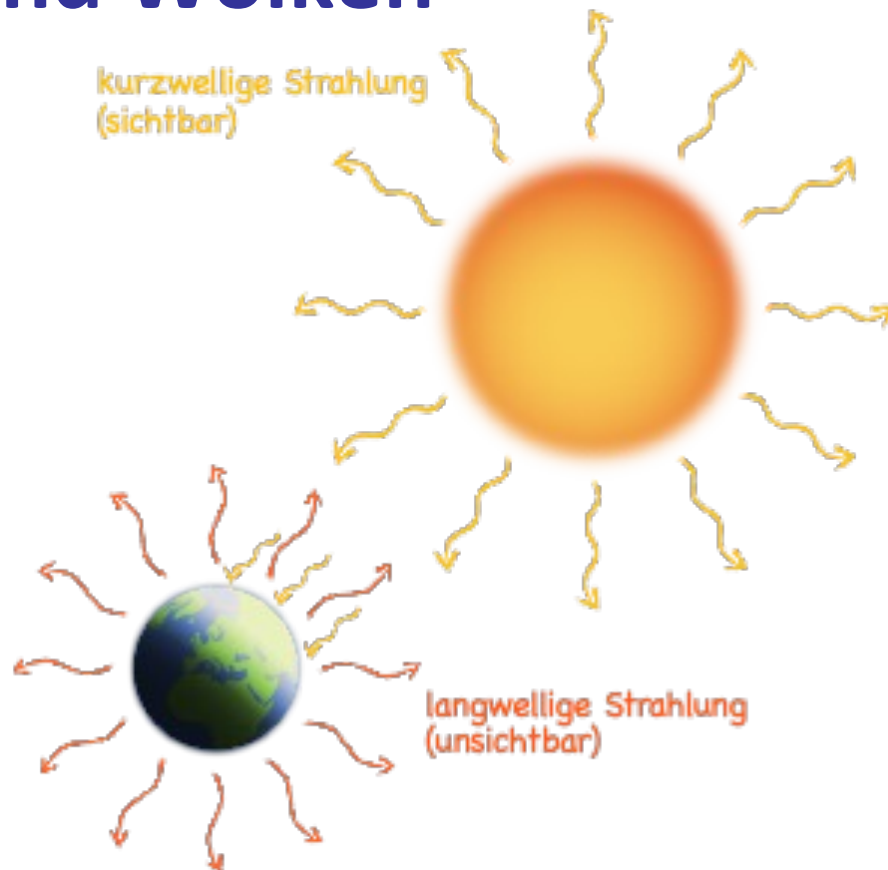


Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken



Stefan Bühler

Meteorologie, Fachbereich
Erdsystemwissenschaften

Universität Hamburg

Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ Treibhauseffekt
- ▶ Klima-Rückkopplungen
- ▶ Wasserdampf
- ▶ Wolken
- ▶ Zusammenfassung

Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ **Treibhauseffekt**
- ▶ Klima-Rückkopplungen
- ▶ Wasserdampf
- ▶ Wolken
- ▶ Zusammenfassung

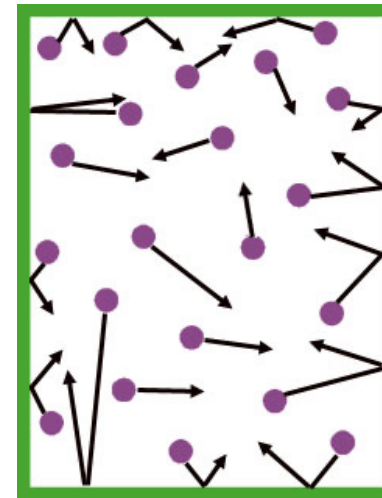
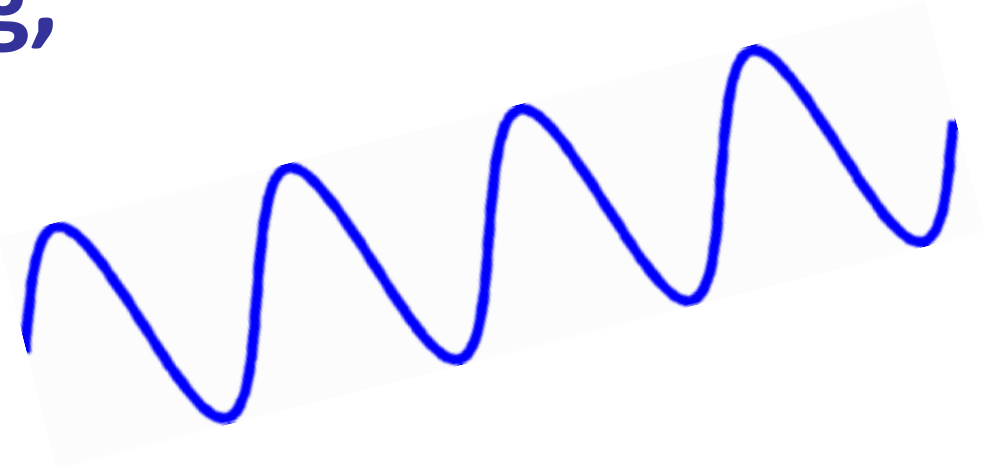
- ▶ Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik.
- ③ ▶ Die „Oberste Direktive“ des Universums (für die die Star Trek kennen).
- ▶ Energie kann von einer Form in die andere umgewandelt, aber weder erzeugt noch vernichtet werden. (Von Mayer, Joule, Helmholtz, ..., alle Mitte 19. Jhd.)

Wärme und Strahlung, zwei Energieformen

Strahlung =
elektromagnetische Welle

Wärme = ungeordnete
Bewegung der Moleküle

1. Hauptsatz: Es geht keine
Energie verloren



Wärme kann in Strahlung umgewandelt werden
(Stefan-Boltzmann Gesetz, Planck Gesetz)...



... und Strahlung in Wärme.



Image by Arek Socha from Pixabay

OLR (Outgoing Longwave Radiation)

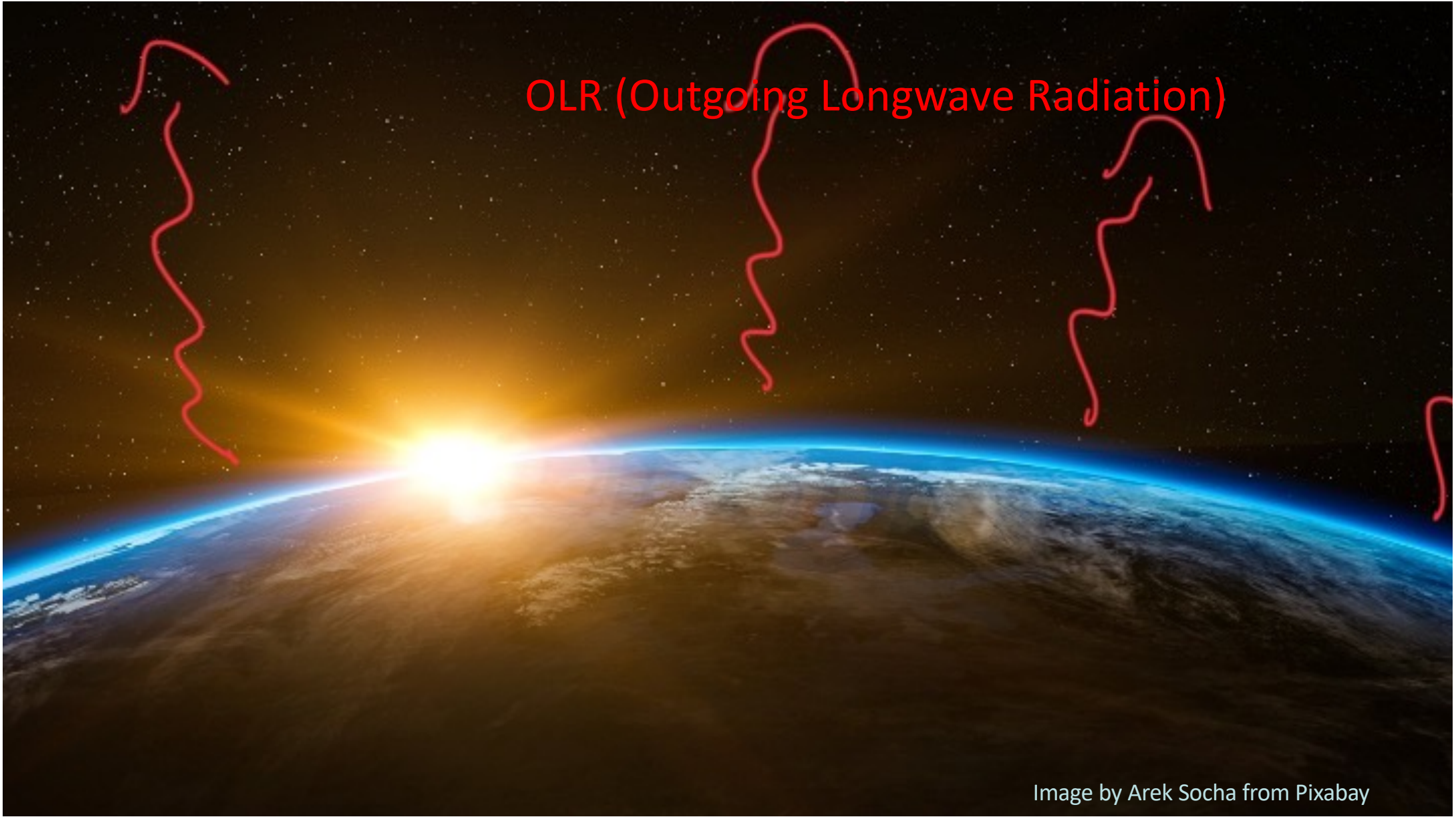


Image by Arek Socha from Pixabay

E

- ▶ Die Erde wird vom Sonnenlicht gewärmt (erhält Energie).
- ▶ Sie strahlt selber Infrarotstrahlung an den Weltraum ab (verliert Energie).
- ▶ Wenn sie mehr Energie gewinnt als verliert, wärmt sie sich auf.
- ▶ Wenn sie wärmer wird steigt die abgestrahlte Infrarotstrahlung.
- ▶ Irgendwann wird diese so groß, dass sich erhaltene Energiemenge pro Zeit und verlorene Energiemenge pro Zeit die Waage halten.
- ▶ Dieser Prozess bestimmt die Temperatur auf der Erdoberfläche. (Wärme aus dem Erdinneren spielt keine Rolle, Joseph Fourier, 1824).

Joseph Fourier, 1824, 281 ppm CO₂

Bolometrische Temperatur im Gleichgewicht:

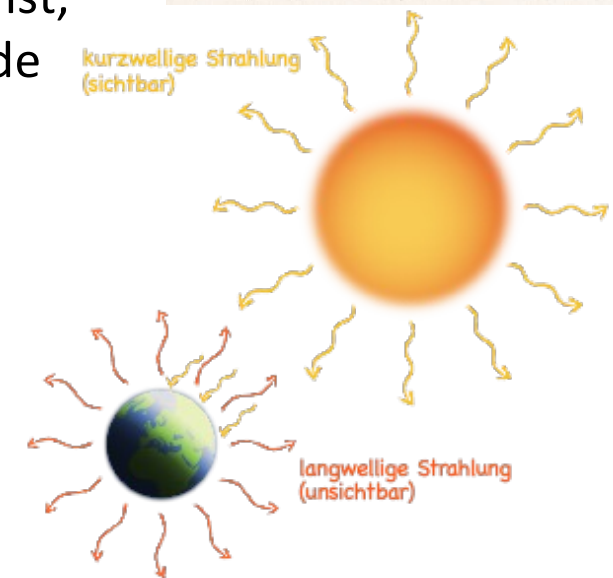
255 K = ca. -18° C

Was ist die tatsächliche Mittlere Temperatur (in Bodennähe)?

③ Ca. +15° C

Schon Fourier (Anfang 19.Jhd) fiel auf, dass die Erde viel wärmer ist, als dem Gleichgewicht entspricht. Er postulierte, dass die fehlende Wärme entweder aus dem Sonnensystem kommt, oder aus der Atmosphäre.

"Remarques Générales Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires". Annales de Chimie et de Physique. 27: 136–167. 1824a.



Eunice Newton Foote, 1856

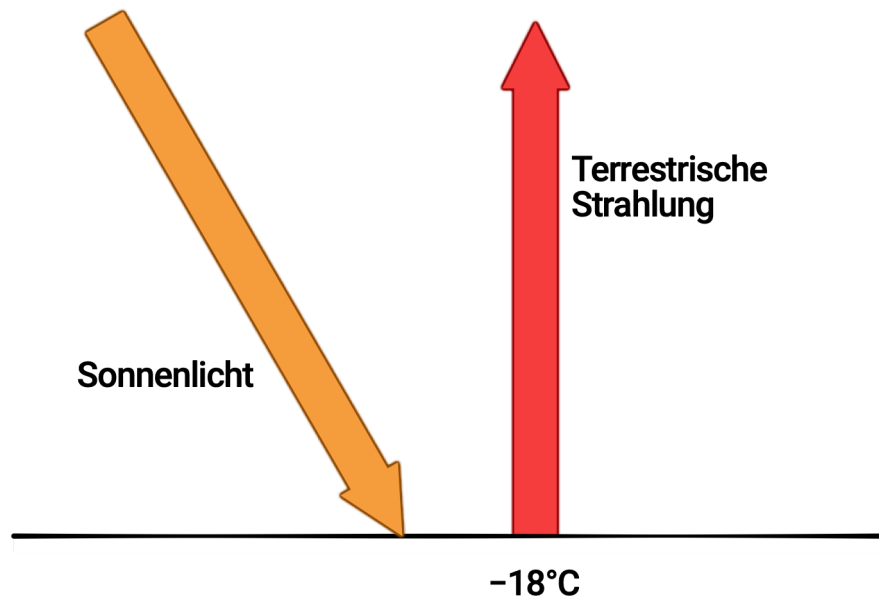
John Tyndall, 1859, 287 ppm CO₂

- ▶ Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂), die Hauptbestandteile der Erdatmosphäre, sind praktisch durchlässig.
- ▶ Als beste Infrarot-Absorber in der Erdatmosphäre stellten sich heraus: Wasserdampf (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂).
- ▶ Solche Gase nennen wir heute Treibhausgase.

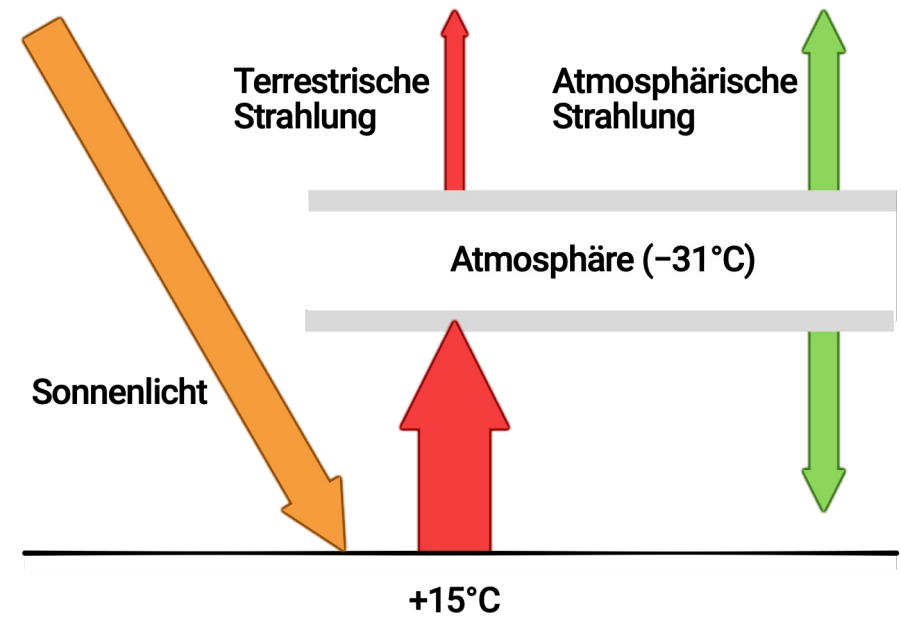
Das beantwortete Fouriers Frage.



Ohne Treibhauseffekt



Mit Treibhauseffekt



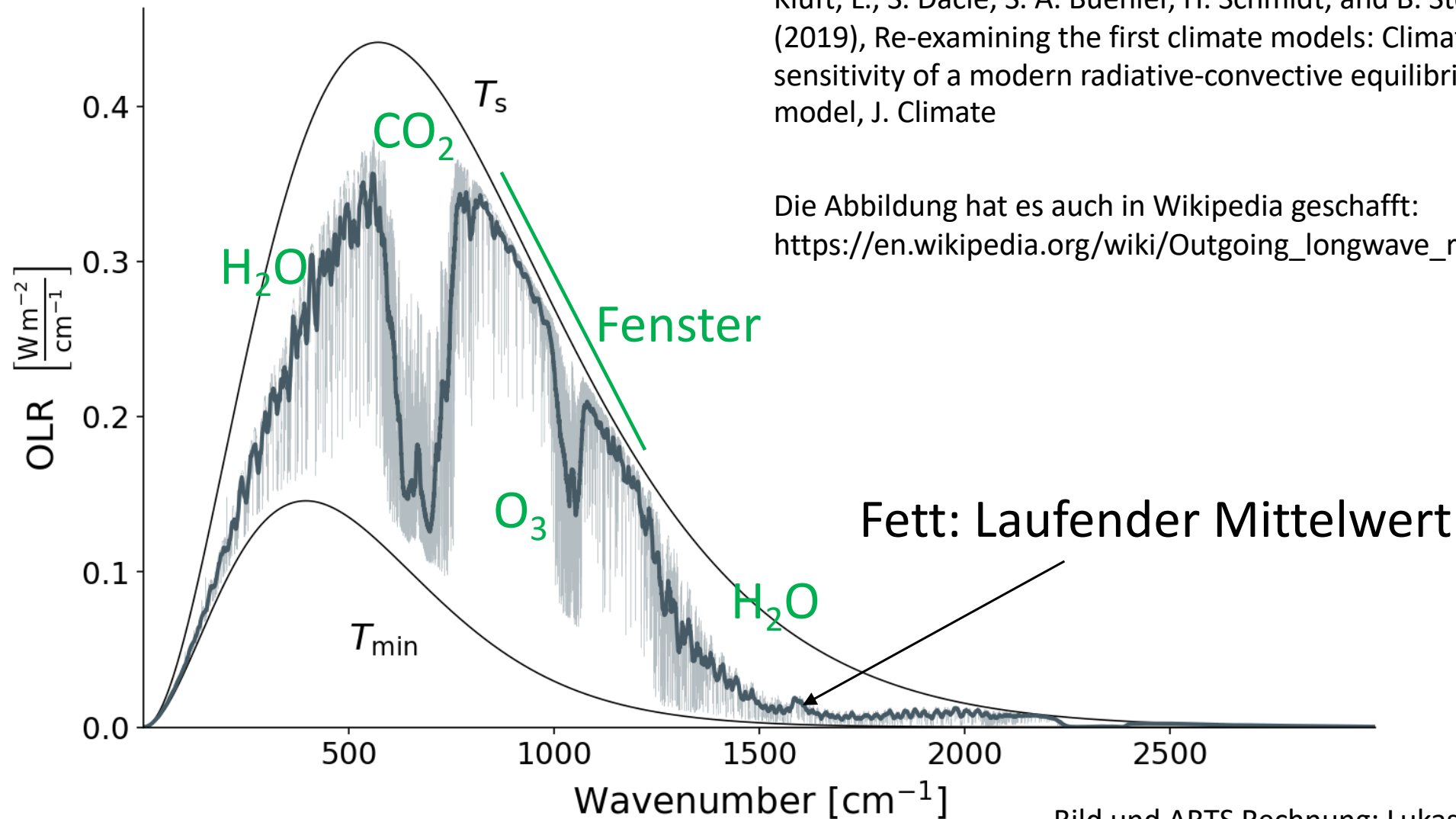
Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ Treibhauseffekt
- ▶ **Klima-Rückkopplungen**
- ▶ Wasserdampf
- ▶ Wolken
- ▶ Zusammenfassung

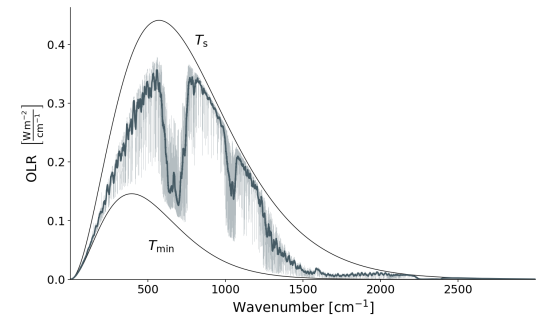
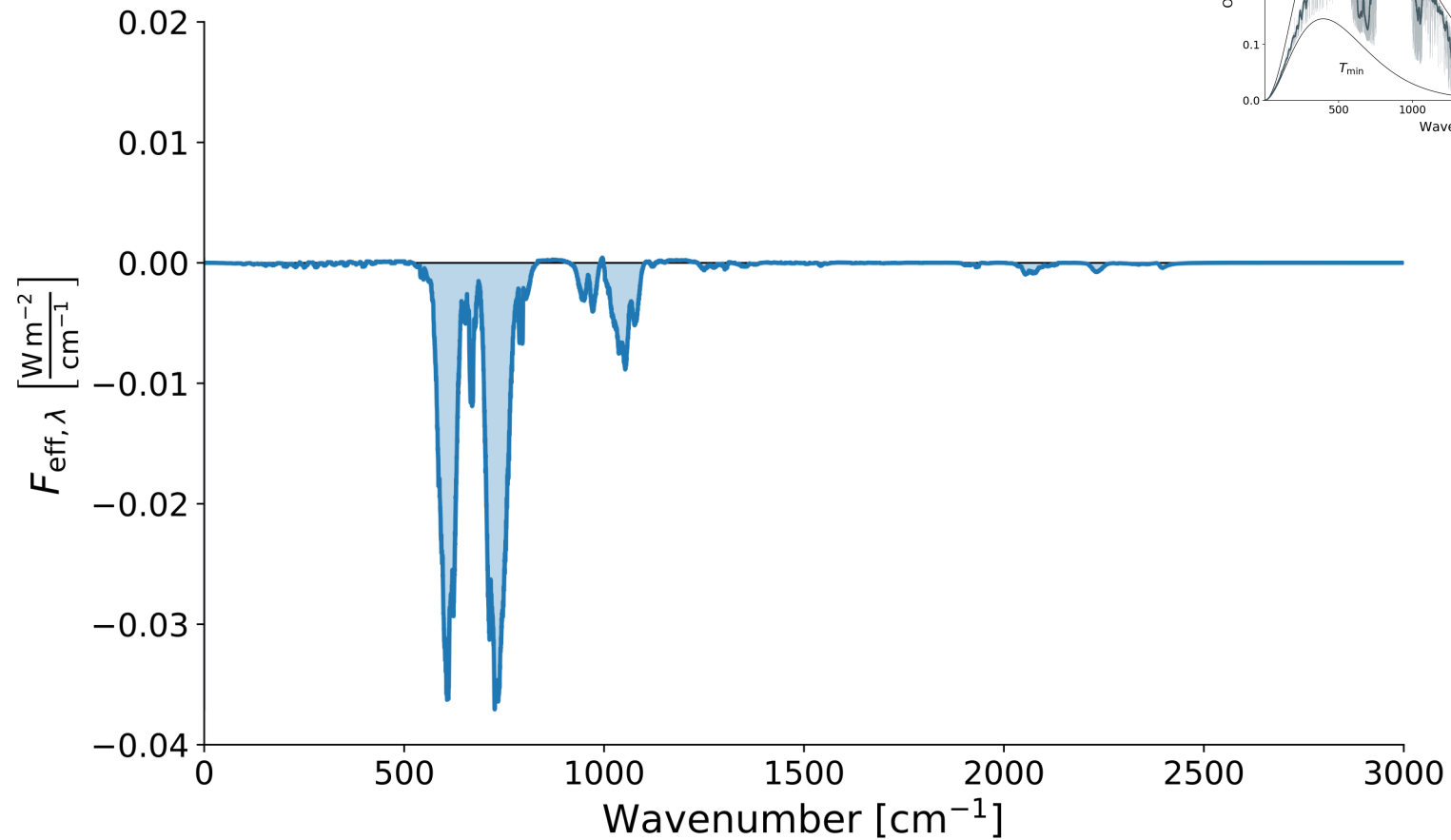
Clear-sky OLR Spektrum

Kluft, L., S. Dacie, S. A. Buehler, H. Schmidt, and B. Stevens (2019), Re-examining the first climate models: Climate sensitivity of a modern radiative-convective equilibrium model, J. Climate

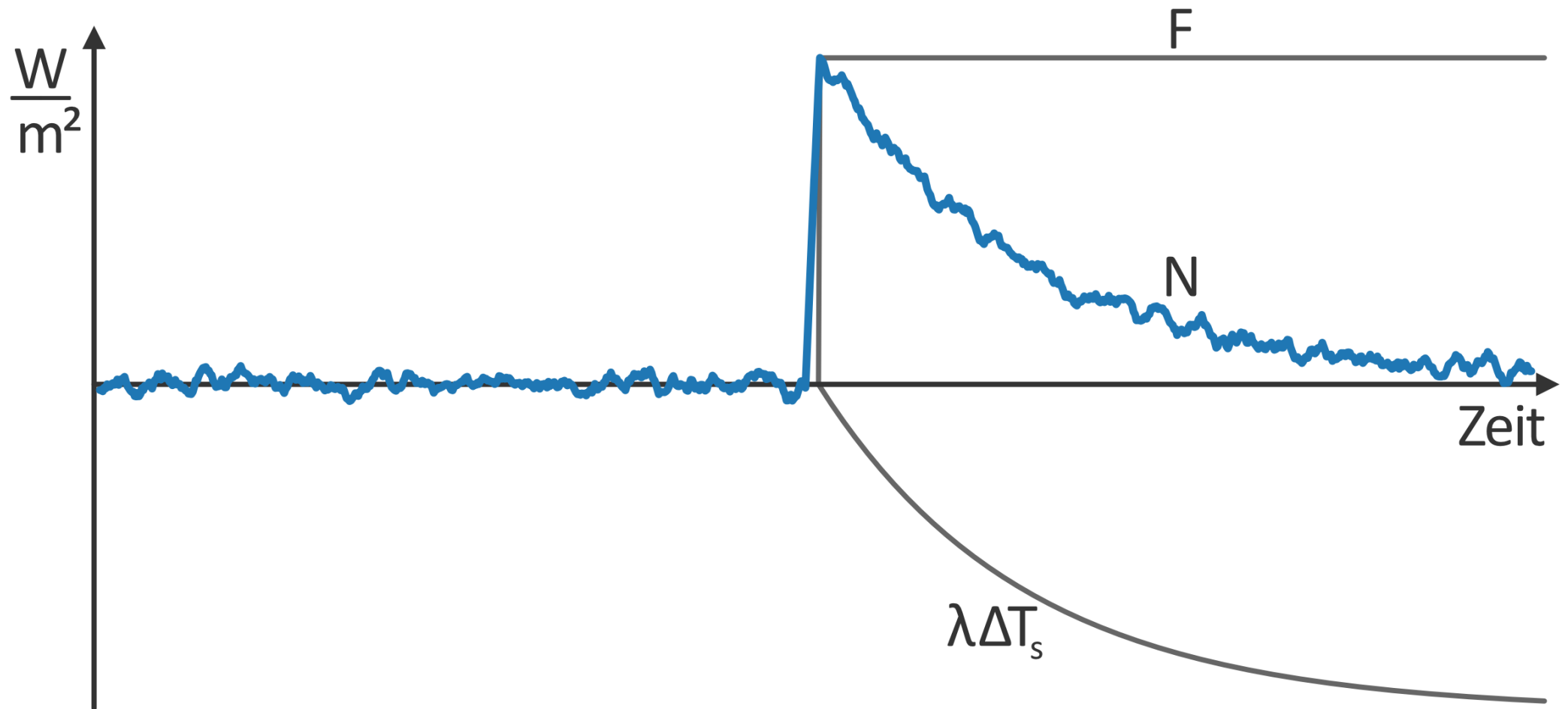
Die Abbildung hat es auch in Wikipedia geschafft:
https://en.wikipedia.org/wiki/Outgoing_longwave_radiation



CO₂ Strahlungsantrieb (mit angepasster Stratosphäre)



Strahlungsantrieb — und Antwort des Erdsystems



Wie stark muss sich die Erde bei einem Antrieb erwärmen, damit die Strahlungsbilanz wieder ausgeglichen ist?

$$N = F + \lambda \Delta T_s \stackrel{!}{=} 0$$

$$\lambda \Delta T_s = -F$$

$$\Delta T_s = \frac{-F}{\lambda}$$

Die Gleichgewichts-Klimasensitivität (engl. Equilibrium Climate Sensitivität ECS) ist definiert als:

$$\text{ECS} = \frac{-F_{2\times\text{CO}_2}}{\lambda}$$

Es ist also die Temperaturänderung, die sich nach einer Kohlendioxid-Verdopplung im neuen Gleichgewicht ergibt.

Ohne Atmosphäre

Stefan-Boltzmann Gesetz, wärmere Körper strahlen mehr Strahlung ab als kalte ($\sim \sigma T^4$):

$$\lambda \approx -3.2 \frac{\text{W/m}^2}{\text{K}}$$

Diese negative Grund-Rückkopplung wird oft auch **Planck-Feedback** genannt.

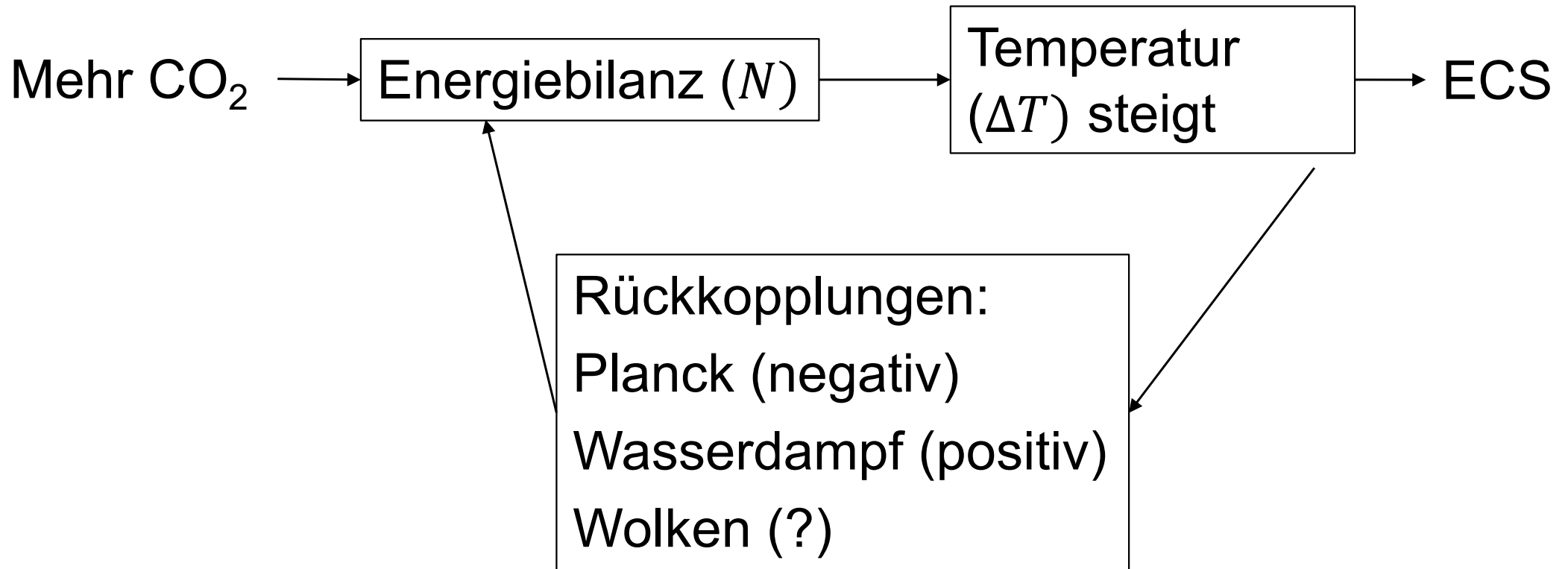
Mit $\Delta F_{2*CO_2} \approx 4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ hätte so eine Welt ohne weitere Rückkopplungen eine ECS von

$$\text{ECS} = \frac{-F_{2xCO_2}}{\lambda} = \frac{4}{3.2} \text{ K} \approx 1.25 \text{ K}$$

Bei CO₂-Verdopplung würde die Temperatur nur um 1.25 K ansteigen.

Wenn das Klima wirklich so stabil wäre, wäre es schwer, die Änderungen in der Erdgeschichte zu erklären.

Mit Atmosphäre

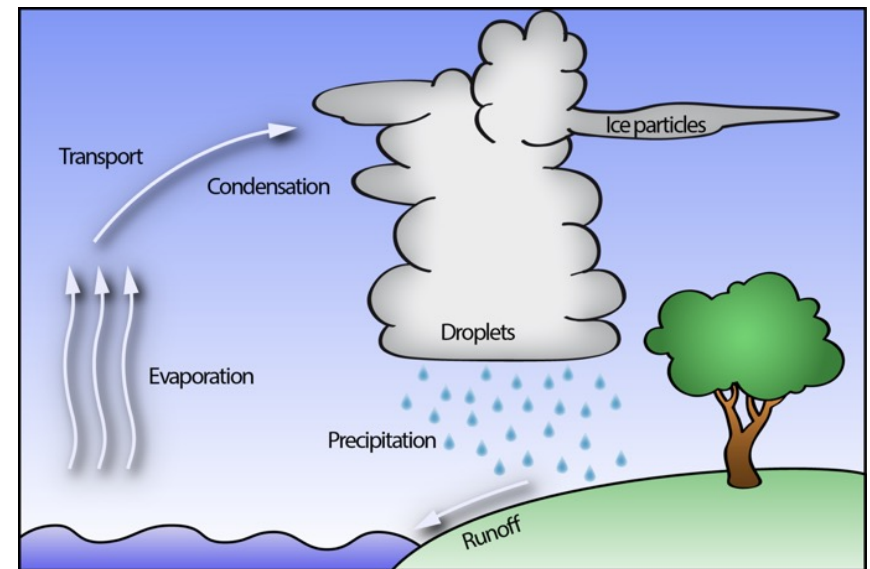
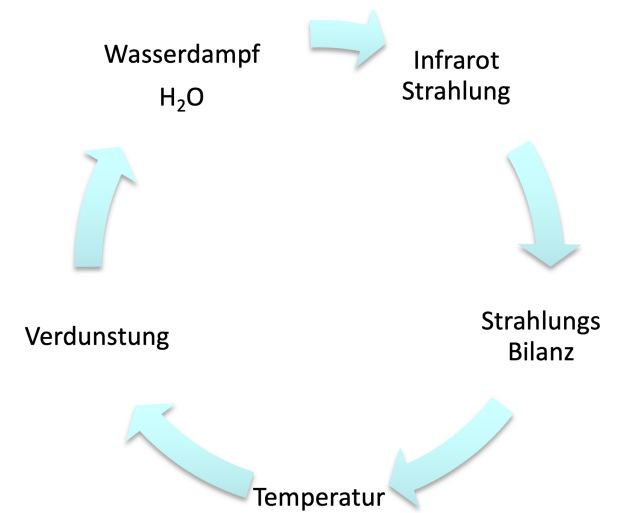


Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ Treibhauseffekt
- ▶ Klima-Rückkopplungen
- ▶ **Wasserdampf**
- ▶ Wolken
- ▶ Zusammenfassung

Wasserdampf-Rückkopplung

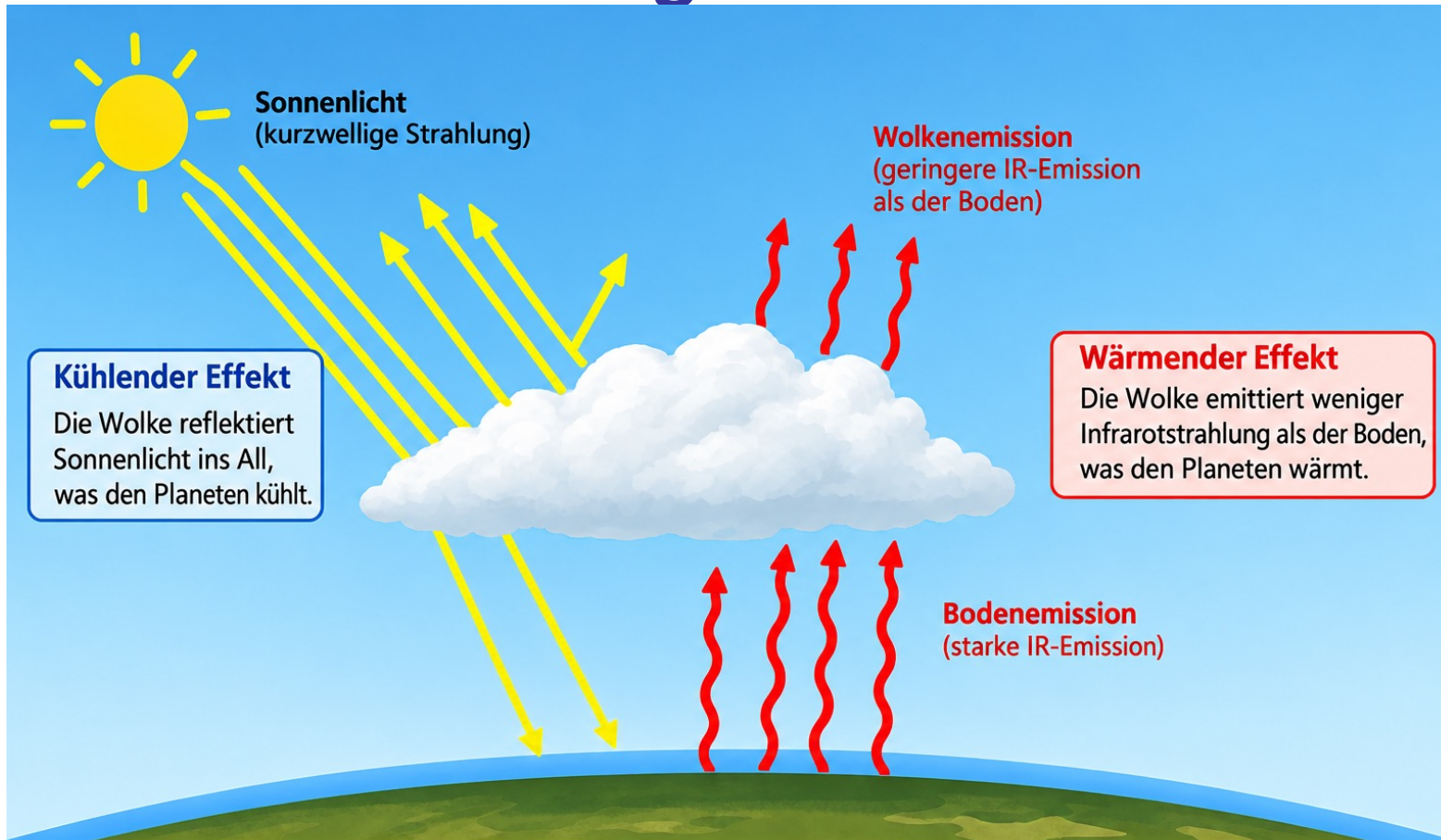
- ▶ Wasserdampf lässt Sonnenlicht fast ungehindert durch, ist im Infraroten aber ein starkes Treibhausgas.
- ▶ Die Temperatur auf der Erde bestimmt, wie viel Wasserdampf in der Atmosphäre ist (und nicht wir Menschen).
- ▶ Diese Rückkopplung verdoppelt ungefähr die Wirkung des CO₂.



Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ Treibhauseffekt
- ▶ Klima-Rückkopplungen
- ▶ Wasserdampf
- ▶ **Wolken**
- ▶ Zusammenfassung

Wolken-Strahlungseffekt

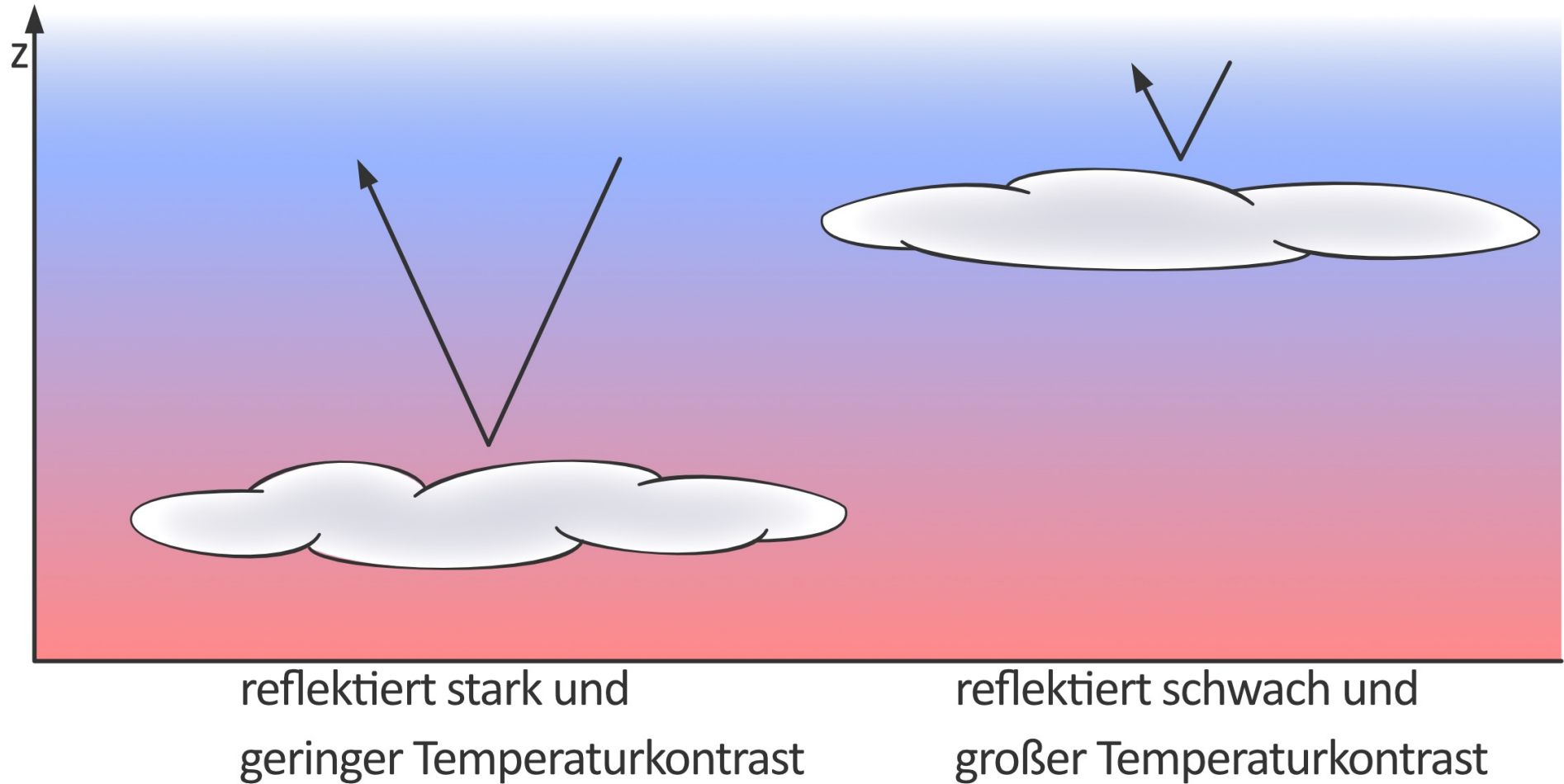


- kurzwellige Sonnenstrahlung (reflektiert/absorbiert)
- langwellige Infrarotstrahlung (emittiert)

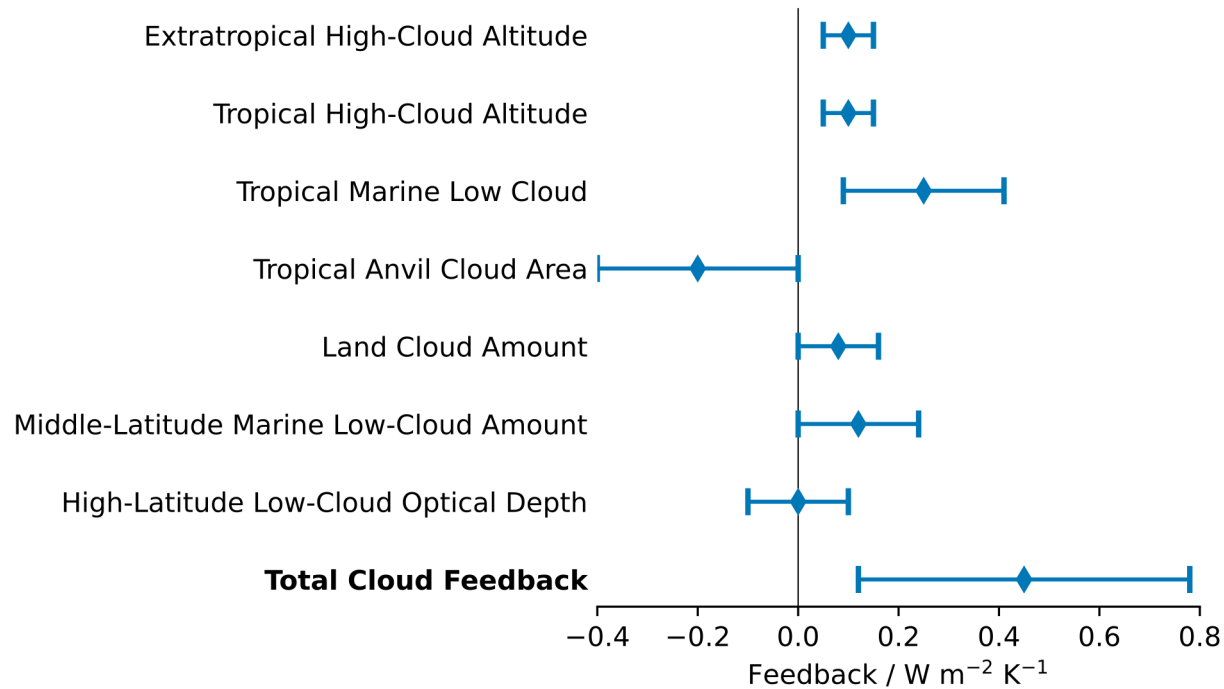
Bild: Chat-GPT, Prompt: "Ich brauche für meine Vorlesung eine einfache Skizze zum Wolkenstrahlungseffekt. Die Wolke reflektiert Sonnenlicht, und das kühlt den Planeten. Sie emittiert weniger Infrarotstrahlung als der Boden, und das wärmt den Planeten." 23

Niedrige und hohe Wolken

Niedrige Wolken haben einen kühlenden Strahlungseffekt, dünne hohe Wolken einen wärmenden.



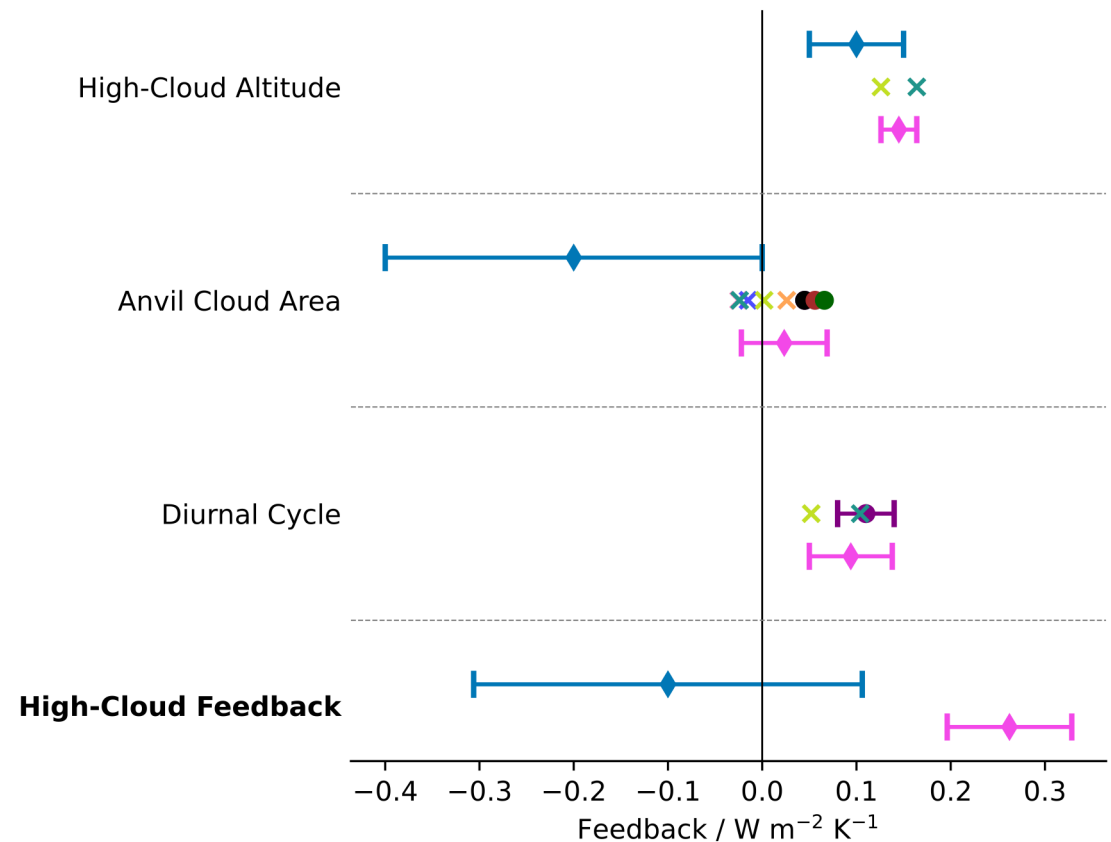
Wolken-Rückkopplung



Adapted from Sherwood et al. (2020), 413 ppm CO₂

Zum Vergleich, klare Atmosphäre (Wasserdampf + Temperaturgradient): $\lambda_{clear} \approx 1.15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$

Jakob Deutloff
 Doktorarbeit
 (Verteidigung
 morgen 9:00
 Bundesstraße 53)
 2026, 428 ppm CO₂



Klimasensitivität (ECS)

$$ECS = \frac{-F_{2xCO2}}{\lambda} \approx \frac{-4 \text{ Wm}^{-2}}{\lambda}$$

Sherwood et al. (2020)

Deutloff 2026

Planck-Rückkopplung: -3.20

Wasserdampf + Temperaturgradient-Rückkopplung: +1.15

Oberflächen-Albedo-Rückkopplung: +0.30

Wolken-Rückkopplung: +0.45 +0.81

Klima-Rückkopplungsparameter λ : **-1.30** **-0.94** $[\frac{W}{m^2K}]$

$$ECS_{alt} = \frac{-4}{-1.3} K = 3.1 K$$

$$ECS_{neu} = \frac{-4}{-0.94} K = 4.3 K$$

Wenn wirklich alles andere gleich wäre. Tatsächlich ist ECS sehr unsicher, IPCC:
Sehr wahrscheinlich 2-5 K, wahrscheinlich 2.5-4 K.

Klimarückkopplungen durch Wasserdampf und Wolken

- ▶ Treibhauseffekt
- ▶ Klima-Rückkopplungen
- ▶ Wasserdampf
- ▶ Wolken
- ▶ **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- ▶ Kohlendioxid und Wasserdampf sind die wichtigsten natürlichen Treibhausgase.
- ▶ Kohlendioxid reguliert, Wasserdampf (und Wolken) verstärken.
- ▶ Bei Strahlungsantrieb ändert sich die Temperatur der Erde, hin zu einem neuen Gleichgewicht.
- ▶ ECS = Erhöhung der Gleichgewichtstemperatur bei Kohlendioxidverdopplung.
- ▶ Die aktuelle Schätzung des IPCC für die ECS ist:

very likely	2-5 K
likely	2.5-4 K
best estimate	3 K
- ▶ Nach unserer aktuellen Forschung könnte die Wolken-Rückkopplung im IPCC etwas unterschätzt sein, was für sich genommen für eine ECS am oberen Ende des Bereichs sprechen würde.

In diesem Song kommt vieles aus meinem Vortrag vor

<https://www.youtube.com/watch?v=1FTD2DDwSMw>

