



# Dürren in Hochwasser in Deutschland

Warum der Klimawandel  
hydrologische Extreme verstärkt

Lehrendenfortbildung  
Weimar 2024

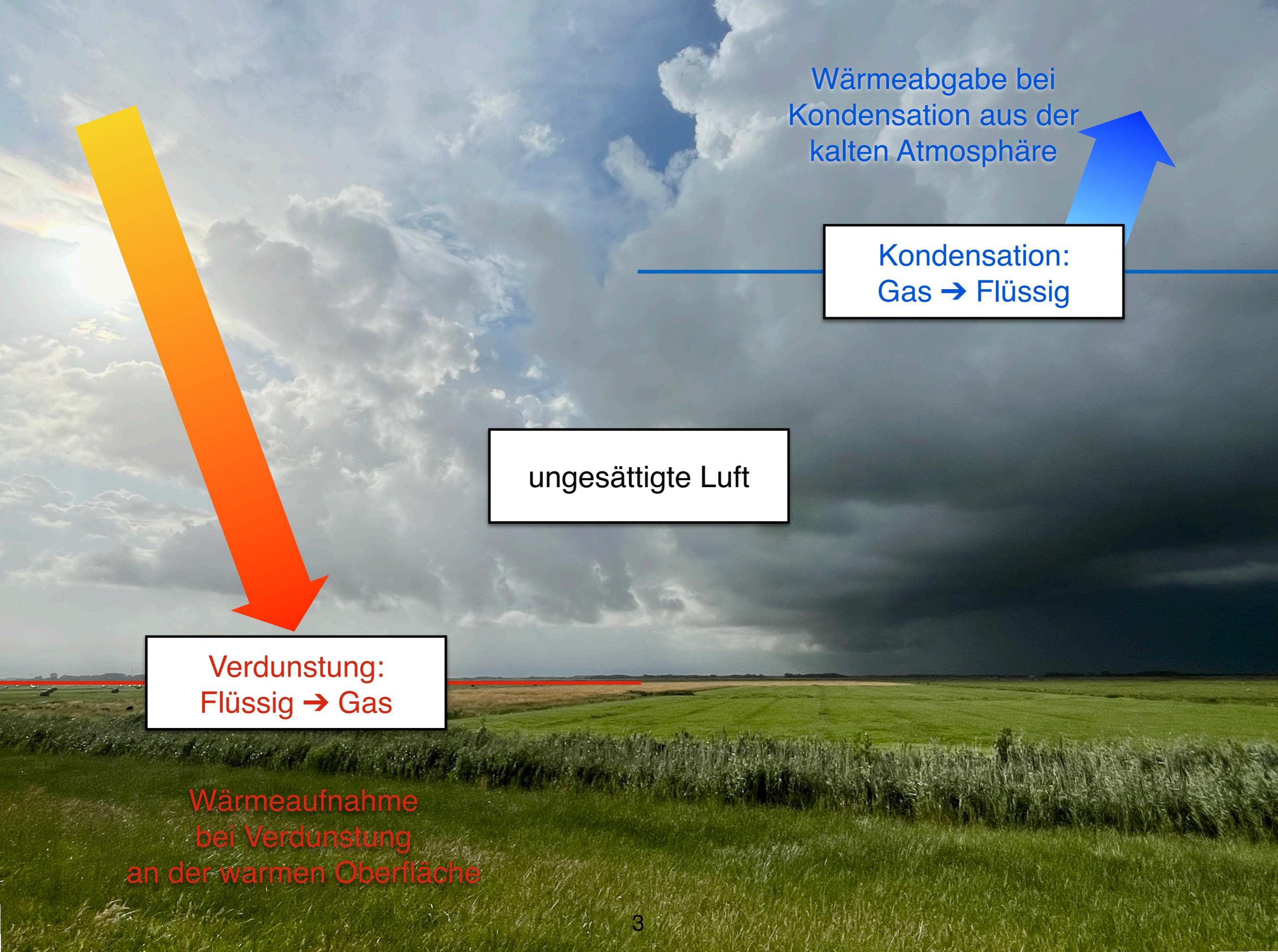
Axel Kleidon  
Max-Planck-Institut für Biogeochemie  
<http://gaia.mpg.de> - [akleidon@bgc-jena.mpg.de](mailto:akleidon@bgc-jena.mpg.de)

# Sättigung

Kondensation:  
Gas → Flüssig

=

Verdunstung:  
Flüssig → Gas



Wärmeabgabe bei  
Kondensation aus der  
kalten Atmosphäre

Kondensation:  
Gas → Flüssig

ungesättigte Luft

Verdunstung:  
Flüssig → Gas

Wärmeaufnahme  
bei Verdunstung  
an der warmen Oberfläche

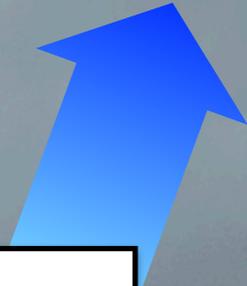
# Verdunstungsphase



Verdunstung:  
Flüssig → Gas

ungesättigte Luft

Kondensation:  
Gas → Flüssig



Leistung aus Solarstrahlung:  
Auftrieb transportiert  
warme, feuchte Luft

planetare  
Energiebilanz

Gesamt-  
absorption

Ausstrahlung  
ins Weltall

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

-18°C

Oberflächen-  
energiebilanz

15°C

$$R_s + R_{l,d} = \sigma T_s^4 + H + LE$$

Absorption  
Solarstrahlung

Atmosphärische  
Gegenstrahlung

Ausstrahlung der  
Erdoberfläche

Wärmetransport  
durch Auftrieb  
und Verdunstung



J

planetare  
Energiebilanz

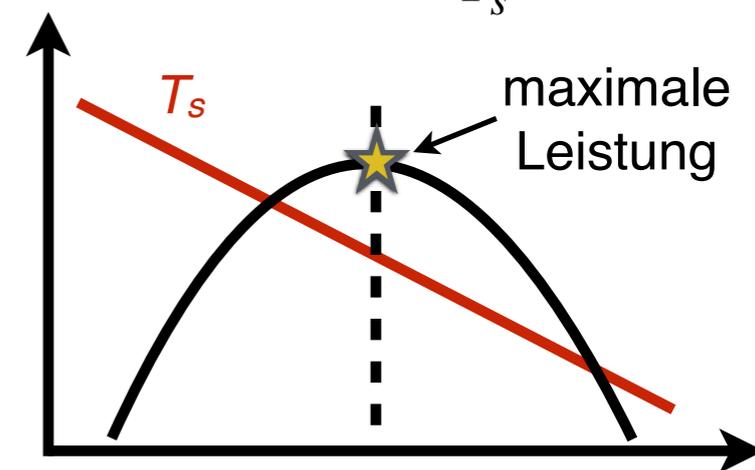
Gesamt-  
absorption

Ausstrahlung  
ins Weltall

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

-18°C

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



Wärmefluss  $J$

Oberflächen-  
energiebilanz

15°C

$$R_s + R_{l,d} = \sigma T_s^4 + H + LE$$

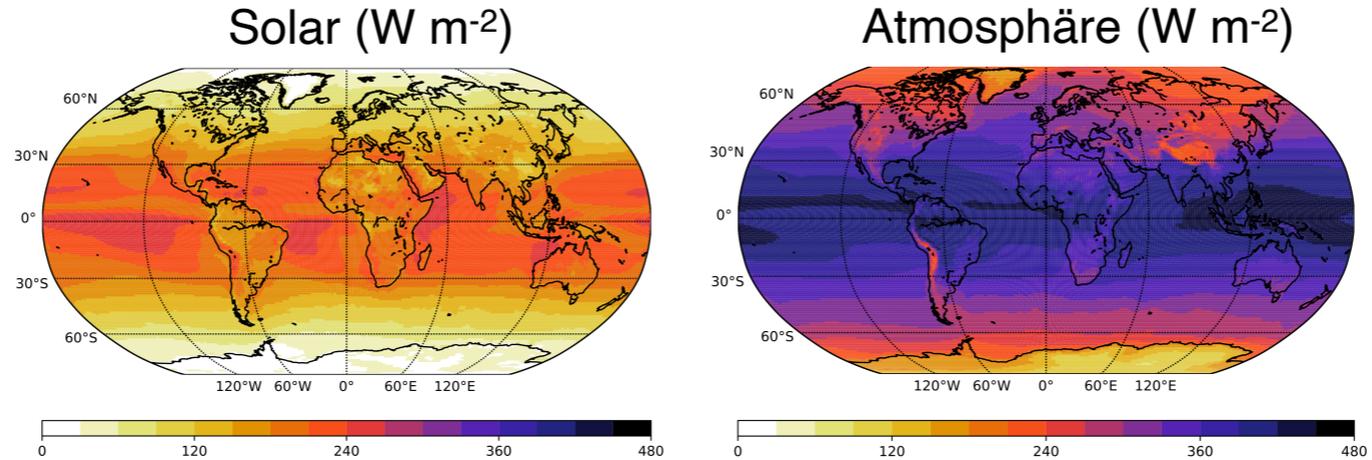
Absorption  
Solarstrahlung

Atmosphärische  
Gegenstrahlung

Ausstrahlung der  
Erdoberfläche

Wärmetransport  
durch Auftrieb  
und Verdunstung

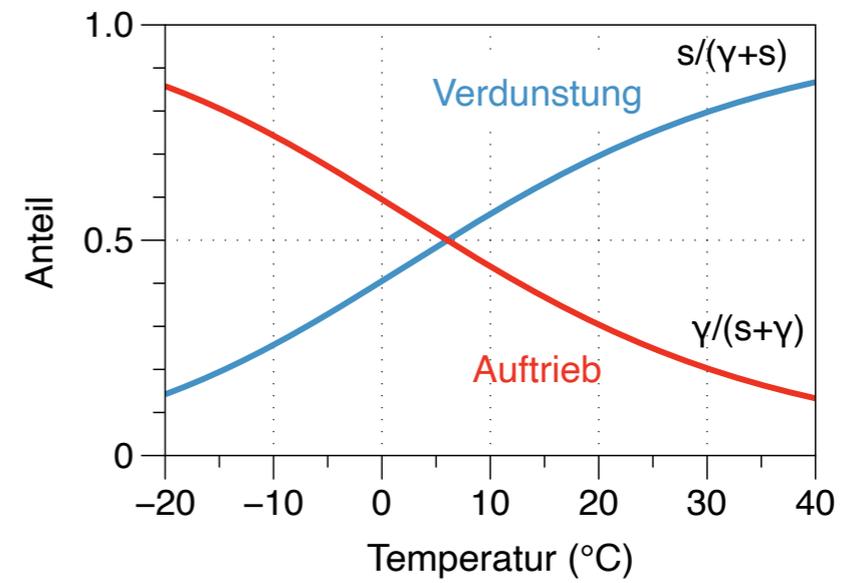
# Erwärmung der Oberfläche durch Strahlung



maximale Leistung



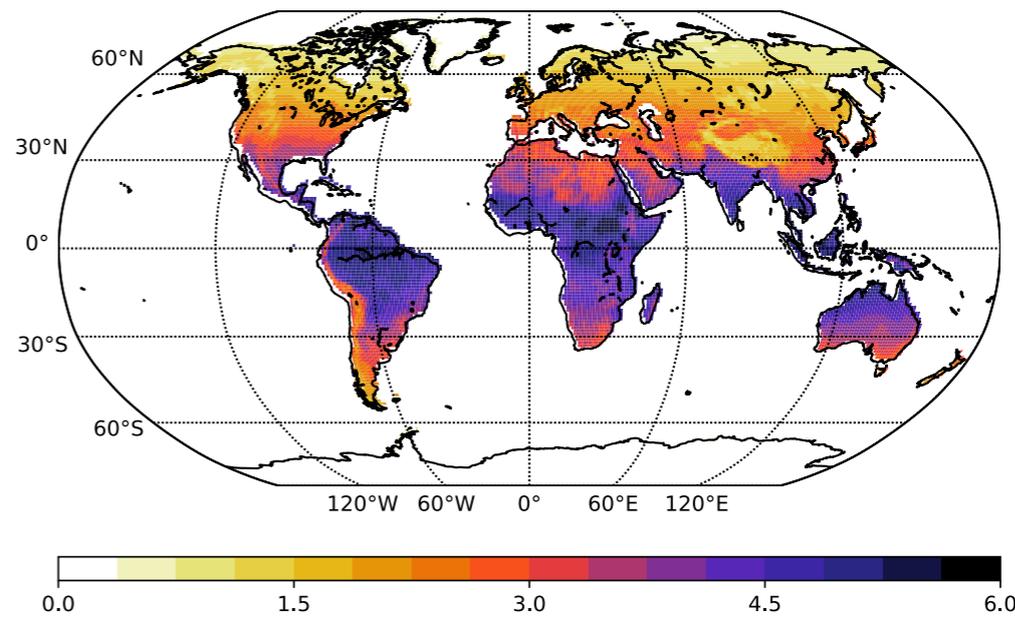
Wärmeflüsse

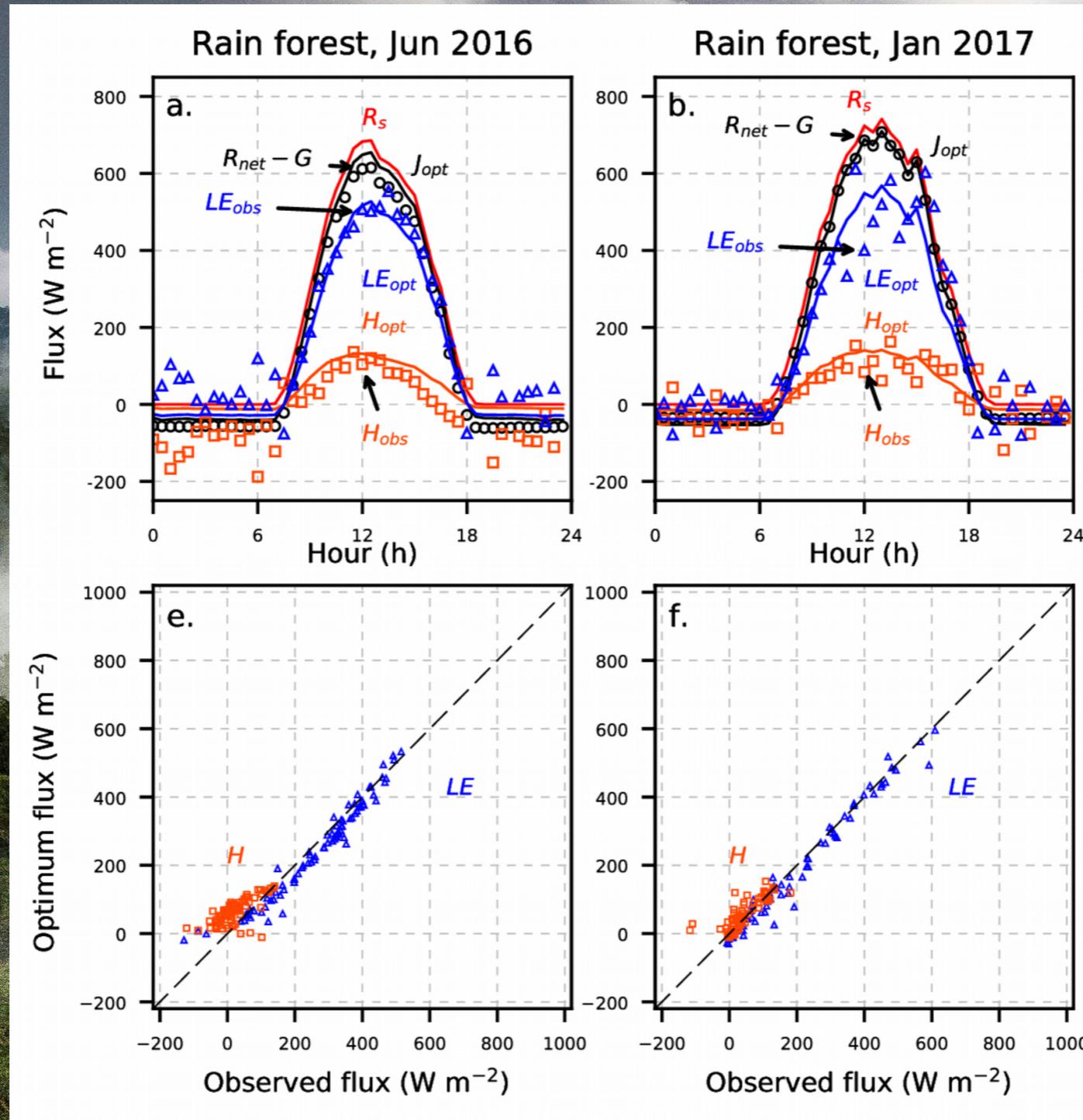


Auftrieb ("sensibel")  $\frac{\gamma}{s + \gamma}$

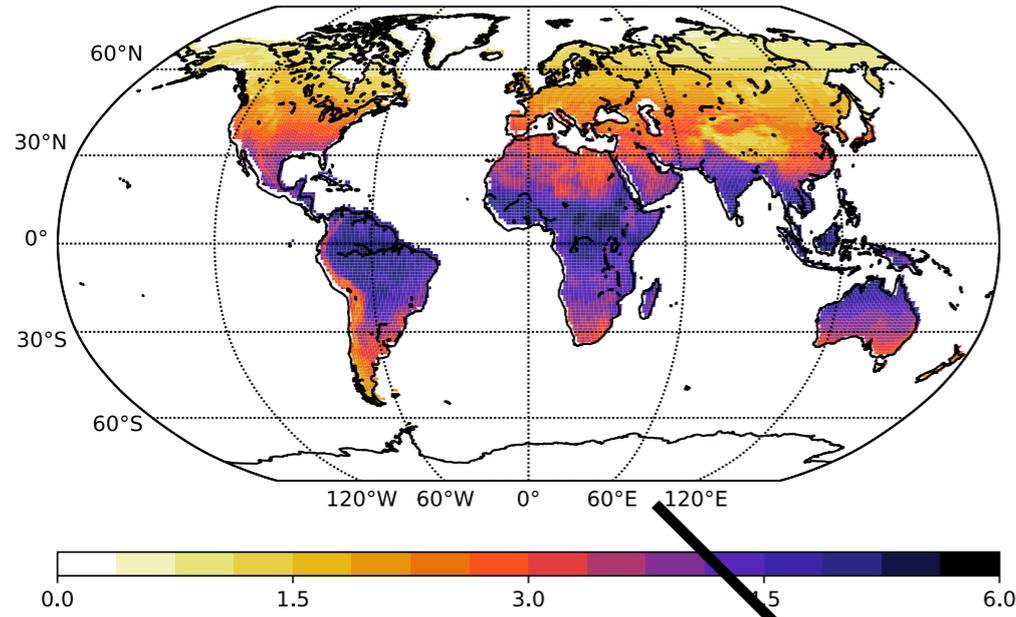


potenzielle Verdunstung ("latent")  $\frac{s}{s + \gamma}$

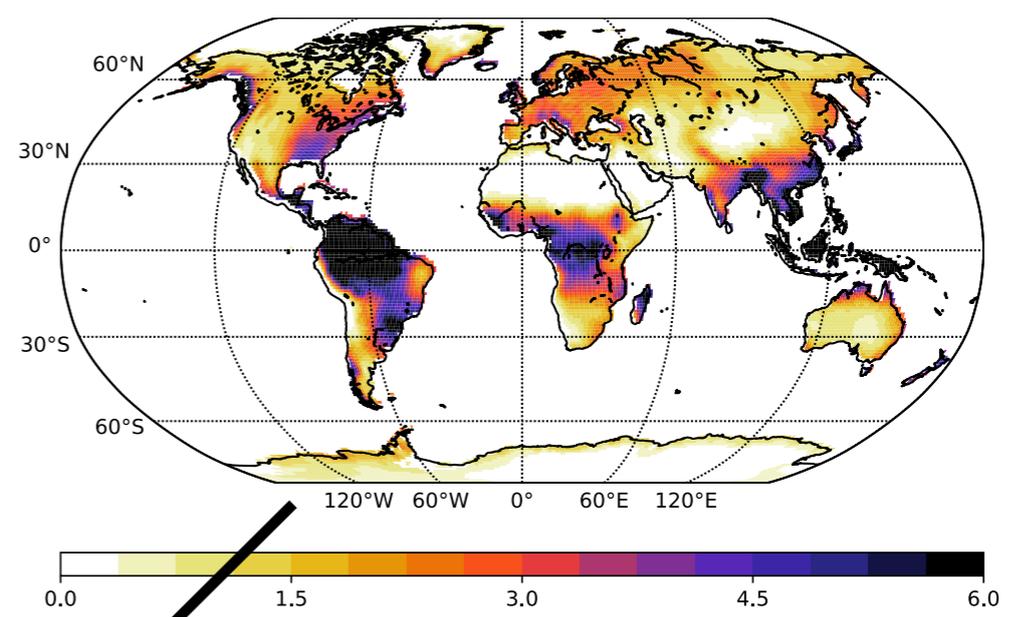




# potenzielle Verdunstung



# Niederschlag



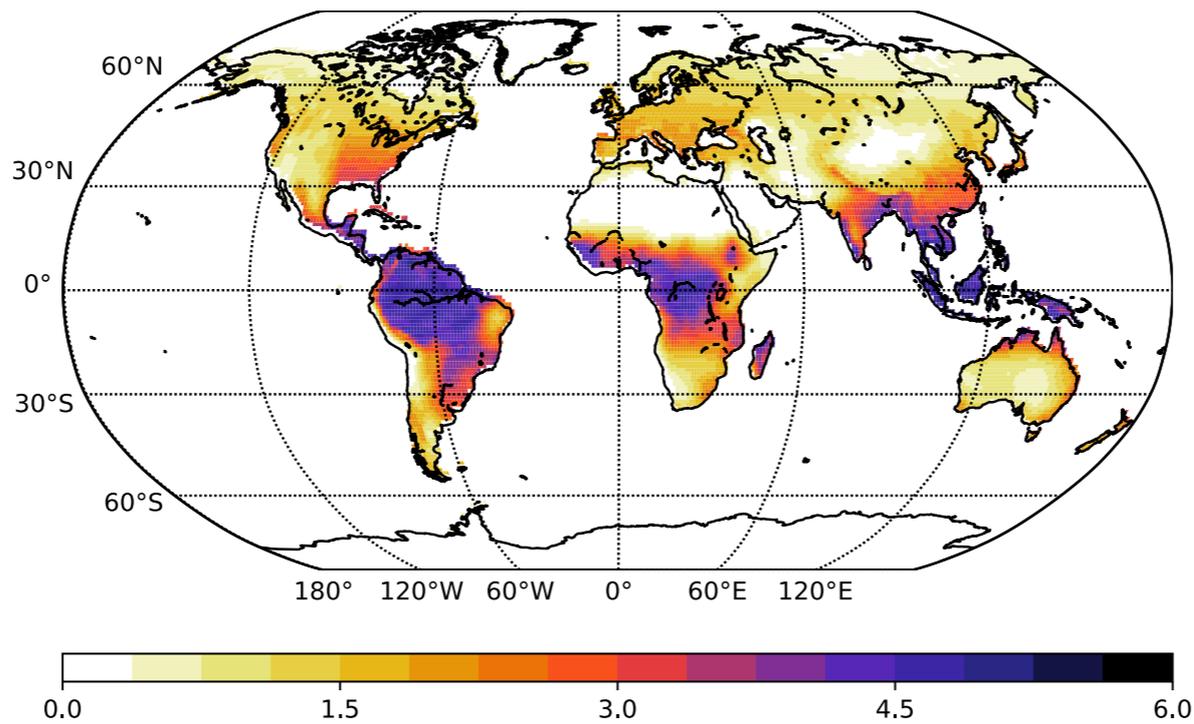
**Trockenheit**  
Humid:  $P > E_{pot}$   
Arid:  $E_{pot} > P$

Vergleich

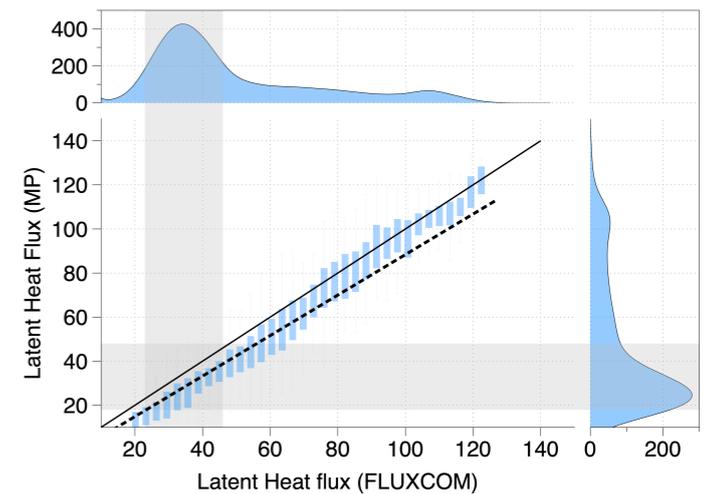
Wasser-  
verfügbarkeit

↓ Minimum

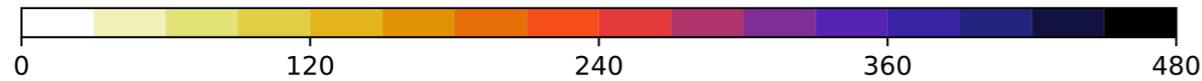
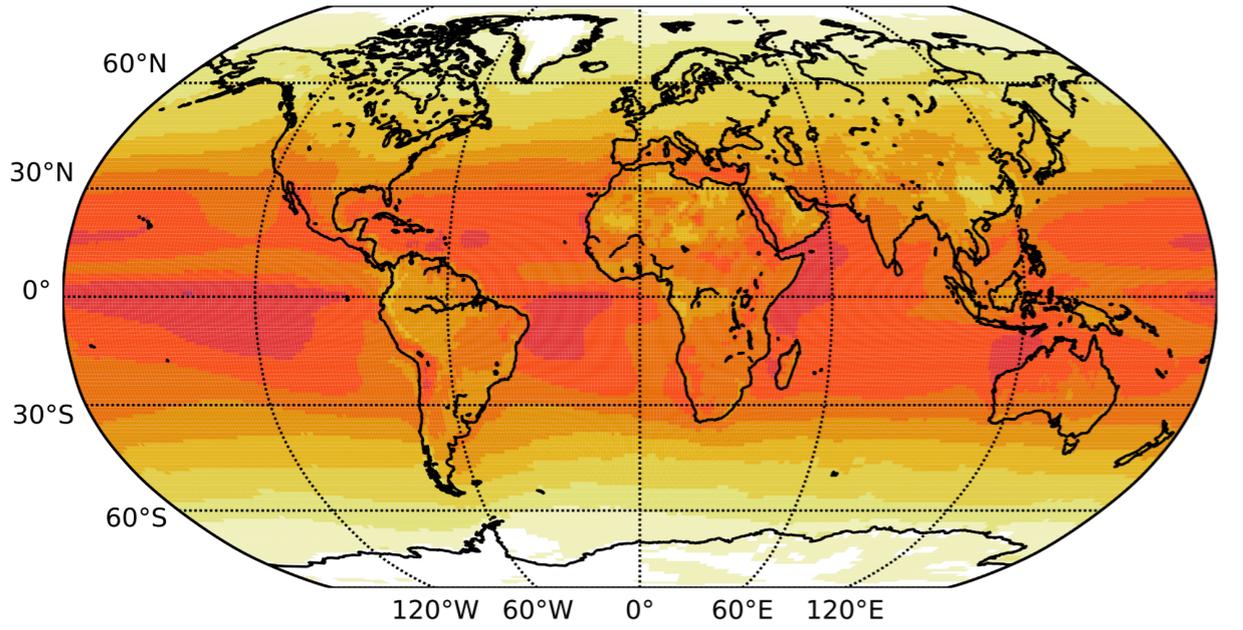
aktuelle  
Verdunstung



Vergleich mit  
Beobachtungen

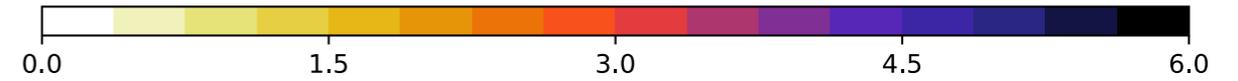
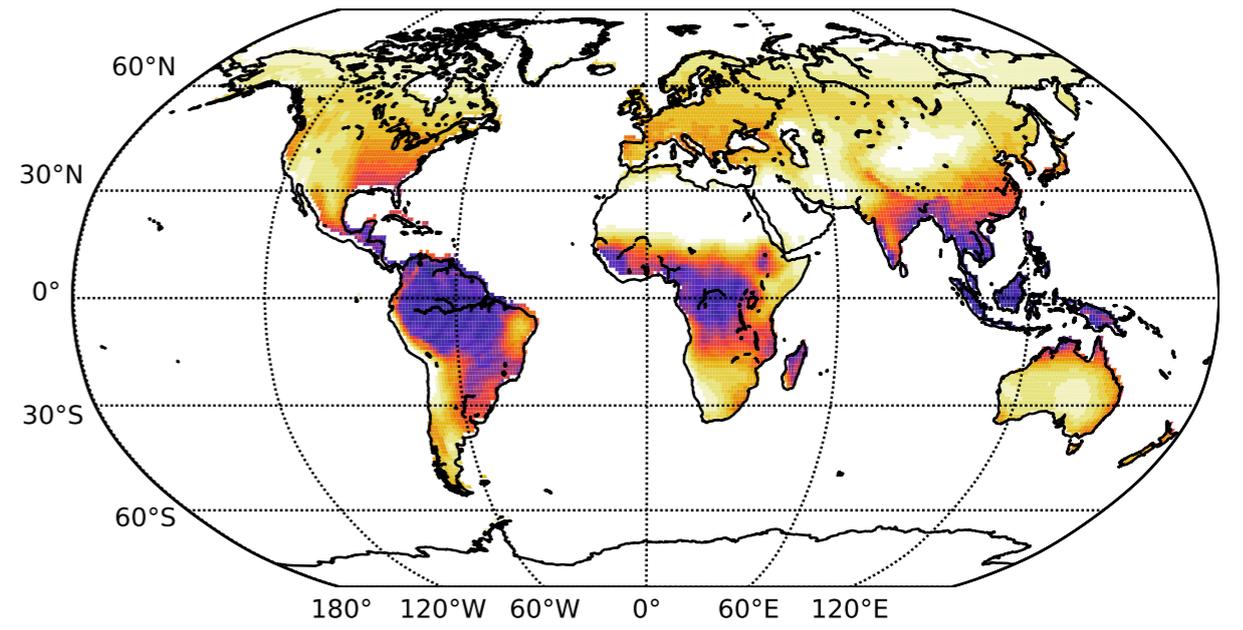


Absorption Solarstrahlung ( $\text{W m}^{-2}$ )



165  $\text{W m}^{-2}$

aktuelle Verdunstung ( $\text{mm Tag}^{-1}$ )



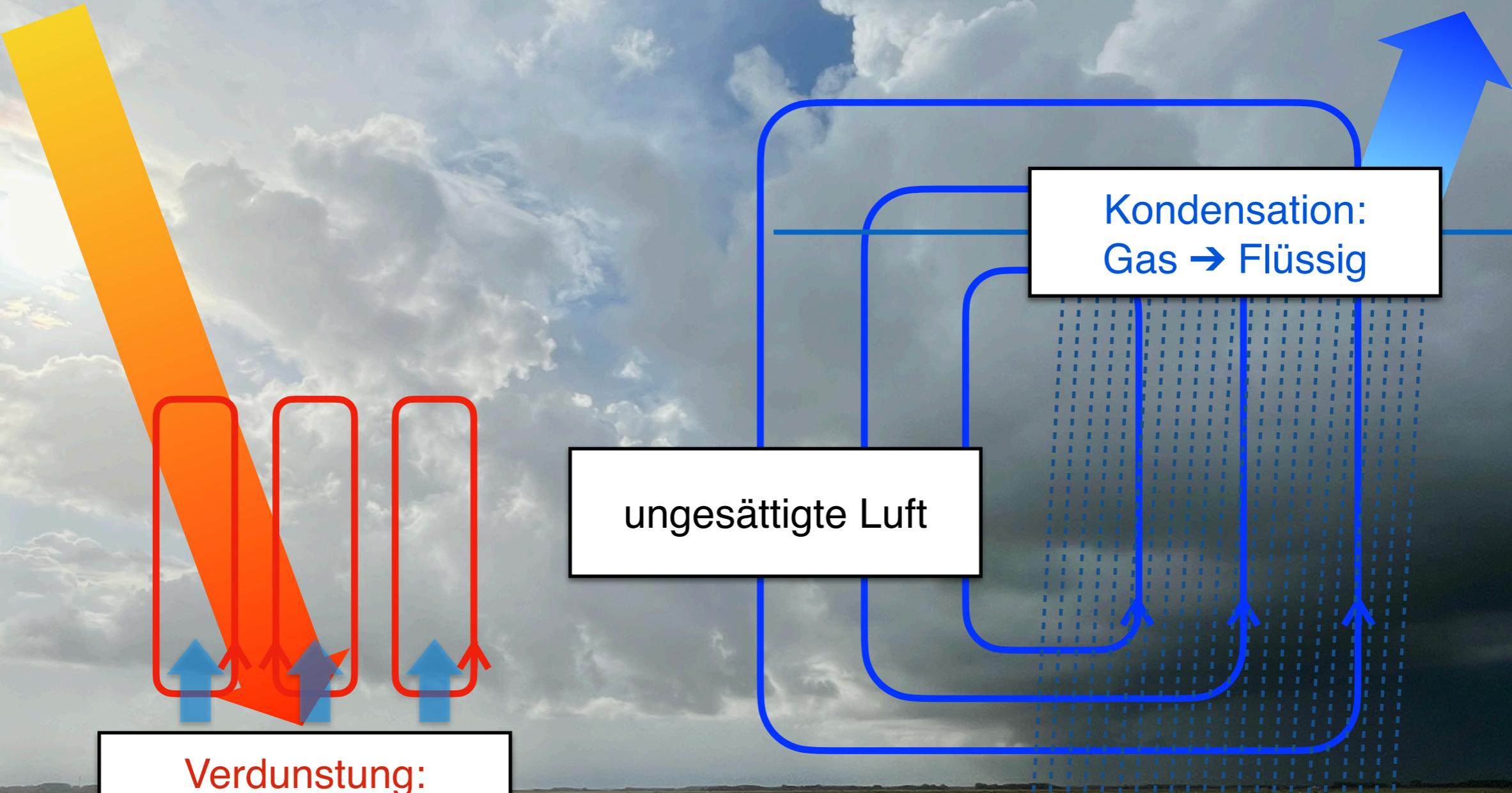
Umrechnung mit latenter Verdunstungswärme

1  $\text{mm Tag}^{-1} \approx 30 \text{ W m}^{-2}$

88  $\text{W m}^{-2}$

Thermodynamik x 2  
(Bewegung, Sättigung)  
bestimmt max.  
Verdunstungsrate  
 $\approx 1/2 \times \text{Solarstrahlung}$

# Niederschlagsphase



Verdunstung:  
Flüssig → Gas

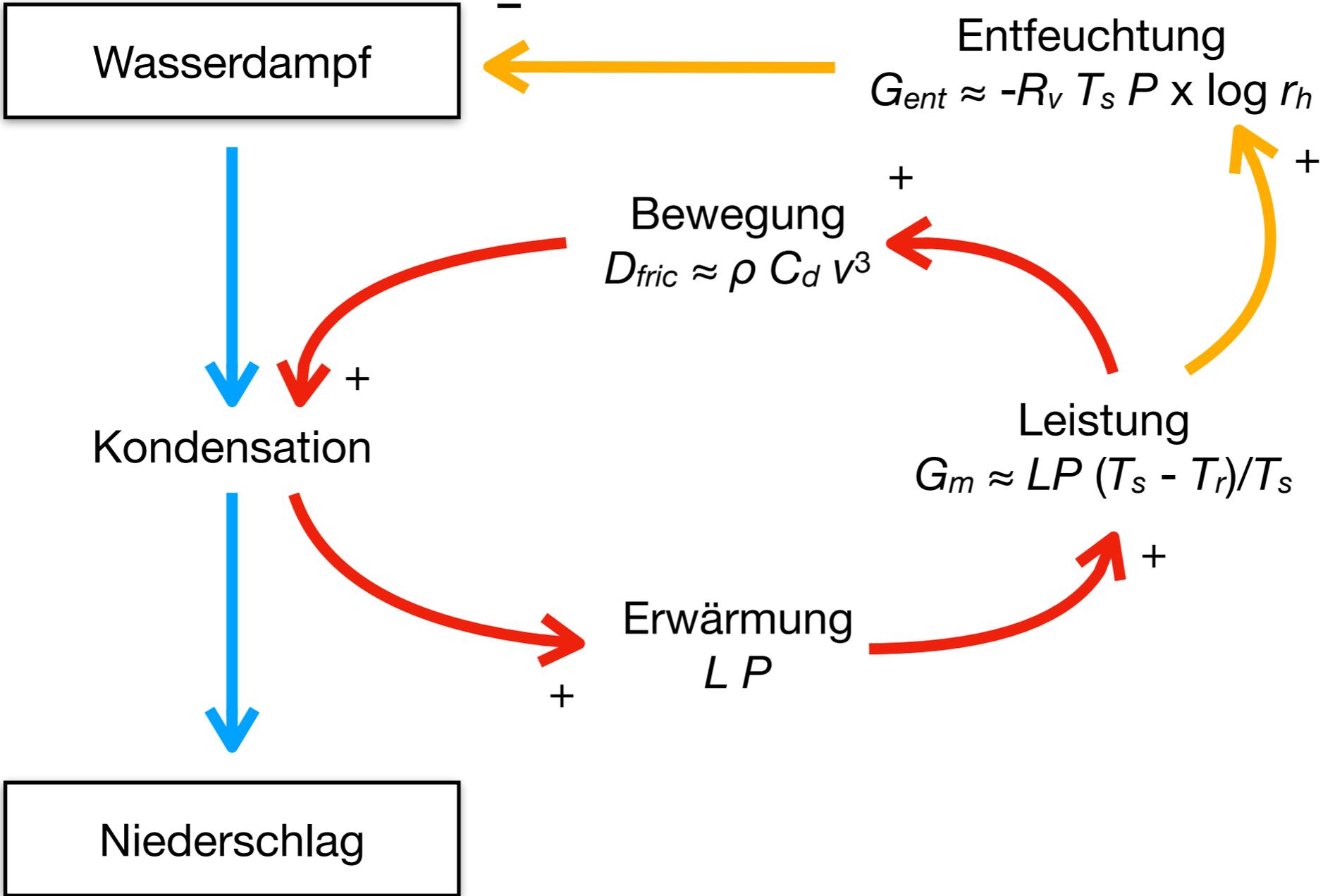
ungesättigte Luft

Kondensation:  
Gas → Flüssig

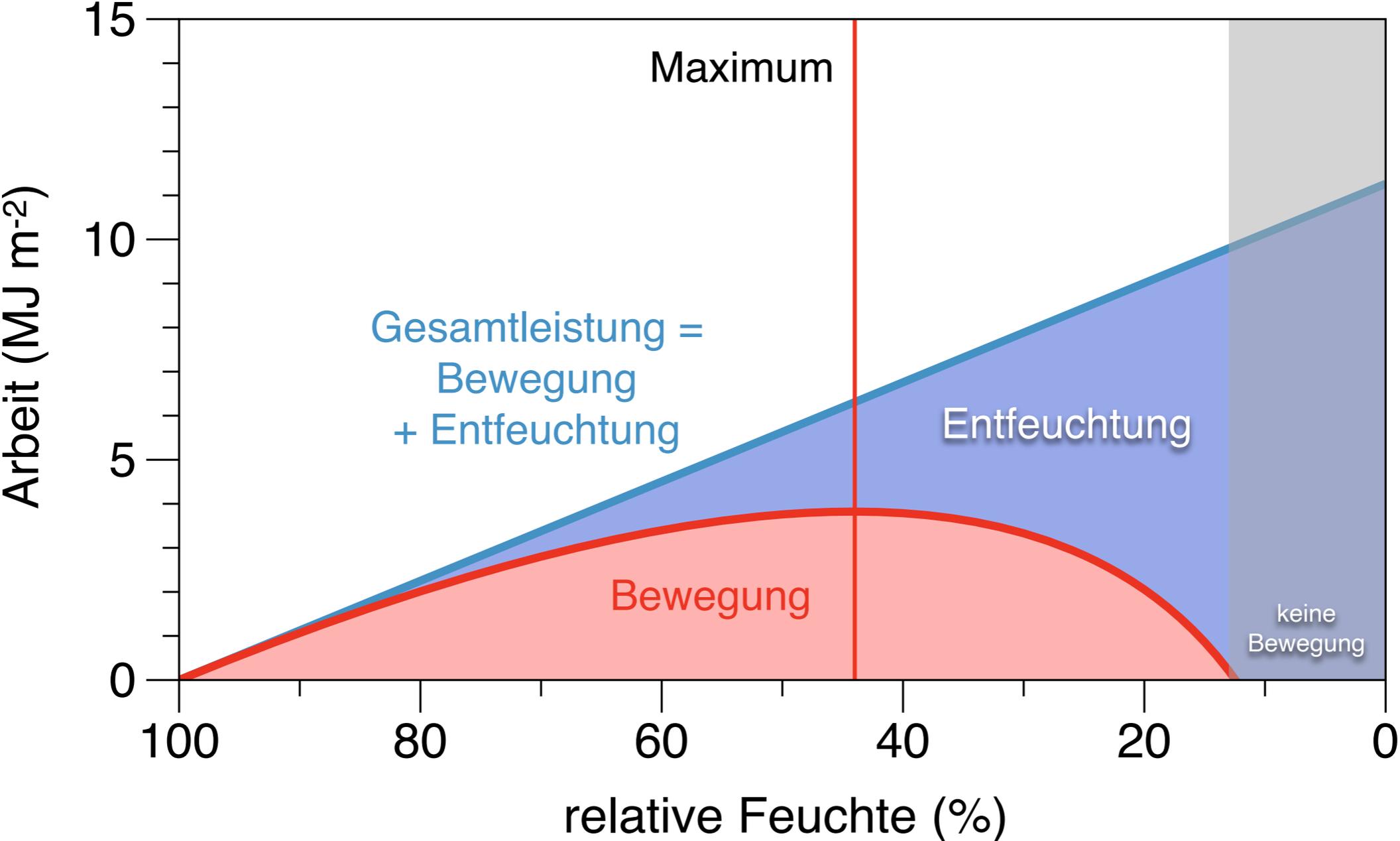
Leistung aus Solarstrahlung:  
Auftrieb transportiert  
warme, feuchte Luft

Leistung aus Kondensation:  
Auftrieb transportiert  
und entfeuchtet Luft

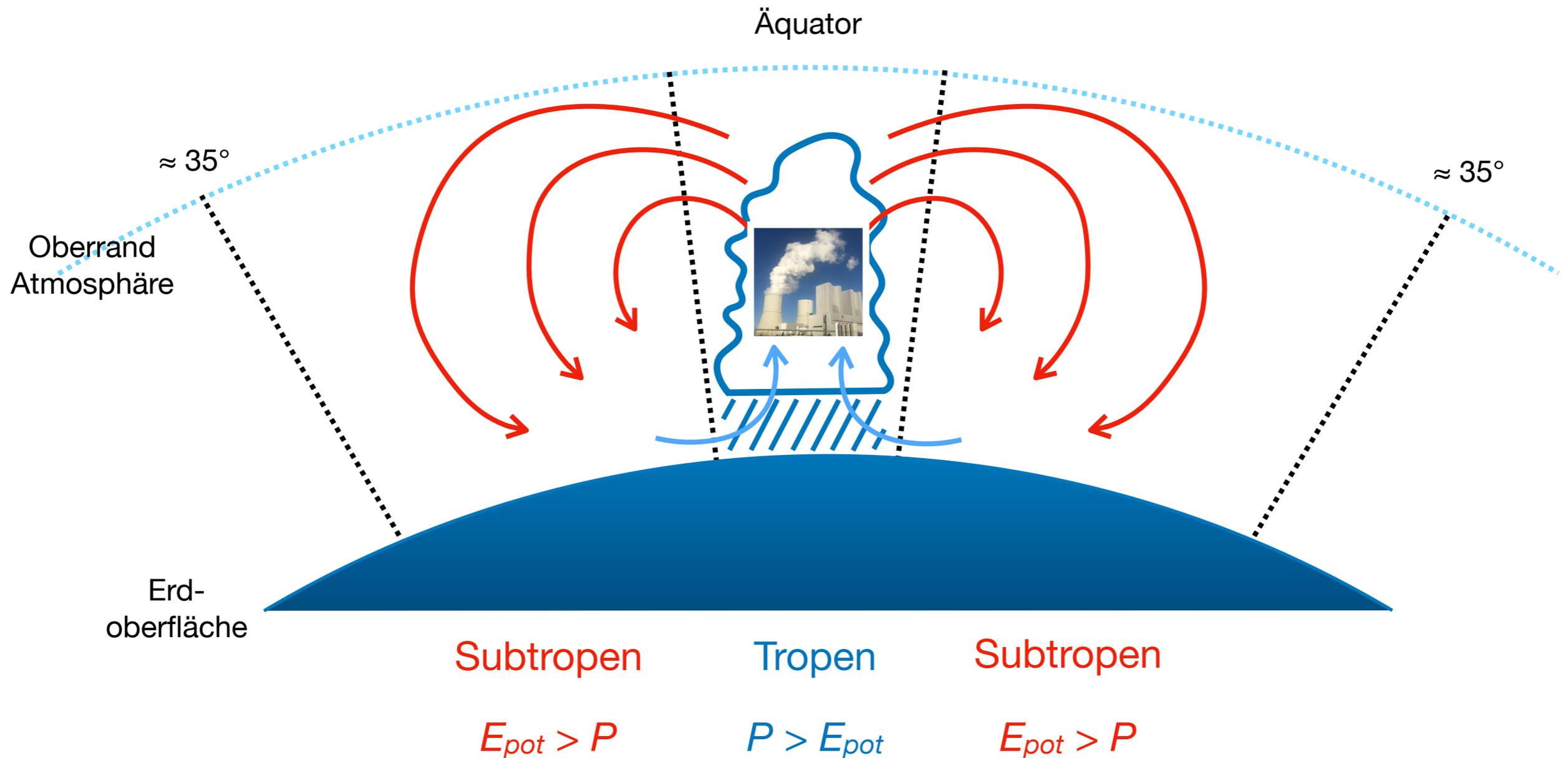
# Niederschlag und Feedbacks auf Leistung



# Thermodynamische Grenze des Niederschlags



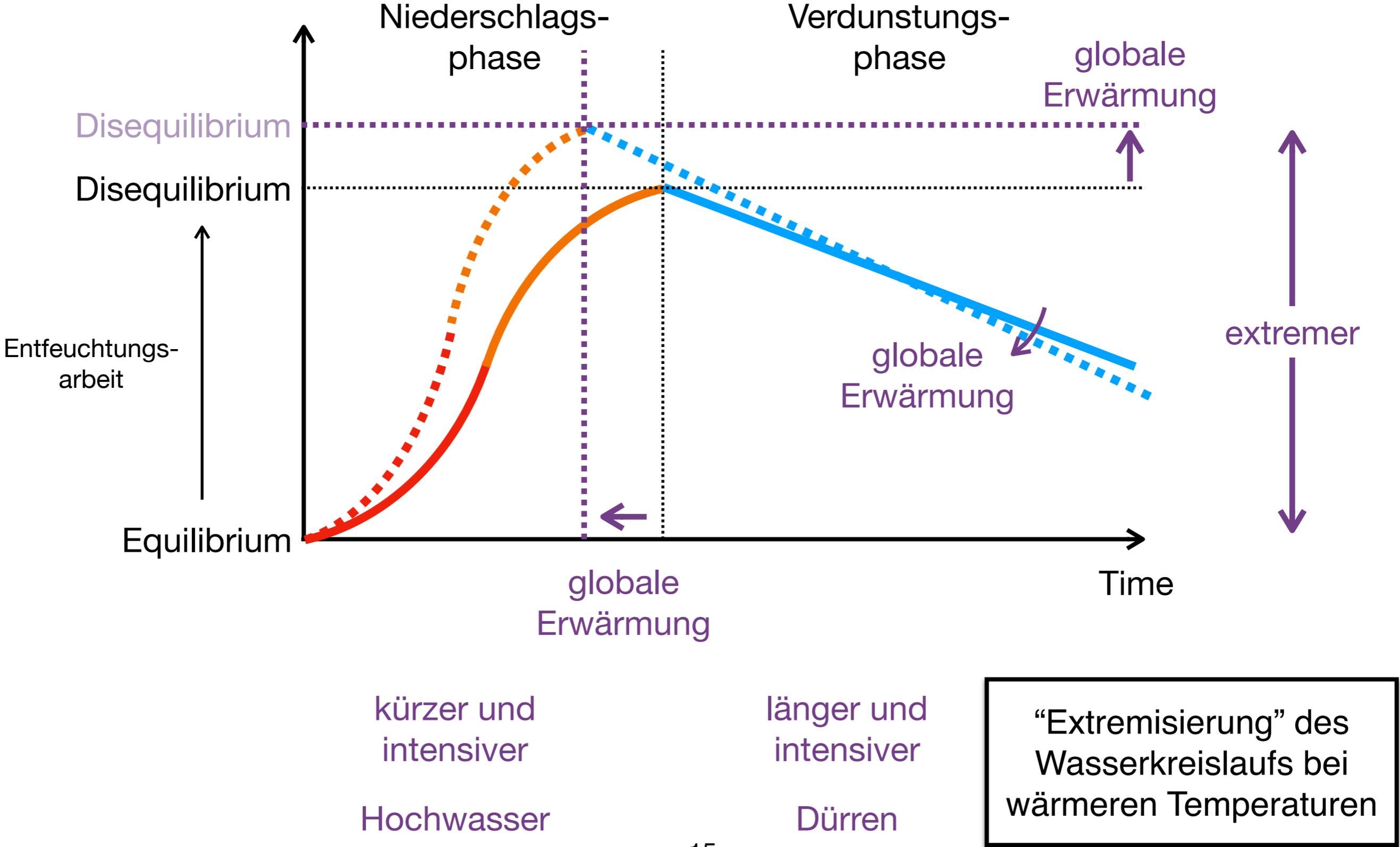
# Feuchtes Kraftwerk und tropische Zirkulation



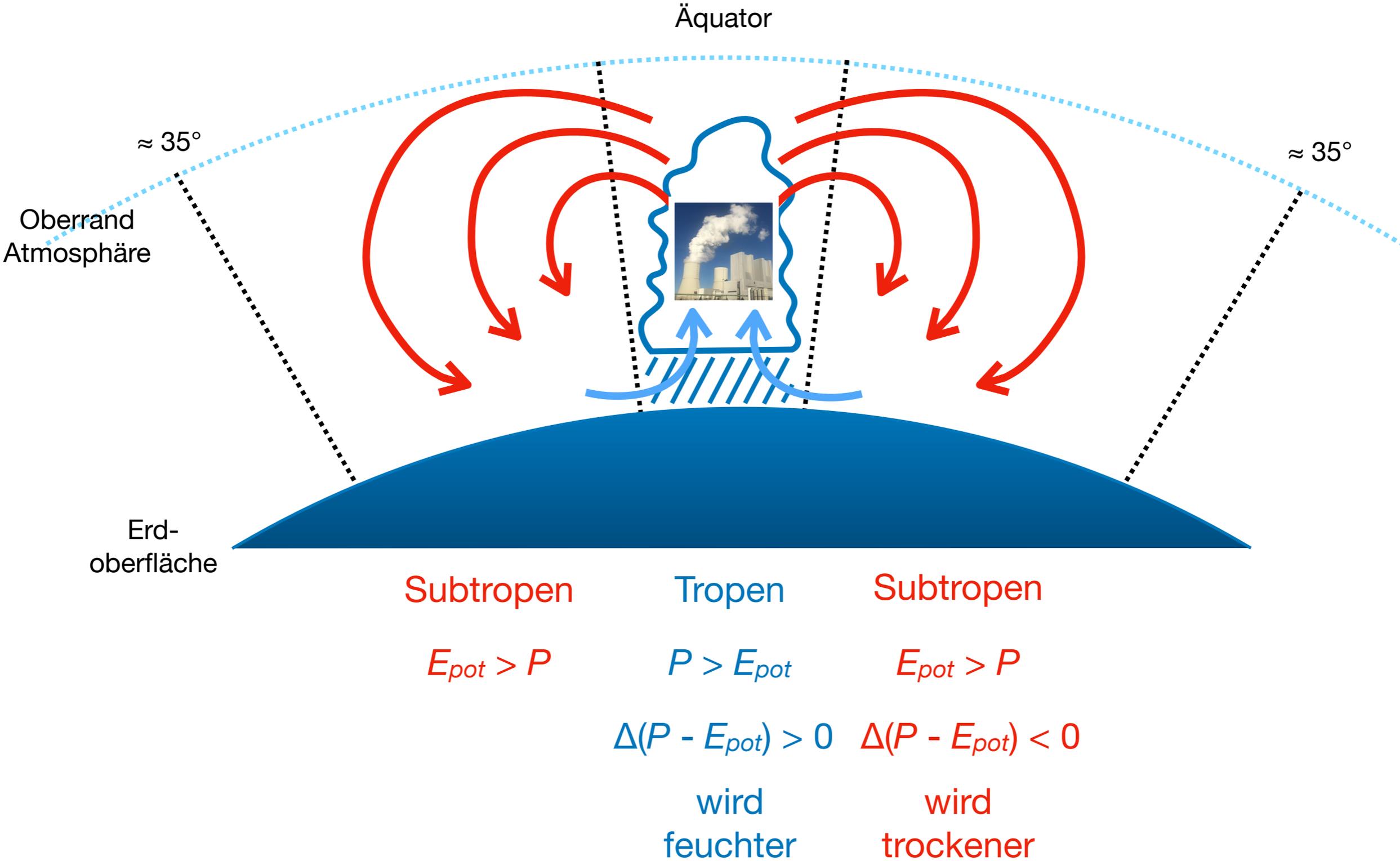
sensibler Wärmefluss  $\approx 20 \text{ W m}^{-2}$

tropischer Niederschlag:  $8 \text{ mm d}^{-1} \times 30 \text{ W m}^{-2}/(\text{mm d}^{-1}) \approx 240 \text{ W m}^{-2}$

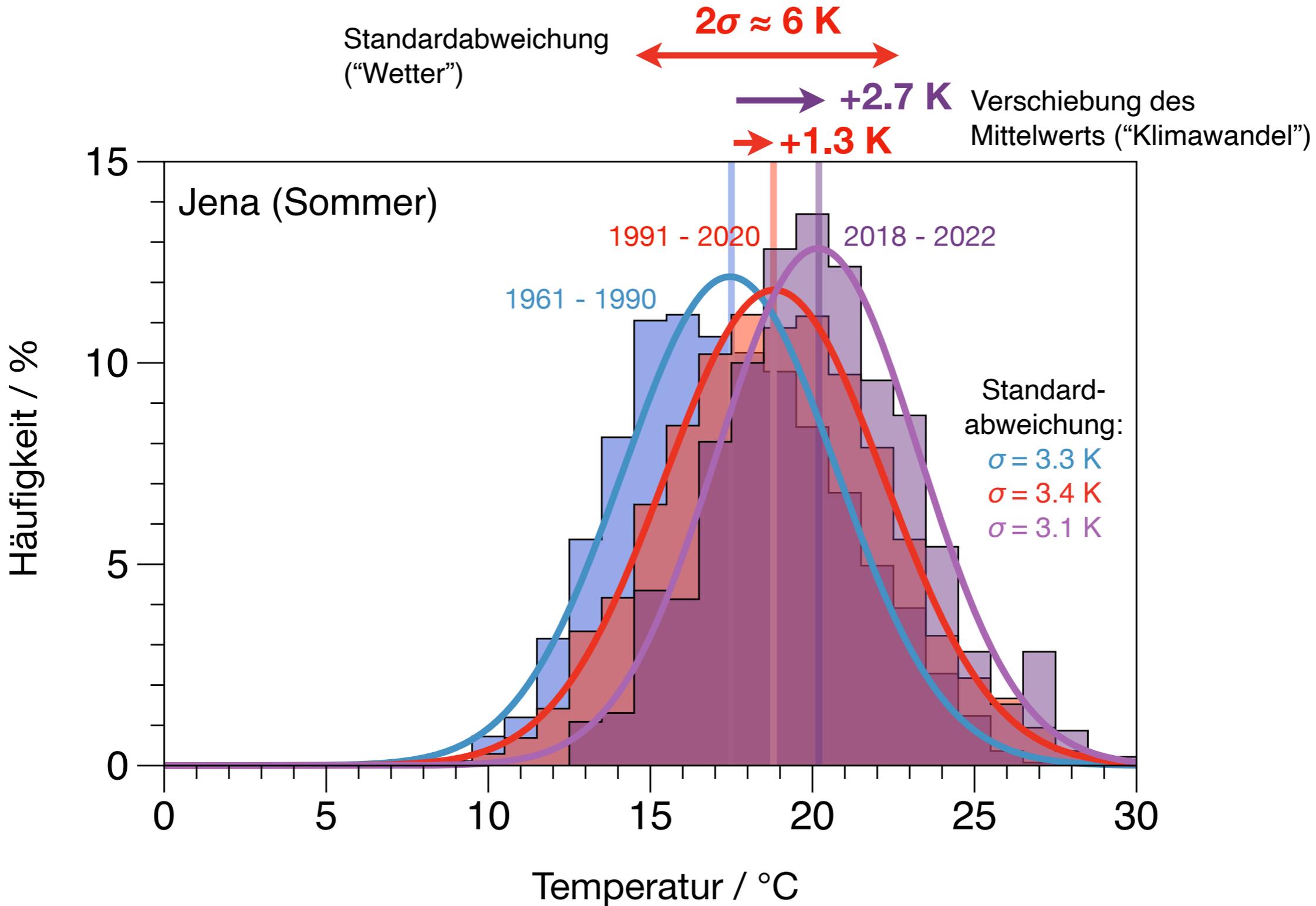
# Wasserkreislauf und Klimawandel



# Klimawandel: "Wet gets wetter" Hypothese



# Klimawandel in Deutschland



# Mittlere Temperatur Deutschlands aus Oberflächenenergiebilanz

Solarstrahlung      atmosphärische Gegenstrahlung



$$R_s (1 - a) + R_{l,down} = \sigma T^4 + H + LE$$

Erwärmung durch Absorption

≈ 120 W m<sup>-2</sup>

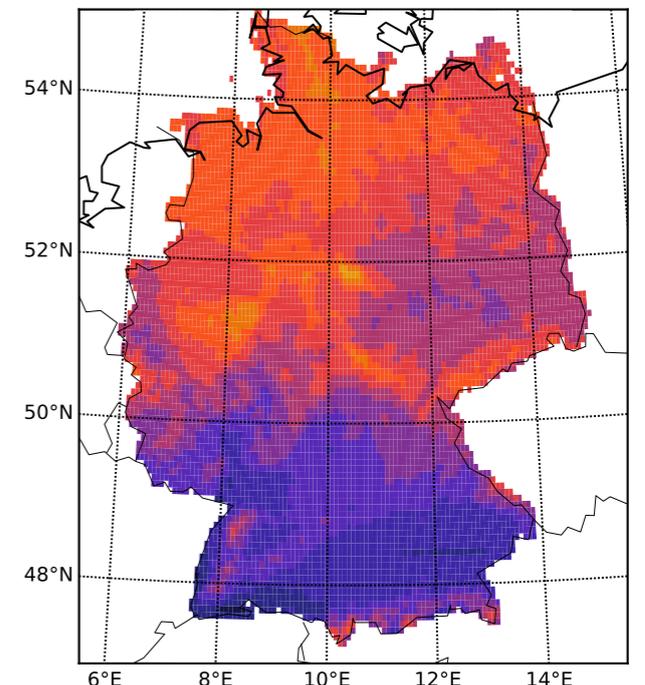
Kühlung

durch Emission      durch Bewegung

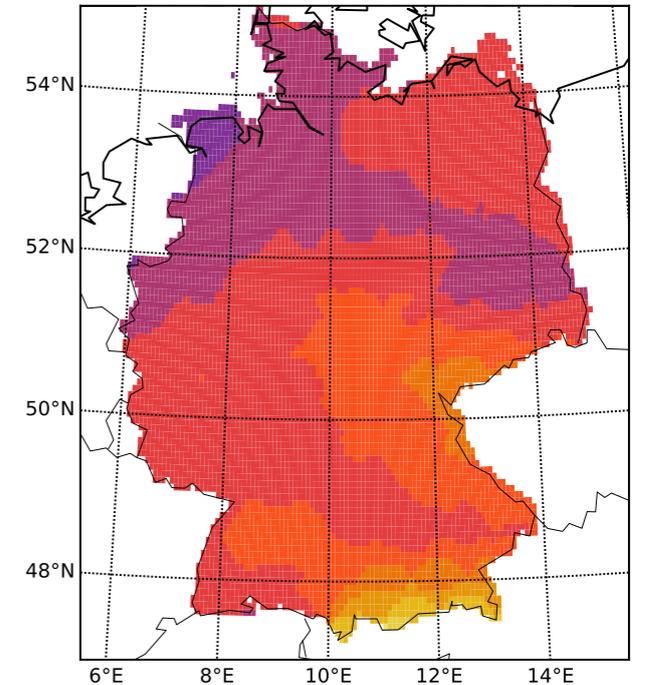
≈ 310 W m<sup>-2</sup>      ≈ 370 W m<sup>-2</sup> (T<sub>s</sub> ≈ 11°C)      ≈ 60 W m<sup>-2</sup>

$$120 \text{ W m}^{-2} = 60 \text{ W m}^{-2} + 60 \text{ W m}^{-2}$$

Erwärmung durch Absorption von Solarstrahlung      Nettokühlung durch Emission von terr. Strahlung      Nettokühlung durch turbulente Wärmeflüsse



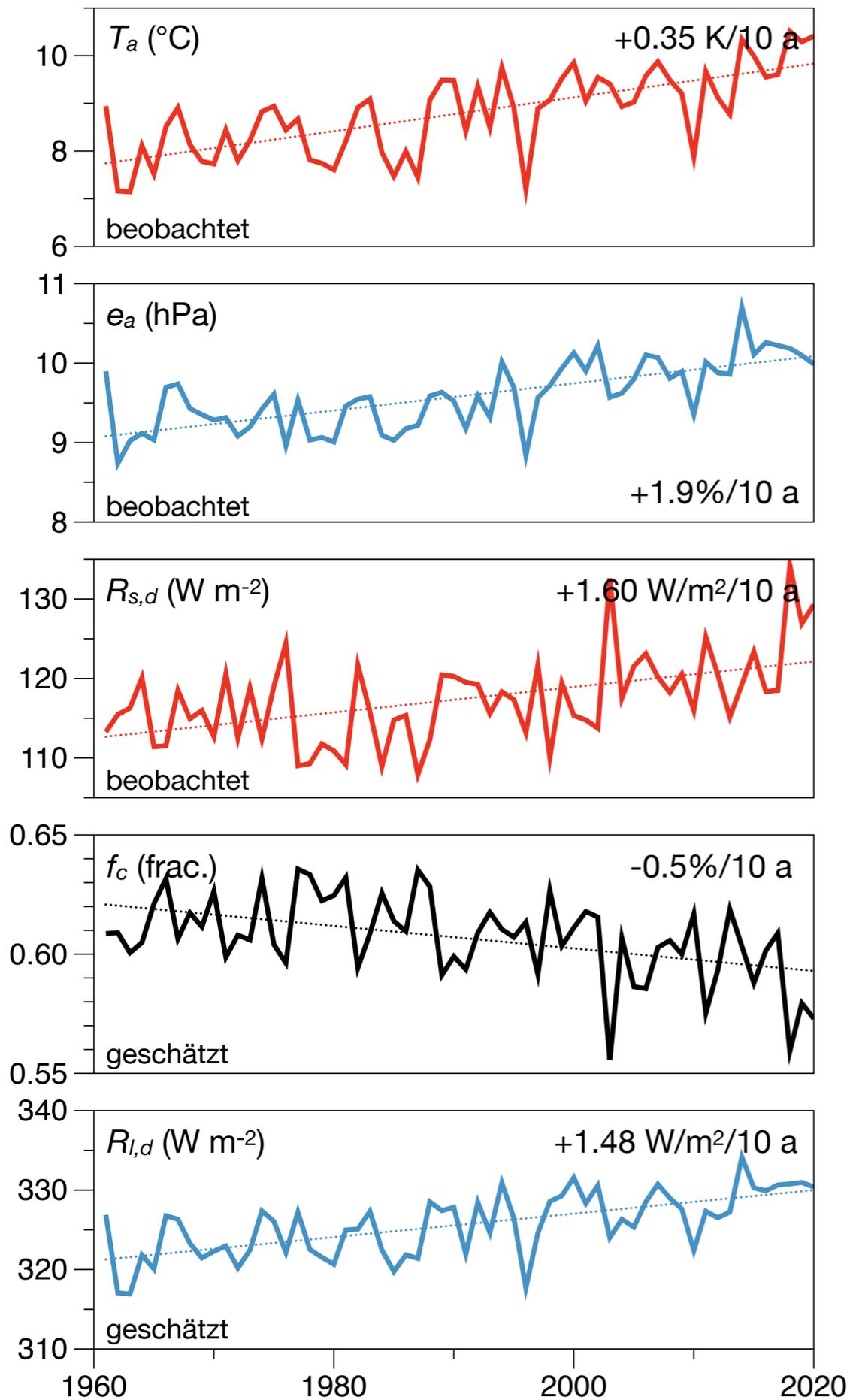
Solarstrahlung / W m<sup>-2</sup> EUMETSAT



atmosphärische Gegenstrahlung / W m<sup>-2</sup> NASA-CERES

σ: Stefan-Boltzmann Konstante (5.67 x 10<sup>-8</sup> W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)

Mittel über Deutschland



DWD-HYRAS (Wetterstationen):

Lufttemperatur ( $T_a$ )

Wasserdampf Partialdruck ( $e_a$ )

Globalstrahlung ( $R_{s,d}$ )

Schätzung des Bewölkungsgrads über Crawford & Duchon (1999, empirisch)

$$f_c = 1 - R_{s,d} / R_{pot}$$

$R_{s,d}$ : Globalstrahlung  
 $R_{pot}$ : potenzielle Strahlung  
 $f_c$ : Bewölkungsgrad

Schätzung der atmosphärischen Gegenstrahlung über Brutsaert (1975) + CD99

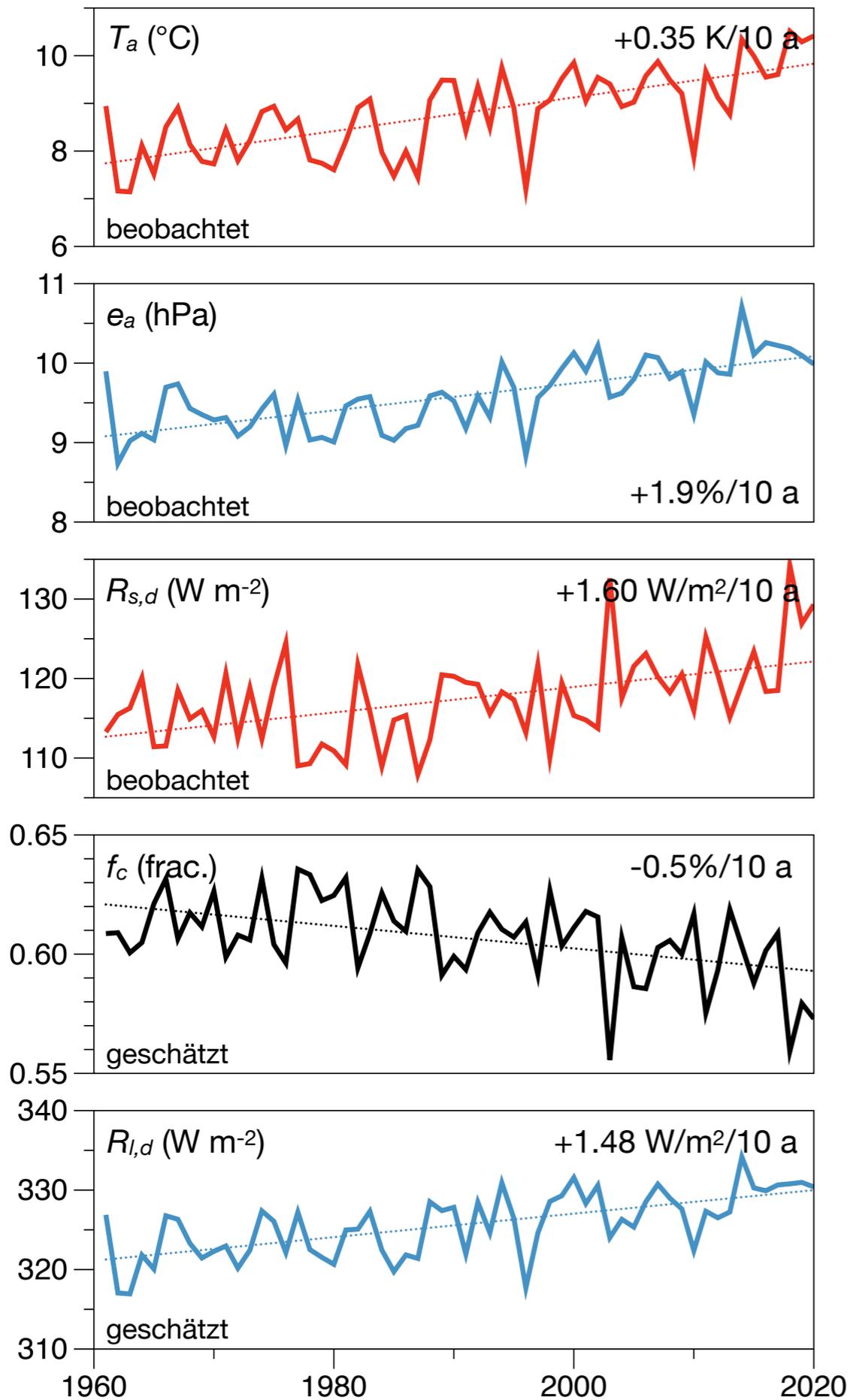
$$\epsilon_{cs} = 1.24 \times (e_a / T_a)^{1/7}$$

$$\epsilon = f_c + (1 - f_c) \times \epsilon_{cs}$$

$$R_{l,d} = \epsilon \times \sigma T_a^4$$

$\epsilon_{cs}$ : wolkenfreie "Emissivität"  
 $\epsilon$ : "all-sky" Emissivität  
 $R_{l,d}$ : atmosphärische Gegenstrahlung

Mittel über Deutschland



Energiebilanz der Oberfläche über Deutschland:

$$R_s + R_{l,d} = \sigma T_s^4 + H + LE$$

Linearisierung der Emission (“Taylor Entwicklung”):

$$\sigma T_s^4 \approx \sigma T_{s,avg}^4 + (4 \sigma T_{s,avg}^3) \Delta T$$

$$k_r = 4 \sigma T_{s,avg}^3 \approx 5.14 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Abschätzung für  $\Delta T$  über 10 Jahre:

$$\Delta R_s + \Delta R_{l,d} \approx (1.4 + 1.5) \text{ W m}^{-2} \approx 2.9 \text{ W m}^{-2}$$

$$\Delta T_s = (\Delta R_s + \Delta R_{l,d}) / 2 k_r \text{ (max. power)}$$

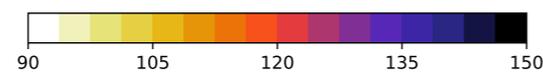
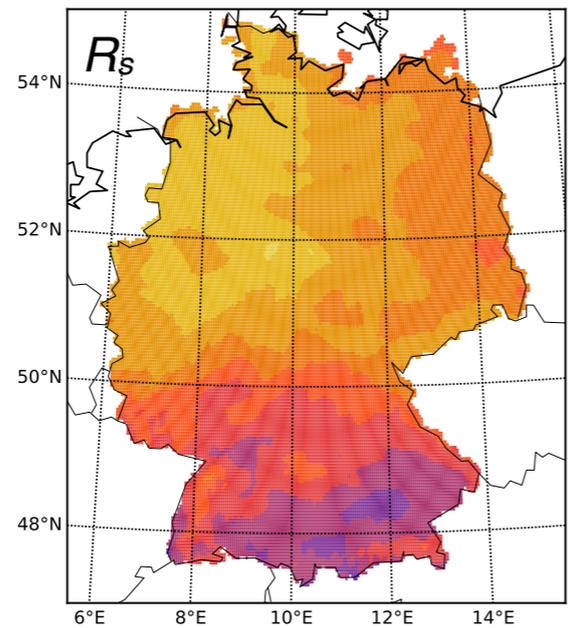
$$\Delta T_s = (2.9 \text{ W m}^{-2}) / (10.3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}) = +0.3 \text{ K}$$

Strahlungstrends erklären Erwärmung  
Trend in Solarstrahlung verdoppelt  $\Delta T$

# Wasserkreislauf in Deutschland

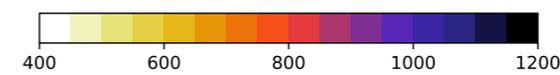
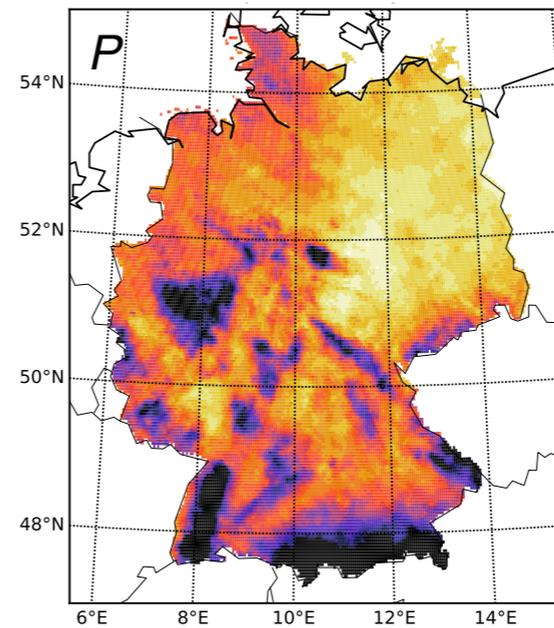
Klimatologie 1961-1990

Absorption von  
Solarstrahlung  $R_s$



Solarstrahlung /  $W\ m^{-2}$

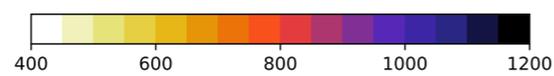
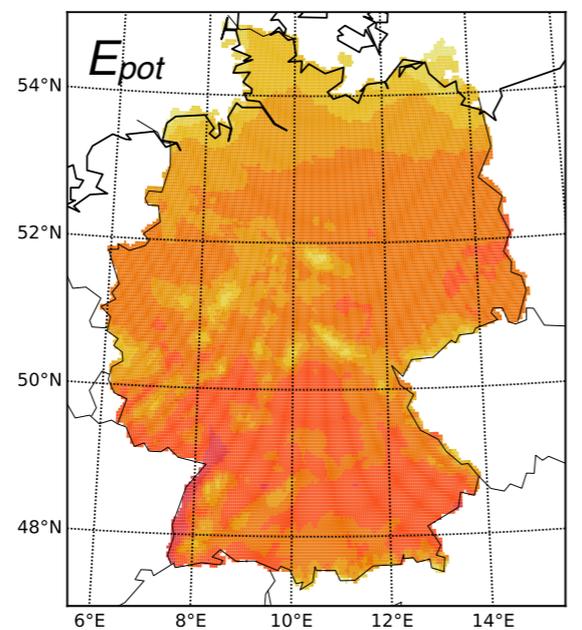
Niederschlag  $P$



Niederschlag /  $mm\ Jahr^{-1}$

potenzielle  
Verdunstung  $E_{pot}$

berechnet nach Hargreaves  
mit  $T_a$  und  $T_{a,max} - T_{a,min}$   
 $800\ mm\ Jahr^{-1} \approx 64\ W\ m^{-2}$



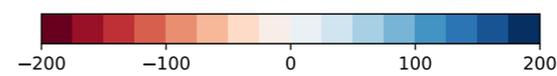
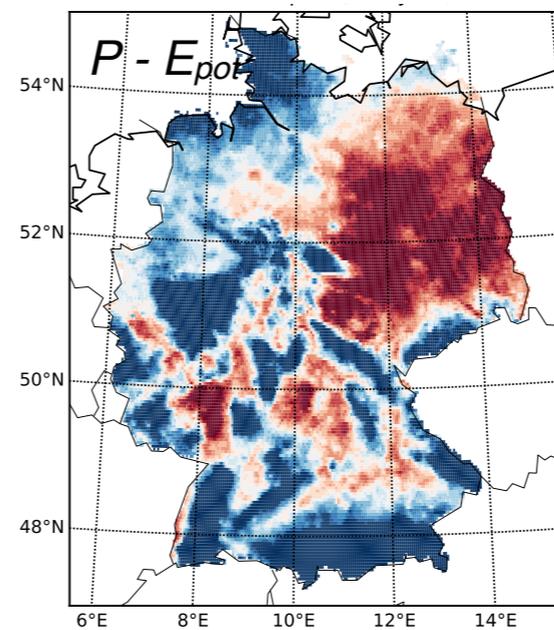
potenzielle Verdunstung /  $mm\ Jahr^{-1}$

klimatologischer  
Wasserüberschuss

$$P - E_{pot}$$

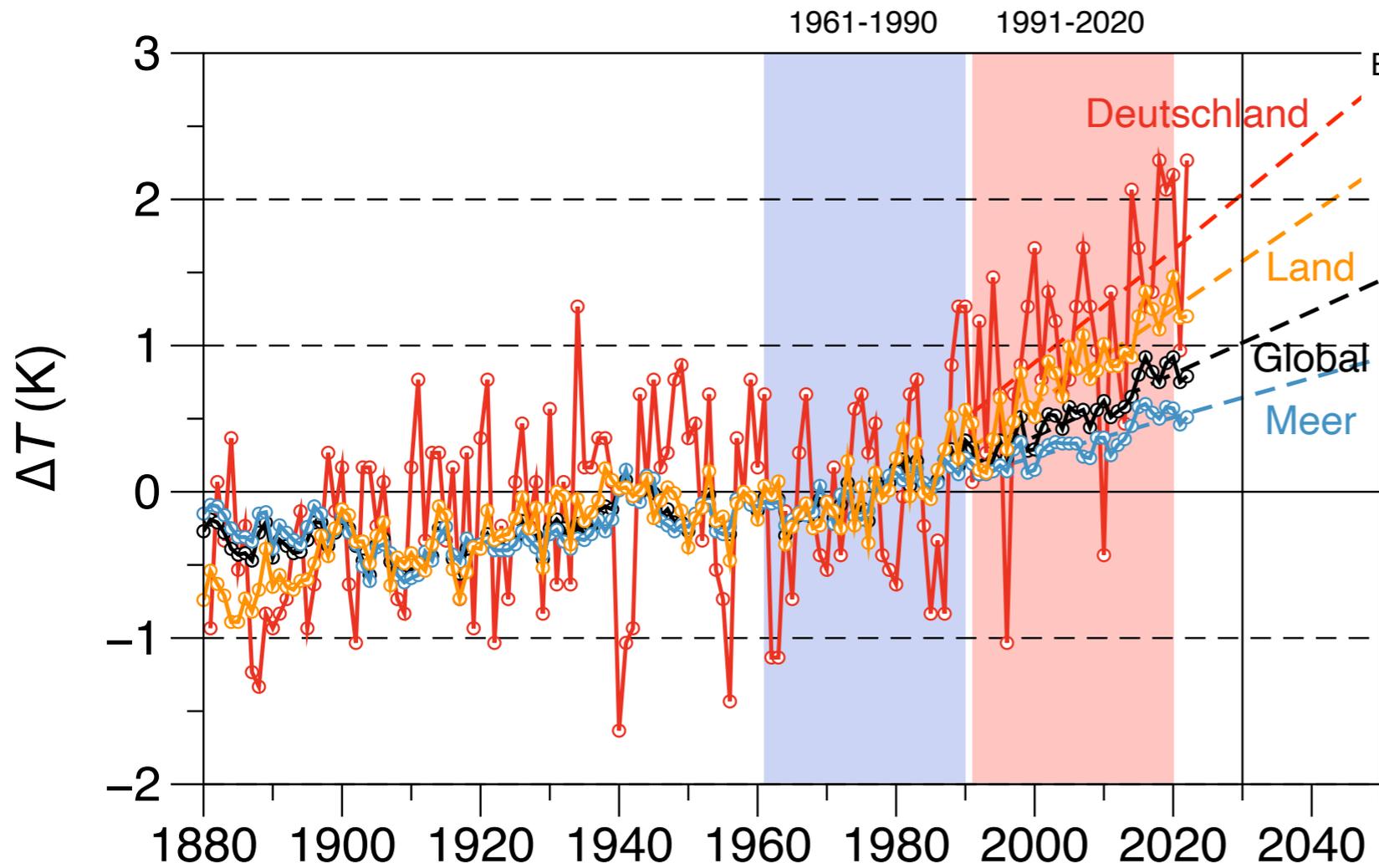
$E_{pot} > P$ : arid

$E_{pot} < P$ : humid



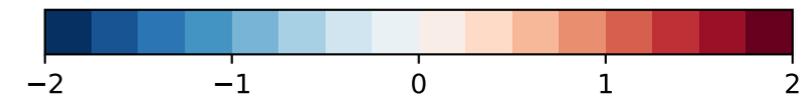
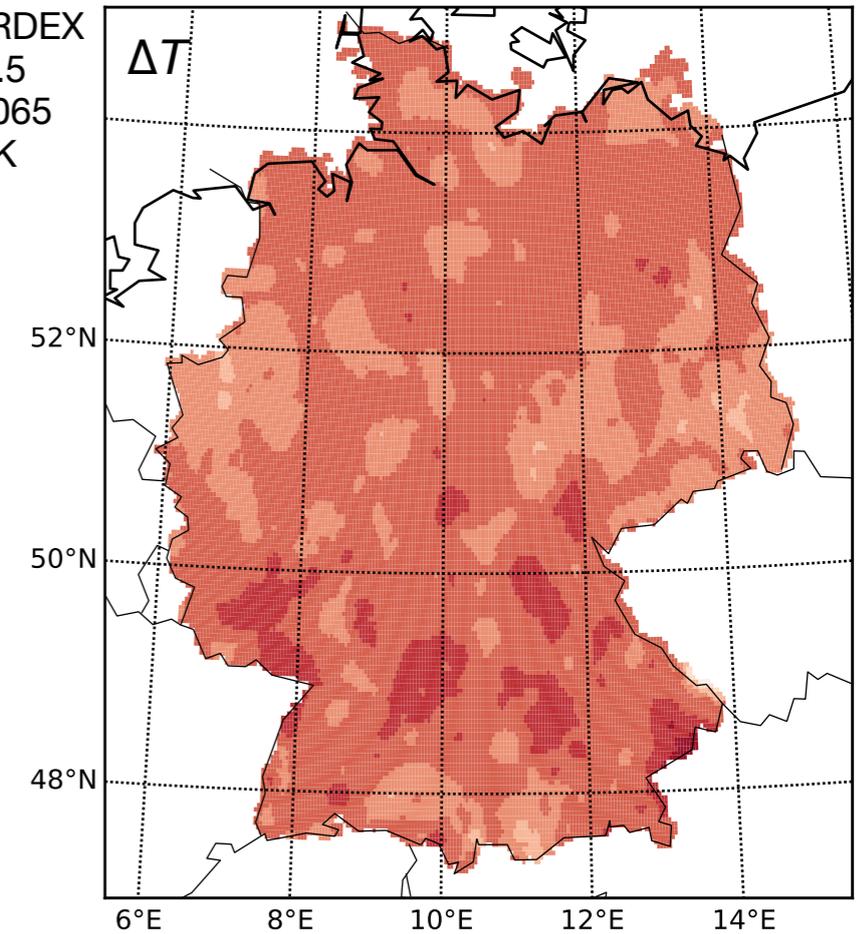
Überschuss /  $mm\ Jahr^{-1}$

# Klimawandel in Deutschland



## Temperaturunterschied

1991-2020 minus 1961-1990

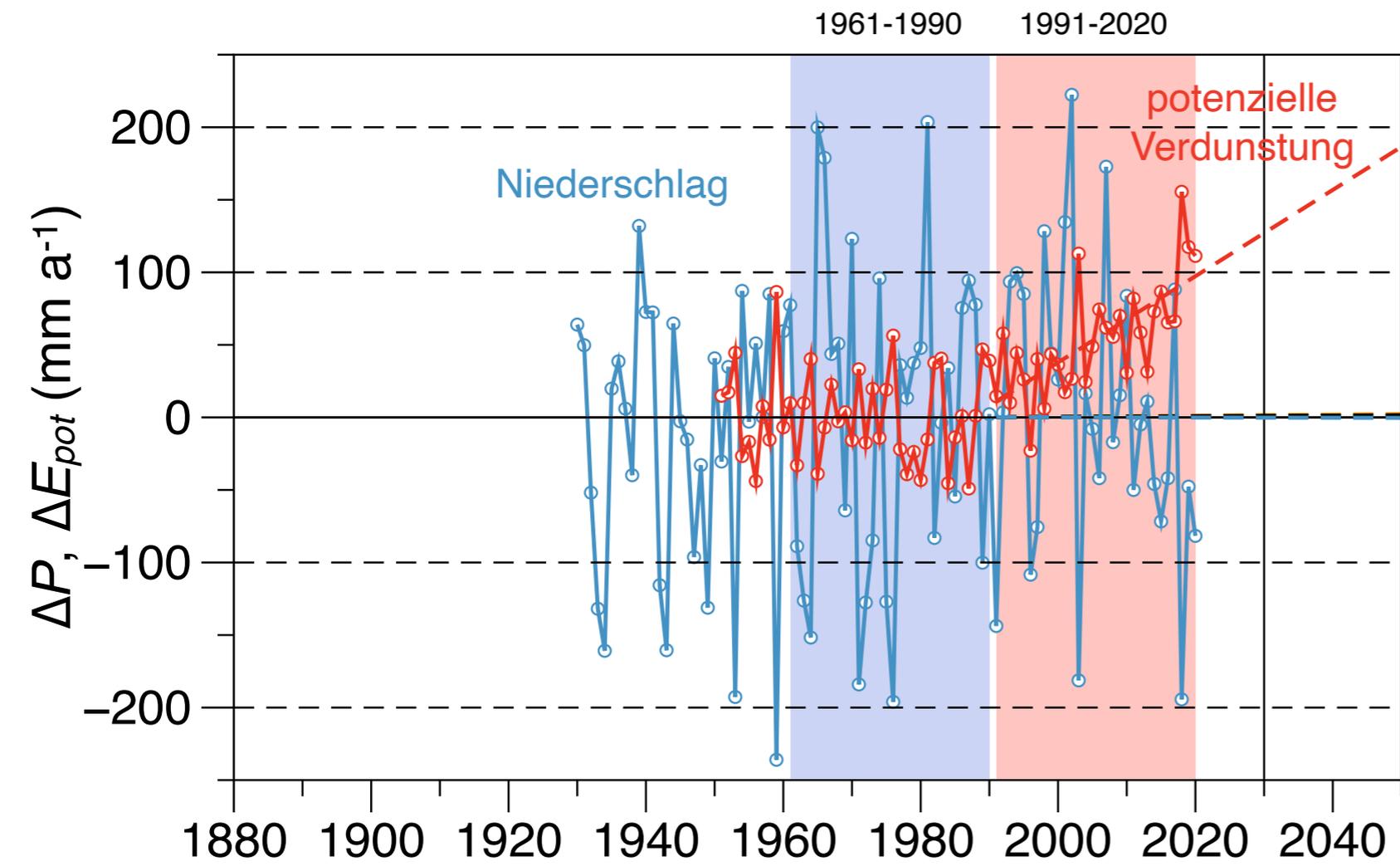


$\Delta$  Temperatur / K

$\Delta T \approx +1$  K

Stärkere Erwärmung  
in Deutschland als  
über Land und global

# Änderungen im Wasserkreislauf

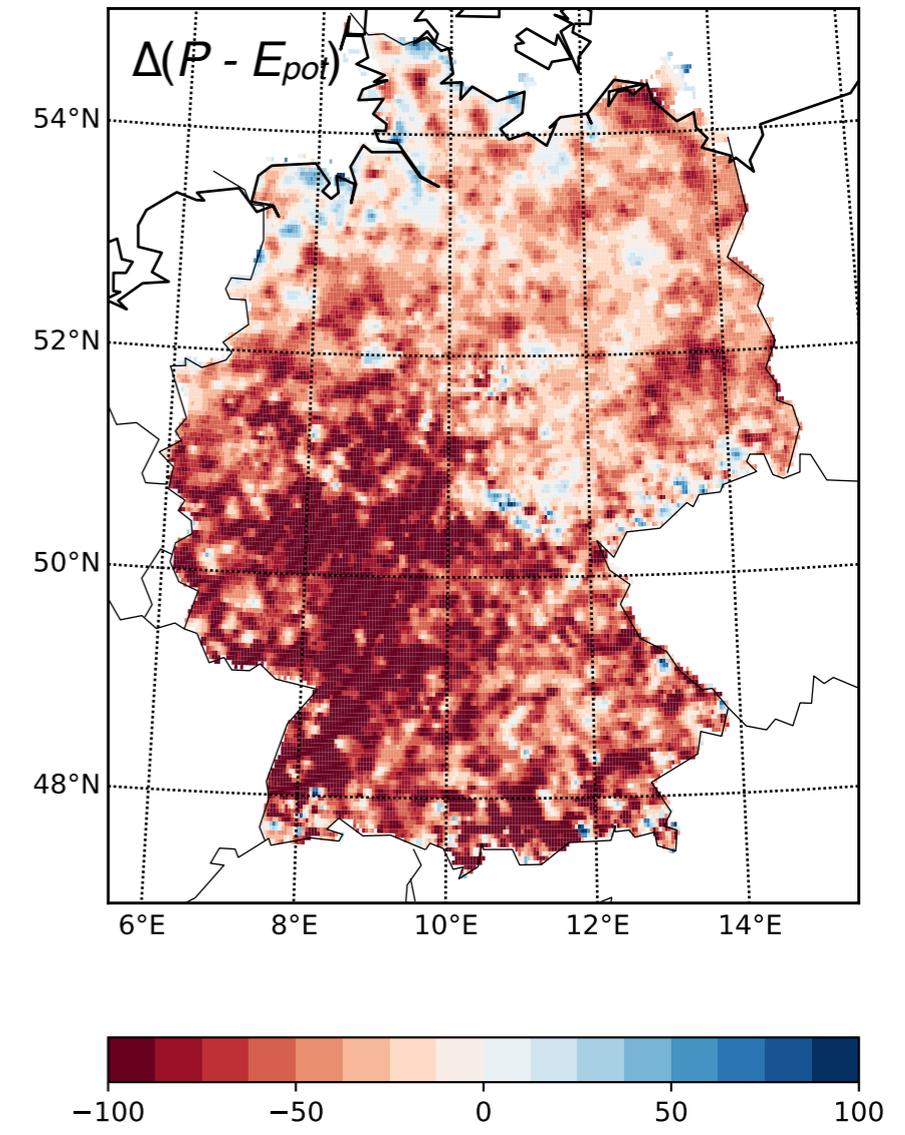


Potenzielle Verdunstung über Hargreaves in  $W\ m^{-2}$ :  
 $LE_{pot} \approx 0.0023 \times R_{pot} \times (T_a + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5}$

Frühjahr 2024:  
 $\Delta T = +3.1\ K$   
 $\Delta P = +49\ mm$

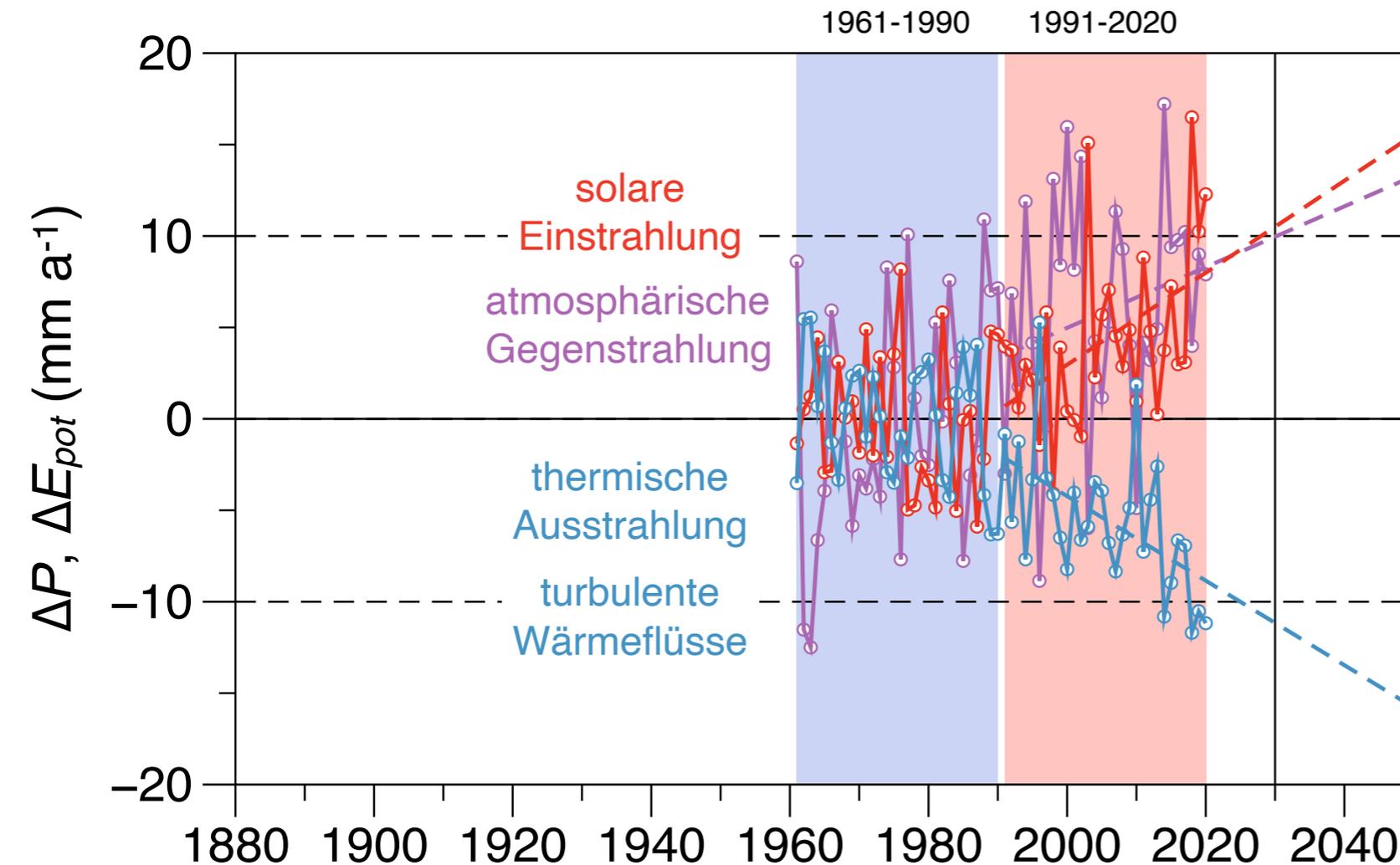
Deutlicher Trend in der potenziellen Verdunstung

Unterschied in  $P - E_{pot}$   
 1991-2020 minus 1961-1990



$\Delta$ Überschuss /  $mm\ Jahr^{-1}$   
 $\Delta(P - E_{pot}) \approx -50\ mm\ a^{-1}$

# Änderungen in der Energiebilanz



## Erwärmung:

durch Gegenstrahlung:	+ 6.1 W m <sup>-2</sup>
durch Solarstrahlung:	+ 5.1 W m <sup>-2</sup>
Gesamt:	+ 11.2 W m <sup>-2</sup>

## Kühlung (Aufteilung nach max. power):

durch Ausstrahlung:	+ 5.6 W m <sup>-2</sup>
durch turbulente Flüsse:	+ 5.6 W m <sup>-2</sup>

Aufteilung in <i>LE</i> ca. 70%	+ 3.9 W m <sup>-2</sup>
entspricht $\Delta E_{pot}$ von	+ 50 mm a <sup>-1</sup>
über Hargreaves:	$\Delta E_{pot} \approx 50$ mm a <sup>-1</sup>

Trend in potenzieller Verdunstung ist konsistent mit Energiebilanzänderungen



# Dürren und Hochwasser in Deutschland

Warum der Klimawandel hydrologische  
Extreme verstärkt

## Was erwarten wir?

mehr atmosphärische Gegenstrahlung führt zu höherer  
Temperatur

- mehr Verdunstung durch mehr Energie & Verschiebung
- höherer Sättigungsdampfdruck
- bei Kondensation mehr Leistung, Bewegung,  
und Entfeuchtung
- positiver Feedback auf Niederschlagsbildung
- stärkerer und kürzerer Niederschlag (→ Hochwasser)
- intensivere und längere Trockenperioden (→ Dürren)

## Was wird beobachtet?

- stärkere Erwärmung als global/kontinental
- kein Trend im mittleren Niederschlag
- deutlich verstärkte potenzielle Verdunstung
  
- erklärbar durch Energiebilanz
- stärkeres Treibhaus & Solarstrahlung
- Kurzlebigerer Wolken?

# Artikel in *Physik in unserer Zeit*



DOI: 10.1002/piuz.202401697

## Warum der Klimawandel hydrologische Extreme verstärkt

# Dürren in Deutschland

AXEL KLEIDON

Die wärmeren Temperaturen des globalen Klimawandels verstärken den Wasserkreislauf, Verdunstung und Niederschlag nehmen zu. Aber auch Extremereignisse wie Starkregen, Hochwasser, Trockenperioden und Dürren häufen und intensivieren sich. Wie passt das zusammen? Einfache physikalische Betrachtungen zeigen, welche Faktoren hauptsächlich die Stärke des Wasserkreislaufs im Erdsystem regulieren und wie dies die Wasserverfügbarkeit auf dem Festland bestimmt. Damit lassen sich die beobachteten Änderungen der Wasserbilanz in Deutschland interpretieren und dessen zunehmende Trockenheit erklären.

Die letzten Jahre zeigten in Deutschland außergewöhnlich warme und trockene Sommermonate, die allgemein dem globalen Klimawandel zugeschrieben werden. Aber es gab auch Starkregen, Unwetter und Hochwasser, wie die Katastrophe im Ahrtal. Wie kann es sein, dass der globale Klimawandel sowohl die Dürren verstärkt als auch die Zeiten des Wasserüberschusses? Was auf den ersten Blick widersprüchlich aussieht, kann man recht einfach physikalisch erklären. Dazu sehen wir uns zuerst an, wie der Wasserkreislauf in die Arbeitsweise des Erdsystems eingebunden ist, bevor wir dies auf den globalen Klimawandel anwenden und die Änderungen der Wasserbilanz in Deutschland interpretieren.

Um Dürren, Starkregen und andere Aspekte von hydrologischen Extremen zu verstehen, verbinden wir diese Prozesse mit den Hauptakteuren des Wasserkreislaufs, dem Niederschlag und der Verdunstung. Niederschlag ist einfach wahrzunehmen und gut zu beobachten, auch wenn er räumlich und zeitlich sehr variabel ist. Die Verdunstung hingegen geht schleichend und kontinuierlich voran, ohne dass wir sie bewusst wahrnehmen. Sie entzieht dem Boden das Wasser und bringt es zurück in die Atmosphäre: Der Boden trocknet aus. Vegetation spielt dabei eine wichtige Rolle, da sie mit ihren Wurzelsystemen Wasser aus tieferen Bodenschichten für die Verdunstung entziehen kann – etwas, was blanker Boden oder asphaltierte Flächen nicht leisten können. Eine Trockenperiode ist eine Phase ohne Niederschlag, in der Verdunstung nur dann stattfinden kann, wenn Bodenwasser verfügbar und erreichbar ist. Der Wasserkreislauf wird extremer, wenn diese beiden Flüsse stärker aus der Balance kommen – also wenn Niederschläge sich verstärken, Perioden des Niederschlags kürzer und solche der Trockenheit intensiver und länger werden. Warum aber wird der Wasserkreislauf mit dem Klimawandel variabler und extremer?

Dazu müssen wir uns die Hauptantriebe ansehen und wie sie in das Wirken des Erdsystems als Ganzes eingebunden sind. Der Ausgangspunkt dafür sind die Phasenübergänge von Wasser, insbesondere die Verdunstung, also der Phasenübergang von flüssig zu gasförmig, und die umgekehrte Richtung, die Kondensation von Wasserdampf in flüssiges Wasser (Abbildung 1). Den Referenzzustand setzt dabei das thermodynamische Gleichgewicht von gesättigter Luft. In diesem Zustand kompensieren sich Verdunstung und Kondensation lokal, die Phasenübergänge passieren bei gleicher Temperatur, und die Luft ist gesättigt mit Wasserdampf. Es gibt keine Nettoflüsse von Verdunstung oder Niederschlag, also keine Änderungen des Wasserdampfgehalts, keine zeitliche Variabilität und daher auch keinen Wasserkreislauf.

Der Wasserkreislauf stellt somit ein thermodynamisches Nichtgleichgewicht dar. Das heißt, die Luft ist überwiegend

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2 | Phys. Unserer Zeit

Online-Ausgabe unter: [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)

© 2024 The Authors. Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

Herbst 2024:

Zukünftige Energieversorgung in Deutschland:  
Kann Kernenergie zur Energiewende beitragen? (Nein!)

Videos in Serie auf YouTube  
(Urknall, Weltall, Leben und Videowissen):



Übersicht auf <https://kraftwerk-erde.de/>

Feedback und Anregungen willkommen!  
[akleidon@bgc-jena.mpg.de](mailto:akleidon@bgc-jena.mpg.de)