

# Atmosphärischer Wasserkreislauf, allgemeine Zirkulation und Strahlung

5. Vorlesung zur Einführung in die Meteorologie und Geophysik

Lisa Schielicke

A full-page background image featuring a powerful waterfall cascading over dark, jagged rocks on the left side. The sky above is a vibrant, deep blue, filled with soft, white, puffy clouds. A bright light source, likely the sun, is visible on the right side of the sky, creating a lens flare effect. The overall scene is dynamic and visually striking.

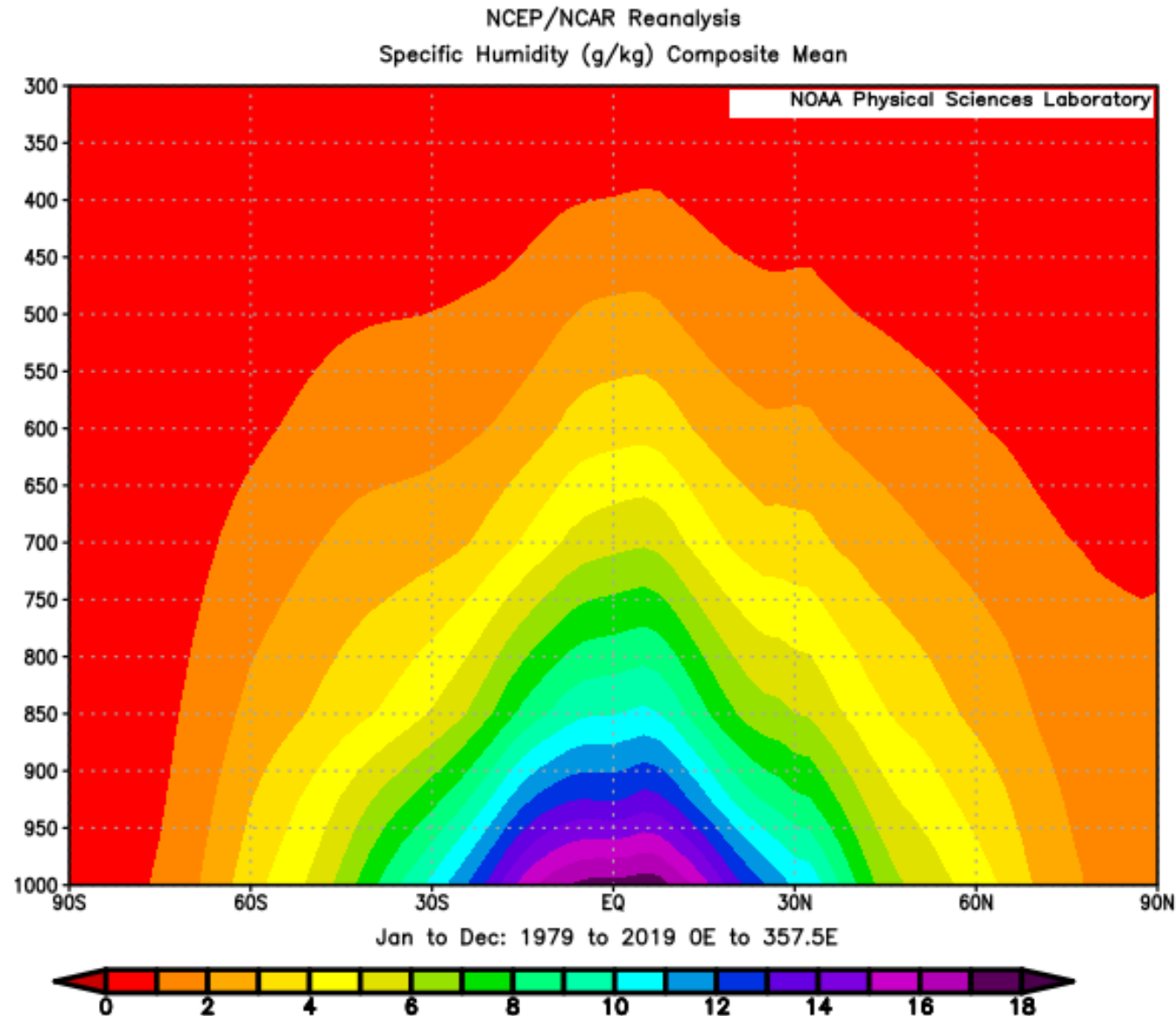
# Atmosphärischer Wasserkreislauf

# Bedeutung der Luftfeuchte im globalen Scale

- **Wasserdampftransport** ist immer auch ein verdeckter (latenter) **(Wärme-)Energietransport**.
- Die **Freisetzung latenter Wärme** bei Kondensation, Deposition und Gefrieren ist ein wesentlicher **Antrieb für viele atmosphärische Prozesse**, z.B.
  - Hadley-Zirkulation der Tropen
  - tropische Zyklonen (vorwiegend)
  - Zyklonen der Mittelbreiten
  - Gewitter (vorwiegend)
- Wasserdampf **absorbiert solare Strahlung** und trägt somit zur Strahlungserwärmung der Atmosphäre bei.
- Wichtiger ist jedoch seine **Absorption und Emission langwelliger Strahlung**, die ihn zum **wichtigsten Treibhausgas** macht.
- Wasserdampf ist **stark variabler Gasbestandteil** der Atmosphäre mit lokal maximal ~4 Volumenprozent (im Kochtopf 100%!), durchschnittlich aber nur 0,3%.

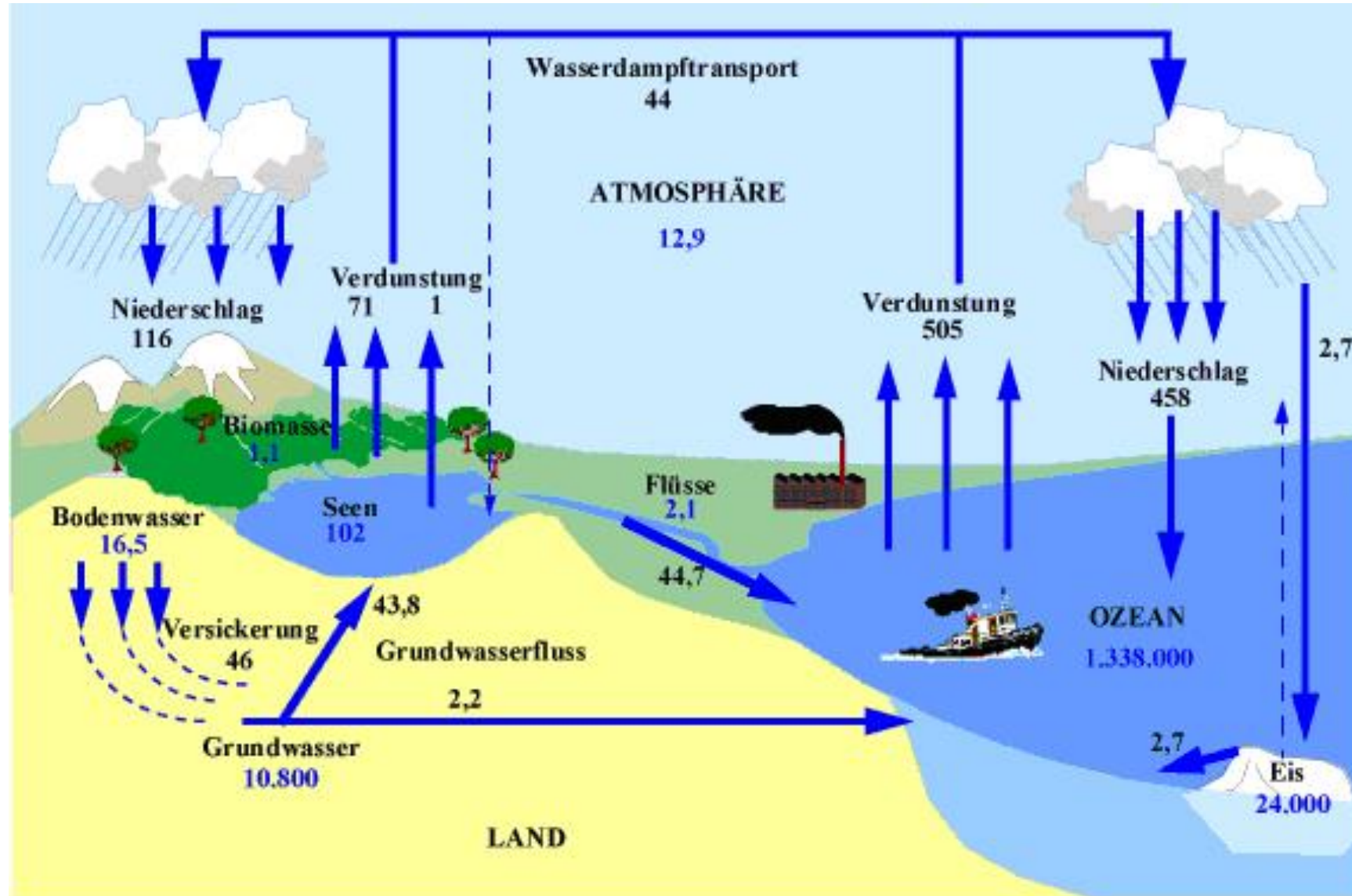


# Vertikale Verteilung der (spezifischen) Luftfeuchte



- Breitengradabhängig
- Abnahme mit der Höhe
- „Trocken“ in den Polarregionen und in der oberen Troposphäre und Stratosphäre
- Temperaturabhängigkeit entsprechend des Sättigungsdampfdrucks (Clausius-Clapayron-Gleichung/Magnus-Formel), der exponentiell mit  $T$  zunimmt.

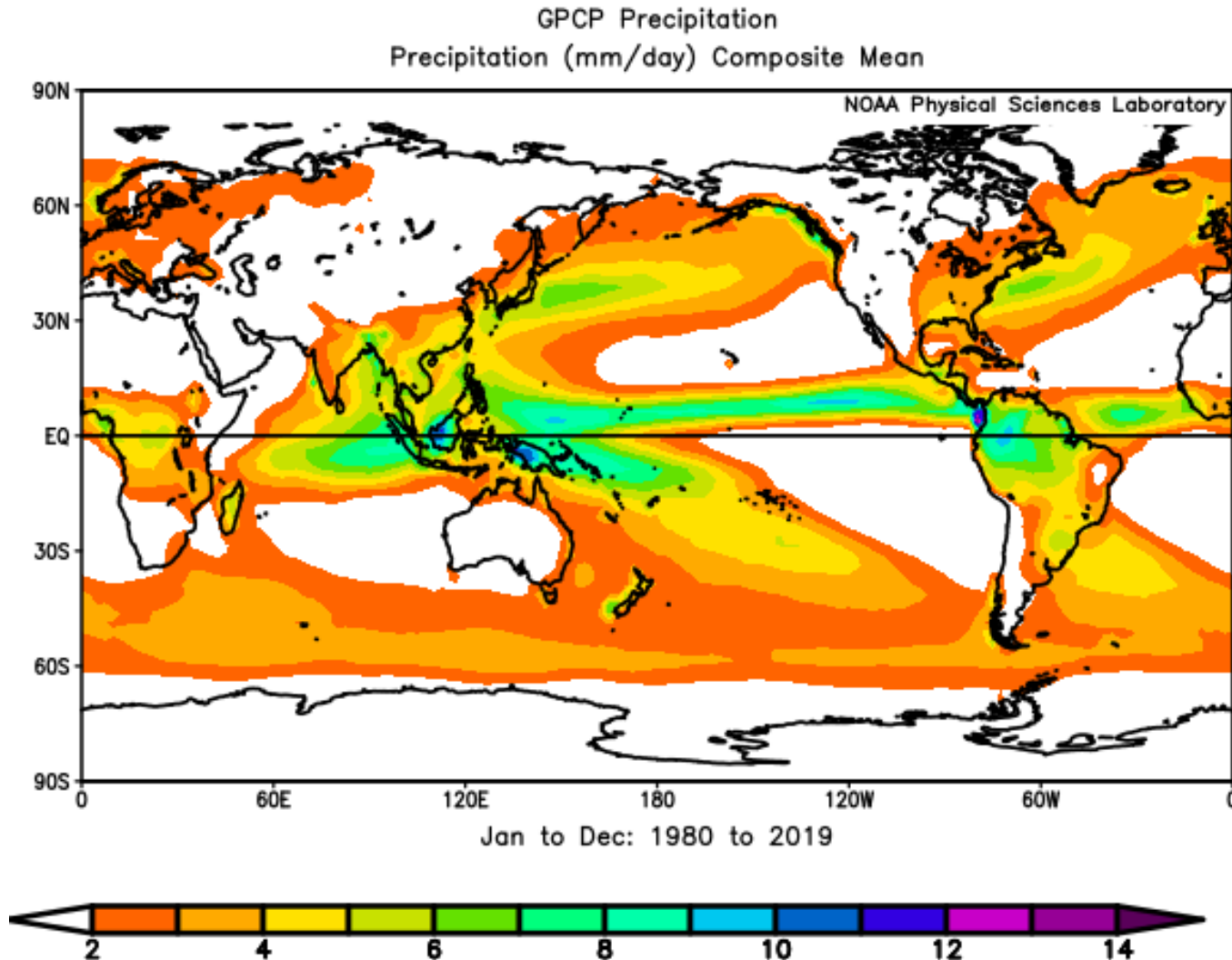
# Globaler Wasserkreislauf



**Globaler Wasserkreislauf:** **Blaue Zahlen** geben die Wasserreservoir in 1.000 km<sup>3</sup> an; **Schwarze Zahlen** geben die Flüsse in 1.000 km<sup>3</sup>/Jahr an.

Quelle: Dieter Kasang, Hamburger Bildungsserver: <https://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182190/wasserkreislauf-global/> (Aufruf: 3.11.2021)

# Globale Verteilung des Niederschlags



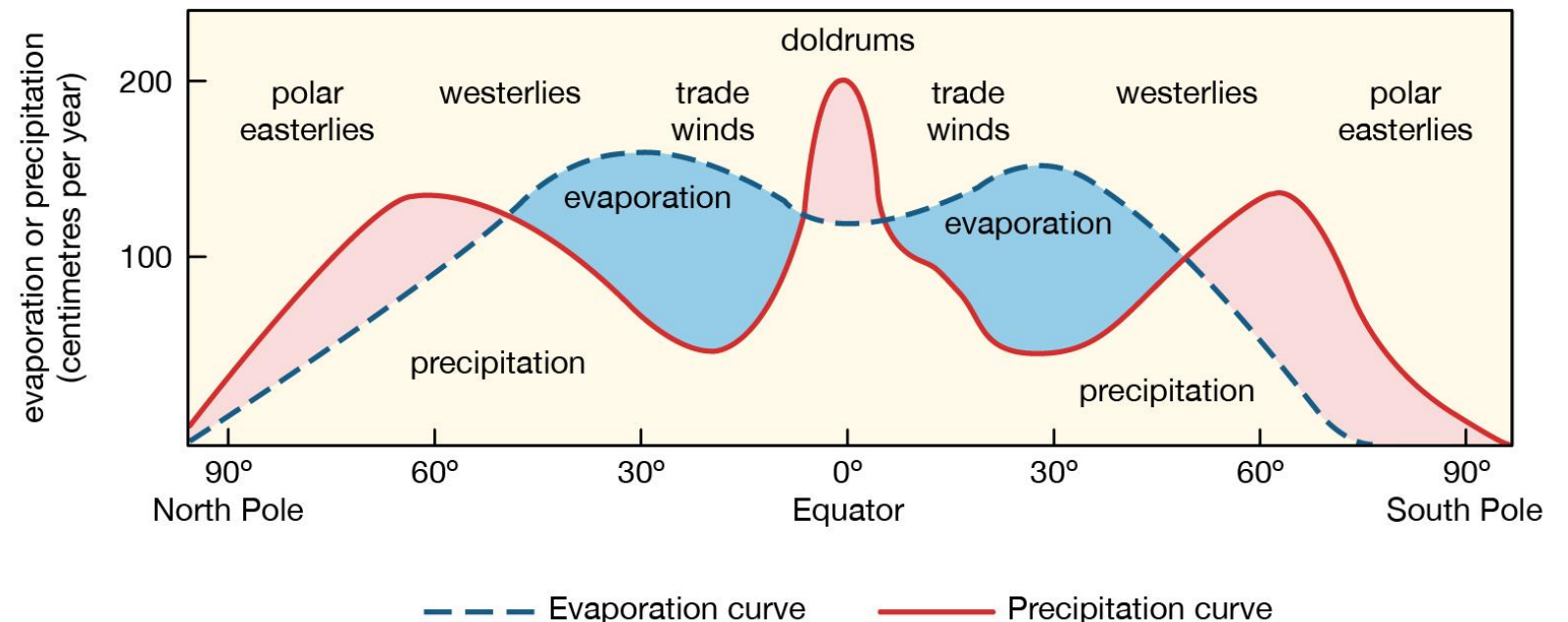
- Höchste Niederschlagsmengen in den Tropen und in den Stormtracks der mittleren Breiten.

# Niederschlag und Verdunstung

- Im langzeitlichen Mittel ist der Wasserkreislauf ein geschlossener Kreislauf und die Wasserdampfmenge, die verdunstet, fällt auch wieder als Niederschlag aus.
- Lokal ist die Verteilung sehr unterschiedlich, z.B. verdunstet mehr Wasser in den Subtropen während mehr Niederschlag in den Tropen und mittleren Breiten ausfällt.

→ Der Wasserdampf muss horizontal transportiert werden  
→ z.B. durch Passate (in die innertrop. Konvergenzzone und in die mittleren Breiten)

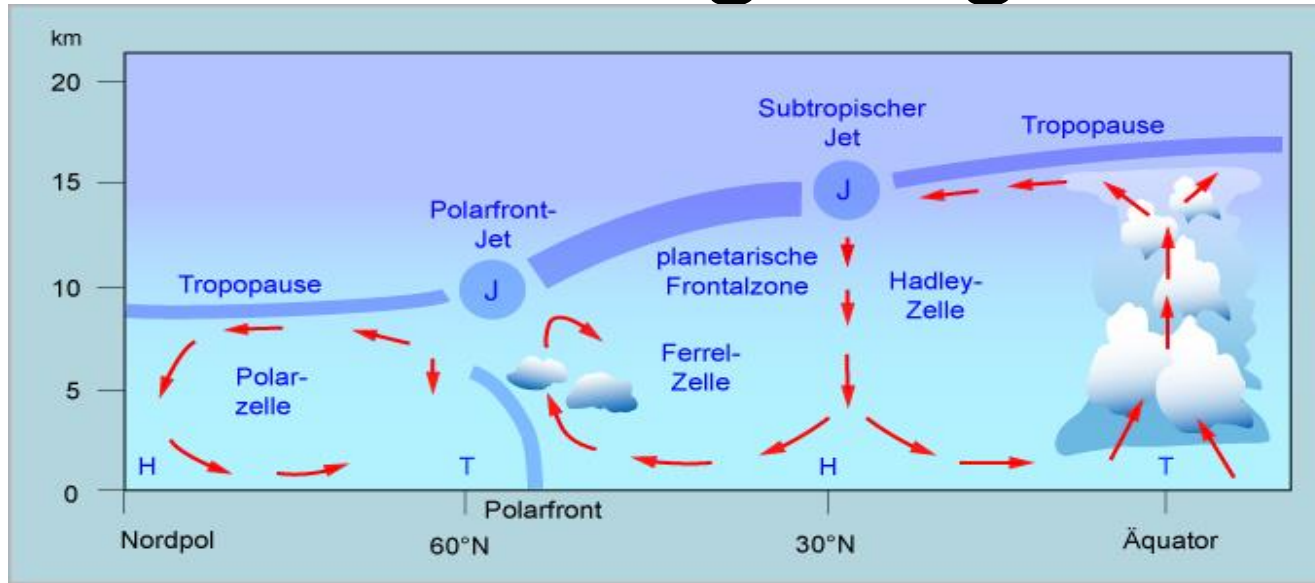
Latitudinal variation in precipitation and evaporation





# Zusammenhang zur globalen Zirkulation

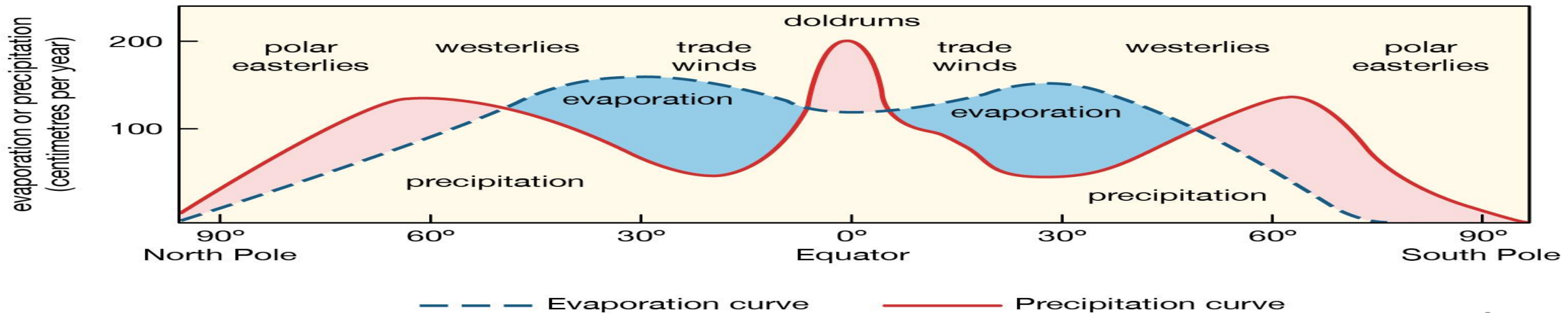
Quelle: [https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosph%C3%A4rische\\_Zirkulation](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosph%C3%A4rische_Zirkulation) (Aufruf: 3.11.2021)



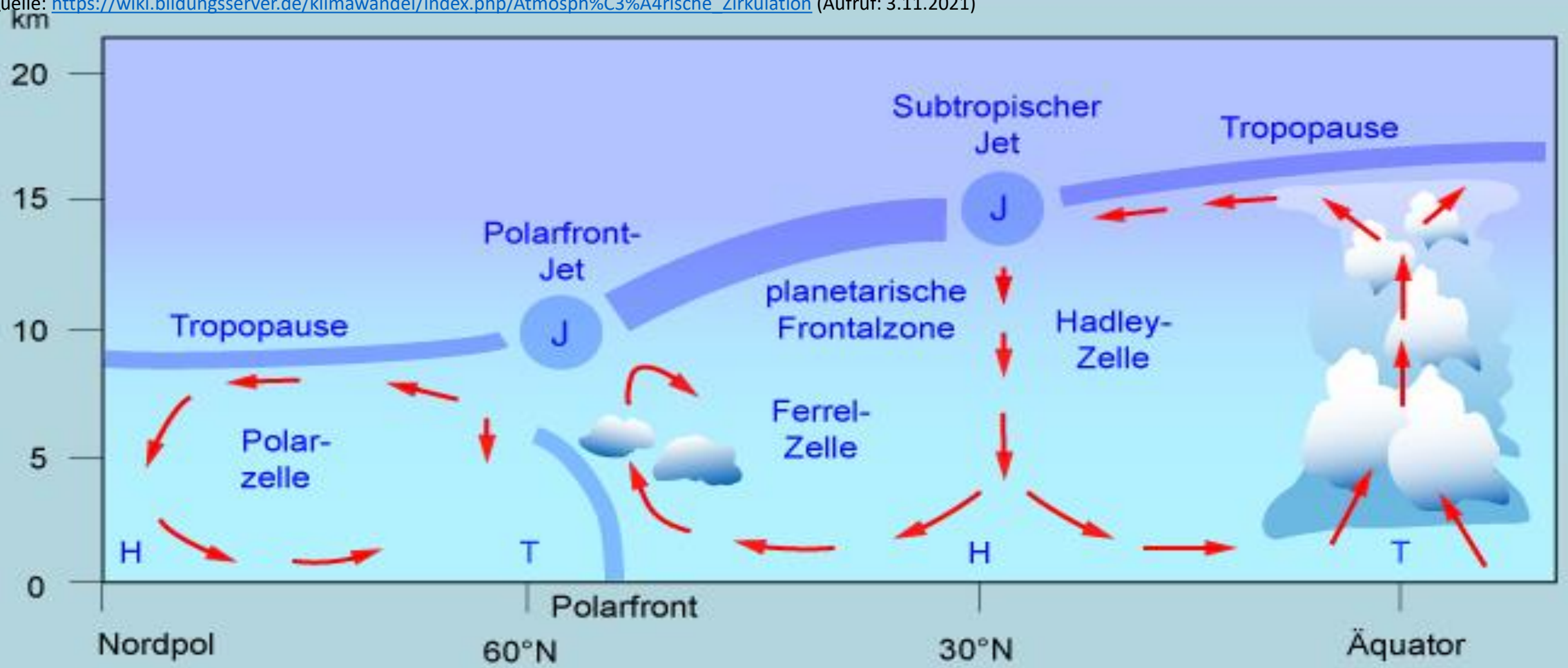
← Atmosphärische Zirkulationszellen (globales Mittel, hier für die Nordhemisph.)

**Hauptantrieb der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation ist die Strahlung.**

## Latitudinal variation in precipitation and evaporation

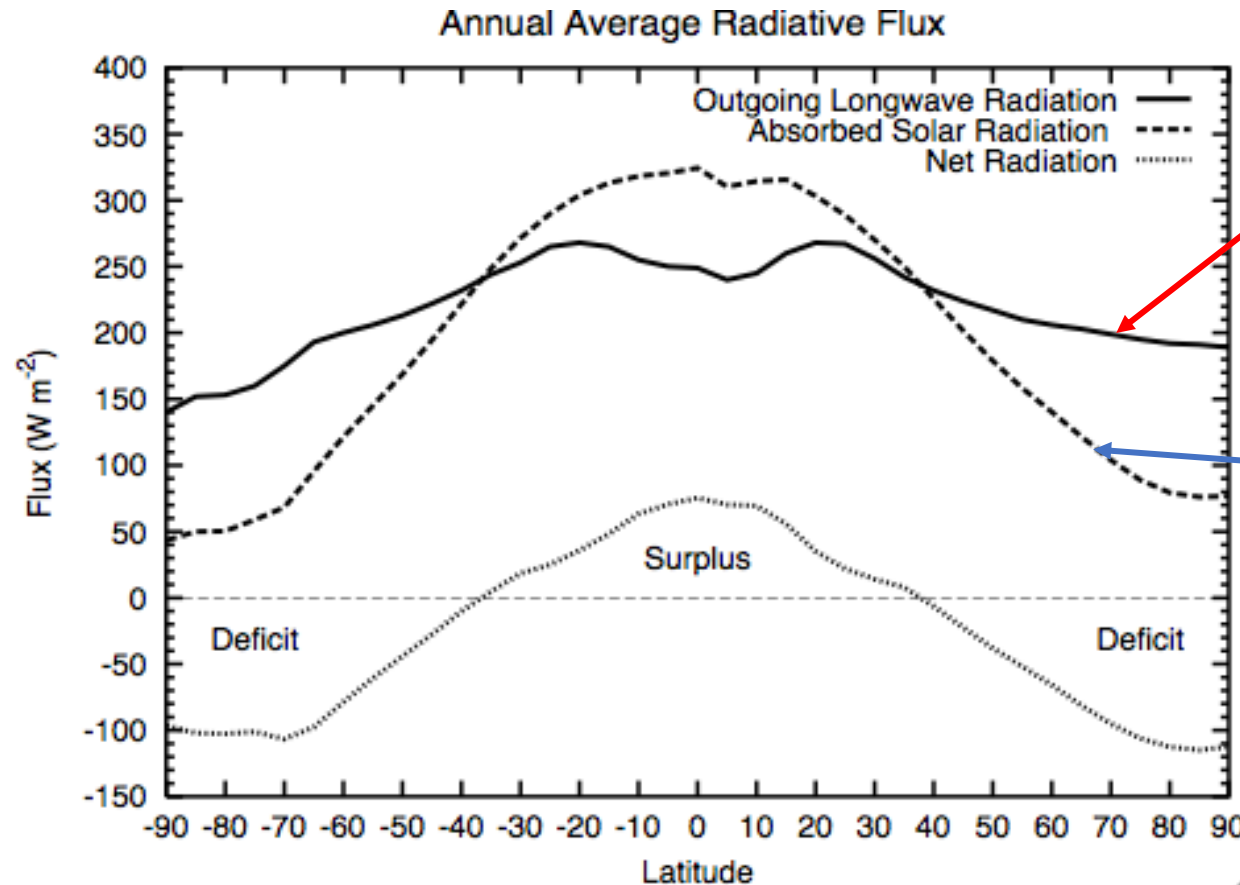






## Globale Zirkulation

# Strahlungsungleichgewicht auf der Erdoberfläche als Antrieb der globalen Zirkulation

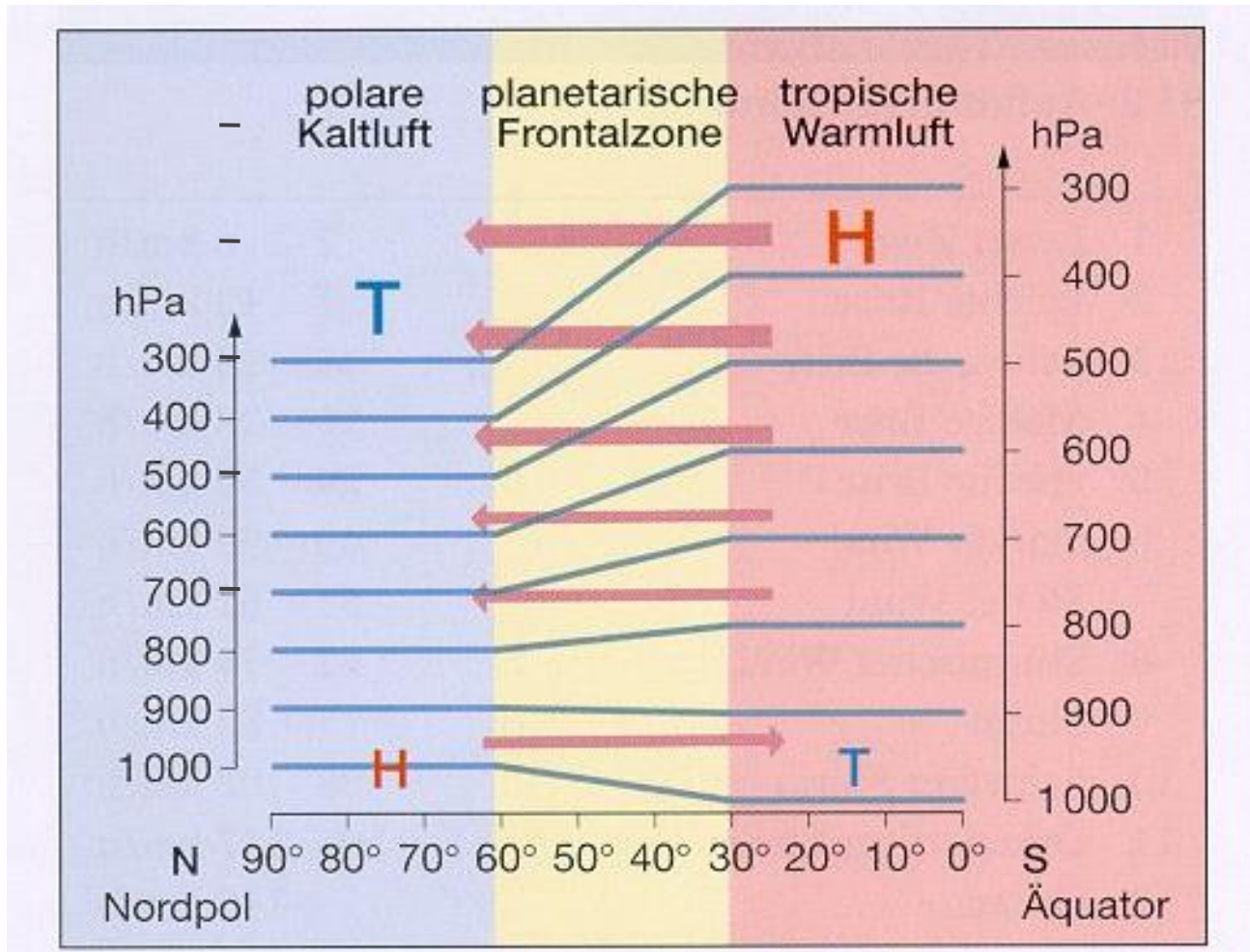


Terrestrische Ausstrahlung (am Oberrand der Atmosphäre)

mittlere von Erde und Atmosphäre absorbierte solare Einstrahlung (Grund für unterschiedliche Einstrahlung: Kugelgestalt der Erde)

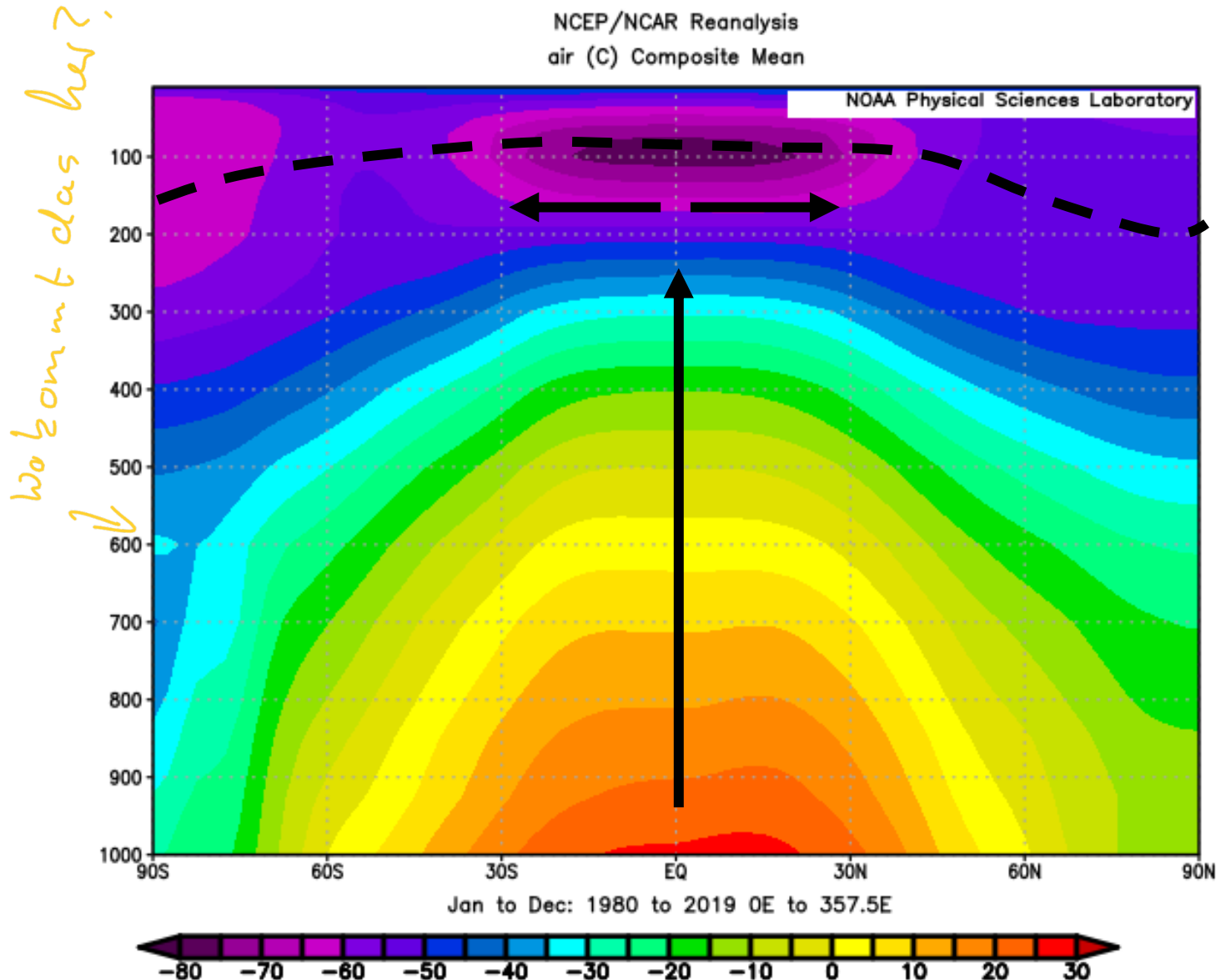
Nettoüberschuss in niedrigen Breiten und ein Nettodefizit in den hohen Breiten (**differenzielle Erwärmung**).

# Antrieb durch differenzielle Erwärmung



- **Nettogewinn** von Strahlungsenergie in den niedrigen Breiten: **Erwärmung** und Ausdehnung der Atmosphäre
- **Nettoverlust** von Strahlungsenergie in den hohen Breiten: **Abkühlung** und Kompression der Atmosphäre.
- **Merken:** *In warmer Luft nimmt der Druck langsamer mit der Höhe ab als in kalter Luft, s.a. barometrische Höhenformel)*
- **Horizontale Druckgradienten** entstehen und treiben Luft zum niedrigen Druck; Einsetzen einer polwärts gerichteten Ausgleichsströmung in der Höhe

# Wiederholung: Vertikale Temperaturverteilung (global)

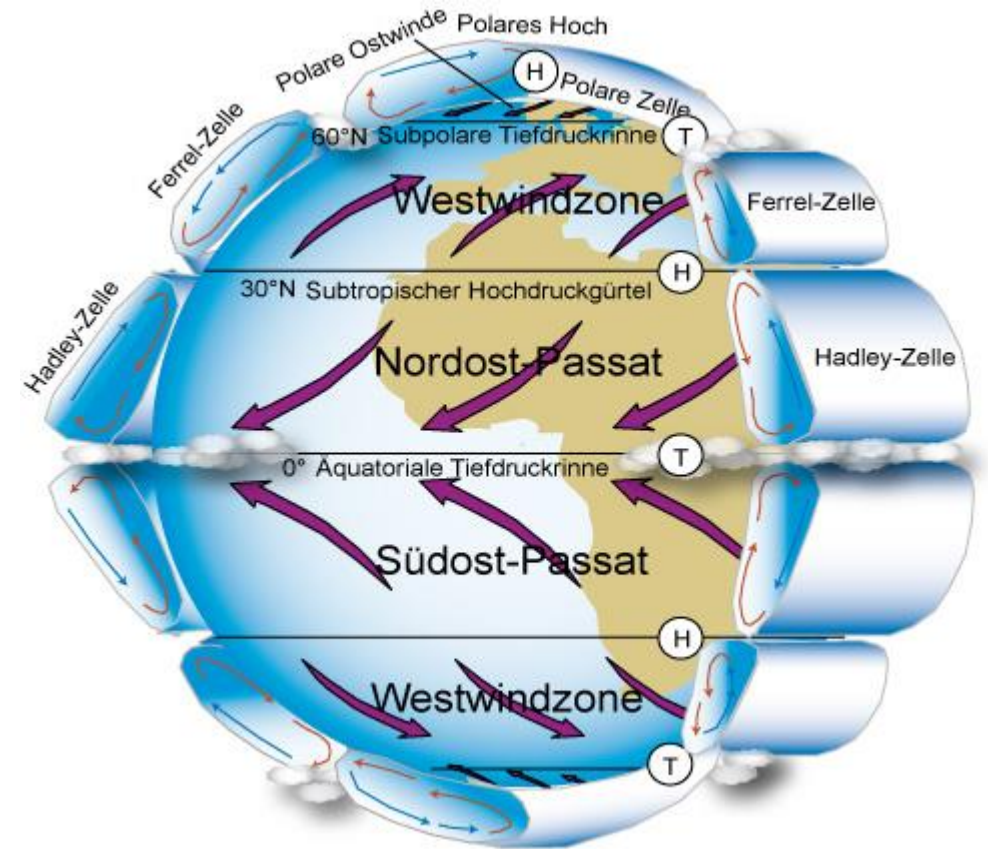
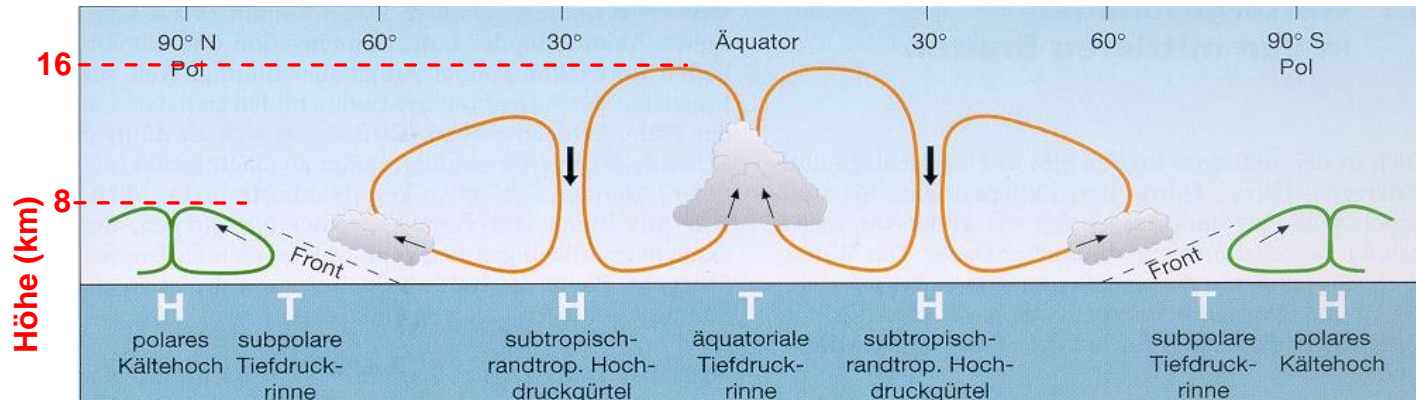


- Breitengradabhängigkeit der Temperatur (auf einem festen Höhenlevel)  
→ **Strahlungsbedingt**
- Am Äquator steigt die warme Luft auf und strömt in der Höhe polwärts.
- Generell besteht ein Bestreben der Atmosphäre, Ungleichgewichte auszugleichen, d.h. ein Transport vom Äquator Richtung Pol setzt ein
- Würde die Erde nicht rotieren, dann würde die Strömung bis zum Pol verlaufen und es würde sich eine geschlossene Zirkulationszelle ergeben  
→ **ABER: Erdrotation beachten!**



# Antrieb durch differenzielle Erwärmung: Ausbildung von Zirkulationszellen

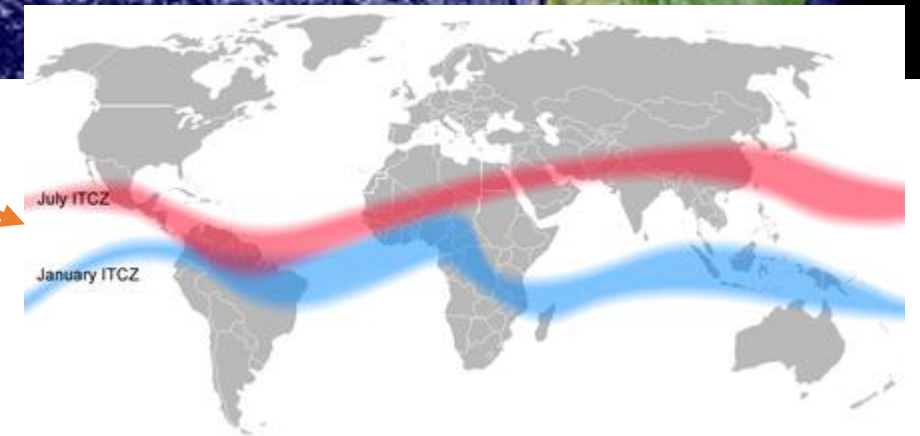
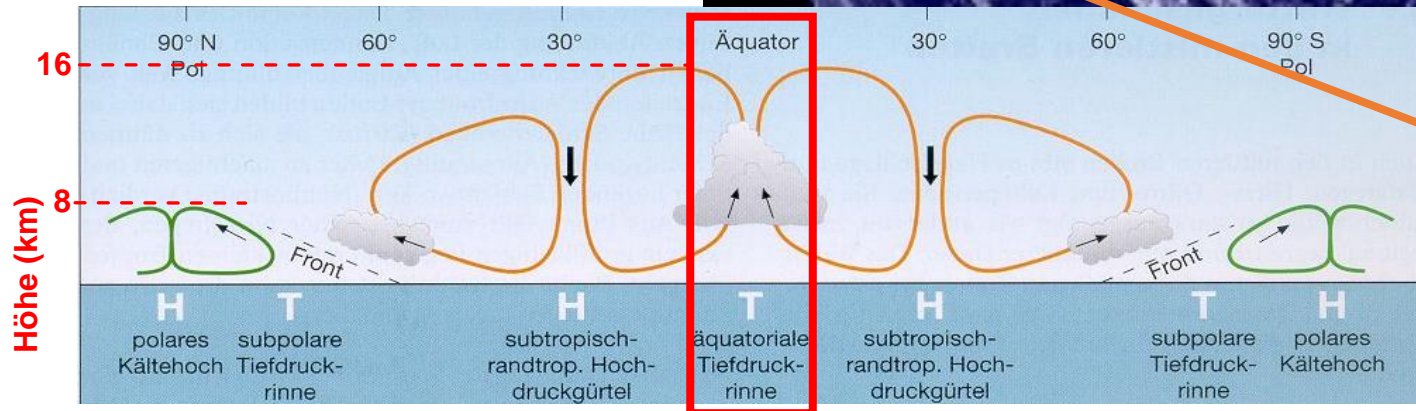
- Durch die Rotation der Erde bilden sich im Allgemeinen (gemittelt, global) **3 Zirkulationszellen** aus. Diese Zellen werden als **allgemeine atmosphärische Zirkulation** bezeichnet.
- Die **Rotation** der Erde (Coriolis-Effekt), die **ungleiche Verteilung der Kontinente**, und das Freiwerden latenter Wärme (**Kondensation von Wasserdampf**) führen zu viel **komplexeren Bewegungsmustern**, als hier dargestellt.





# Innertropische Konvergenzzone (ITCZ)

- Die ITCZ zeichnet sich durch einen tiefen Druck am Boden aus. Es kommt zum Aufstieg feucht-warmer Luft und Ausbildung **hochreichender Konvektionsbewölkung** (siehe Satellitenbild).
- Die **Lage der ITCZ** variiert im Jahresverlauf in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Sonne

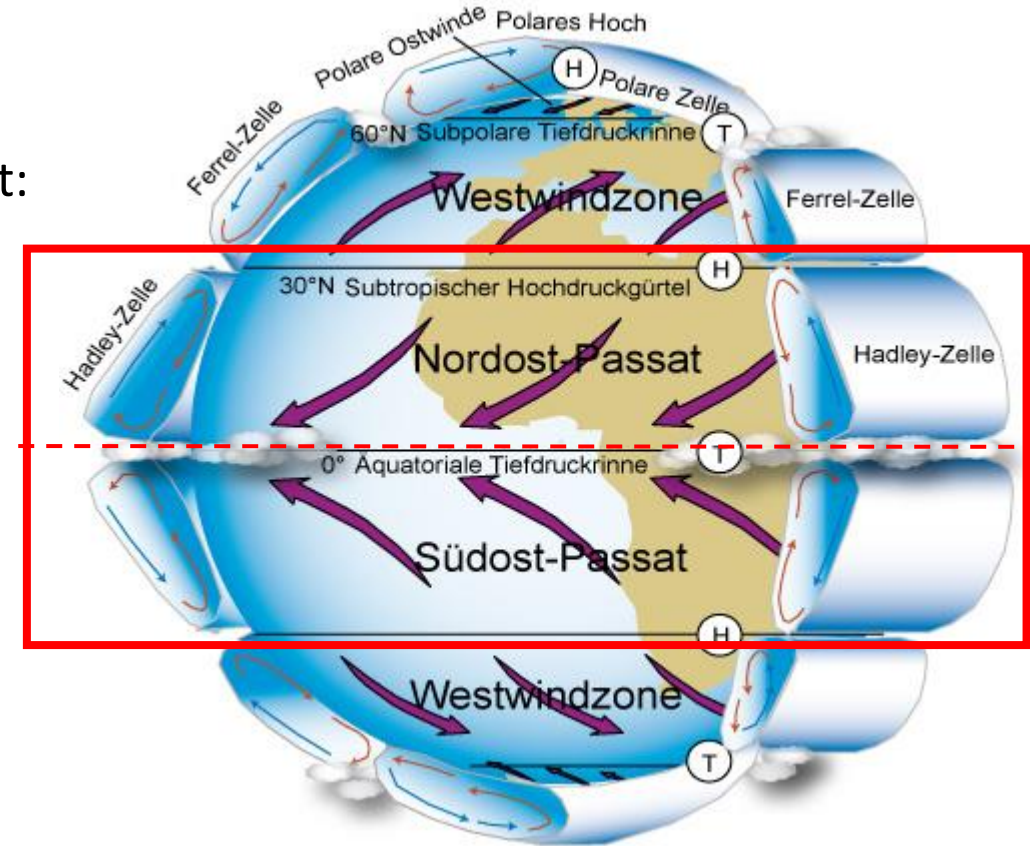
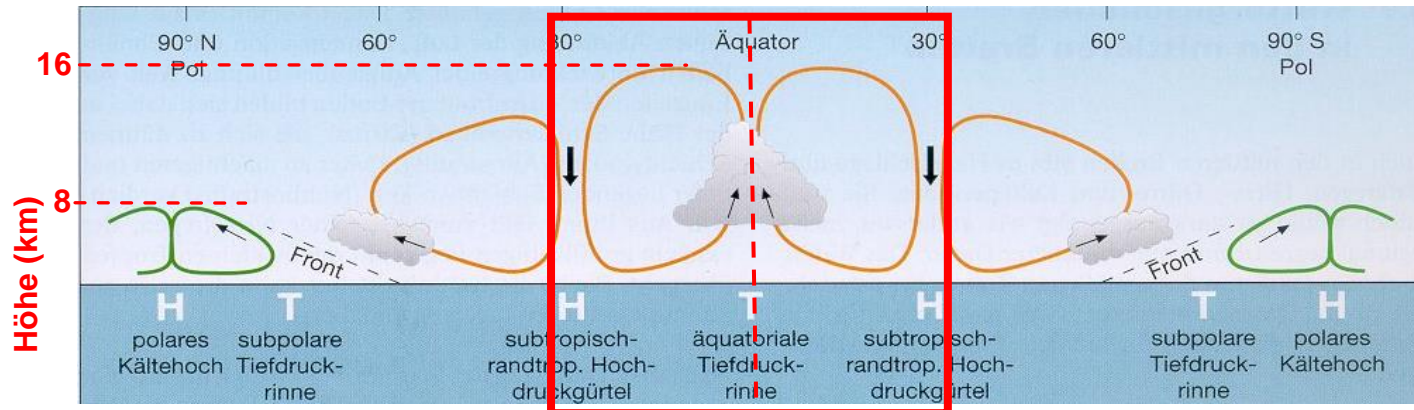




# Hadley-Zirkulation

Die Hadley-Zelle stellt eine geschlossene Zirkulationszelle dar mit:

- (1) Aufstieg an der äquatorialen Tiefdruckrinne,
- (2) polwärtigem Transport im oberen Ast (mit Ablenkung durch die Corioliskraft → Westwinde),
- (3) Absinken im subtropischen Hochdruckgürtel bei ca. 30°N/S und
- (4) einem Transport Richtung Äquator durch die Passate (mit Ablenkung durch die Corioliskraft → Ostwinde, schwächer als im oberen Ast wegen des Einfluss der Reibung in Bodennähe)

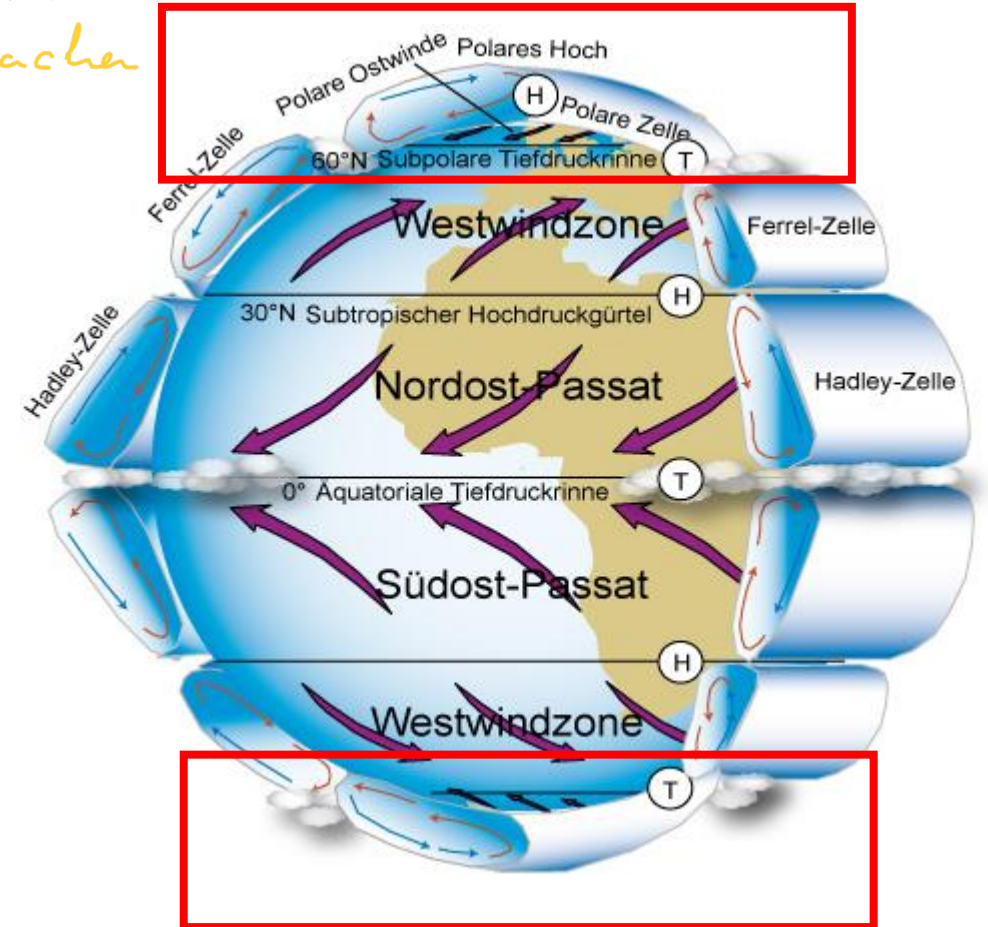
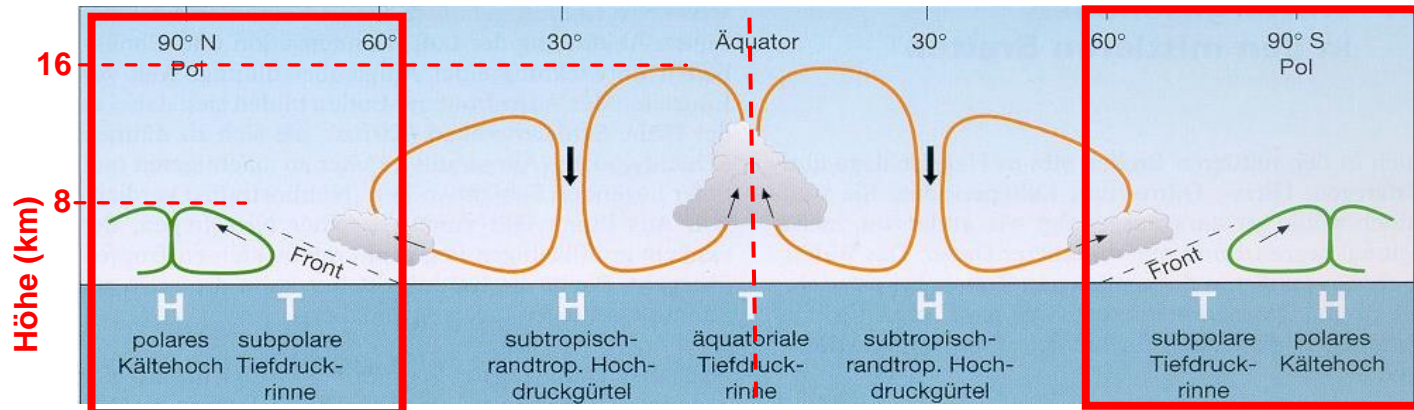


Die Hadley-Zirkulation ist **thermisch-direkt**, da warme Luft aufsteigt und kalte Luft absinkt.

# Polare Zelle

→ farbiger Eiswürfel in Wanne → Video machen

- Luft kühlt über den Polkappen sehr stark aus.
- Die kalten, schweren Luftmassen, die so entstehen, sinken ab und bilden über den Polen Hochdruckgebiete aus.
- Kaltluft fließt aus den Hochs Richtung Äquator. Aufgrund der Erdrotation (Corioliskraft) entstehen Ostwinde.
- In ca. 60°N/S steigt die Luft an der subpolaren Tiefdruckrinne auf
- In der Höhe: Zurückströmen in Richtung Pol (Ablenkung durch die Corioliskraft → Westliche Winde)

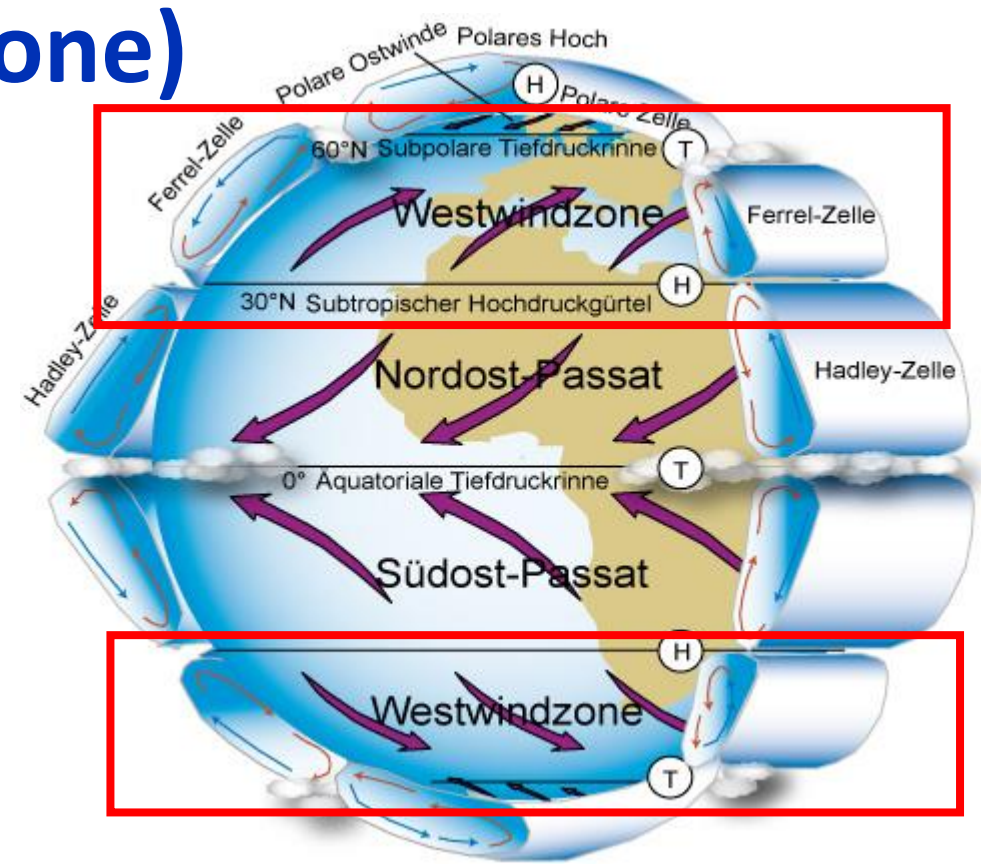
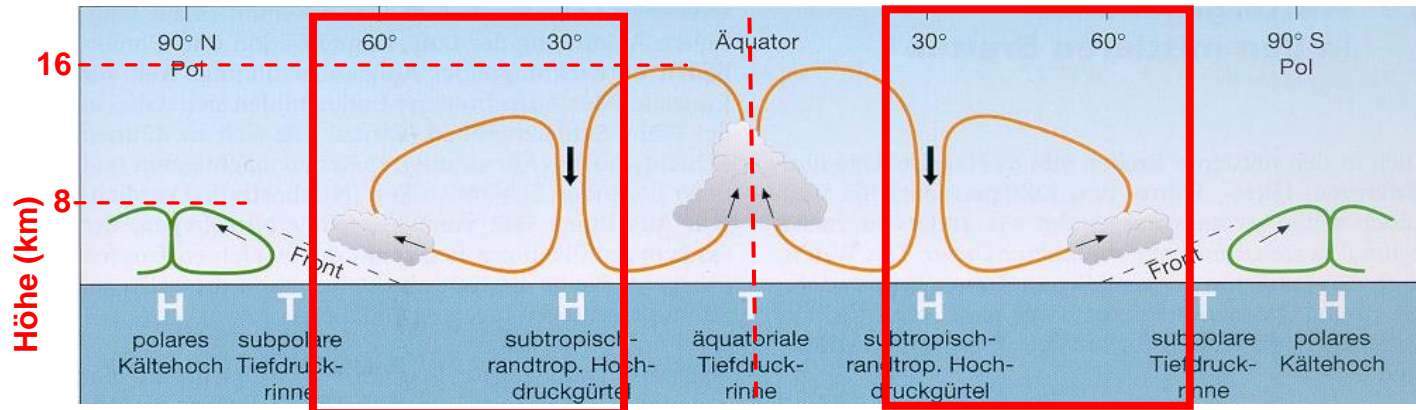


Die Polare Zirkulation ist ebenfalls **thermisch-direkt**, da kalte Luft absinkt und warme Luft aufsteigt.



# Instabile Ferrel-Zelle (Westwindzone)

- Die Ferrel-Zelle: zwischen trop. Hadley-Zelle und der Polarzelle
- Ferrel-Zelle ist nur im langjährigen, zonalen Mittel zu sehen(!) mit aufsteigender Luft in ca. 60°N/S (subpolare Tiefdruckrinne) und absteigender Luft in ca. 30°N/S (Subtropen).
- In Bodennähe wird die Luft polwärts verlagert: Einwirken der Corioliskraft → Westwinde → **Westwindzone der gemäßigten Breiten**
- Instabile Zirkulationszelle**, weil in ca. 60°N/S feucht-warme Westwinde auf kalt-trockene polare Ostwinde treffen → Bildung der Polarfront

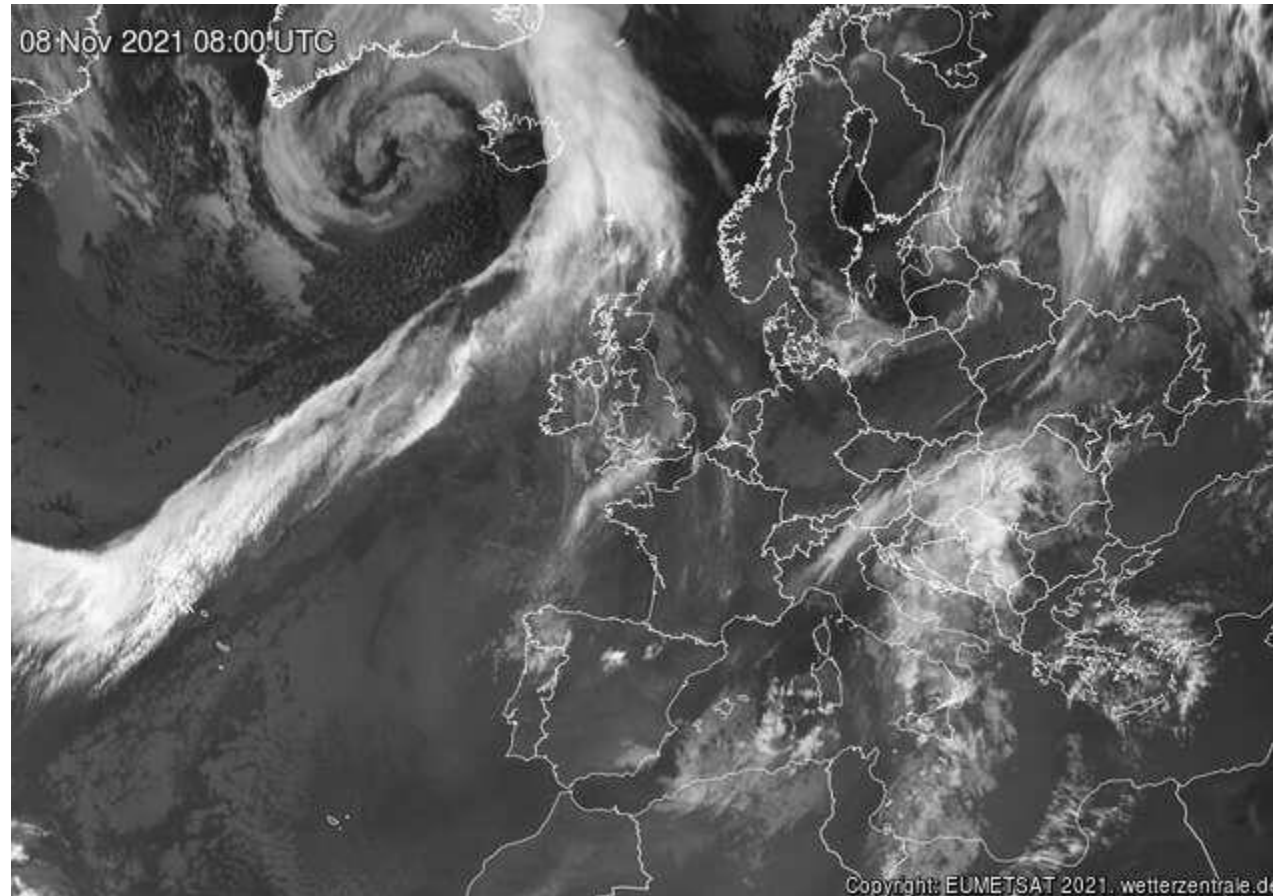


Die Ferrel-Zelle ist **thermisch-indirekt**, da warme Luft absinkt und kalte Luft aufsteigt. Dennoch gibt es **einen polwärts-gerichteten Netto-Wärmetransport**, der durch die **Hoch- und Tiefdruckgebiete der mittleren Breiten** bewerkstelligt wird!

# Unser Wissen um die atmosphärische Zirkulation stammt aus Beobachtungsdaten

Ein hilfreiches Werkzeug: Beobachtung der atmosphärischen Strömungen aus dem All mit Hilfe von Satelliten

Satelliten registrieren  
Strahlung!



Quelle: <https://www.wetterzentrale.de/> (8.11.2021, 8 UTC, Luftmasse S/W)





# Strahlung

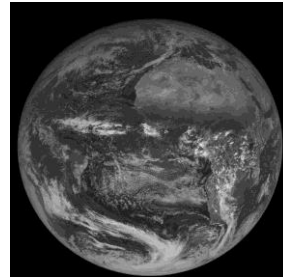


# Strahlung erschließt uns die Erde aus dem All

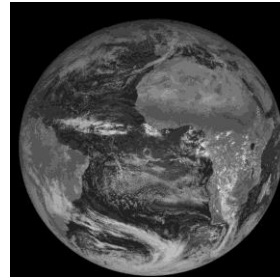
VIS=Visible  
NIR=Near Infrared  
WV=Water Vapor  
IR=Infrared  
HRVIS=High-Resolution Visible

Zahlen geben die Wellenlängen der gemessenen Strahlung in  $\mu\text{m}$  an.

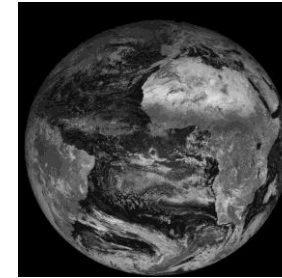
Quelle:  
Johannes Schmetz,  
Eumetsat



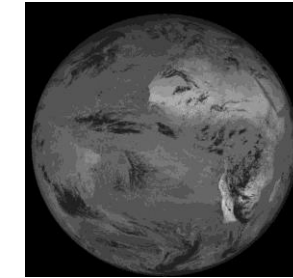
**VIS 0.6**



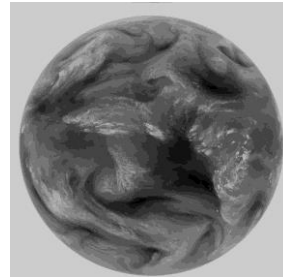
**VIS 0.8**



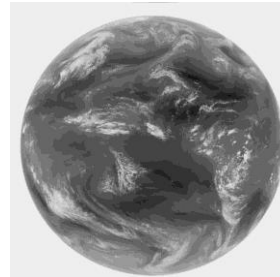
**NIR 1.6**



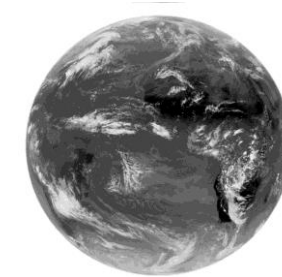
**NIR 3.9**



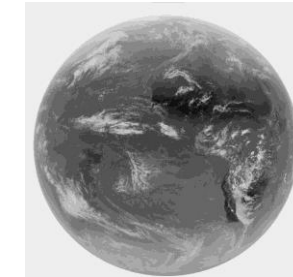
**WV 6.2**



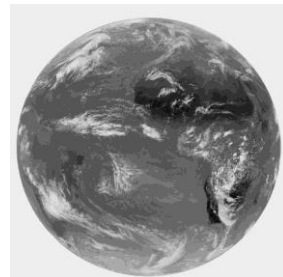
**WV 7.3**



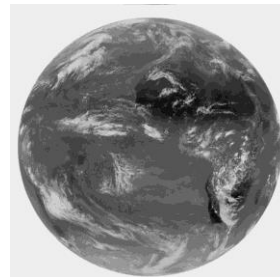
**IR 8.7**



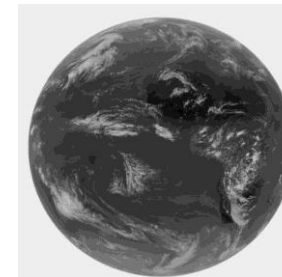
**IR 9.7**



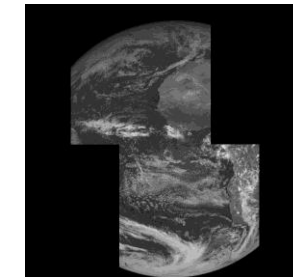
**IR 10.8**



**IR 12.0**



**IR 13.4**



**HRVIS**

SEVIRI-Sensor auf METEOSAT Second Generation (MSG)  
Abtastung alle 15 Minuten, 3 km (HRVIS 1 km) Auflösung am Subsatellitenpunkt

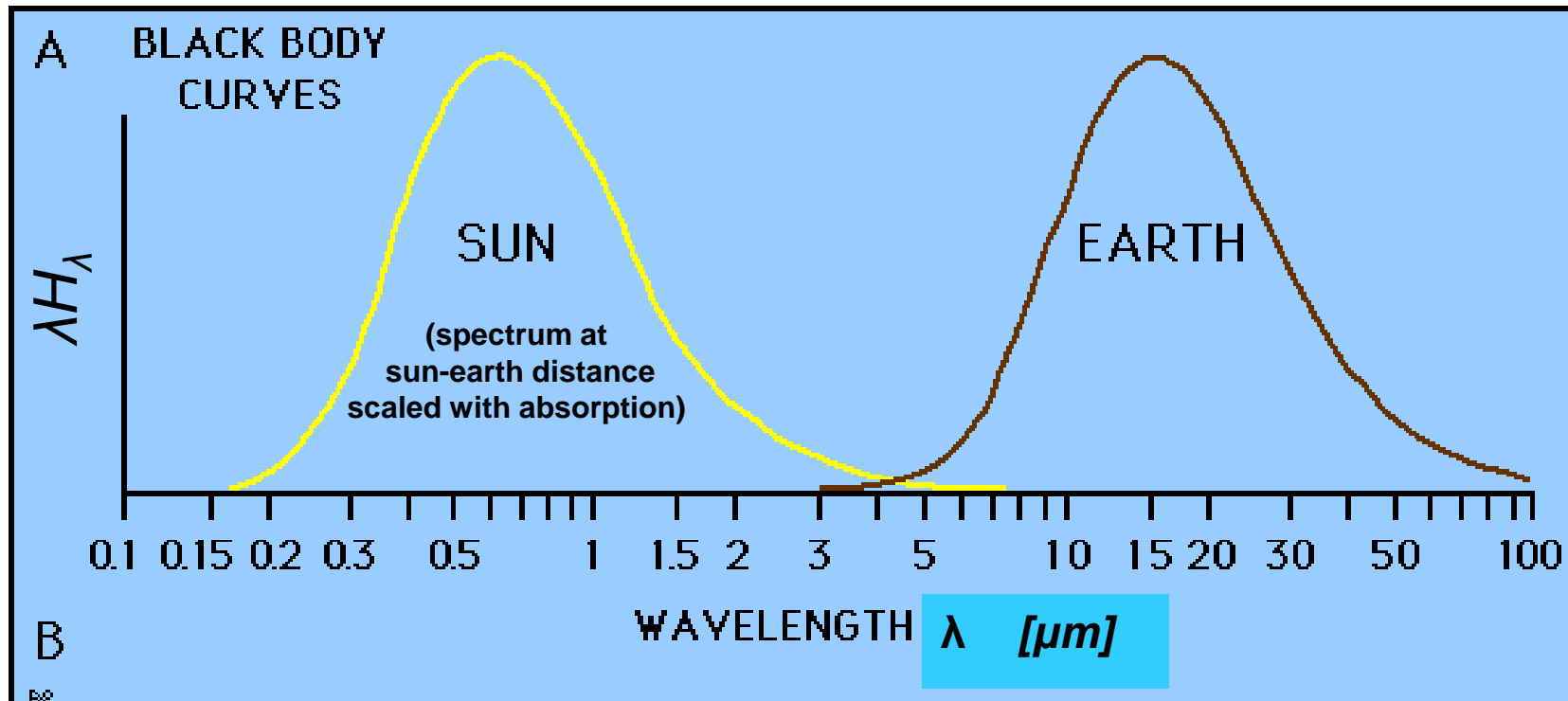


# Bedeutung der Strahlung

- Die räumliche Verteilung der Strahlungsenergiebilanzen (Summe aller eingehenden und ausgehenden Strahlungsenergieströme) auf der Erde treibt die **atmosphärische Zirkulation** über die resultierende horizontal unterschiedliche Erwärmung/Abkühlung (**= differenzielle Erwärmung**) – und zwar über die hierüber generierten horizontalen Druckgradienten – an.
- **Solare Strahlung wird zum größten Teil von der Erdoberfläche absorbiert**, in Wärmeenergie umgewandelt, von unten der Atmosphäre über terrestrische, langwellige Strahlung und Wärmeleitung zugeführt, aber **hauptsächlich zur Verdunstung von Wasser** verbraucht.
- Strahlung ist bis auf das Schwerfeld die einzige Information, die von Satelliten über Erde und Atmosphäre erfasst werden kann; diese wird von der **Fernerkundung** zur Bestimmung des Atmosphärenzustandes genutzt

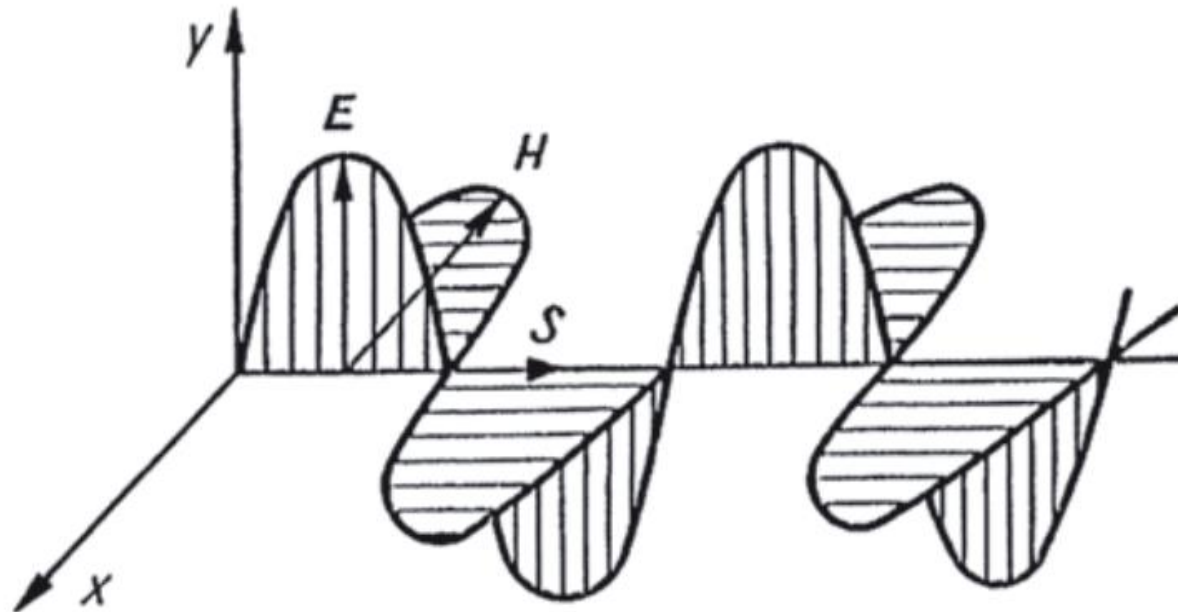
# Allgemeines zur Strahlung

- Strahlung besteht aus *elektromagnetischen Wellen (oder Photonen)*
- Meteorologisch wichtig:
  - a. die kurzwellige Strahlung, die von der Sonne kommt (*solar*)
  - b. die langwellige Strahlung, die von der Erde/Atmosphäre selbst ausgestrahlt wird (*terrestrisch*).
- Beide Strahlungsarten nehmen *fast disjunkte* spektrale Bereiche ein!



# Strahlung als elektromagnetische Welle

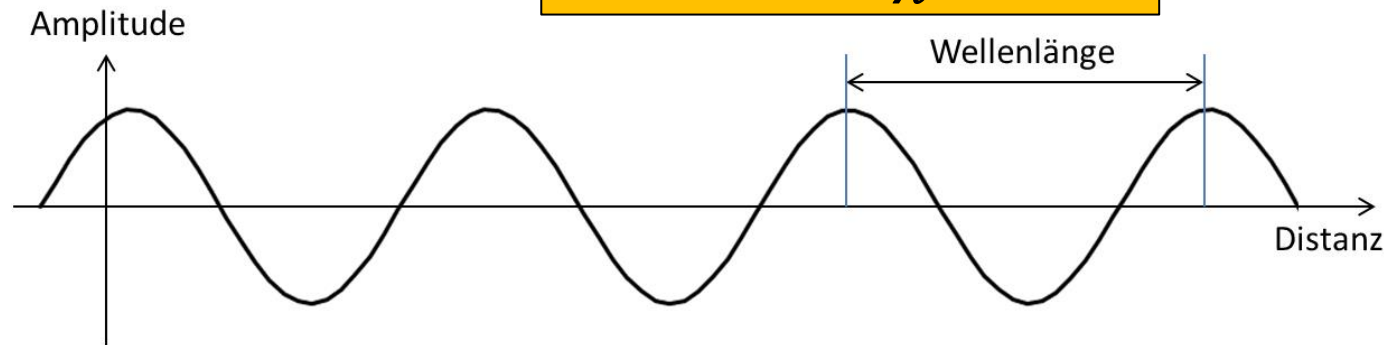
- Strahlung = **Transport von Energie durch elektromagnetischer Wellen** oder Photonen (geht auch im Vakuum)
- Die mit der Strahlung transportierte Energie  $E = h\nu$  (=Strahlungsenergie (Einheit J) mit Frequenz  $\nu$  und  $h = 6,62612 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ : Plancksches Wirkungsquantum) betrachtet man als Energie pro Fläche und Zeit, sodass man von einem Strahlungsstrom spricht.
- **Strahlung breitet sich geradlinig aus** (gilt in erster Näherung auch für Luft)



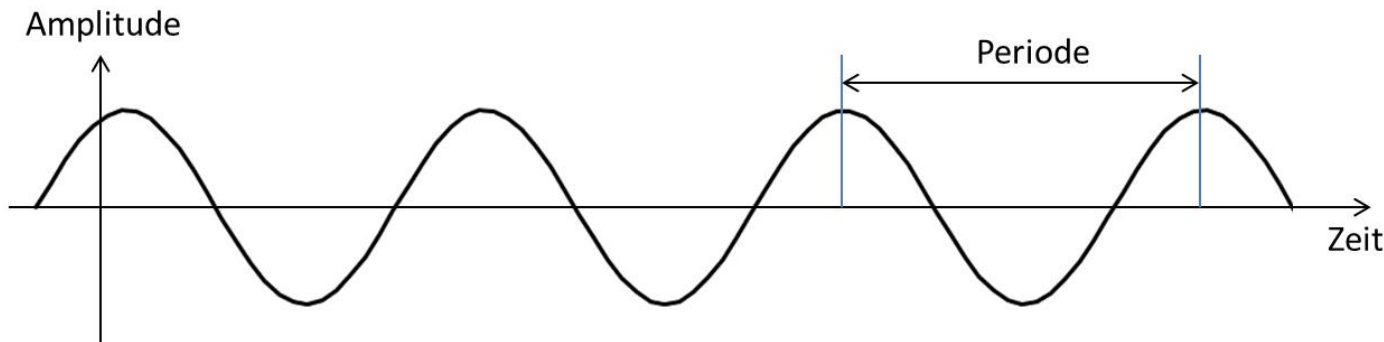
# Frequenz und Wellenlänge elektromagnetischer Wellen

- Strahlung besteht aus **elektromagnetischen Wellen (oder Photonen)**
- Elektrische & magnetische Felder breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  ( $c \approx 300\,000\text{ km/s}$ ) aus.
- Je höher die Frequenz  $\nu$  (Einheit 1/s), umso kleiner ist die Wellenlänge  $\lambda$  (Einheit m):

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$



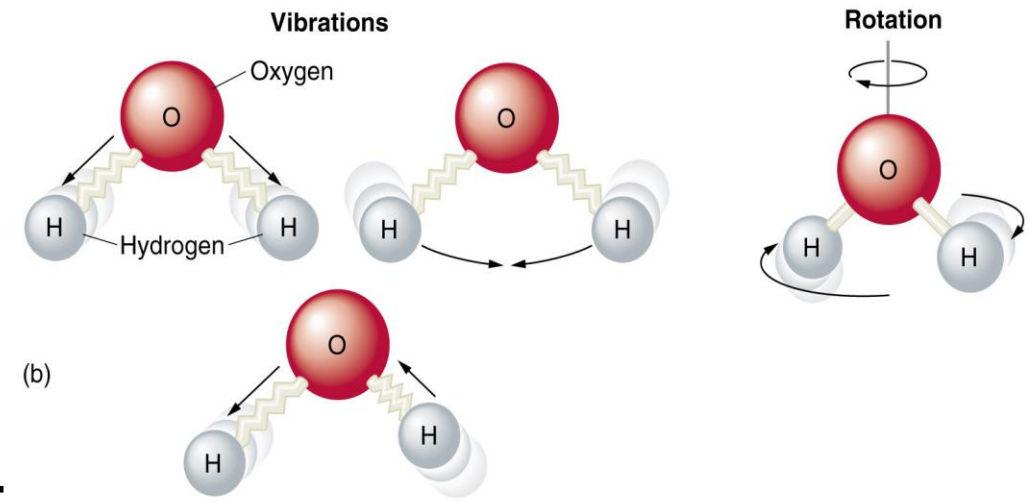
Wellenlänge = Distanz zwischen zwei „Wellenbergen“





# Elektromagnetische Wellen

- **Elektromagnetische Wellen/Photonen** werden **emittiert** von Materie, wenn Atome/Moleküle auf einen niedrigeren Energiezustand (beschrieben u.a. durch Elektronenkonfiguration, Schwingungs- und Rotationszustand) übergehen.
- Werden **elektromagnetische Wellen/Photonen von einem Molekül absorbiert** (vernichtet), so gelangt das Molekül entsprechend auf einen höheren Energiezustand.
- **Angeregte Molekülzustände** geben diese Energie teilweise an die **kinetische Energie der Moleküle** weiter und erhöhen damit die Temperatur.



**Jegliche Materie oberhalb von 0 K emittiert Strahlung.**

# Definition: Schwarzer Körper

„**Ein Schwarzer Körper** (auch: Schwarzer Strahler, planckscher Strahler, idealer schwarzer Körper) **ist eine idealisierte thermische Strahlungsquelle**. Die Idealisierung besteht darin, dass solch ein Körper **alle auftreffende elektromagnetische Strahlung jeglicher Wellenlänge vollständig absorbiert**, während reale Körper immer einen Teil davon zurückwerfen. **Gleichzeitig sendet er als Wärmestrahlung eine elektromagnetische Strahlung aus**, deren Intensität und spektrale Verteilung von der weiteren Beschaffenheit des Körpers und seiner Oberfläche unabhängig sind und **nur von seiner Temperatur abhängen**. “

Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer\\_K%C3%B6rper](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper) (8.11.2021)

# Stefan-Boltzmann-Gesetz

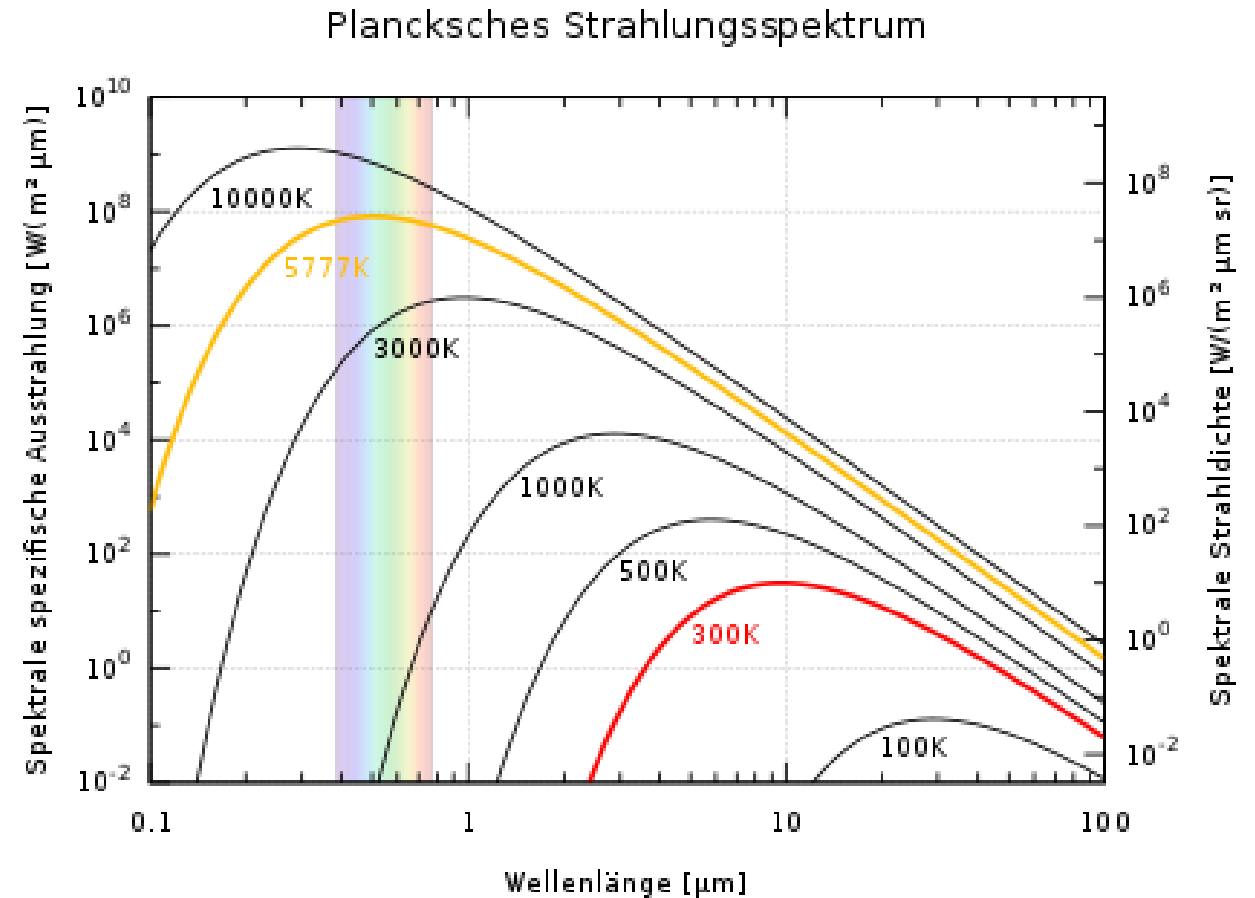
- Jeder Körper (mit  $T > 0$  K) gibt Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Ein Schwarzer Körper sendet die bei der betreffenden Temperatur maximal mögliche thermische Leistung aus (Emissivität=1).
- Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung  $P$  (in W) ein schwarzer Körper der Fläche  $A$  und der absoluten Temperatur  $T$  (in K) aussendet:

$$P = BA = \sigma AT^4 \quad \text{und} \quad B = \sigma T^4$$

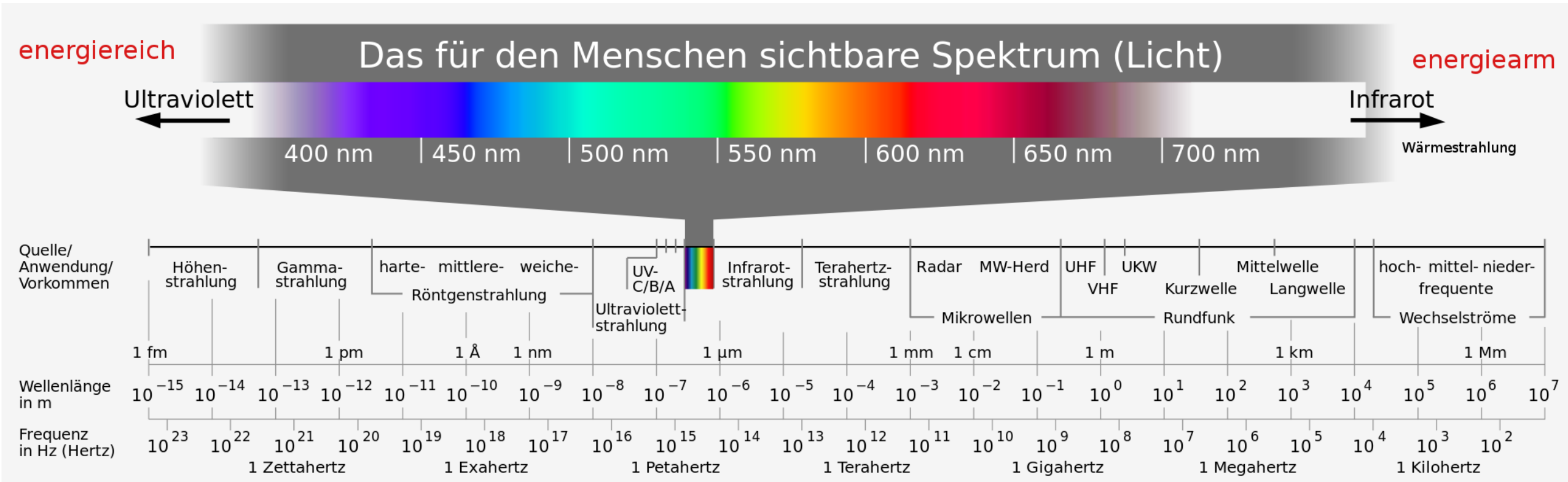
mit Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$

$$\sigma = 5,670374419 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

- Die gesamte Strahlungsleistung entspricht der Fläche unter den Kurven in der Abbildung (Plancksches Strahlungsspektrum)



# Elektromagnetisches Spektrum



Quelle: <https://www.chemiezauber.de/inhalt/q2/farbmittel-und-textilien/licht-und-farbigkeit/theorie-der-farbigkeit/407-wellenlaenge-frequenz-farbe.html> (8.11.2021)



# Quellen meteorologisch wirksamer Strahlung

- **Solare Strahlung ( $\approx 0,2 - 5 \mu\text{m}$ )**

Emission der „Sonnenatmosphäre“, Schwarzkörperstrahlung bei  $T \approx 6000 \text{ K}$   $\rightarrow \approx 1365 \text{ W/m}^2$  am Erdatmosphärenoberrand, senkrecht zur Einstrahlungsrichtung, quasi-kontinuierliches Spektrum

- **Terrestrische Strahlung ( $\approx 3 - 100 \mu\text{m}$ )**

- Emission der Erdoberfläche, Schwarzkörperstrahlung bei  $T \text{ ca. } 300 \text{ K}$ , kontinuierliches Spektrum
- Emission atmosphärischer Gase, grauer Körper bei  $T \text{ ca. } 200\text{--}300 \text{ K}$ , spektral sehr differenziert durch
  - Rotationsübergänge
  - Vibrationsübergänge
  - Elektronenübergänge
- Emission von Niederschlag, Wolken, Aerosole, graue Körper bei  $T \text{ ca. } 200 - 300 \text{ K}$ , kontinuierliches Spektrum weil sehr viele Zustandsfreiheitsgrade, die Energie absorbieren und emittieren können

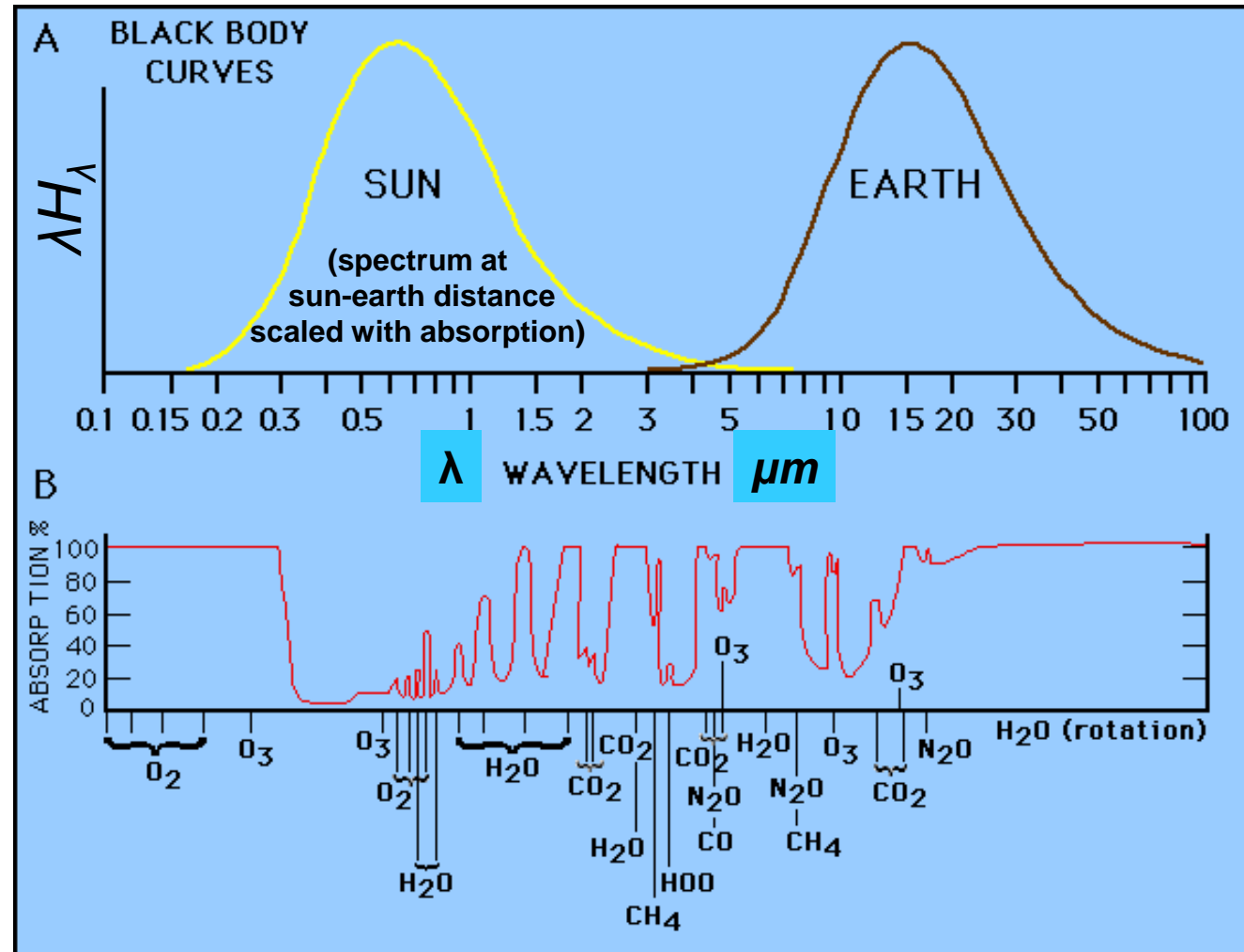
# Absorption von Strahlung in der Atmosphäre

Gase absorbieren die Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre selektiv.

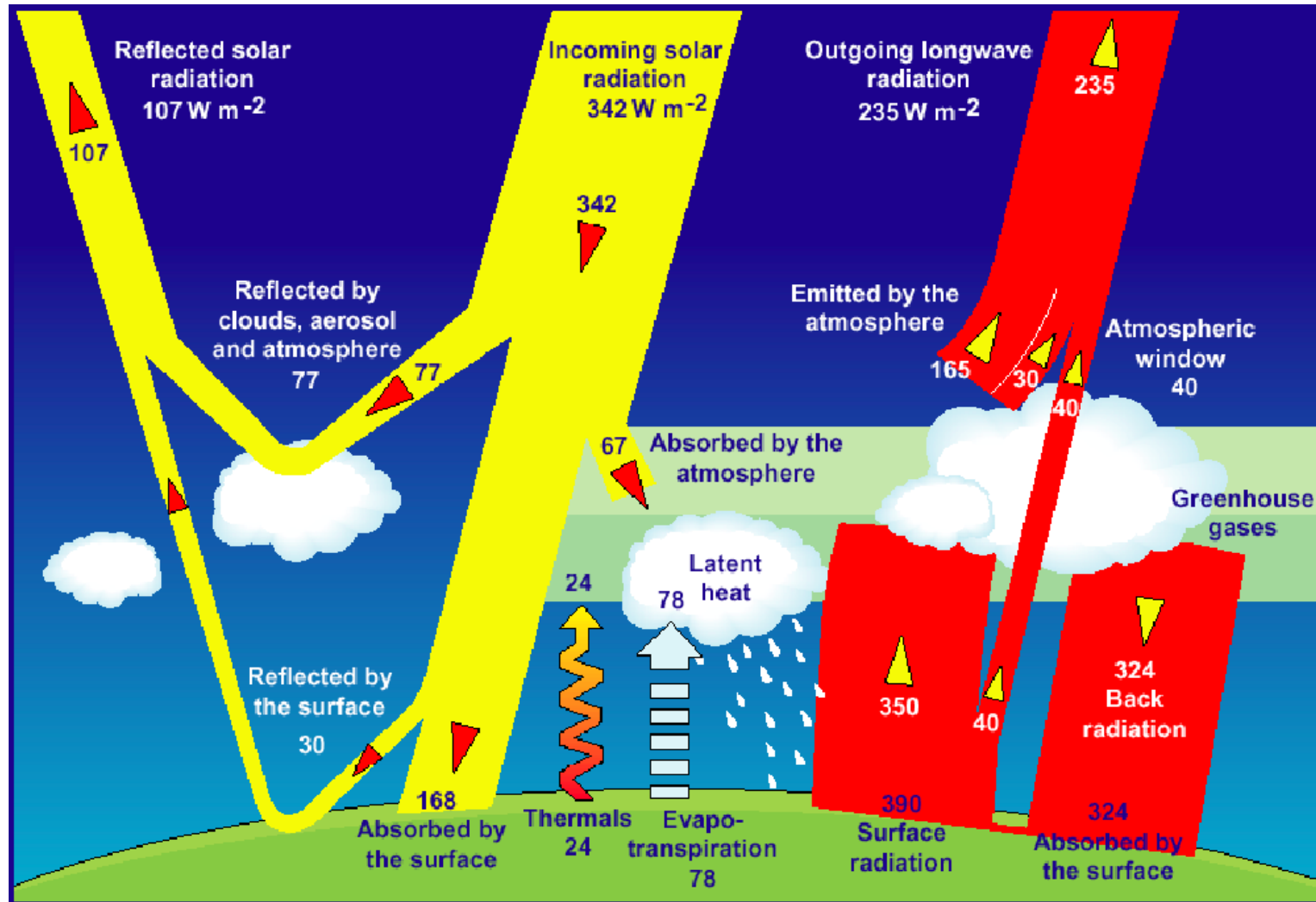
Dadurch gibt es „**optisch dichte**“  
**Bereiche** im Spektrum und  
„**Fenster**“.

Der **terrestrische Spektralbereich**  
**ist** im Gegensatz zum solaren  
optisch relativ **dicht**.

H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> und O<sub>3</sub>  
sind dabei die wichtigsten  
Absorber.



# Globale Strahlungsbilanz



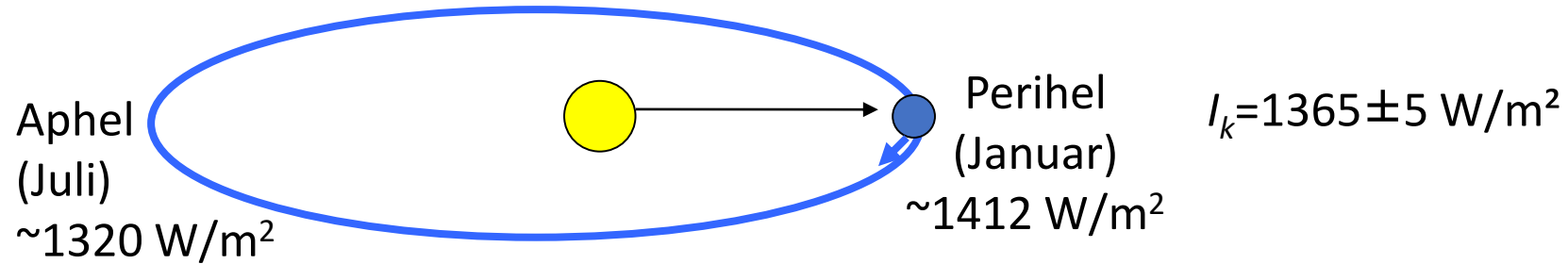
KIEHL J., and K. TRENBERTH, 1997: Earth's annual global mean budget. *Bull. Am. Met. Soc.*, **78**, 197-208.

Die Atmosphäre verliert durch Strahlung  $\sim 100 \text{ W m}^{-2}$ . Die Landoberfläche gewinnt durch Strahlung  $\sim 100 \text{ W m}^{-2}$ . Ausgleich durch turbulente Flüsse (fühlbare+latente Wärme).



# Solarkonstante

Die Solarkonstante  $I_k$  ist die Strahlungsflussdichte, die **extraterrestrisch** an der Erde auf einer Einheitsfläche senkrecht zur Strahlrichtung der Sonne **ankommt**.



Aus der Solarkonstante kann man mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz unter der Annahme, dass die Sonne ein schwarzer Strahler ist, die **Strahlungstemperatur der Sonne** berechnen.

**Ansatz:** Die gesamte Strahlungsenergie, die die Sonnenatmosphäre verlässt (durch eine Kugeloberfläche mit Radius  $r_s = 6,9626 \times 10^8 \text{ m}$ ), muss die gleiche sein, die durch eine Kugel mit Radius Abstand Sonne-Erde  $r_{S-E} = 1471 - 1521 \times 10^8 \text{ m}$ , im **Mittel  $1496 \times 10^8 \text{ m}$** , geht (Energieerhaltung).

$\sigma T^4$

$r_s$

$r_{S-E}$

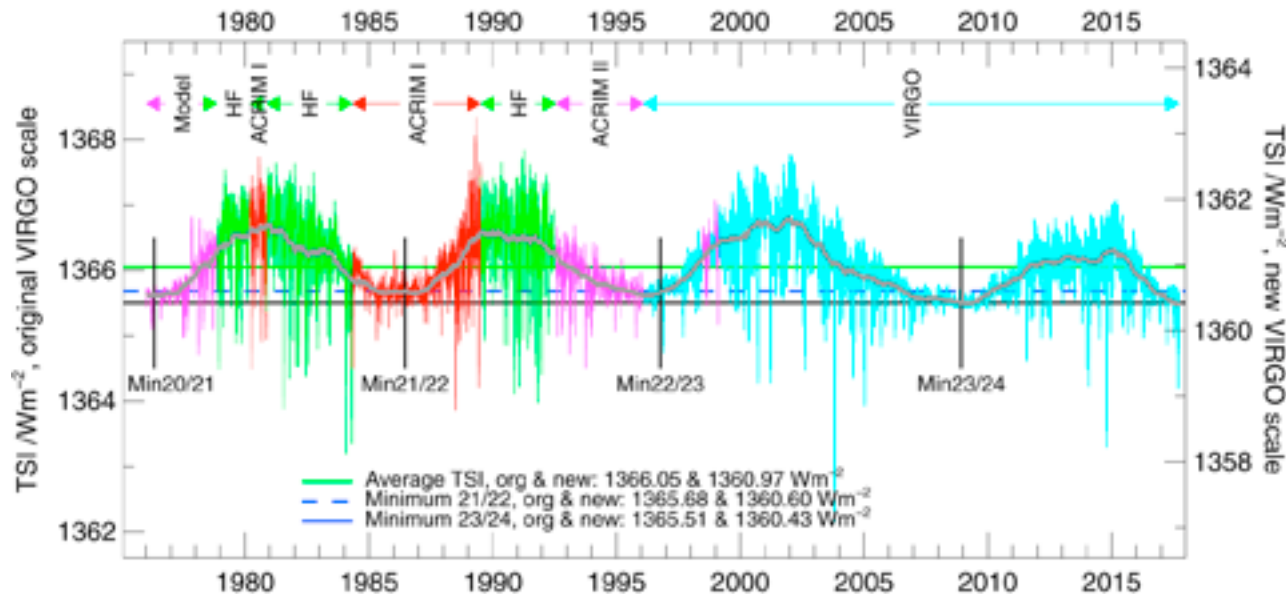
$I_k$

$$\underbrace{4\pi r_s^2}_{\text{Sonnenoberfläche}} \sigma T_s^4 \equiv I_k \underbrace{4\pi r_{S-E}^2}_{\text{Oberfläche einer Kugel um die Sonne mit Radius Abstand Erde-Sonne}} \Rightarrow I_k = \frac{r_s^2}{r_{S-E}^2} \sigma T_s^4$$

$$\Rightarrow T_s = \sqrt[4]{\frac{I_k r_{S-E}^2}{\sigma r_s^2}} = 5774 \text{ K}$$

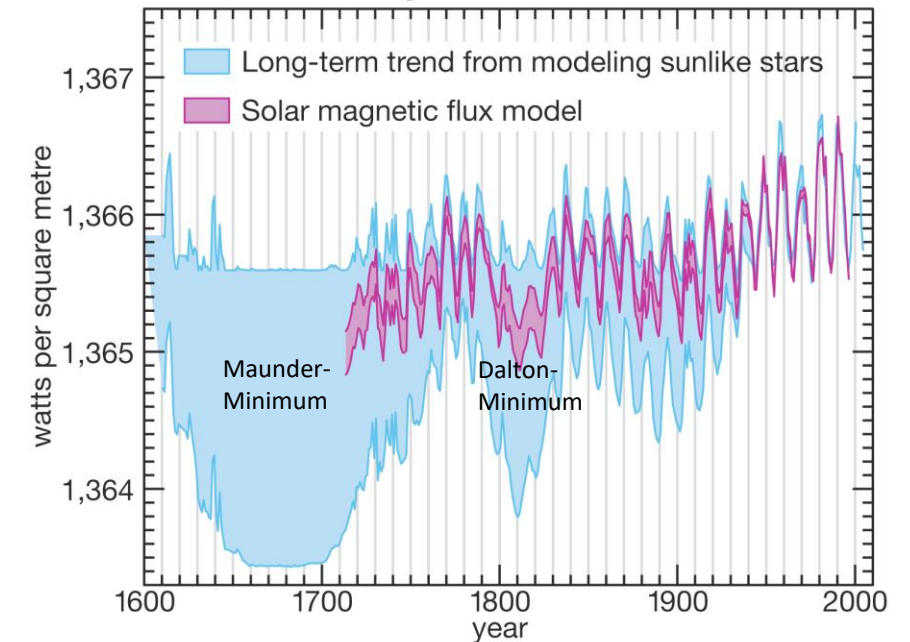
# Solarkonstante

- Die Solarkonstante variiert von Jahr zu Jahr durch den ca. 22-jährigen Hale-Zyklus (zwei 11-jährige Sonnenfleckenzyklen, während dem sich das Magnetfeld der Sonne um- und wieder zurückpolt (unten links).
- Mehr Sonnenflecken bedeuten höhere Sonnenausstrahlung (etwa  $0,5 \text{ W/m}^2$ ).
- Aber es gibt auch eine längerfristige Variabilität (Abb. rechts)



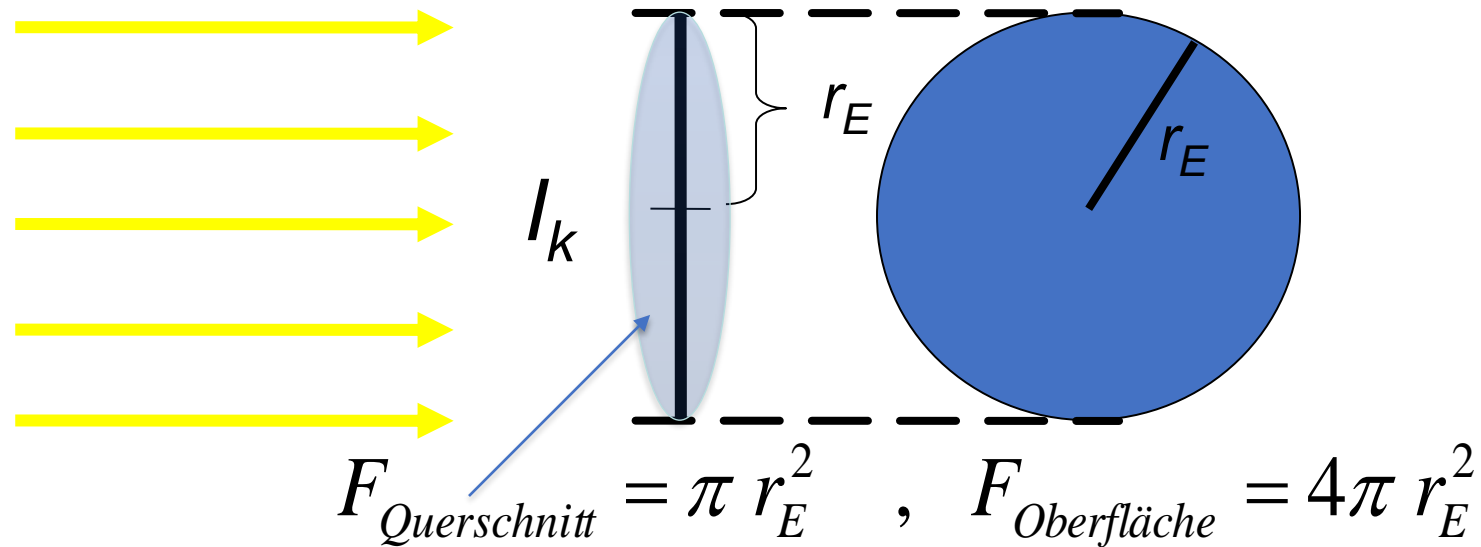
<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant> (15-Nov-2021)

Reconstructions of long-term solar irradiance



Source: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change

# Mittlere solare Einstrahlung auf der Erde



- Auf die Erde trifft der Teil der Sonnenstrahlung, welcher durch die Fläche des Erdquerschnitts  $F_{\text{Querschnitt}}$  geht.
- Im Mittel über einen Tag und gemittelt über die Oberfläche der Erde  $F_{\text{Oberfläche}}$  kommen dann an solarer Strahlung pro  $\text{m}^2$  an:

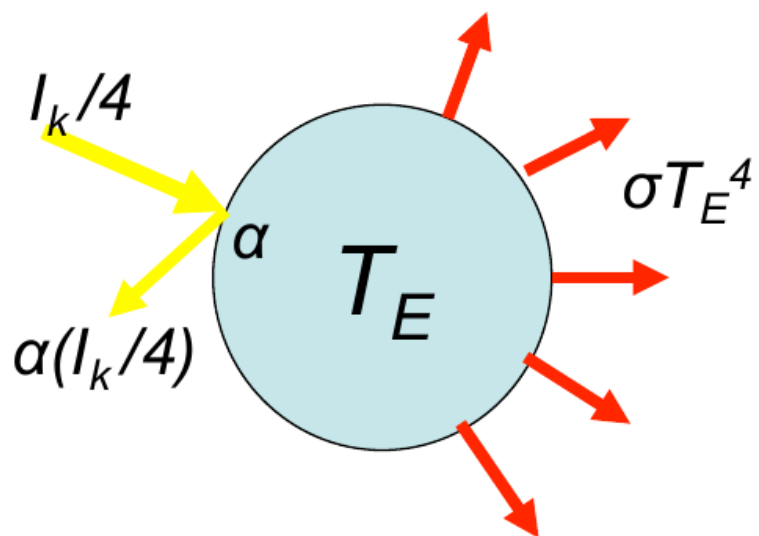
$$I_k \frac{\pi r_E^2}{4\pi r_E^2} = I_k / 4 = 1365 / 4 \approx 341 \text{ W/m}^2$$



# Ausstrahlungstemperatur des Systems Erde-Atmosphäre

Die Erde muss genau (zumindest über einige Zeit gemittelt) die von der Sonne absorbierte Strahlungsenergie wieder abgeben, da sie sich nicht ständig erwärmt oder abkühlt. Die Erde gibt diese Energie durch **Ausstrahlung ins All** wieder ab. Dieser Ausstrahlung kann man nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz wieder einer Temperatur eines Schwarzkörpers zuordnen – **die Strahlungsgleichgewichtstemperatur  $T_E$**  der Erde.

Zu berücksichtigen bei dieser Rechnung ist, dass die Erde nicht alle Sonnenstrahlung absorbiert, sondern einen Teil – beschrieben durch **die planetare Albedo  $\alpha \approx 0,3$**  – (z.B. durch Reflexion an Wolken) ins All zurück reflektiert



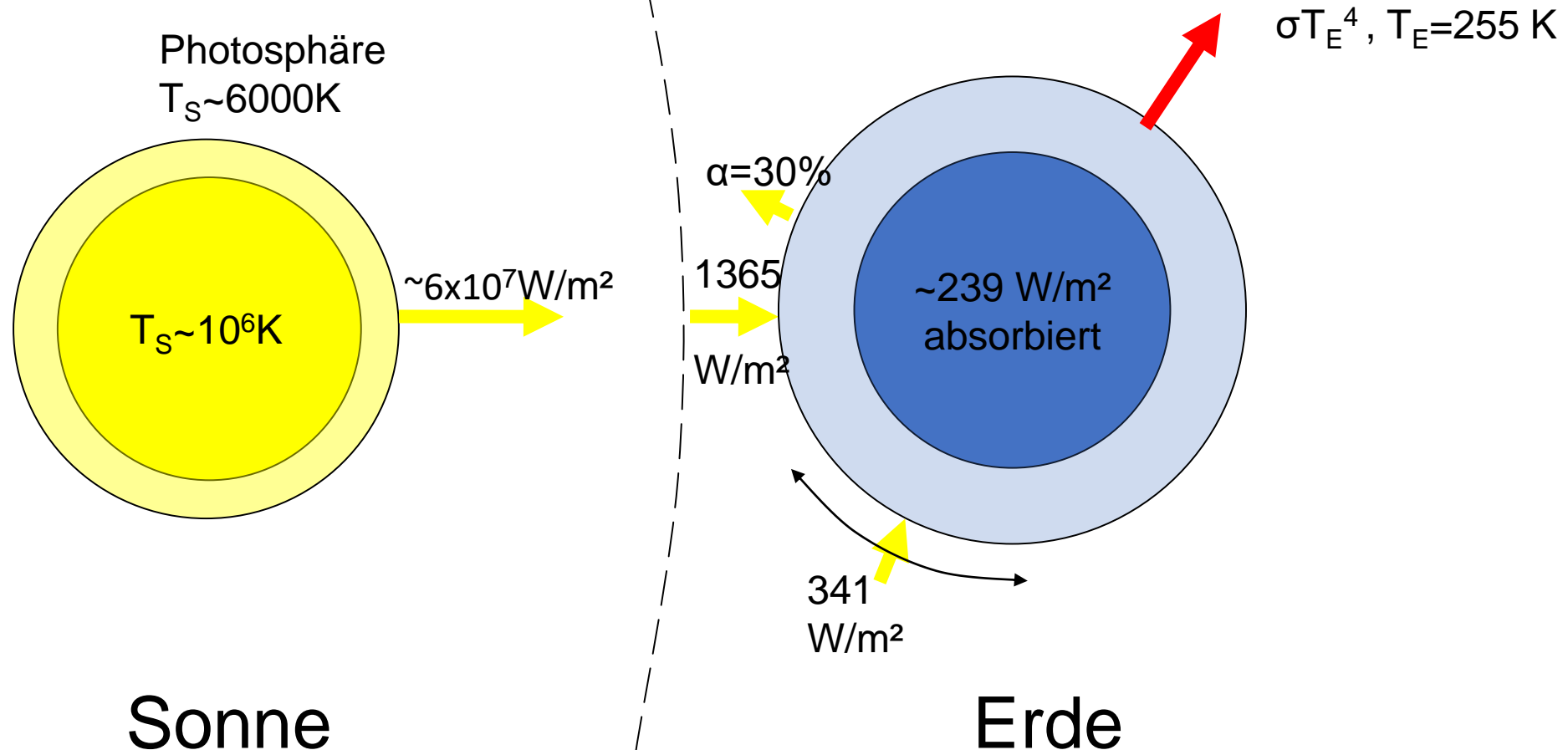
$$\left(\frac{I_k}{4}\right)(1-\alpha) = \sigma T_E^4 \Rightarrow T_E = \sqrt[4]{\frac{I_k}{4\sigma}(1-\alpha)}$$

$$T_E(\alpha = 0 \Rightarrow \text{schwarze Erde}) = 279K \quad (6^\circ\text{C})$$

$$T_E(\alpha = 0,3 \text{ aus Satellitenmess.}) = \underbrace{255K}_{\sim T \text{ in 5 km Höhe}} \quad (-18^\circ\text{C})$$

# Zusammenfassung

$\sigma T_S^4 = 6,31 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \rightarrow \text{um Faktor } r_{S-E}^2 / r_S^2 = 46200 \text{ größer als } I_K$

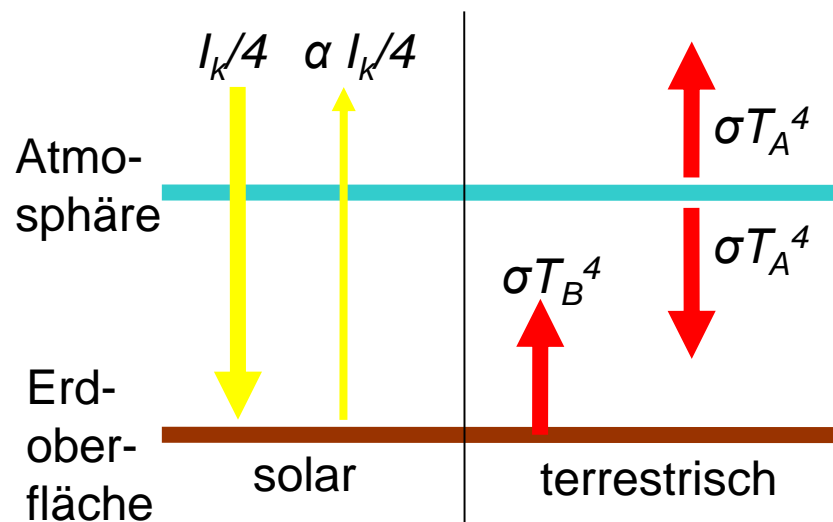


# Treibhauseffekt der Atmosphäre

Unter dem Treibhauseffekt der Atmosphäre versteht man die Beobachtung, dass die Temperatur nahe der Erdoberfläche (**in 2 m Höhe im Mittel ca. 287 K**) höher ist als die **Ausstrahlungstemperatur der Erde (ca. 255 K)**, die sich im Strahlungsgleichgewicht mit Sonne und Weltall einstellen würde. **Ursache** ist die Tatsache, dass die **Erdatmosphäre im terrestrischen Spektralbereich fast undurchlässig** ist und damit nach Kirchhoff selber recht viel Strahlung auch nach unten emittiert.

Dies lässt sich durch ein einfaches **2-Schichten-Modell** grob veranschaulichen, das annimmt:

- Im **solaren** Spektralbereich ist die Atmosphäre (bis auf Wolken, die alles reflektieren und am Boden liegen) vollständig **transparent** und die **Erdoberfläche absorbiert davon den Teil  $1-\alpha$** .
- Im **terrestrischen** Spektralbereich sind Erdoberfläche und Atmosphäre **schwarze Körper**.



**Bilanzgleichungen für die beiden Platten:**

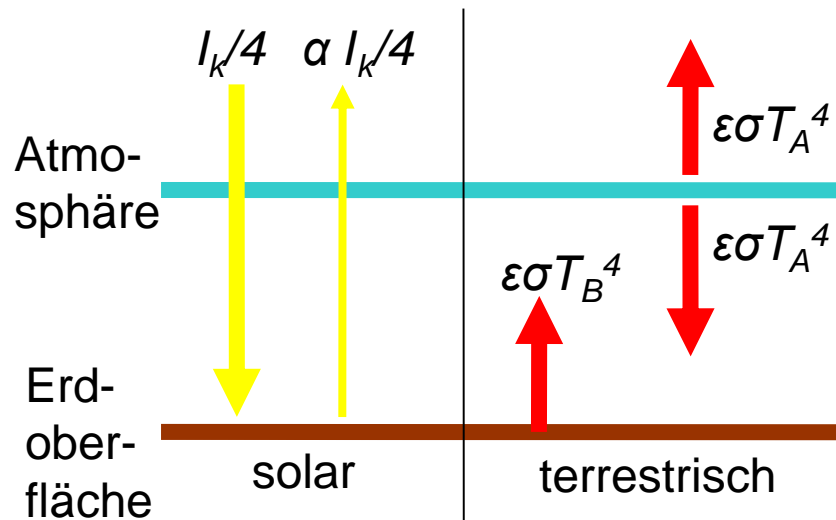
Atmosphäre:	$-2\sigma T_A^4 + \sigma T_B^4 = 0$
Erdoberfläche:	$\sigma T_A^4 - \sigma T_B^4 + 0,7 \frac{I_k}{4} = 0 \quad (+)$
	$-\sigma T_A^4 + 0,7 \frac{I_k}{4} = 0$
	$\Rightarrow T_A = 255 \text{ K } (= -18^\circ\text{C})$
	$\Rightarrow T_B = 303 \text{ K } (= +30^\circ\text{C})$



# Treibhauseffekt bei „grauer“ Atmosphäre

Die Annahme einer im terrestrischen Spektralbereich **schwarzen Atmosphäre** führt zu **zu hohen Oberflächentemperaturen verglichen mit Beobachtungen**.

Man erreicht eine Verallgemeinerung/Verbesserung, wenn man die Atmosphäre mit einer **Emissivität  $\varepsilon < 1$  im Terrestrischen** versieht. Damit wird die Atmosphäre auch im Terrestrischen etwas transparent. Dies berücksichtigt unter anderem, dass es auch im terrestrischen Spektralbereich Fenster gibt, z.B. zwischen 8 und 12  $\mu\text{m}$ .



$$\begin{aligned}
 & -2\varepsilon\sigma T_A^4 + \varepsilon\sigma T_B^4 = 0 \quad \text{Atmosphäre} \\
 & +\varepsilon\sigma T_A^4 - \sigma T_B^4 + (1-\alpha)I_k/4 = 0 \quad \text{Erdoberfläche} \quad (*2, +) \\
 \hline
 & -(2-\varepsilon)\sigma T_B^4 + 2(1-\alpha)I_k/4 = 0 \\
 & \Rightarrow T_A = (2-\varepsilon)^{-1/4} T_E \\
 & \Rightarrow T_B = (1-\varepsilon/2)^{-1/4} T_E \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \Rightarrow T_A = (2-\varepsilon)^{-1/4} T_E \\ \Rightarrow T_B = (1-\varepsilon/2)^{-1/4} T_E \end{aligned}} \right\} \text{mit } T_E = \left( \frac{1-\alpha}{\sigma} \frac{I_k}{4} \right)^{1/4}
 \end{aligned}$$

Die gesamte terrestrische Ausstrahlung (die wie vorher  $(1-\alpha)I_k/4$  ausgleichen muss) setzt sich nun aus Strahlung der Atmosphäre **und** des Bodens zusammen (denn  $(1-\varepsilon)\sigma T_B^4$  geht nun durch die Atmosphäre durch ins All!).

Für den beobachteten mittleren Wert für  $T_B = 288,15 \text{ K}$  ( $= 15^\circ\text{C}$ ) ergibt sich  $\varepsilon = 0,7706$  und  $T_A = 242,30 \text{ K}$  ( $= -30^\circ\text{C}$ ) also niedriger als bei einer schwarzen Atmosphäre).

# Treibhauseffekt in Klimamodellen

- In Klimamodellen wird der **Treibhauseffekt an jeder Stelle der Atmosphäre** unter Berücksichtigung der jeweiligen Gaszusammensetzung (insbesondere des Wasserdampfes) berechnet.
- Dabei wird **nicht** – wie in den besprochenen 1-dimensionalen Modellen – **von einer ausgeglichenen Bilanz ausgegangen**, sondern nur von Energieerhaltung.
- Es werden eine Reihe von **spektralen Bereichen** mit unterschiedlicher Durchlässigkeit **getrennt gerechnet** und danach spektral integriert.
- Insbesondere wird der **Einfluss** der im Modell entstehenden **Aerosole und Wolken** auf den Treibhauseffekt berücksichtigt.
- Schließlich wird auch die **Dynamik der Atmosphäre** berücksichtigt, die z.B. eine nur durch Strahlungseffekte viel zu hohe Temperaturabnahme mit der Höhe durch die zwingend einsetzende Konvektion abbaut (bis auf max. 1 K/100m).
- **Gemittelt über die Erde stimmen die Ergebnisse aber grob mit dem einfachen 2-Plattenmodell überein.**