Solarstrahlung **reflektiert die Erde**? 31%

■ Was reflektiert mehr: **Erdoberfläche** (inkl. Eisflächen) oder **Atmosphäre**?  
*→ A. deutlich mehr*  
*↳ viel Meer (je nach Winkel, aber v.a. Absorption)*  
*wolken*

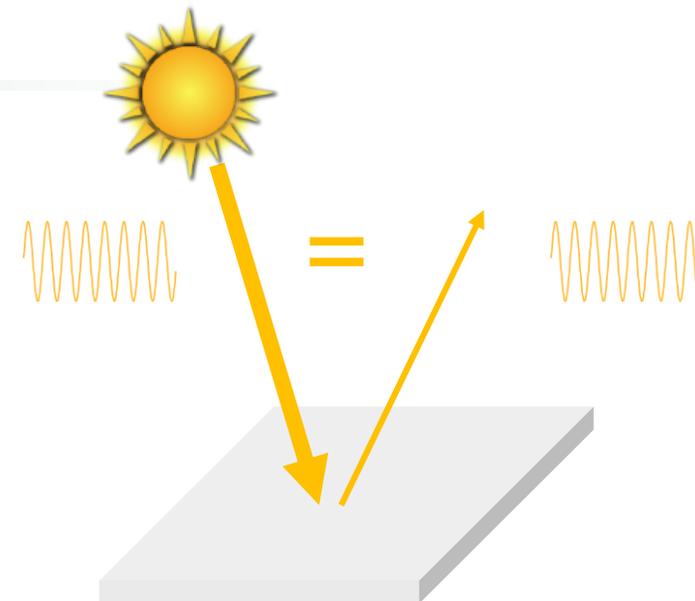
■ Wodurch ändert sich die **Reflexion** der Erde?  
*(in letzten ~100 Jahren)*  
*Aerosole*  
*wolken*  
*Abschmelzen Polkappen*  
*Abholzung*  
*(nflauf. Ökosysteme großen Einfluss)*

■ Wie bezeichnet man solche Vorgänge im Klimasystem? *Rückkopplung*

## 6.3.2 Albedo

### Albedo (kurzwellig)

- Teil der einfallenden solaren Strahlung, der direkt an der Oberfläche **reflektiert** wird
  - **keine Absorption** an der Oberfläche (keine Änderung der Temperatur)
  - **keine Änderung der Wellenlänge**



- **Albedo**: Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung

$$A = \text{Albedo} = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{einfallende Strahlung}} \quad (\text{heißt auch: } 1-A \text{ wird absorbiert})$$

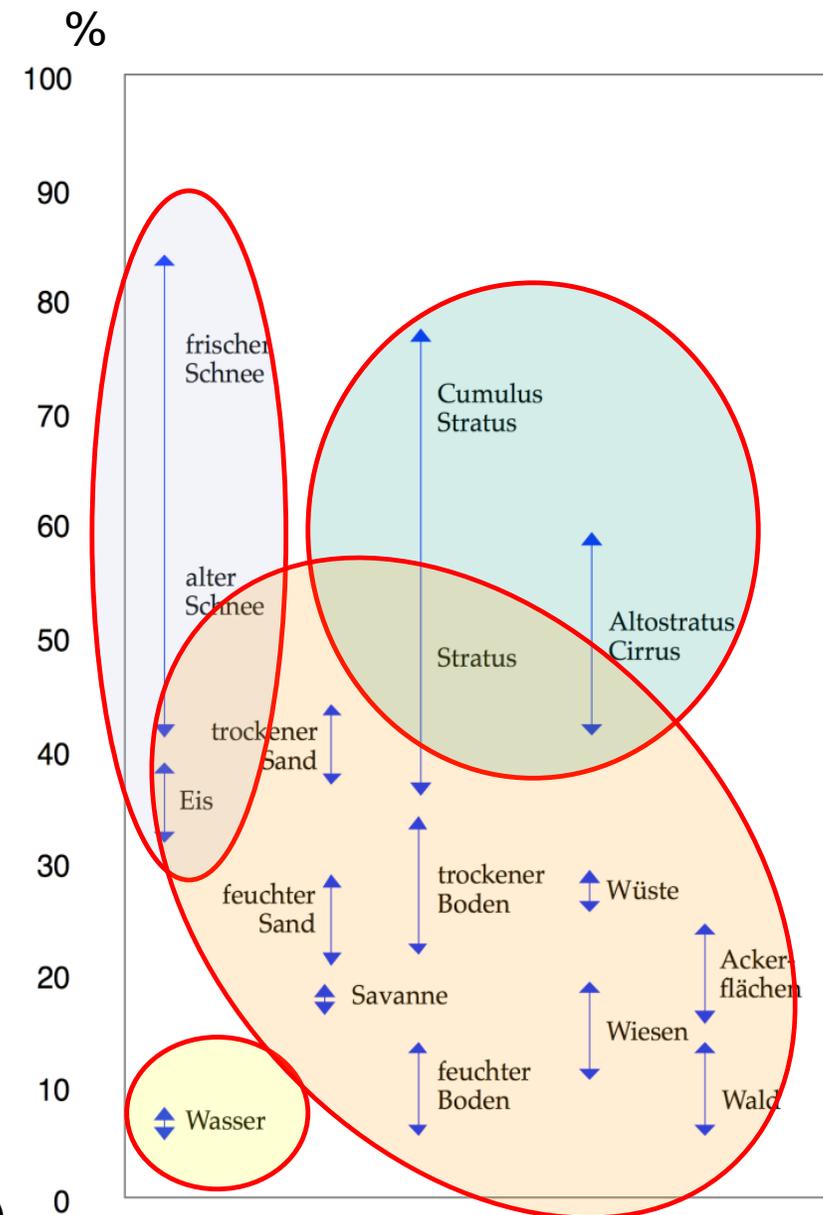
- Planetare Albedo: **Mittel:  $A = 0,313$**  (Donohoe and Battisti, 2011)

## 6.3.2 Albedo

### Kurzweilige (!) Albedo einiger terrestrischer Oberflächen

Oberfläche	Albedo (%)
frischer Schnee	75–95
alter Schnee → <i>schmilzt schneller</i>	40–70
Wolken	60–90
Felsen	10–40
Wiese	10–30
Wald	10–20
Asphalt	5–20
Wasserfläche (Auftrittswinkel > 45°) → siehe nächste Folie	6–12

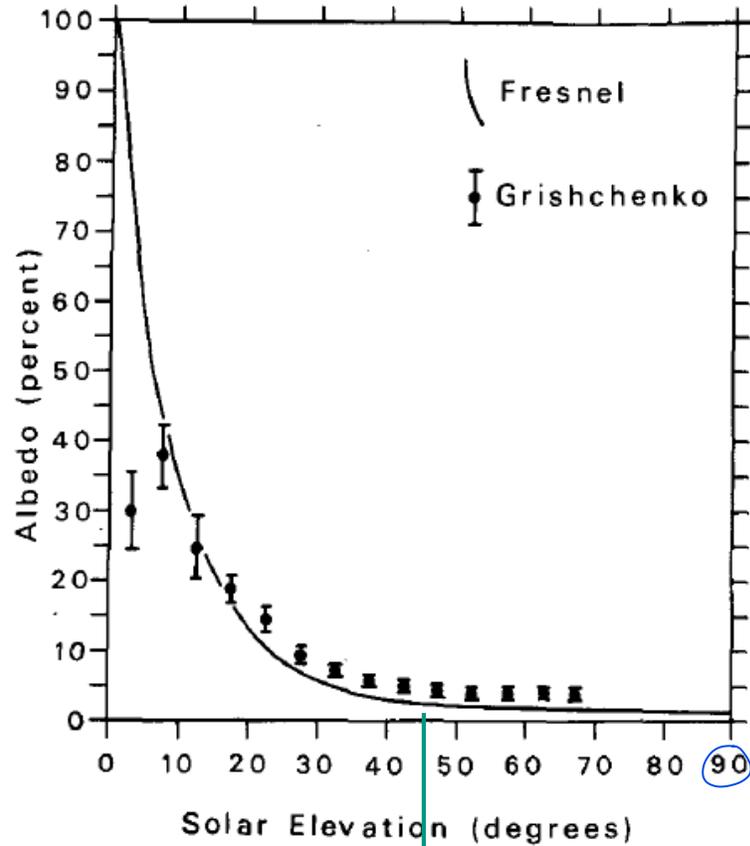
(Zahlenwerte: Kraus, 2007)



(Quelle: wikipedia)

## 6.3.2 Albedo

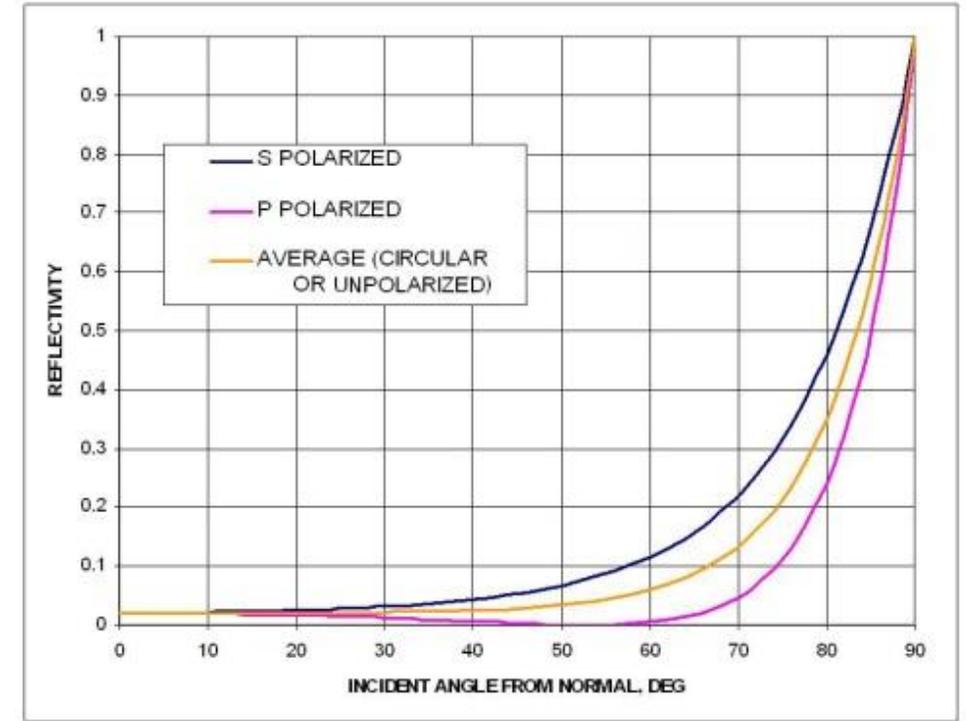
- Albedo Wasserflächen in Abhängigkeit von Auftreffwinkel solarer Strahlung und Polarisationsart (berücksichtigt: mittlere Wellenlänge)



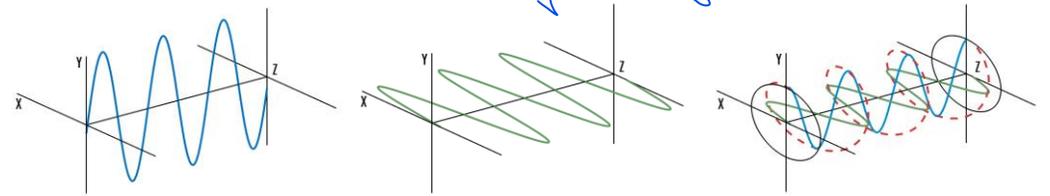
(Cogley, 1979, MWR)

45°

(je flacher  $\angle$ , desto tiefer?)



abh. von Polarisationsrichtung Strahlung

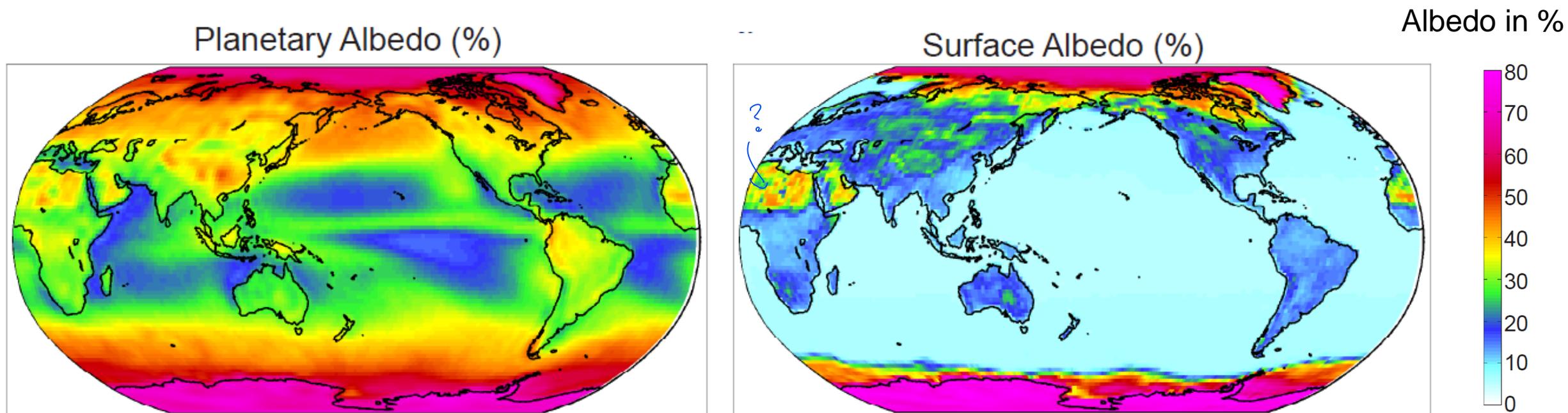


(<https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-polarization>)

## 6.3.2 Albedo

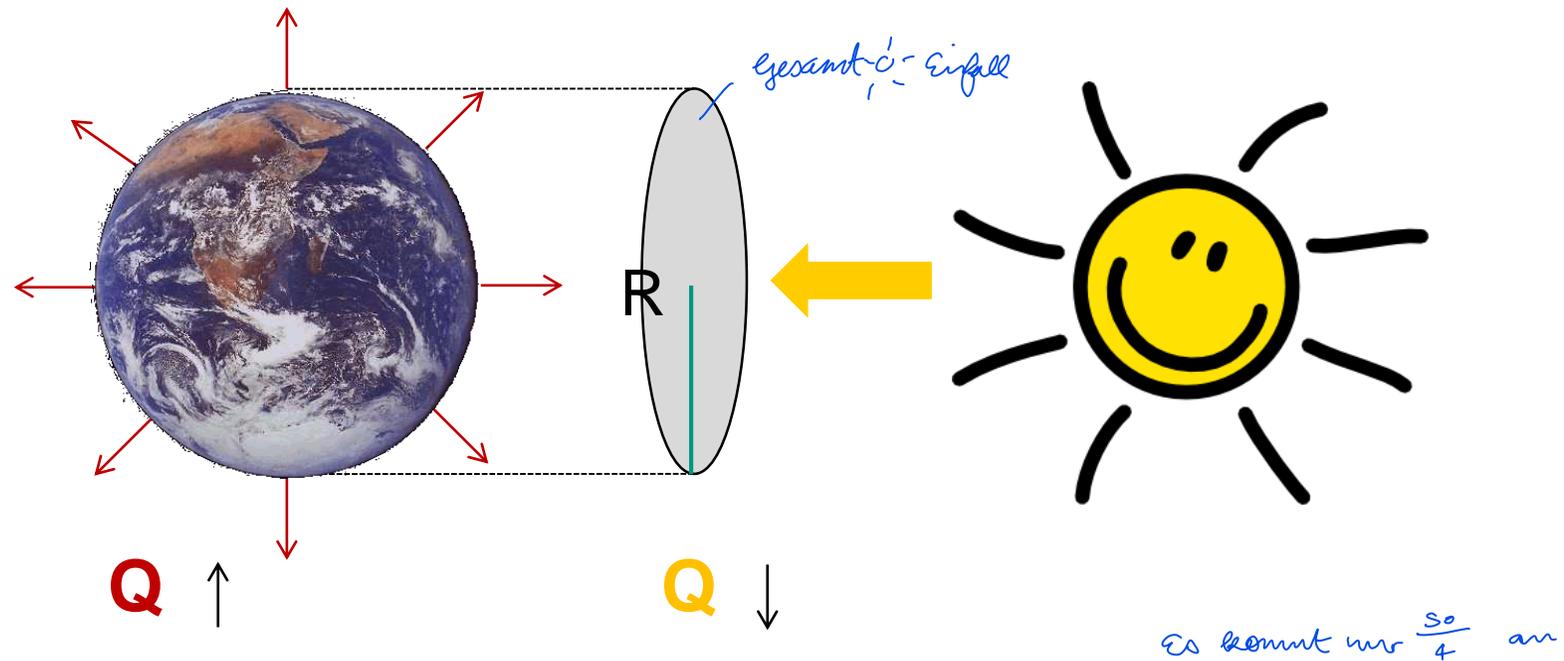
### Globale Verteilung der Albedo

- Größter Anteil der globalen planetaren Albedo (88%) resultiert aus Reflexion in der Atmosphäre (Gase, Wolken);
- Bodenalbedo gering v.a. wegen großen Meeresflächen, die wenig reflektieren



(Donohoe and Battisti, 2011)

## 6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle



**Annahme: Sonne und Erde im Strahlungsgleichgewicht**

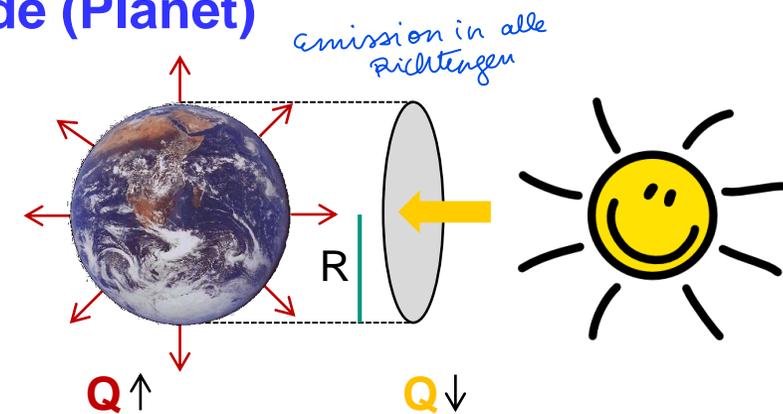
## 6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle

### Anwendung: Berechnung Strahlungstemperatur Erde (Planet)

- **Annahme 1:** Sonne und Erde im **Strahlungsgleichgewicht**

→ Einstrahlung Sonne  $Q_{\downarrow}$  =  
Ausstrahlung Erde  $Q_{\uparrow}$

↓  
↑



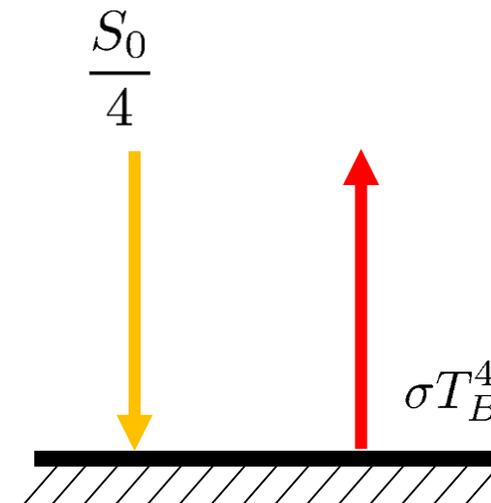
$$\cancel{S_0 \pi R^2} = \cancel{4\pi R^2} \sigma T_B^4 \quad (R = \text{Radius Erde})$$

$$\Rightarrow \frac{S_0}{4} = \sigma T_{\text{Boden}}^4$$

$$\Rightarrow T_B = \sqrt[4]{\frac{S_0}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1367 \text{ K}^4}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}}$$

$$\Rightarrow T_B = 278,6 \text{ K}$$

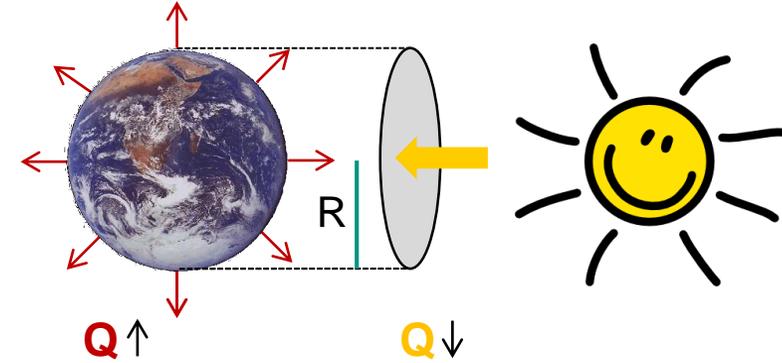
(ohne Atmosphäre)  
eig. 16°C im Mittel



## 6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle

### Anwendung: Berechnung Strahlungstemperatur Erde (Planet)

- **Annahme 2:** Sonne und Erde im Strahlungsgleichgewicht und **planetare Albedo (= 0,313)**



$$\frac{Q \downarrow}{S_0} = \frac{Q \uparrow}{\sigma T_B^4} + \frac{Q \uparrow}{4} \cdot A$$

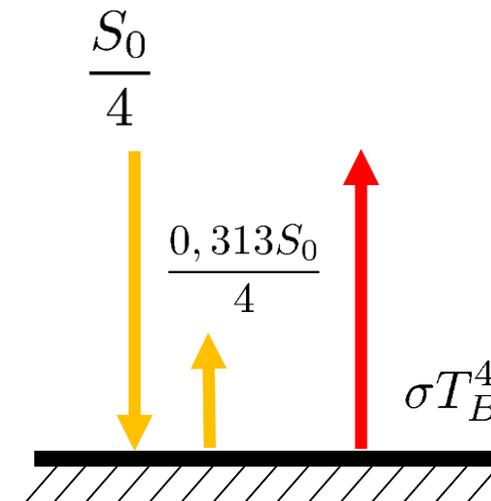
$$\Rightarrow \frac{S_0(1 - A)}{4} = \sigma T_B^4$$

$$\Rightarrow T_B = \sqrt[4]{\frac{S_0(1 - A)}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{0,687 \cdot 1367 \text{ K}^4}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}}$$

$$\Rightarrow T_B = 253,7 \text{ K}$$

(sehr kalt)

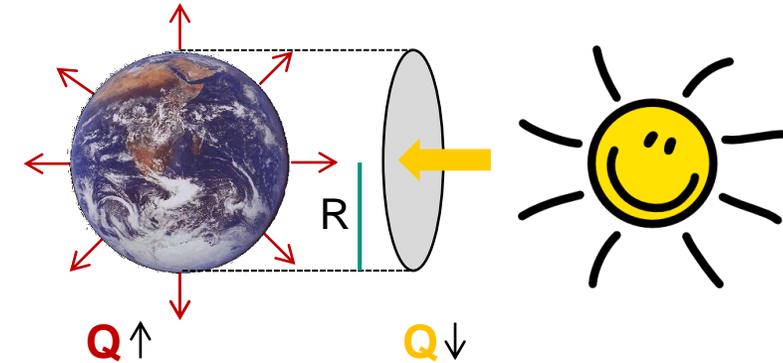
(Reflexion klein)



## 6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle

### Anwendung: Einfaches Glashaussmodell

- **Annahme 3:** Sonne und Erde im Strahlungsgleichgewicht, **planetare Albedo** und **Atmosphäre**



– Für A gilt:

$$\sigma T_B^4 = 2\sigma T_A^4$$

– Für B gilt:

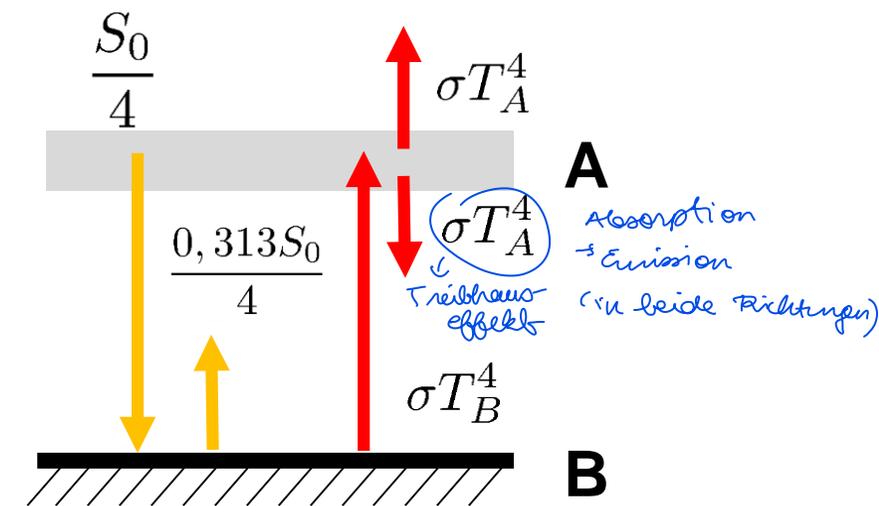
$$(1 - A) \frac{S_0}{4} + \sigma T_A^4 = \sigma T_B^4$$

$$\Rightarrow T_A = 253,7 \text{ K}$$

$$\Rightarrow T_B = 301,9 \text{ K}$$

→ siehe nächstes Übungsblatt

*mit atm.  
Gegenstrahlung*



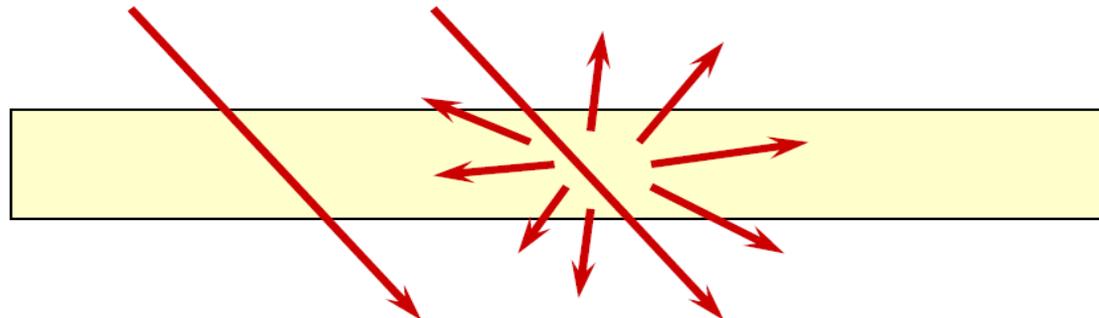
# Fragen über Fragen...

- Wieso ist der Himmel **blau**? *blaues Licht stärker gestreut ( $\lambda$  kurz), Rayleigh-Streuung*
- Wieso sind **Sonnenuntergänge** vor allem im Herbst/Winter oder nach Vulkanausbrüchen rot? *Refraction, langer Weg durch Atmosph., blau wird weggestreut  
Vulkanausbrüche  $\rightarrow$  Aerosole (Streuung)*
- Was ist **Streuung**? *Art Reflexion ohne  $\Delta\lambda$ , Verhältnis  $\frac{\lambda}{\text{Größe Streukörper}}$*
- Wie wird Strahlung **absorbiert**? *Energieniveaus Elektronen, später Reemission  
(außer Photodissoziation) Schwingungsrotationsbanden Moleküle*
- Welche Gase sind am wichtigsten für die Absorption **solarer Strahlung**? *O<sub>3</sub>, Wasserdampf, CO<sub>2</sub>*

## 6.3.4 Streuung

### Streuung

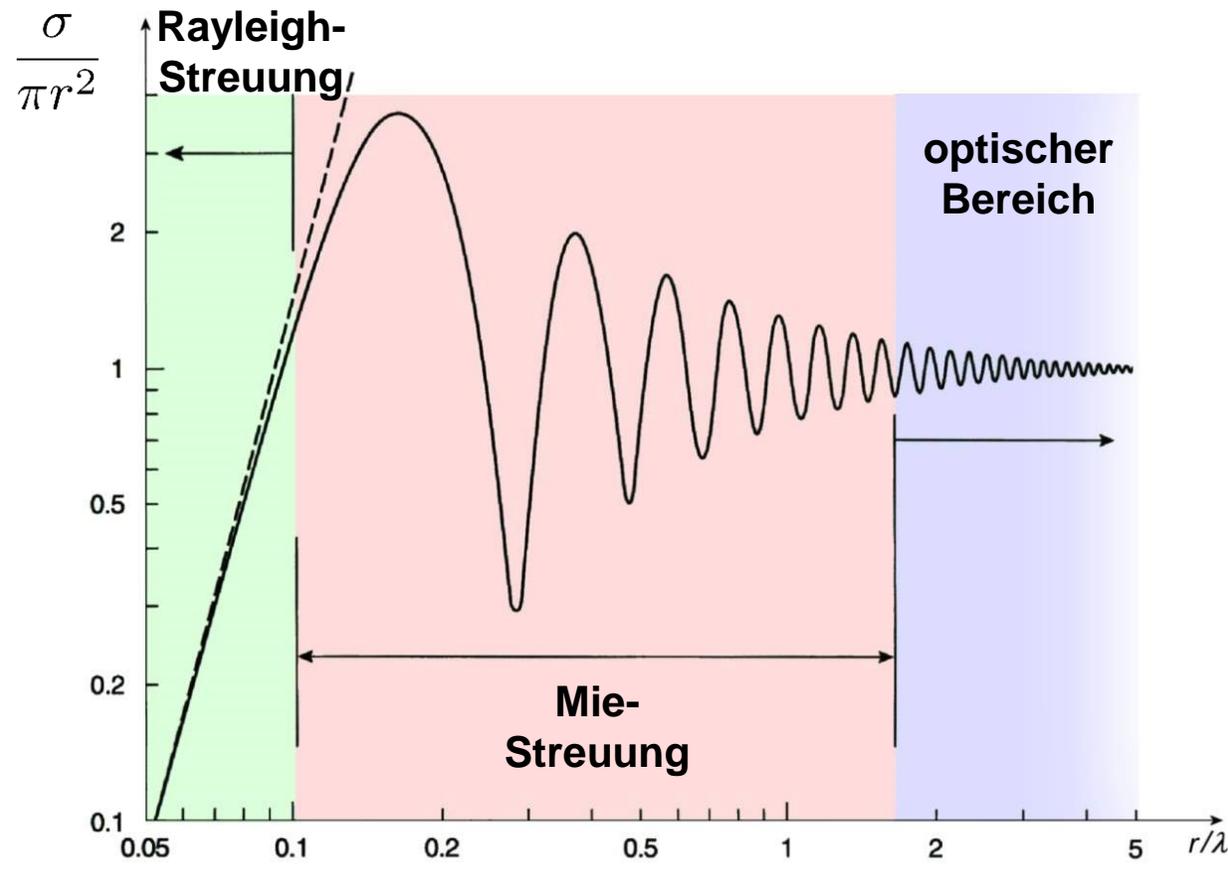
- Abschwächung der Strahlungsintensität in einer Richtung
  - Umverteilung der Strahlungsenergie in andere Raumrichtungen
  - Wellenlänge (Frequenz) bleibt konstant
  - keine Absorption / Emission (z.B. Wärmeenergie)
- Streukörper: Luftmoleküle, Aerosole, Wolkentröpfchen, Niederschlag,...
- Streuung abhängig von
  - Wellenlänge (relativ zur Größe des Streukörpers)
  - Radius Partikel (Annahme: kugelförmige Teilchen)



## 6.3.4 Streuung

### Verschiedene Arten der Streuung

- Rückstreuquerschnitt  $\sigma$  (normiert mit Fläche des Streuers) als Funktion des Größenparameters  $\alpha$  (Radius/Umfang normiert mit Wellenlänge)



(Quelle: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu))

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

## 6.3.4 Streuung

### Rayleigh-Streuung

- Streuung an **kleinen Streukörpern**  $r \ll \lambda$  ( $r = \text{Radius}$ ); z.B. Streuung solarer Strahlung an Luftmolekülen
- **Streukoeffizient** (Streuquerschnitt Molekül in  $\text{m}^2$ )

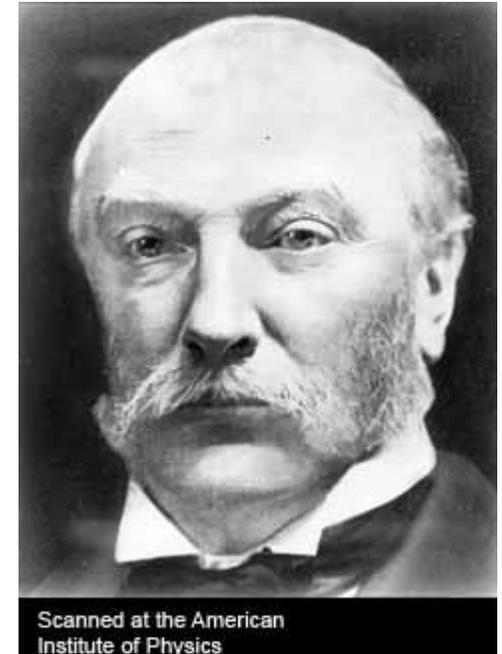
$$s_\lambda = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N^2\lambda^4} \rightarrow s_\lambda \sim \lambda^{-4}$$

$N$ : Anzahldichte Moleküle

$n$ : Brechungsindex

- Kürzere Wellenlängen werden sehr viel stärker gestreut als lange Wellenlängen
- Beispiel: Verhältnis Streuung zwischen blauem ( $\lambda \approx 0,47 \mu\text{m}$ ) rotem ( $\lambda \approx 0,64 \mu\text{m}$ ) Licht

$$\frac{s_\lambda(\lambda = 0,47 \mu\text{m})}{s_\lambda(\lambda = 0,64 \mu\text{m})} = \left(\frac{0,64}{0,47}\right)^4 = 3,45$$



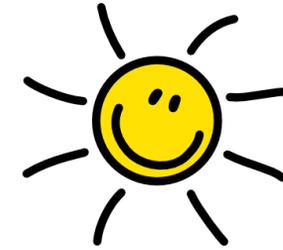
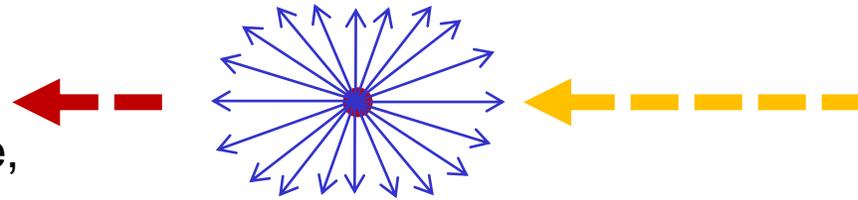
John William Strutt, Baron Rayleigh (1842-1919); engl. Physiker; 1904 Nobelpreis

## 6.3.4 Streuung

### Rayleigh-Streuung der solaren Strahlung

- Erklärung ‚blauer Planet‘, Himmelsblau, Abendrot

**rotes** Licht wenn viel gestreut wird (tiefstehende Sonne, langer Weg durch Atmosphäre)



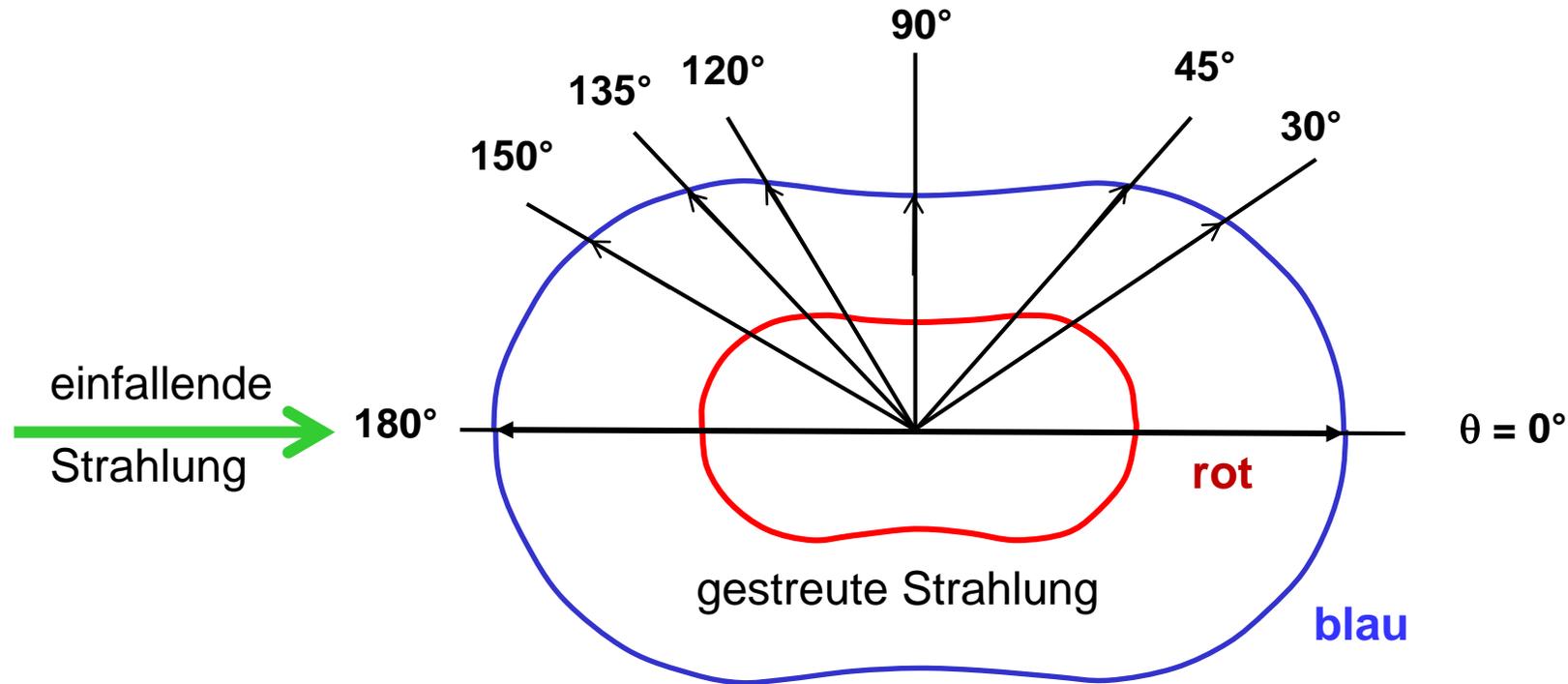
**blaues** Licht



## 6.3.4 Streuung

### Rayleigh-Streuung

- **Richtung der Streuung:** Vorwärts- und Rückwärtsstreuung vom Betrag her gleich, seitliche Streuung etwas geringer

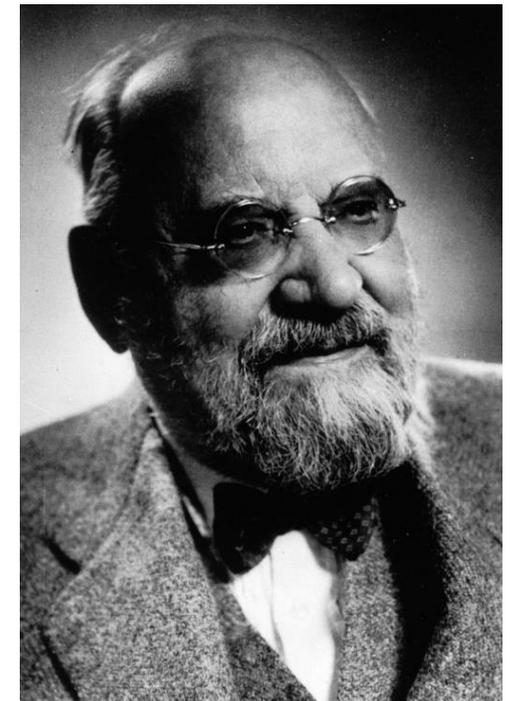
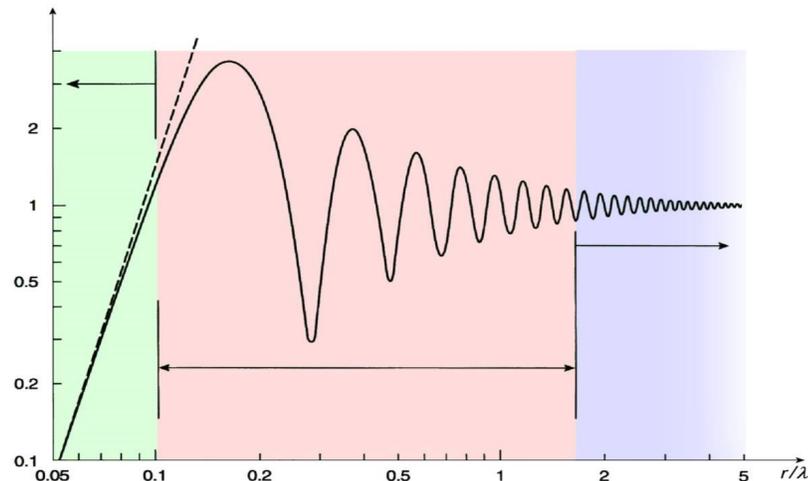


## 6.3.4 Streuung

### Mie-Streuung

- Streuung an **größeren sphärischen Teilchen**: Dunst, Staub, Rauch,..
- Streuung der solaren Strahlung ~ **unabhängig von Wellenlänge**
  - gestreutes Licht erscheint je nach Dichte als grau oder weiß (z.B. Wolken)
- Streukoeffizient kann nicht direkt angegeben werden, da er stark vom Größenparameter  $\alpha$  bzw. der Wellenlänge  $\lambda$  abhängt

$$s_{\lambda} \sim \lambda^{-x} \quad x = 0,5 \text{ bis } 3$$

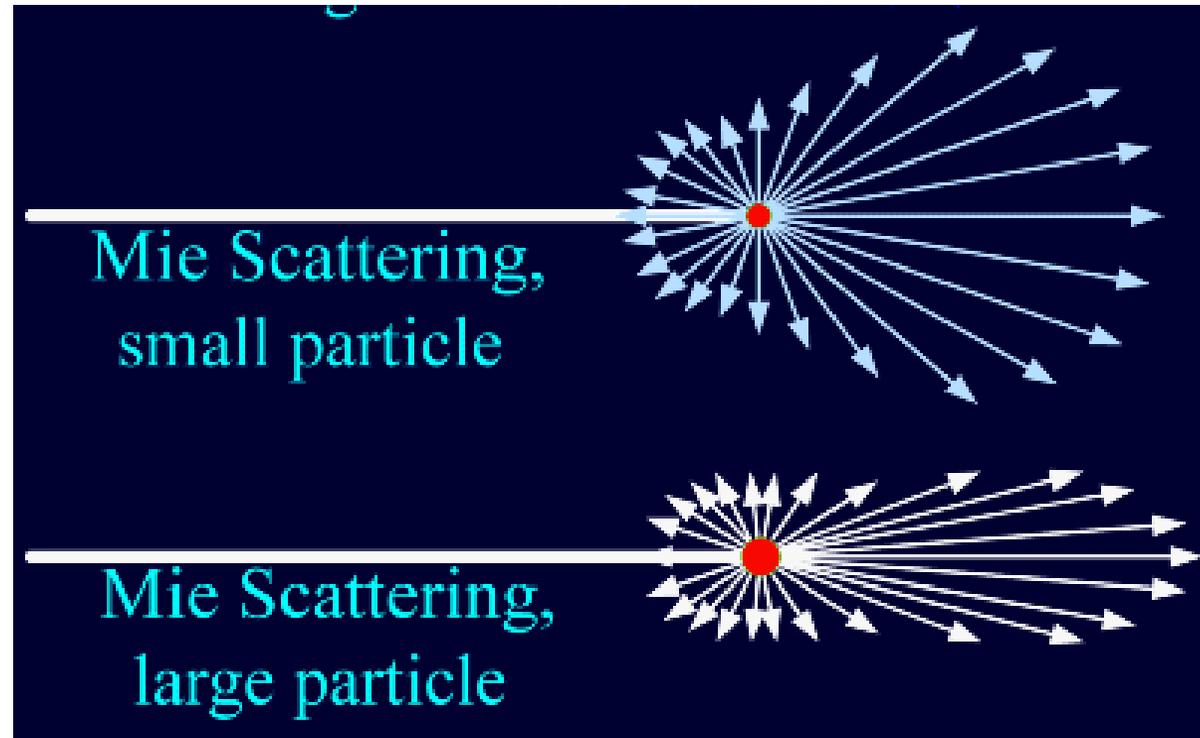


Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (1868-1957); dt. Physiker

## 6.3.4 Streuung

### Mie-Streuung

- **Richtung der Streuung** abhängig von Größe der Streukörper
- generell gilt: **Vorwärtsstreuung** überwiegt, vor allem bei größeren Teilchen



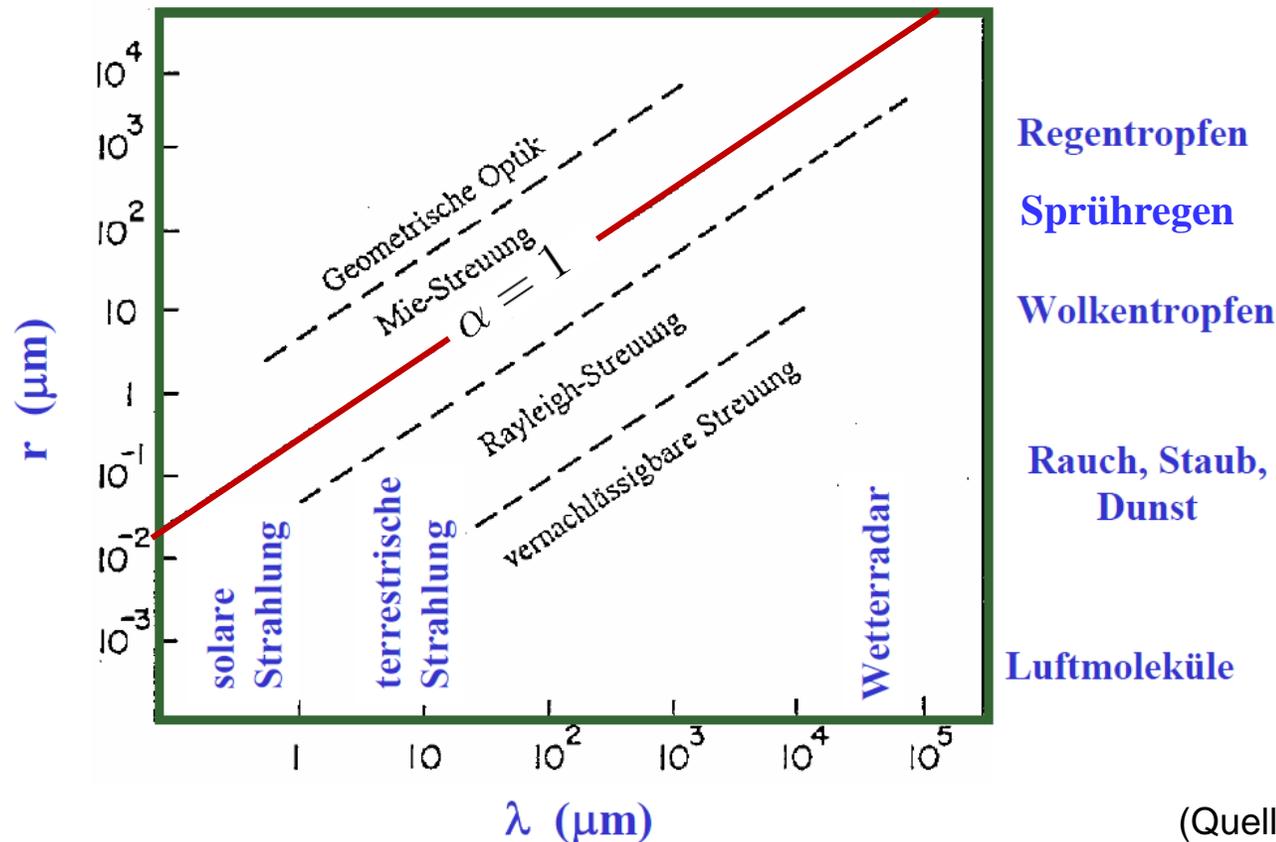
(Quelle: physics.stackexchange.com)

## 6.3.4 Streuung

### Abhängigkeit der Streuung von Wellenlänge und Radius

- Größenparameter  $\alpha$ : Verhältnis Kreisumfang zu Wellenlänge
- Wenn  $\alpha > 1$ : Mie; wenn  $\alpha \ll 1$ : Rayleigh

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$



(Quelle: R. Smith, 2004)

# Wir fassen zusammen...

- Ableitung Planck → Wiensches Verschiebungsgesetz

$$\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0 \quad \lambda_{max}T = 2898 \mu\text{m K}$$

- Kirchhoffsches Gesetz: berücksichtigt graue Körper

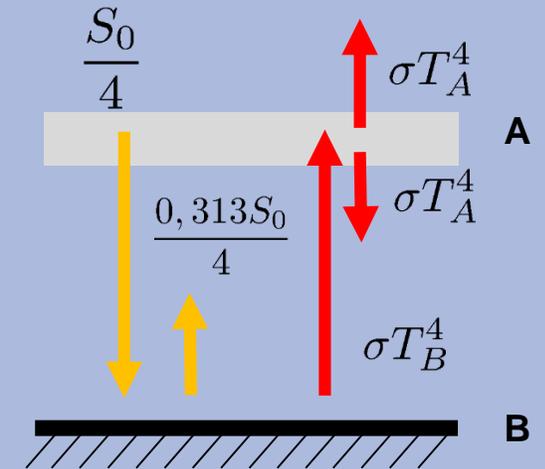
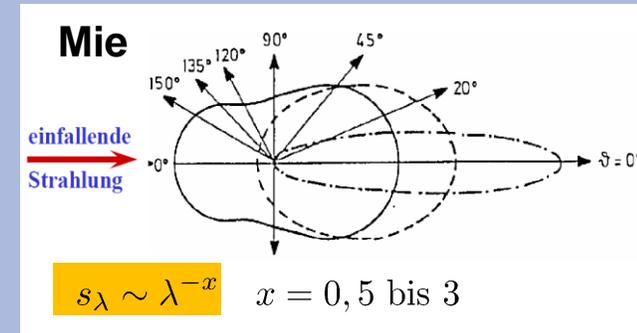
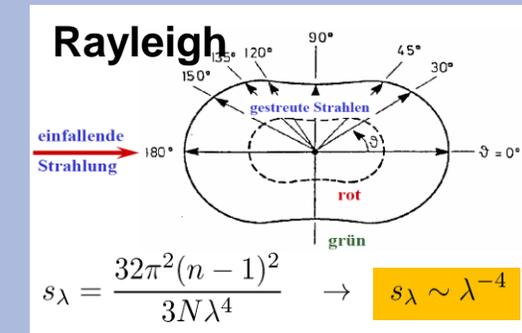
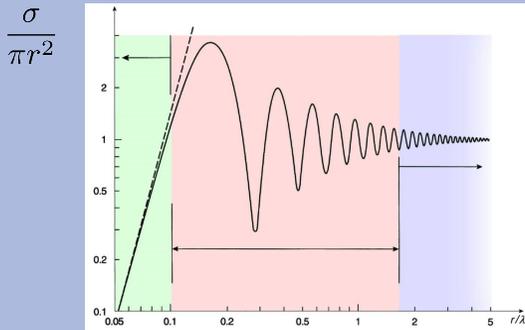
$$\frac{E_\lambda(T)}{\varepsilon(\lambda)} = B_\lambda(T)$$

- Solarkonstante: Strahlung „Oberrand Atmosphäre“, senkrechter Einfall

- Albedo:  $A = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{einfallende Strahlung}}$  Mittel:  $A = 0,313$

- Modelle für Strahlungsgleichgewicht ( $E = A$ )

- Streuung



# Evaluierung Vorlesung: Montag 12.12.

