

Kraftwerk Erde

Wie der belebte Planet Energie umwandelt

Planetarium Göttingen

7. November 2023

Axel Kleidon

Max-Planck-Institut für Biogeochemie

<http://gaia.mpg.de> ❖ earthsytem.org

Mond



Erwärmung = Kühlung

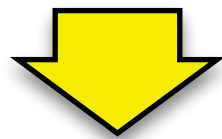
Erde



Erwärmung = Kühlung

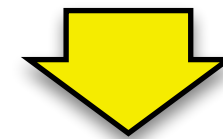
leistet Arbeit!

Kraftwerk



Nutzbare Energie
(Strom)

Erde



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

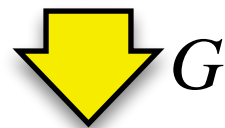


1. Hauptsatz: Energieerhaltung

$$J_{in} = J_{out} + G$$

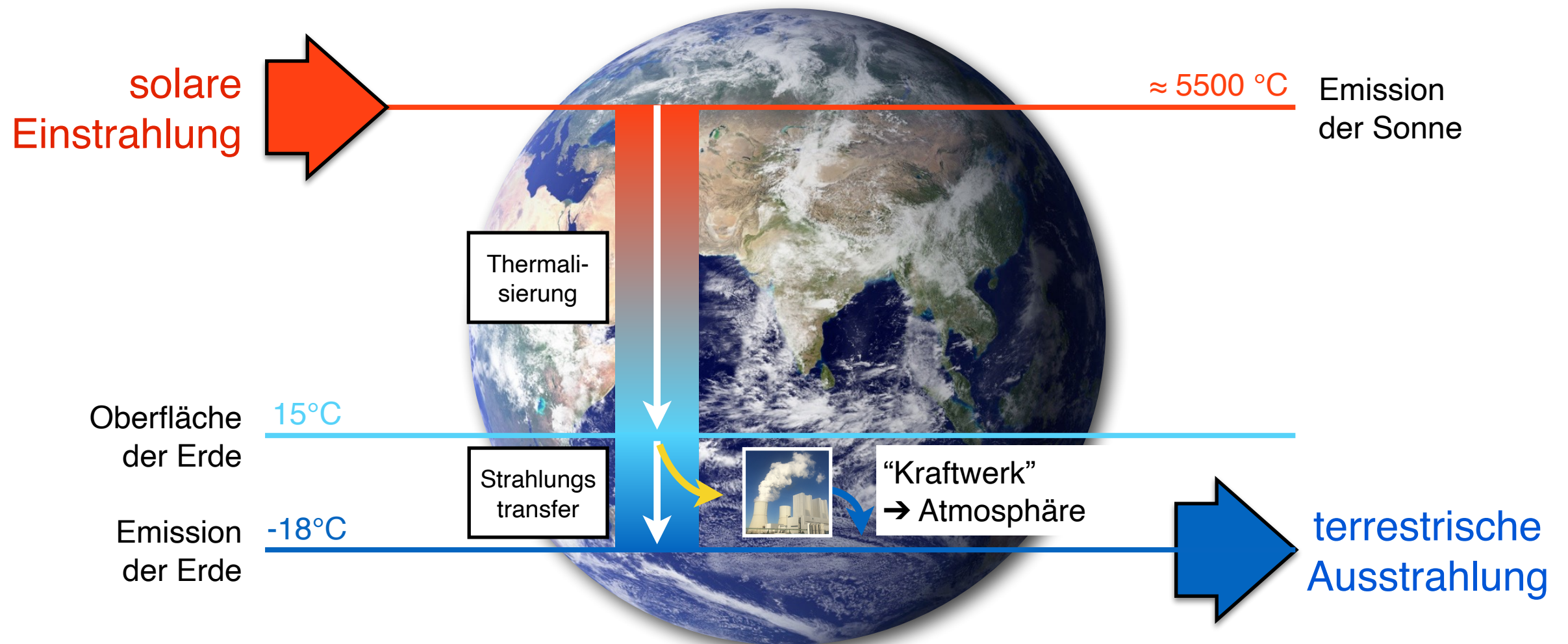
2. Hauptsatz: Zunahme der Entropie

$$\frac{J_{out}}{T_{out}} = \frac{J_{in}}{T_{in}} + \sigma$$



nutzbare Energie
(keine Entropie)

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



kurze Wellenlängen

Lange Wellenlängen

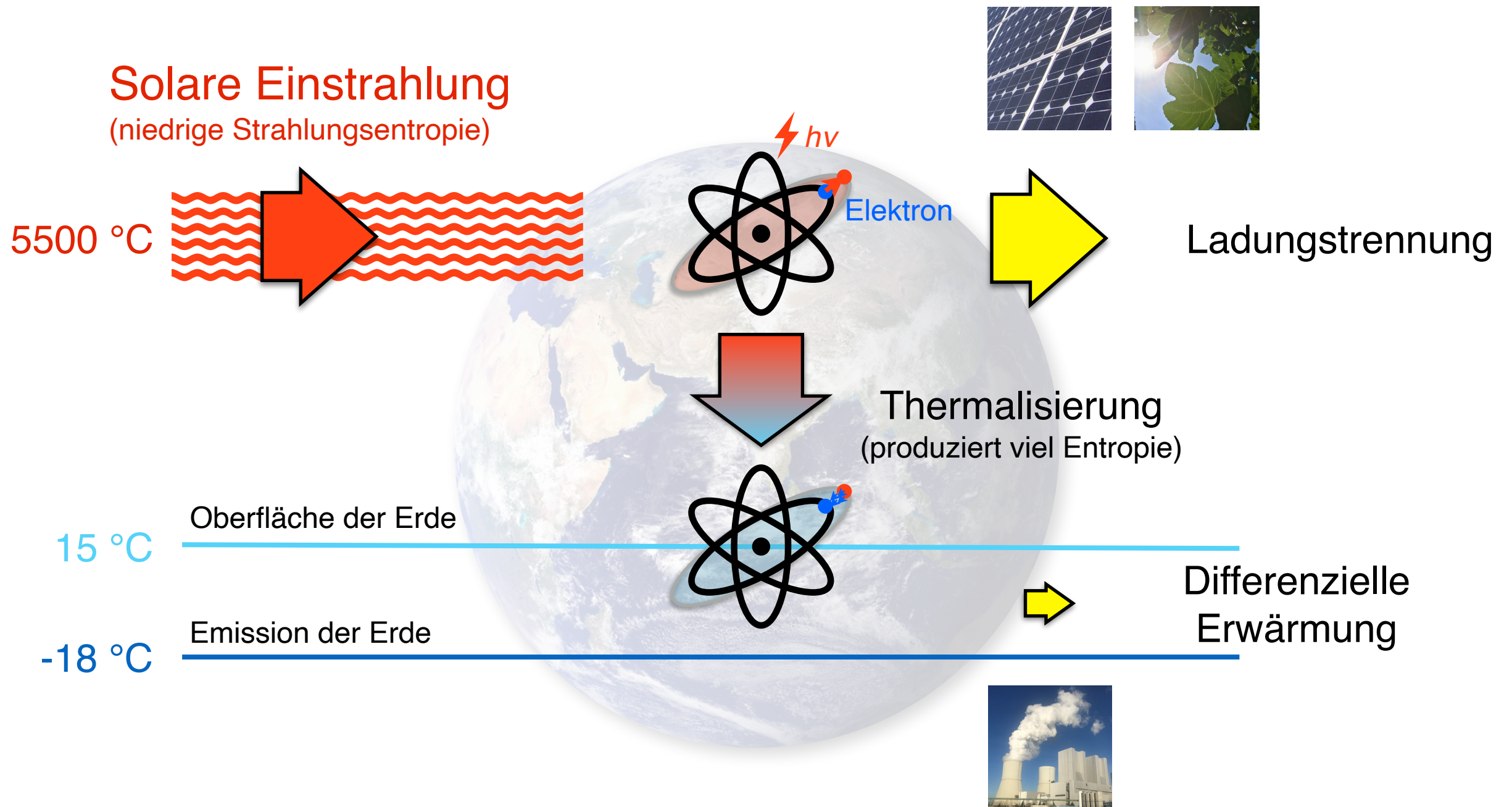
wenige energetische
Photonen

Viele schwachenergetische
Photonen

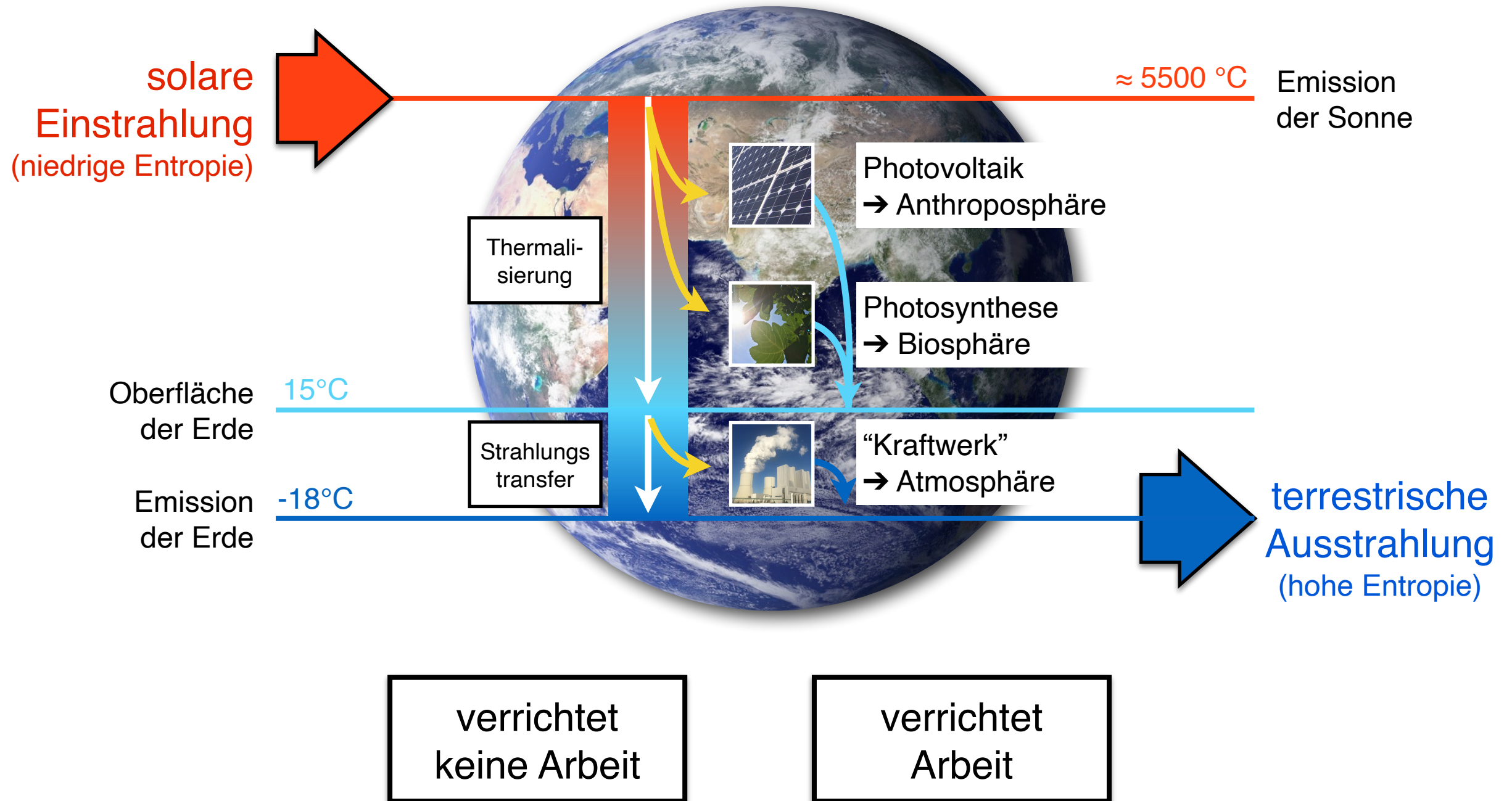
geringe
Strahlungsentropie

Entropie
produktion

hohe
Strahlungsentropie



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



The diagram illustrates the greenhouse effect using a landscape background. A large red arrow points from the sun in the top left towards the ground. A blue arrow points upwards from a box labeled 'Kühlung durch Emission' (-18°C) towards the sky. A white box containing an image of a power plant with cooling towers is surrounded by a white looped arrow. A red arrow points from the ground towards a box labeled 'Erwärmung durch Absorption' (15°C). The ground is a green field, and the sky is blue with some clouds.

Kühlung durch Emission

-18°C

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

15°C

Erwärmung durch Absorption

planetare
Energiebilanz

Gesamt-
absorption

Ausstrahlung
ins Weltall

$$R_{s,tot} = R_{l,toa} = \sigma T_r^4$$

-18°C

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



J

Oberflächen-
energiebilanz

15°C

R_s

+

$R_{l,d}$

=

σT_s^4

+

$H + LE$

Absorption
Solarstrahlung

Atmosphärische
Gegenstrahlung

Ausstrahlung der
Erdoberfläche

Wärmetransport
durch Auftrieb
und Verdunstung

Strahlungstemperatur

-18°C

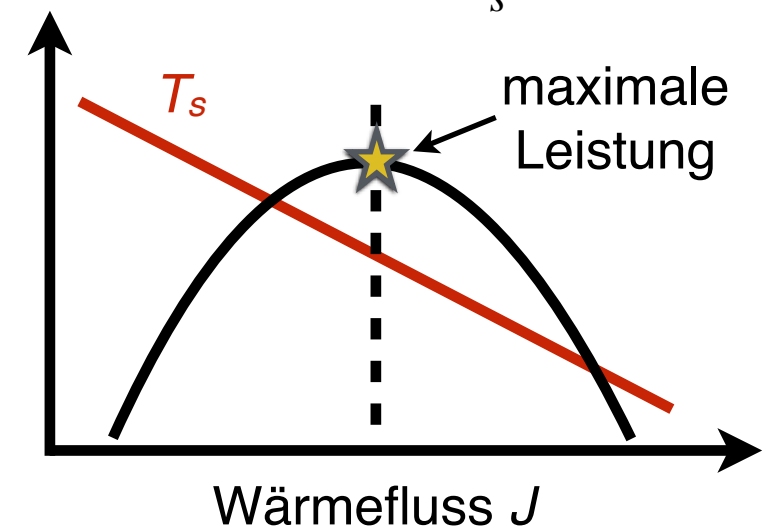


J

Oberflächentemperatur

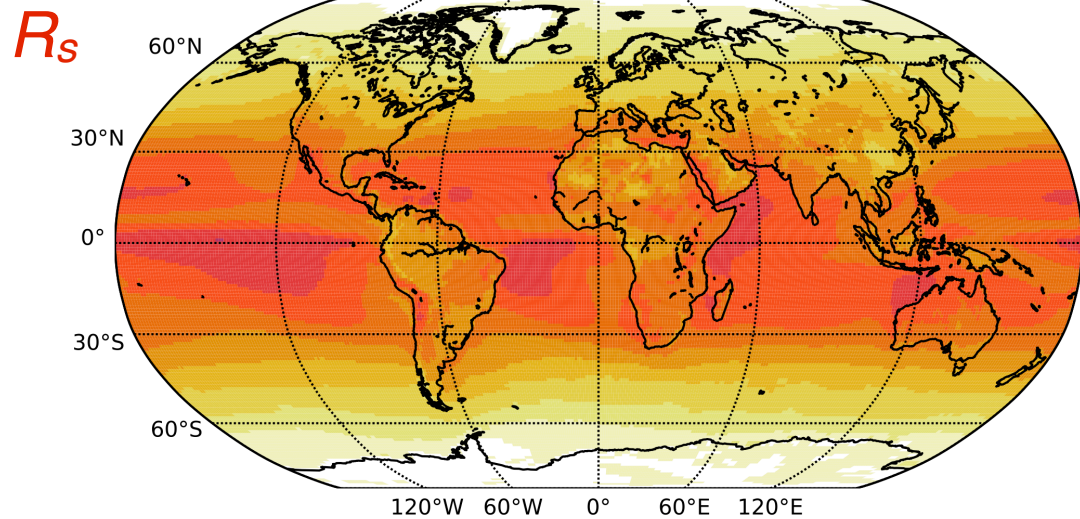
15°C

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

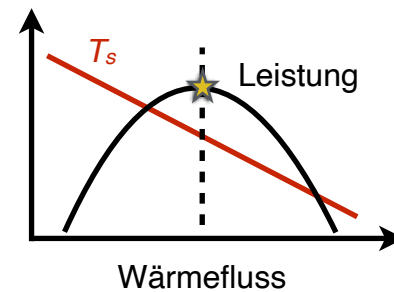
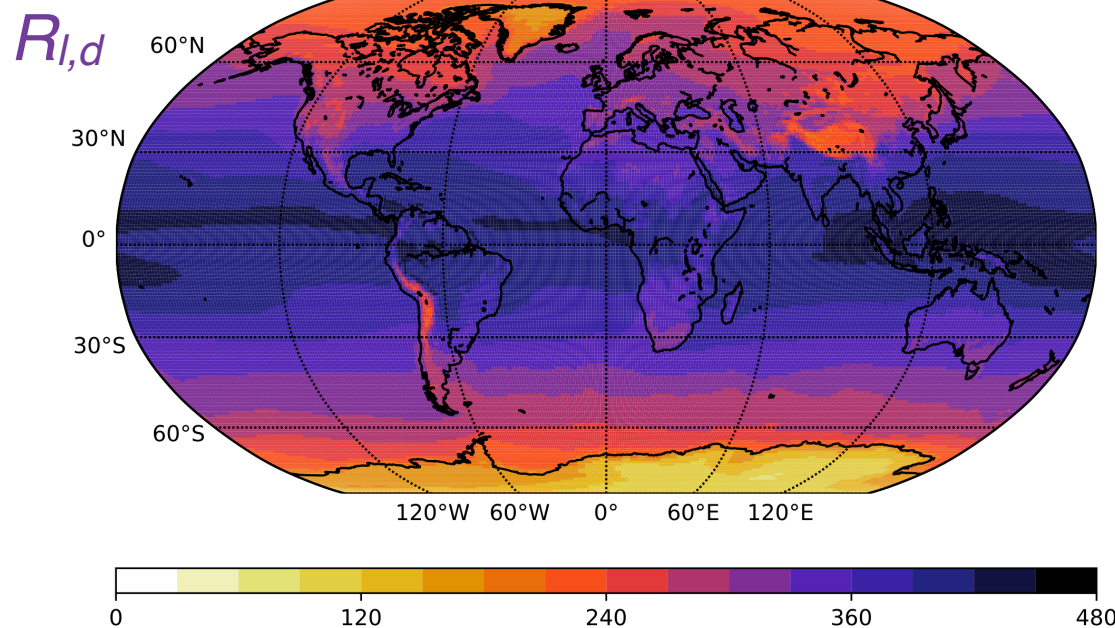


Erwärmung der Oberfläche durch Strahlung

Solar (W m^{-2})



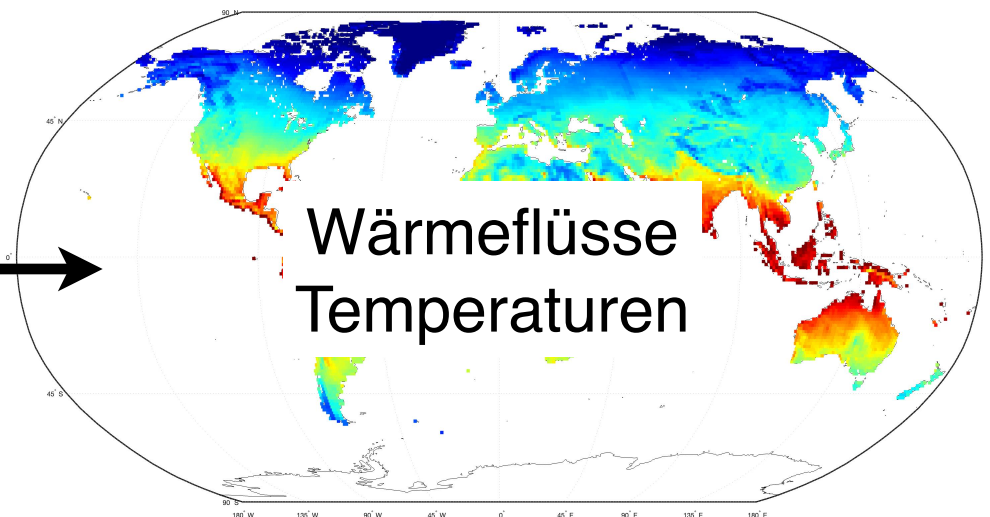
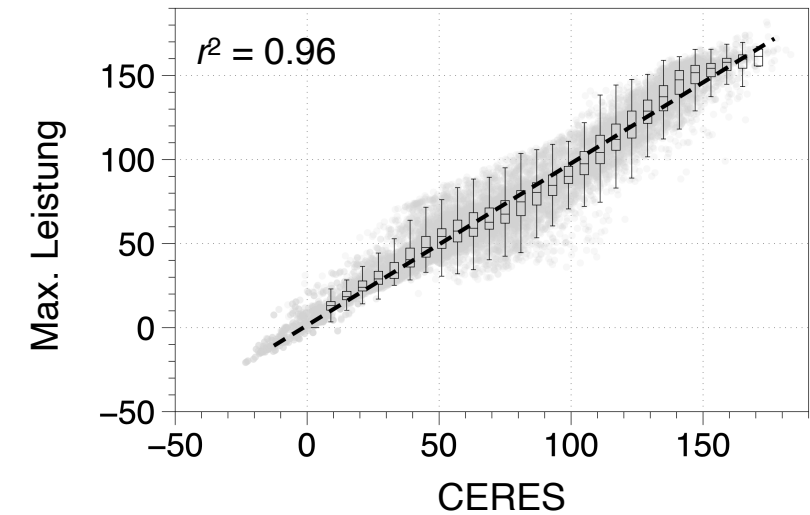
atmosphärische Gegenstrahlung (W m^{-2})



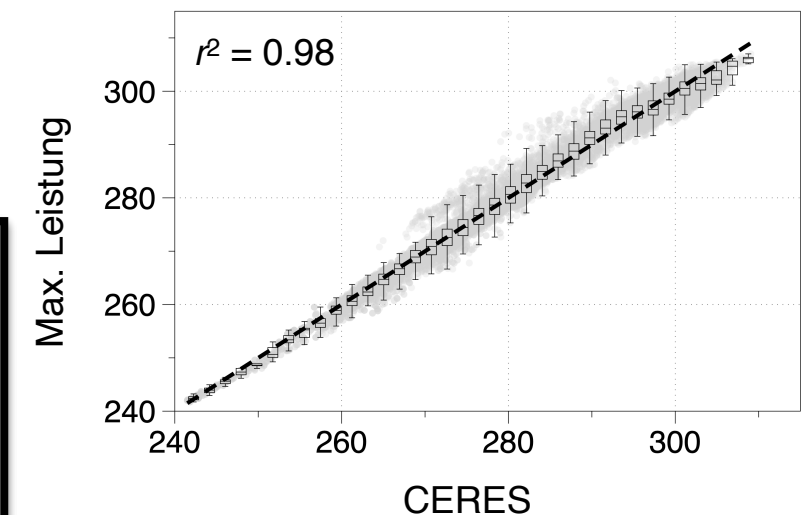
maximale Leistung

Atmosphäre arbeitet so hart wie sie kann!

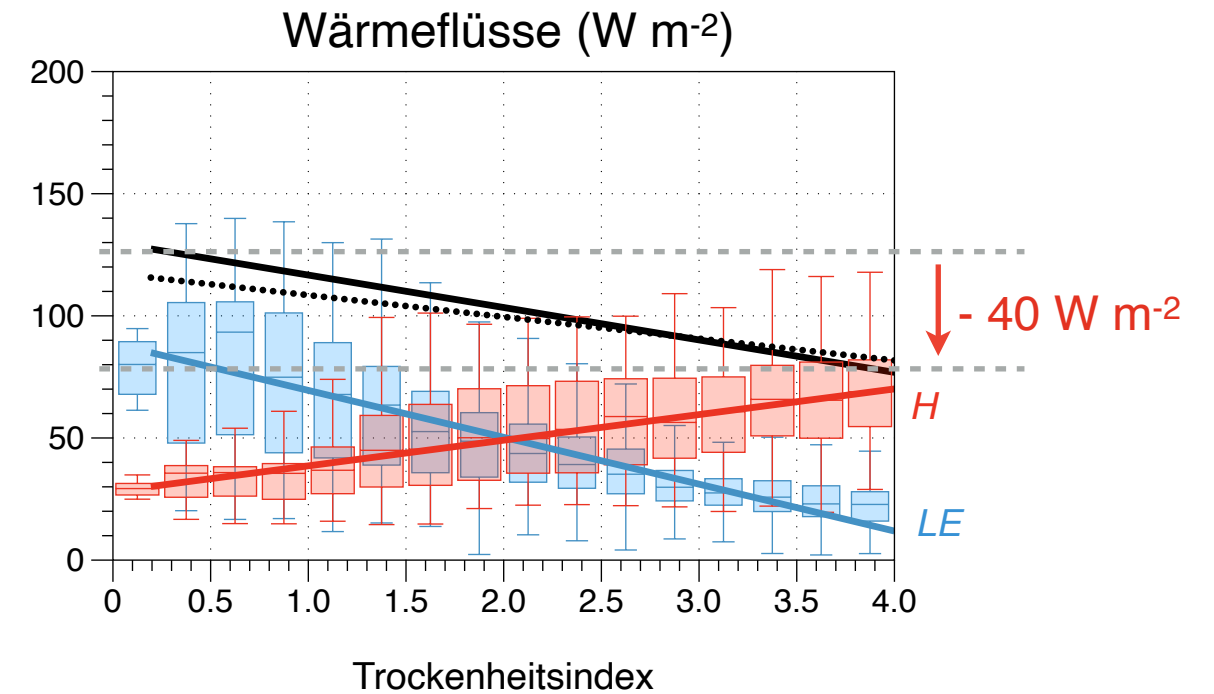
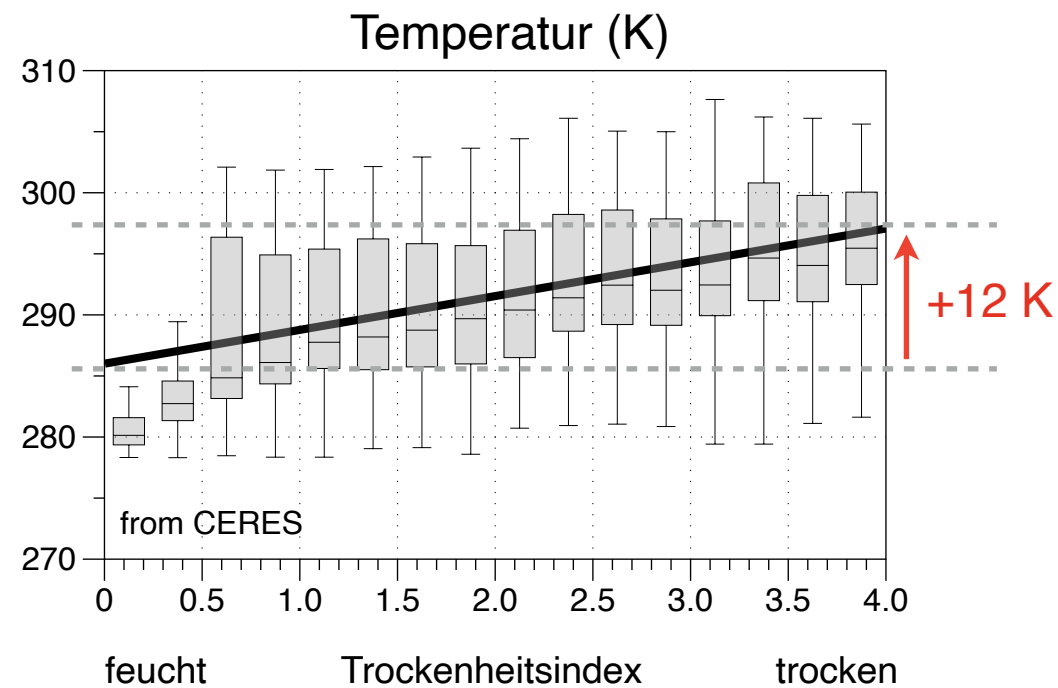
Wärmeflüsse (W m^{-2})



Temperatur (K)



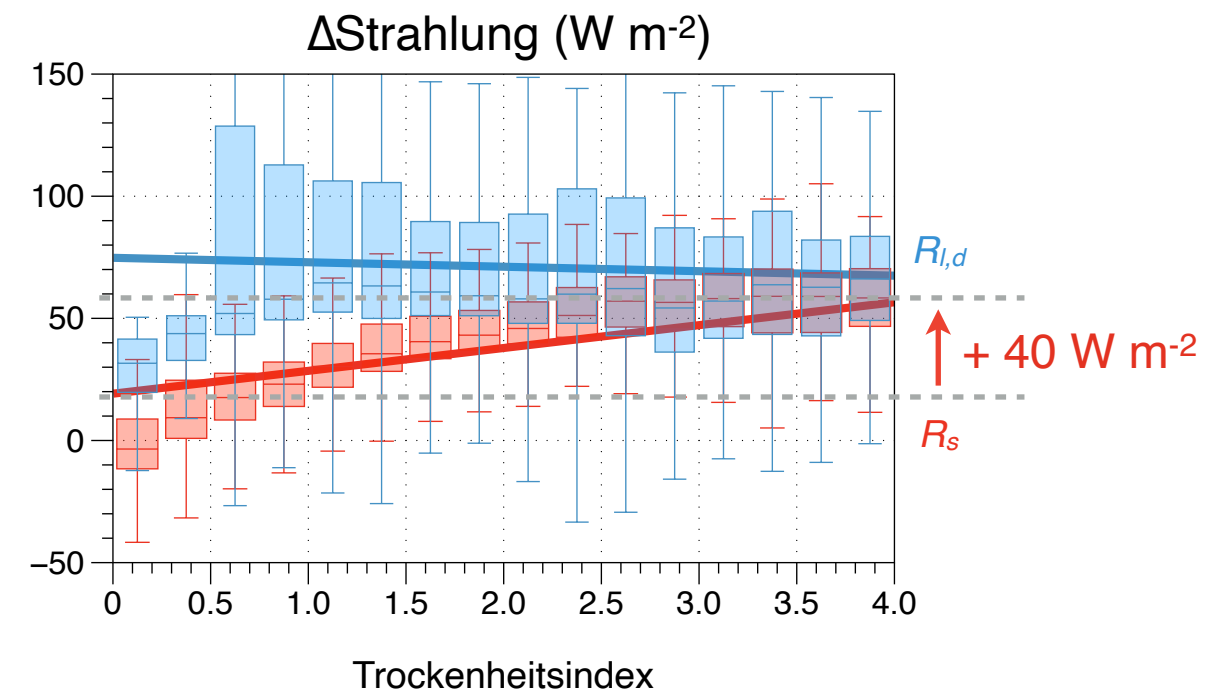
Warum sind Wüsten wärmer?



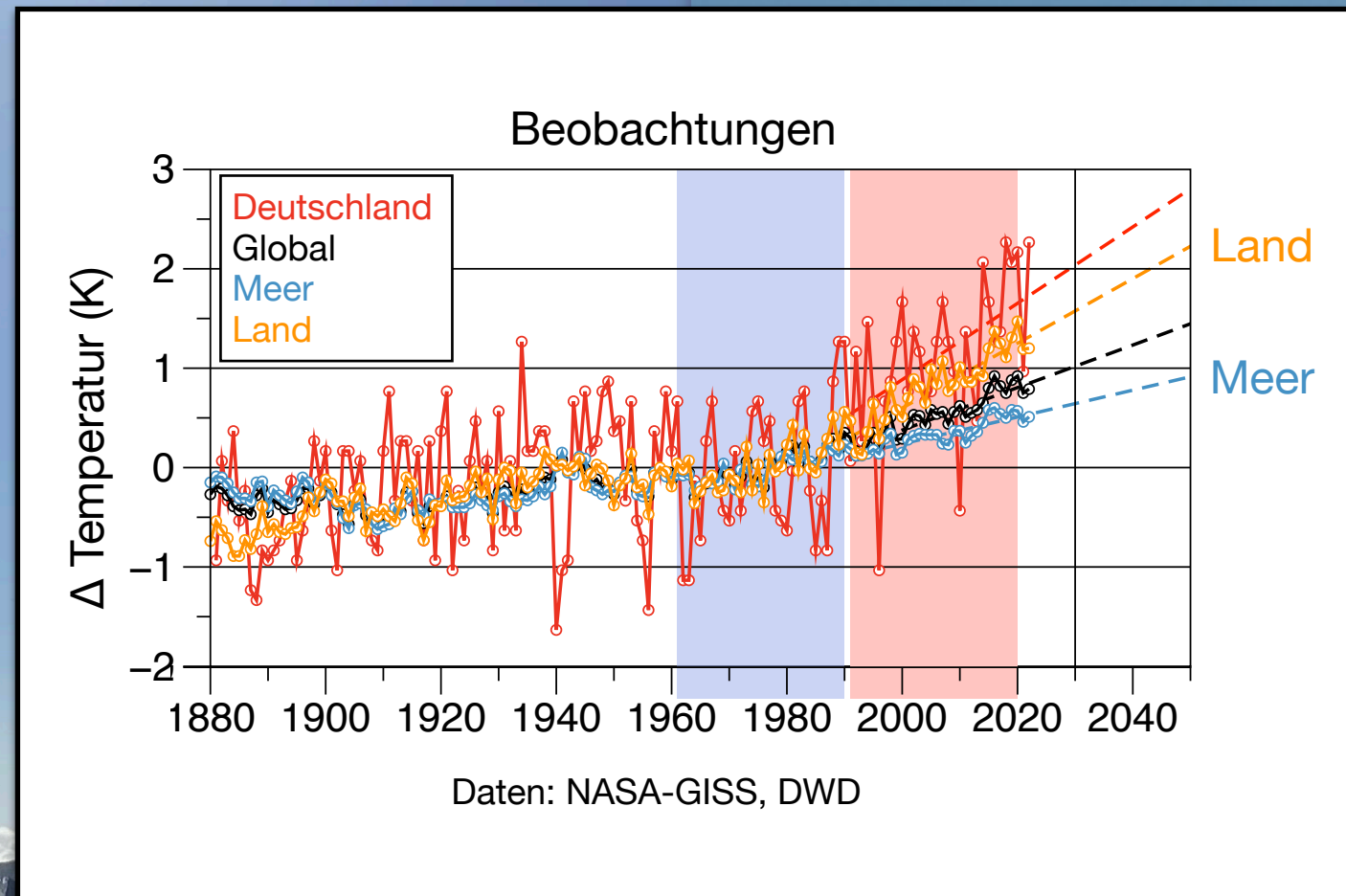
$$\Delta T_s = \frac{\Delta R_s + \Delta R_{l,d} - \Delta LE - \Delta H}{4\sigma T_{s,0}^3}$$

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

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



Warum erwärmt sich Land stärker als das Meer?

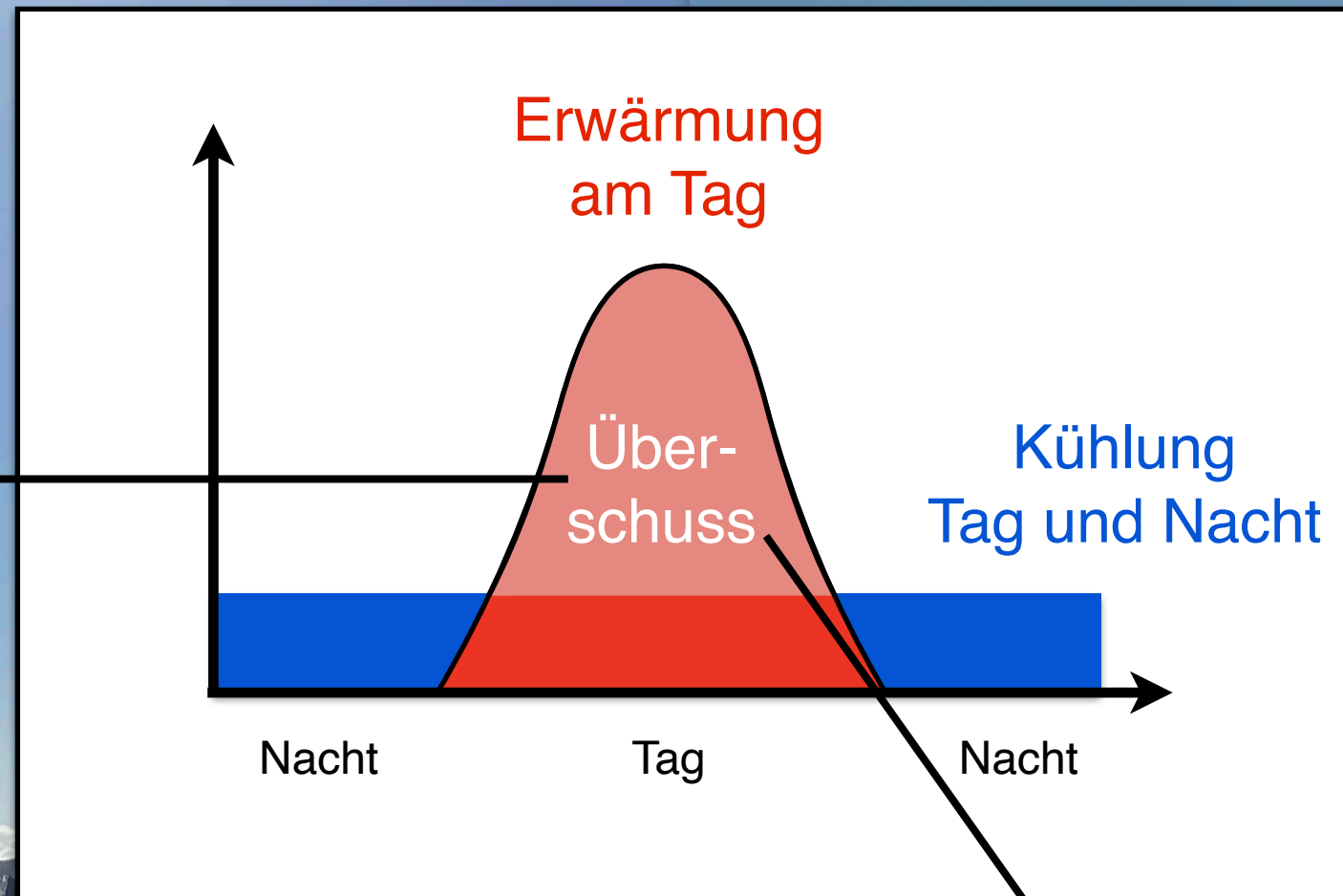


Land

Meer

Warum erwärmt sich Land stärker als das Meer?

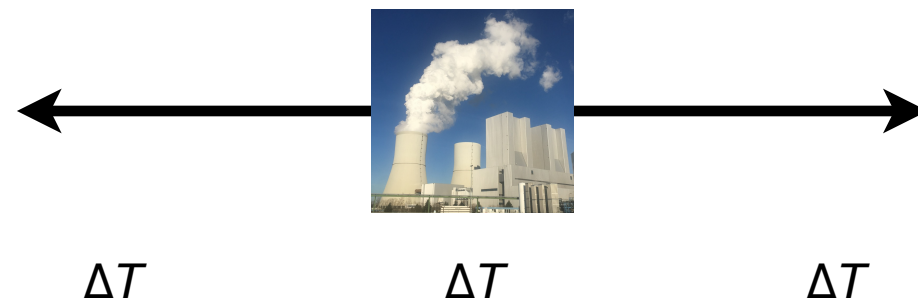
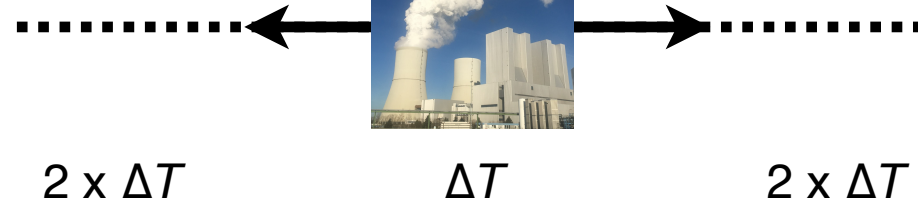
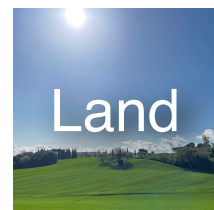
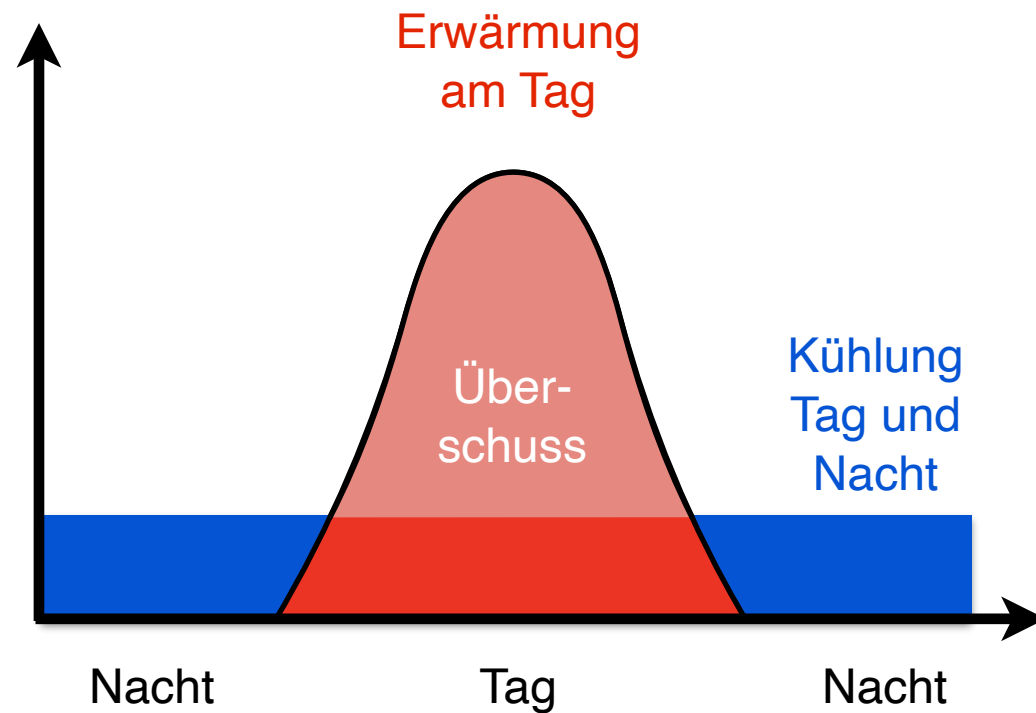
Änderungen der
Wärmespeicherung
über der Oberfläche



Änderungen der
Wärmespeicherung
unter der Oberfläche

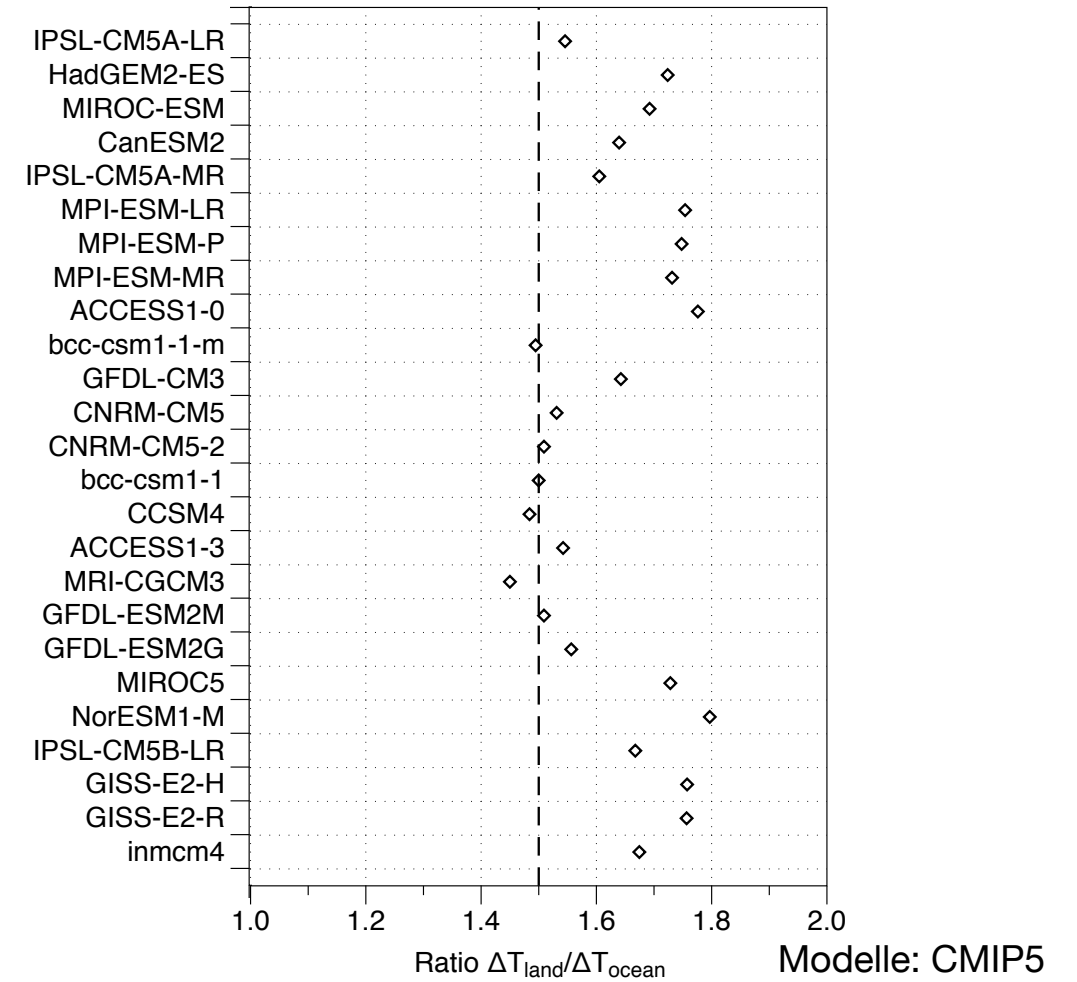
Land

Meer




$$\overline{\Delta T_{Land}} \approx 1.5 \cdot \overline{\Delta T_{Meer}}$$

Klimamodellszenarien



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

A foggy landscape with a body of water in the foreground. In the background, there is a line of trees and a small building partially visible on the left. The scene is misty and atmospheric.

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

Wärmeabgabe
bei Kondensation

Atmosphäre

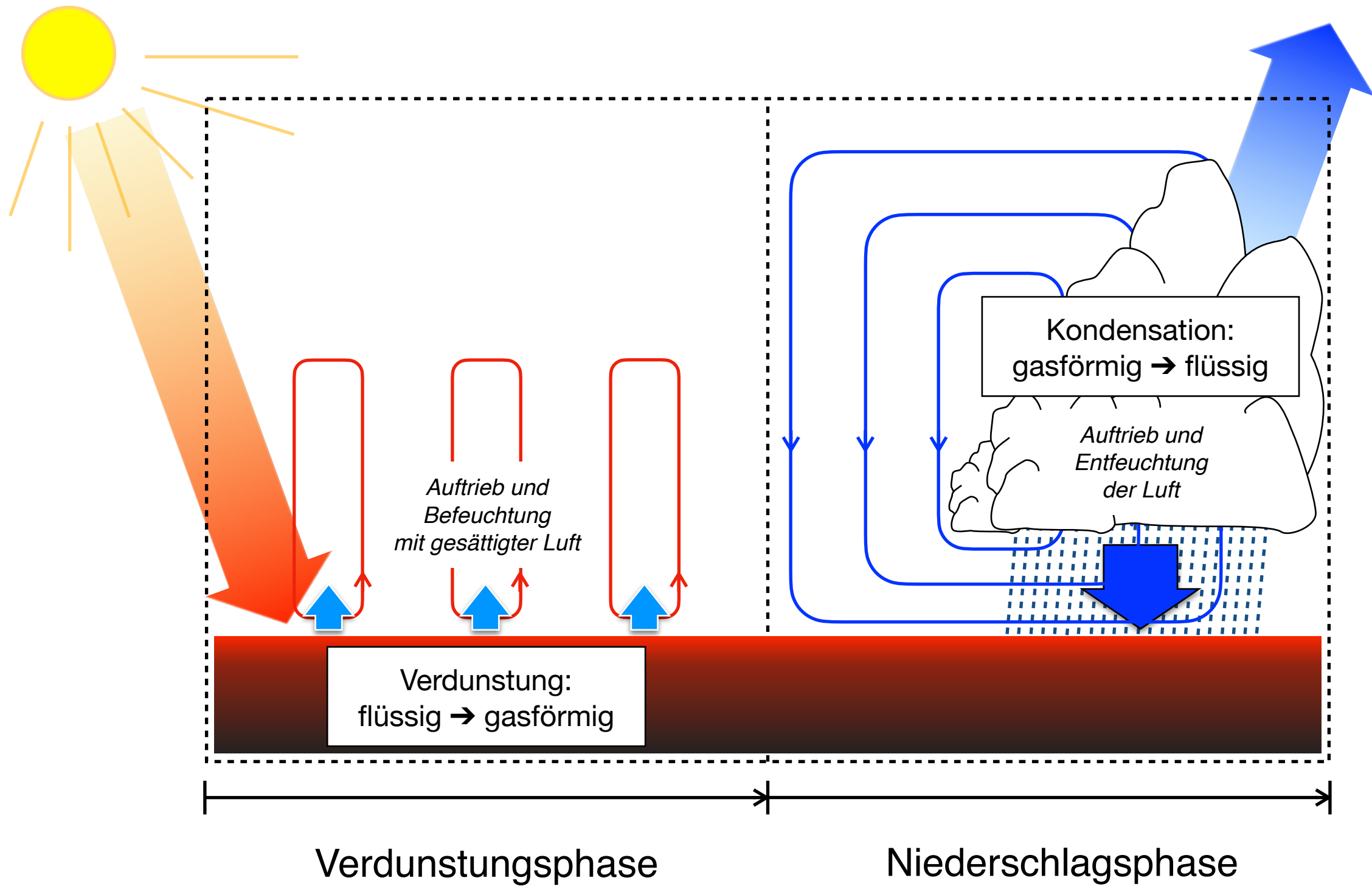
Kondensation: Gas \rightarrow Flüssig



Oberfläche

Verdunstung: Flüssig \rightarrow Gas

Wärmeaufnahme
bei Verdunstung



Absorbierte
Solarstrahlung

maximale
Leistung



turbulente
Wärmeflüsse

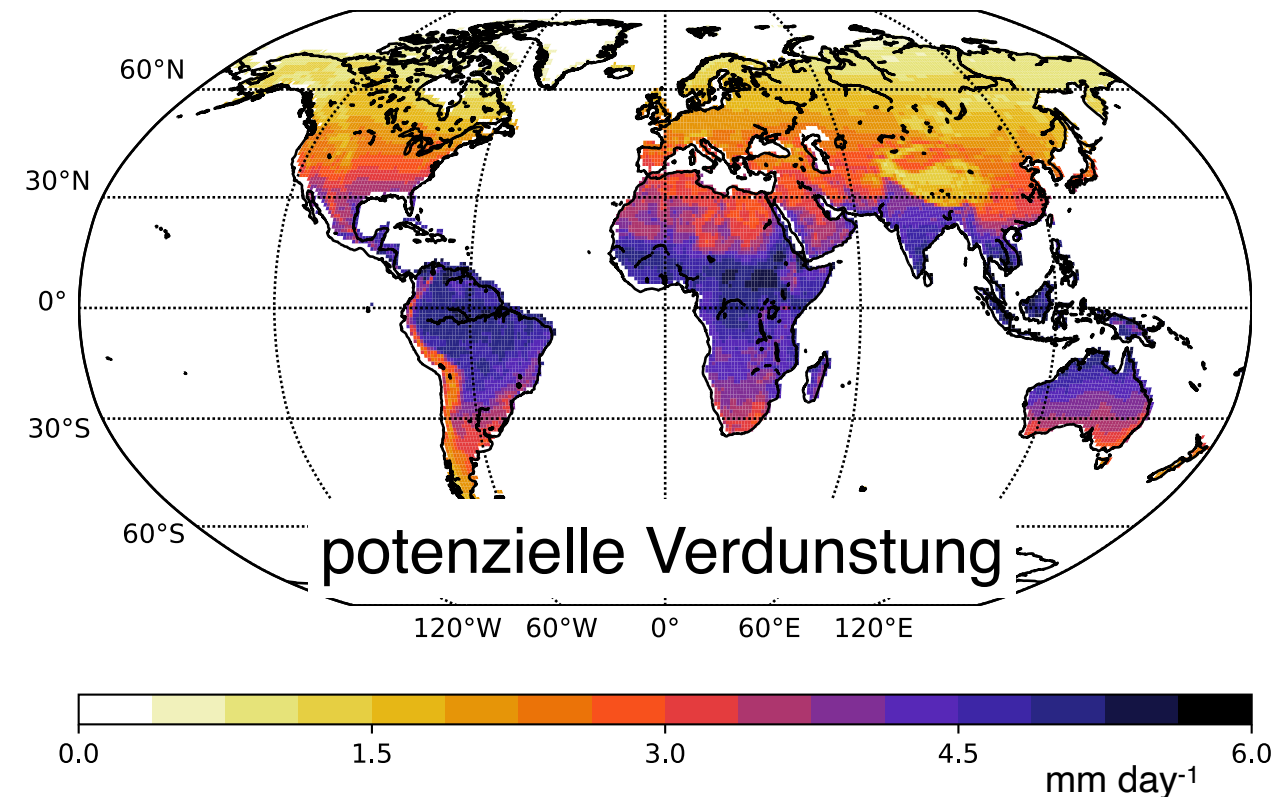
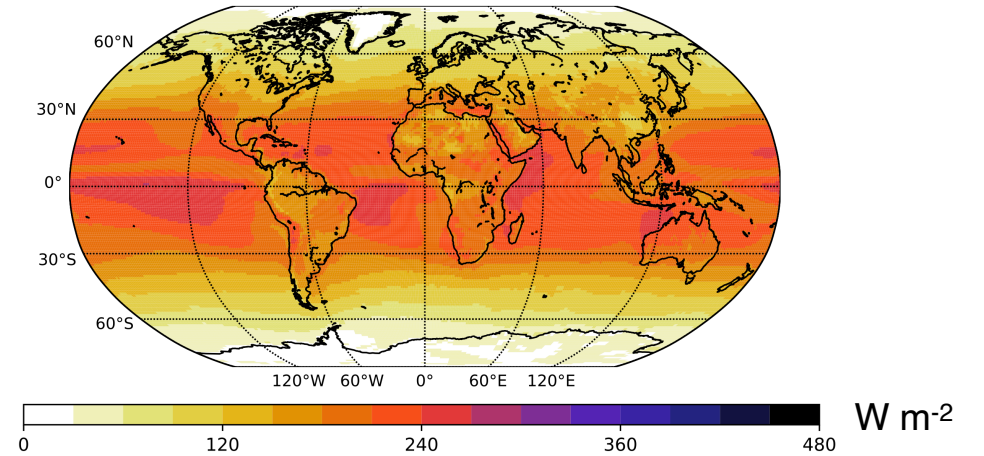
thermo-
dynamisches
Gleichgewicht

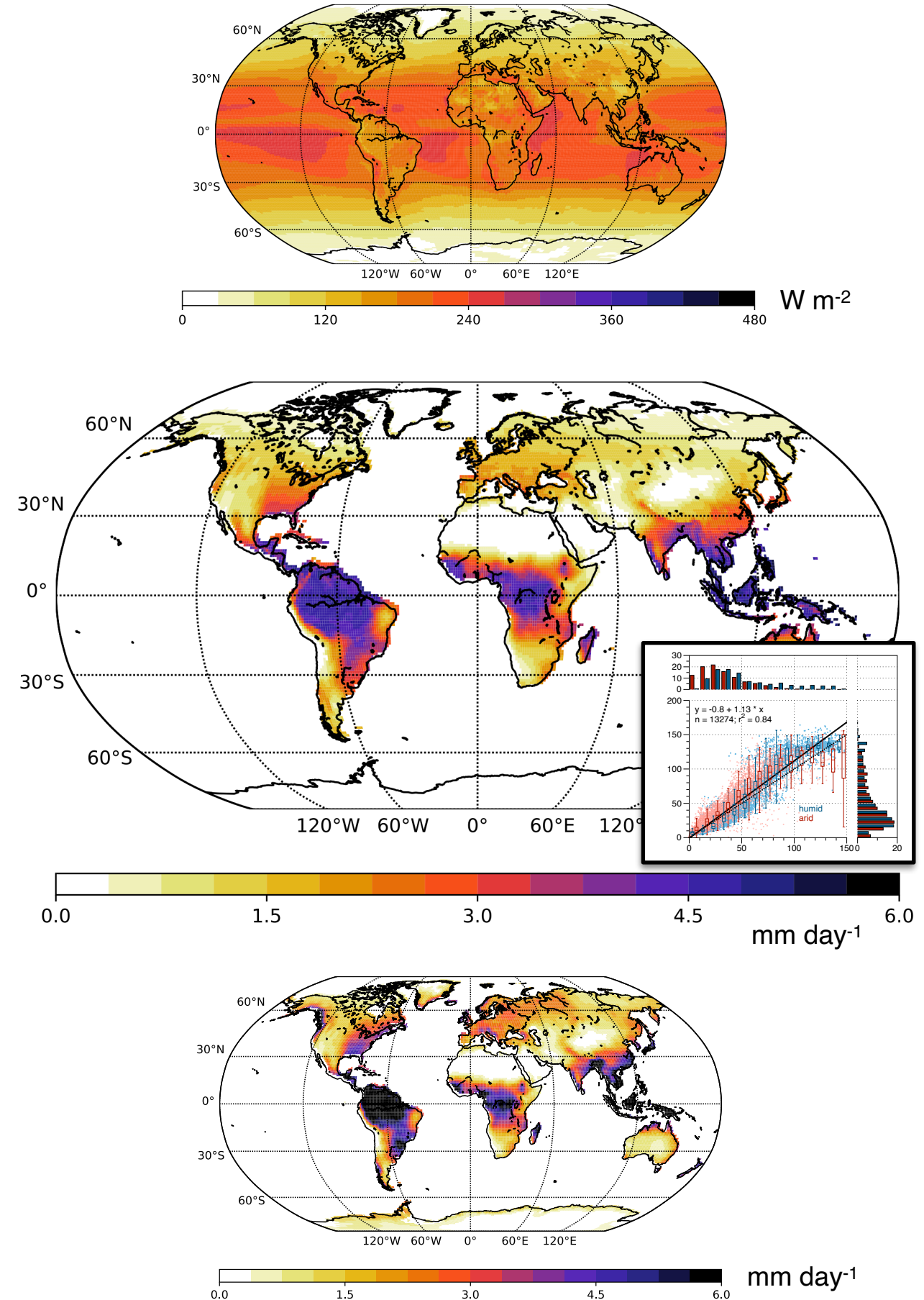
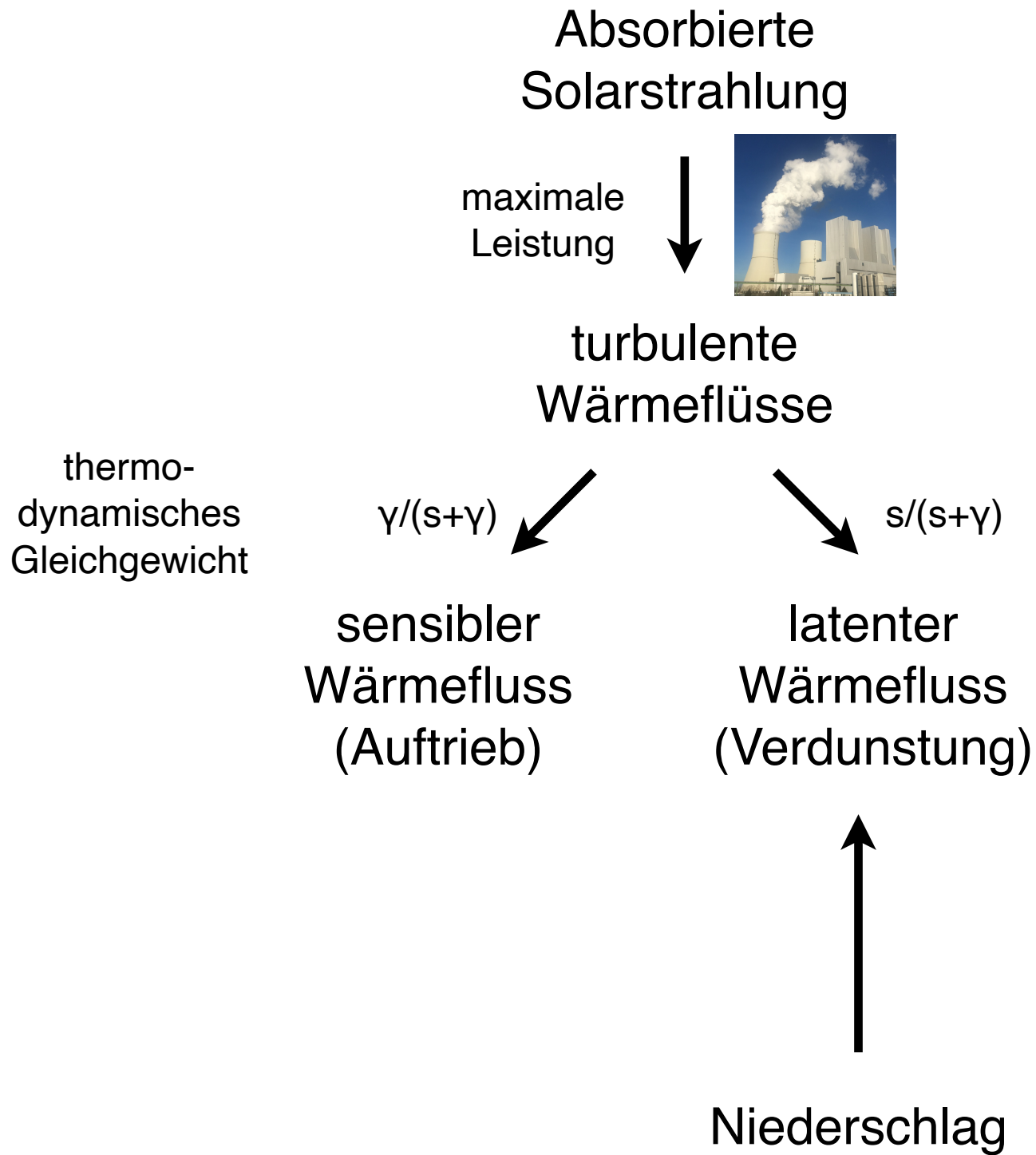
$$\gamma/(s+\gamma)$$

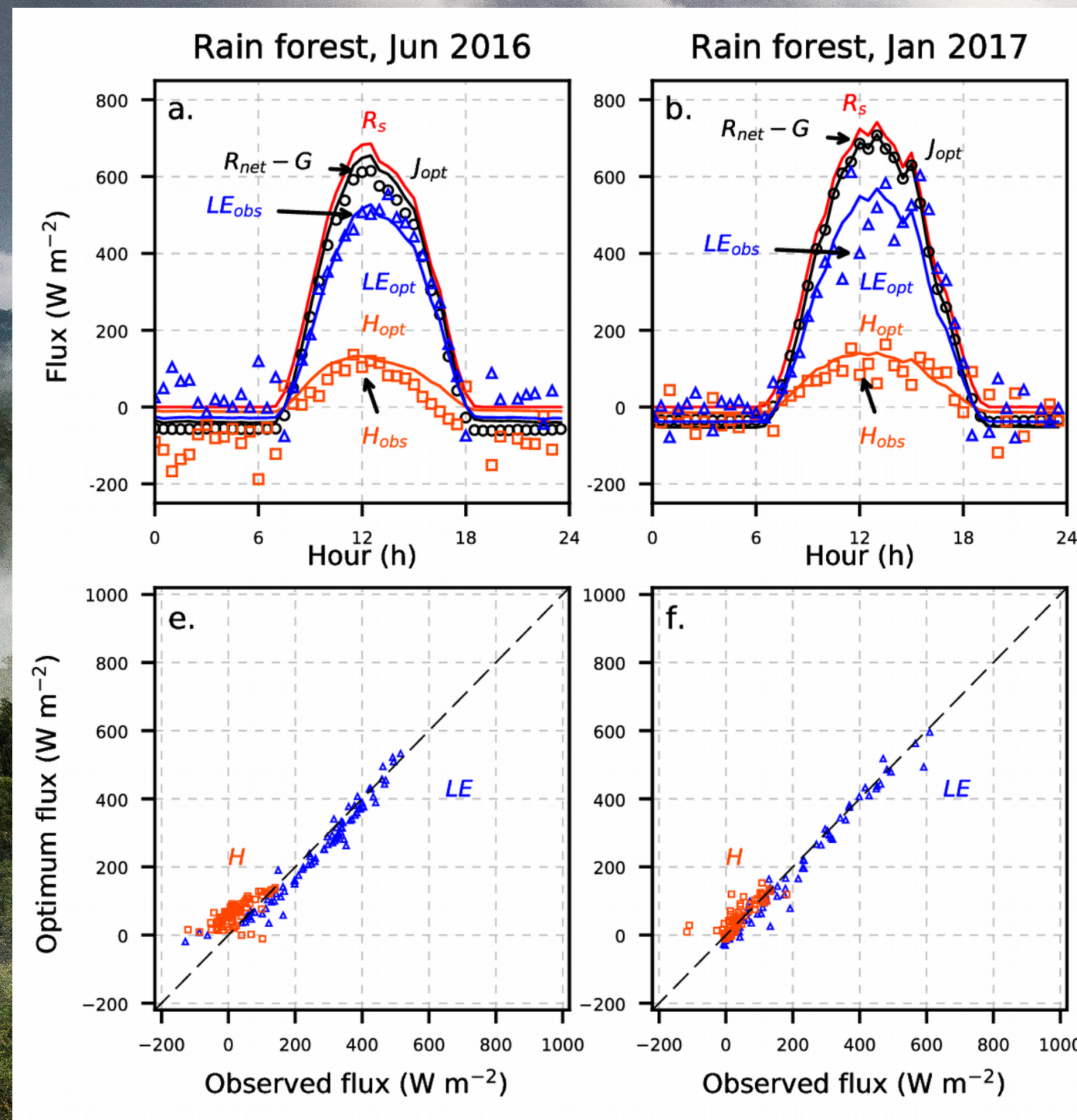
sensibler
Wärmefluss
(Auftrieb)

$$s/(s+\gamma)$$

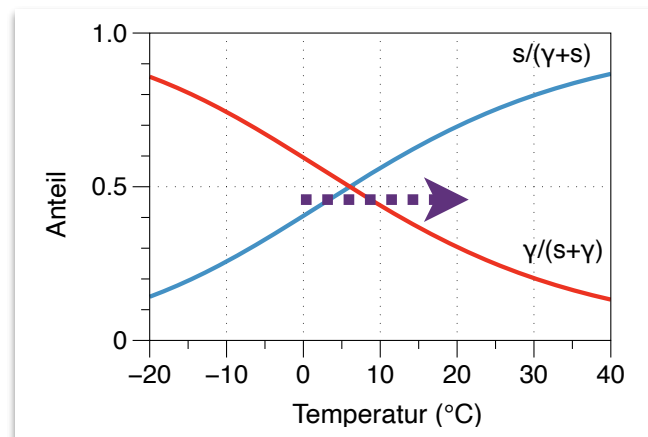
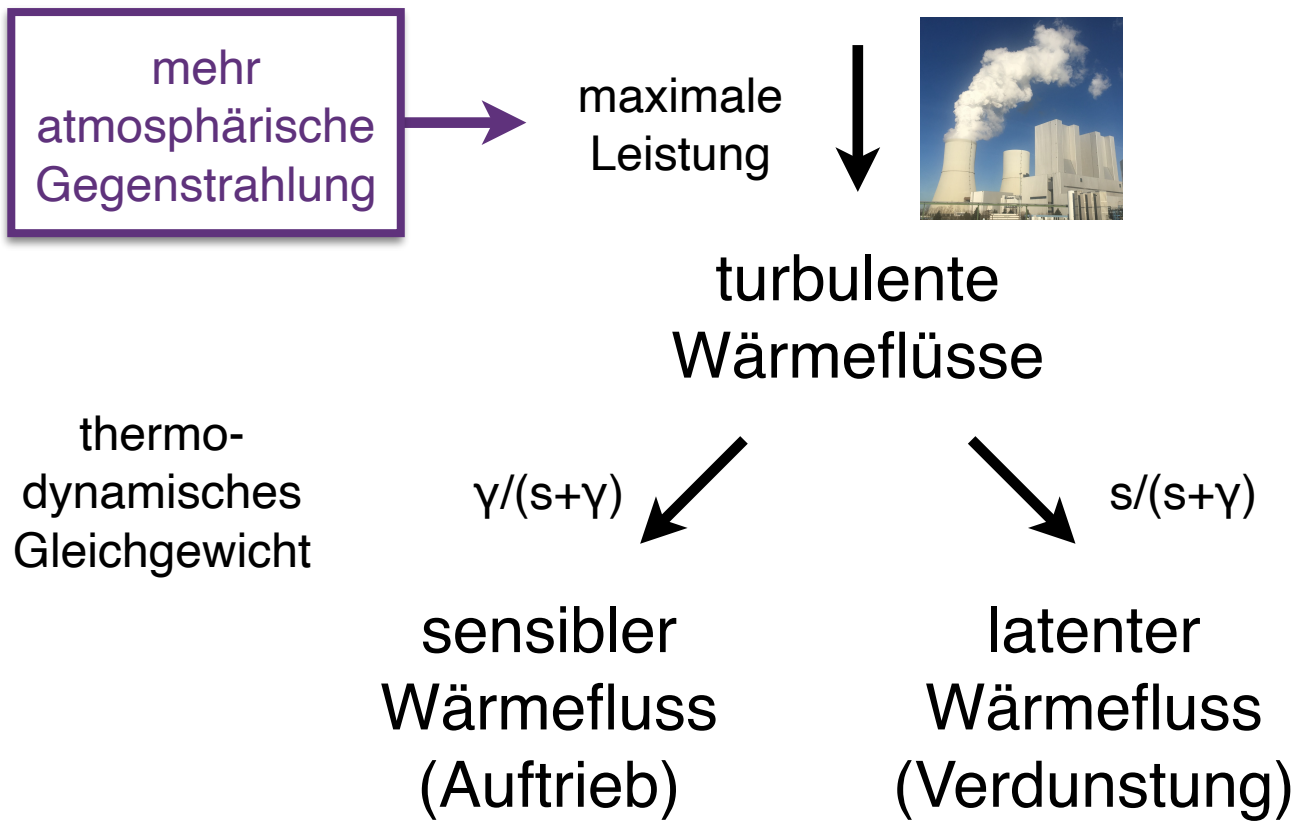
latenter
Wärmefluss
(Verdunstung)



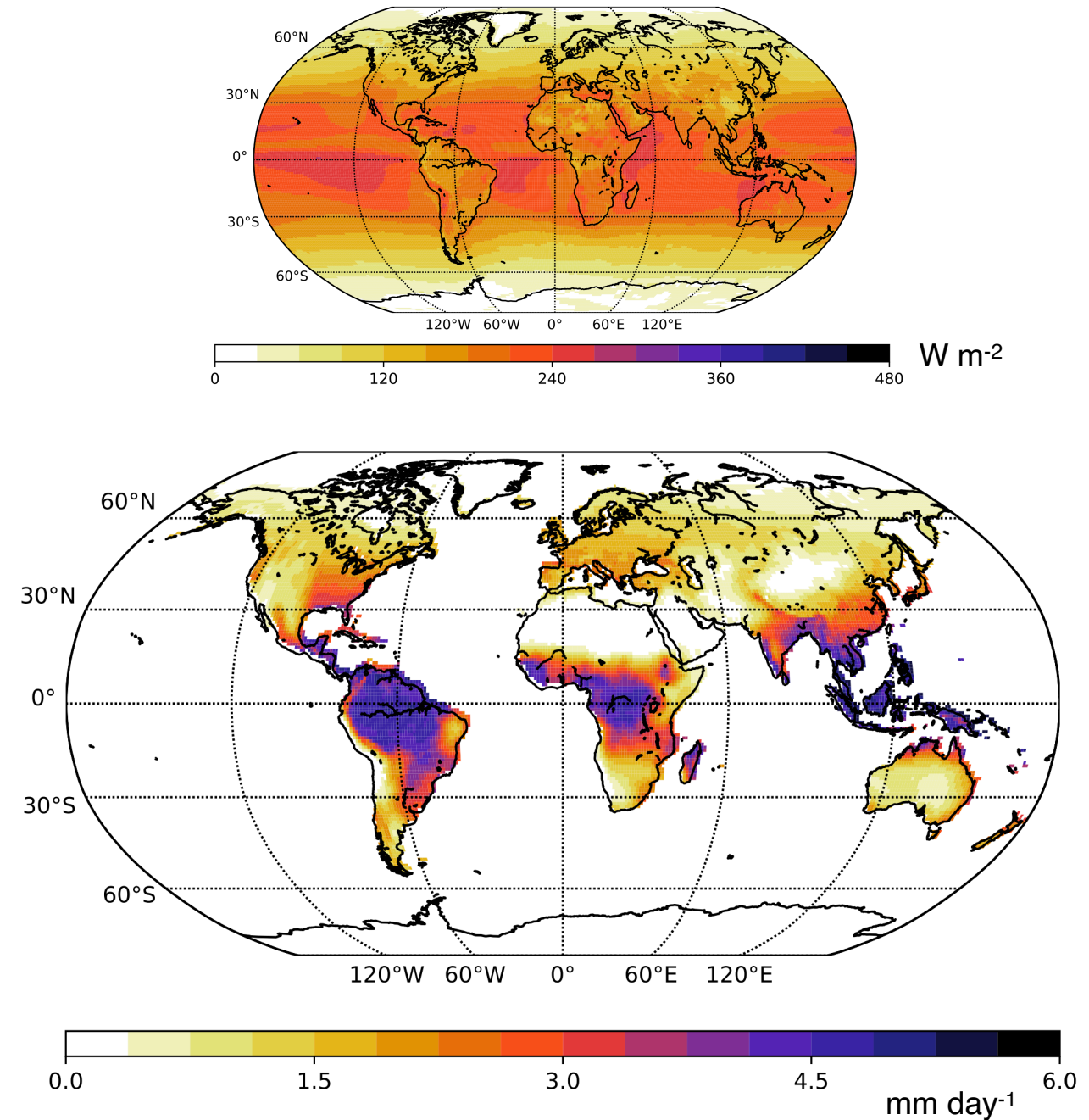




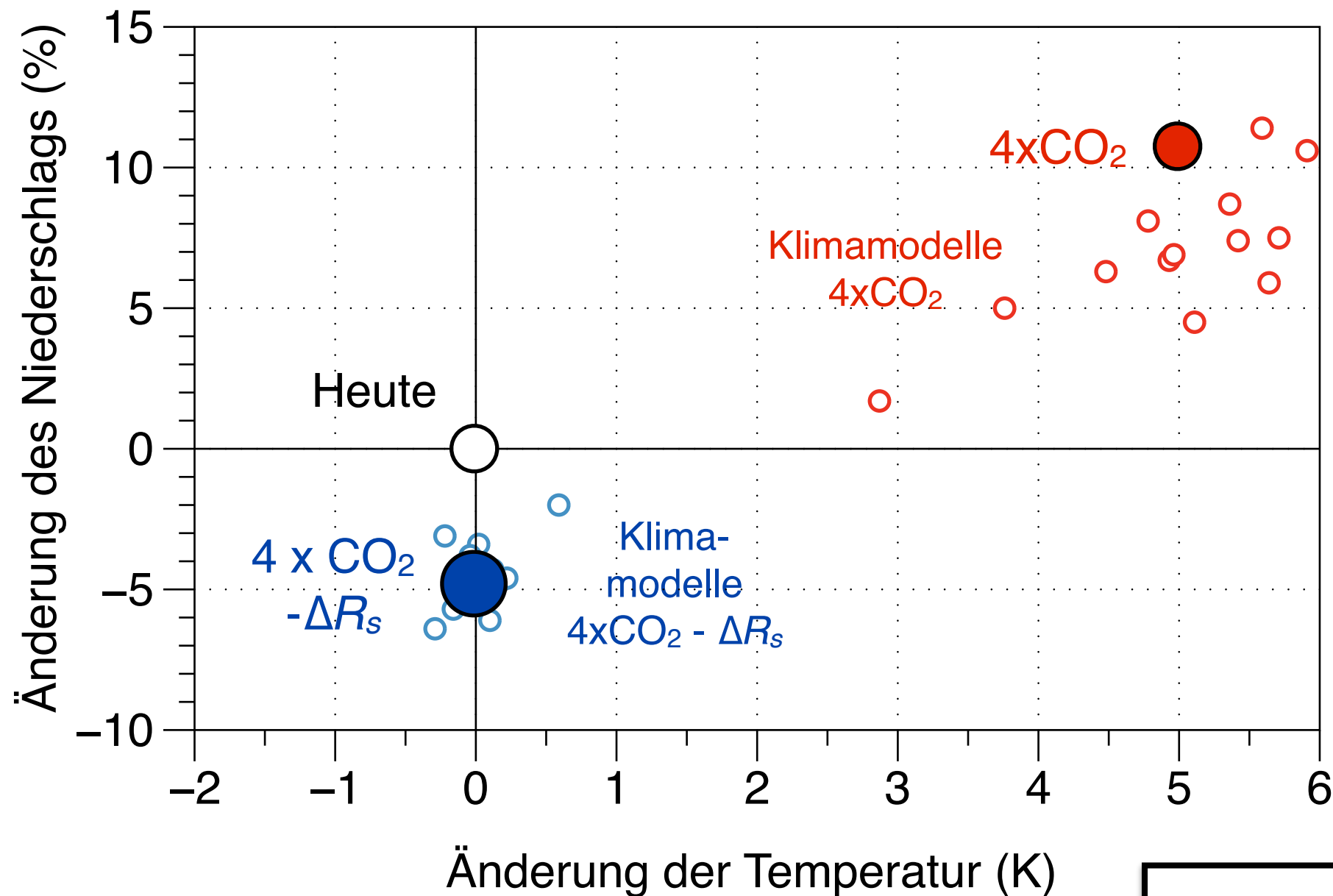
Globale Erwärmung



Verschiebung der Aufteilung

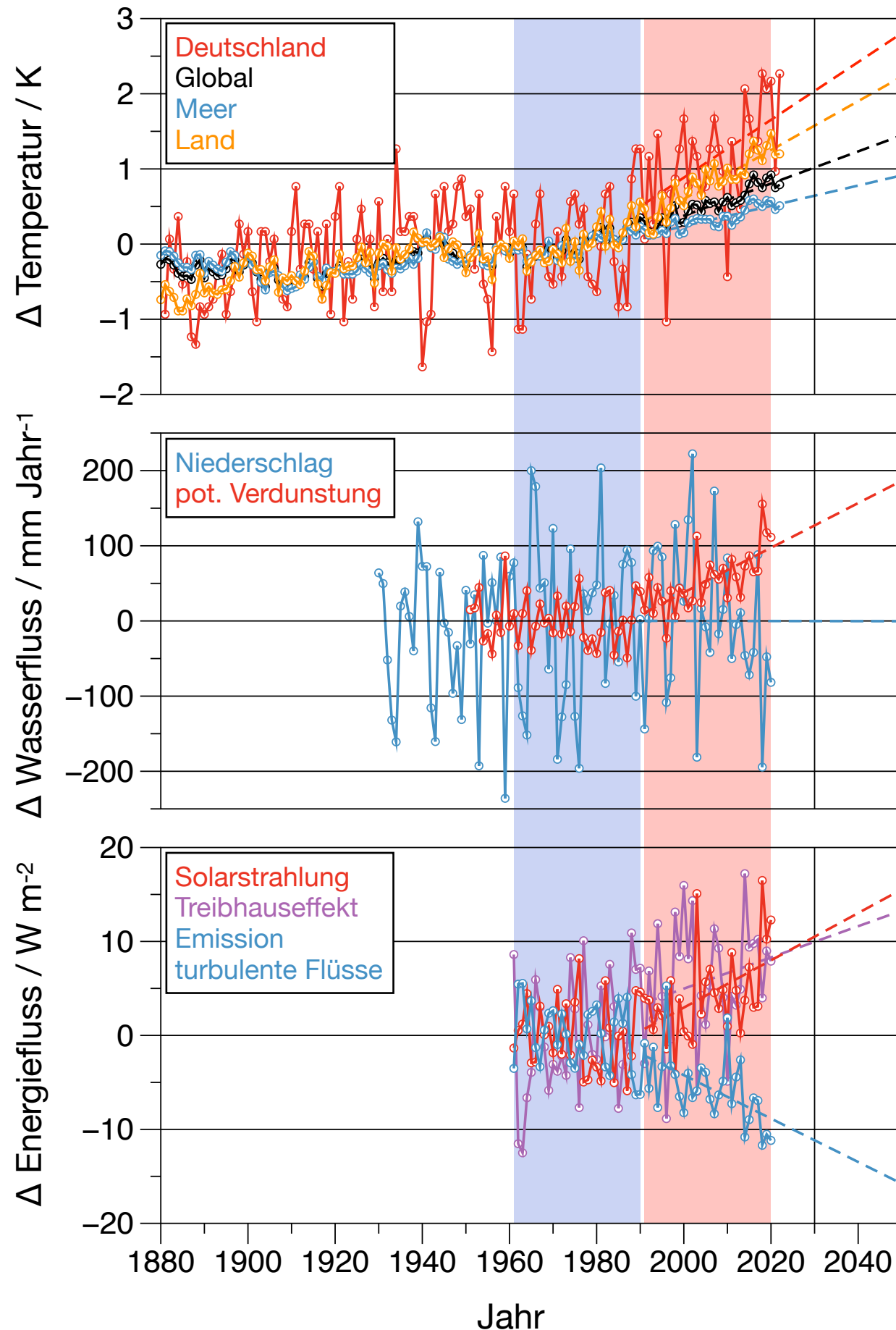


Was passiert bei globaler Erwärmung?

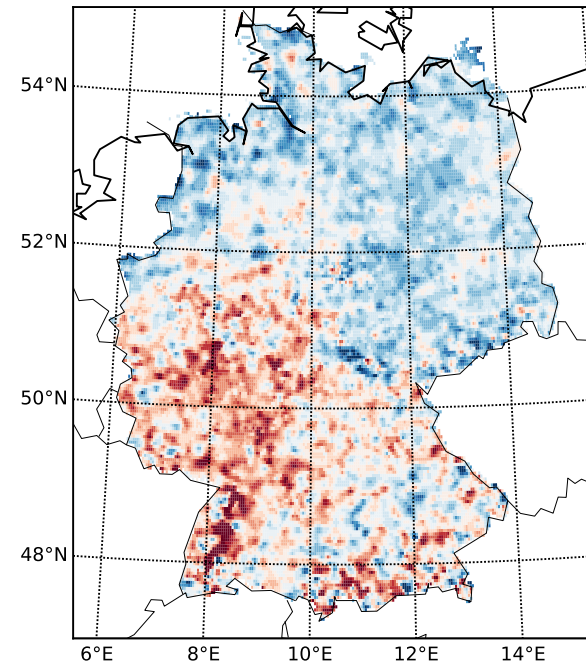


Verstärkung des Wasserkreislaufs im Klimawandel wird durch Thermodynamik erklärt

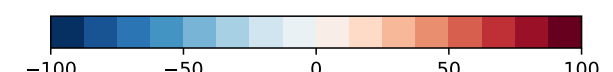
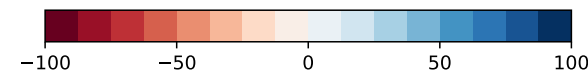
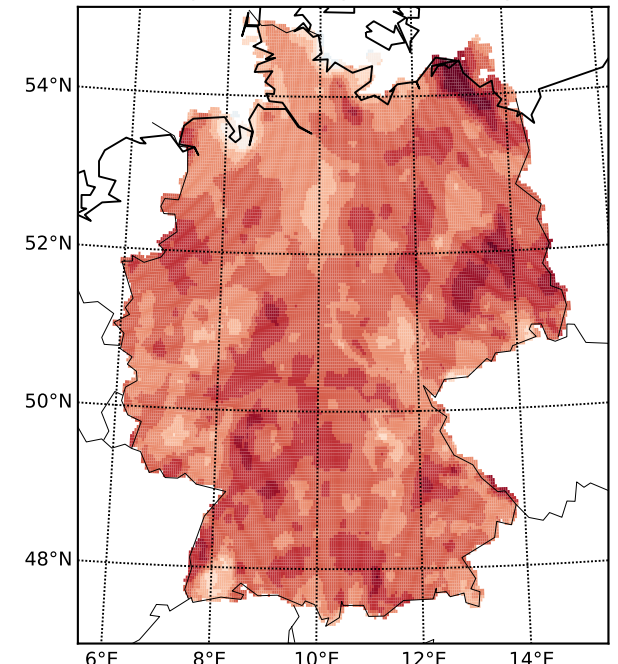
Warum wird Deutschland trockener?



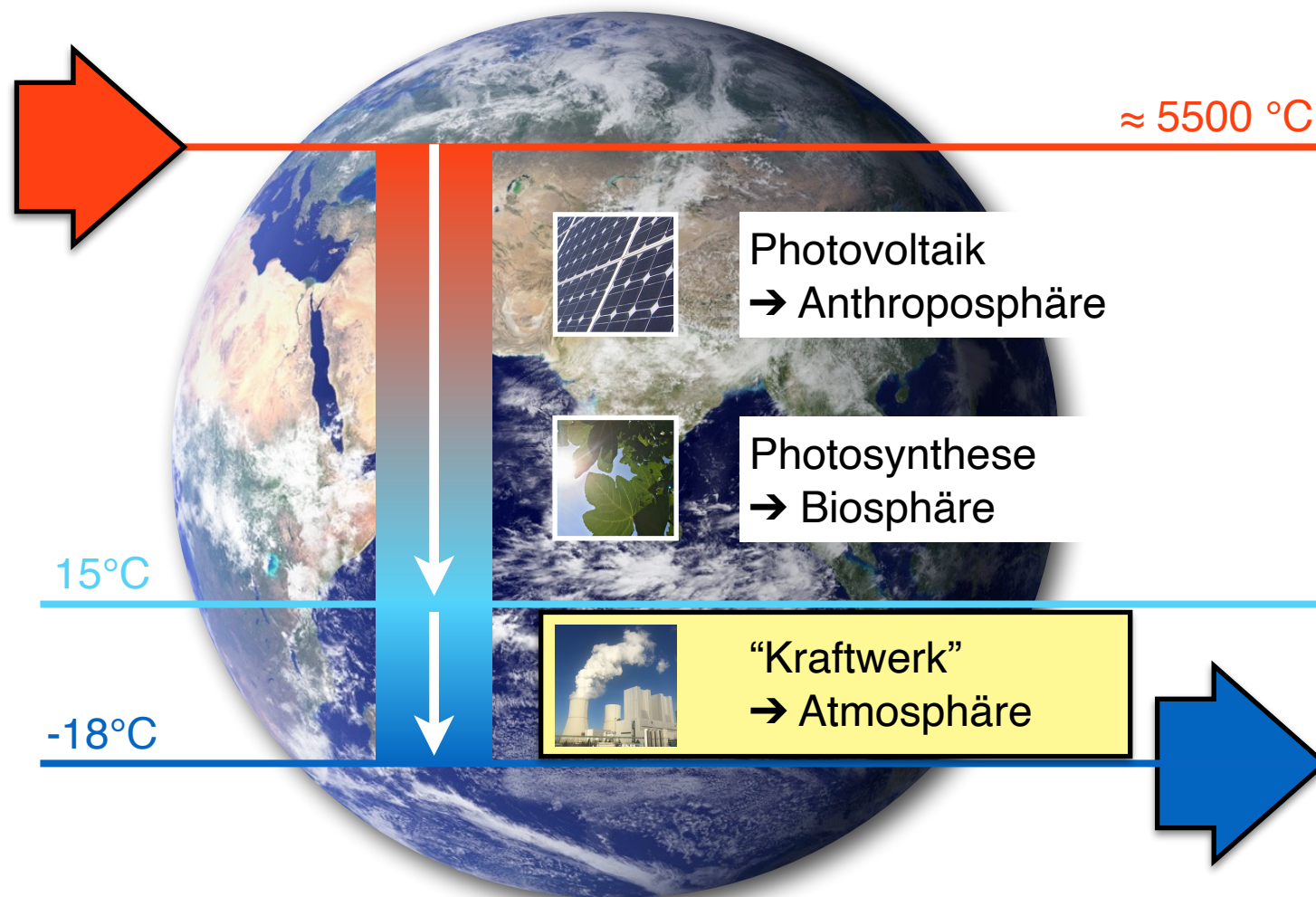
Δ Niederschlag
(mm Jahr⁻¹)



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

Biosphäre

Kohlendioxid
 CO_2

Photosynthese

organischer
Kohlenstoff
 CH_2O

Wasser
 H_2O

Metabolismus

Sauerstoff
 O_2

Wärmeabgabe
durch metabolische
Aktivität

Energieaufnahme
bei Absorption

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

Kohlendioxid
 CO_2

Wasser
 H_2O

Biosphäre

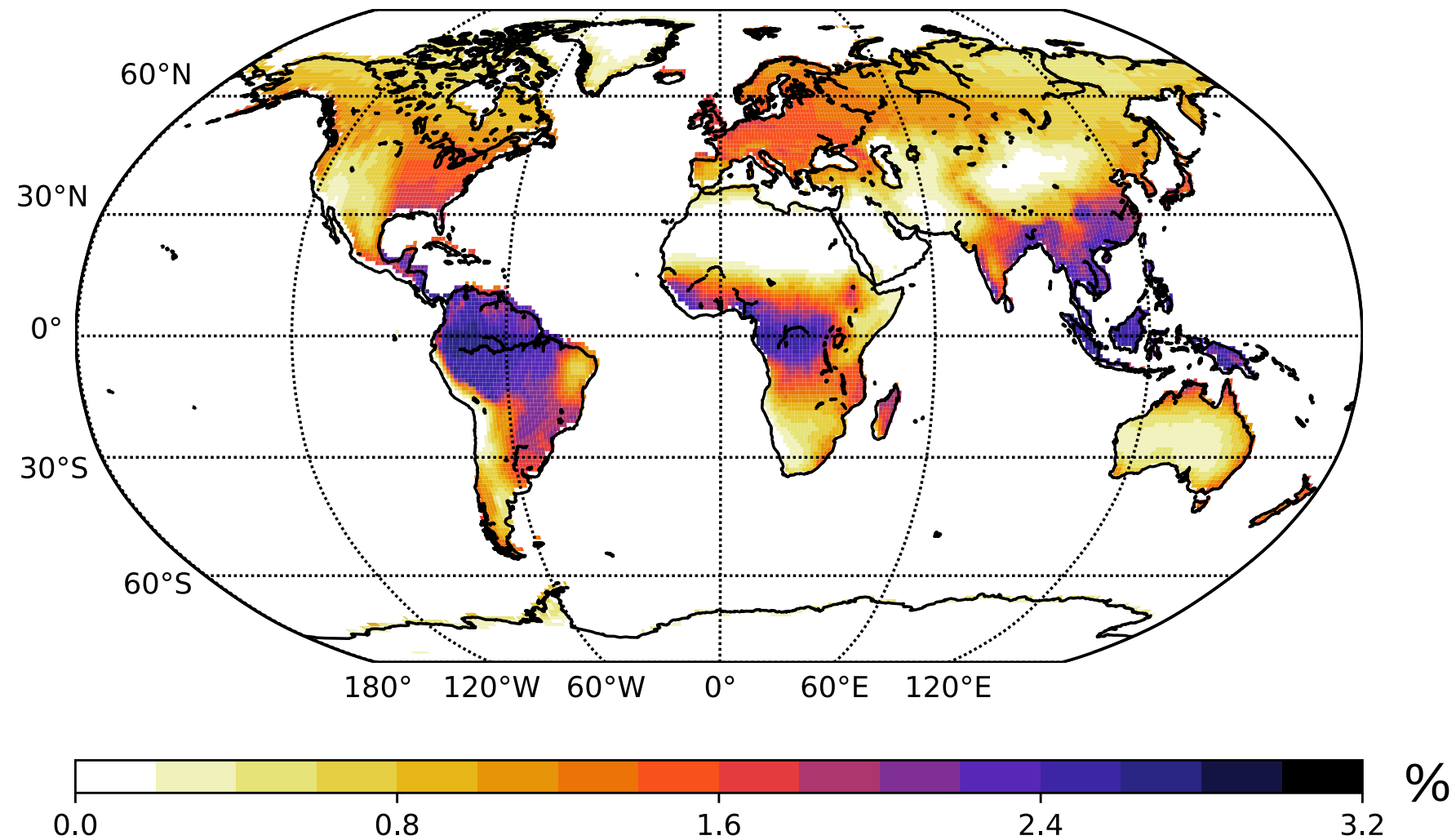
Photosynthese

organischer
Kohlenstoff
 CH_2O

Glukose
0.48 MJ/mol C

Effizienz

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



Effizienz

$\approx 1 - 2\%$

Daten: [NASA-CERES](#); [CASA-GFED](#)

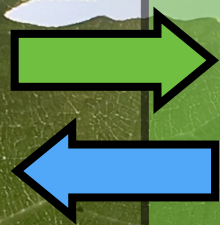
Antrieb
des Kraftwerks



Erzeugung
von Bewegung



Kohlendioxid
 CO_2



Biosphäre

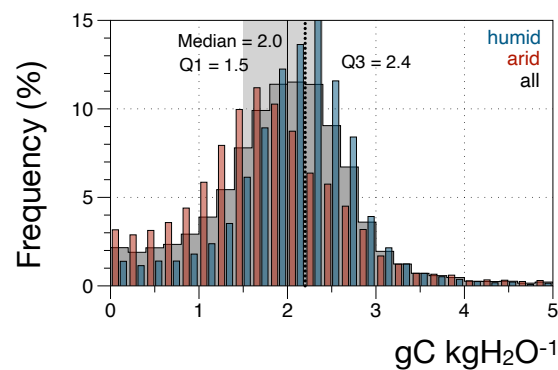
Photosynthese



organischer
Kohlenstoff
 CH_2O

Wasser
 H_2O

Wassernutzungseffizienz

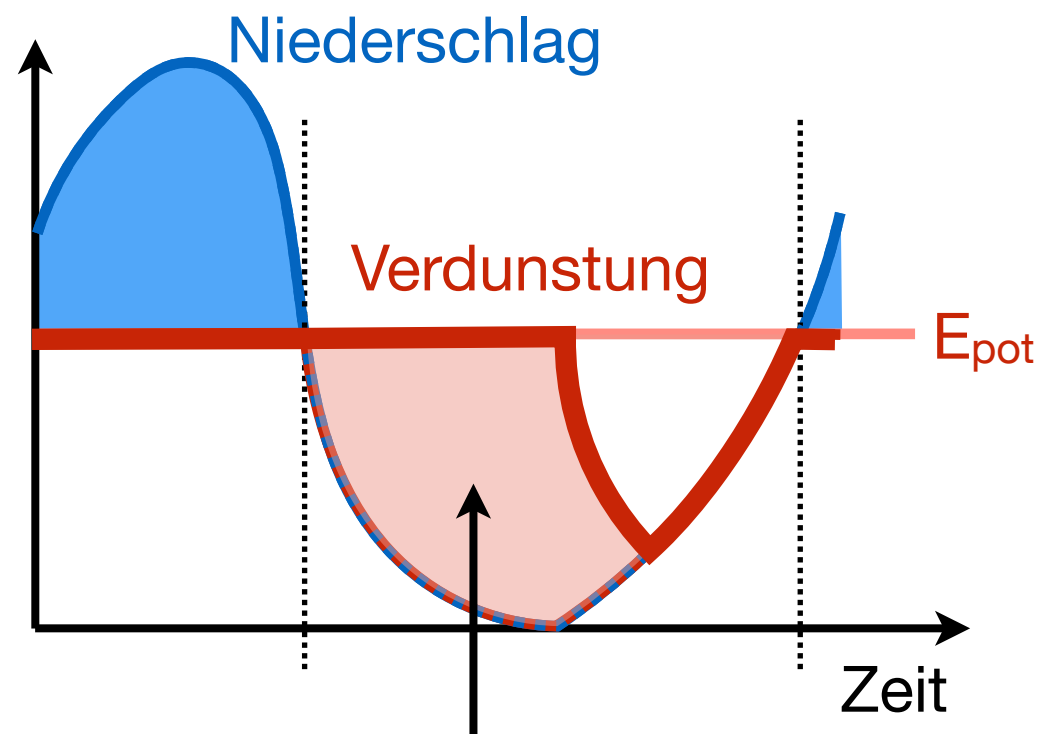


Effizienz

50% x 70% x 3.6%
 $\approx 1\%$

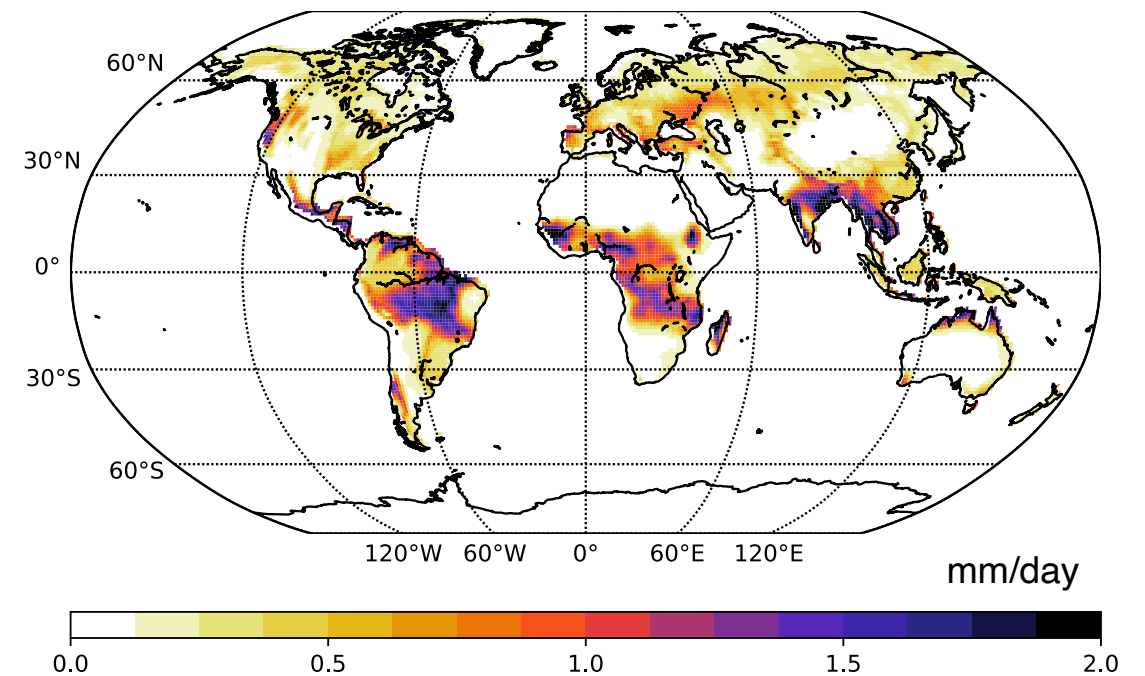
Geringe Effizienz
durch langsamen
Gasaustausch

“Pushing the Limits”



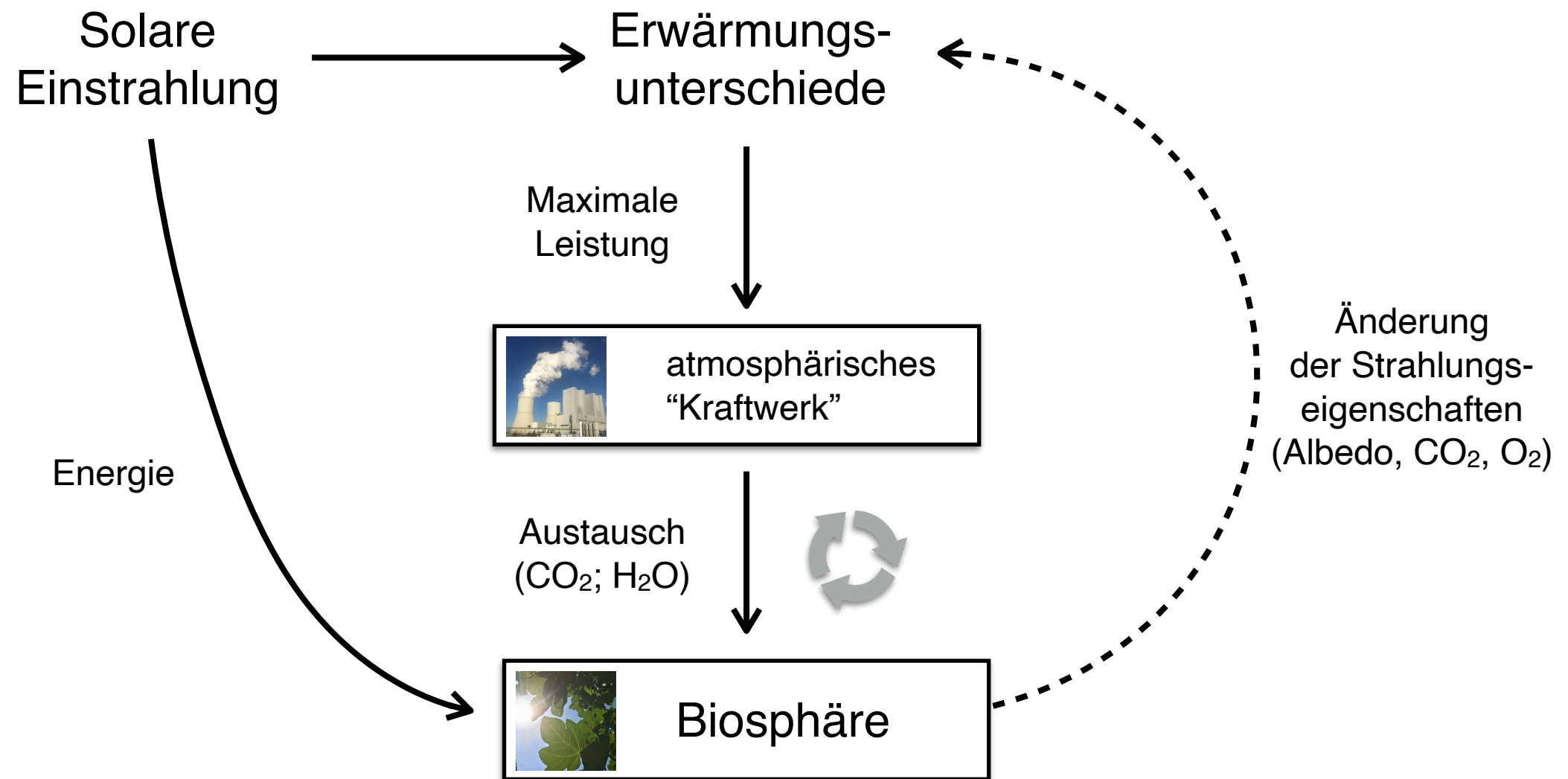
Wurzelsysteme
ermöglichen Zugang
zu Bodenwasser

Mehr Verdunstung durch Wurzelsysteme

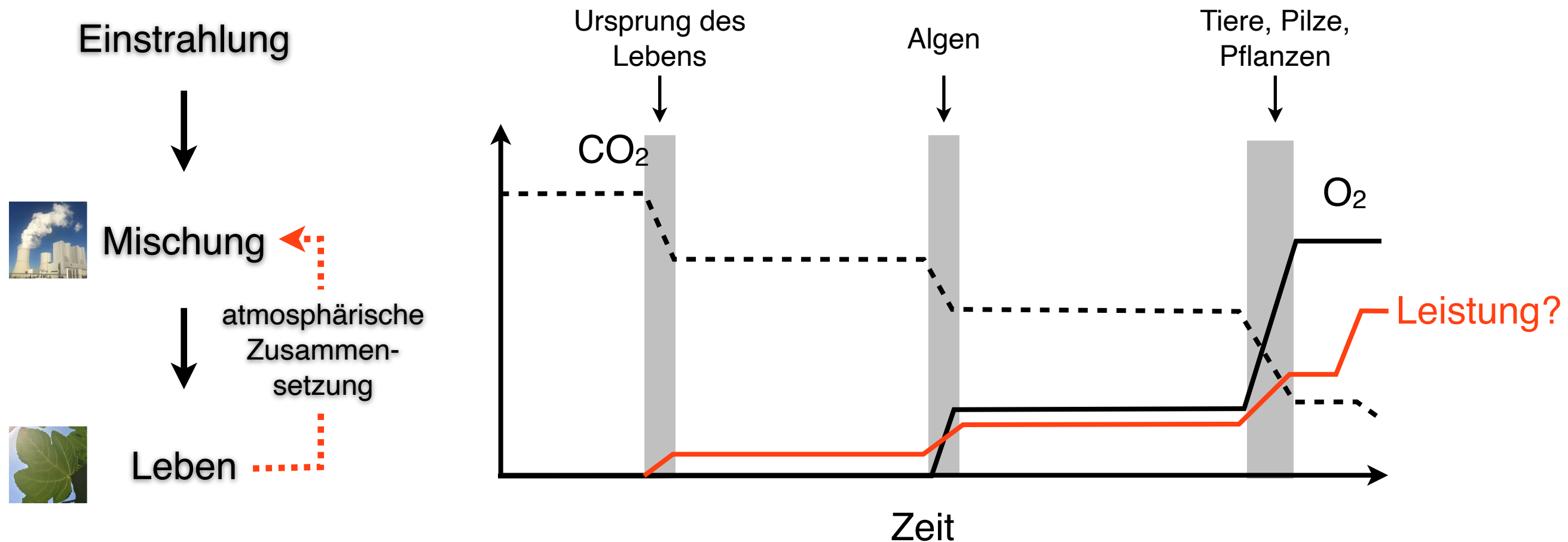


Mehr Verdunstung
→ mehr Gasaustausch
→ höhere Produktivität
+12%

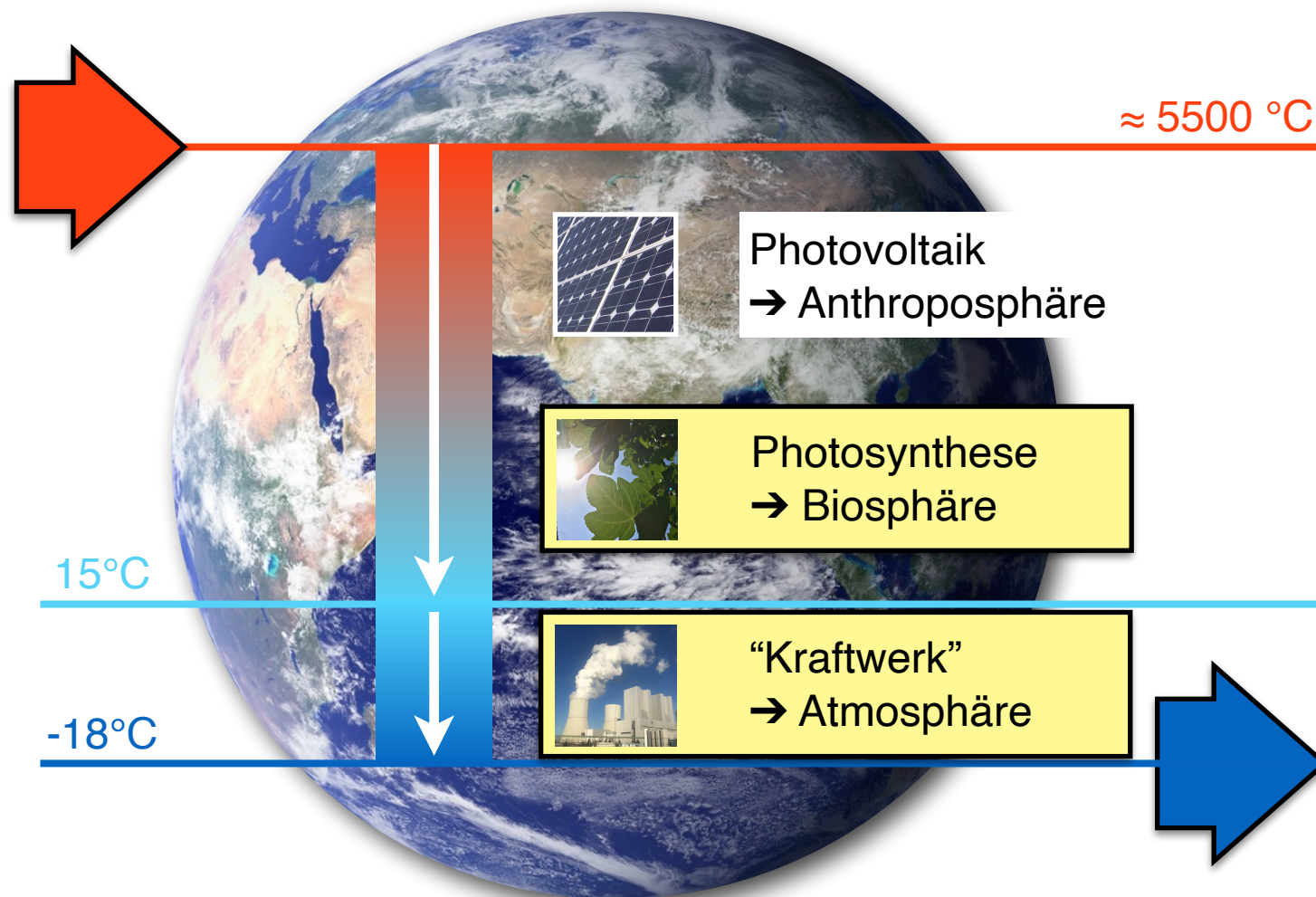
“Pushing the Limits” des gesamten Planeten?



Eine allgemeine Richtung zu mehr Leistung?



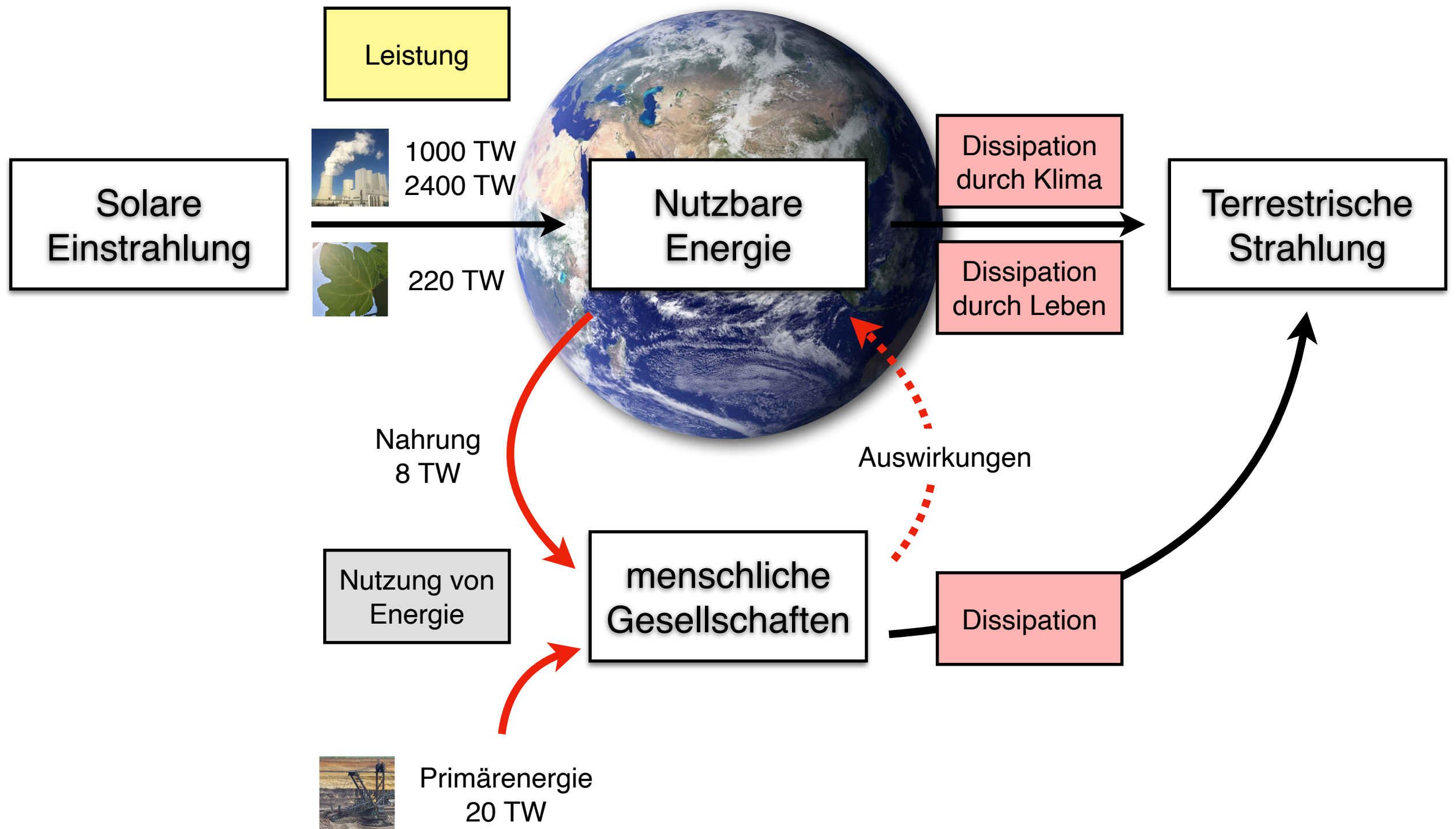
Im Laufe der Erdgeschichte wuchs das Nichtgleichgewicht und Diversität des Lebens an. Und wahrscheinlich zu mehr Leistung.

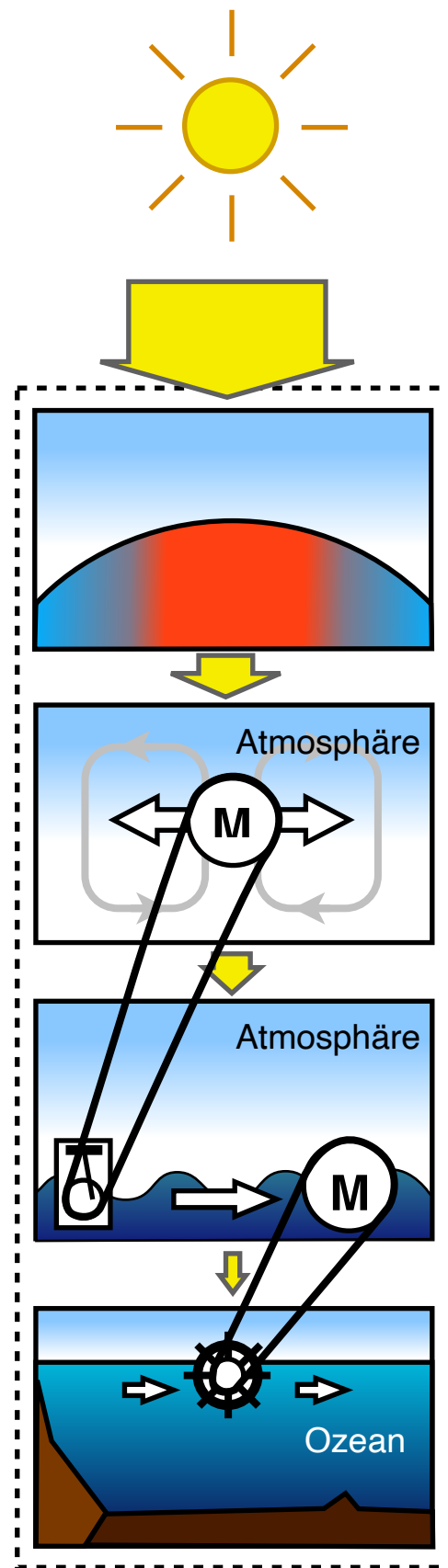


Leben an der Grenze

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

Rolle der Menschheit?





Strahlung

$\approx 175000 \text{ TW}$

→ Solarenergie



Thermalisierung
Einstrahlungsunterschiede

Wärme

$\approx 49000 \text{ TW}$



atmosphärisches
Kraftwerk

Bewegung

$\approx 1000 \text{ TW}$

→ Windenergie



Übertrag durch
Reibung

Wellen

$\approx 65 \text{ TW}$

→ Wellenenergie



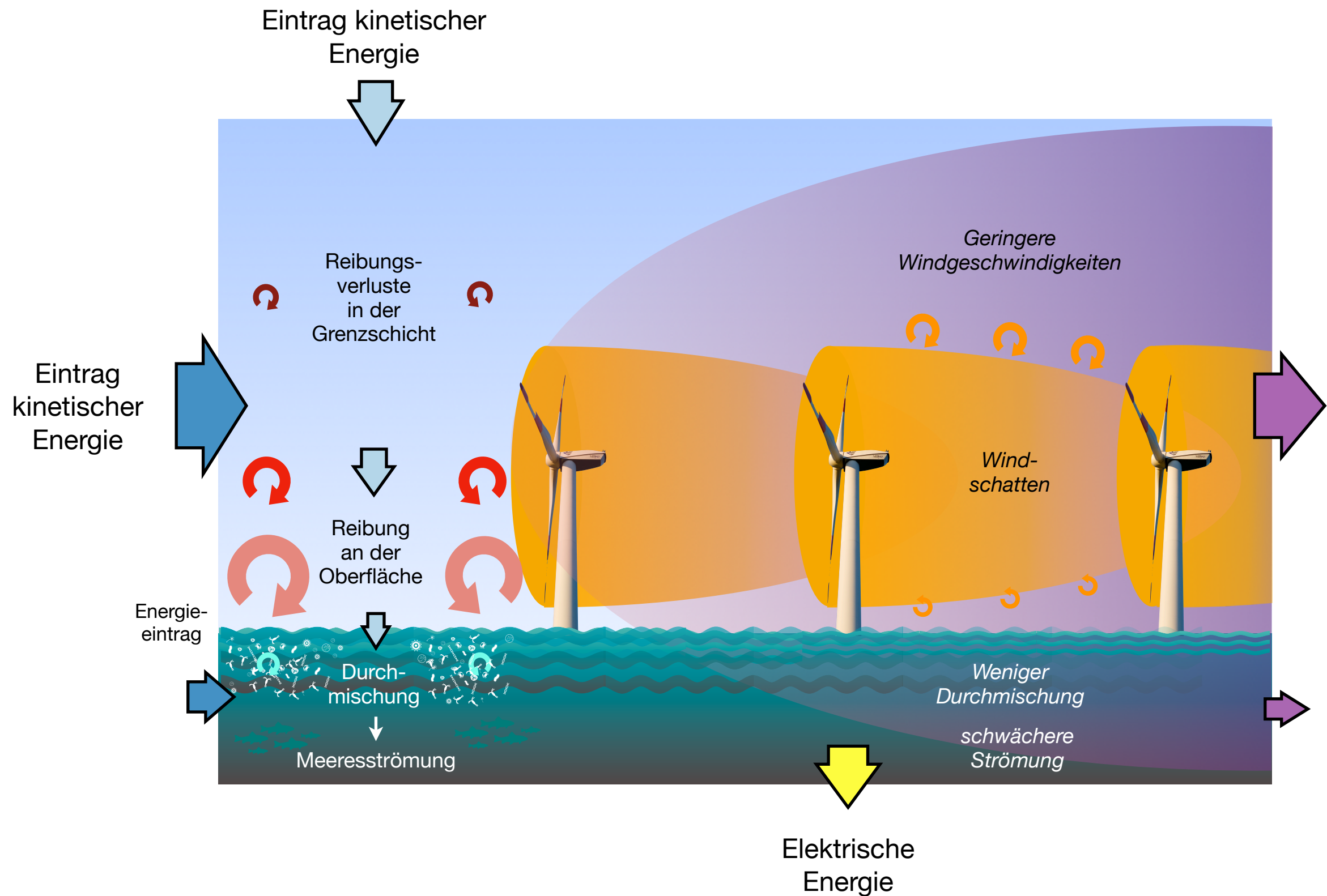
Meeresströmungen

$\approx 5 \text{ TW}$

→ Meeresenergie

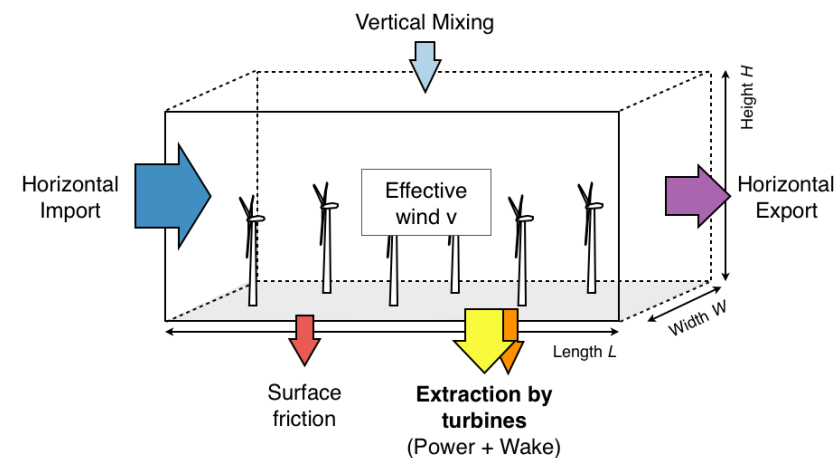
Geothermie $\approx 50 \text{ TW}$
Gezeiten $\approx 5 \text{ TW}$

Primärenergieverbrauch
 $\approx 20 \text{ TW}$

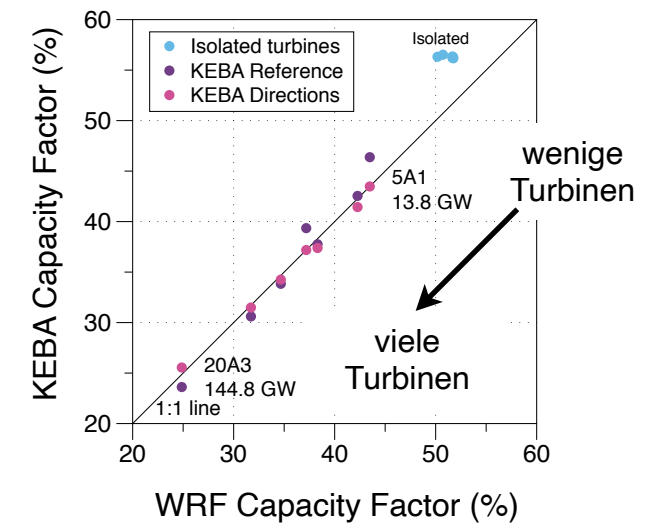


Deutsche Bucht: 70 GW Windenergie bis 2050

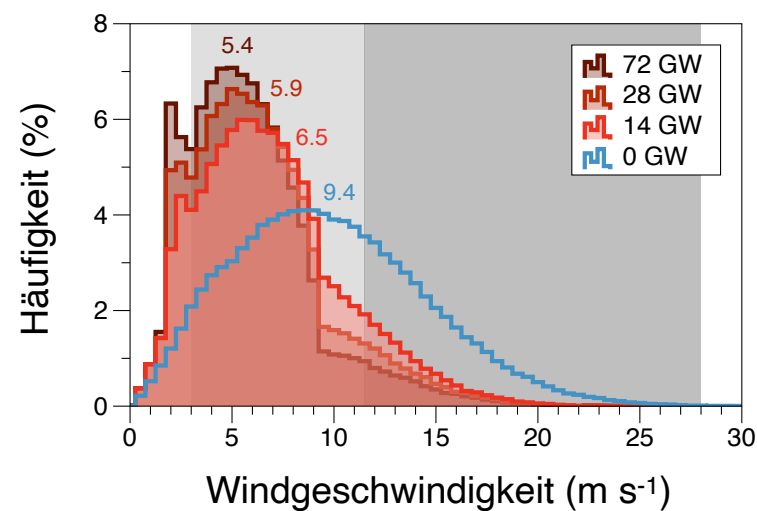
Ansatz: kinetische Energie budgetieren!



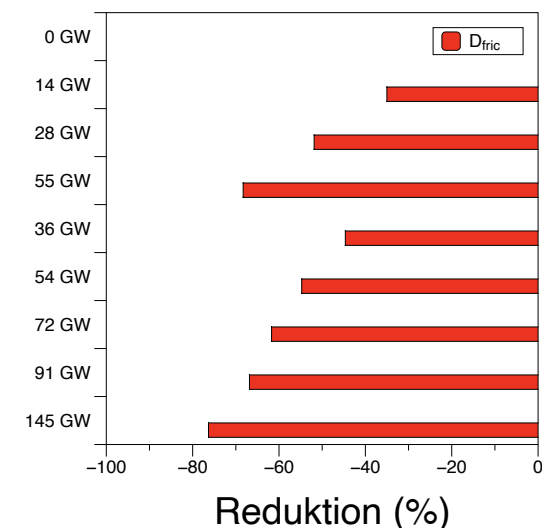
Mehr Turbinen → weniger Effizienz!



Mehr Turbinen → weniger Wind!



Weniger Wind → weniger Ozeaneintrag!



“Empowering the Planet”

Energie erzeugen

Frishwasser erzeugen

Natur



Photosynthese

Effizienz:
< 3%



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?



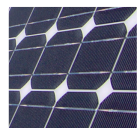
Leistung durch:



“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

Planetarium Göttingen

7. November 2023

Axel Kleidon

Max-Planck-Institut für Biogeochemie

<http://gaia.mpg.de> ❖ earthsytem.org