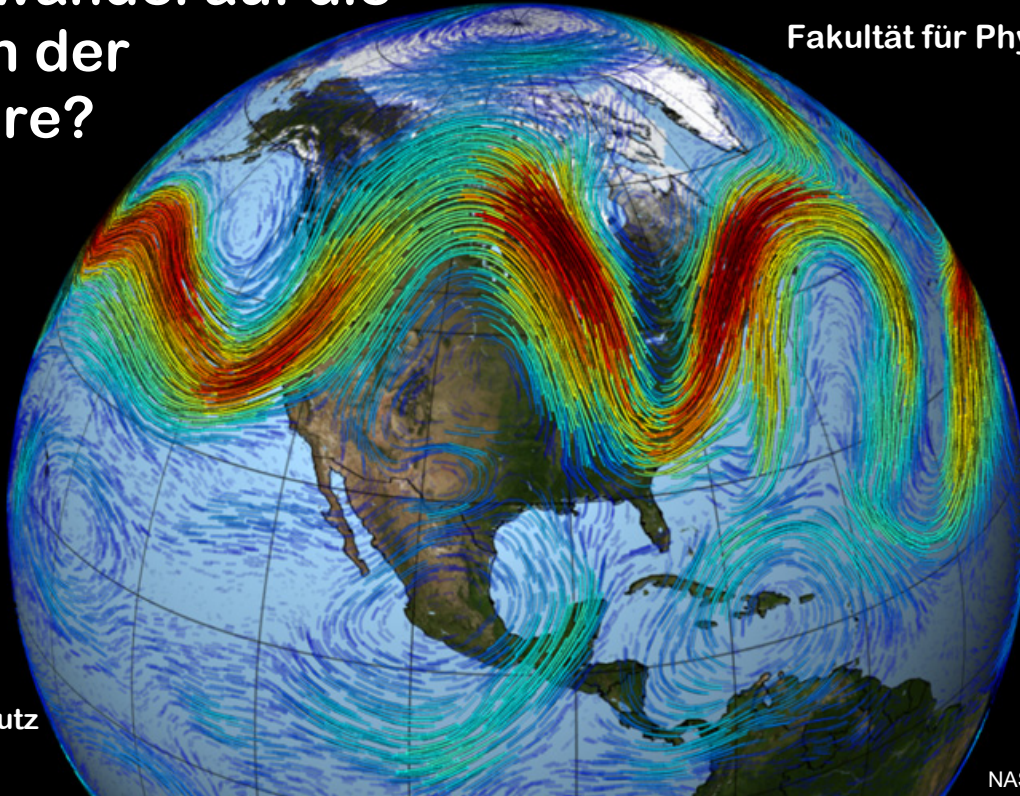


Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Zirkulation der Atmosphäre?

Thomas Birner

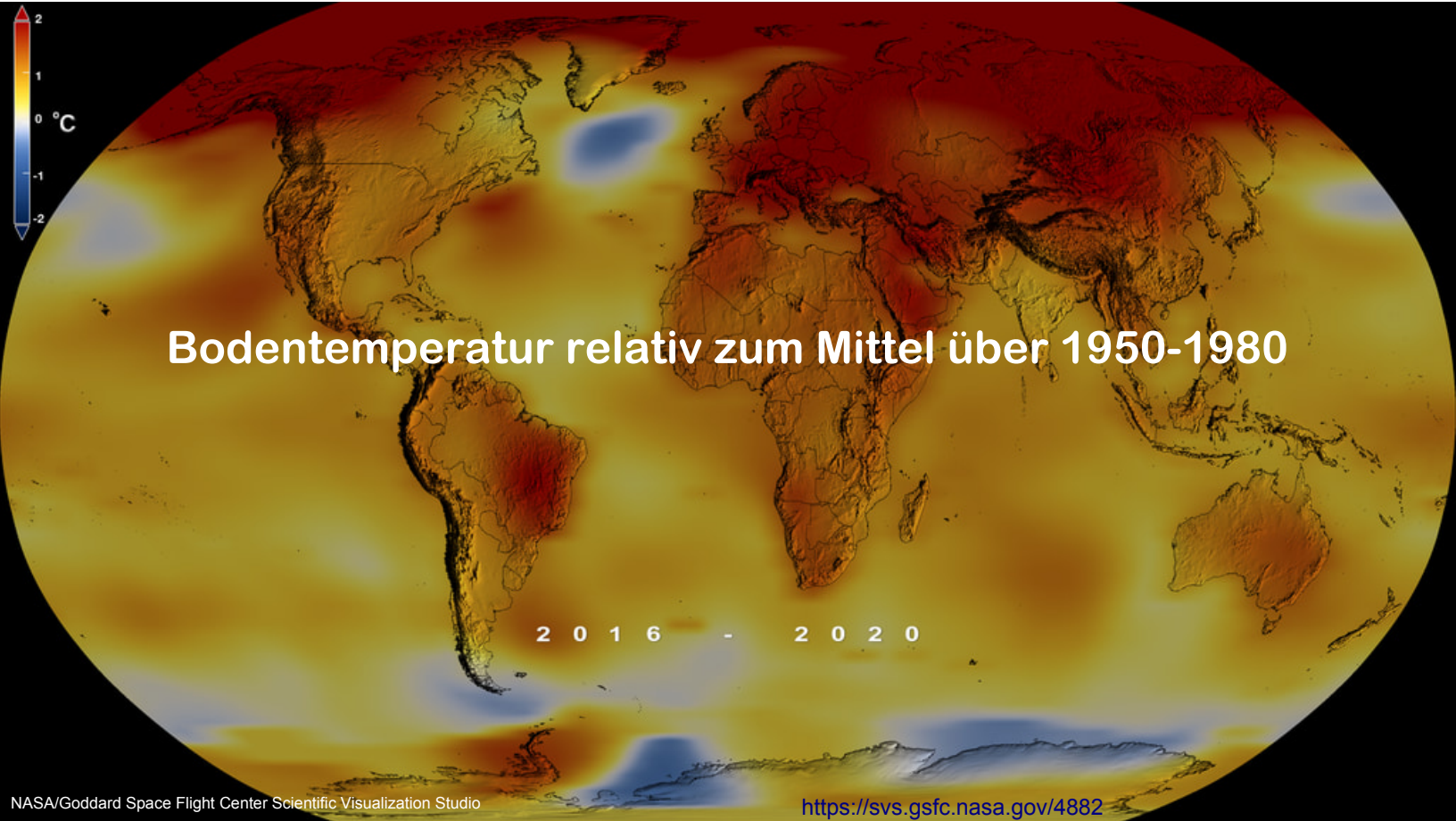
Professor für Theoretische Meteorologie

Fakultät für Physik, LMU München



Ringvorlesung
Bildung für Klimaschutz
12.07.2021

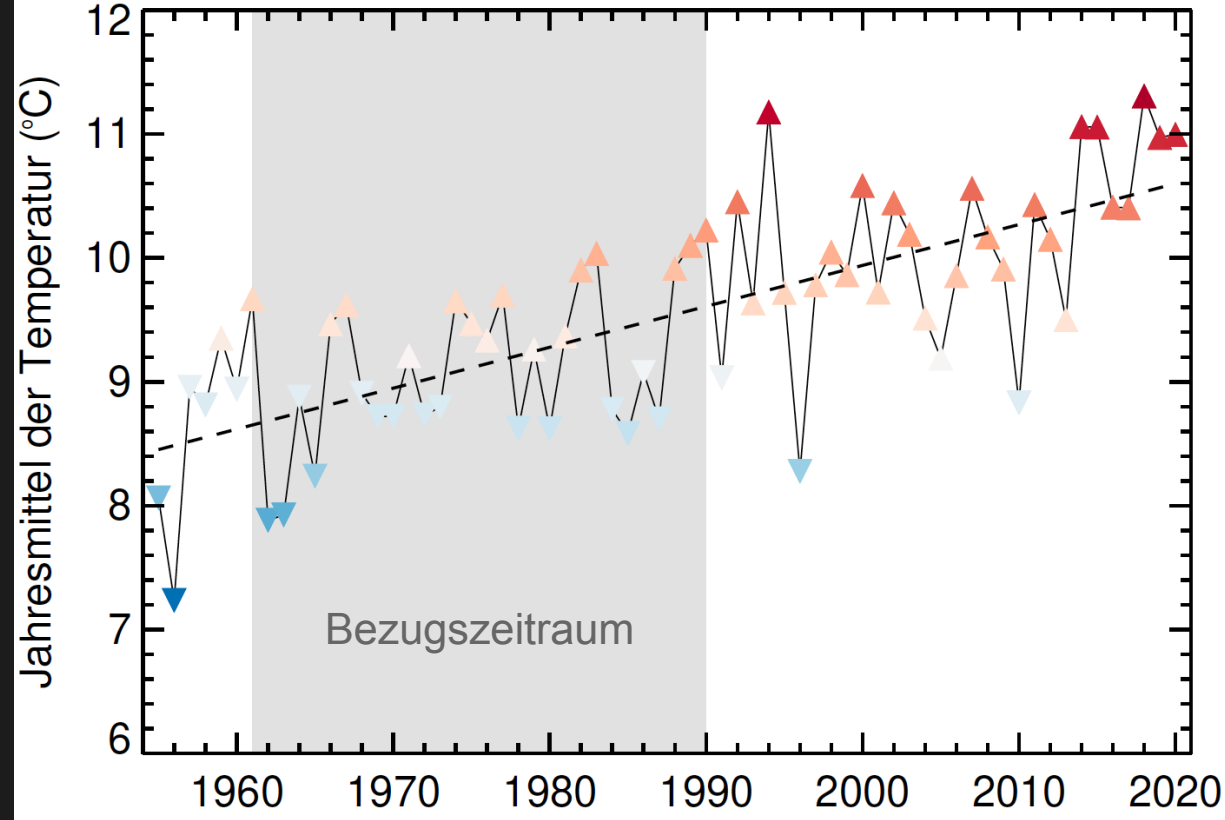
NASA, GSFC



Bodentemperatur relativ zum Mittel über 1950-1980

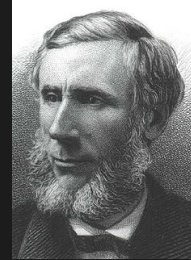
2016 - 2020

Station: Muenchen Stadt, DWD



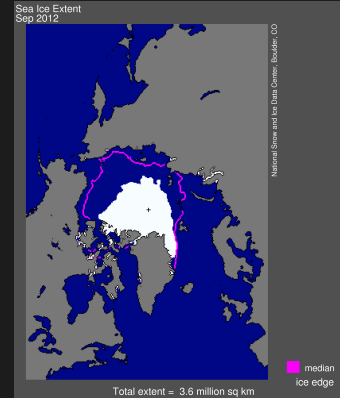
Worüber sind wir uns sicher?

- CO₂ Moleküle absorbieren & re-emittieren thermische Strahlung (John Tyndall, 1859)
- Erhöhung der CO₂ Menge verursacht zusätzlichen Energieeintrag → globale Erwärmung (Svante Arrhenius, 1896)
- Zusätzliche Menge an CO₂ wird für hunderte von Jahren globale Erwärmung voran treiben



Außerdem sind wir uns sehr sicher, dass:

- Erwärmung führt z.B. zu:
 - Schmelzen von Gletschern und Meereis
 - Eis-Albedo Rückkopplung
 - Anstieg des Meeresspiegels
 - Erhöhtem Wasserdampfgehalt der Luft
 - Wasserdampfrückkopplung
 - verstärkter Wasserkreislauf
 - Häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden



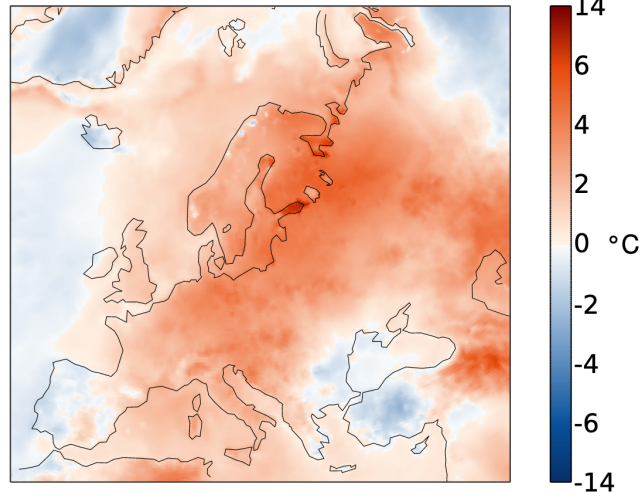
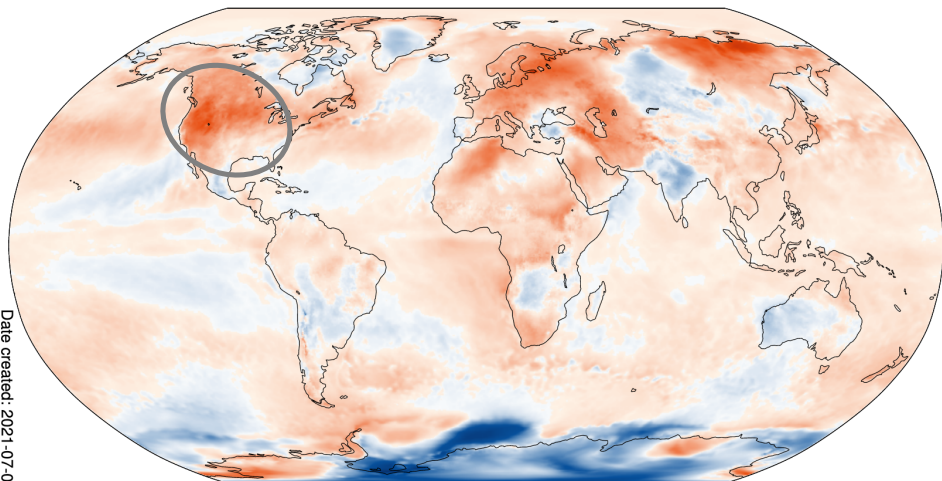
Außerdem sind wir uns sehr sicher, dass:

- Erwärmung führt z.B. zu:
 - Schmelzen von Gletschern und Meereis
 - Anstieg des Meeresspiegels
 - Erhöhtem Wasserdampfgehalt der Luft
 - Häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden

□ **Aussagen basierend auf grundlegender Thermodynamik**

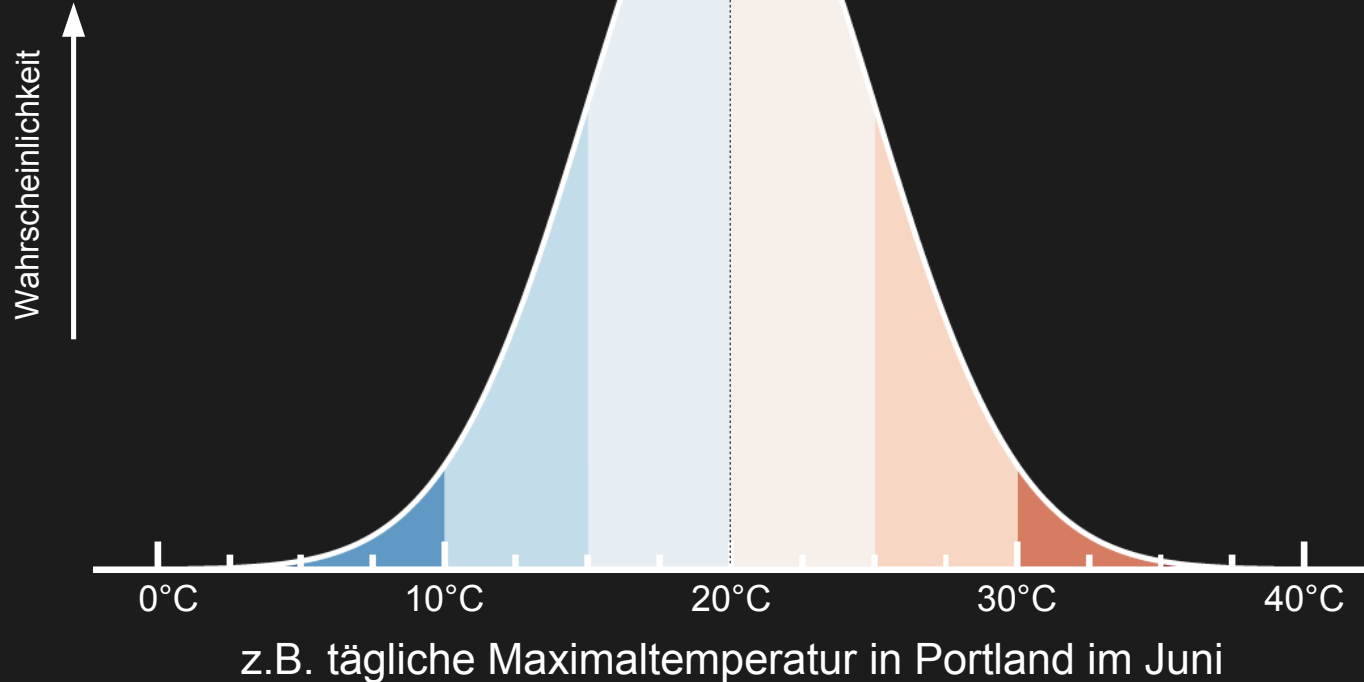
Rolle des Klimawandels bei jüngster Hitzewelle über Nordamerika?

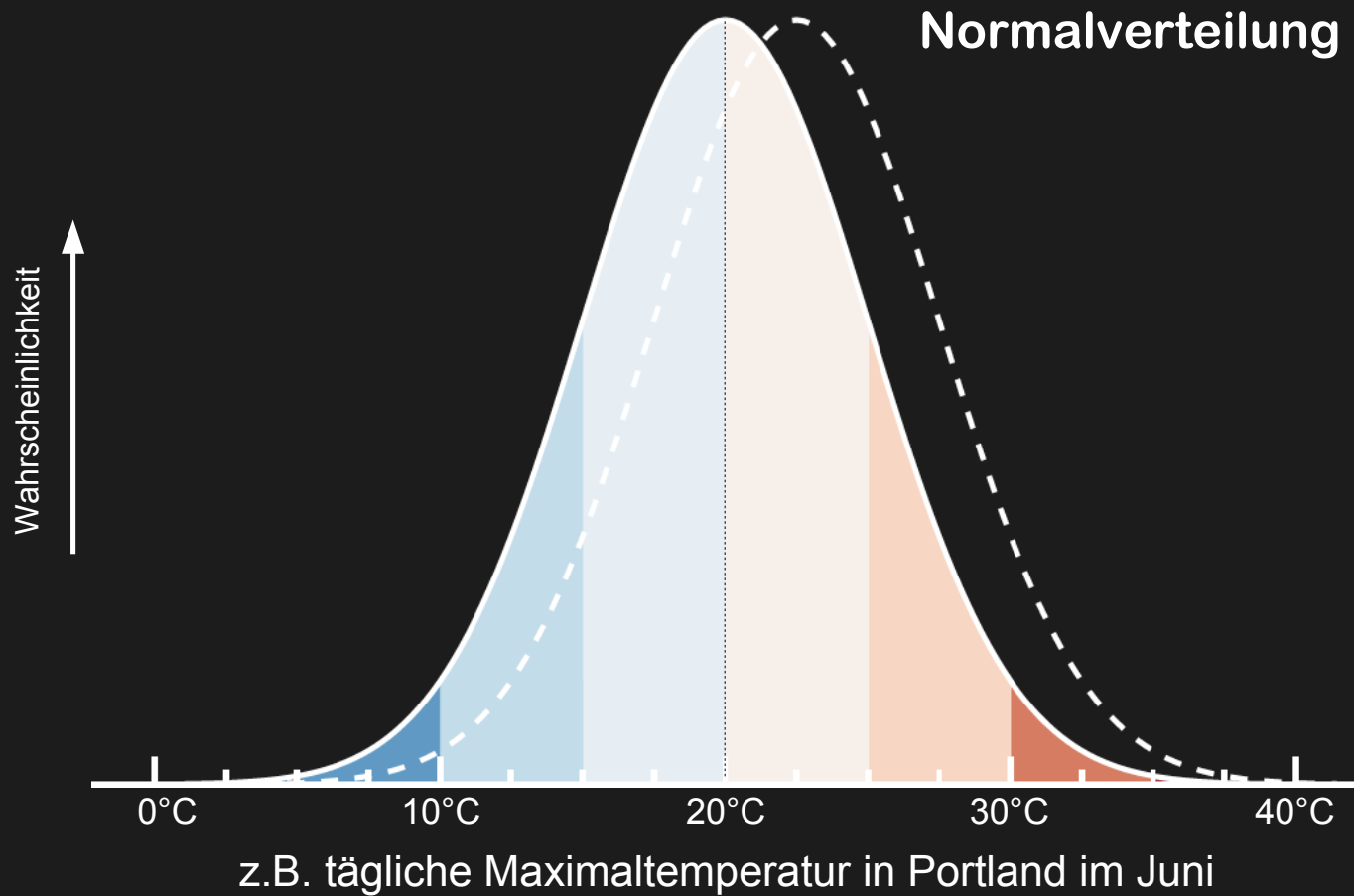
Surface air temperature anomaly for June 2021



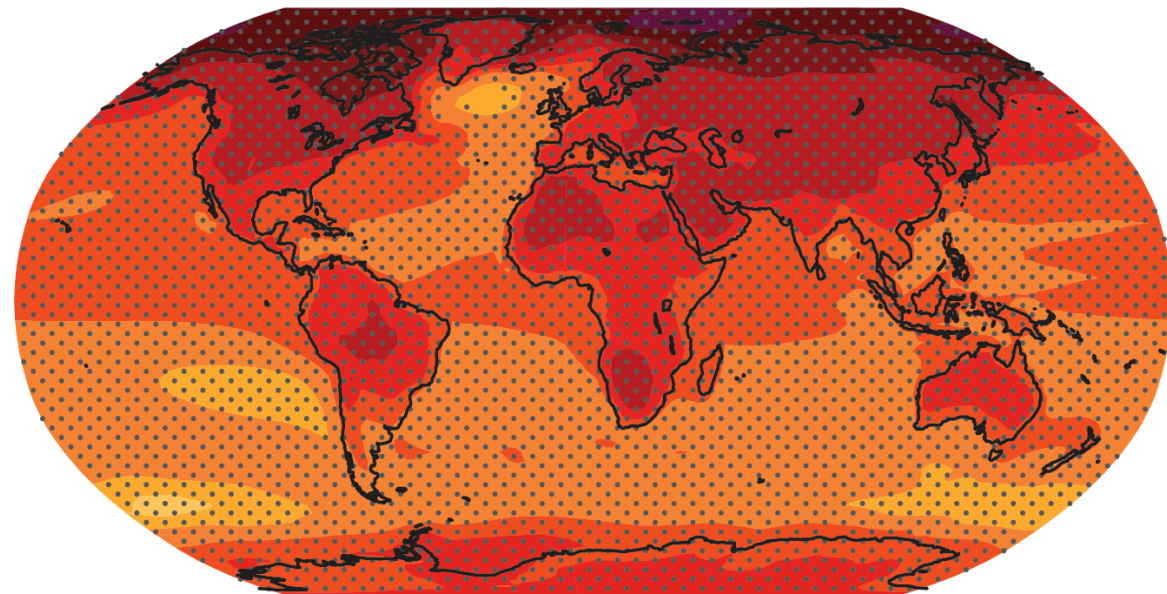
(Data: ERA5. Reference period: 1981-2010. Credit: C3S/ECMWF)

Normalverteilung

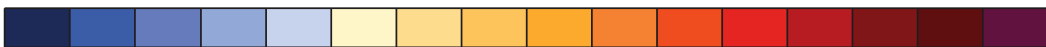




Projizierte Temperaturänderung für 2100



IPCC (2013)



-2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 2 3 4 5 7 9 11

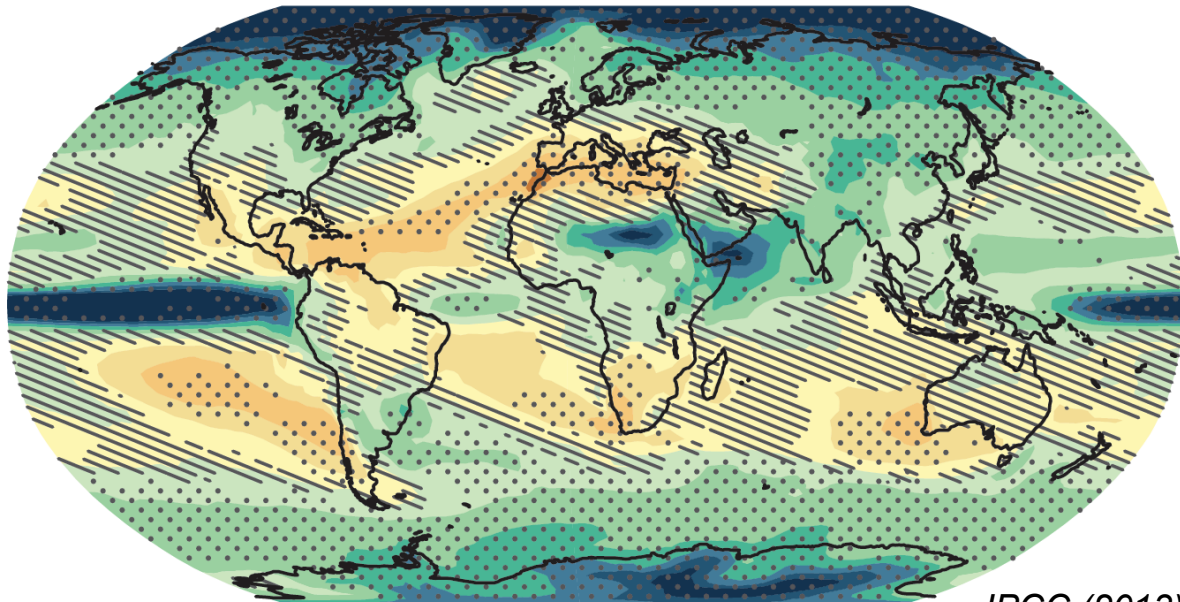
Change in surface temperature (°C)

RCP8.5

→ robuste globale Erwärmung

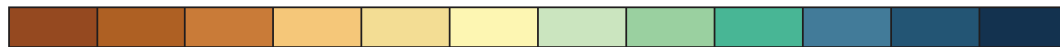
(graue Punkte = Änderung groß gegenüber natürlicher Variabilität & Übereinstimmung des Vorzeichens der Änderung in verschiedenen Klimamodellen)

Projizierte Niederschlagsänderung für 2100



→ Änderungen nicht robust über große Bereiche

(schraffiert = kleine Änderung verglichen mit natürlicher Variabilität, graue Punkte = große Änderung verglichen mit natürlicher Variabilität)

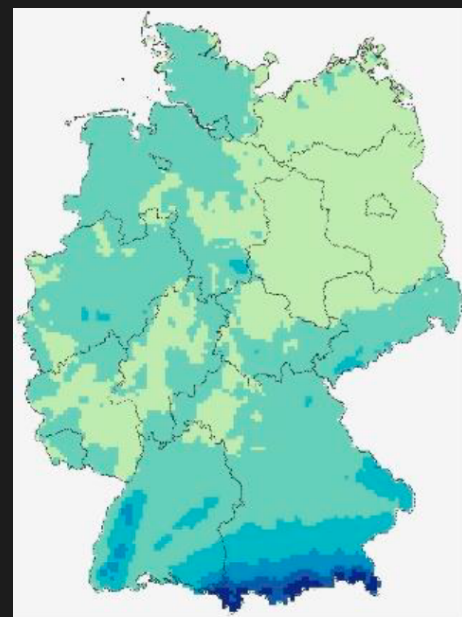


-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50

Change in precipitation (%)

RCP8.5

Mittlere Niederschlagssumme im Sommer (Juni–August) in Deutschland

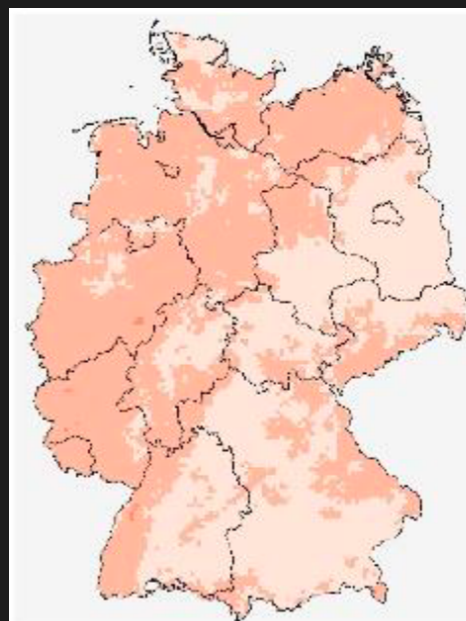


Bezugszeitraum (1971-2000)

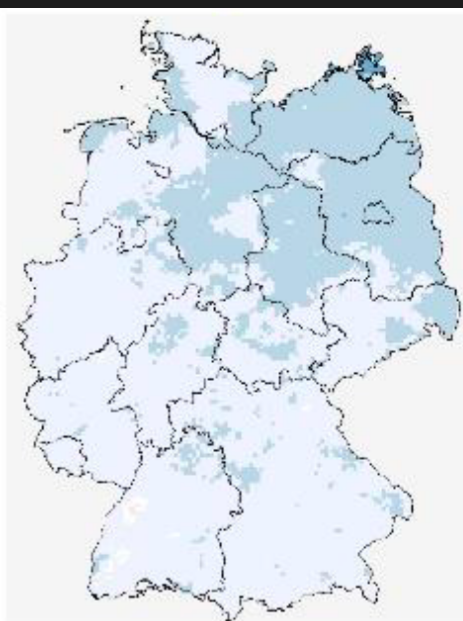
Mittlerer Niederschlag [mm]



80 140 200 300 400 500 600 800



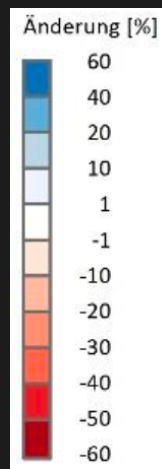
RCP8.5 15. Perzentil



RCP8.5 85. Perzentil

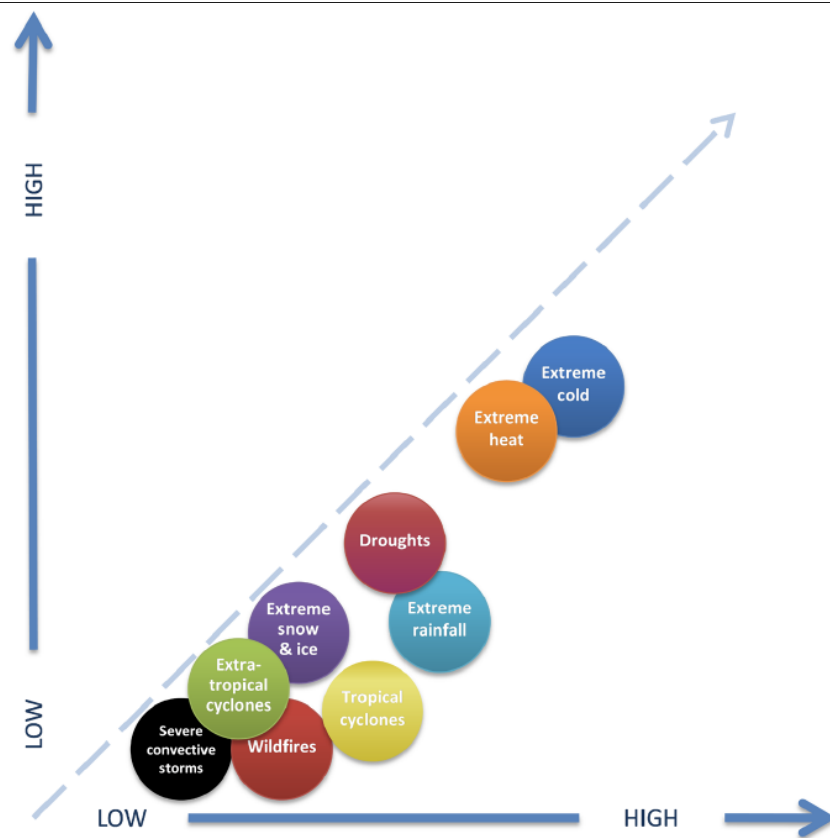
Mitte des Jahrhunderts (2031-2060)

Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst



Zuordnung von Extremereignissen:

Fähigkeit, den Einfluss des Klimawandels auf Extremereignis nachzuweisen



Verständnis des Einflusses des Klimawandels auf Extremereignis

Wie kommt Zirkulation zustande?

Vertikale Umverteilung von Wärme durch Konvektion

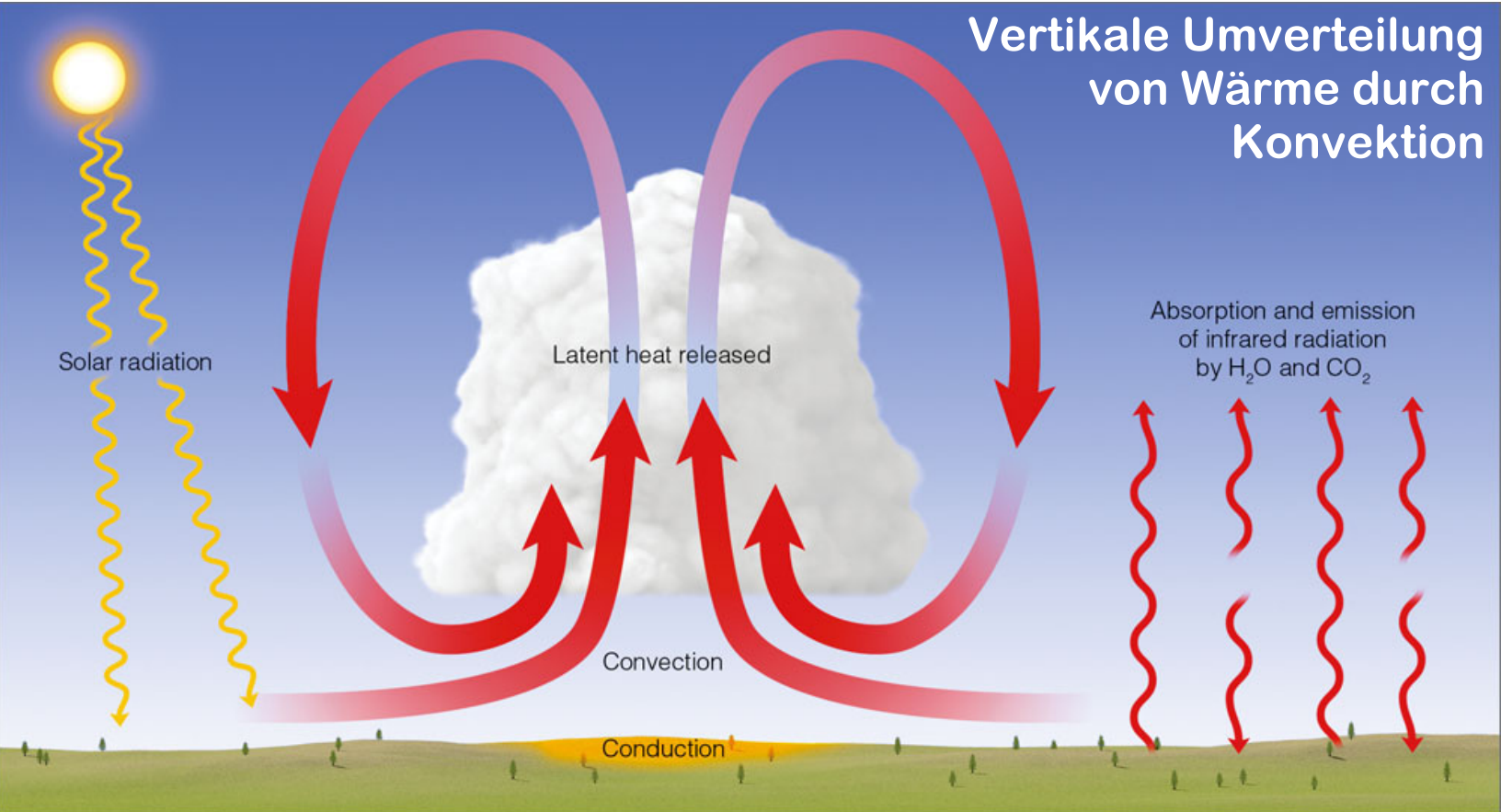
Solar radiation

Latent heat released

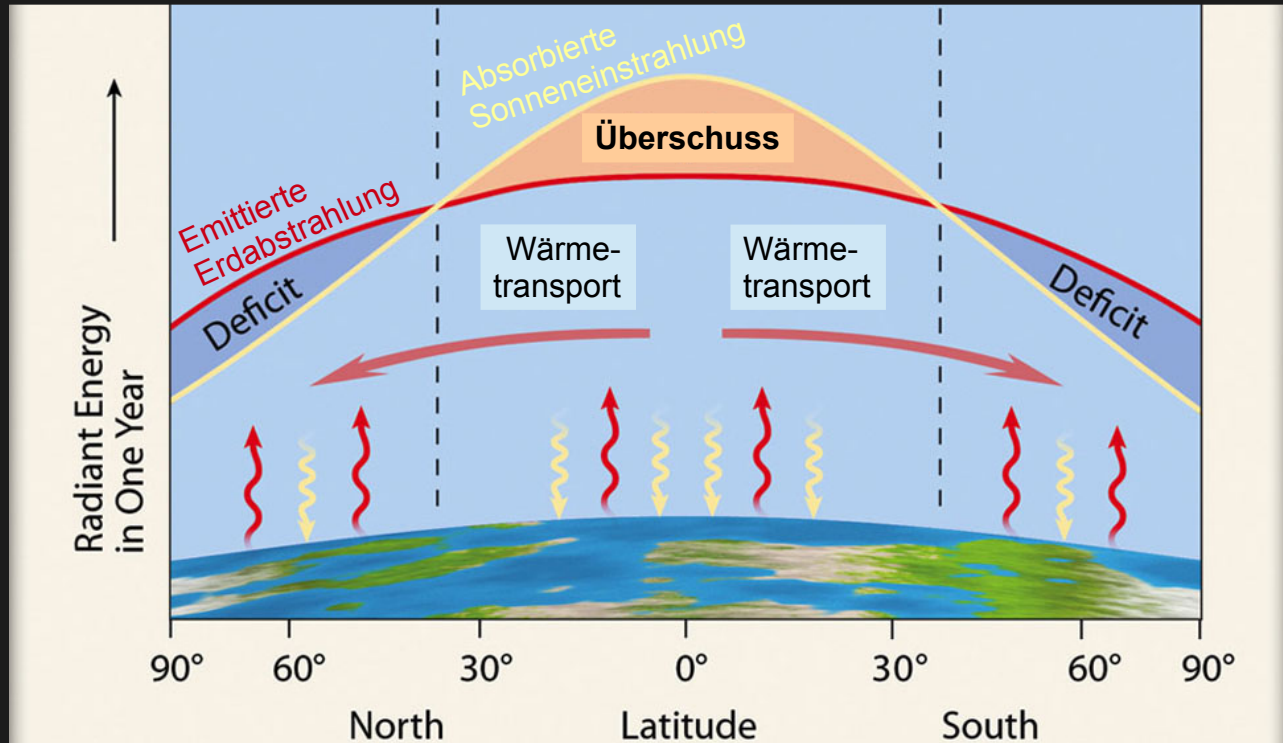
Absorption and emission of infrared radiation by H_2O and CO_2

Convection

Conduction



Zirkulation (~Wind) wird letztlich durch (ungleich verteilte) Sonneneinstrahlung angetrieben



... ein paar Zahlen ...

- Gesamtverbrauch Primärenergie der Menschheit $\sim 18 \cdot 10^{12}$ Watt
- Gesamtabstrahlung der Sonne = $4 \cdot 10^{26}$ Watt
- Davon für Erdsystem: $1,75 \cdot 10^{17}$ Watt (= $342 \text{ W/m}^2 \cdot \text{Erdoberfläche}$)
- (30% werden reflektiert, bleiben $\approx 1,2 \cdot 10^{17}$ Watt)
- (zum Vergleich, davon in atmosphärischer Zirkulation: $\sim 10^{15}$ Watt)

Hurricane: 600 TW ~ 10.000 Atombomben

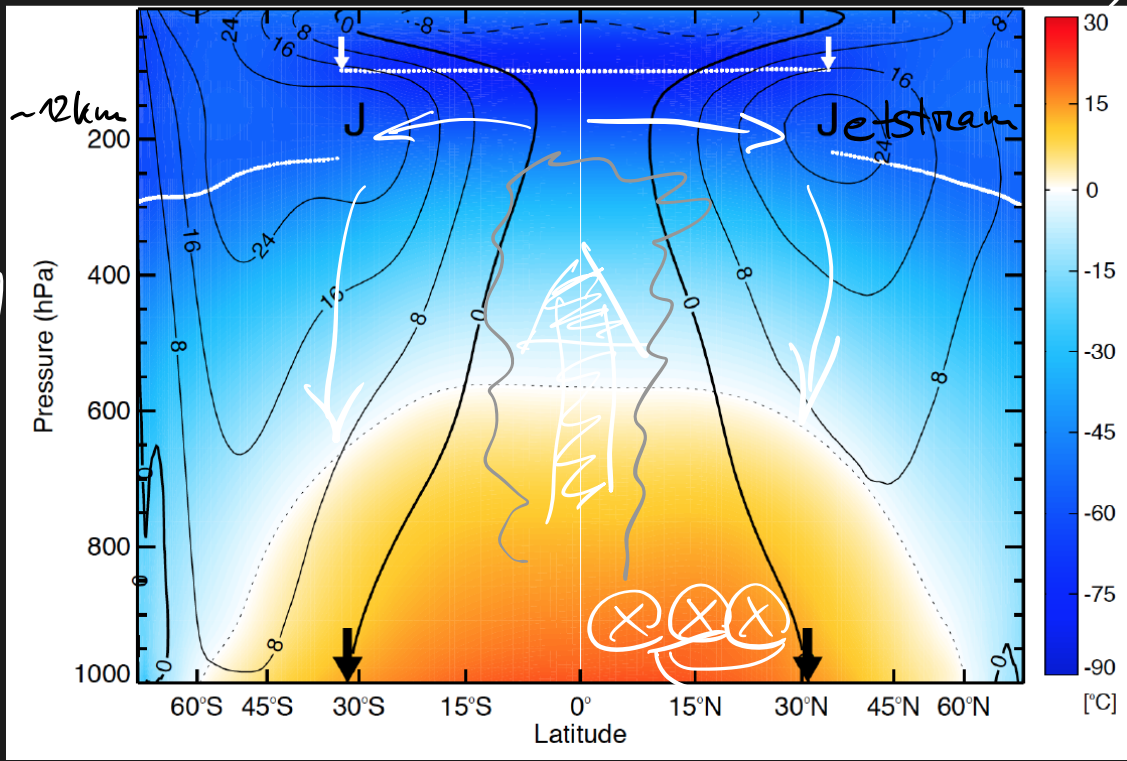


Typhoon aus Sicht der International Space Station

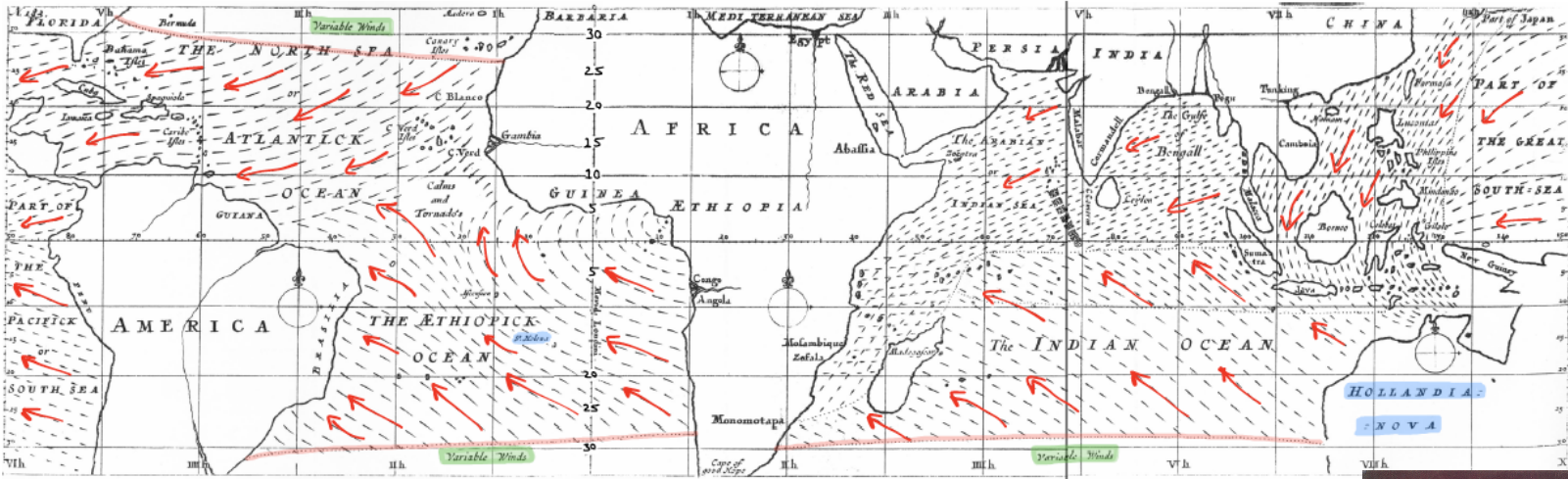
Mittlere Temperatur und West $\square \rightarrow$ Ost Wind ($\frac{m}{s}$)

Zirkulation wird durch Temperaturunterschiede angetrieben

Coriolis Ablenkung
NH: nach rechts
SH: ~ links



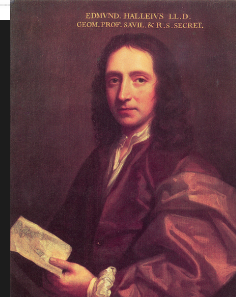
Edmund Halley und die Passatwinde



An Historical Account of the Trade Winds, and Monsoons, observable in the Seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the Phisical cause of the said Winds, by E. Halley.

Philos. Trans. (1686)

Edmund Halley
(1656–1742),
picture around 1687



George Hadley

(1685–1768)

Concerning the Cause of the General Trade-Winds. Philos. Trans. London (1735).

Einfluss der Erdrotation →

Globale Drehimpulserhaltung →

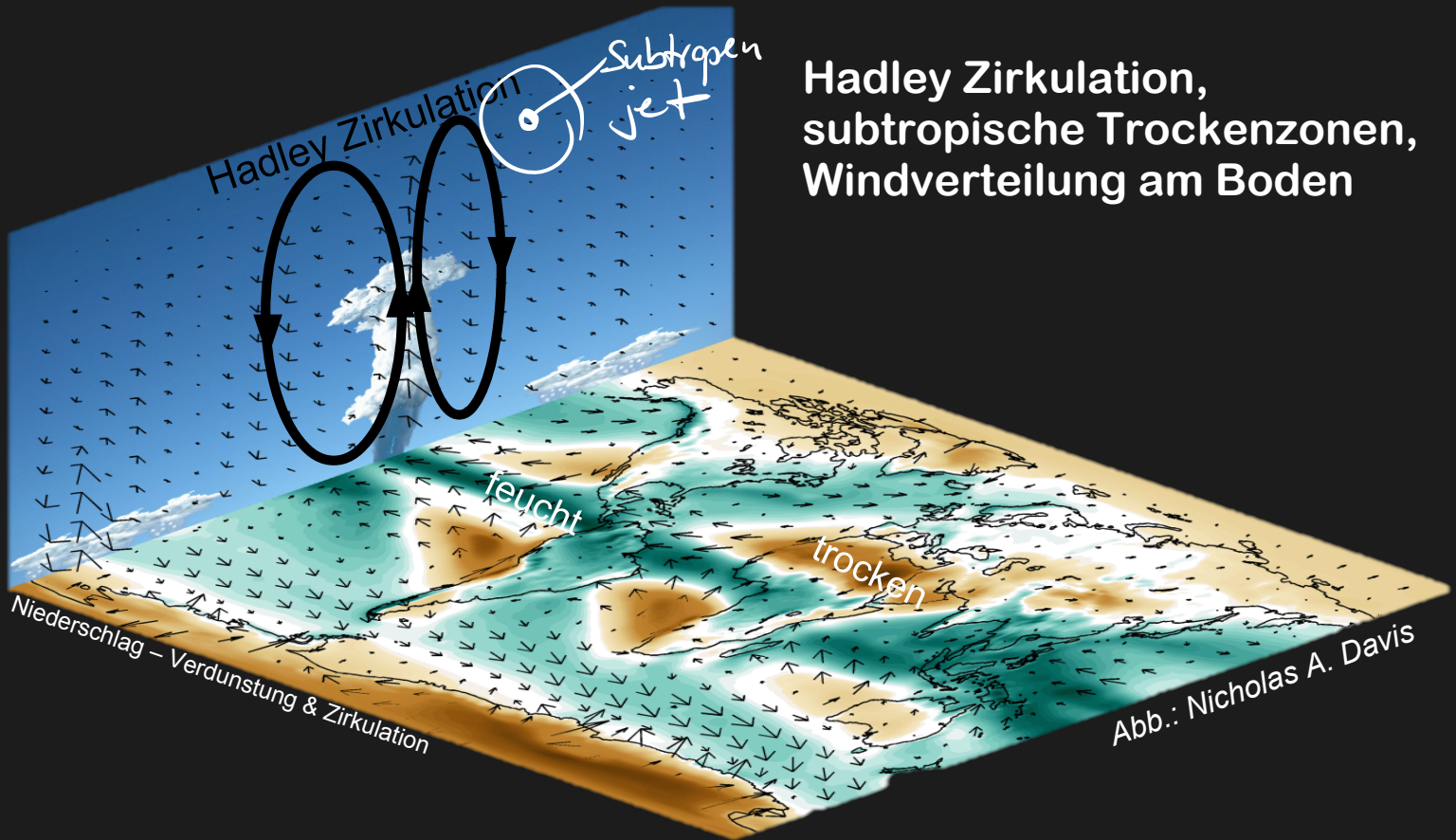
VI. Concerning the Cause of the General Trade-Winds : By Geo. Hadley, Esq; F. R. S.

I Think the Causes of the General Trade-Winds have not been fully explained by any of those who have wrote on that Subject, for want of more particularly and distinctly considering the Share the diurnal Motion of the Earth has in the Production of them : For although this has been

... into greater Length than I propose. From what has been said it follows :

First, That without the Assistance of the diurnal Motion of the Earth, Navigation, especially Easterly and Westerly, would be very tedious, and to make the whole Circuit of the Earth perhaps impracticable.

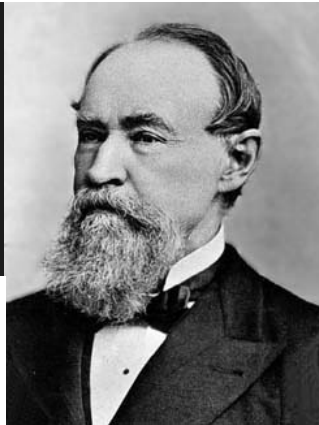
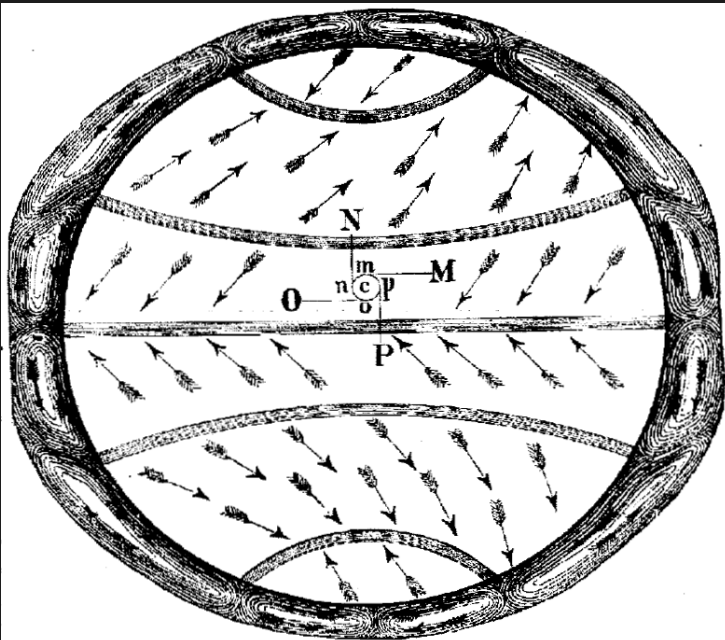
Secondly, That the N. E. and S. E. Winds within the Tropicks must be compensated by as much N. W. and S. W. in other Parts, and generally all Winds from any one Quarter must be compensated by a contrary Wind some where or other ; otherwise some Change must be produced in the Motion of the Earth round its Axis.



William Ferrel

(1817–1891)

An essay on the winds and the currents of the ocean. Nashville Journal of Medicine and Surgery (1856).



ASTRONOMICAL JOURNAL.

No. 109.

VOL. V.

ALBANY, 1858, JANUARY 20.

NO. 11.

THE INFLUENCE OF THE EARTH'S ROTATION UPON THE RELATIVE MOTION OF BODIES NEAR ITS SURFACE.

BY W. FERREL.

If a body upon or near the earth's surface receive a motion relatively to the earth, either by means of a single impulse or by a continually acting force, this motion, combined with the rotatory motion of the earth, gives rise to a deflecting force relatively to the earth, which causes a different relative motion from that of a body acted upon in a similar manner upon the earth at rest. It is proposed, in this paper, to examine a few of the effects produced by this deflecting force.

Let x , y and z be three rectangular coordinates having their origin at the center of the earth, z corresponding with the axis; and P , Q and R be the forces which act respectively in the directions of these ordinates. We shall then have

$$\frac{dx}{dt} = P; \quad \frac{dy}{dt} = Q; \quad \frac{dz}{dt} = R. \quad [1]$$

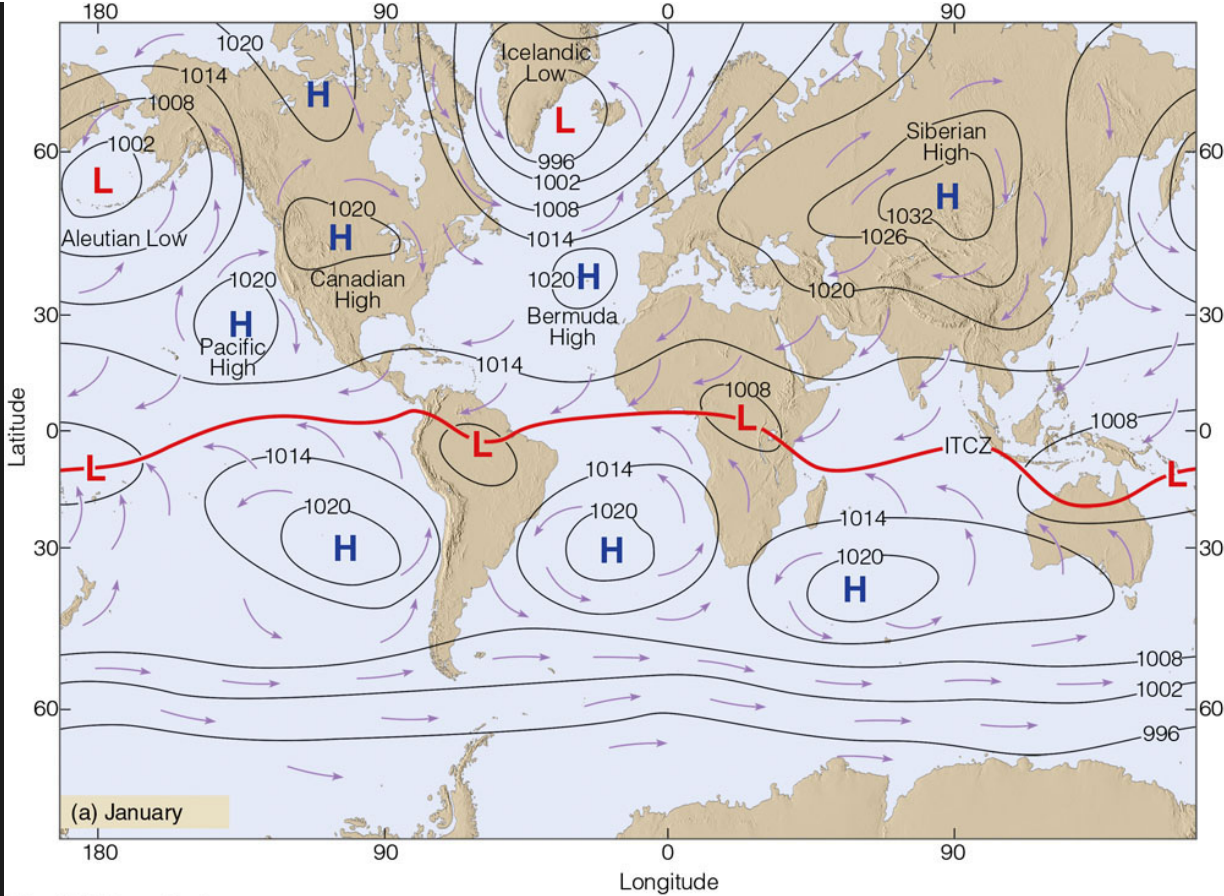
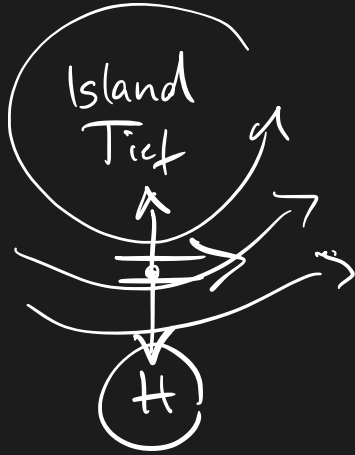
$$\sin \theta \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \cos \theta \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} - r \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} + r \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2} - r \sin \theta \left(n + \frac{d\pi}{dt} \right)^2 = \cos(\pi + \theta) Q + \sin(\pi + \theta) R \quad [4]$$

Multiplying equation [3] by $\cos \theta$ and equation [4] by $\sin \theta$, and adding, we get the first of equations [5]. Multiplying the former by $\sin \theta$ and the latter by $\cos \theta$, and subtracting, we get the second of equations [5]. Again, after substituting the second differentials of y and z , as stated above, in the last two of equations [1], if we multiply the former by $\sin(\pi + \theta)$ and the latter by $\cos(\pi + \theta)$, and subtract, we get the last one of the following equations.

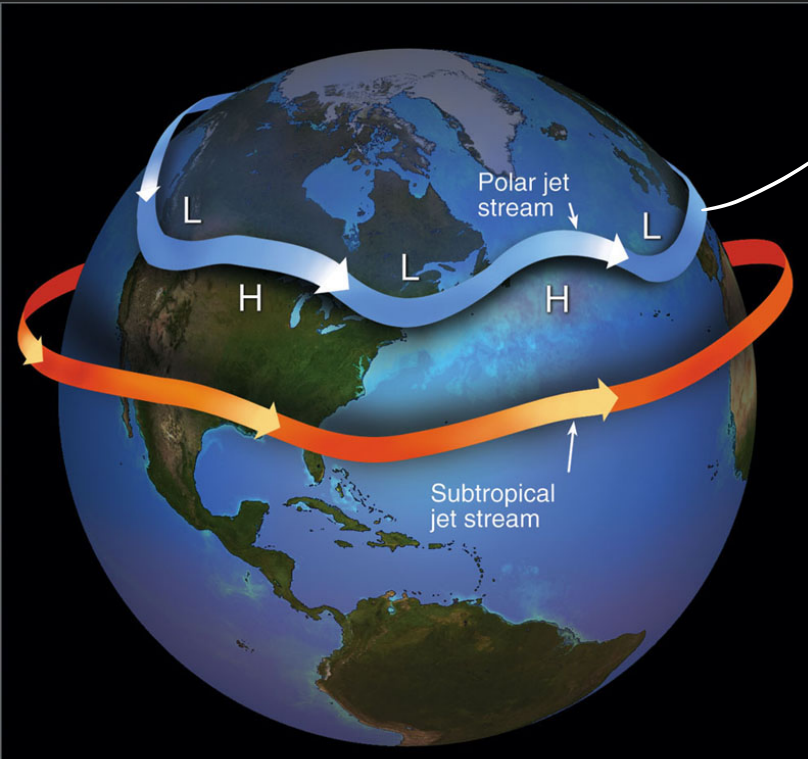
$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} - r \frac{d^2\theta}{dt^2} - r \sin^2 \theta \left(n + \frac{d\pi}{dt} \right)^2 &= \cos \theta P + \sin \theta \cos(\pi + \theta) Q + \sin \theta \sin(\pi + \theta) R; \\ - \frac{d^2y}{dt^2} - 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \sin \theta \cos \theta \left(n + \frac{d\pi}{dt} \right)^2 &= \sin \theta P - \cos \theta \cos(\pi + \theta) Q - \cos \theta \sin(\pi + \theta) R; \\ - r \sin \theta \frac{d^2z}{dt^2} - 2 \sin \theta \left(n + \frac{d\pi}{dt} \right) \frac{dr}{dt} - 2 r \cos \theta \left(n + \frac{d\pi}{dt} \right) \frac{d\theta}{dt} &= (\sin \pi + \theta) Q - \cos(\pi + \theta) R. \end{aligned} \quad [5]$$

“If a body is moving in any direction, there is a force arising from the Earth's rotation, which always deflects it to the right in the northern hemisphere, and to the left in the southern hemisphere.”

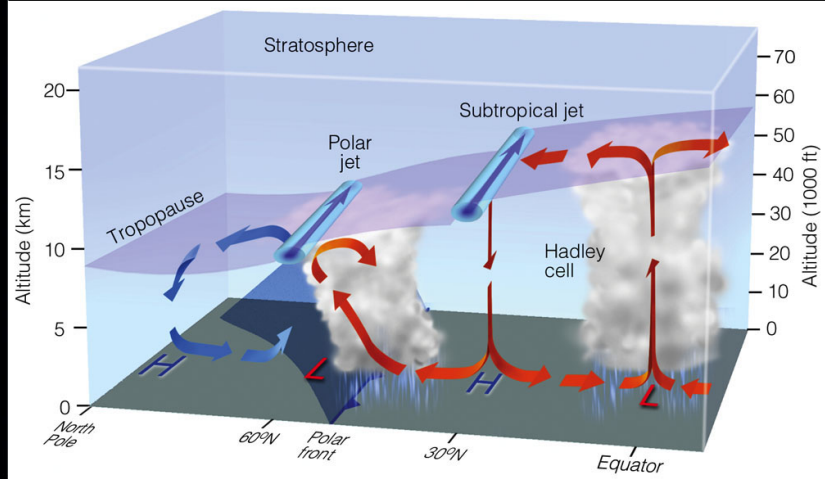
Mittlere Zirkulation auf Meeresniveau im Januar



Strahlströme (jetstreams) und Temperaturkontraste



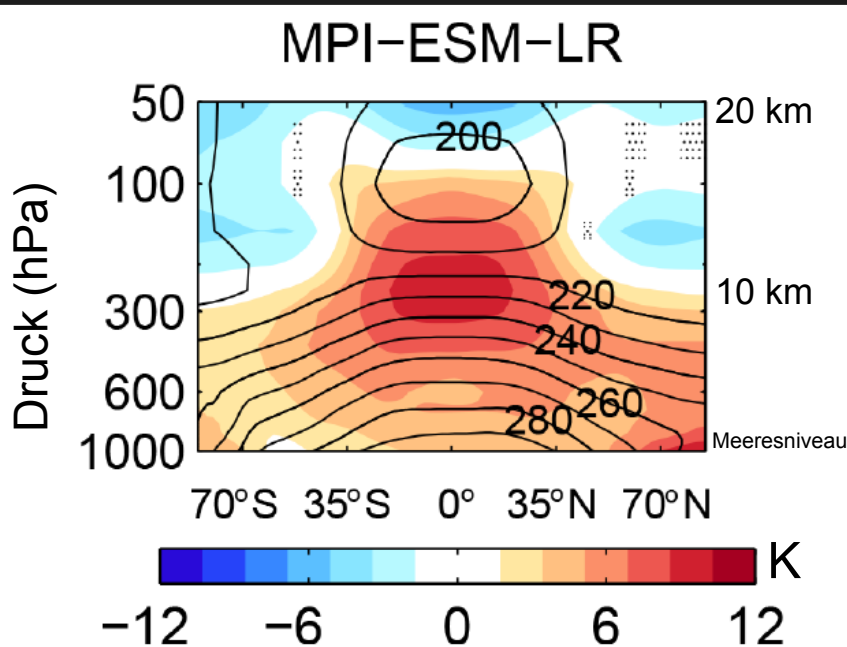
Rossbywellen



Auswirkungen des Klimawandels auf die globale Zirkulation

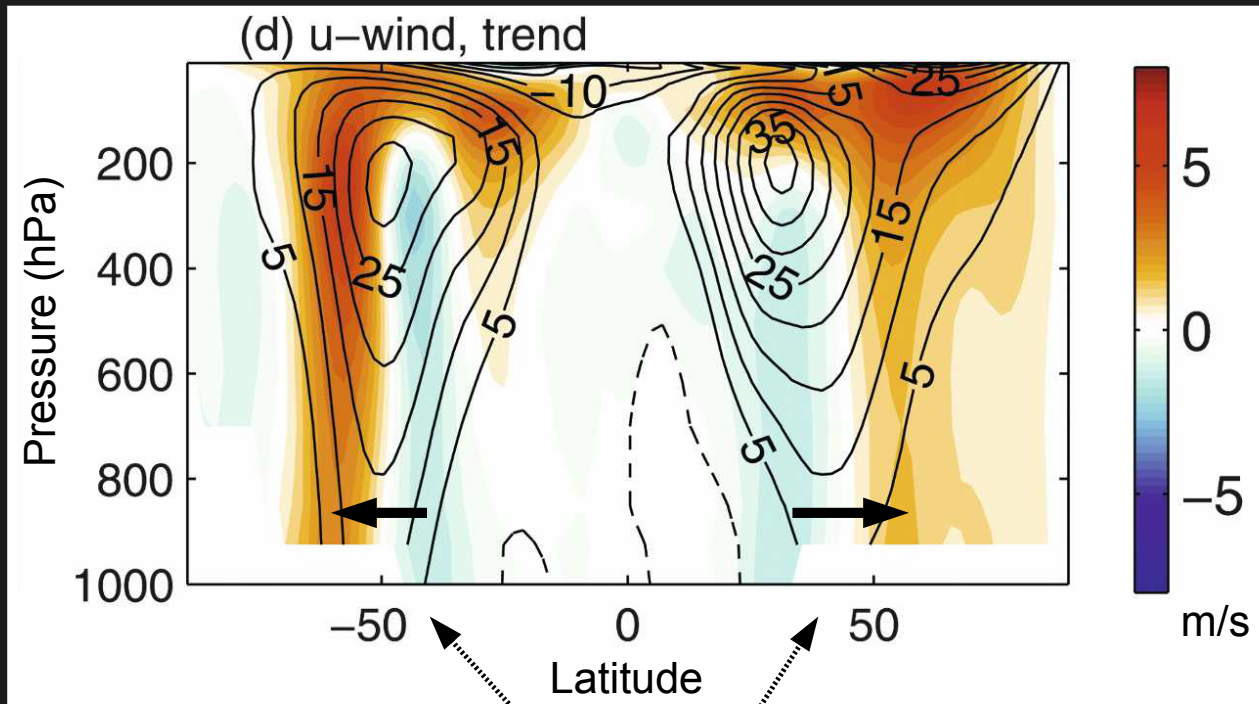
Veränderungen der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation

Simulierte Temperaturänderung durch 4-fache CO₂ Erhöhung:



- verstärkte Erwärmung der tropischen oberen Troposphäre
- Abkühlung der Stratosphäre
- verstärkte arktische Erwärmung (~arktische Verstärkung)

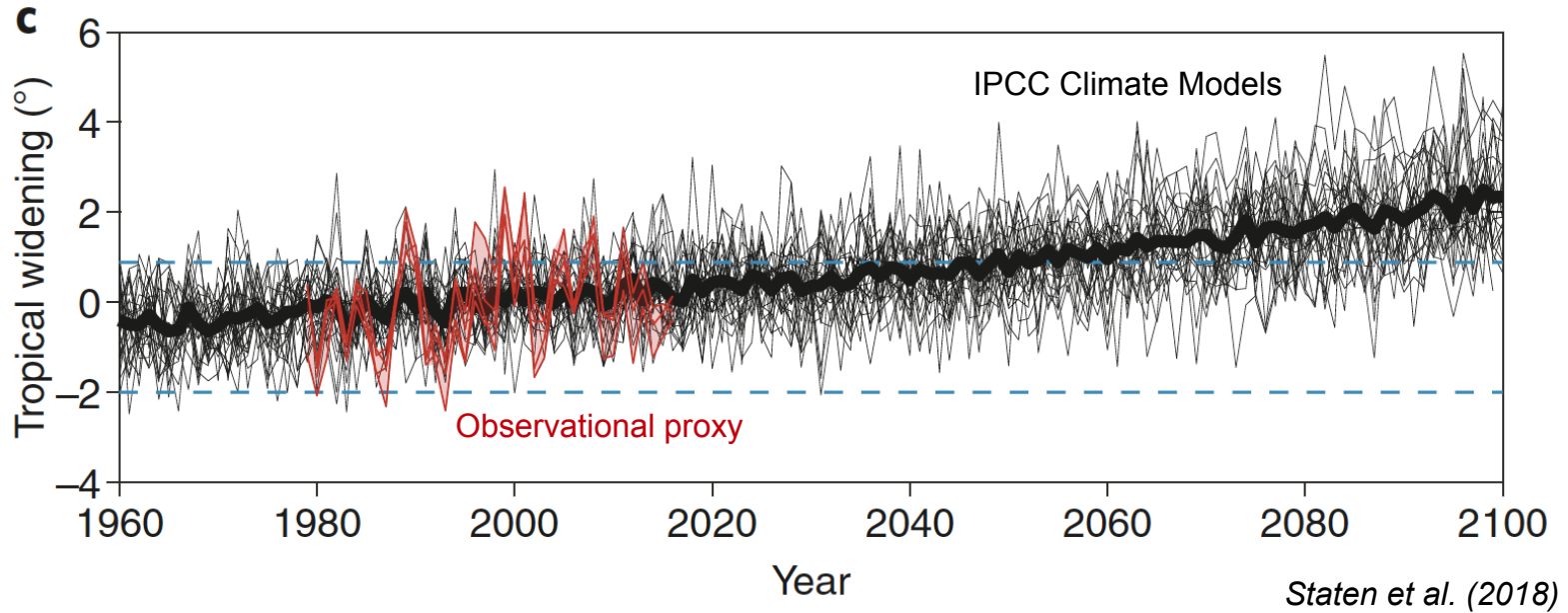
Multi-Model Mean Climate Change Response “Future – Present”



Lu et al. 2008

polewärtige Verschiebung der Strahlströme

Verschiebung der subtropischen Trockenzonen Richtung Pol

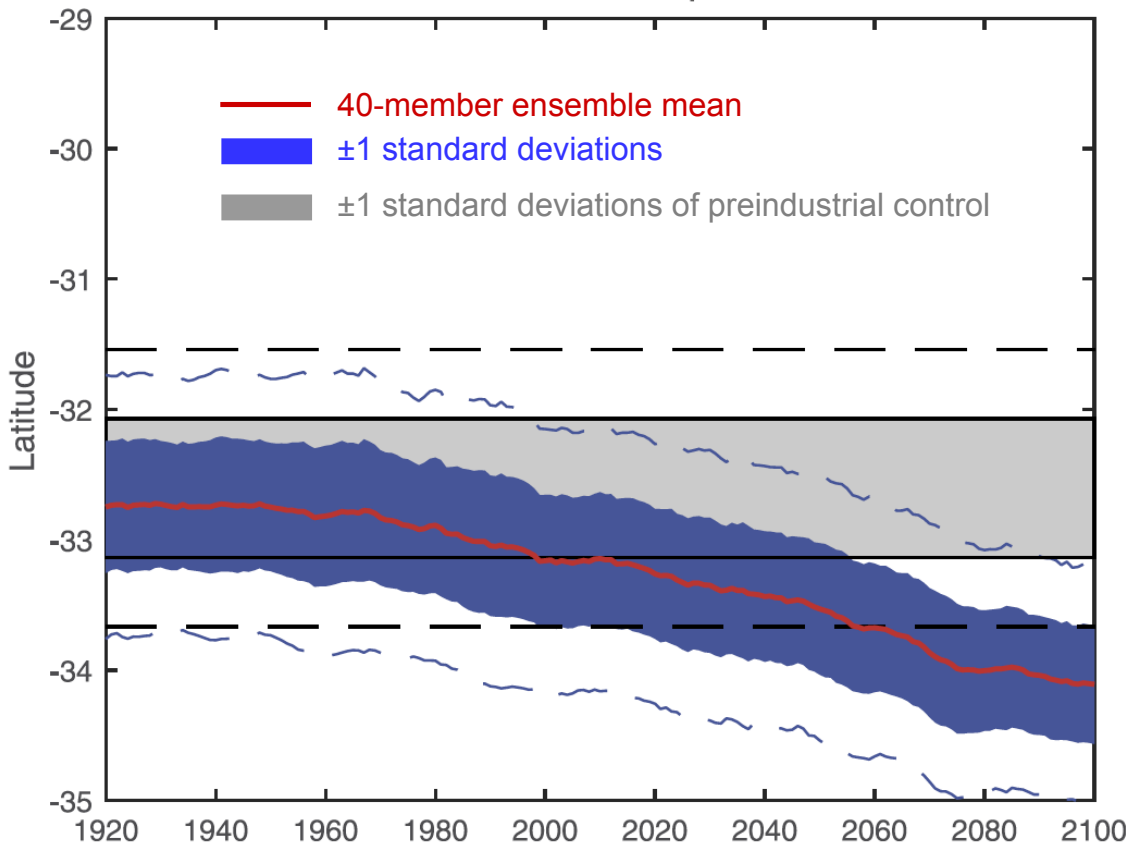


Verschiebung der südhemisphärischen Tropengrenze (CESM Large Ensemble)

Grise et al. (2019)

b

Southern Hemisphere

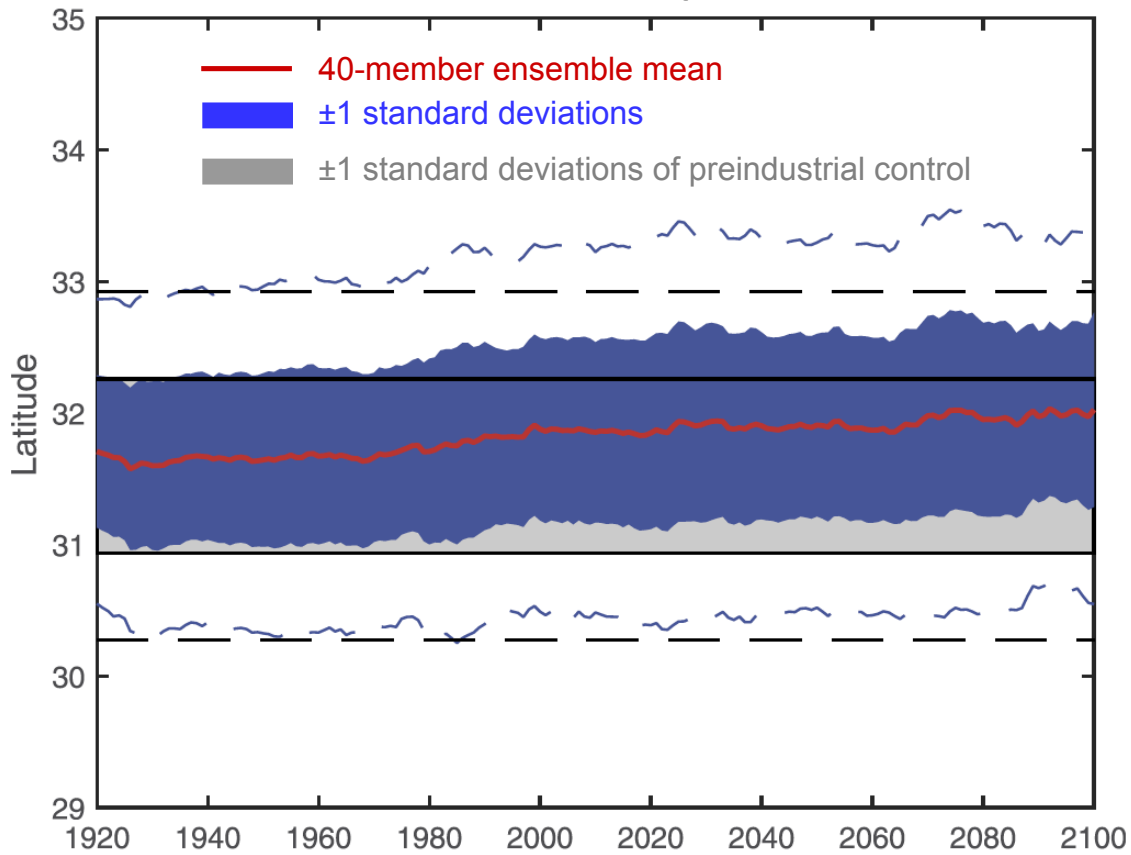


Verschiebung der nordhemisphärischen Tropengrenze (CESM Large Ensemble)

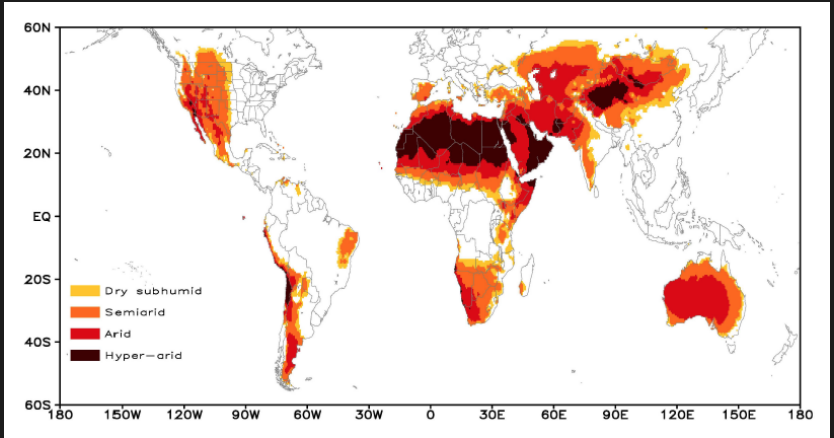
Grise et al. (2019)

a

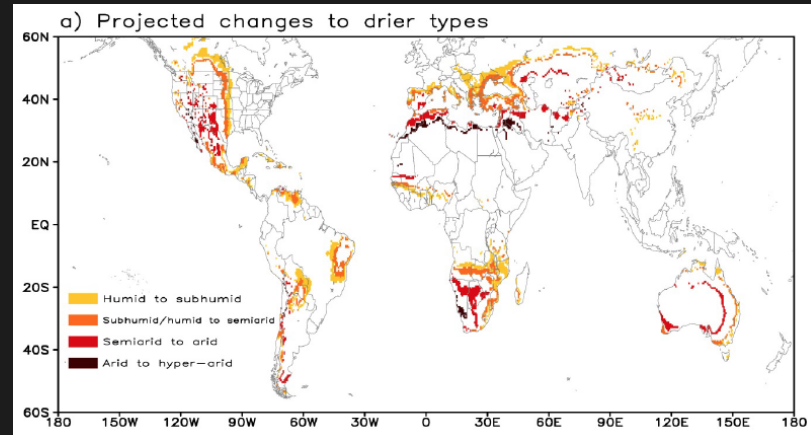
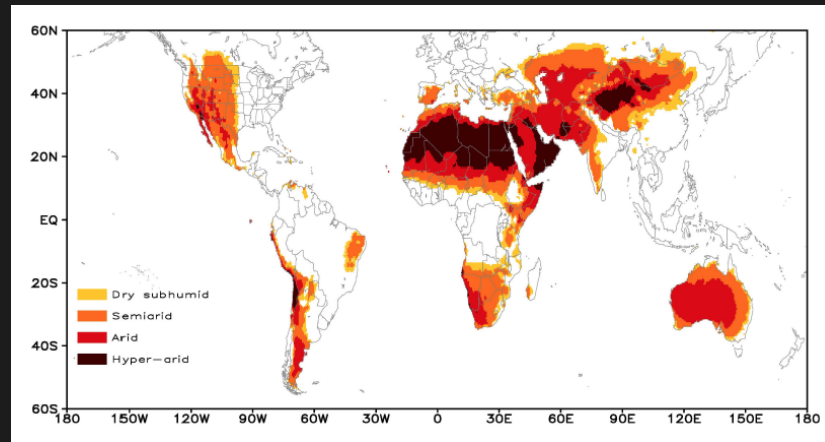
Northern Hemisphere



Globale Verteilung der Trockenzonen



Verschiebung / Ausbreitung der Trockenzonen



Punkte zum Mitnehmen

- Thermodynamische Aspekte des Klimawandels (~Energiebilanz) weitgehend gut verstanden und vorhersagbar
- Veränderungen der Zirkulation deutlich komplexer und schwieriger vorherzusagen
 - Verschiebung der Strahlströme Richtung Pol (Änderungen der Wellen/Mäandrierung unklar, nach wie vor Forschungsgegenstand)

Komplexe/Diverse Klimawissenschaft:

- Physik (elektromagnetische Strahlung)
- Geographie (Klimazonen)
- Biologie (Photosynthese)
- Chemie (catalytischer Ozonabbau)
- Geologie (Vulkanausbrüche)
- Informatik (Klimamodelle)
- Ingenieurwissenschaften (erneuerbare Energien)
- Mathematik (partielle Differentialgleichungen)
- Politikwissenschaften (CO₂-Steuer)
- Soziologie (Extremwetterwarnungen)
- Wirtschaftswissenschaften (Kosten und Nutzen von verringerten CO₂ Emissionen)