

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz



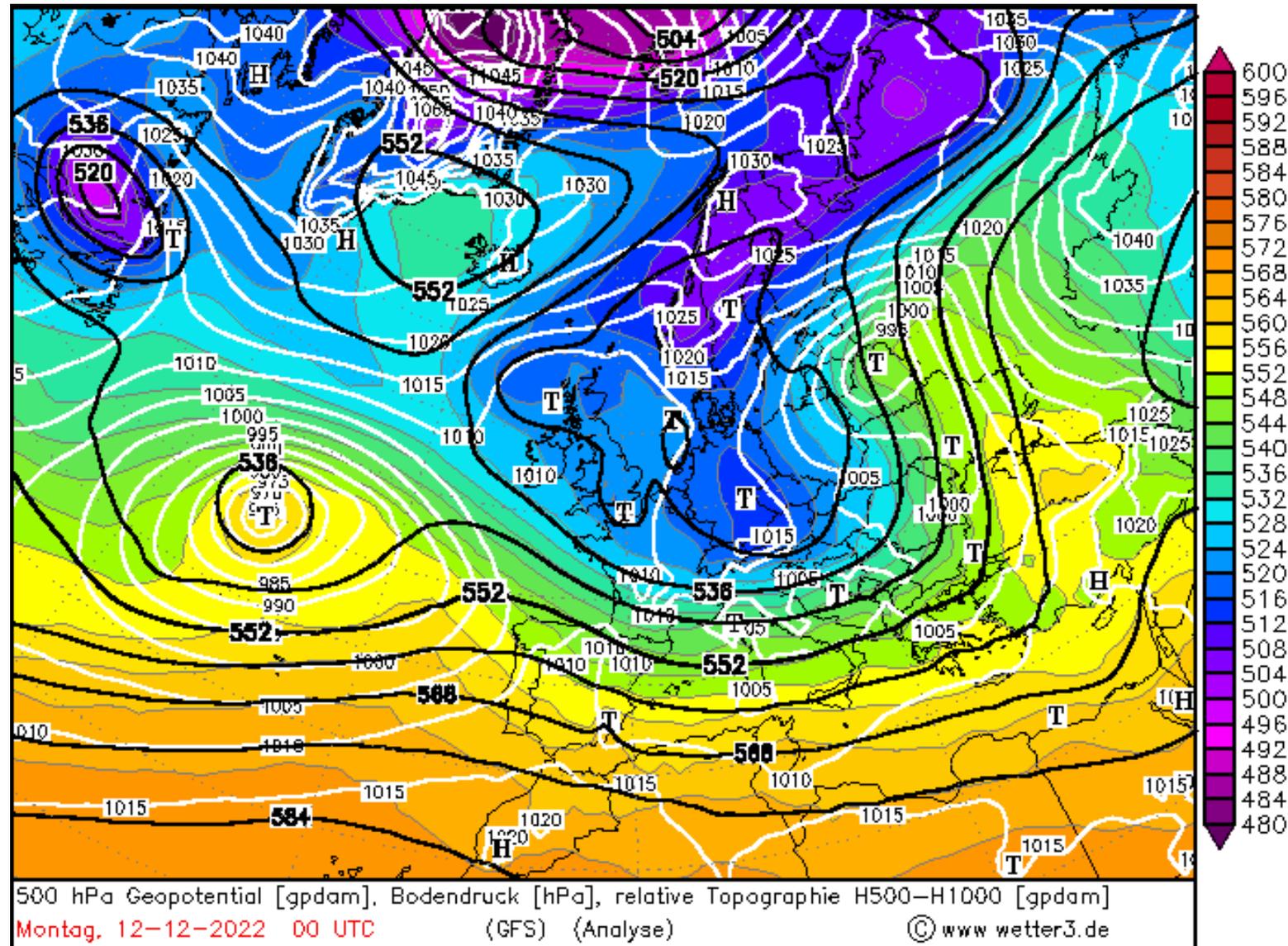
Evaluierung Vorlesung



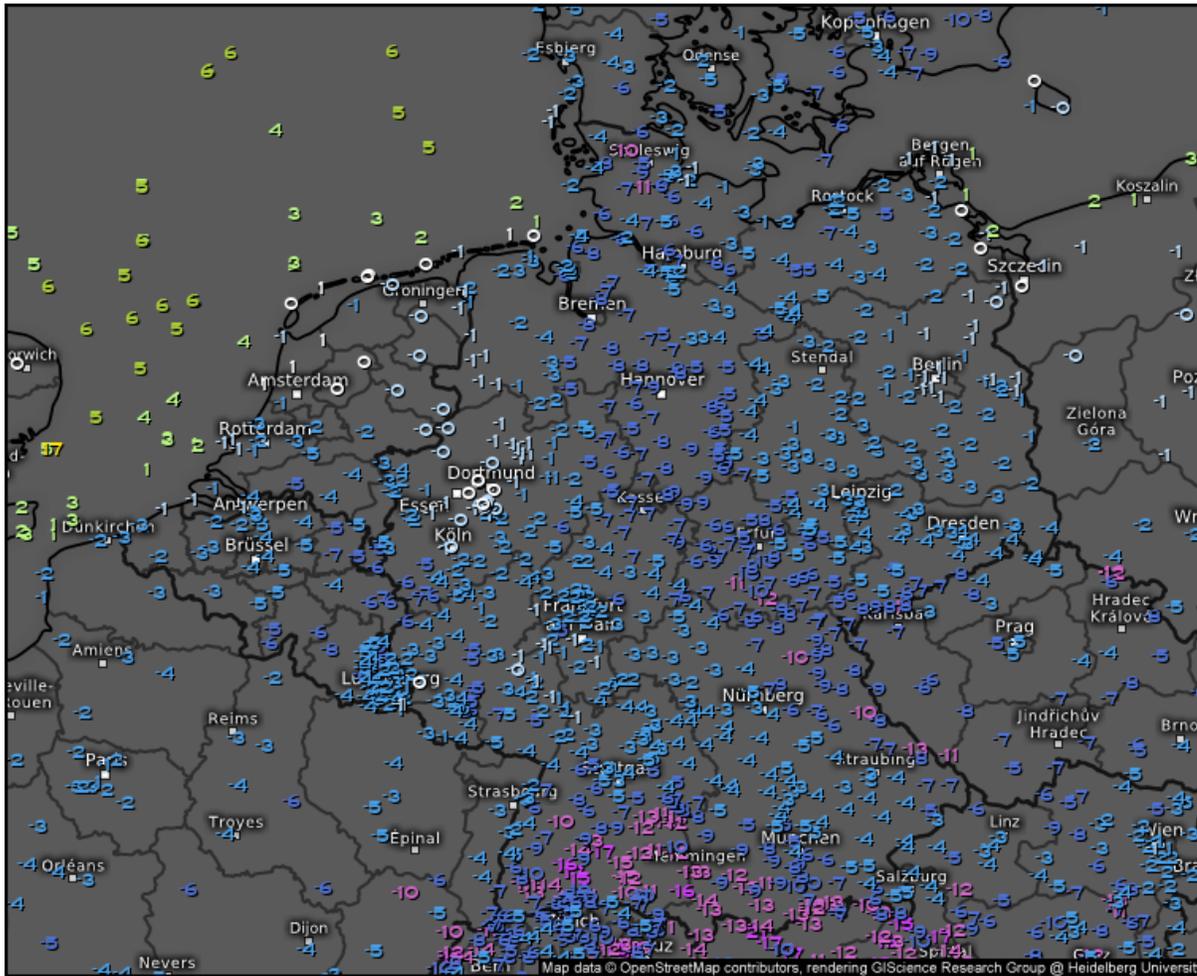
Das Wetter...



Entwicklung



Aktuelles Wetter

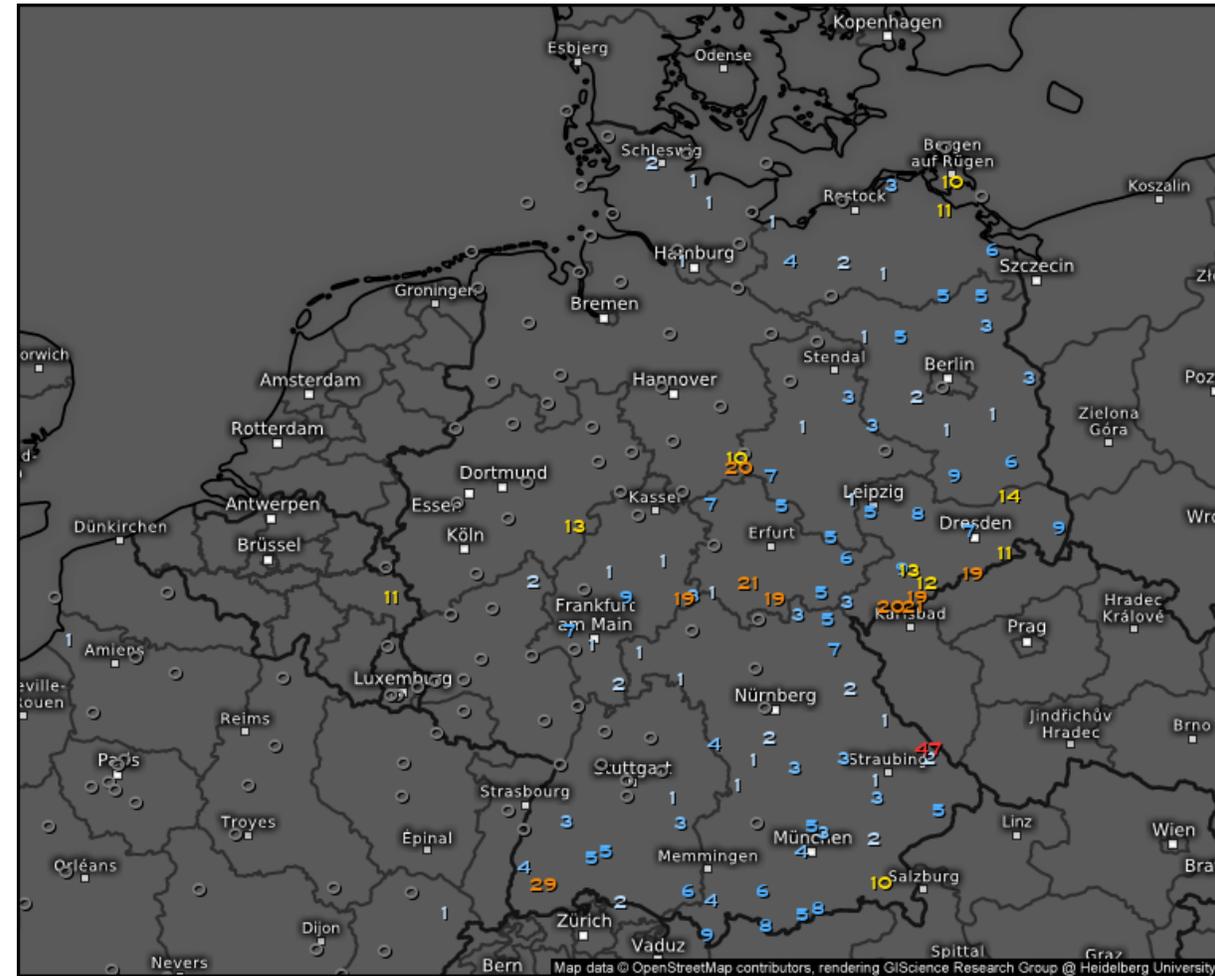


Temperatur 2m (°C)

Mo. 12.12.2022, 06:00 Uhr MEZ



-20 -15 -10 -5 -1 0 1 5 10 15 20 25 30 35 40



Schneehöhe (cm)

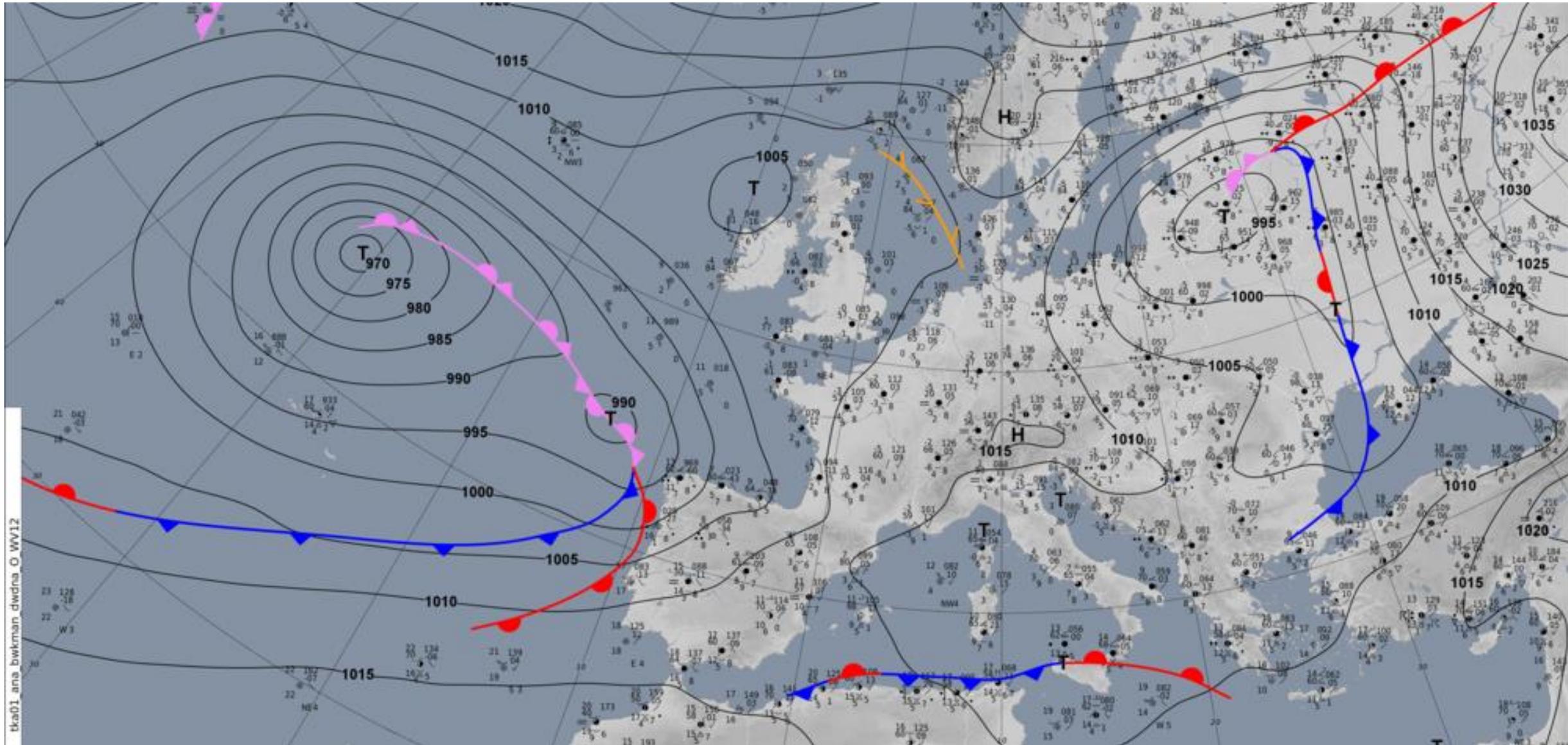
Mo. 12.12.2022, 10:00 Uhr MEZ



0 3 5 10 15 30 50 75 100

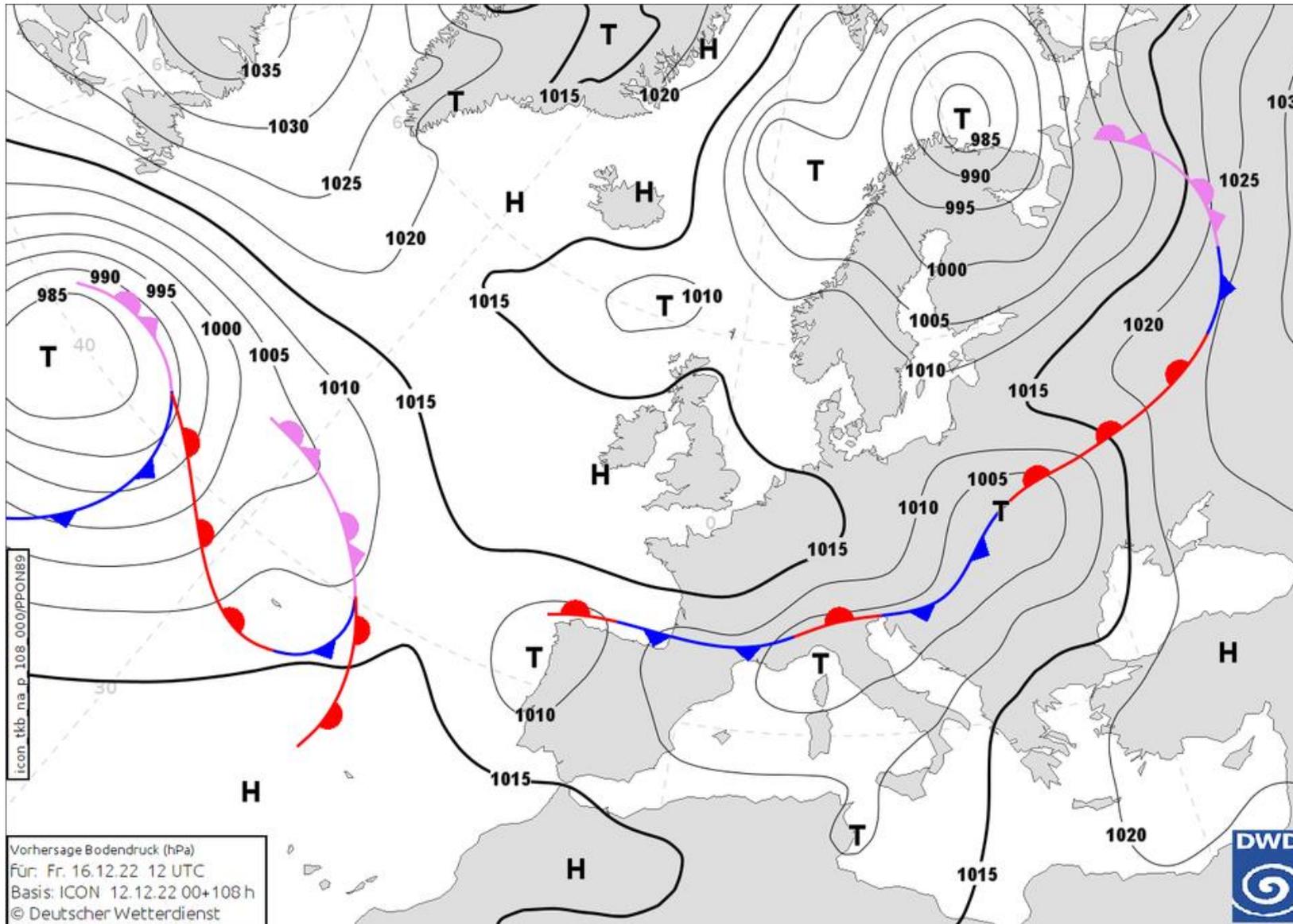
→ eig nur wenn Schnee liegt zweifelh. - Bereiche (wegen Albedo) & trockene Luft, klare Nacht

Bodenwetterkarte 12.12. 06:00



tka01 ana bwkman dwdna O WV12

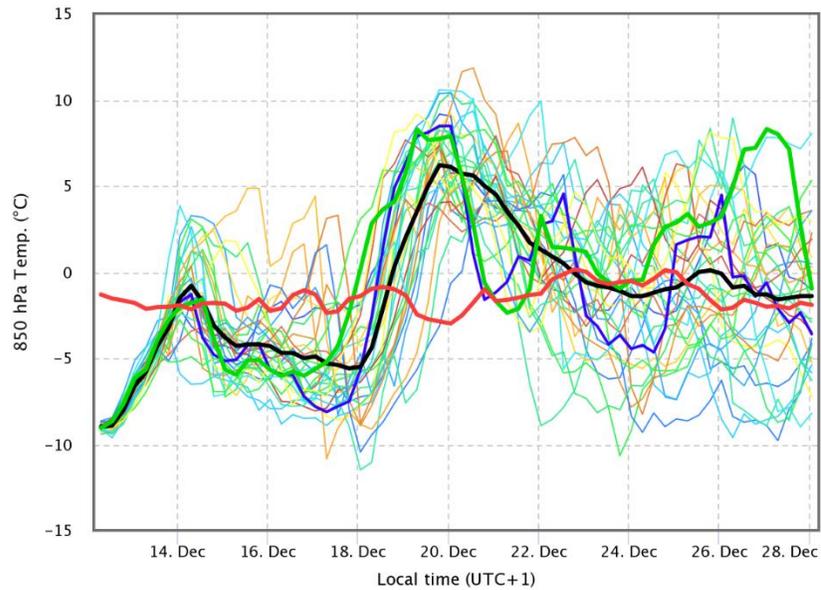
Bodenwetterkarte - Vorhersage



Vorhersage: Ensembles

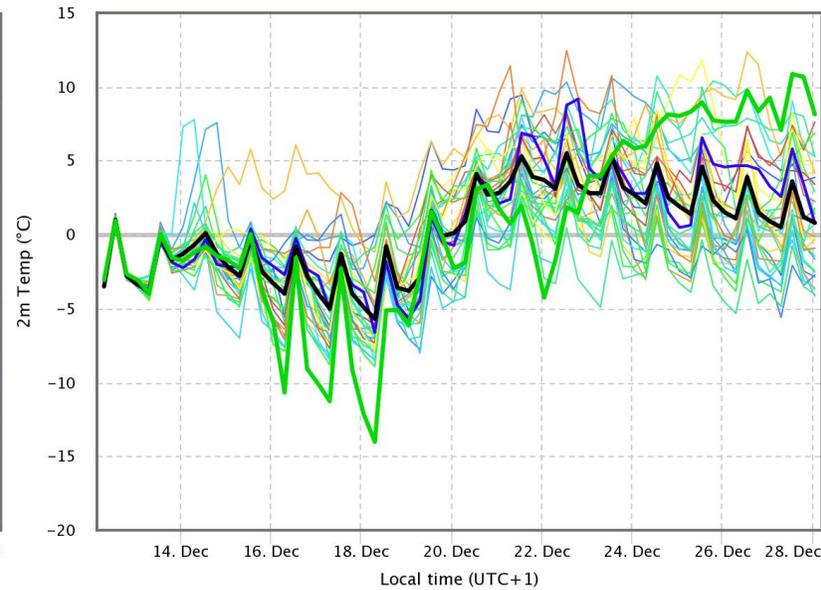
- Modell GFS (Global Forecast System) des amerik. Wetterdienstes NOAA
- 30 Ensemble Läufe
- Gitterpunkt Karlsruhe

T850



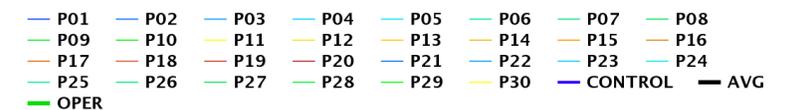
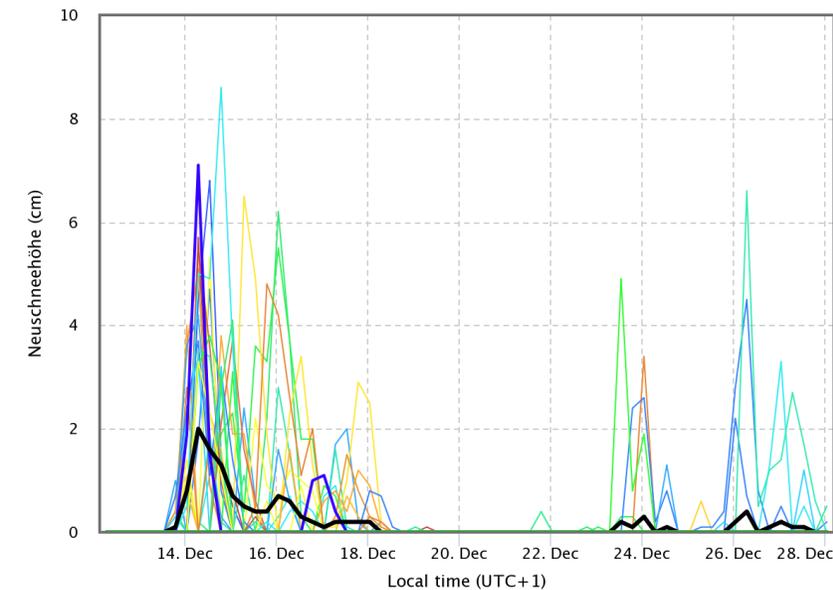
wetterzentrale.de

T 2m



wetterzentrale.de

Neuschneehöhe



wetterzentrale.de

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

Kapitel 6: Strahlung



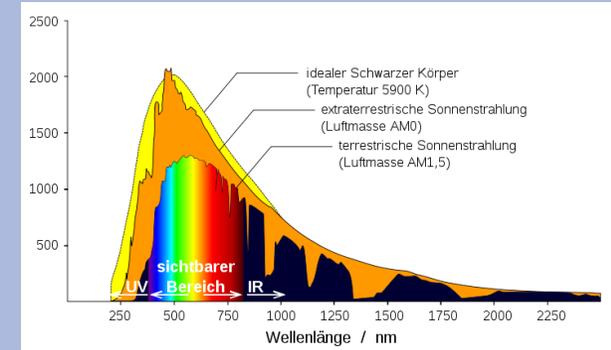
Letzte Vorlesung...

■ Ableitung Planck → Wiensches Verschiebungsgesetz $\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0$

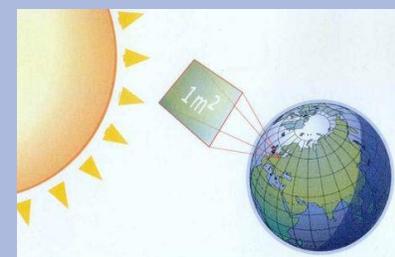
$$\lambda_{max} T = 2898 \mu\text{m K}$$

■ Kirchhoffsches Gesetz: berücksichtigt graue Körper $\frac{E_\lambda(T)}{\varepsilon(\lambda)} = B_\lambda(T)$

■ **Solare Strahlung:** kurzwelliger Spektralbereich; Absorption durch Gase rel. gering; v.a. durch O₃, H₂O (Wasserdampf) und CO₂



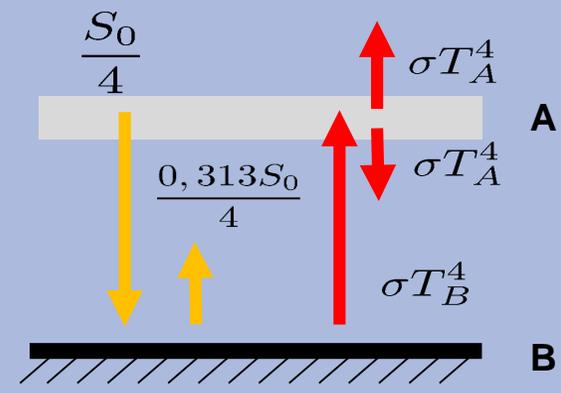
■ **Solarkonstante:** Strahlung „Oberrand“ Atmosphäre, senkrechte Orientierung; Strahlungsfluss Sonne = Strahlungsfluss Kugelschale R_{Sonne-Erde} → im Mittel ankommende Strahlung S₀/4 auf Erde (ohne Extinktion) *ist relativ wenig*



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

Größter Anteil der globalen planetaren Albedo (88%) resultiert aus Albedo in Atmosphäre (Gase, Wolken)

■ Modelle für Strahlungsgleichgewicht: Einstrahlung = Ausstrahlung; Modifikation mit Albedo, Atmosphäre



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

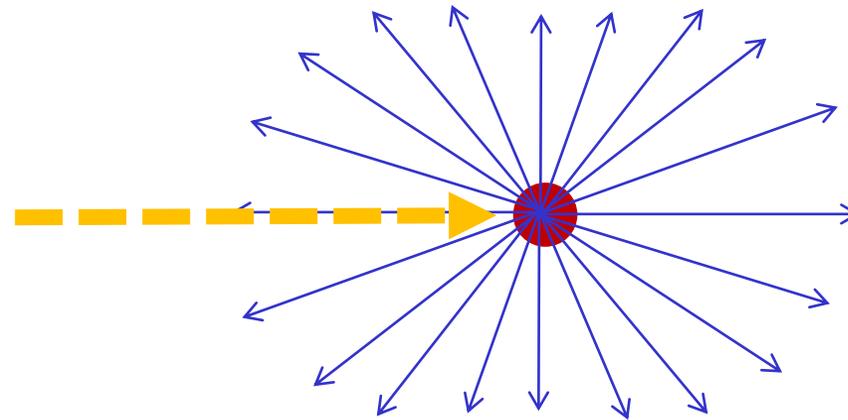
6.6 Geometrische Strahlungsgesetze und optische Phänomene

6.3.4 Streuung

Streuung

- Abschwächung der Strahlungsintensität in einer Richtung; dabei:
 - 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)

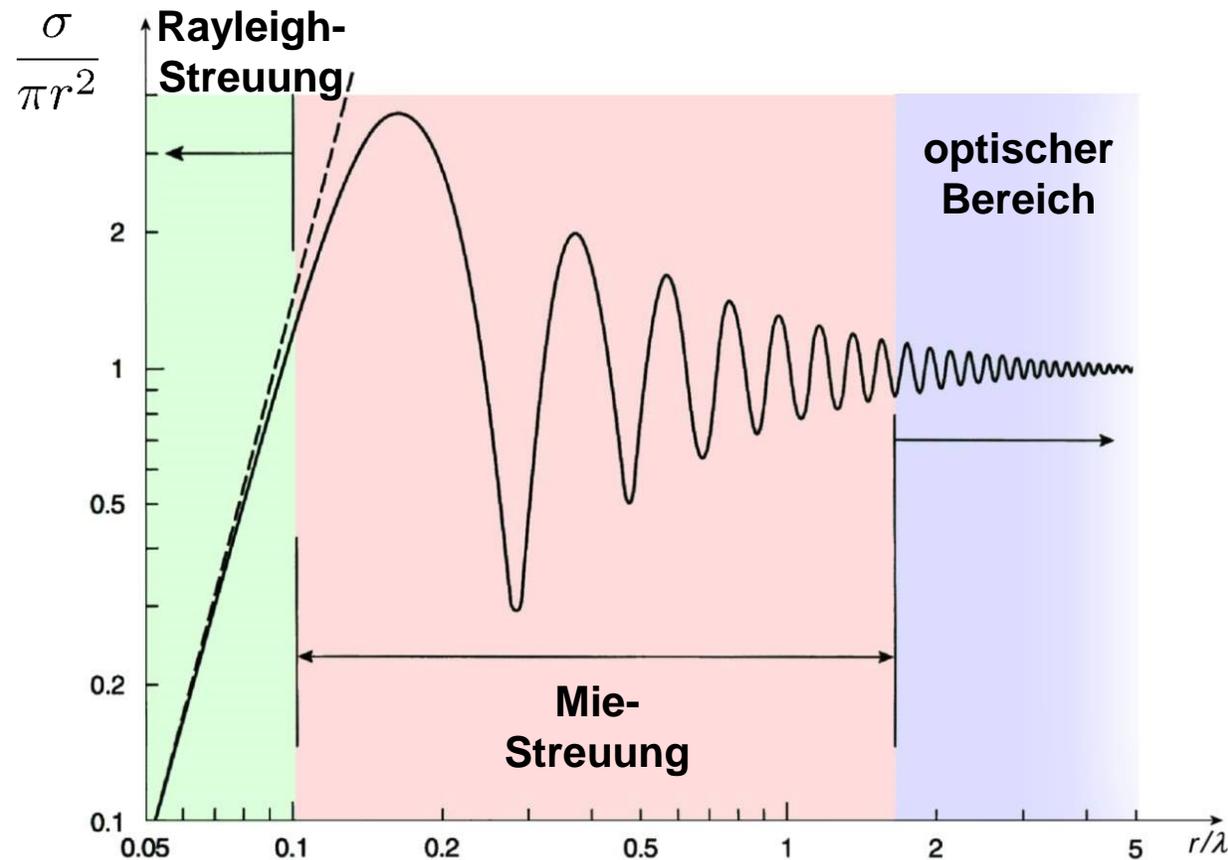
spanisch



6.3.4 Streuung

Verschiedene Arten der Streuung

- Rückstreuquerschnitt σ (normiert mit Fläche des Streuers) als Funktion des Größenparameters α (Umfang normiert mit Wellenlänge)



für weißes Licht: Mie-Str.
unabh. von λ
(gerade f.-Abh.)

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

(Quelle: www.radartutorial.eu)

6.3.4 Streuung

Rayleigh-Streuung

- Streuung an **kleinen Streukörpern** $r \ll \lambda$ (r = Radius); z.B. Streuung solarer Strahlung an Luftmolekülen
Faktor 10 oder 80
- **Streukoeffizient** (~Streuquerschnitt Moleküle) ?

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

N : Anzahldichte Moleküle

n : Brechungsindex

λ : Wellenlänge

- 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

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

*blaues Licht 3,45 x stärker gest. als rot
→ blauer Himmel*



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

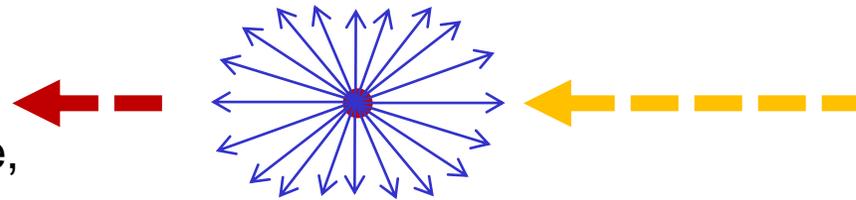
6.3.4 Streuung

Rayleigh-Streuung der solaren Strahlung

- Erklärung ‚blauer Planet‘, Himmelsblau, Abendrot

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

(blaues Licht „schon weggestreut“)



blaues Licht



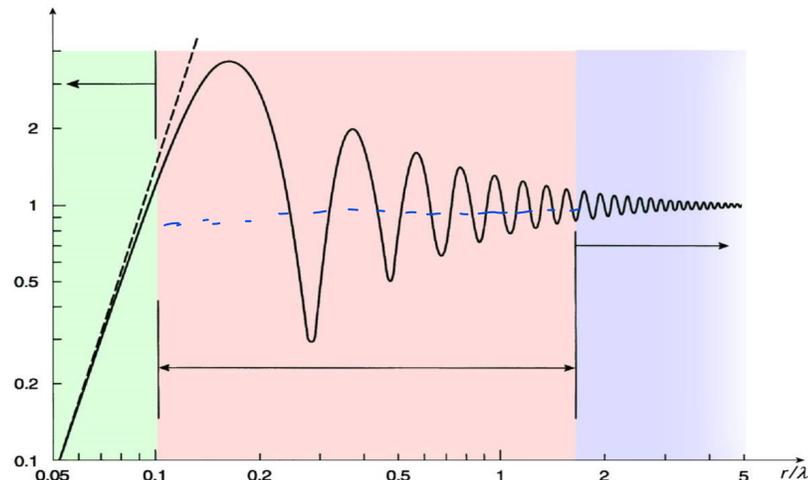
sonst Himmel schwarz (ohne Luftmoleküle)

6.3.4 Streuung

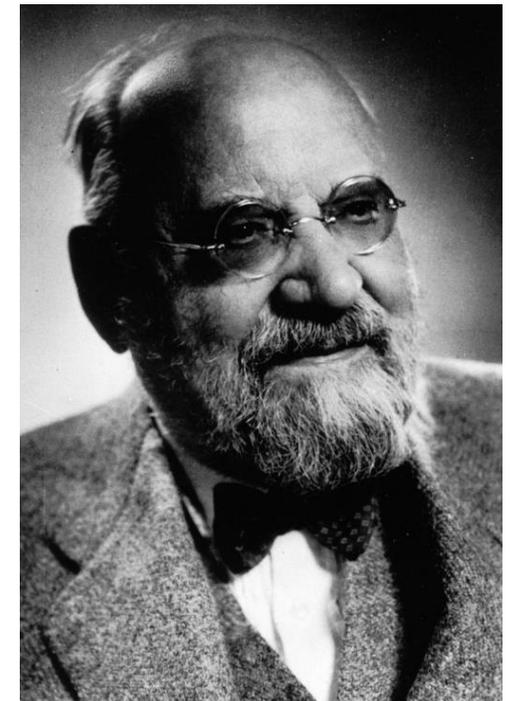
Mie-Streuung

- 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 α bzw. der Wellenlänge λ abhängt

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



bei weißem Licht : gestreutes Licht trotzdem weiß (-----)
←

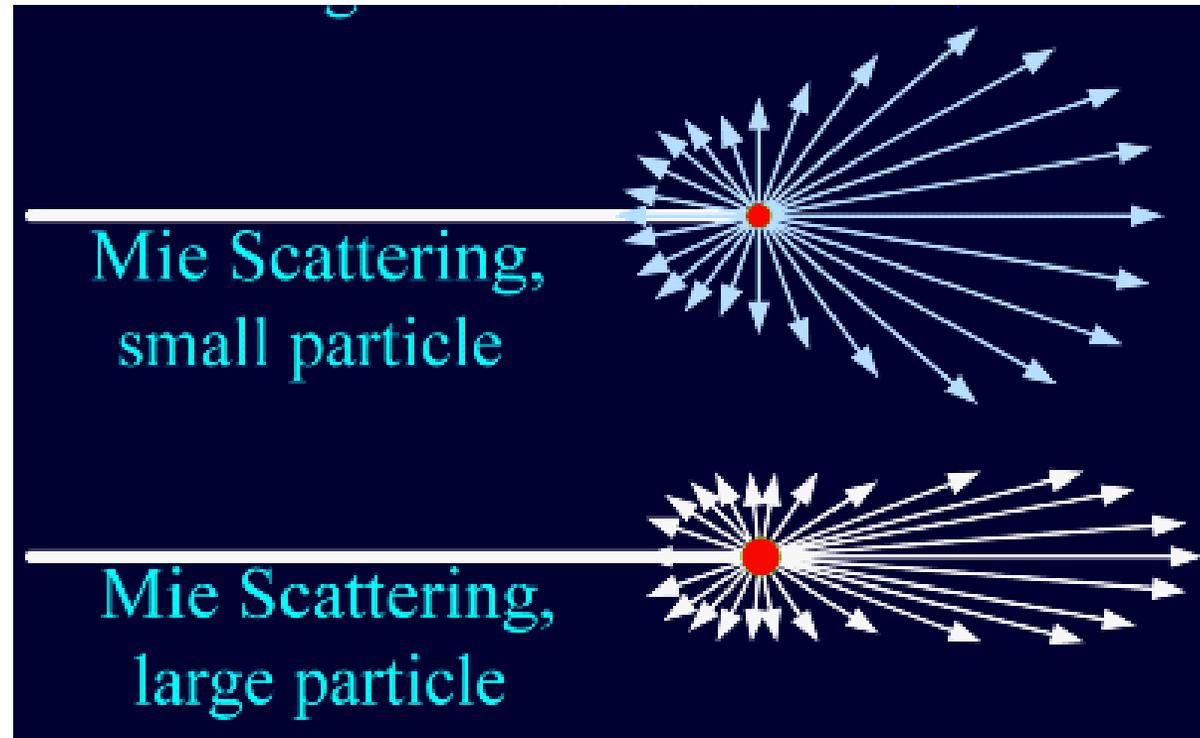


Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (1868-1957); dt. Physiker

6.3.4 Streuung

Mie-Streuung

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



Bei Nebel z.B. sieht man Sonne durch (wg. dom. Vorwärtsstreuung)

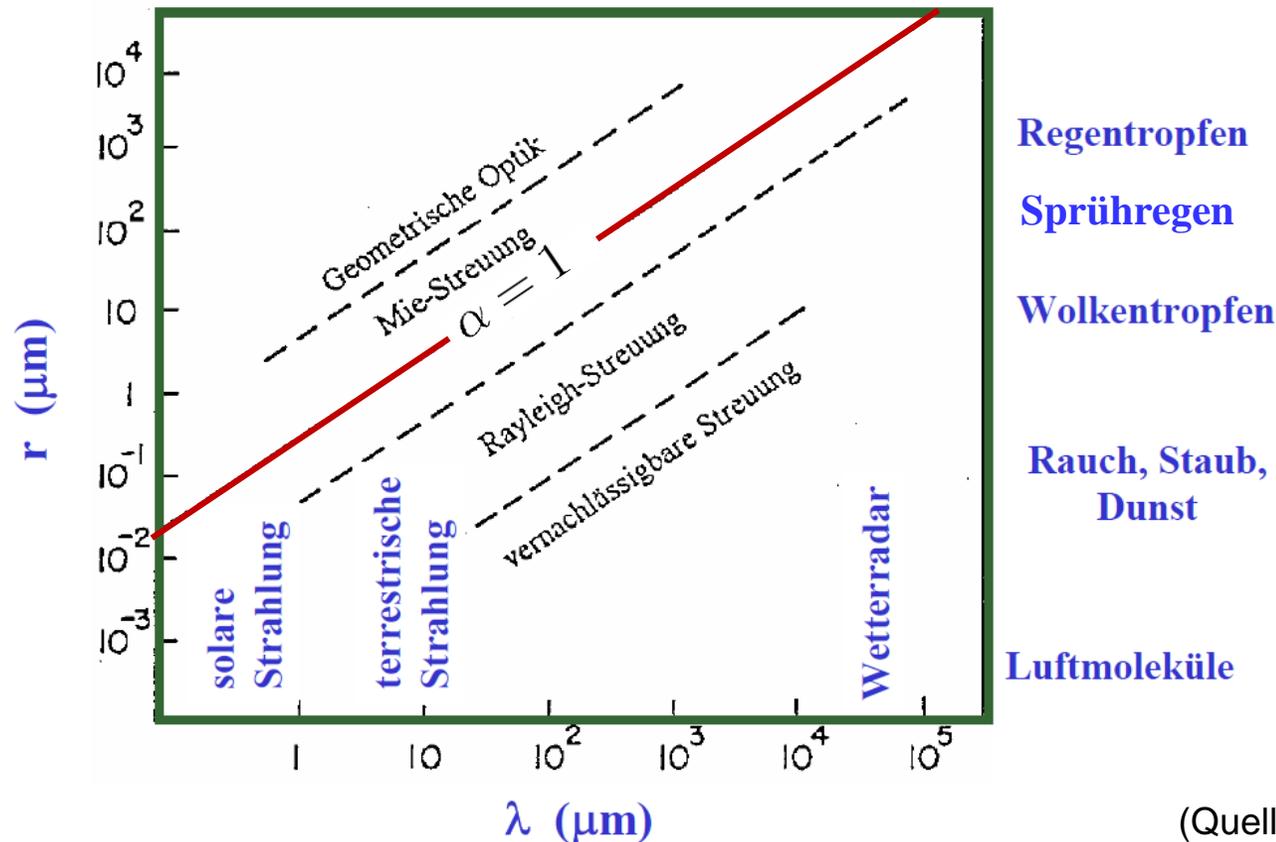
(Quelle: physics.stackexchange.com)

6.3.4 Streuung

Abhängigkeit der Streuung von Wellenlänge und Radius

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

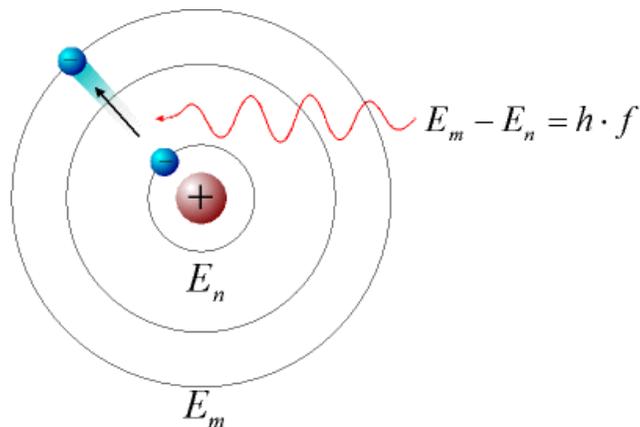
$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$



(Quelle: R. Smith, 2004)

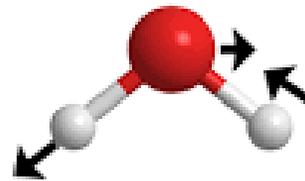
6.3.5 Absorption

- Umwandlung Strahlungsquant $h\nu$ in innere Energie $u \Rightarrow$ **Erwärmung des Absorbers**
 - Absorption von Strahlung durch Gase in der Atmosphäre durch
 - Elektronenübergänge des Moleküls (Atom)
 - Anregung von Schwingungszuständen
 - Anregung von Rotationszuständen
- } **Schwingungs-Rotationsbanden**
- Emission gemäß **Temperatur** des Moleküls $\rightarrow F(T), \lambda_{max}$ *Wien* $\epsilon \sigma T^4$
 - Absorptionsvermögen abhängig von Anzahl „**Freiheitsgraden**“ des Absorbers
 \rightarrow je komplexer Aufbau Molekül, umso größer ist das Absorptionsvermögen



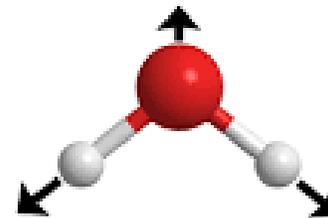
Elektronenübergang

Asymmetrische
Streckschwingung



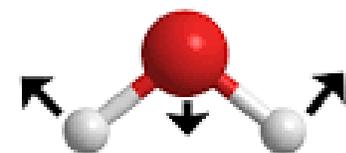
ν_{as} (2788 cm^{-1})

Symmetrische
Streckschwingung



ν_s (2672 cm^{-1})

Biegeschwingung

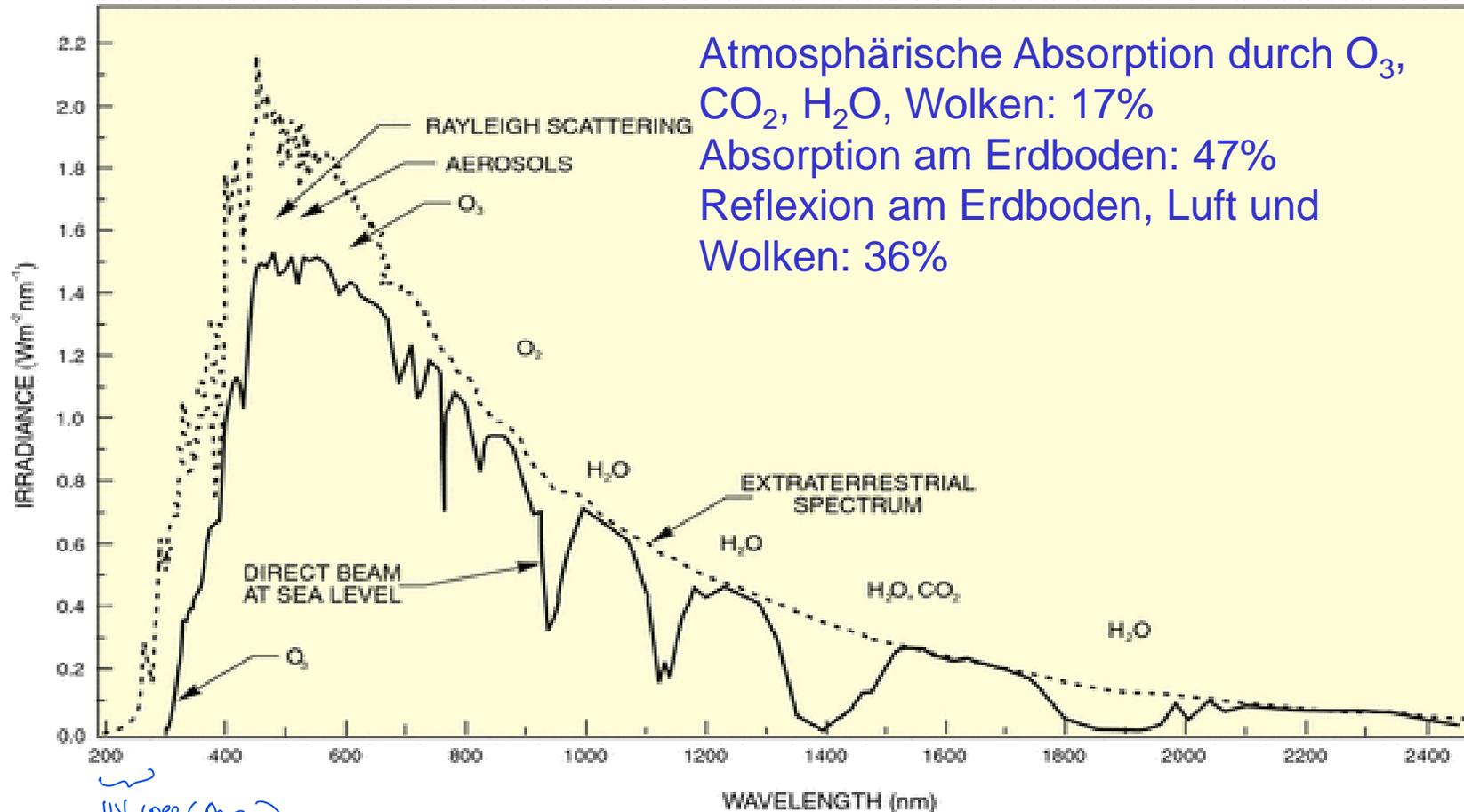


δ_s (1178 cm^{-1})

Normalschwingungen des schweren Wasser-Moleküls (D2O)
(L. Schöttner, KIT, 2018)

6.3.5 Absorption

- Absorption **solarer Strahlung** vor allem durch O_3 , H_2O , CO_2
- Streuung an zweiatomigen Molekülen (Rayleigh-Streuung)



Atmosphärische Absorption durch O_3 , CO_2 , H_2O , Wolken: 17%
Absorption am Erdboden: 47%
Reflexion am Erdboden, Luft und Wolken: 36%

(Quelle: assets.newport.com)

UV weg (Ozon)

6.3.6 Extinktion der Strahlung

Strahlungsabschwächung durch Extinktion

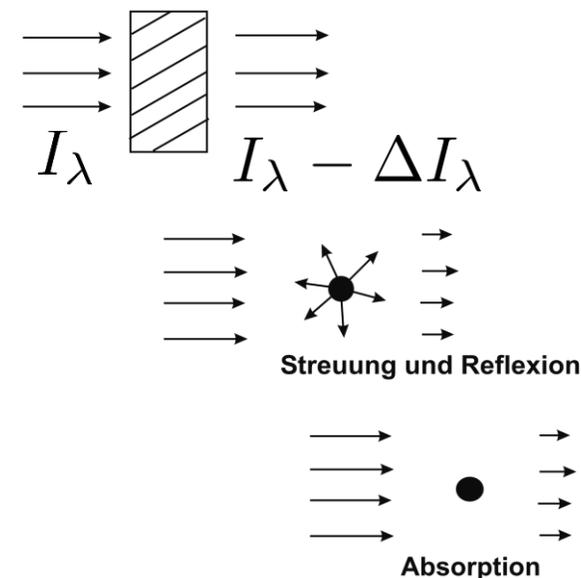
■ Ursachen der Extinktion:

- **Streuung** an Streukörpern: nur **Richtungsumverteilung**; Strahldichte integriert über gesamten Raum bleibt erhalten
- **Absorption**: **Temperaturzunahme** des Mediums

$$\text{Extinktion} = \text{Absorption} + \text{Streuung}$$

- Annahme: homogener, paralleler Strahl monochromatisches Licht dringt in Medium ein
- Abnahme Strahlungsintensität hinter Medium

$$I_\lambda - \underbrace{\Delta I_\lambda}_{\text{extingiert}} < I_\lambda$$



6.3.6 Extinktion der Strahlung

Strahlungsabschwächung durch Extinktion

■ Ursachen der Extinktion:

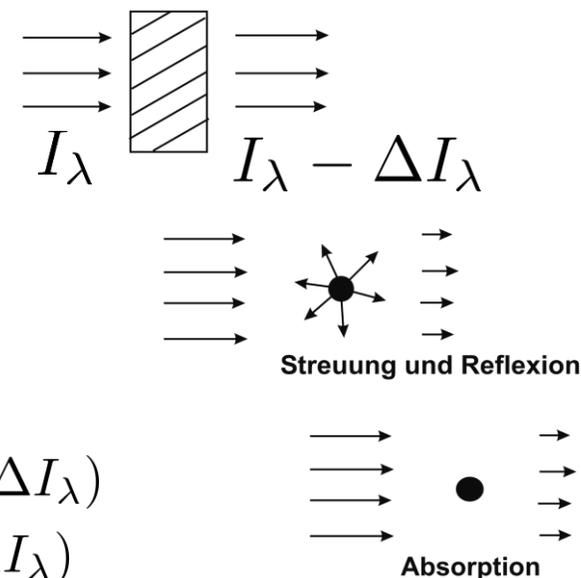
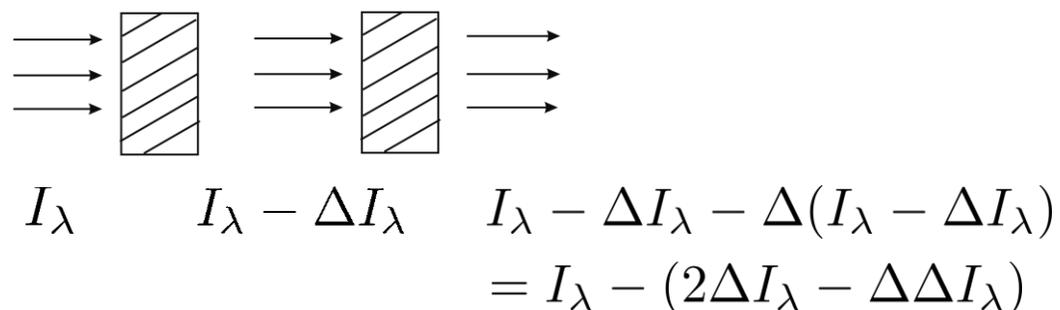
- **Streuung** an Streukörpern: nur Richtungsumverteilung; Strahldichte integriert über gesamten Raum bleibt erhalten
- **Absorption**: Temperaturzunahme des Mediums

$$\text{Extinktion} = \text{Absorption} + \text{Streuung}$$

■ Annahme: homogener, paralleler Strahl monochromatisches Licht dringt in Medium ein

■ Abnahme Strahlungsintensität hinter Medium

■ Verdopplung Dicke Medium:



6.3.6 Extinktion der Strahlung

Extinktionsgesetz nach Beer-Bouguer-Lambert

- Abnahme Strahldichte in homogenem Medium

$$I_\lambda = I_\lambda(0)e^{-\sigma_\lambda \tau}$$

↳ wegen $\Delta \Delta \Delta \dots$
(#-23)

I_λ spektrale Strahldichte
 σ_λ Massenextinktionsquerschnitt
 τ opt. Weglänge

- Transmissivität:
($T_\lambda = 1$: keine Extinktion; $T_\lambda = 0$: vollst. Extinktion)

$$T_\lambda = I_\lambda / I_\lambda(0) = e^{-\sigma_\lambda \tau}$$

rein raus

- Absorptivität (ohne Streuung)

$$A_\lambda = 1 - T_\lambda = 1 - e^{-\sigma_\lambda \tau}$$

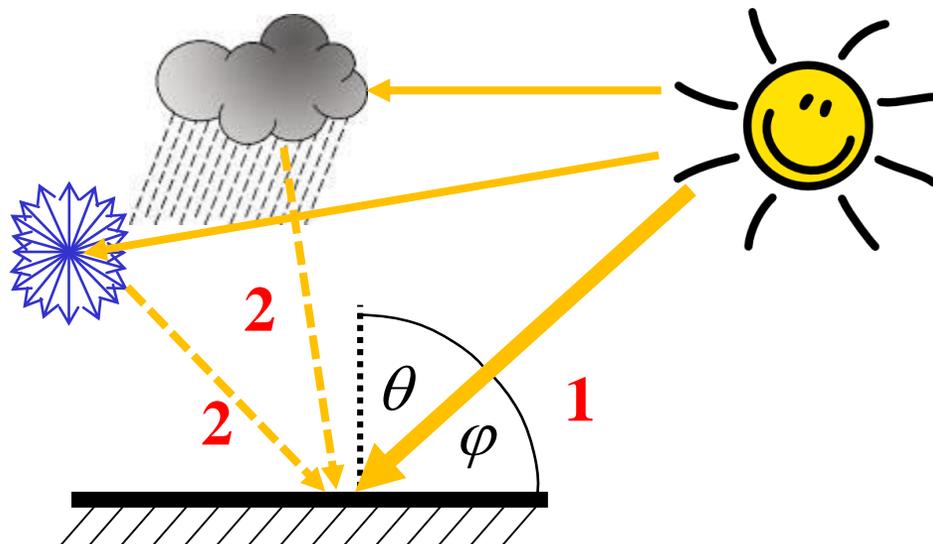
- In streuenden Medien:

$$T_\lambda + A_\lambda + R_\lambda = 1$$

Transmission + Absorption + Reflexion = 1

6.3.7 Globalstrahlung

Solare Strahlung auf Fläche



■ Globalstrahlung G bezeichnet die Summe aus

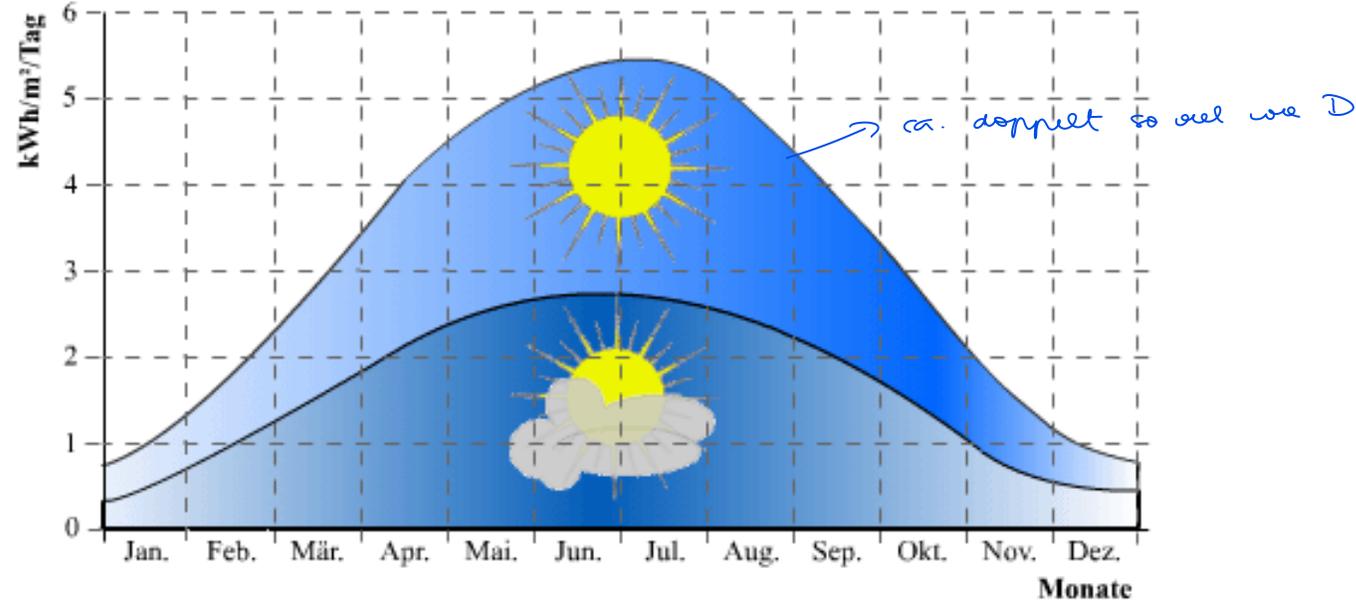
1 direkter Sonnenstrahlung $S = I \sin \varphi$ (φ : Sonnenhöhe)

2 diffuser Himmelsstrahlung D (Streustrahlung)

$$G = S + D = I \sin \varphi + D = I \cos \theta + D$$

6.3.7 Globalstrahlung

Solare Strahlung auf Fläche



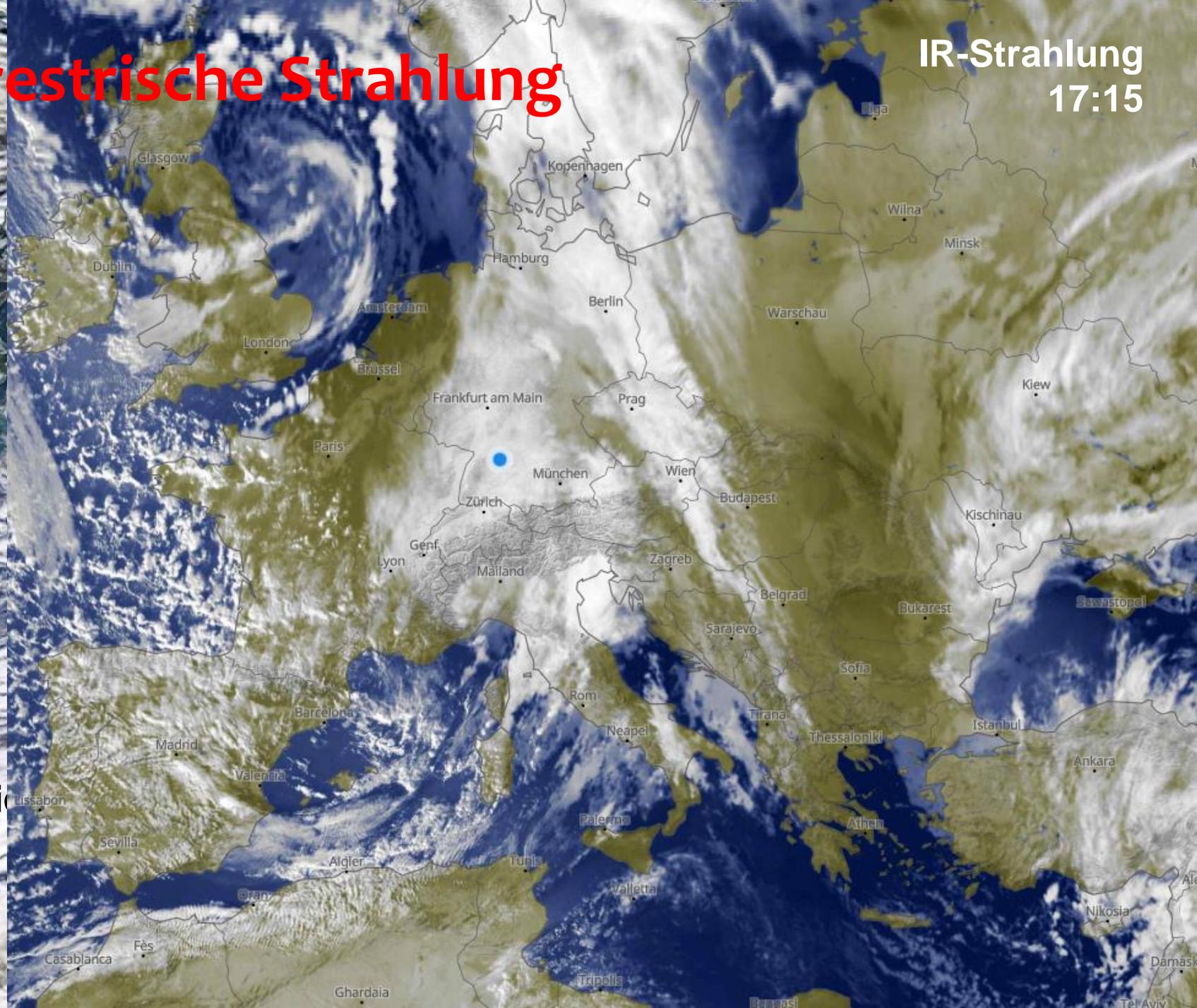
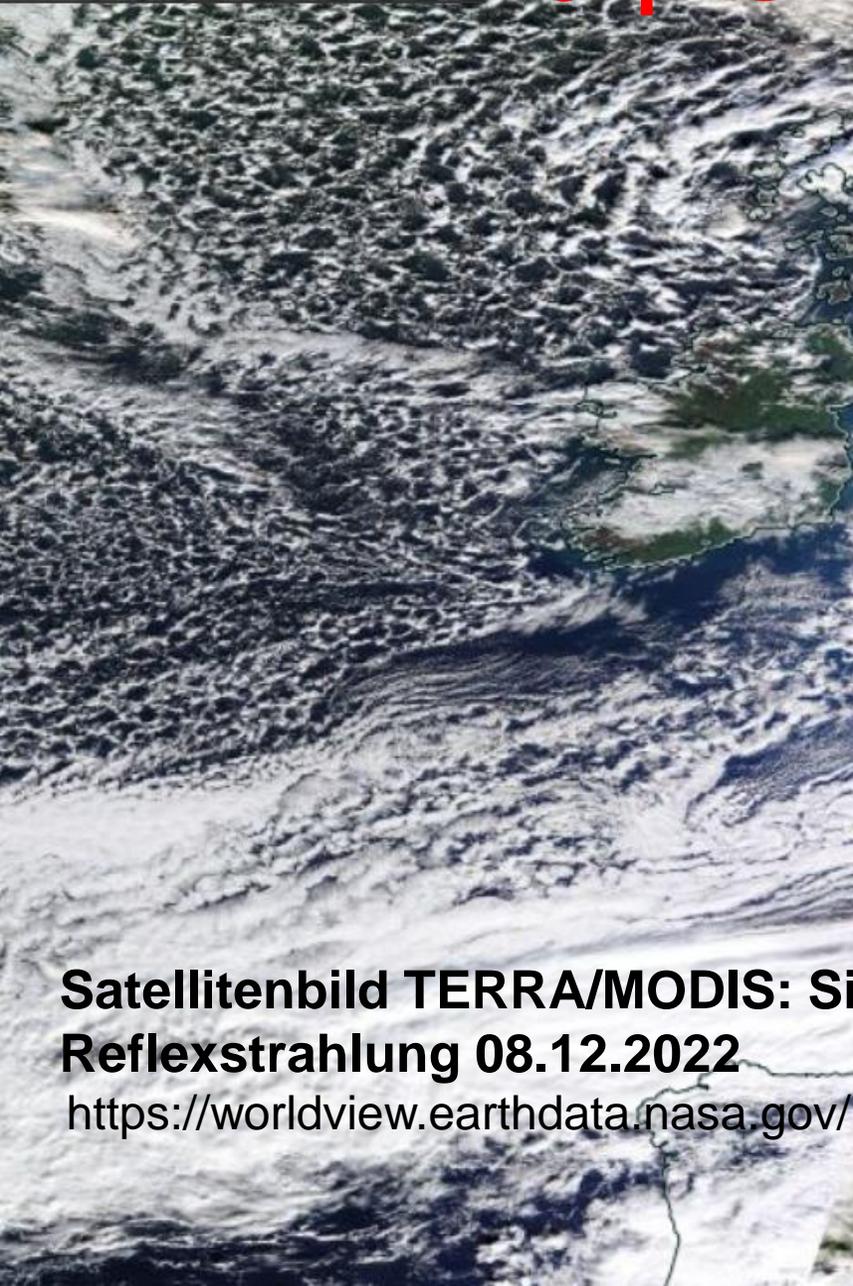
■ Globalstrahlung G bezeichnet die Summe aus

- 1 direkter Sonnenstrahlung $S = I \sin \varphi$ (φ : Sonnenhöhe)
- 2 diffuser Himmelsstrahlung D (Streustrahlung)

$$G = S + D = I \sin \varphi + D = I \cos \theta + D$$

6.4 Terrestrische Strahlung

IR-Strahlung
17:15



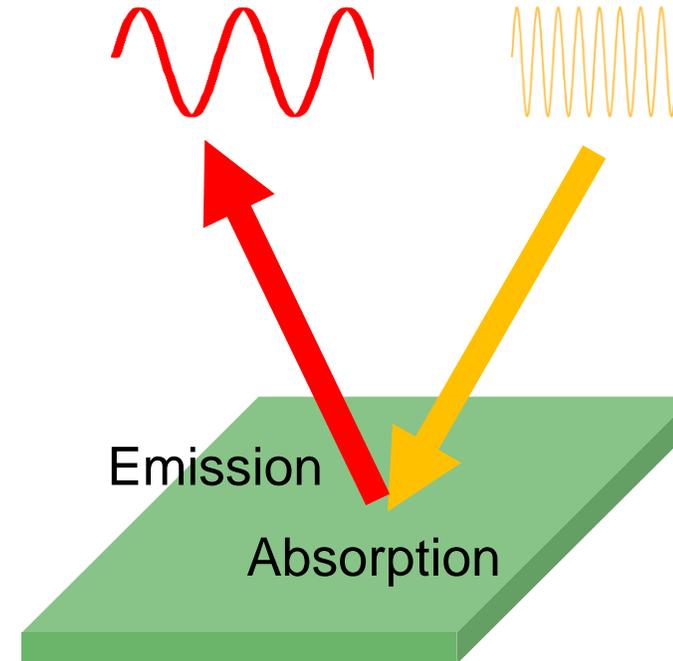
Satellitenbild TERRA/MODIS: Si
Reflexstrahlung 08.12.2022
<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

6.4 Terrestrische Strahlung

Infrarotstrahlung (IR) der Erde

- Erdoberfläche / Gase strahlen gemäß Oberflächentemperatur (Emission für graue Körper)
- Strahlungseigenschaften im IR von Gasen, Wasser, Wolken, Schnee wichtig für Interpretation Satellitenbilder

- Wiensches Verschiebungsgesetz $\lambda_{max} = \frac{2898 \mu\text{m K}}{T}$
- Stefan-Boltzmann Gesetz $E = \varepsilon\sigma T^4$
- Kirchhoffsches Gesetz $\frac{E_\lambda(T)}{\varepsilon(\lambda)} = B_\lambda(T)$

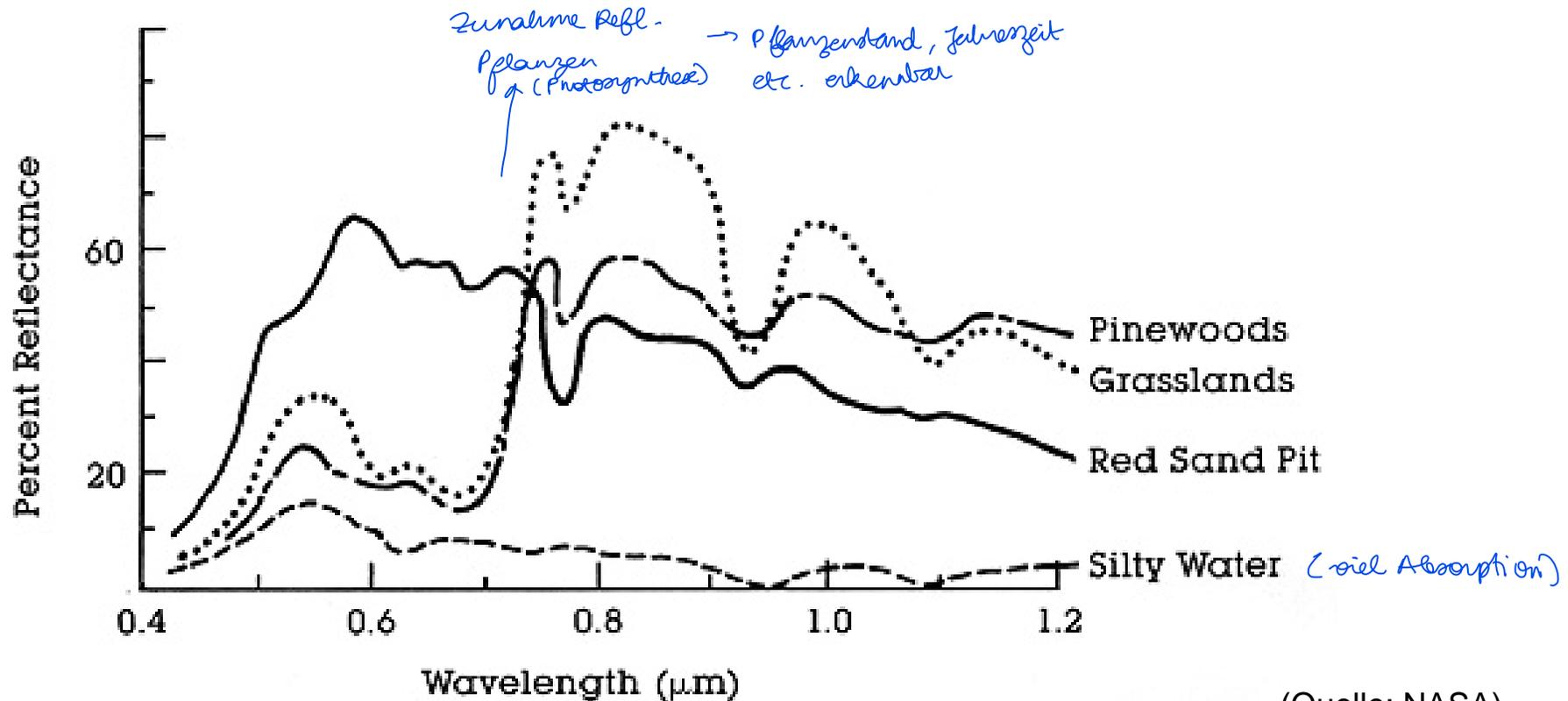


6.4 Terrestrische Strahlung

Reflexionsvermögen abhängig von Wellenlänge und Material

■ Spektrales Reflexionsvermögen (senkrecht) im Sichtbaren und nahen Infrarot (IR); **A = 1-R**

- **Wasser**: geringe Reflexion
- **Pflanzen**: abrupter Anstieg Reflexion sichtbares Licht bei $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$

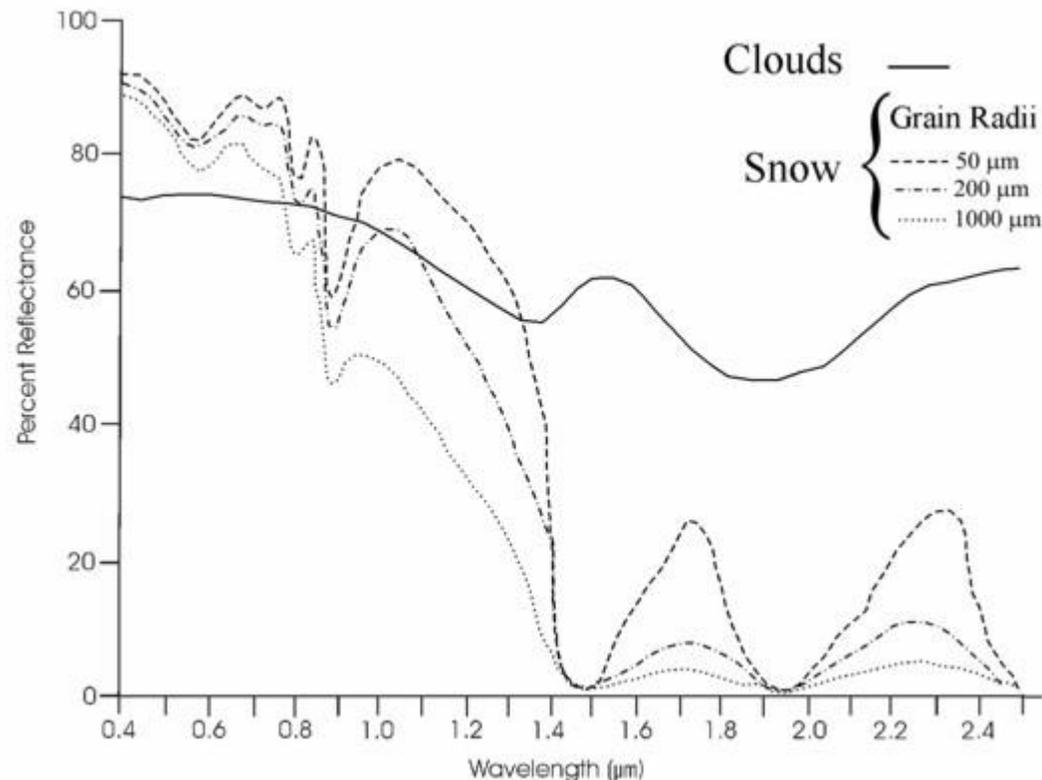


(Quelle: NASA)

6.4 Terrestrische Strahlung

Reflexionsvermögen abhängig von Wellenlänge und Material

- Spektrales Reflexionsvermögen (senkrecht) im **Sichtbaren und nahen Infrarot (IR)**; $A = 1 - R$
 - **Wolken**: hohe Reflexion, geringere spektrale Unterschiede
 - **Schnee**: hohe Reflexion im Sichtbaren, geringe im IR (\Rightarrow hohe Absorption/Emiss.)



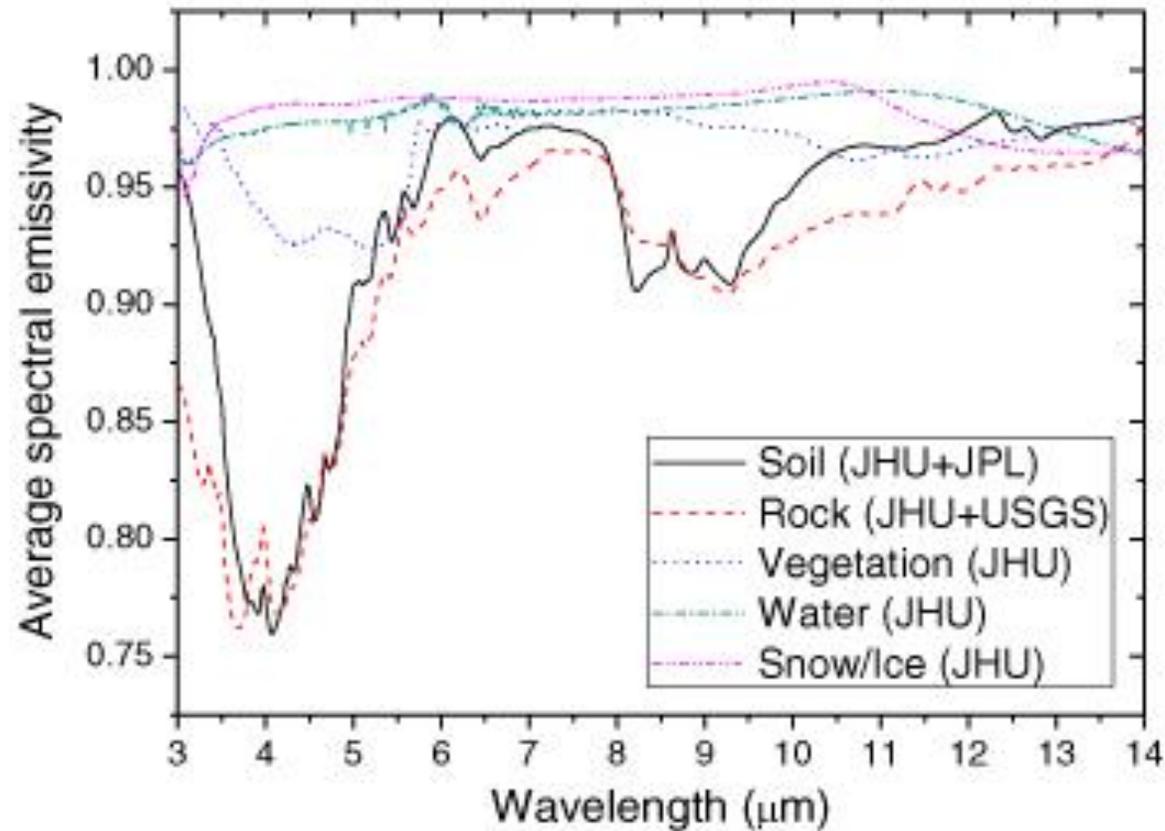
(Quelle: www.cps-amu.org/)



6.4 Terrestrische Strahlung

Emissionsvermögen abhängig von Wellenlänge und Material

- Spektrales **Emissionsvermögen** (= Absorptionsvermögen) **im IR-Bereich**
- Hohes Emissionsvermögen aller Oberflächen; Wasser $\varepsilon > 0,7$; Schnee: $\varepsilon > 0,95$



(Quelle: Tang et al., 2010)

6.4 Terrestrische Strahlung

Emissionsvermögen abhängig von Wellenlänge und Material

- Absorptionsvermögen (= Emissionsvermögen) und Reflexionsvermögen, integriert über **langwelliges Spektrum** (IR; Annahme: Transmission = 0)
- Senkrecht über ebener Fläche (nach D. Lorenz)

| Oberfläche | Emissionsvermögen ε | Reflexion |
|------------------|---------------------------------------|-----------|
| Schneedecke | 0,995 <i>→ quasi schwarzer Körper</i> | 0,005 |
| Rasen | 0,984 | 0,016 |
| Wasser | 0,96 | 0,04 |
| Kalk, Kies | 0,92 | 0,08 |
| Sand | 0,9 | 0,1 |
| Wolken | 0,9 – 1,0 | 0,1 – 0 |
| Polierte Metalle | 0,02 | 0,98 |

6.4 Terrestrische Strahlung

Absorption der langwelligen (terrestrischen) Strahlung

■ Spektrale Absorption durch Treibhausgase; Beitrag zum **natürlichen** Treibhauseffekt:

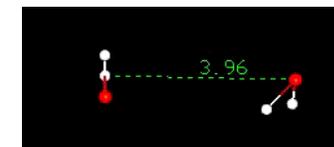
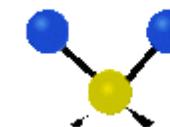
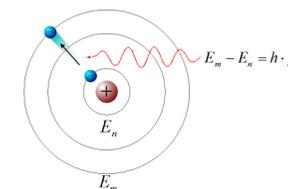
- Wasserdampf H_2O : 62,4 %
- Kohlendioxid CO_2 : 21,8 %
- bodennahes Ozon O_3 : 7,3 %
- Distickstoffoxid N_2O : 4,2 %
- Methan CH_4 : 2,4 %

■ Treibhausgase: vor allem mehratomige Gase (≥ 3)
→ Rotations- und Schwingungsbanden

■ Treibhausgaspotentiale: abhängig von Freiheitsgraden der Moleküle **und** Besetzung der jeweiligen Spektralbereiche

- CO_2 : 1-faches Treibhauspotenzial
- CH_4 : 23-faches Treibhauspotenzial
- N_2O : 296-faches Treibhauspotenzial
- FCKW: 4600-faches Treibhauspotenzial

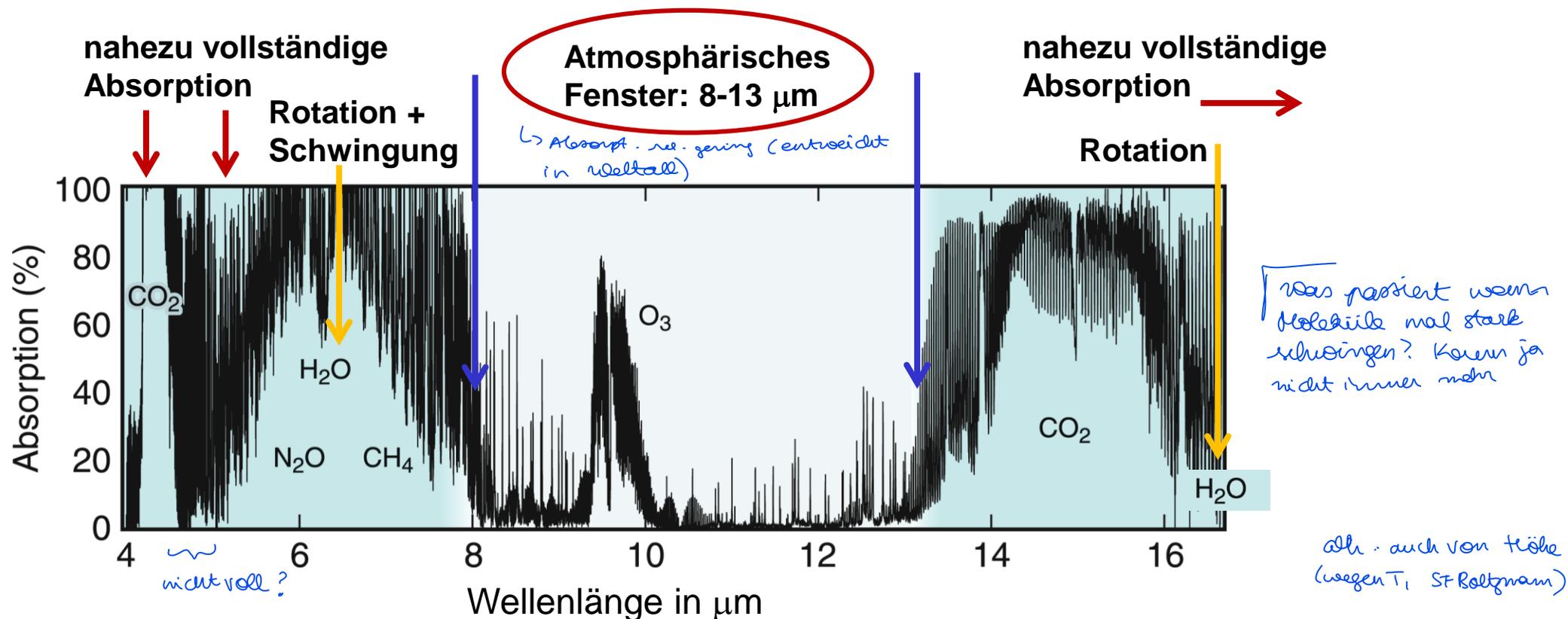
■ **Aber sehr unterschiedliche Konzentrationen !**



6.4 Terrestrische Strahlung

Absorption der langwelligen (terrestrischen, IR-) Ausstrahlung

- Absorption langwelliger Strahlung durch verschiedene Treibhausgase in Abhängigkeit von der Frequenz *(Linienspektrum)*
- Sehr geringe Absorption im Bereich atmosphärisches Fenster ~8-13 μm



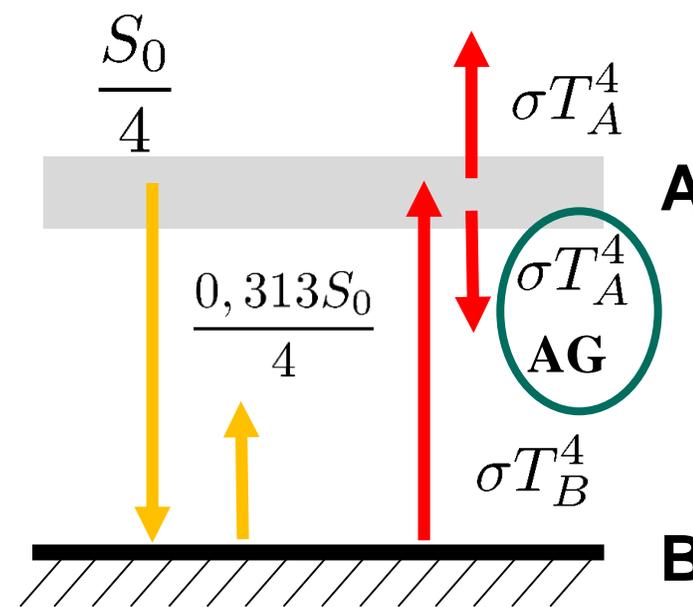
6.4 Terrestrische Strahlung

Atmosphärische Gegenstrahlung

- Abstrahlung der durch Treibhausgase absorbierten langwelligen Strahlung in alle Raumrichtungen
- Teil in Richtung Erdboden: **atmosphärische Gegenstrahlung AG**
- **Effektive Ausstrahlung E_{eff}** : Differenz zwischen Ausstrahlung und Gegenstrahlung

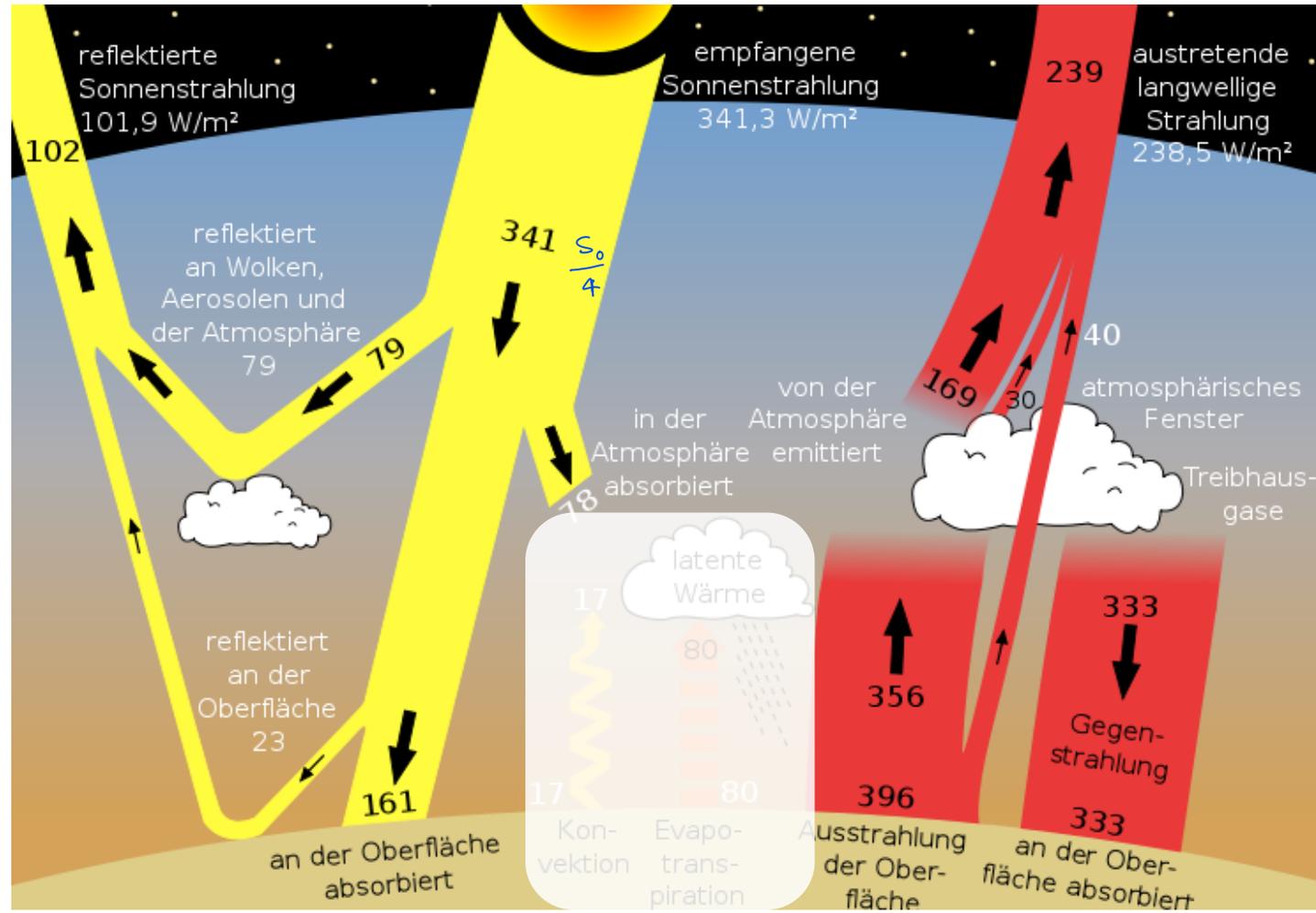
$$E_{\text{eff}} = \varepsilon\sigma T_B^4 - AG$$

- Effektive Ausstrahlung: Energieverlust für Erde (v.a. im Bereich atmosphärisches Fenster)
→ Ausgleich durch solare Einstrahlung



6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

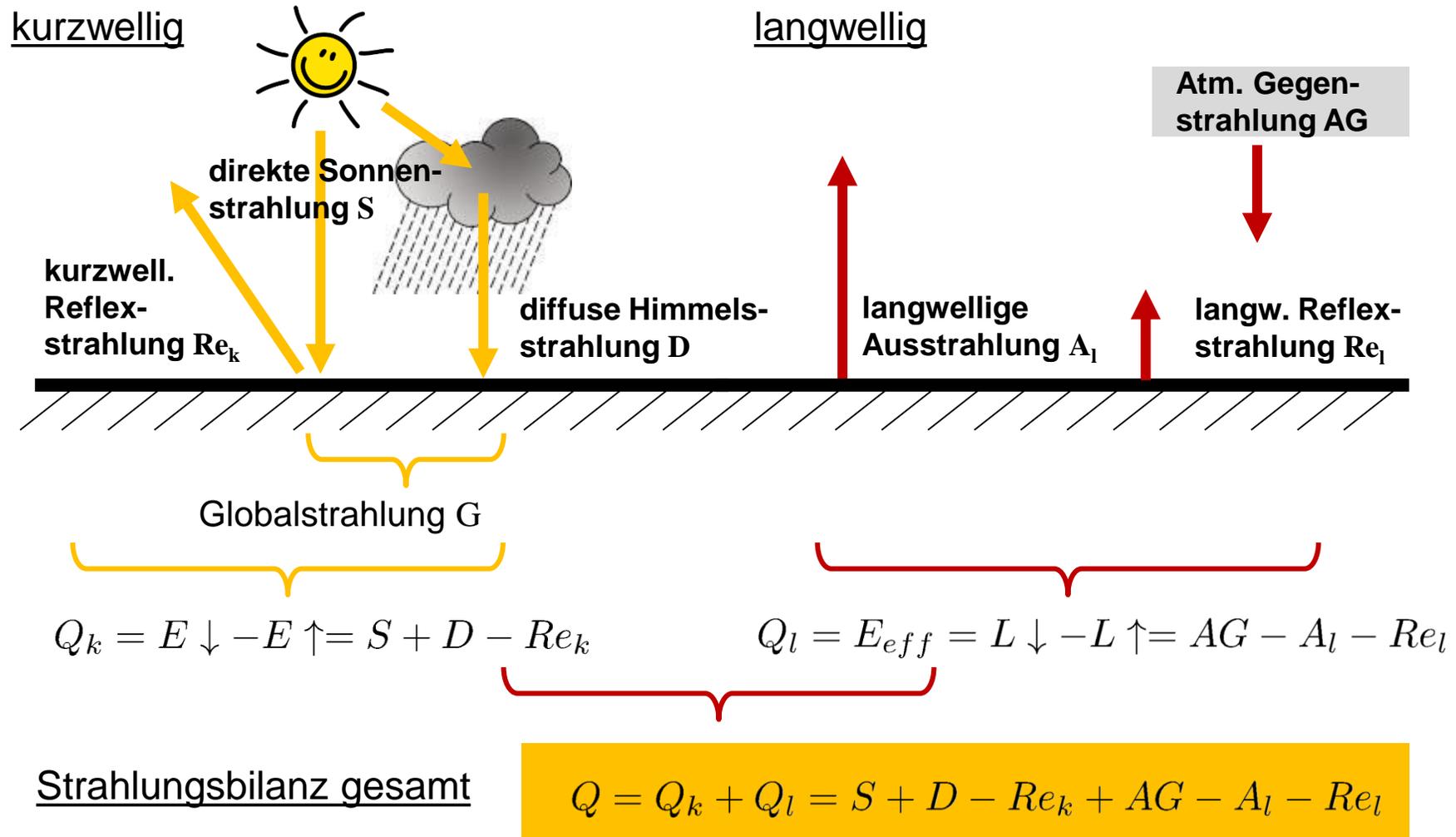
Strahlungsbilanz Q Summe der Strahlungsflussdichten Erdoberfl.



(Quelle: Klimawiki, u.a. CSC)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

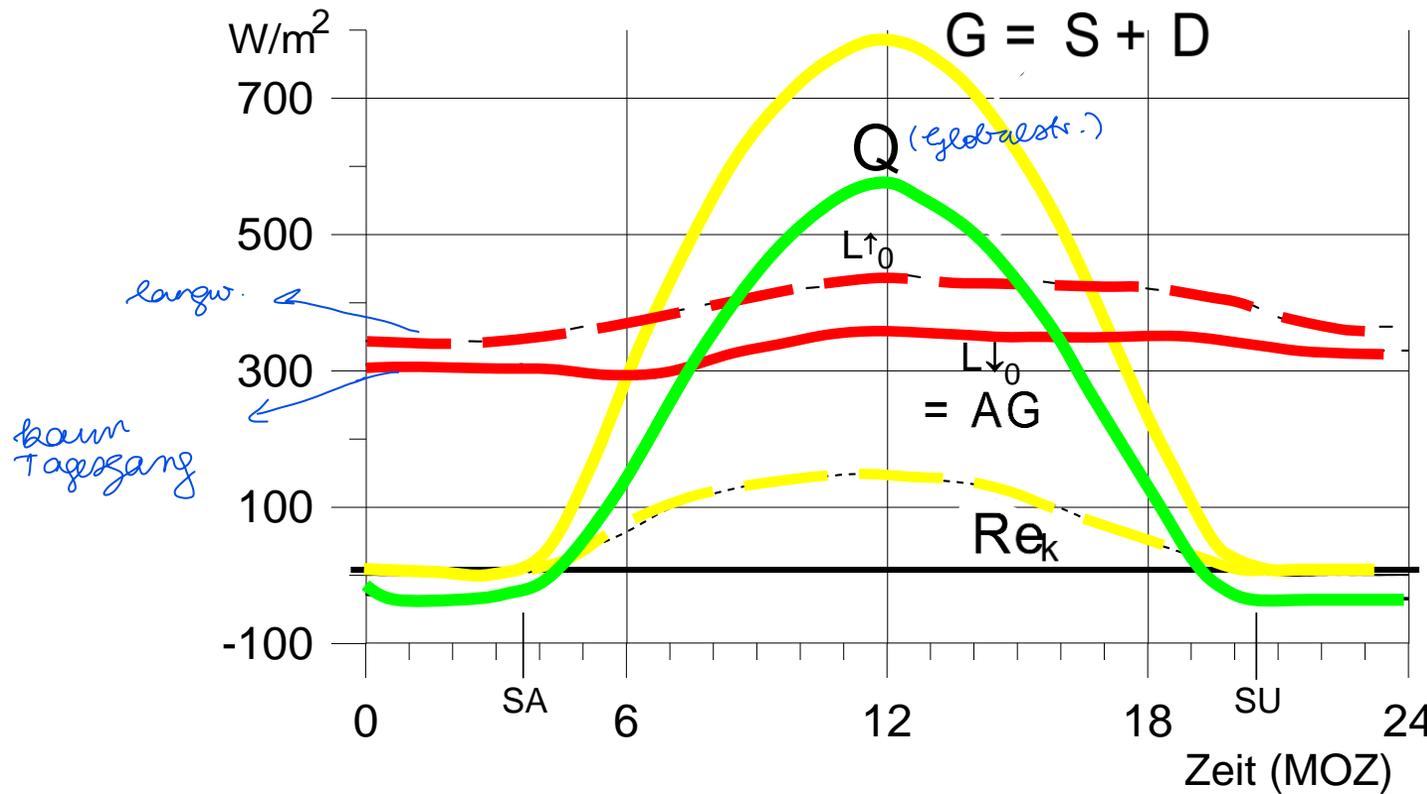
Strahlungsbilanz Q Summe der Strahlungsflussdichten Erdoberfläche



Fragen über Fragen...

- Ist die **Strahlungsbilanz** an einem bestimmten Ort über das Jahr hin ausgeglichen (also = 0)? *viel am Äquator, weniger an Polen*
Nein
- Ist die **Energiebilanz** an einem bestimmten Ort ausgeglichen? Und global? *Ja*
↳ ja, auch wenn es best. Anomalien gibt (z.B. Grönland)
- Was ist im globalen Mittel höher: der Fluss **fühlbarer** oder der Fluss **latenter** Wärme? *latent*
(Kondensation & Verdunstung)
↳ sehr viel Energie nötig

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz



Lokale Strahlungsbilanz:
 Typischer Tagesgang im Sommer mit Komponenten

5.6.1954, Wiese bei Hamburg-Fuhlsbüttel

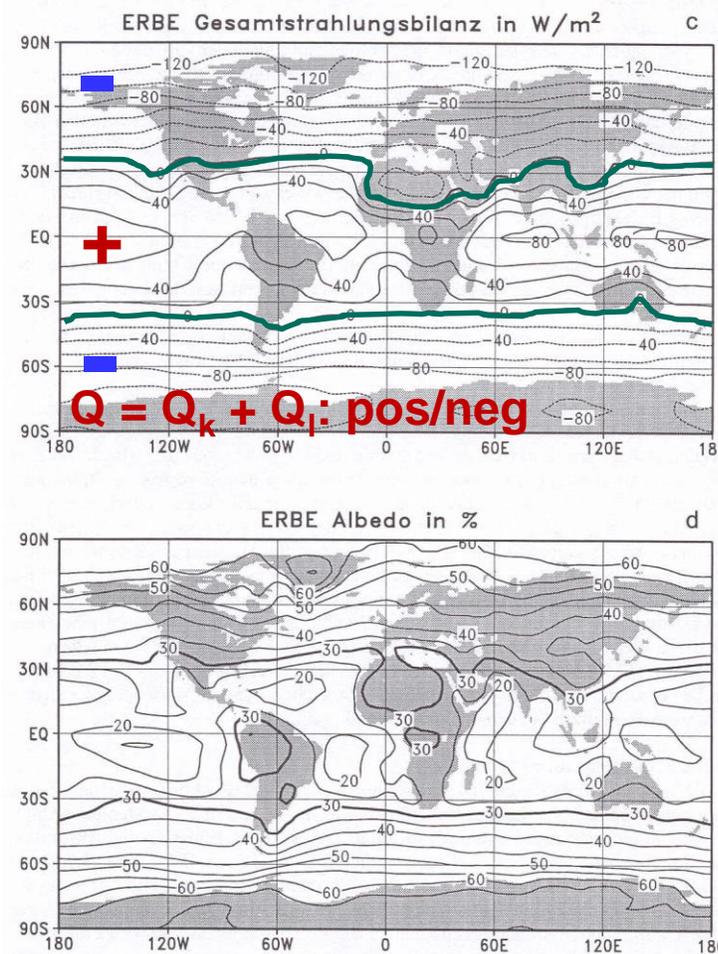
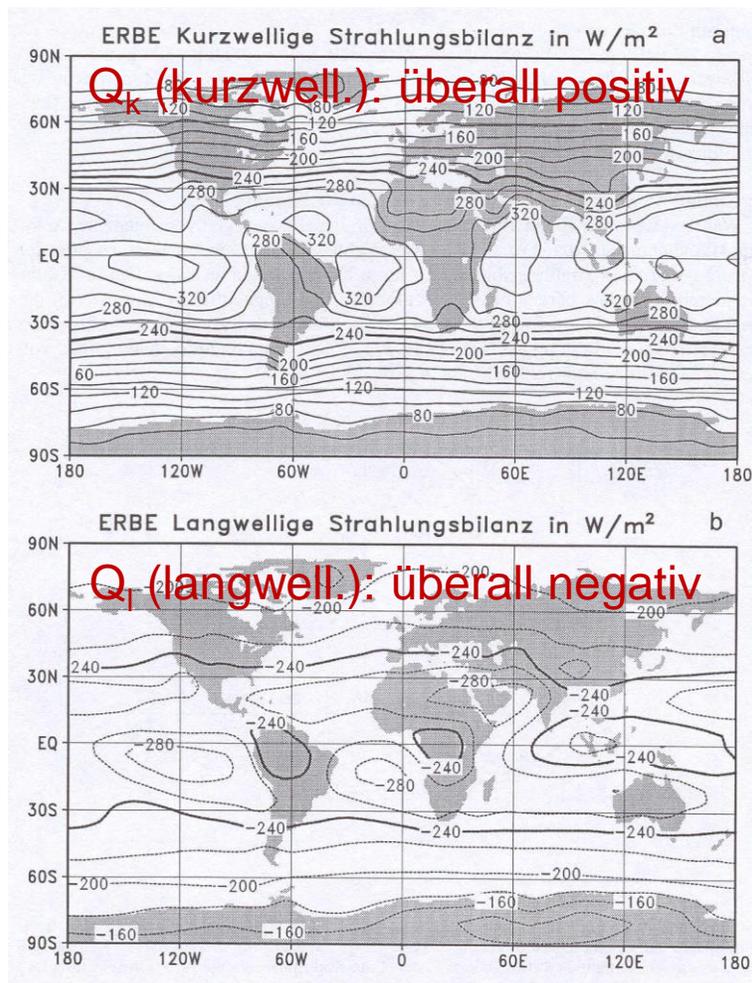
(Quelle: Kraus, 2004)

- **solare** Strahlung: Globalstrahlung G (gelb) tagsüber etwa Sinus-förmig (nachts null); Reflexstrahlung Re_k verläuft parallel zu G
- **terrestrische** Strahlung: geringe Variation von AG und $(A_1 + Re_1)$
- **Strahlungsbilanz** Q (grün) verläuft annähernd parallel zu G, ist aber nachts negativ, da Ausstrahlung > Einstrahlung; **Tagemittel Q positiv im Sommer (!)**

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Globale mittlere Strahlungsbilanz

Strahlungsbilanz = Einstrahlung – Ausstrahlung; kurzwellig / langwellig



→ Sahara?

⇒ Ungleichgewicht:
Ausgleich nötig

Condiskraft: Brechungs-
ablenkung

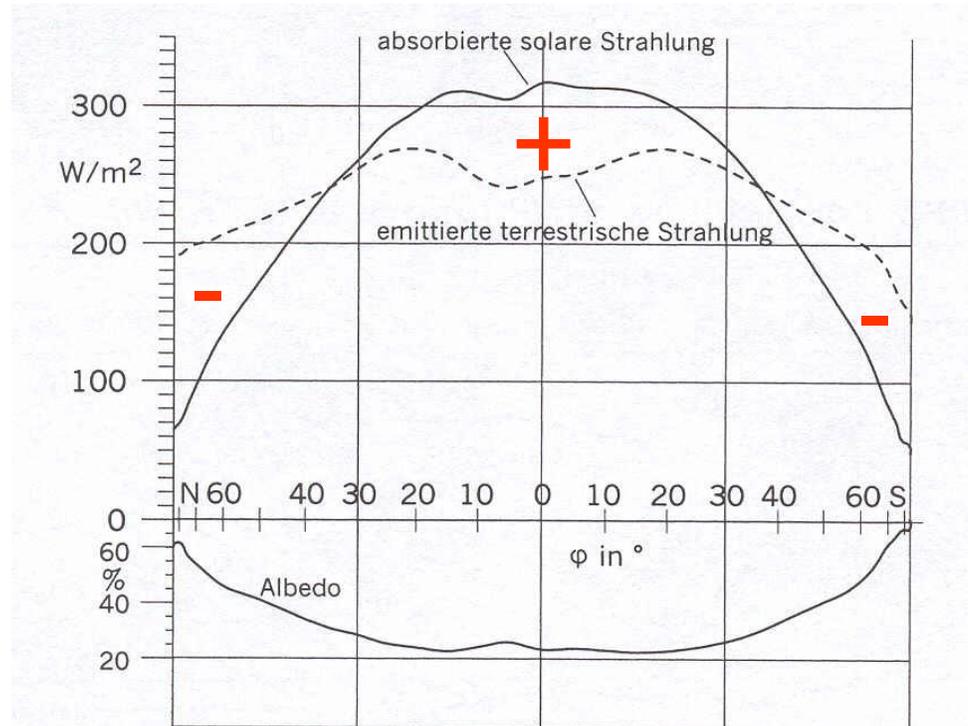
— bis hier VL 12.12. —

(Quelle: Kraus, 2004)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Globales Breitenmittel Strahlungsbilanz

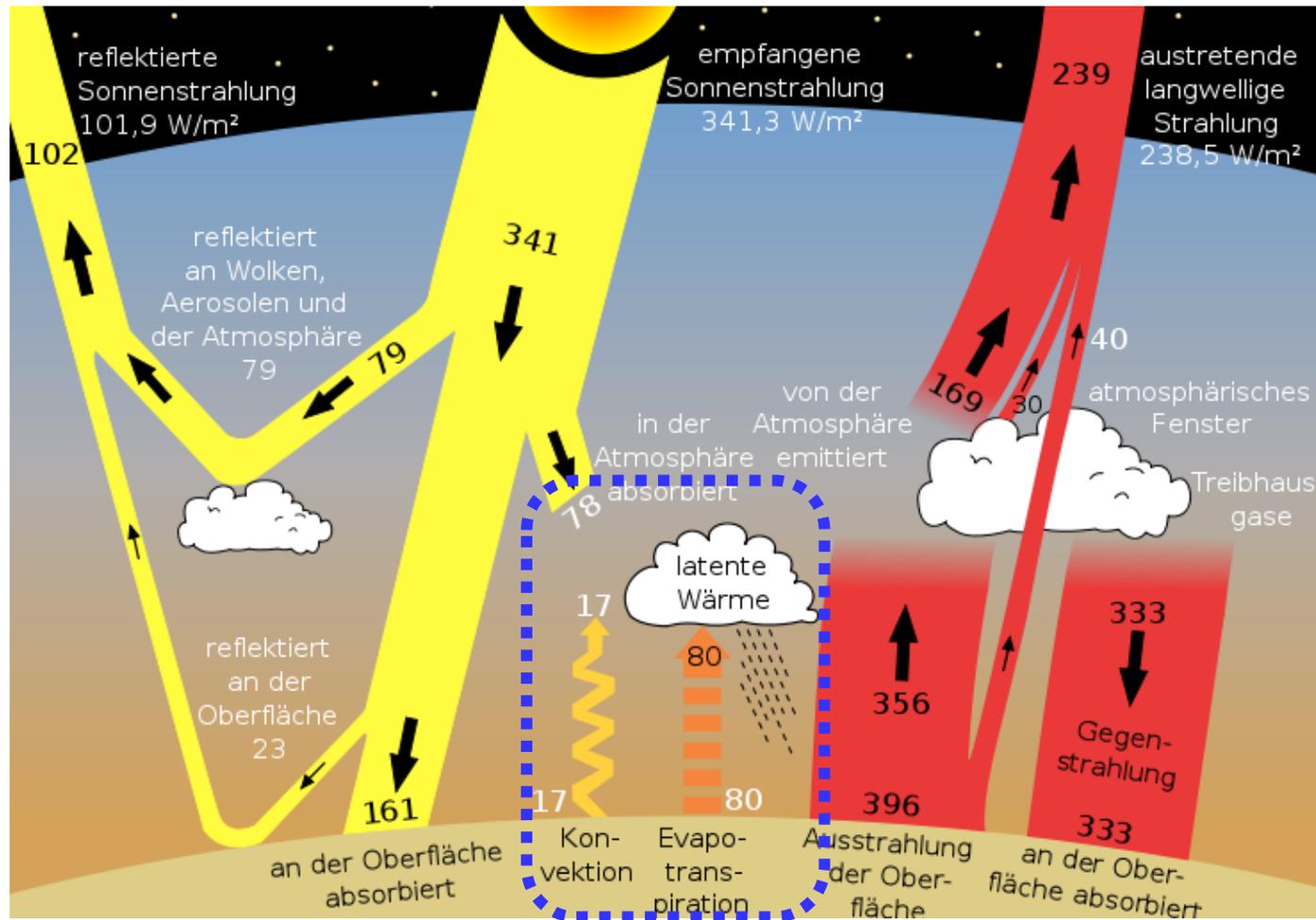
- Niedrige Breiten: positive Strahlungsbilanz (Einstrahlung > Ausstrahlung)
- Mittlere / hohe Breiten: negative Strahlungsbilanz: (Ausstrahlung > Einstrahlung)
- Resultierende differentielle Erwärmung: Ursache von Bewegung in Atmosphäre (= Wind) und Strömungen im Ozean



(Quelle: Kraus, 2004)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

- Energiebilanz: Ausgleich Strahlungsbilanz durch **Flüsse fühlbarer / latenter Wärme**



(Quelle: Klimawiki, u.a. CSC)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Energiebilanz der Erdoberfläche

- Rund **60 %** der vom Erdboden absorbierten solaren Strahlung wird durch **Wärmeflüsse** in der Atmosphäre transportiert:
 - Turbulenter Fluss **fühlbarer** Wärme **H: 17 W m⁻² globales Mittel**
 - Turbulenter Fluss **latenter** Wärme **E: 80 W m⁻² globales Mittel**
- Weitere Komponente Energiebilanz: **Bodenwärmestrom B** (auch: Wärmestrom im Meer)
 - im globalen Mittel **B = 0**
- Globales Mittel (lokal nicht immer ausgeglichen, nur global!)

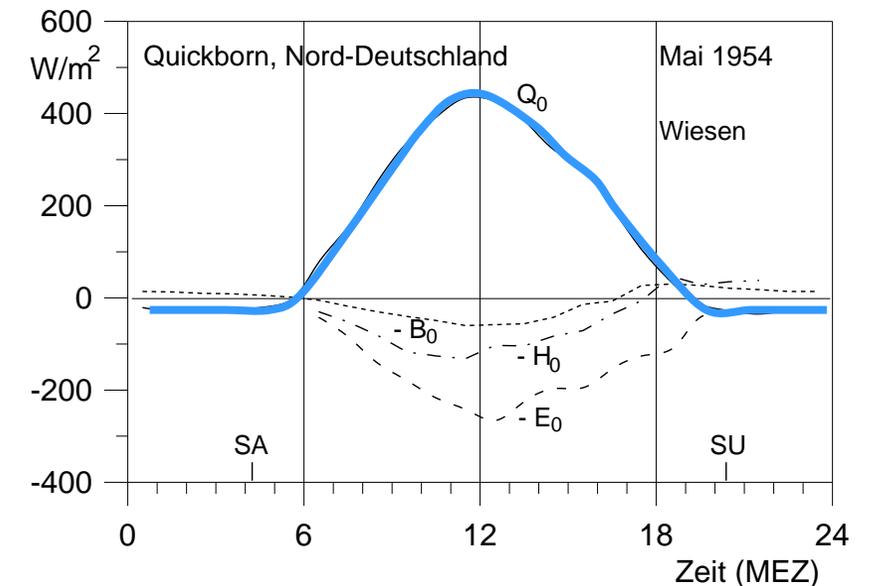
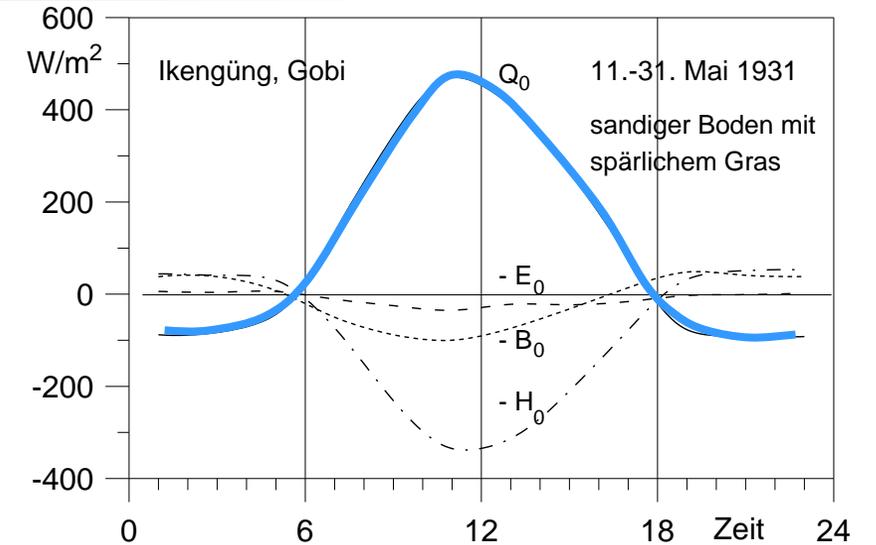
$$Q + B + H + E = 0$$

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Energiebilanz der Erdoberfläche

- Turbulente Flüsse gleichen **über Landoberflächen** die Strahlungsbilanz weitgehend aus
- **Fluss fühlbarer Wärme H** ist nachts meist von der Atmosphäre zur Erdoberfläche gerichtet (negativ)
- Über **vegetationslosen** Böden (Wüste) ist Betrag Fluss fühlbarer Wärme $H > \text{Fluss latenter Wärme } E$
- Über **Vegetation** $|H| < |E|$

$$Q + B + H + E = 0$$



Letzte Vorlesung...

- Mie / Rayleigh-Streuung: abhängig von Wellenlänge vs. Größe; Rayleigh etwas geringere Seitwärtsstreuung, Mie v.a. Vorwärtsstreuung
- Extinktionsgesetz nach Bouguer-Lambert: Abnahme Strahldichte in homogenem Medium durch **Absorption + Streuung**; exponentielle Abnahme
- **Globalstrahlung**: direkte Sonnenstrahlung + diffuse Himmelsstrahlung
- Reflexionsvermögen und Emissionsvermögen (= Absorptionsvermögen) abhängig von Material und Wellenlänge
 - Z.B. Reflex. Wasser gering, Pflanzen abrupter Anstieg bei $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$
 - Schnee hohes Absorptionsvermögen im IR (~schwarzer Körper)
- Absorption **langwelliger** Strahlung durch verschiedene Treibhausgase, v.a. H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 (in dieser Reihenfolge)
- Atmosphärisches Fenster: **8-13 μm** ; sehr geringe Absorption im IR-Spektralbereich
- Zur Erde emittierte IR-Strahlung der Treibhausgase: atmosphärische Gegenstrahlung AG
- Strahlungsbilanz: nicht ausgeglichen; $Q = Q_k + Q_l = S + D - Re_k + AG - A_l - Re_l$
tagsüber / Sommer pos.; Winter / Nacht neg.
- Energiebilanz: global ausgeglichen; lokal nicht unbedingt $Q + B + H + E = 0$