



Kraftwerk Erde

Wie der belebte Planet Energie umwandelt

Planetarium Göttingen
7. November 2023

Axel Kleidon
Max-Planck-Institut für Biogeochemie
<http://gaia.mpg.de> ♦ earthsystem.org

Mond



Erde

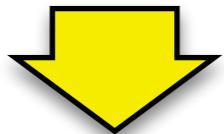


Erwärmung = Kühlung

Erwärmung = Kühlung

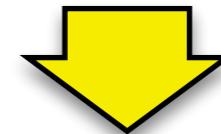
leistet Arbeit!

Kraftwerk

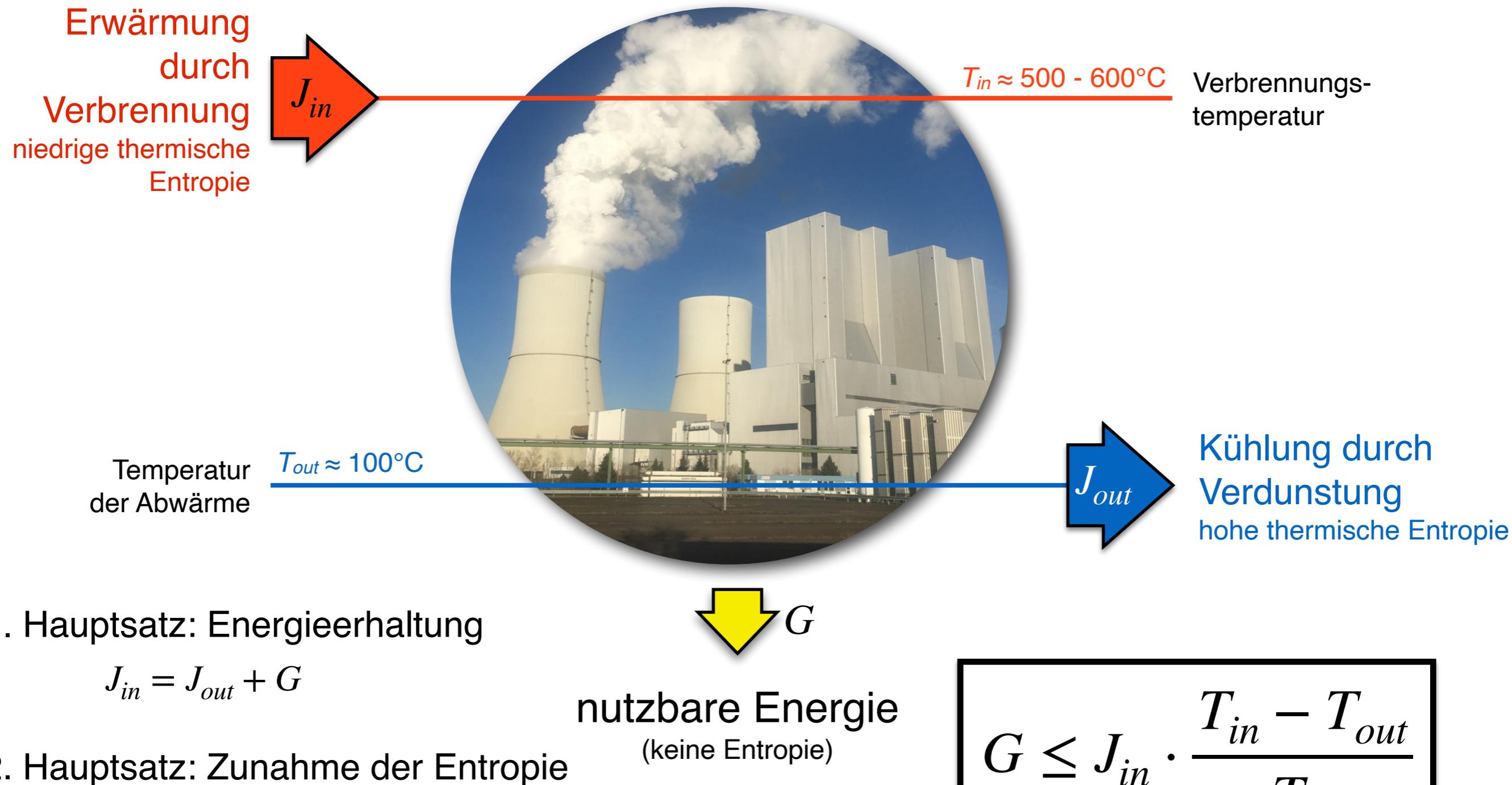


Nutzbare Energie
(Strom)

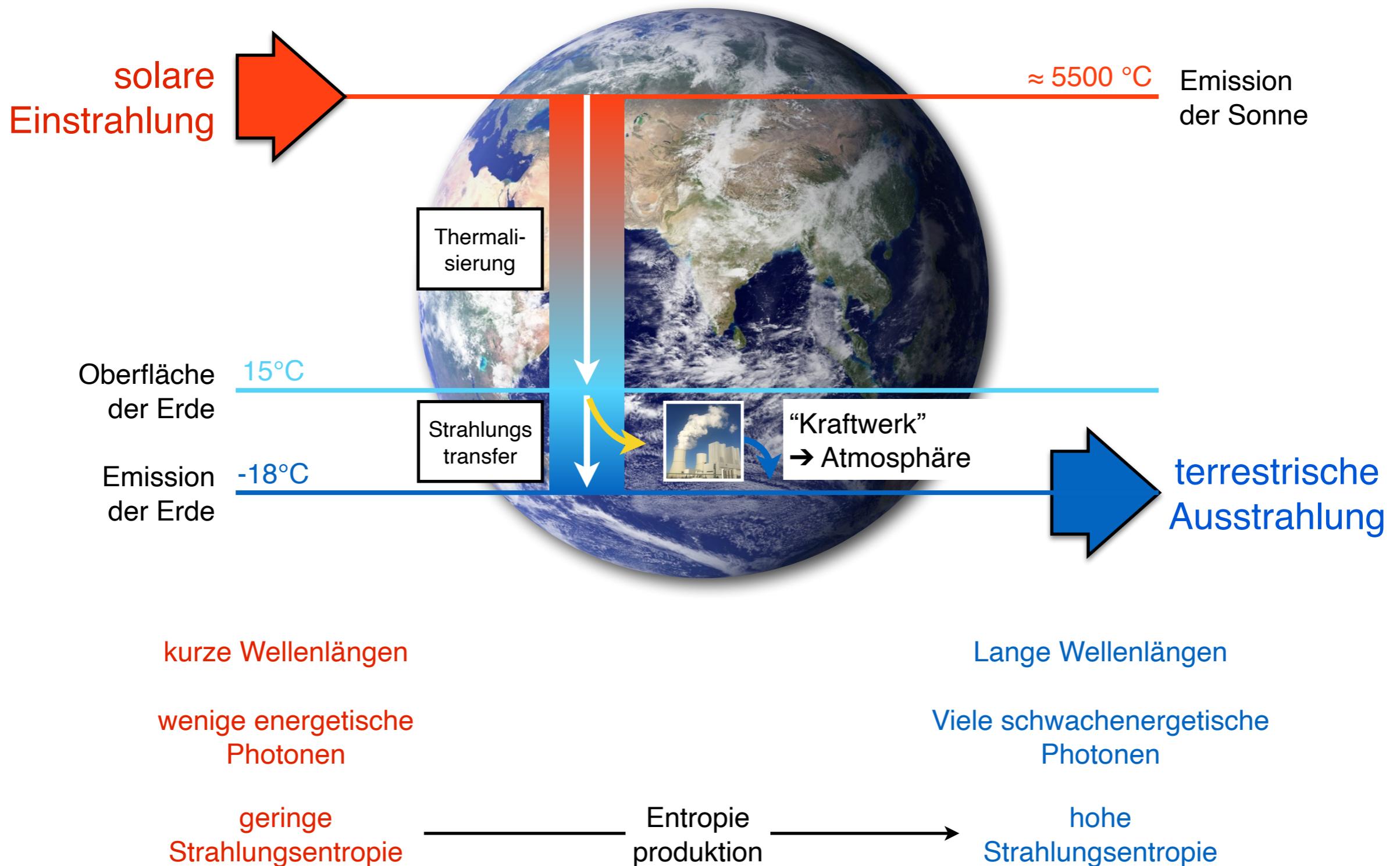
Erde



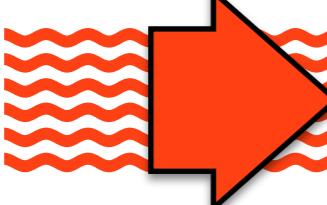
Nutzbare Energie
(Wind, Wasser,
Biomasse, ...)

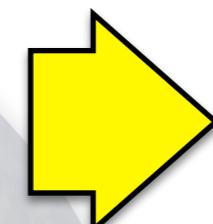


$$G \leq J_{in} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}$$



Solare Einstrahlung (niedrige Strahlungsentropie)

5500 °C 



Ladungstrennung

15 °C 
Oberfläche der Erde
-18 °C 
Emission der Erde

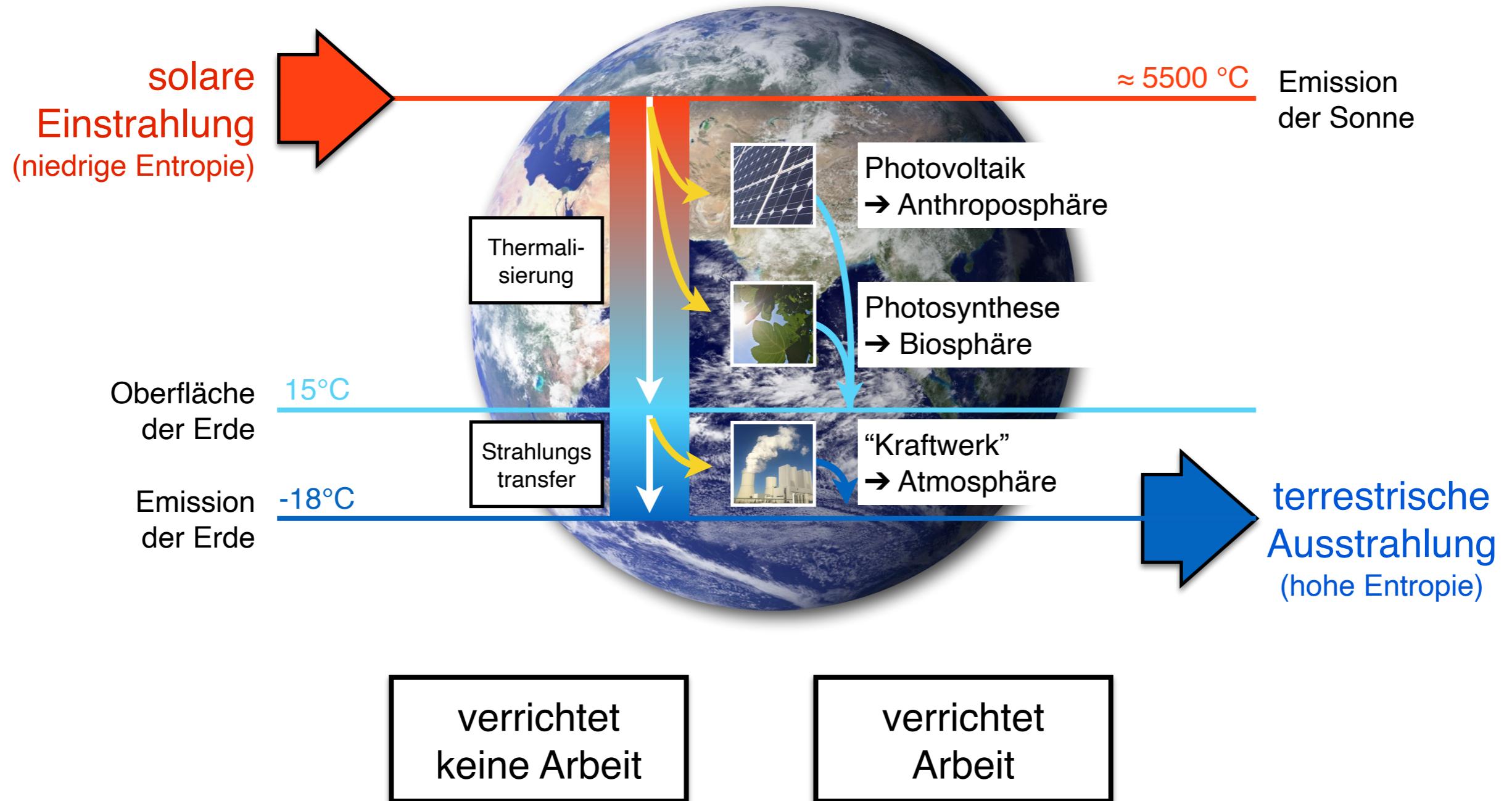
Thermalisierung
(produziert viel Entropie)



Differenzielle
Erwärmung



Kraftwerk Erde



Typ I

Mond, Merkur



Typ II

Venus, Mars



Typ III

frühe Erde, Mars?



Typ IV

Erde



Typ V

zukünftige Erde?



Arbeit durch:



“Kraftwerke” (Bewegung, Kreisläufe)

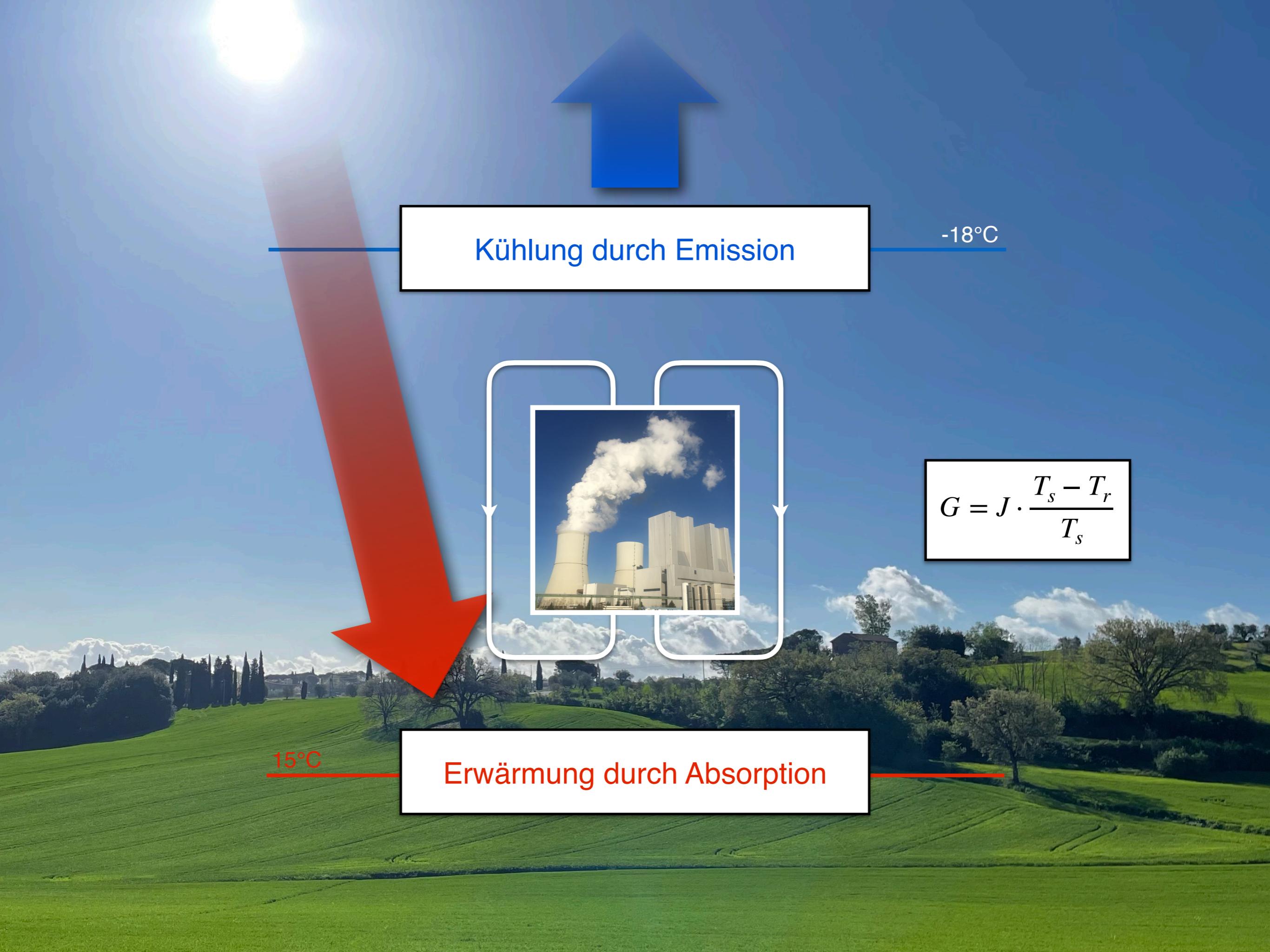


Photosynthese (Leben)



Photovoltaik (Menschheit)

→ mehr Leistung



Kühlung durch Emission

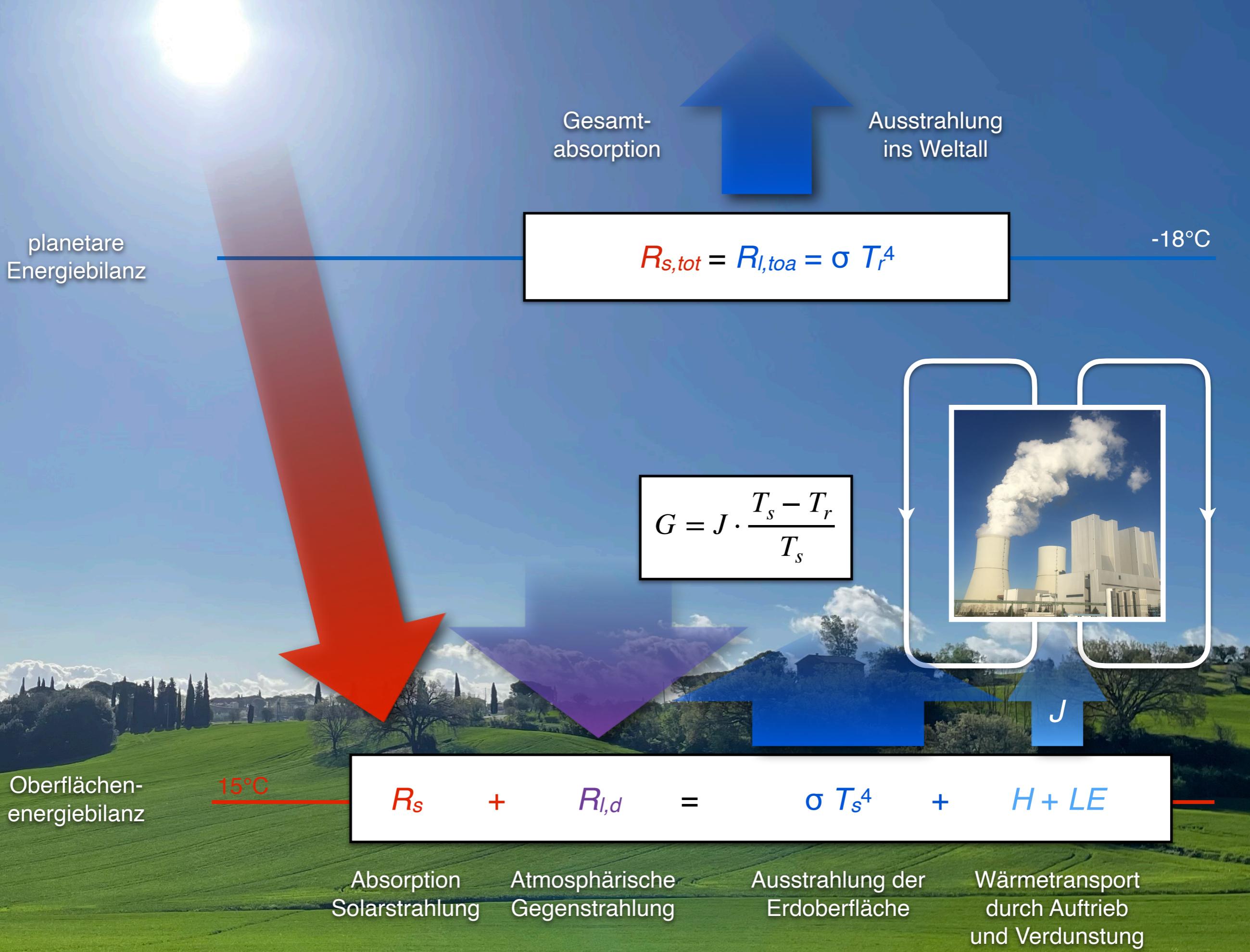
-18°C

$$G = J \cdot \frac{T_s - T_r}{T_s}$$



Erwärmung durch Absorption

15°C



Strahlungstemperatur

-18°C



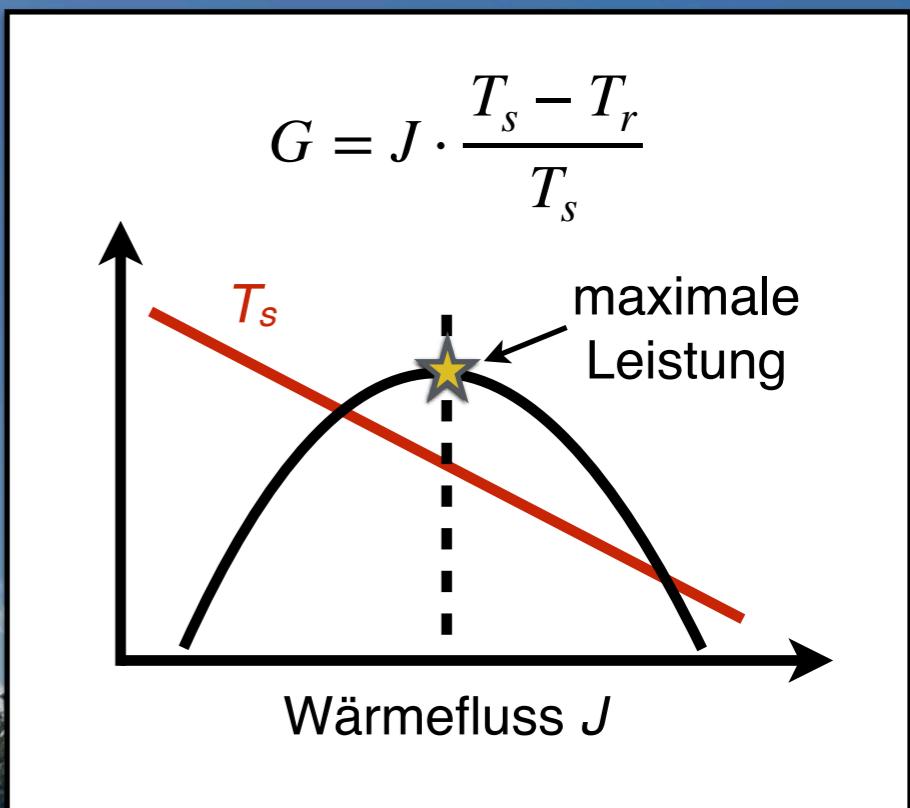
Oberflächentemperatur

15°C

$$G = J \cdot \frac{T_s - T_r}{T_s}$$

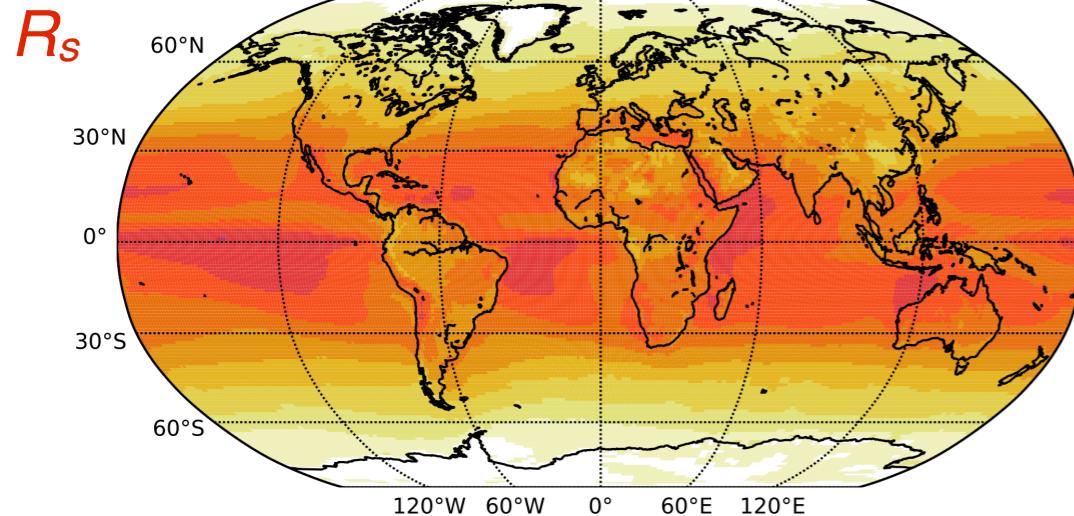
T_s maximale Leistung

Wärmeffluss J

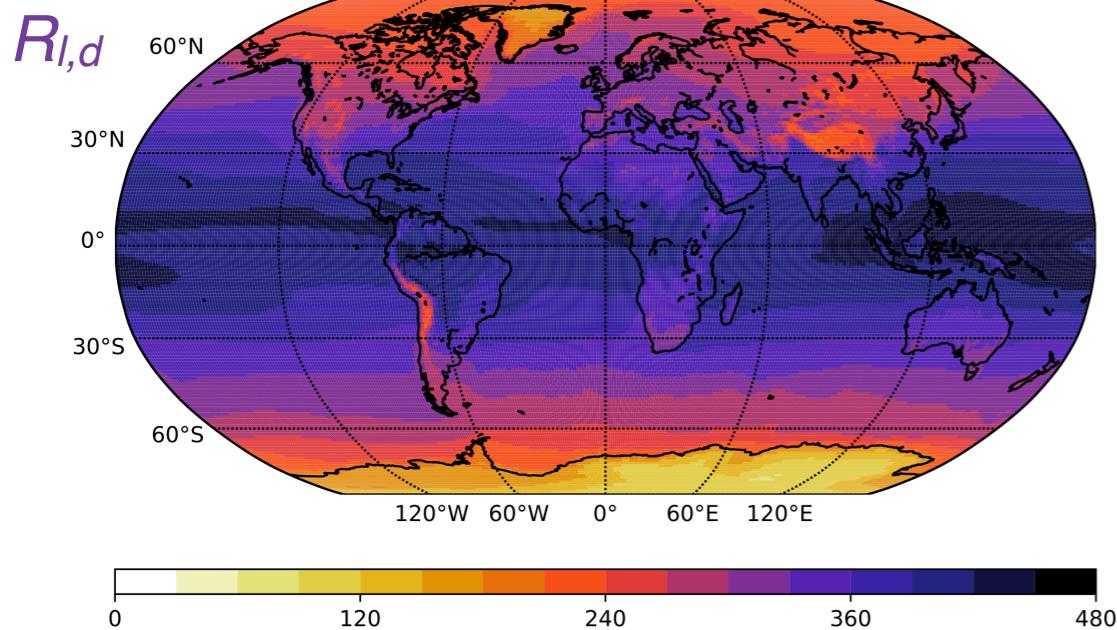


Erwärmung der Oberfläche durch Strahlung

Solar (W m^{-2})



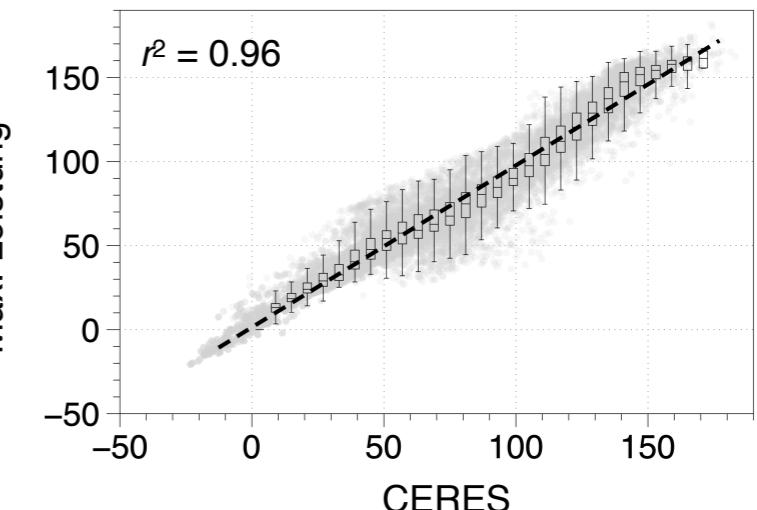
atmosphärische Gegenstrahlung (W m^{-2})



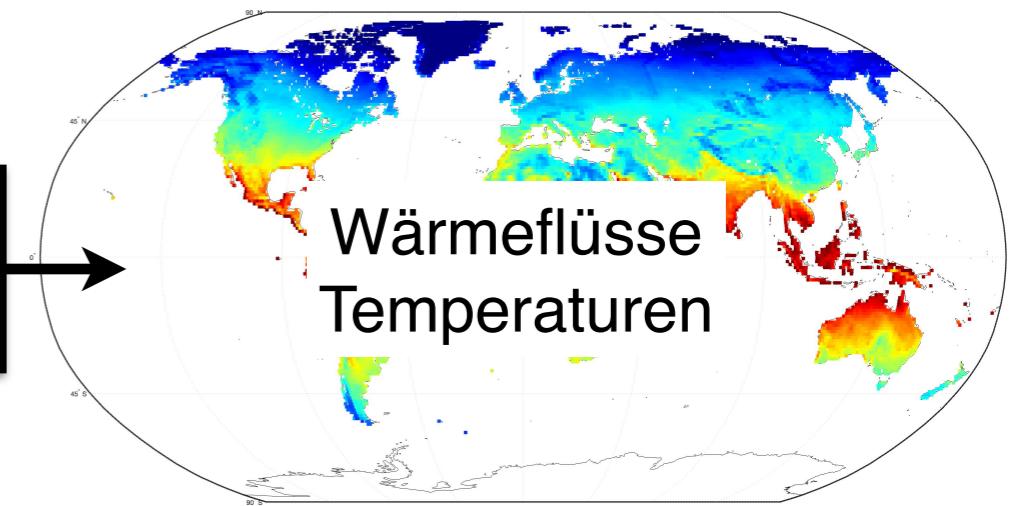
maximale
Leistung

Atmosphäre
arbeitet so hart
wie sie kann!

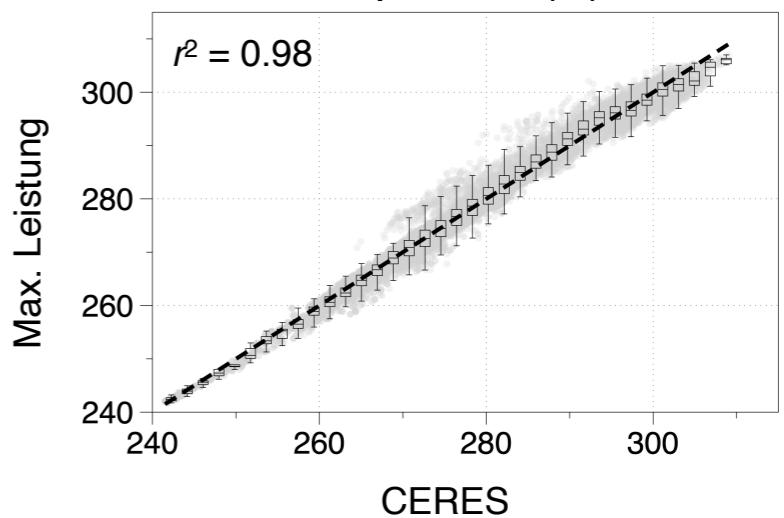
Wärmeflüsse (W m^{-2})



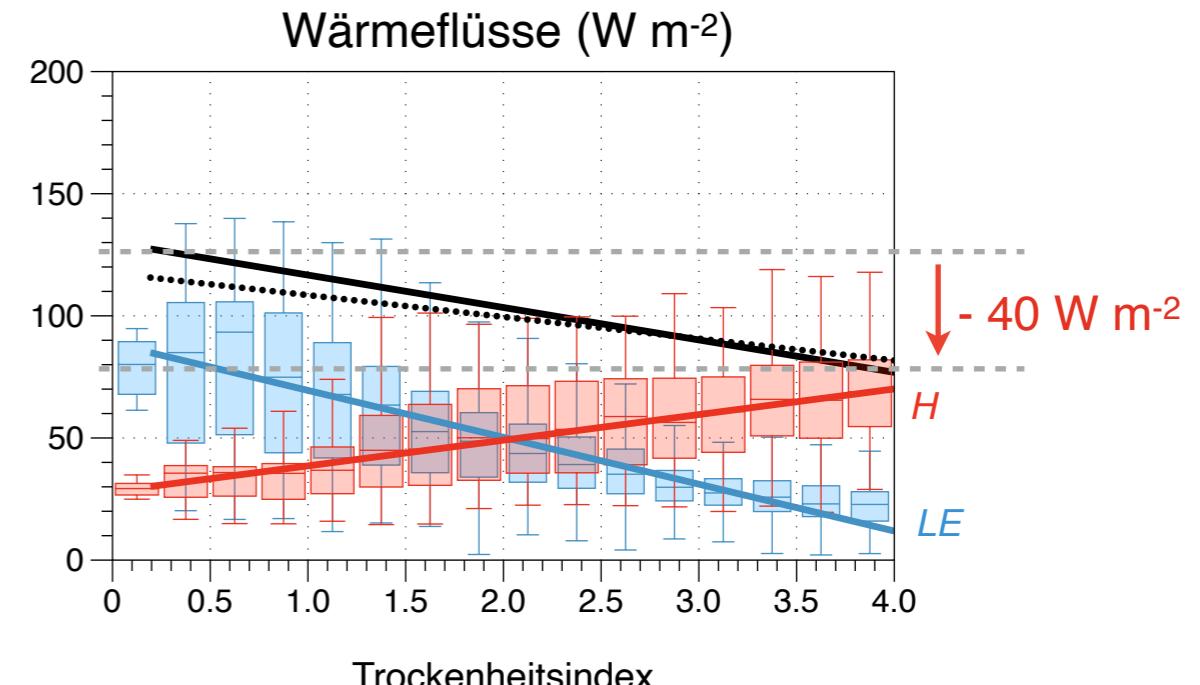
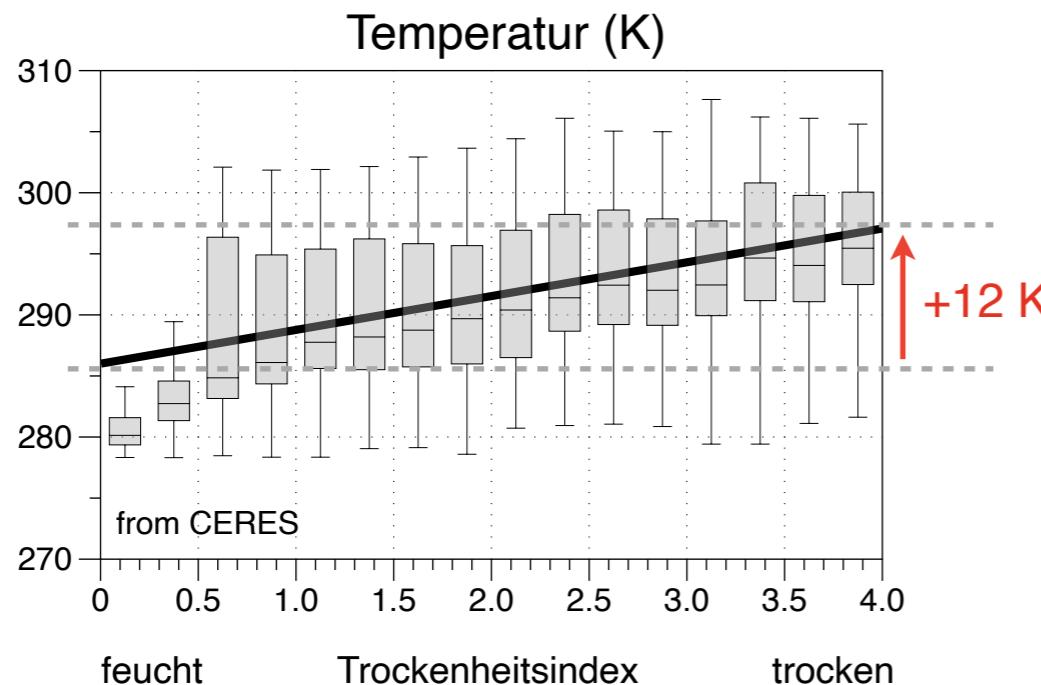
Wärmeflüsse
Temperaturen



Temperatur (K)



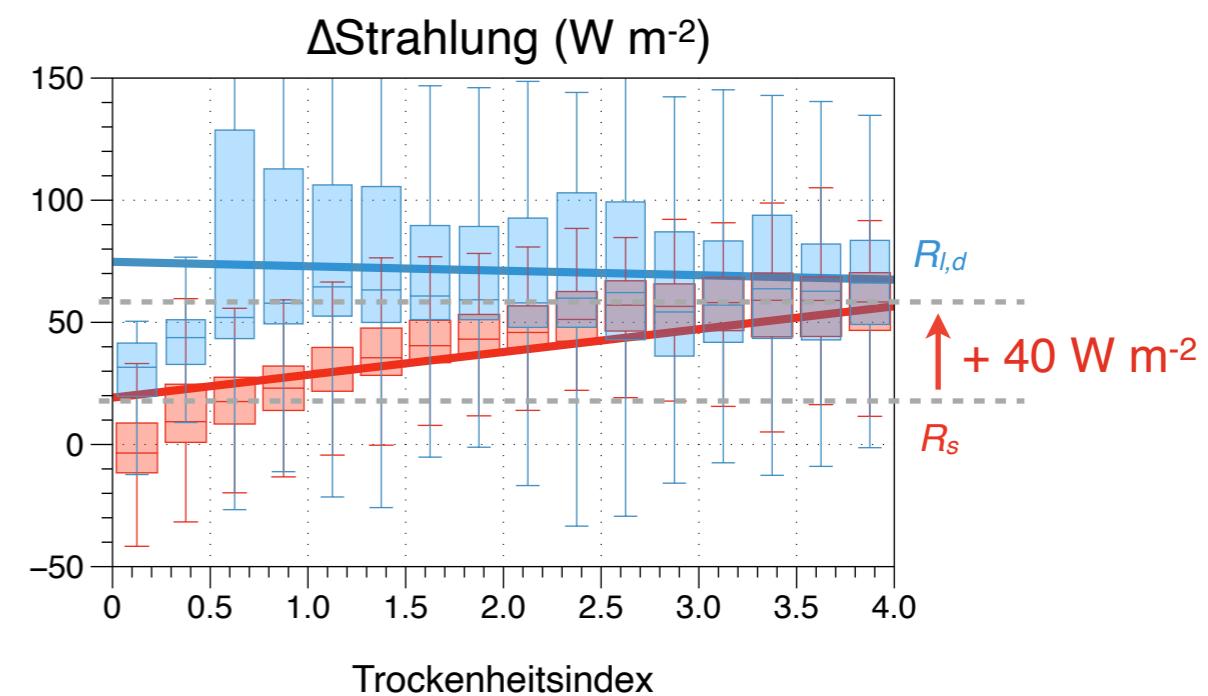
Warum sind Wüsten wärmer?



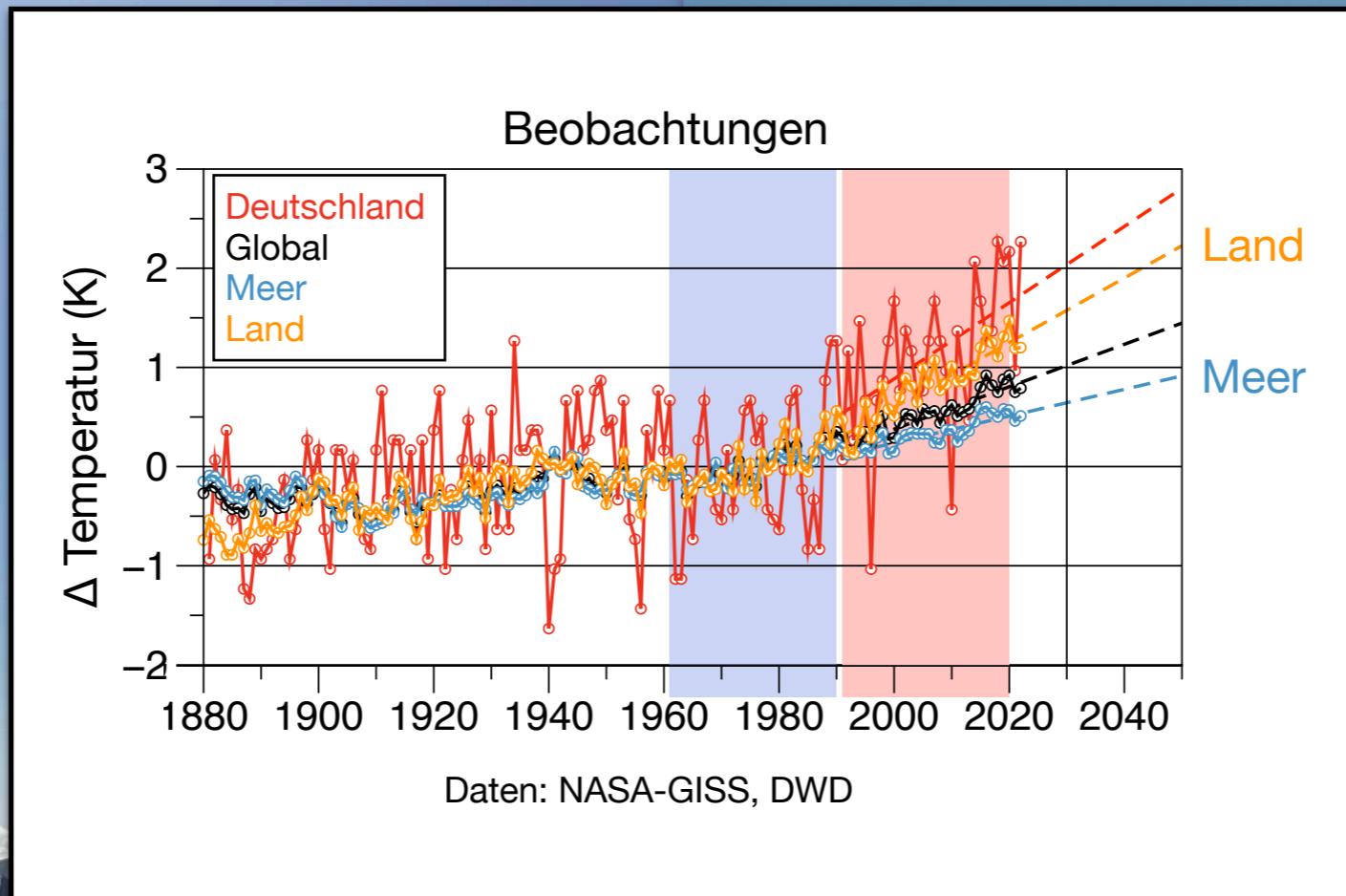
$$\Delta T_s = \frac{\Delta R_s + \Delta R_{l,d} - \Delta LE - \Delta H}{4\sigma T_{s,0}^3}$$

$$\Delta T_s \approx +14 \text{ K}$$

Wüsten sind wärmer weil
 (a) mehr Sonne und
 (b) schwächeres Kraftwerk!



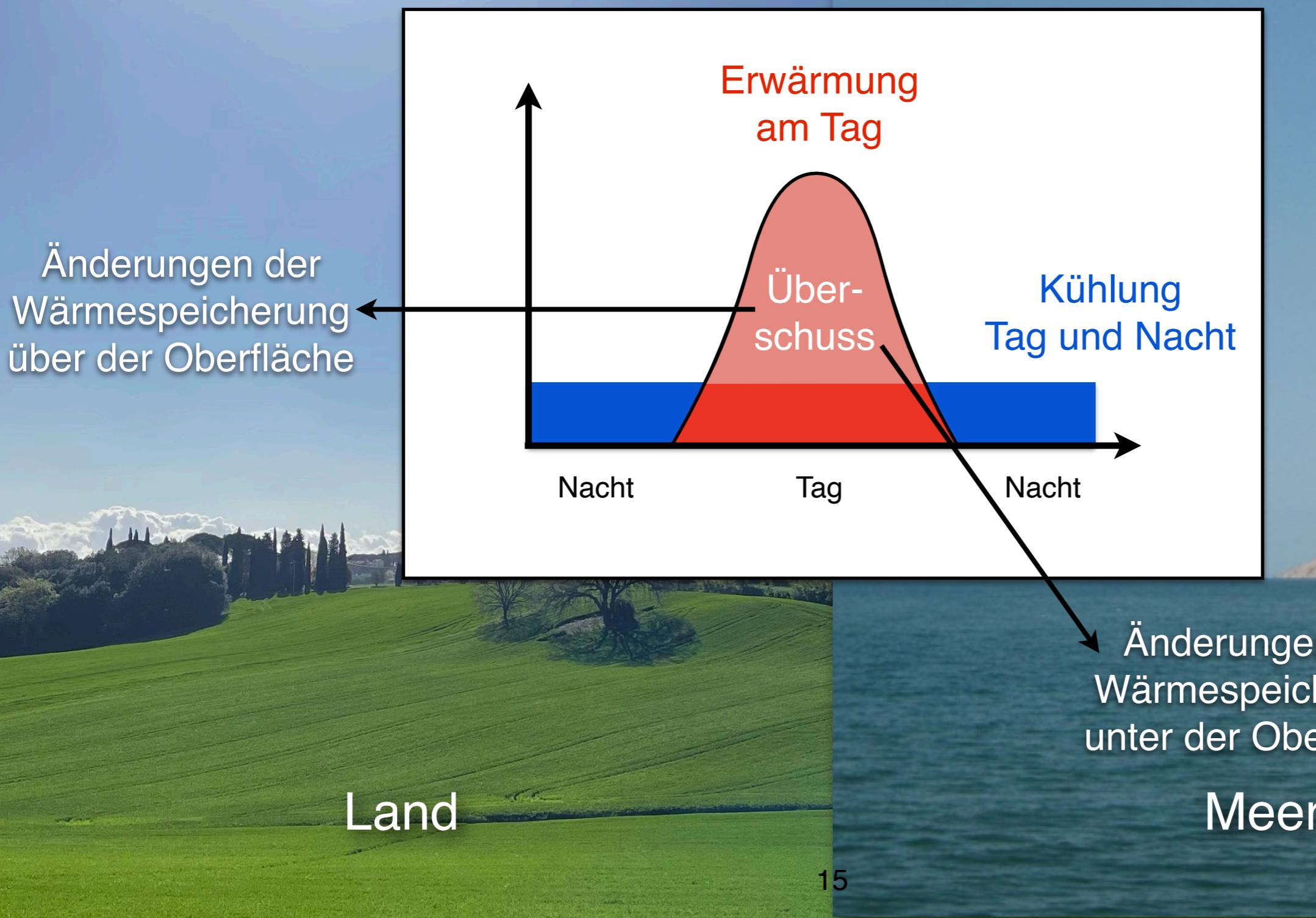
Warum erwärmt sich Land stärker als das Meer?

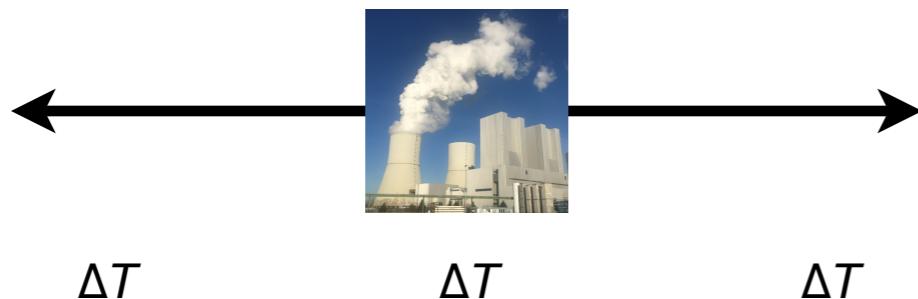
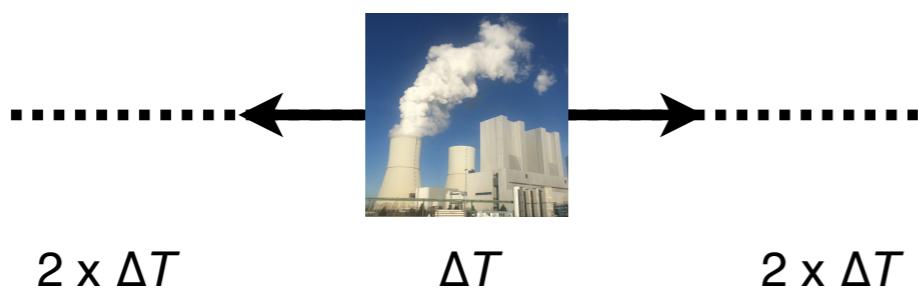
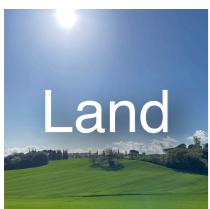
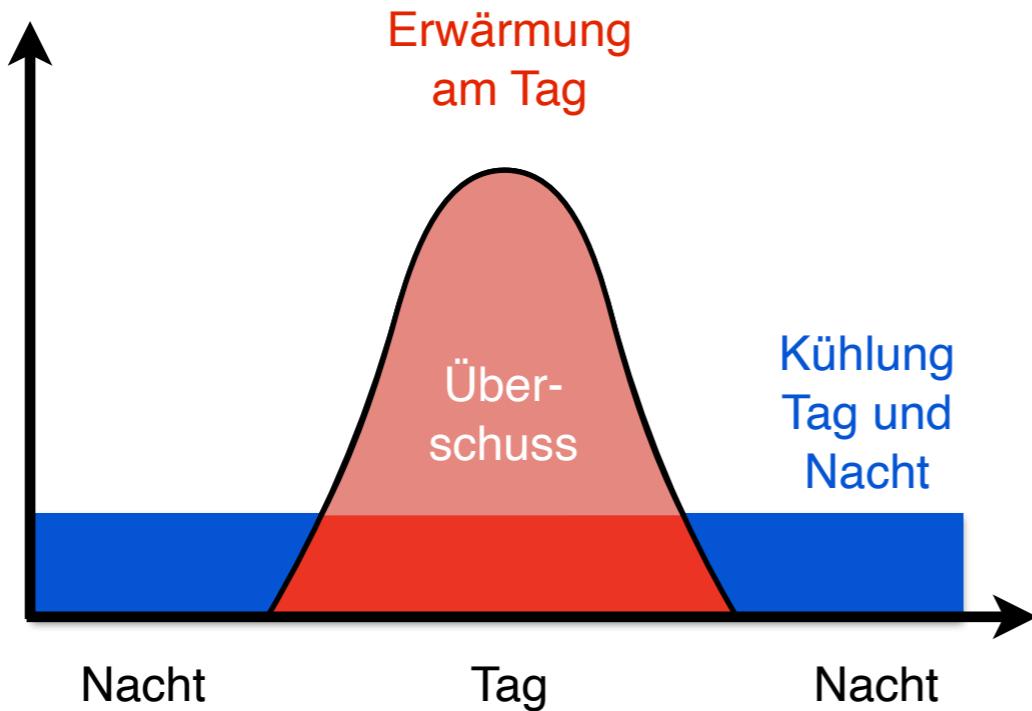


Land

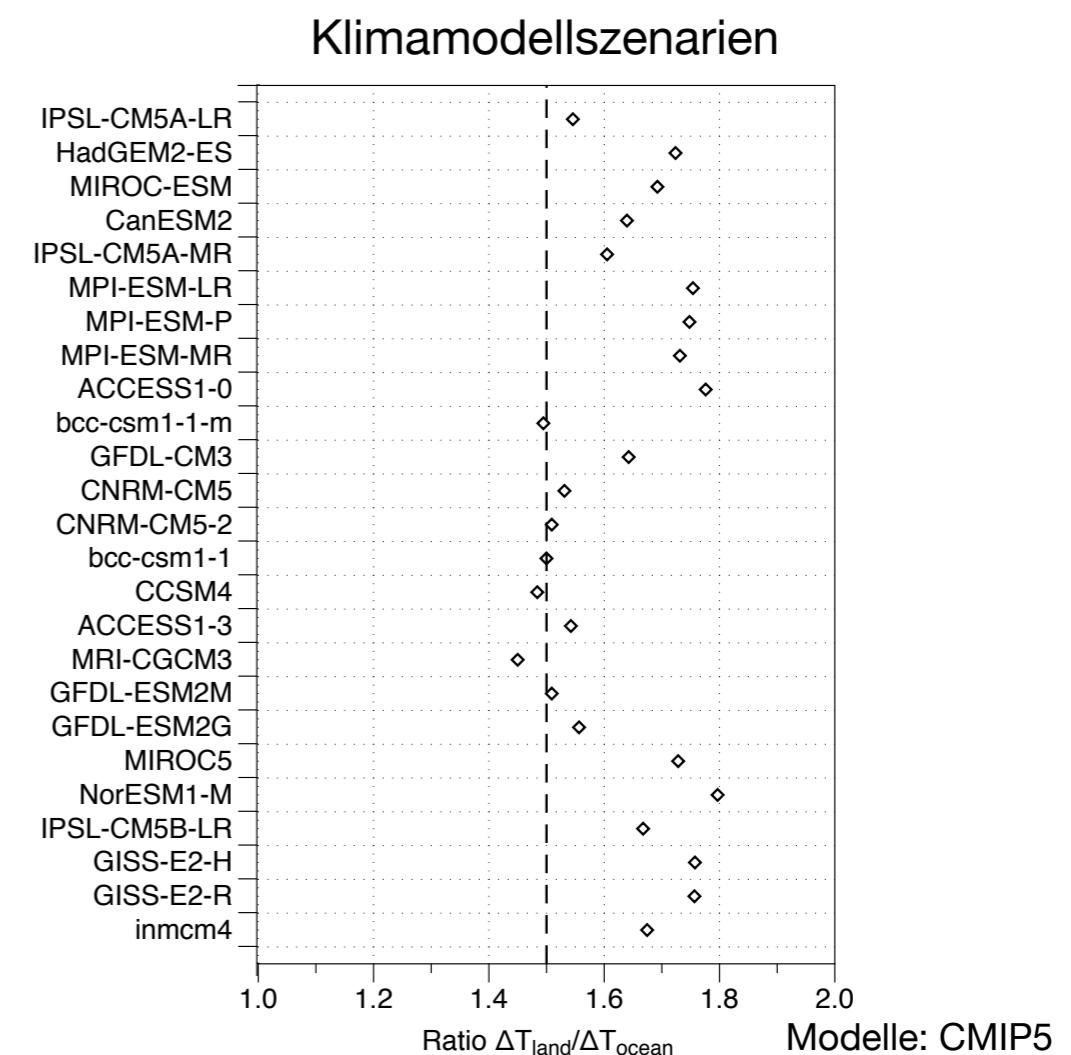
Meer

Warum erwärmt sich Land stärker als das Meer?





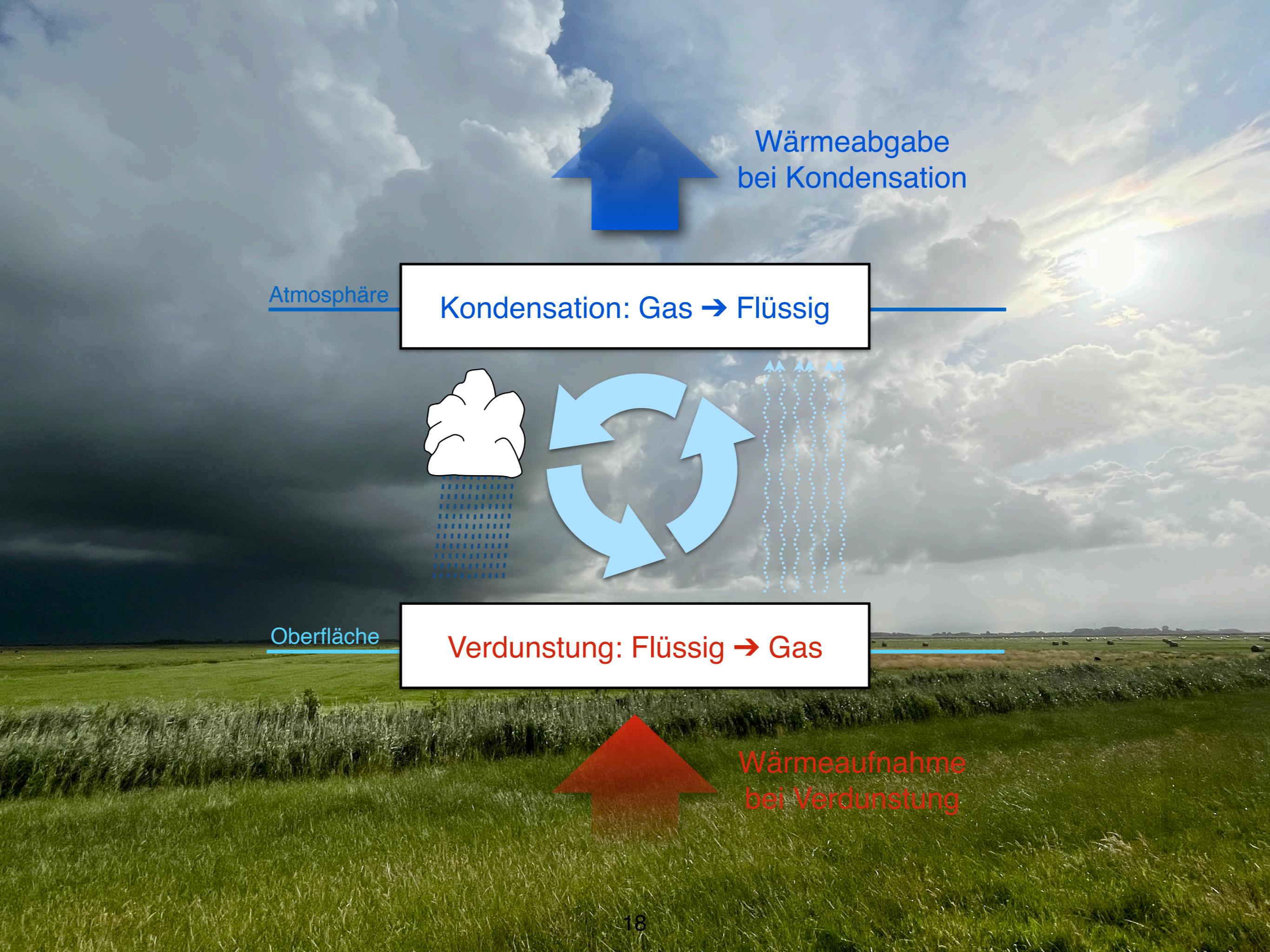
$$\Delta \overline{T}_{Land} \approx 1.5 \cdot \Delta \overline{T}_{Meer}$$

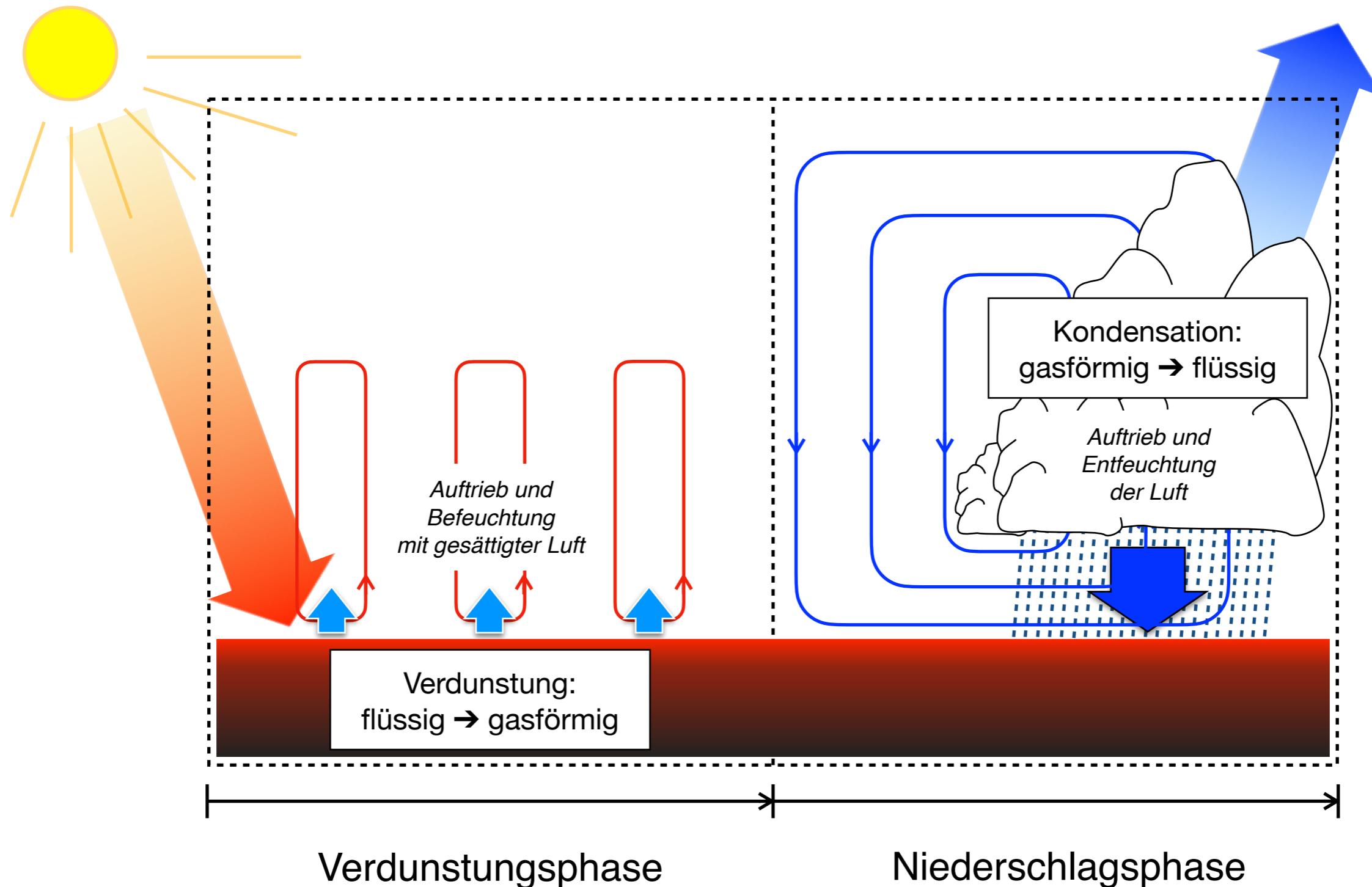


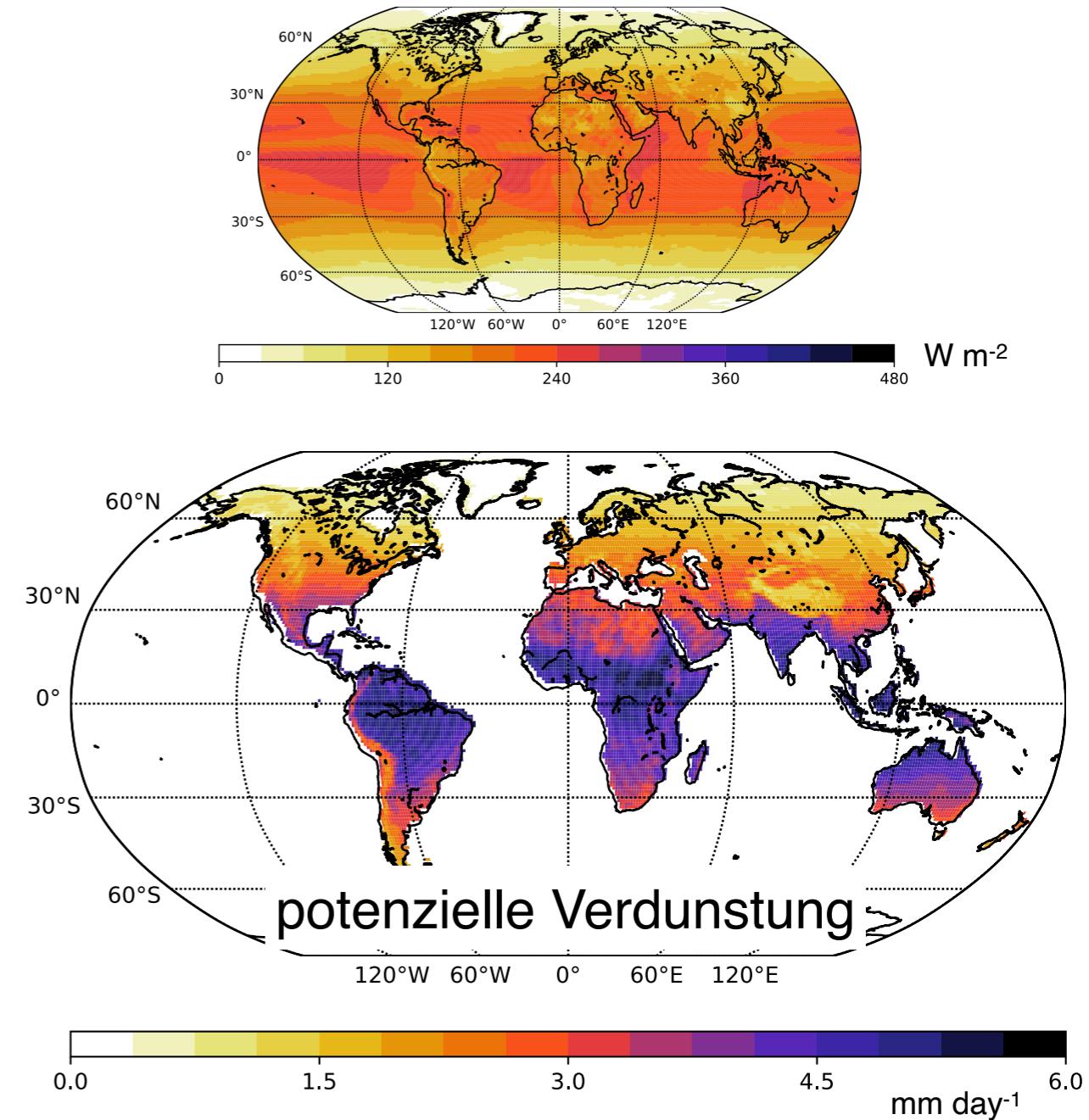
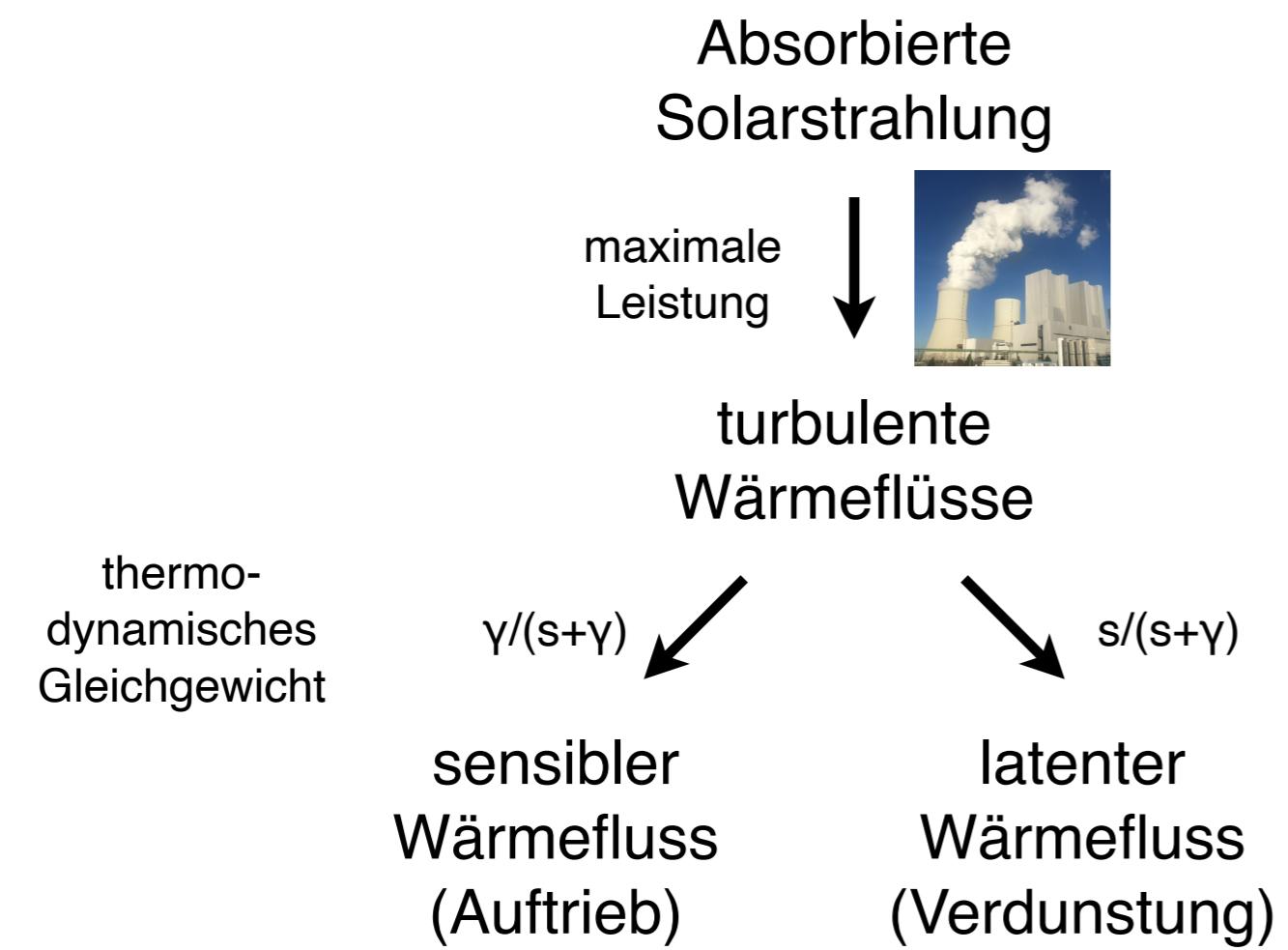
Land erwärmt sich
stärker als das Meer
weil das Kraftwerk
nur tagsüber läuft!

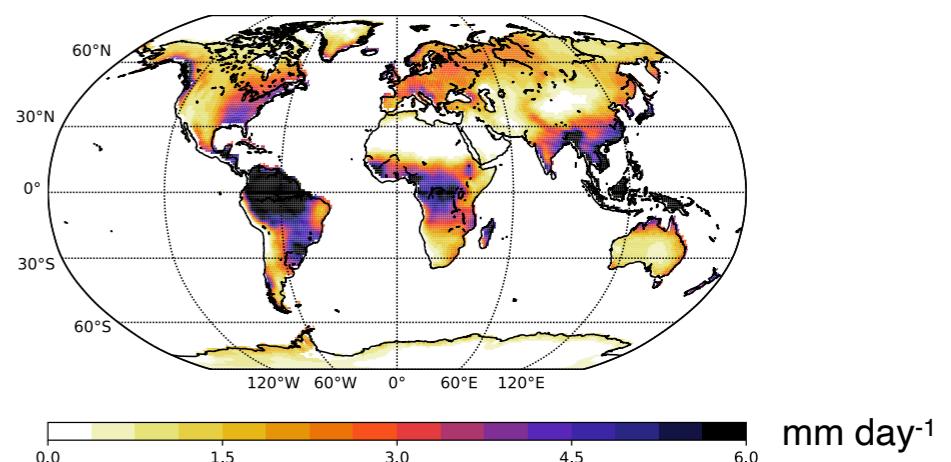
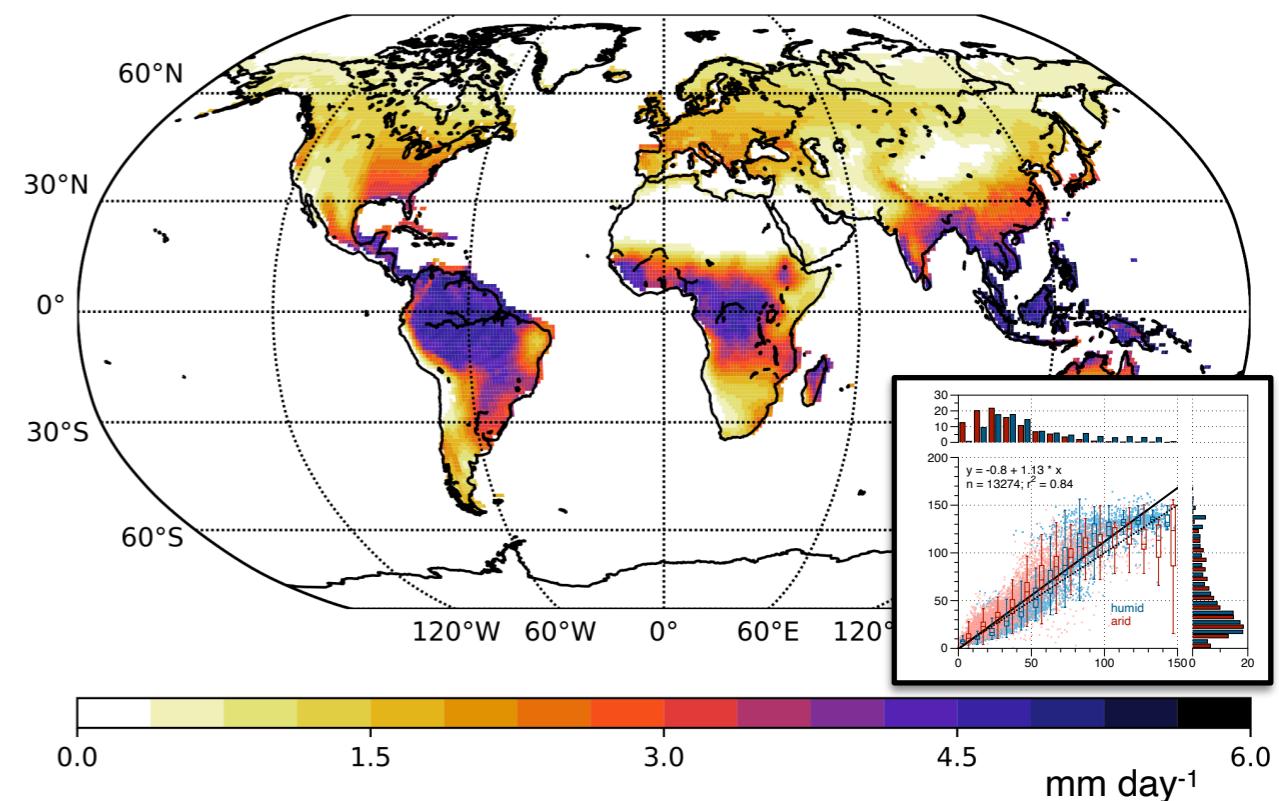
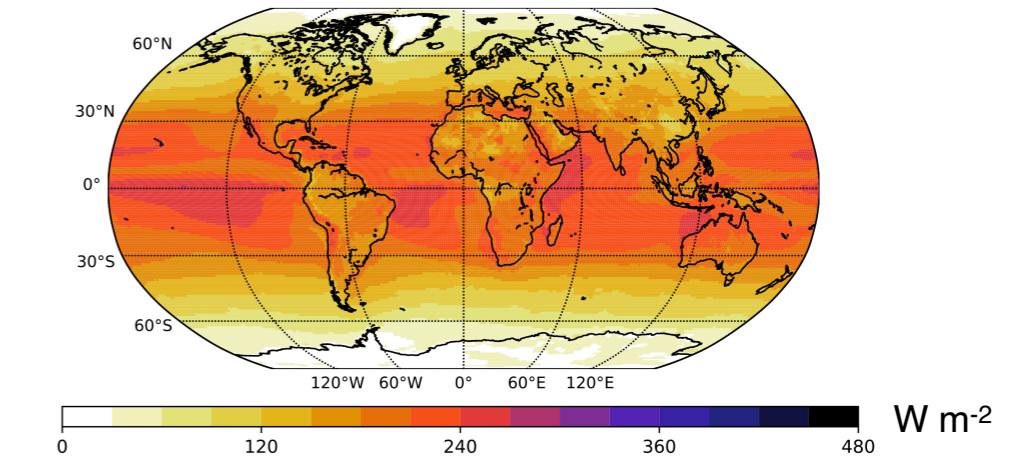
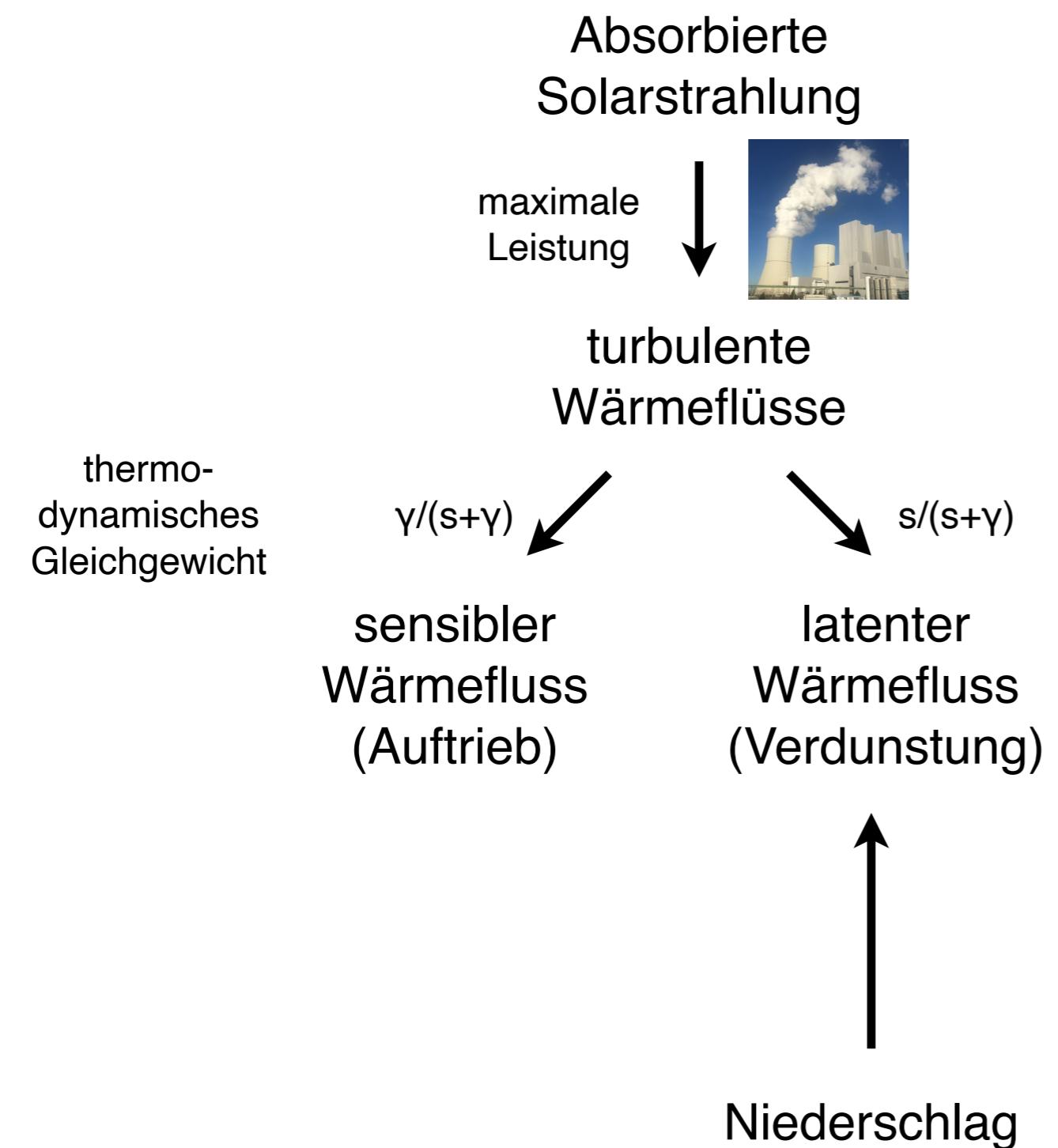


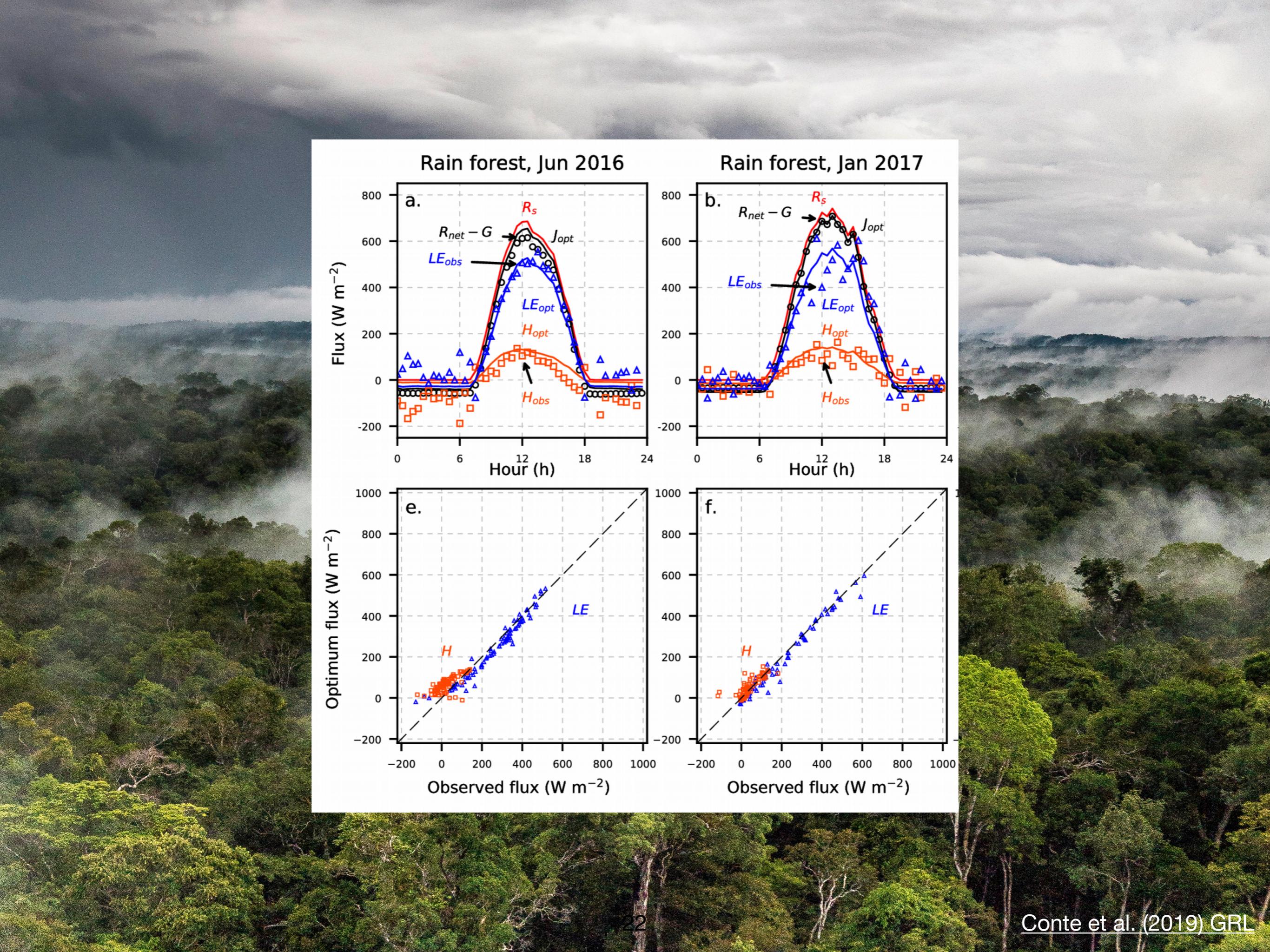
Sättigung:
Kondensation (Gas → Flüssig)
=
Verdunstung (Flüssig → Gas)



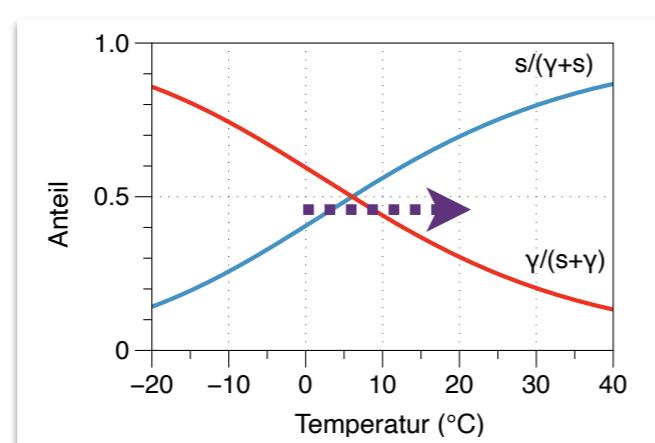
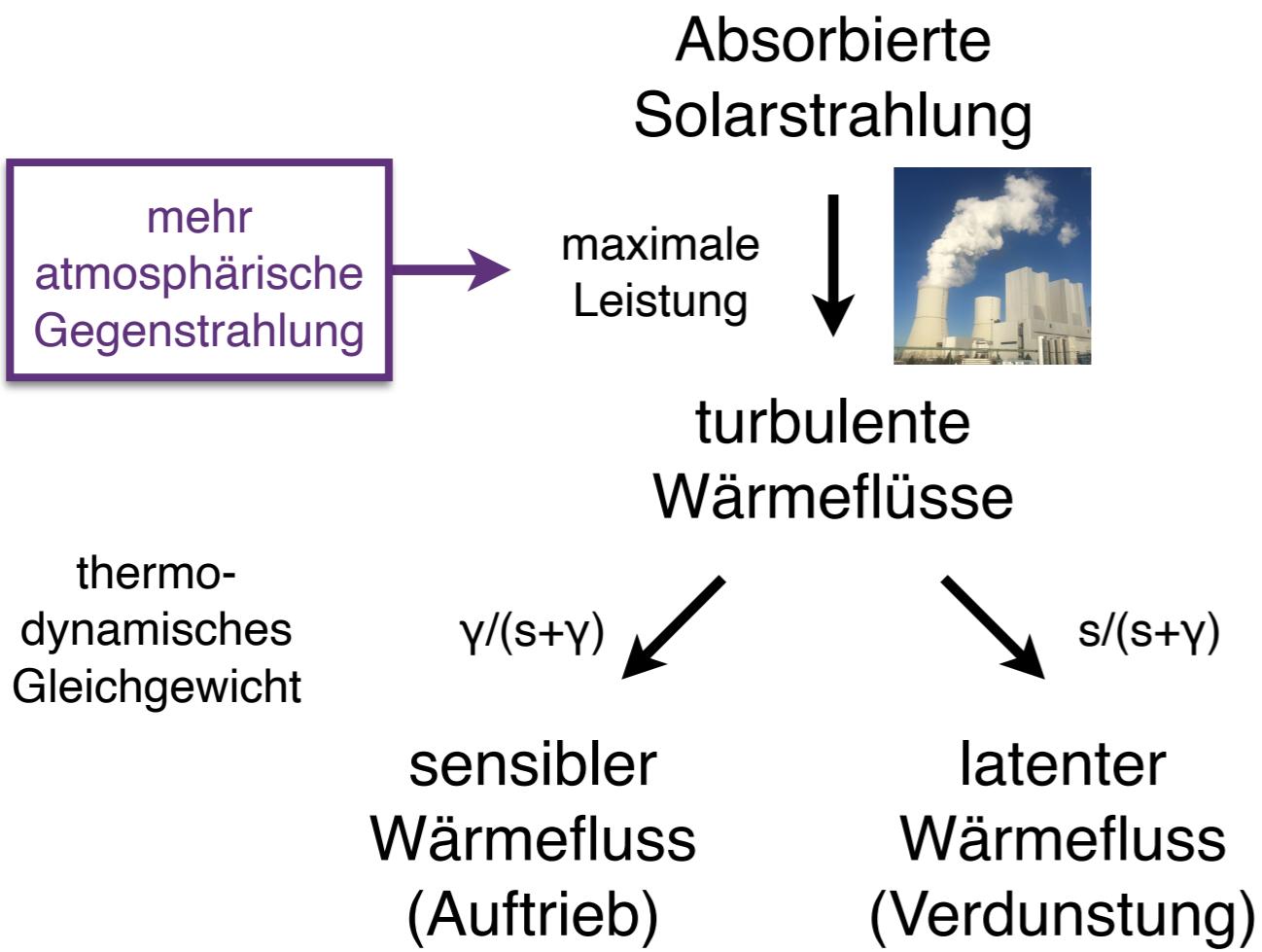




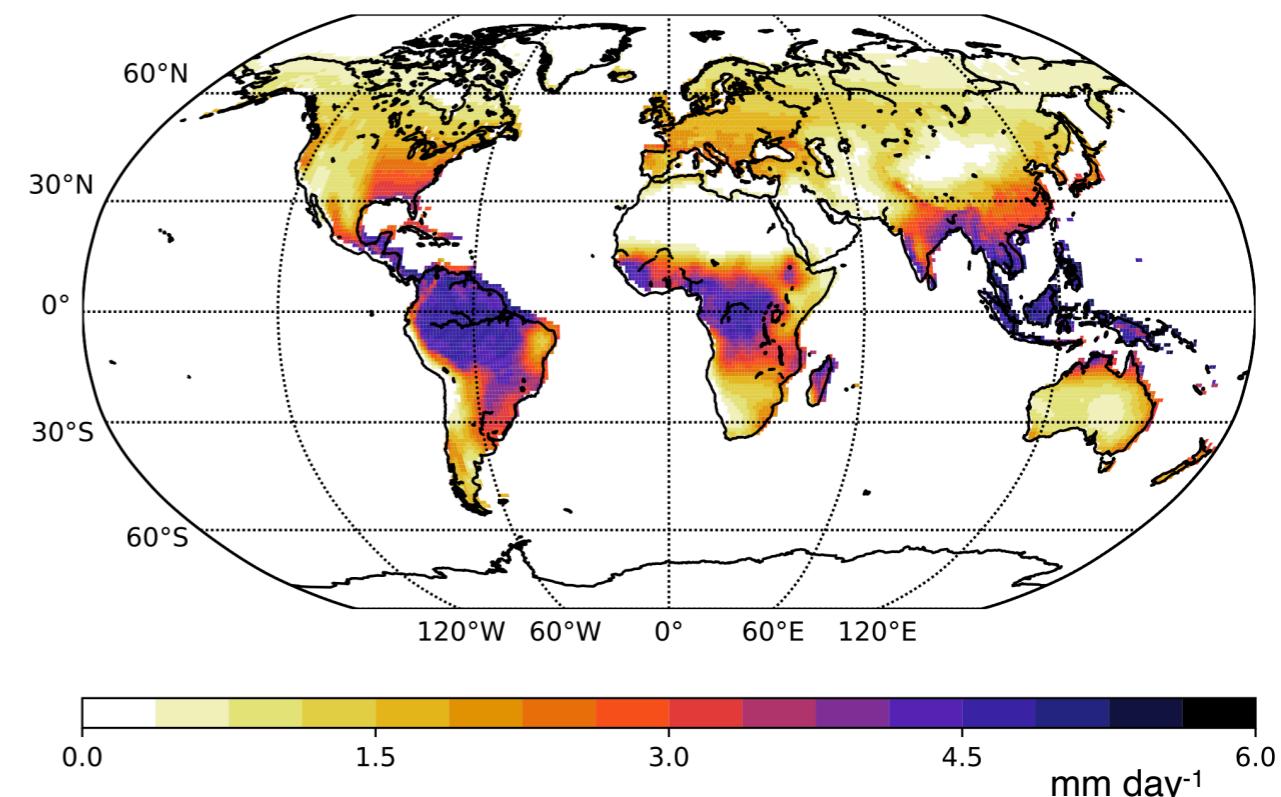
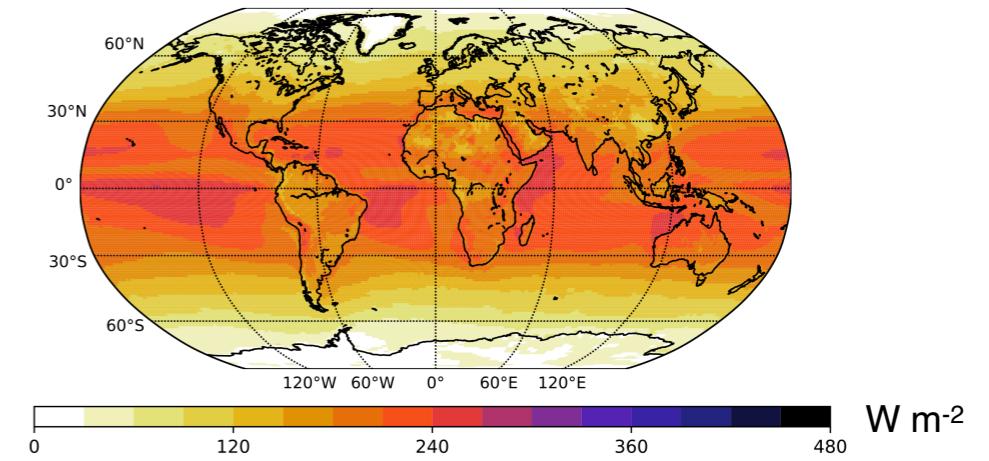




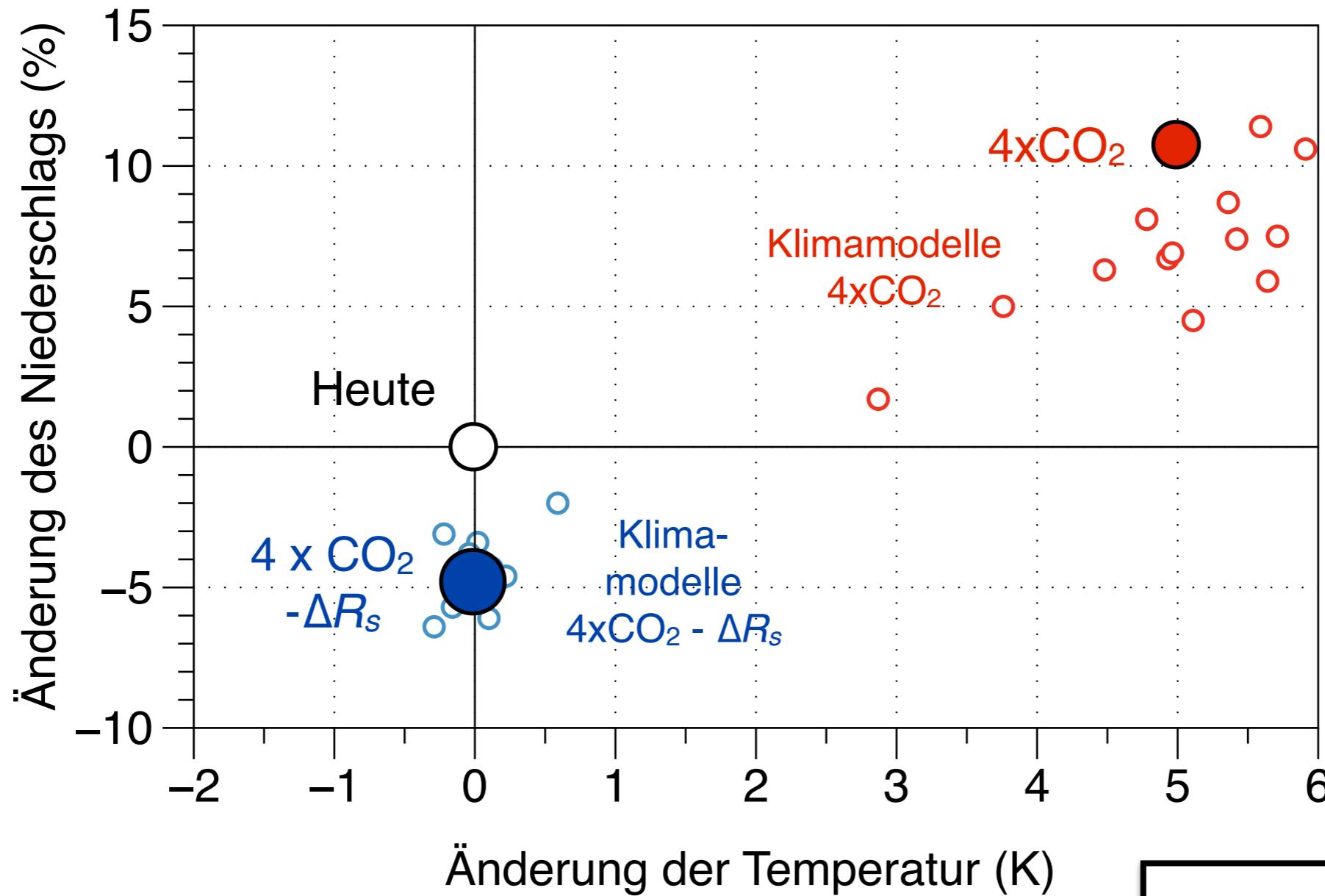
Globale Erwärmung



Verschiebung der Aufteilung

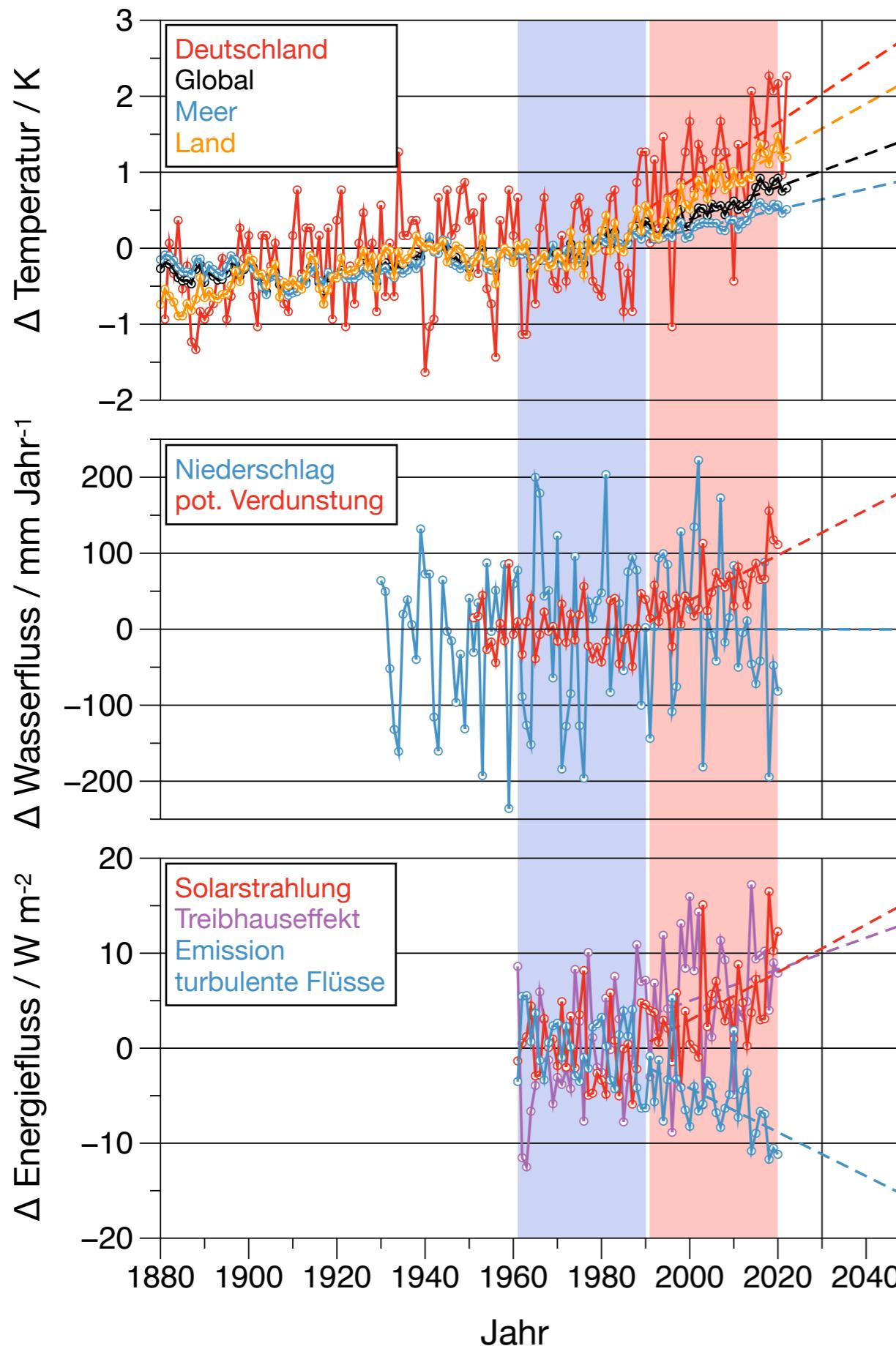


Was passiert bei globaler Erwärmung?



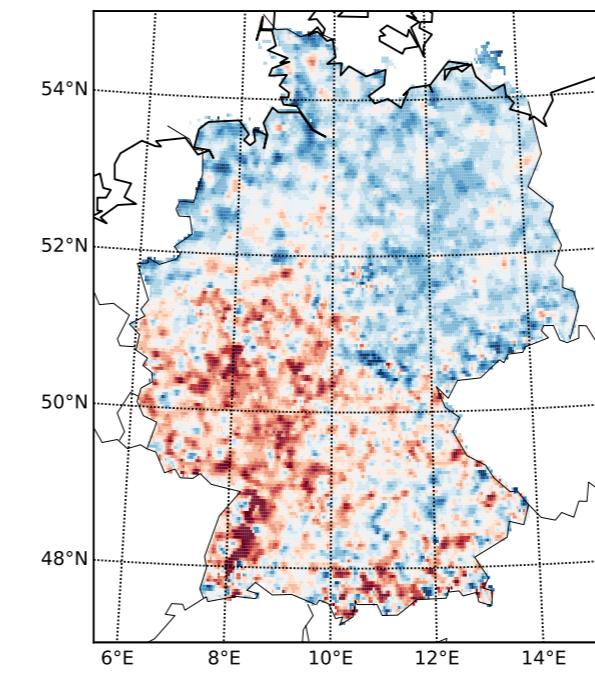
Klimamodelle: GeoMIP
Kleidon and Renner (2013)
Kleidon, Kravitz, Renner (2015)
Kleidon und Renner (2015)

Verstärkung des
Wasserkreislaufs im
Klimawandel wird durch
Thermodynamik erklärt

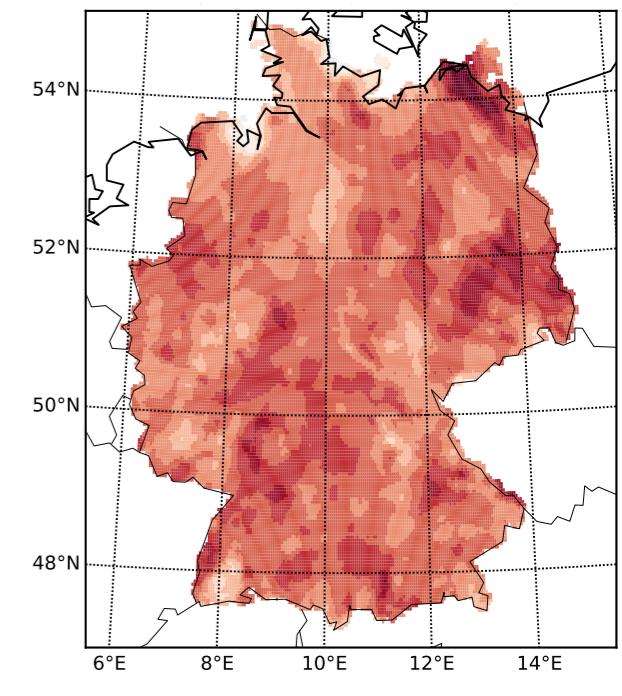


Warum wird Deutschland trockener?

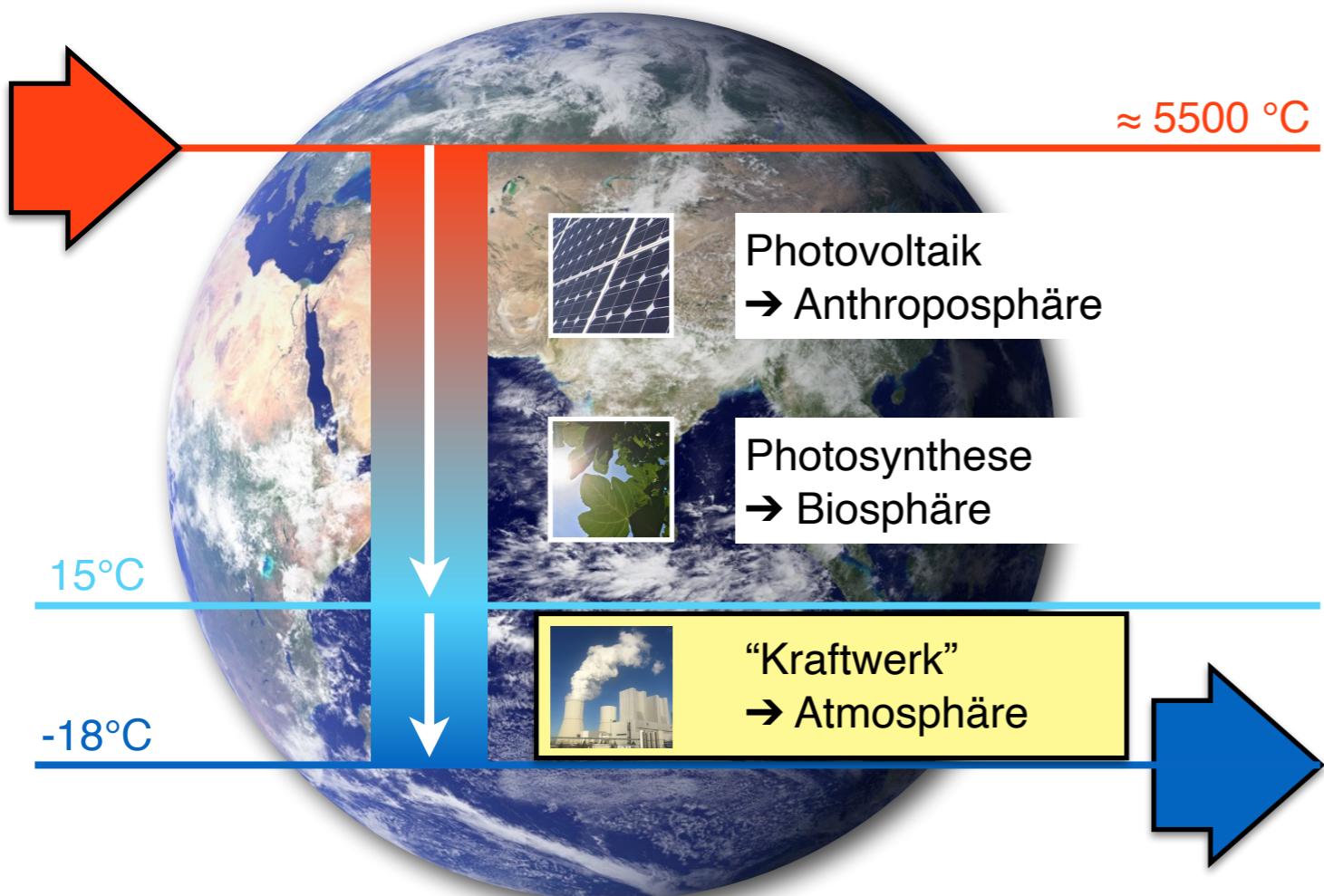
Δ Niederschlag
(mm Jahr⁻¹)



Δ potenzielle Verdunstung
(mm Jahr⁻¹)

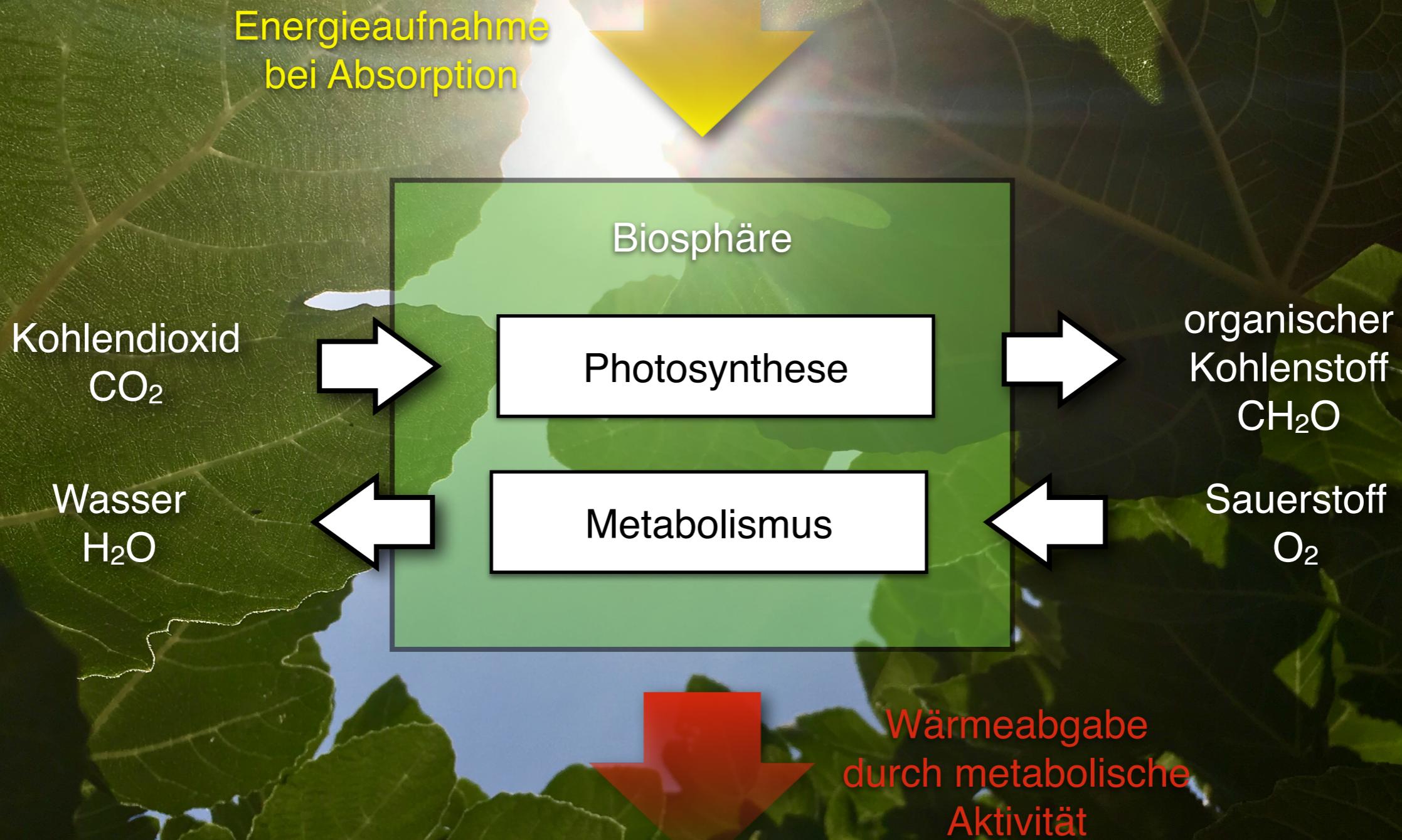


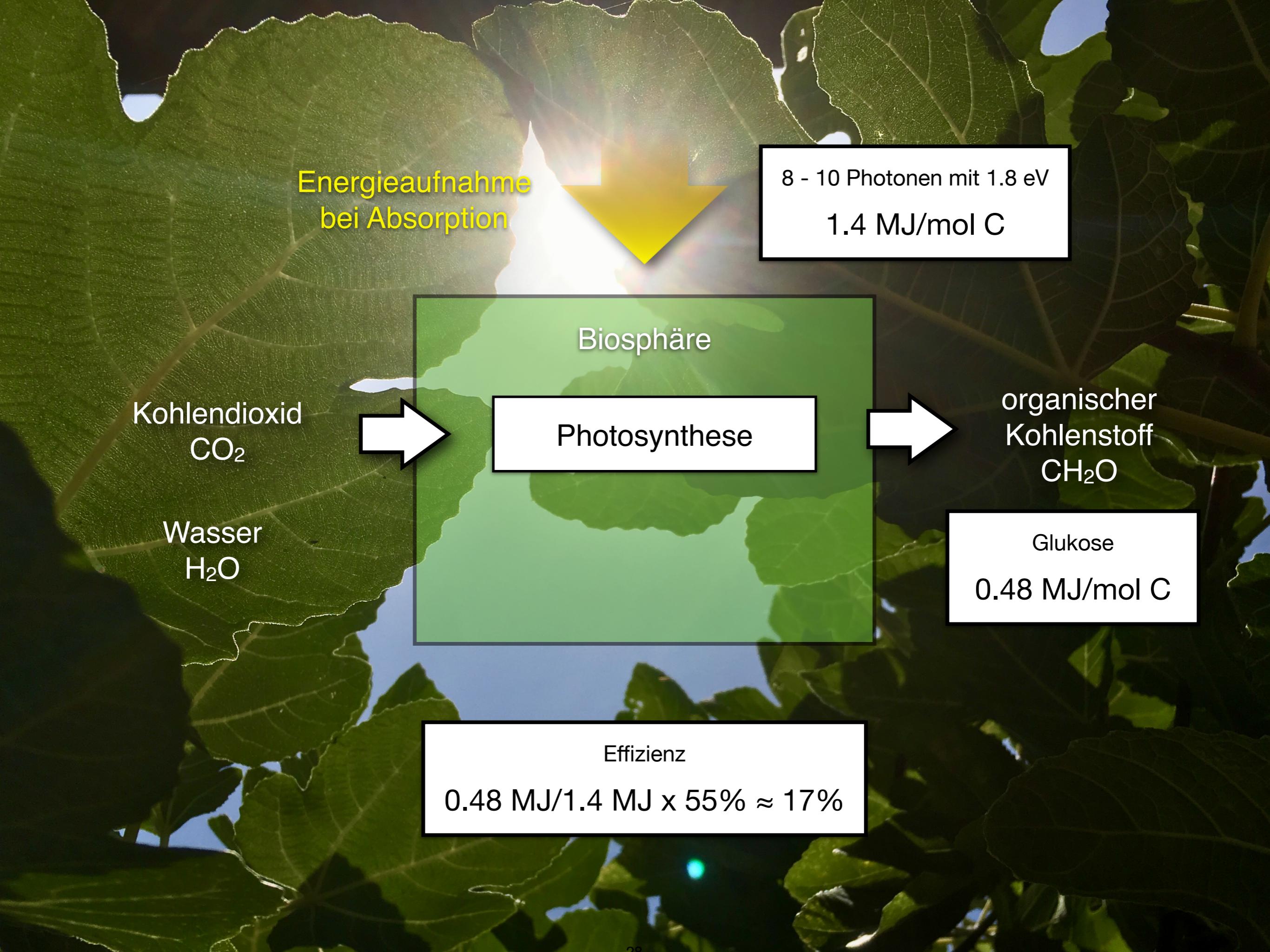
Zunehmende Trockenheit in Deutschland wird durch stark erhöhte potenzielle Verdunstung erklärt



Klima an der Leistungsgrenze

- Strahlungsunterschiede
→ $\Delta\text{Temperatur}$
→ erzeugen Leistung
→ bewegen Luft
→ kühlen Oberfläche
- Luft bewegt sich an der Leistungsgrenze
- Wasserkreislauf als Kombination von Luftbewegung und Thermodynamik
- Klima und Klimawandel einfach berechnet und fundiert erklärt





Energieaufnahme
bei Absorption

8 - 10 Photonen mit 1.8 eV
1.4 MJ/mol C

Kohlendioxid
 CO_2

Wasser
 H_2O

Biosphäre

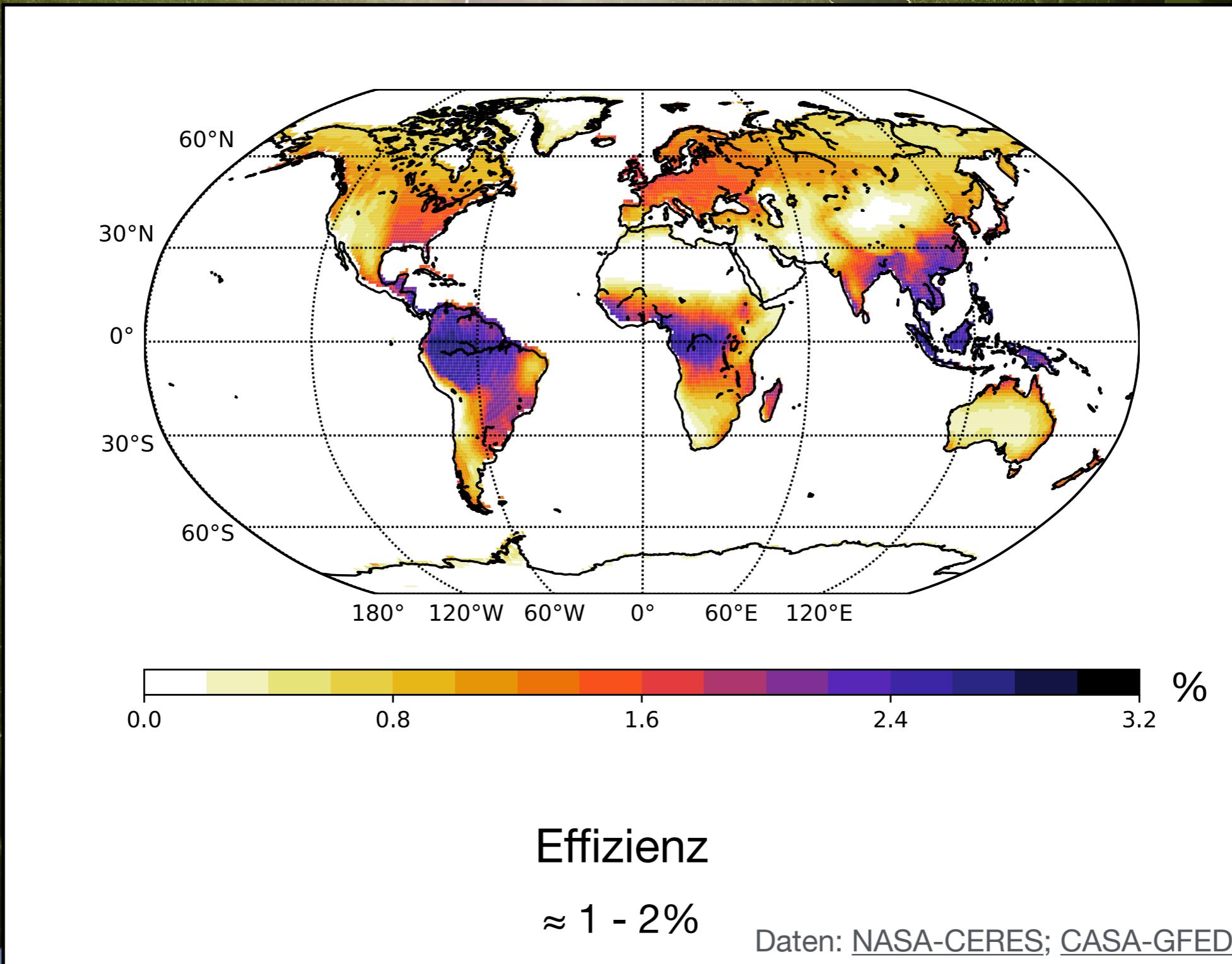
Photosynthese

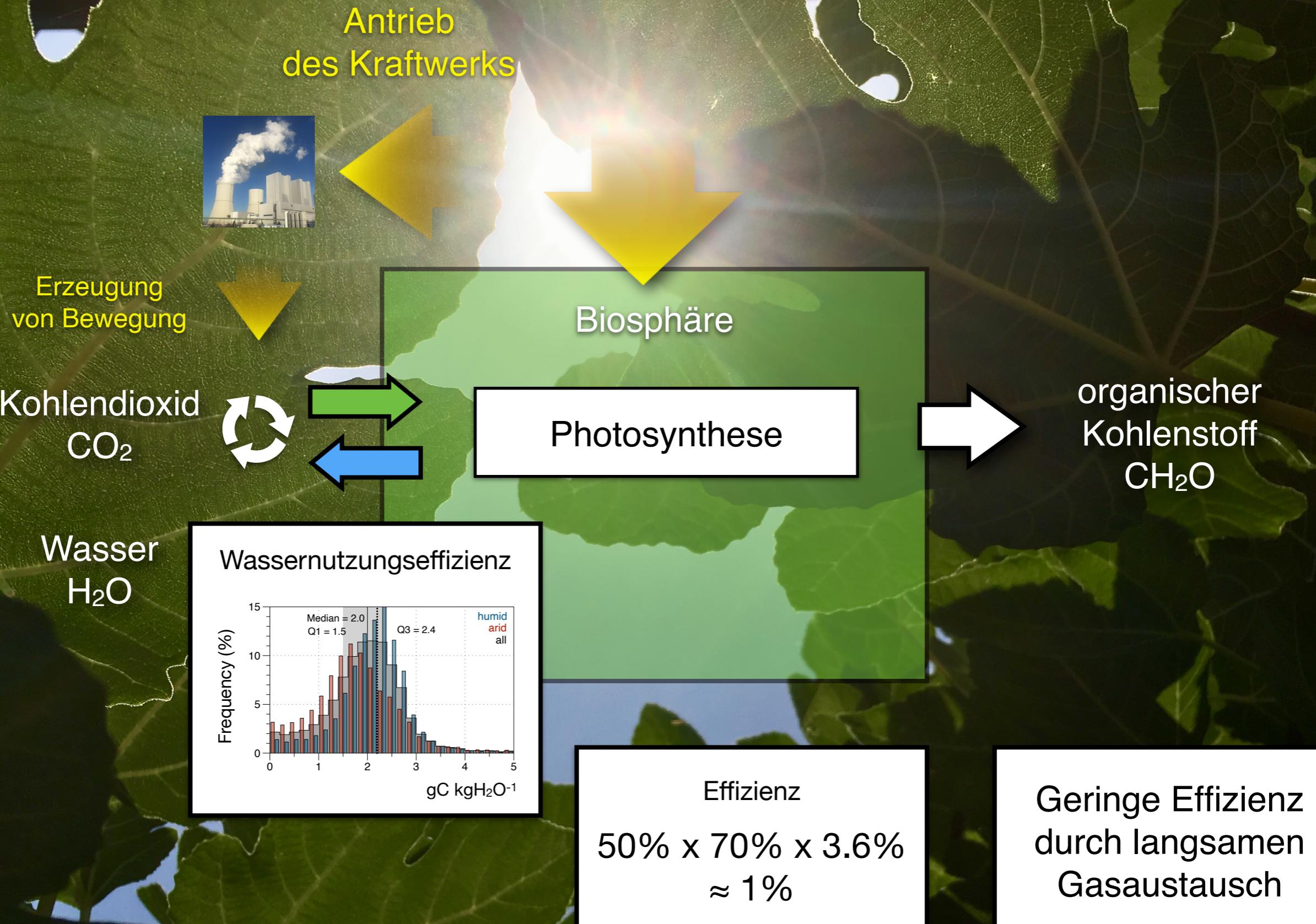
organischer
Kohlenstoff
 CH_2O

Glukose
0.48 MJ/mol C

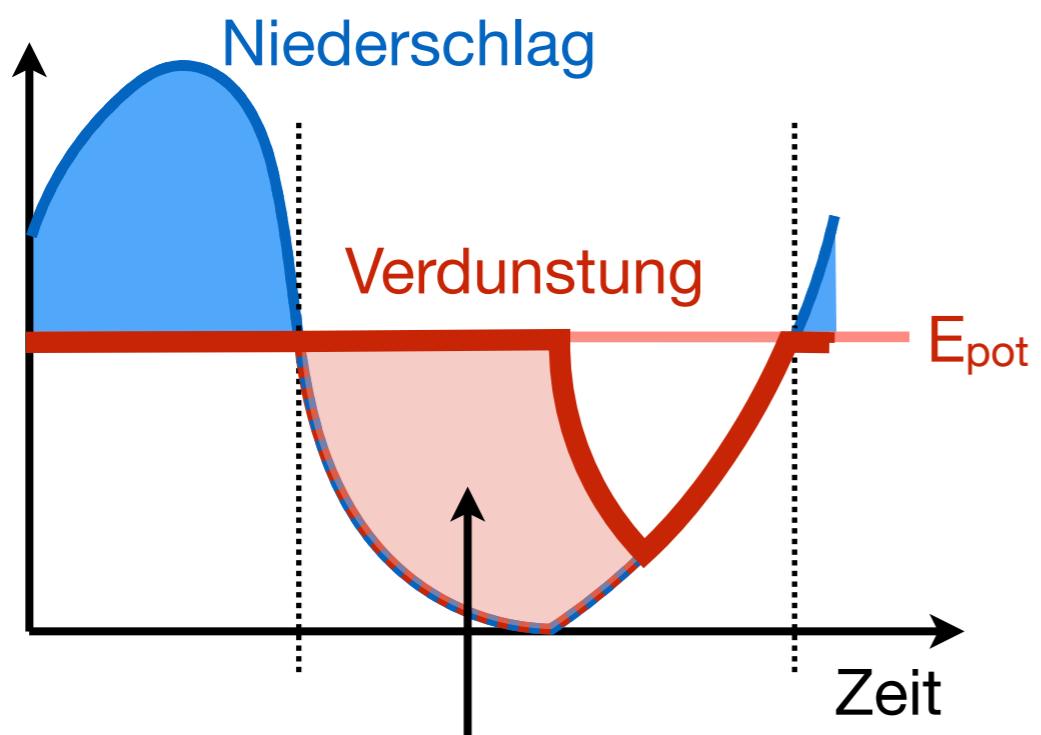
Effizienz

$0.48 \text{ MJ} / 1.4 \text{ MJ} \times 55\% \approx 17\%$



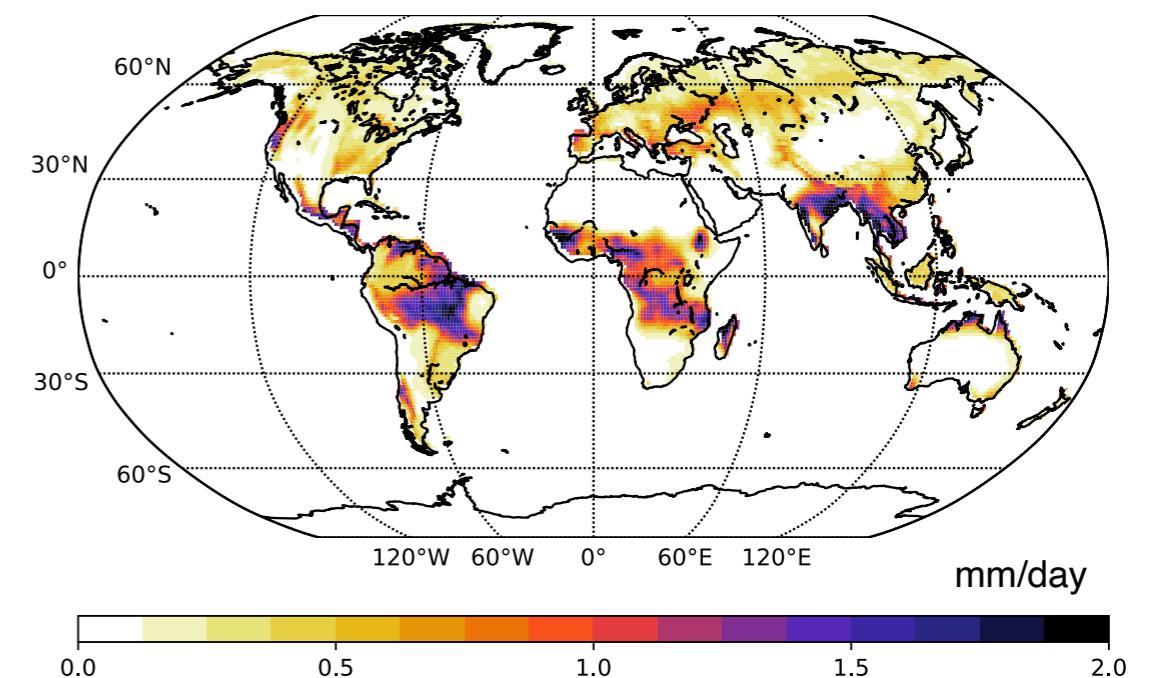


“Pushing the Limits”



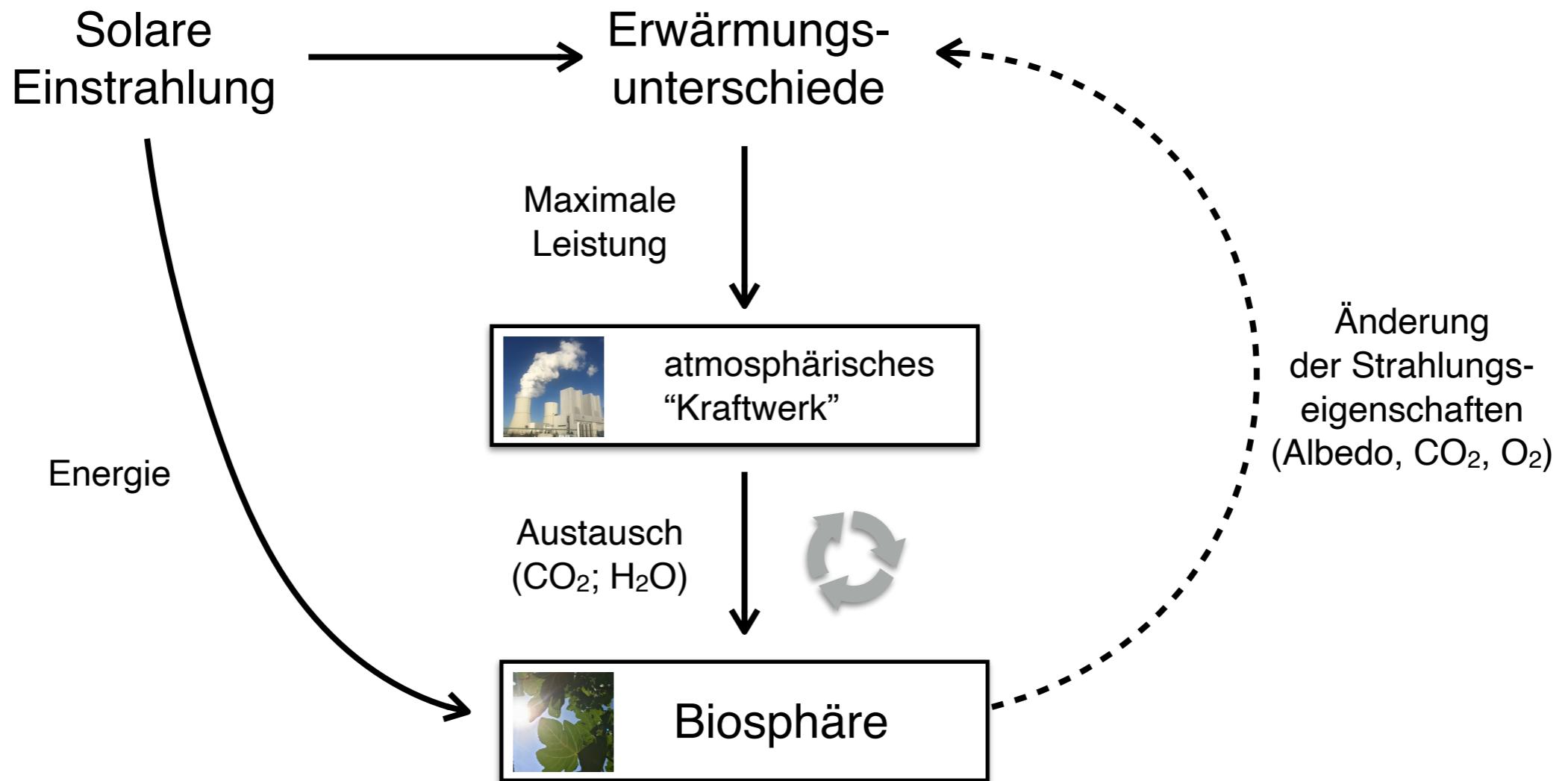
Wurzelsysteme
ermöglichen Zugang
zu Bodenwasser

Mehr Verdunstung durch Wurzelsysteme

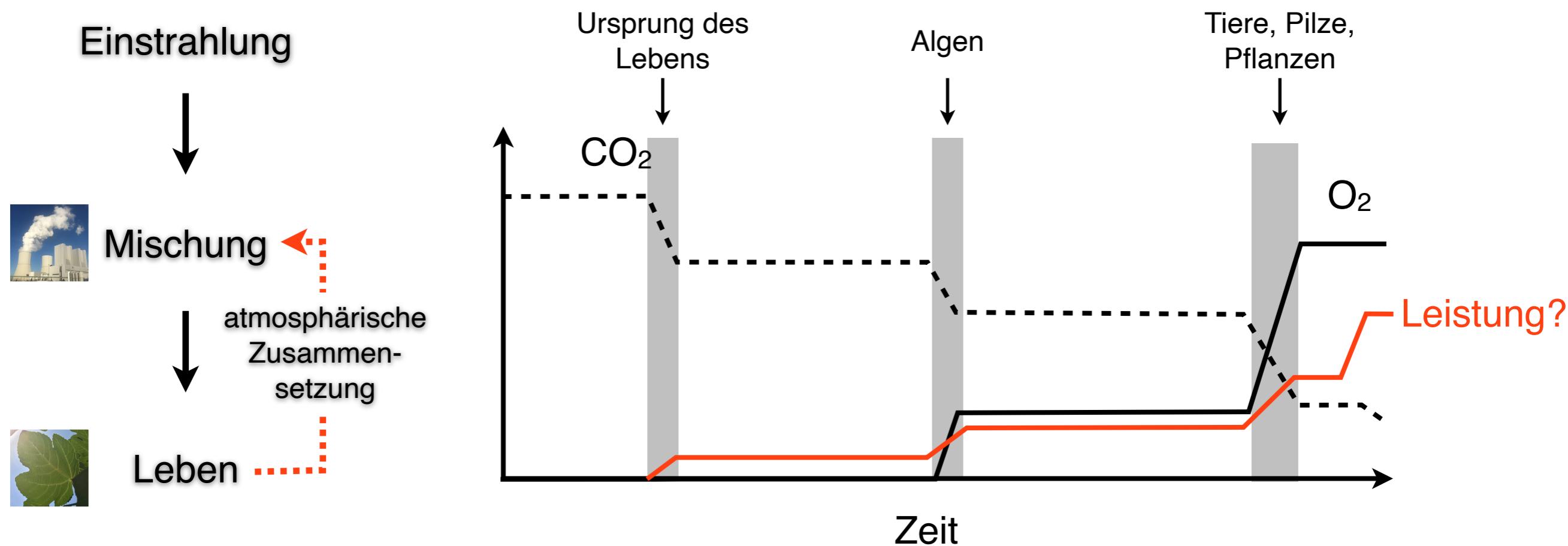


Mehr Verdunstung
→ mehr Gasaustausch
→ höhere Produktivität
+12%

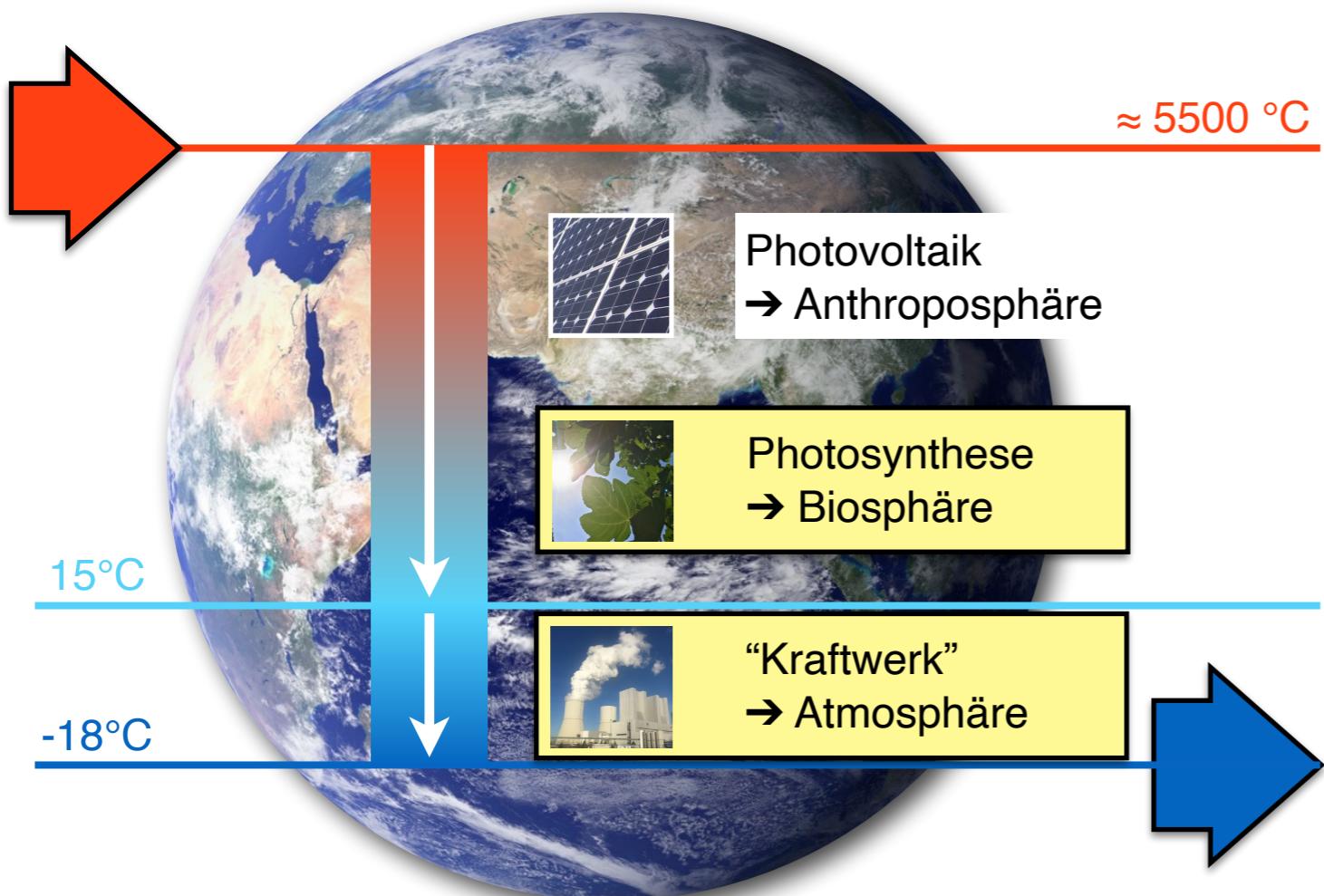
“Pushing the Limits” des gesamten Planeten?



Eine allgemeine Richtung zu mehr Leistung?



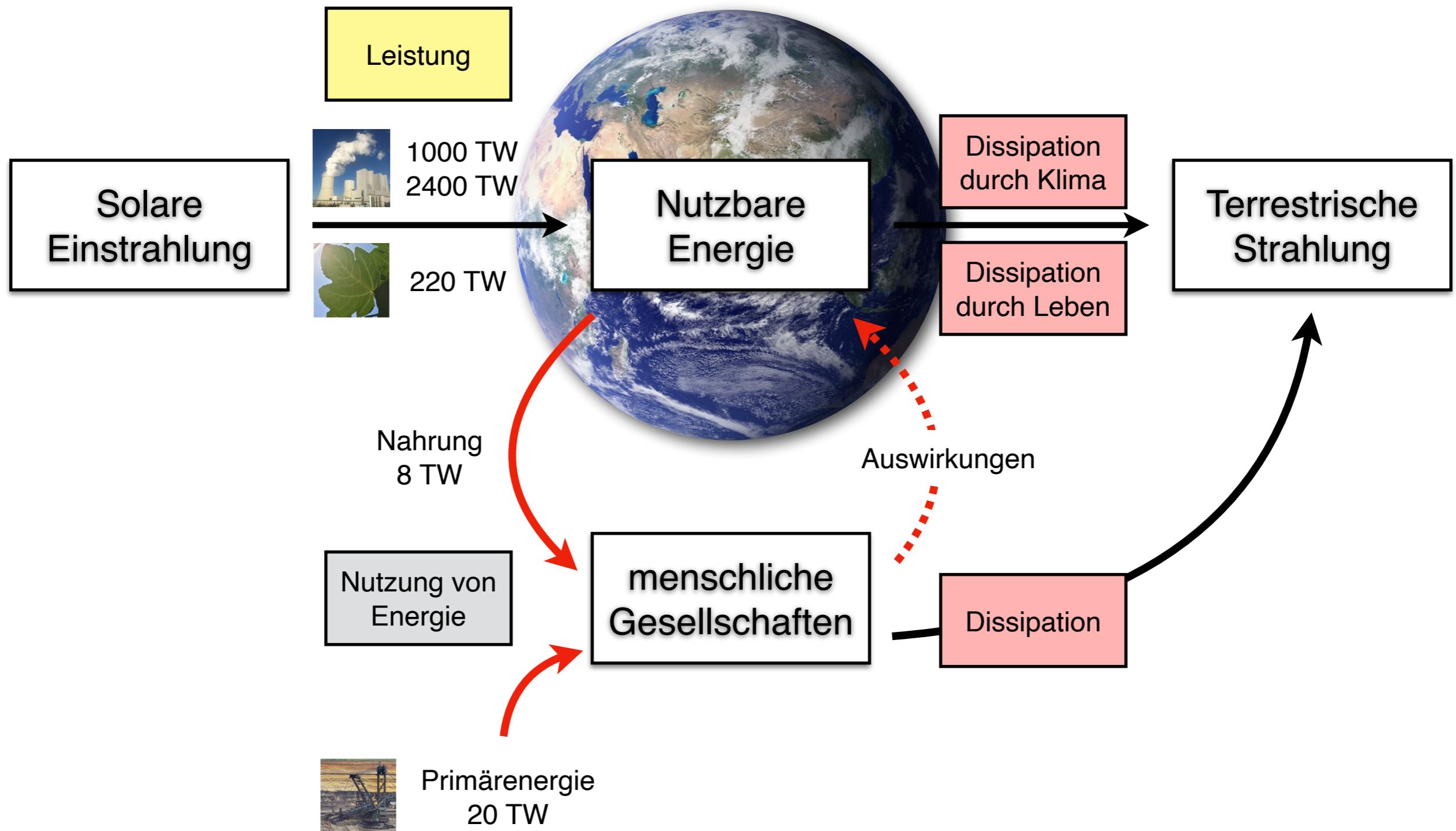
Im Laufe der Erdgeschichte wuchs das
Nichtgleichgewicht und Diversität des Lebens an.
Und wahrscheinlich zu mehr Leistung.

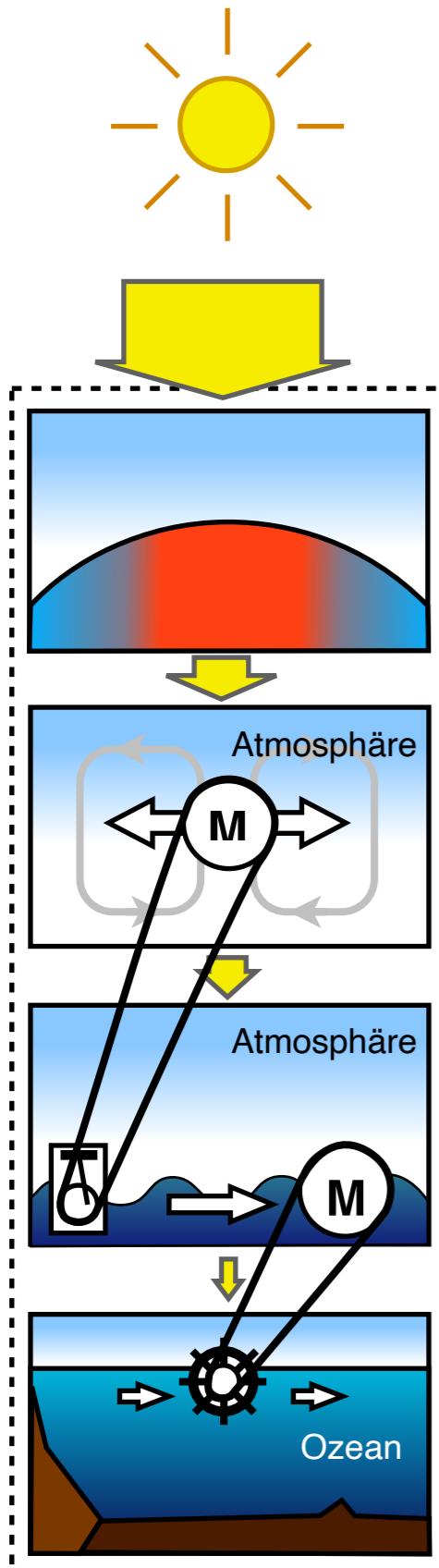


Leben an der Grenze

- Photosynthese: photochemische Nutzung von Sonnenlicht
- Theoretisch hoch effizient, praktisch limitiert durch Stoffaustausch
- biotische Effekte können Grenzen anheben

Rolle der Menschheit?





Strahlung

$\approx 175000 \text{ TW}$

\rightarrow Solarenergie

Thermalisierung
Einstrahlungsunterschiede

Wärme

$\approx 49000 \text{ TW}$



atmosphärisches
Kraftwerk

Bewegung

$\approx 1000 \text{ TW}$

\rightarrow Windenergie

Übertrag durch
Reibung

Wellen

$\approx 65 \text{ TW}$

\rightarrow Wellenenergie

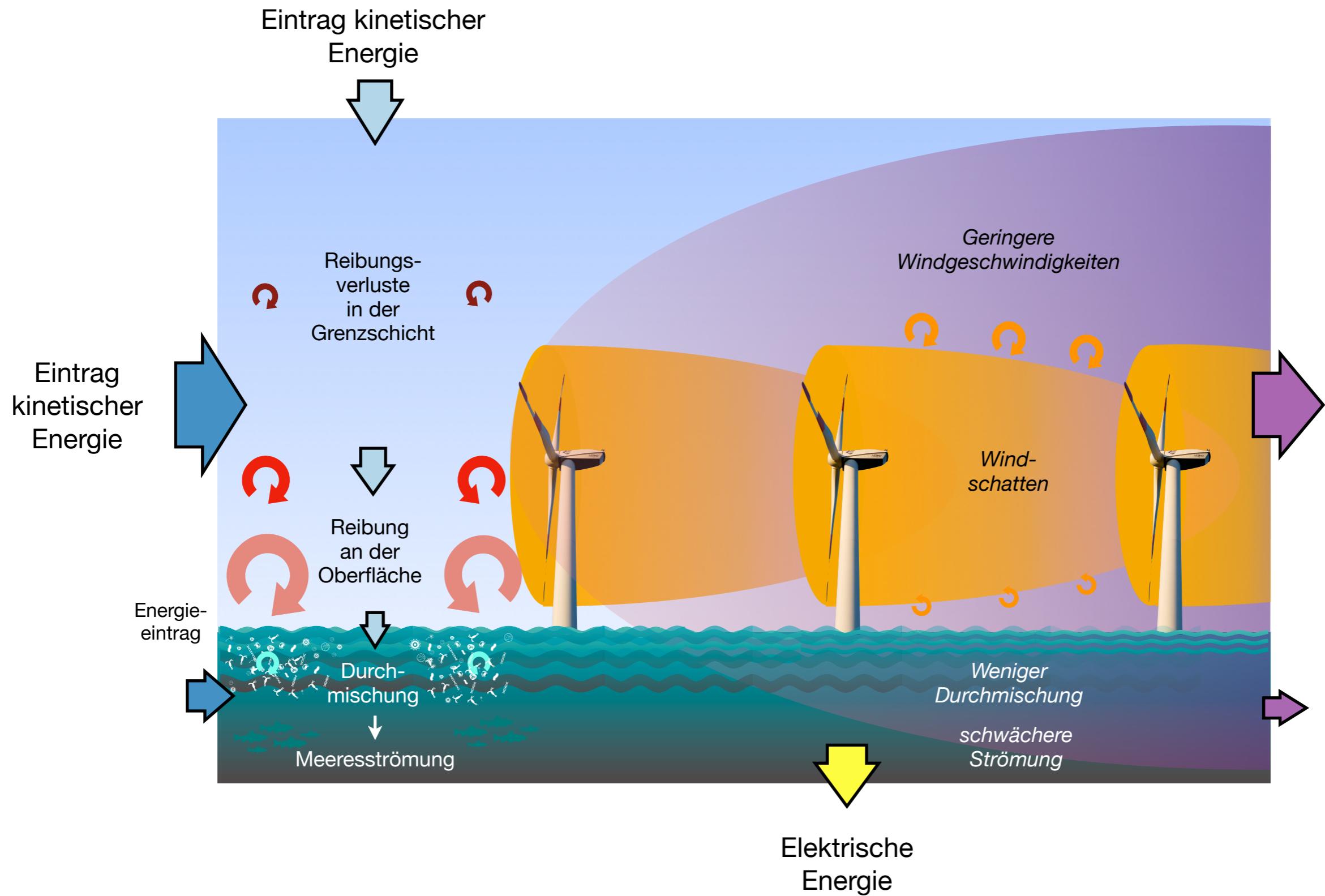
Meeresströmungen

$\approx 5 \text{ TW}$

\rightarrow Meeresenergie

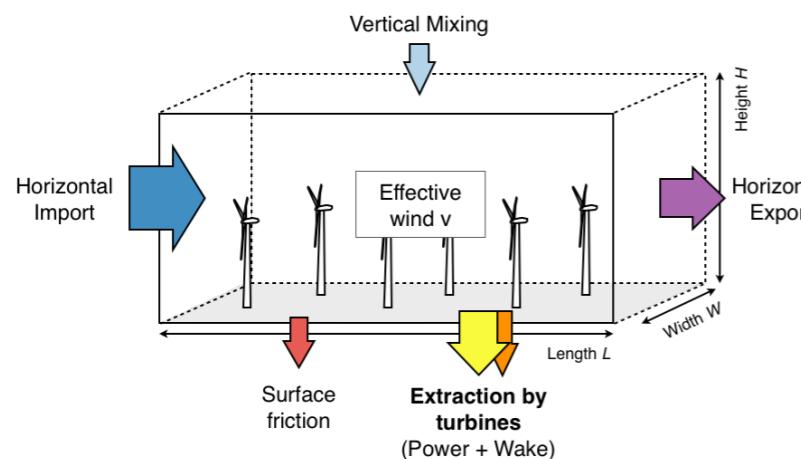
Geothermie $\approx 50 \text{ TW}$
Gezeiten $\approx 5 \text{ TW}$

Primärenergieverbrauch
 $\approx 20 \text{ TW}$

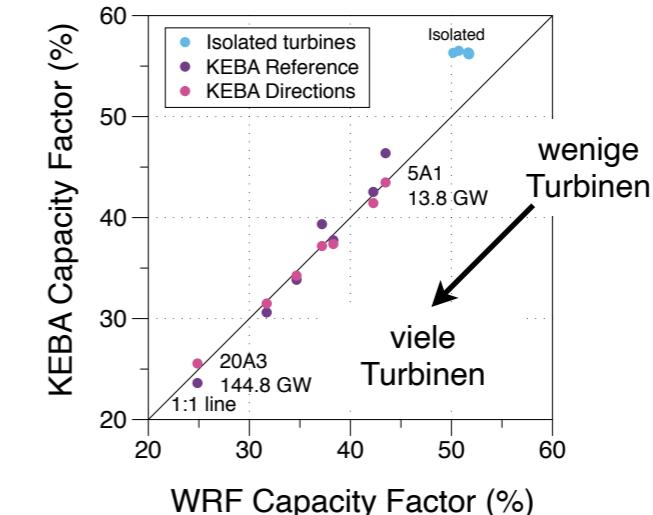


Deutsche Bucht: 70 GW Windenergie bis 2050

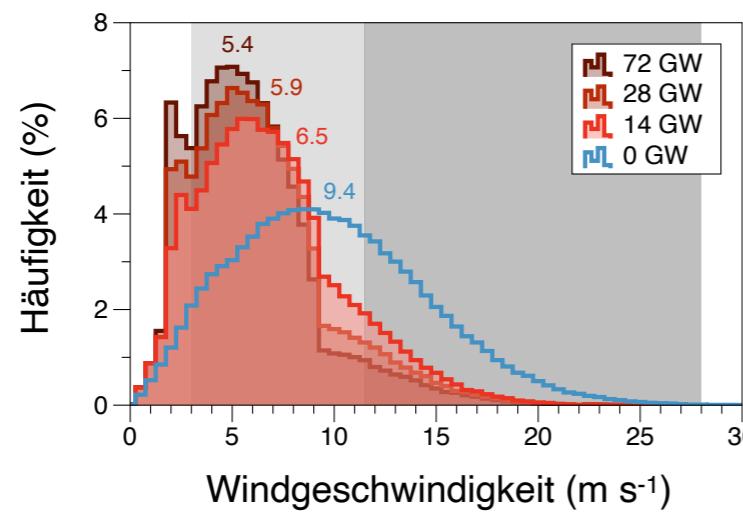
Ansatz: kinetische Energie budgetieren!



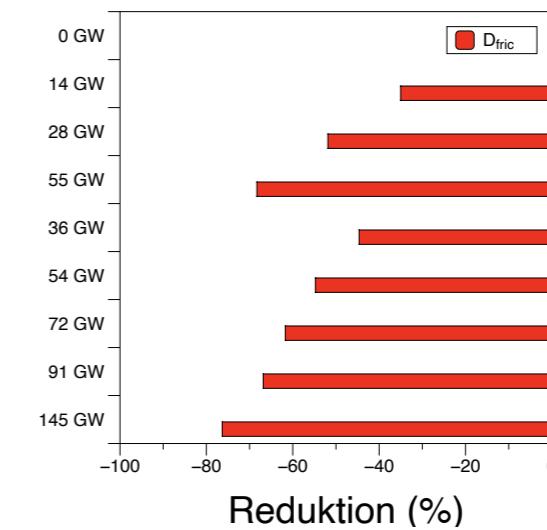
Mehr Turbinen → weniger Effizienz!



Mehr Turbinen → weniger Wind!



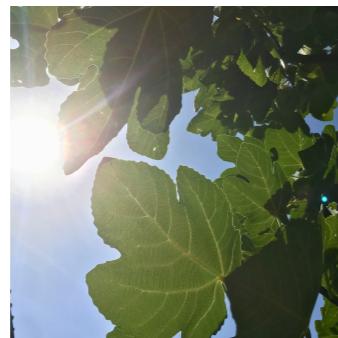
Weniger Wind → weniger Ozeaneintrag!



“Empowering the Planet”

Natur

Energie erzeugen



Effizienz:
< 3%

Photosynthese

Frischwasser erzeugen



Verdampfung

Energiekosten:
2500 kJ/kg H₂O

Technologie



Photovoltaik

Effizienz:
20%
und mehr



Entsalzung

Energiekosten:
6.5 kJ/kg H₂O

Technologie kann
sehr viel effizienter
sein als die Natur!

Typ I
Mond, Merkur



Typ II
Venus, Mars



Typ III
frühe Erde, Mars?



Typ IV
Erde



Typ V
zukünftige Erde?



Leistung durch:



“Kraftwerke” (Bewegung, Kreisläufe)



Photosynthese (Leben)



Photovoltaik (Menschheit)



mehr Leistung
mehr Dissipation

Kraftwerk Erde

Wie der belebte Planet Energie umwandelt

- Planetarer Blick auf Entropie, Arbeit und Leistung
- Klima an der Leistungsgrenze: macht Klima & Klimawandel einfach berechenbar und erklärbar
- Leben an der Grenze: Produktivität begrenzt durch Transport, aber mit Optionen, die Grenzen zu erhöhen
- Menschheit und Nachhaltigkeit: notwendiger Wandel vom Verbraucher zum Erzeuger von nutzbarer Energie