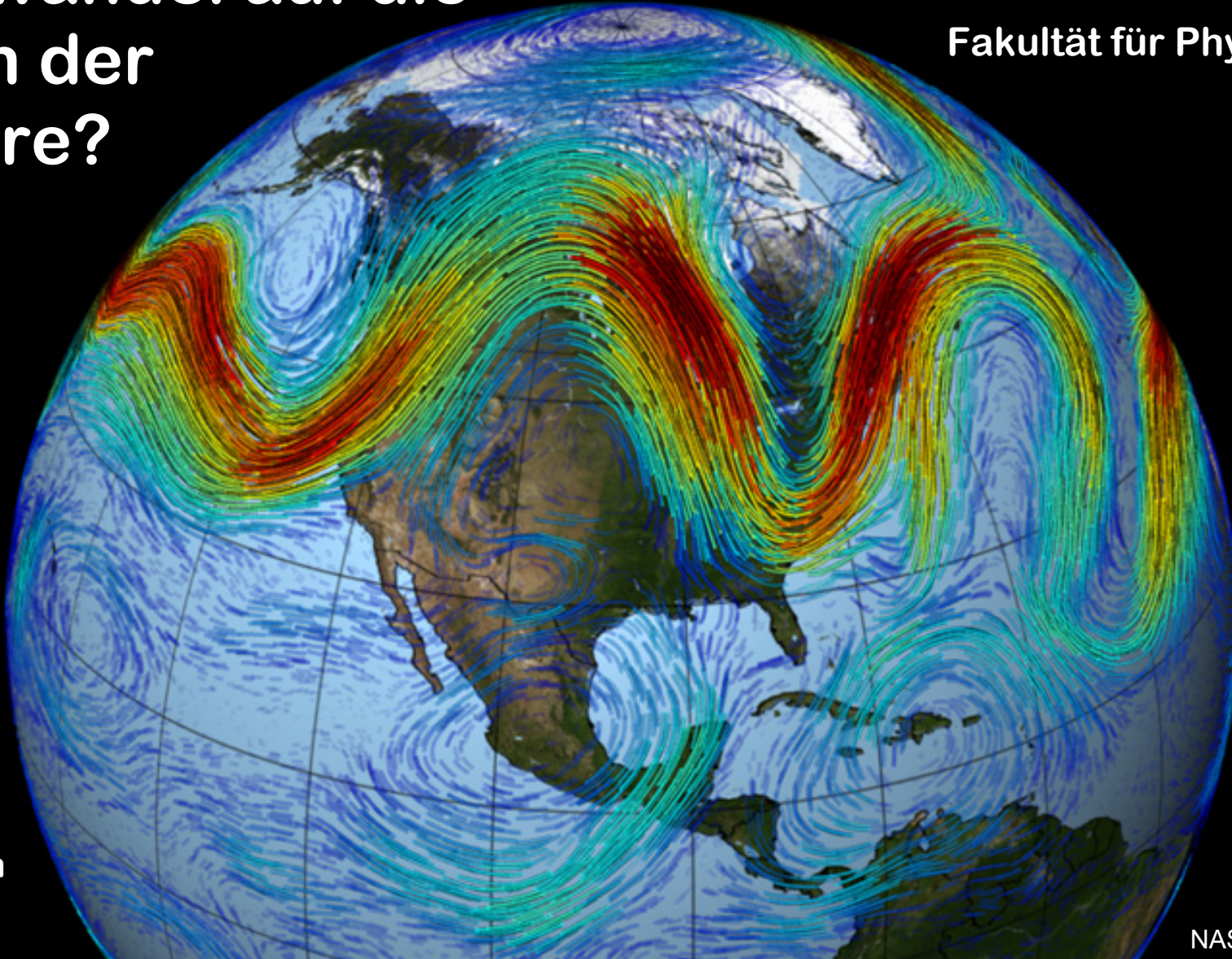


# Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Zirkulation der Atmosphäre?

Thomas Birner

Professor für Theoretische Meteorologie

Fakultät für Physik, LMU München



MNU-Tag Südbayern

26.09.2023

NASA, GSFC

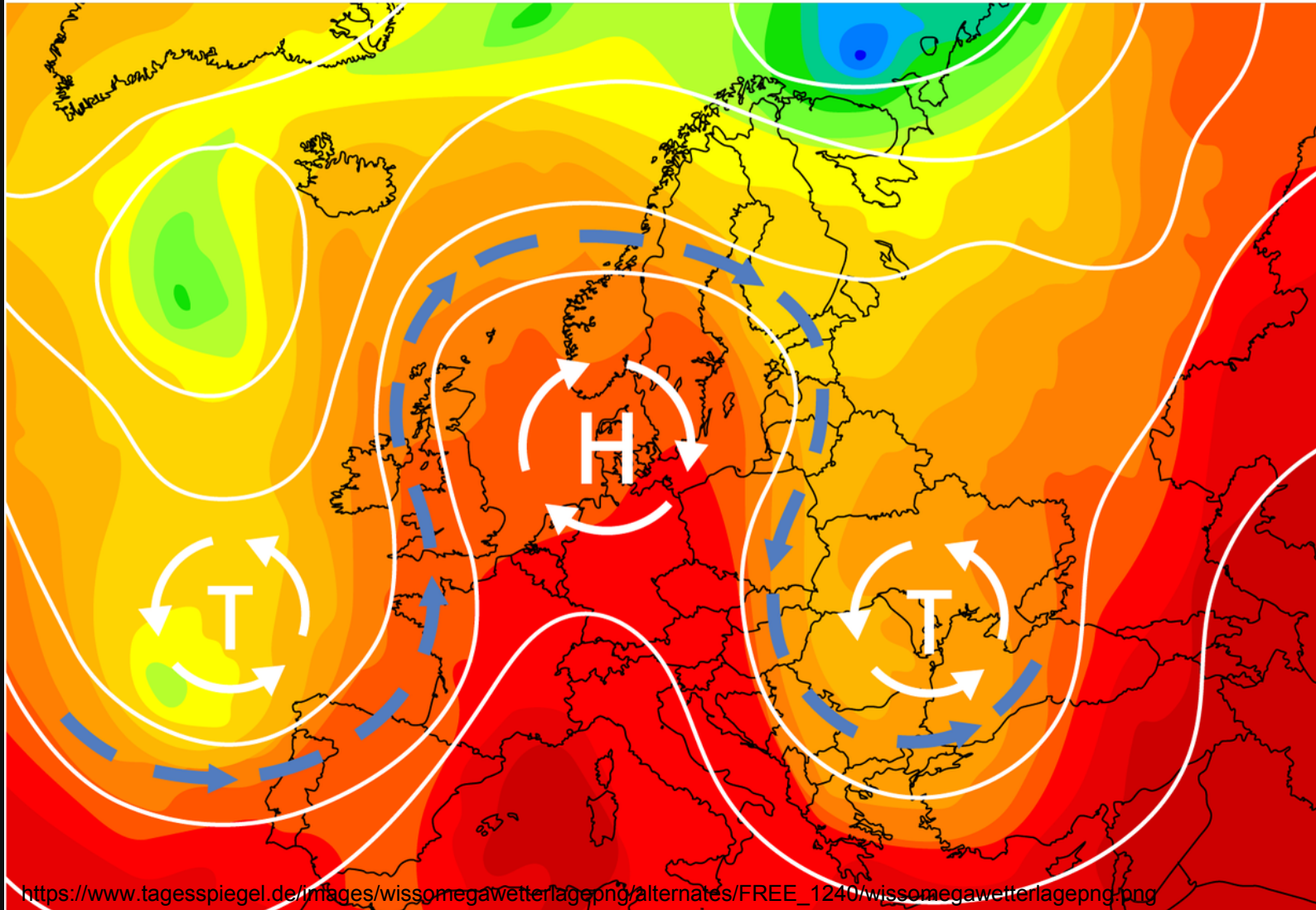
# “Mindestens 150 Tote bei Unwetter in Libyen” (Tagesschau 11.09.2023)



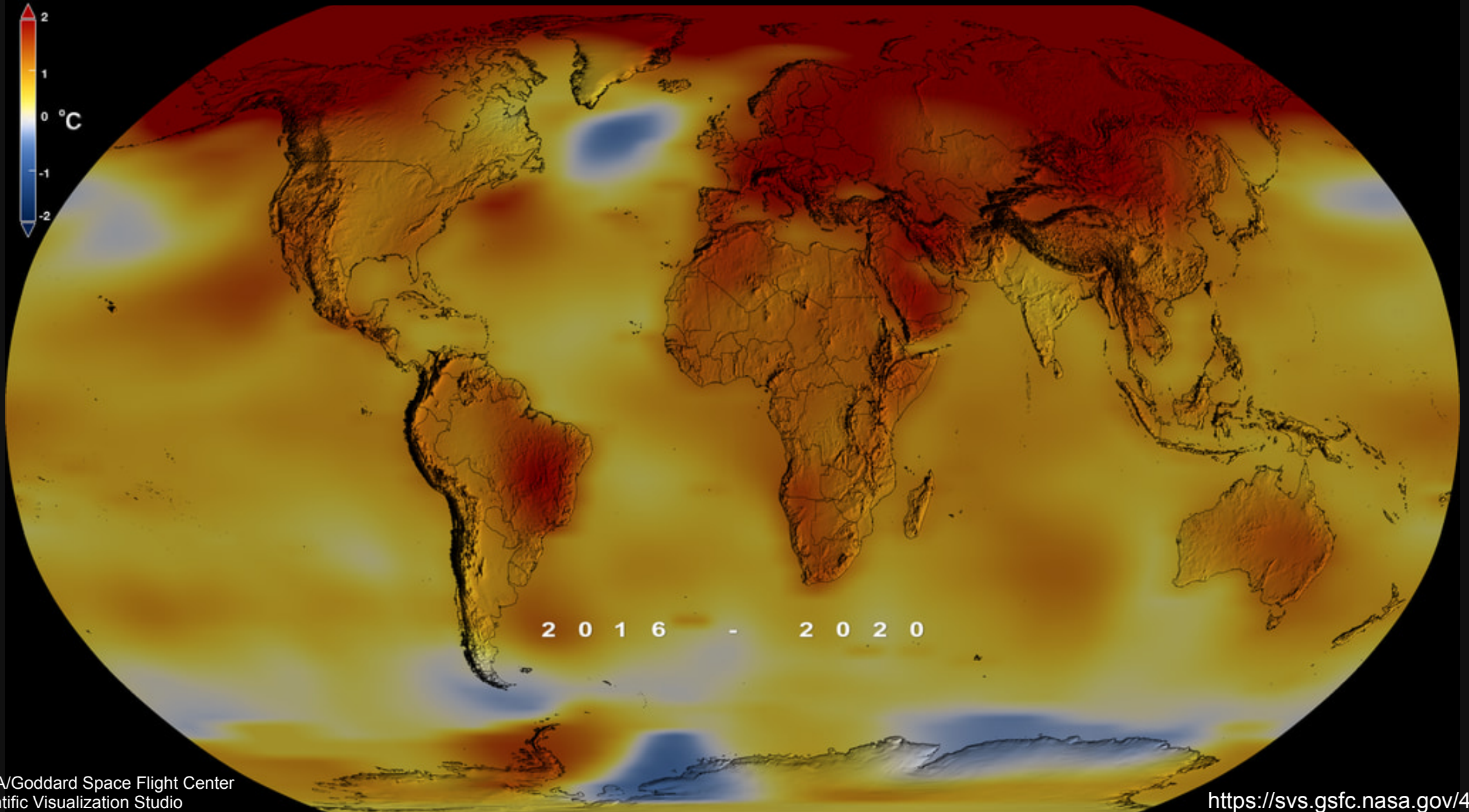
تاثيرات

# Die Omega-Wetterlage

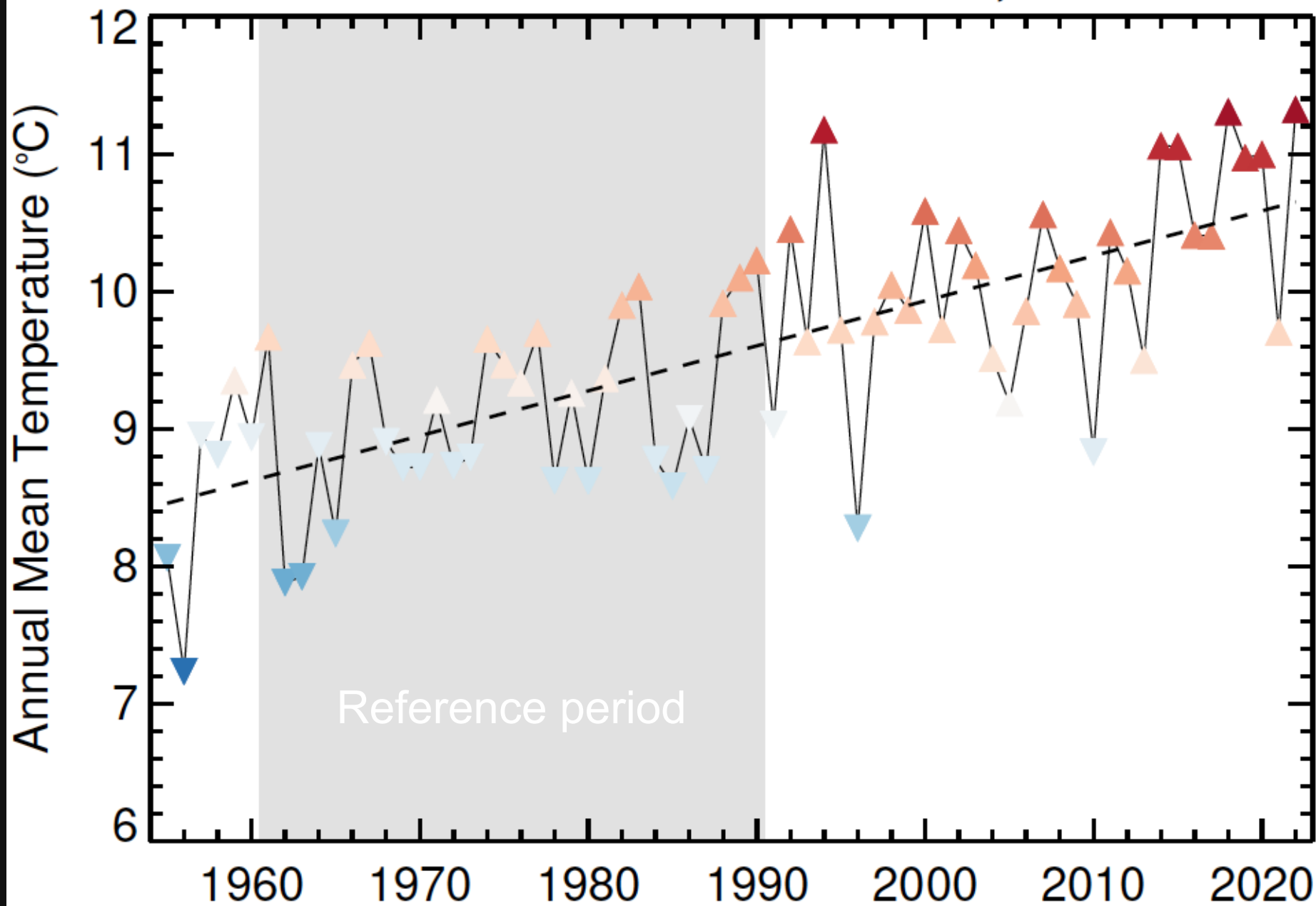
Das Hoch über Mitteleuropa ist zwischen zwei Tiefs eingeklemt. Die weißen Linien (Isohypsen) bilden dabei den griechischen Buchstaben Omega. Die Karte zeigt die Strömung (blau) und Temperatur in 5,5 Kilometer Höhe.



# Bodentemperatur (2016-2020) relativ zum Mittel über 1950-1980

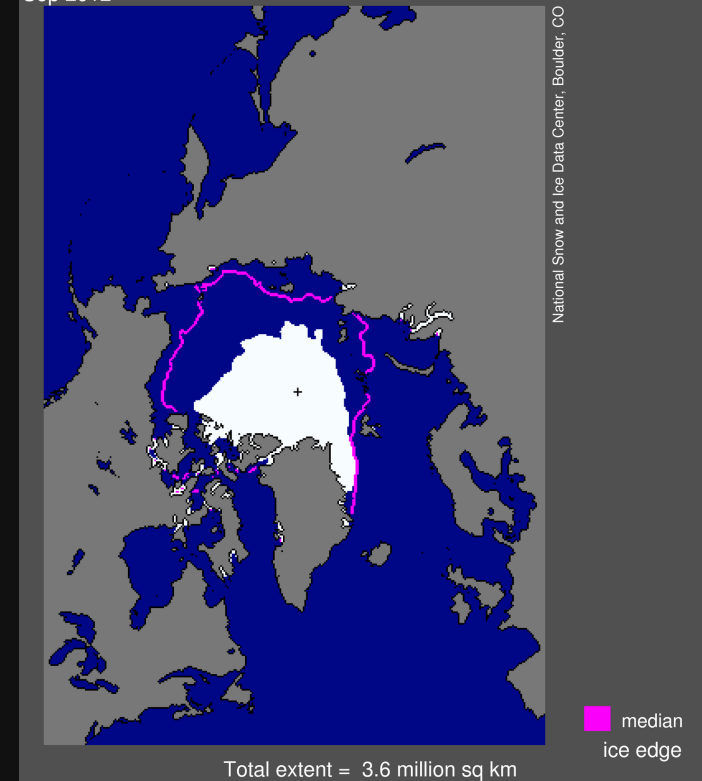


# Station: Downtown Munich, DWD



- Erwärmung führt außerdem z.B. zu:
  - Schmelzen von Gletschern und Meereis
    - Eis-Albedo Rückkopplung
  - Anstieg des Meeresspiegels

Sea Ice Extent  
Sep 2012



- Erwärmung führt außerdem z.B. zu:
  - Schmelzen von Gletschern und Meereis  
→ Eis-Albedo Rückkopplung
  - Anstieg des Meeresspiegels
  - häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden



dpa/Boris Roessler

- Erwärmung führt außerdem z.B. zu:
  - Schmelzen von Gletschern und Meereis
    - Eis-Albedo Rückkopplung
  - Anstieg des Meeresspiegels
  - häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden
  - erhöhtem Wasserdampfgehalt der Luft
    - verstärkter Wasserkreislauf, Zunahme von Extremniederschlagsereignissen



# Wasserkreislauf



- Erwärmung führt außerdem z.B. zu:
  - Schmelzen von Gletschern und Meereis
    - Eis-Albedo Rückkopplung
  - Anstieg des Meeresspiegels
  - häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden
  - erhöhtem Wasserdampfgehalt der Luft
    - verstärkter Wasserkreislauf, Zunahme von Extremniederschlagsereignissen
    - Wasserdampfrückkopplung

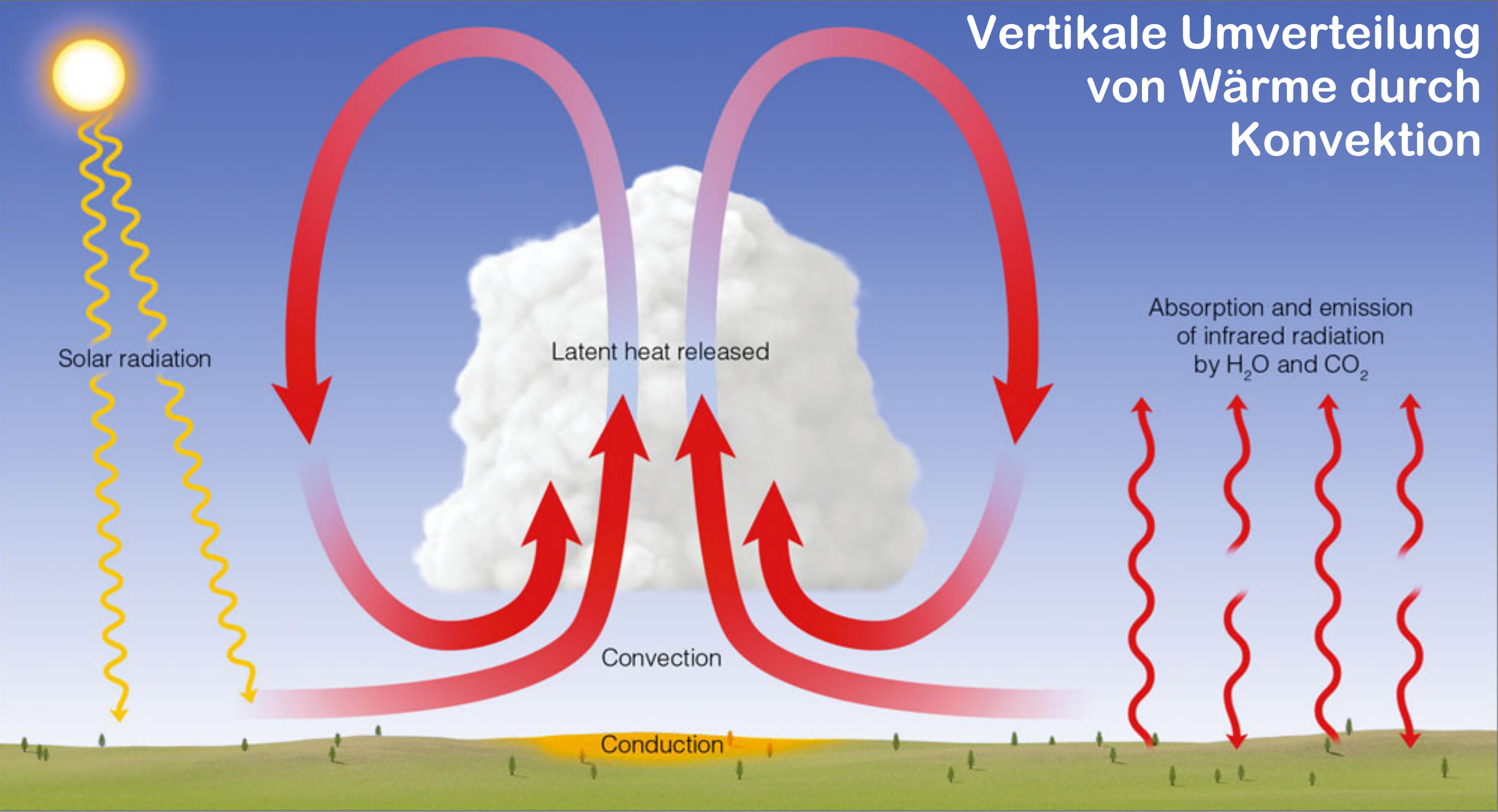
- Erwärmung führt außerdem z.B. zu:
  - Schmelzen von Gletschern und Meereis
    - Eis-Albedo Rückkopplung
  - Anstieg des Meeresspiegels
  - häufigere und intensivere Hitzewellen und Dürreperioden
  - erhöhtem Wasserdampfgehalt der Luft
    - verstärkter Wasserkreislauf, Zunahme von Extremniederschlagsereignissen
    - Wasserdampfrückkopplung

□ **Aussagen basierend auf grundlegender Thermodynamik**

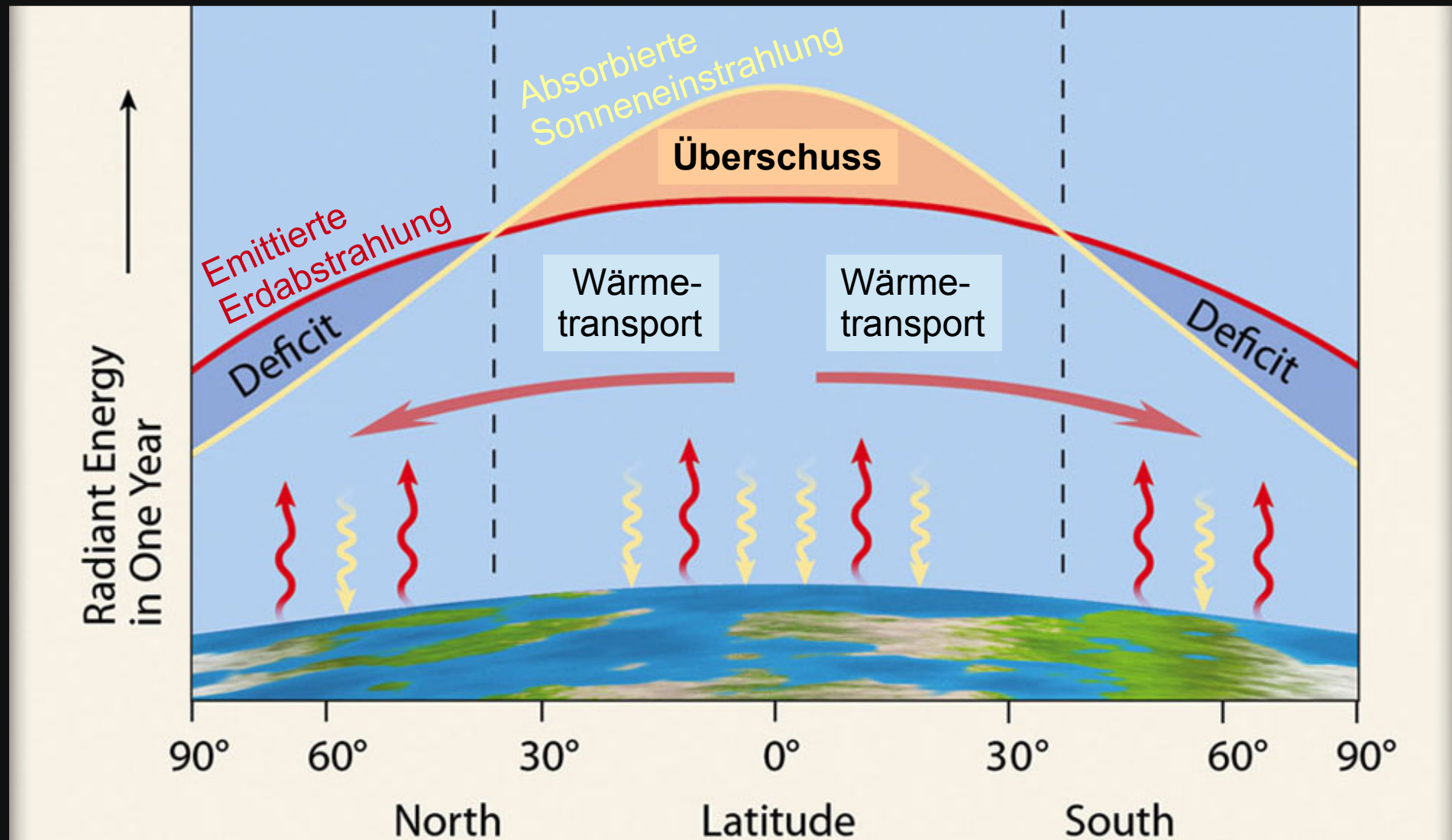
... Aussagen zu möglichen Zirkulationsänderungen  
(Thermodynamik + Fluiddynamik) deutlich komplexer,  
weniger robust, schwerer vorherzusagen

**Wie kommt Zirkulation zustande?**

# Vertikale Umverteilung von Wärme durch Konvektion



# 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)

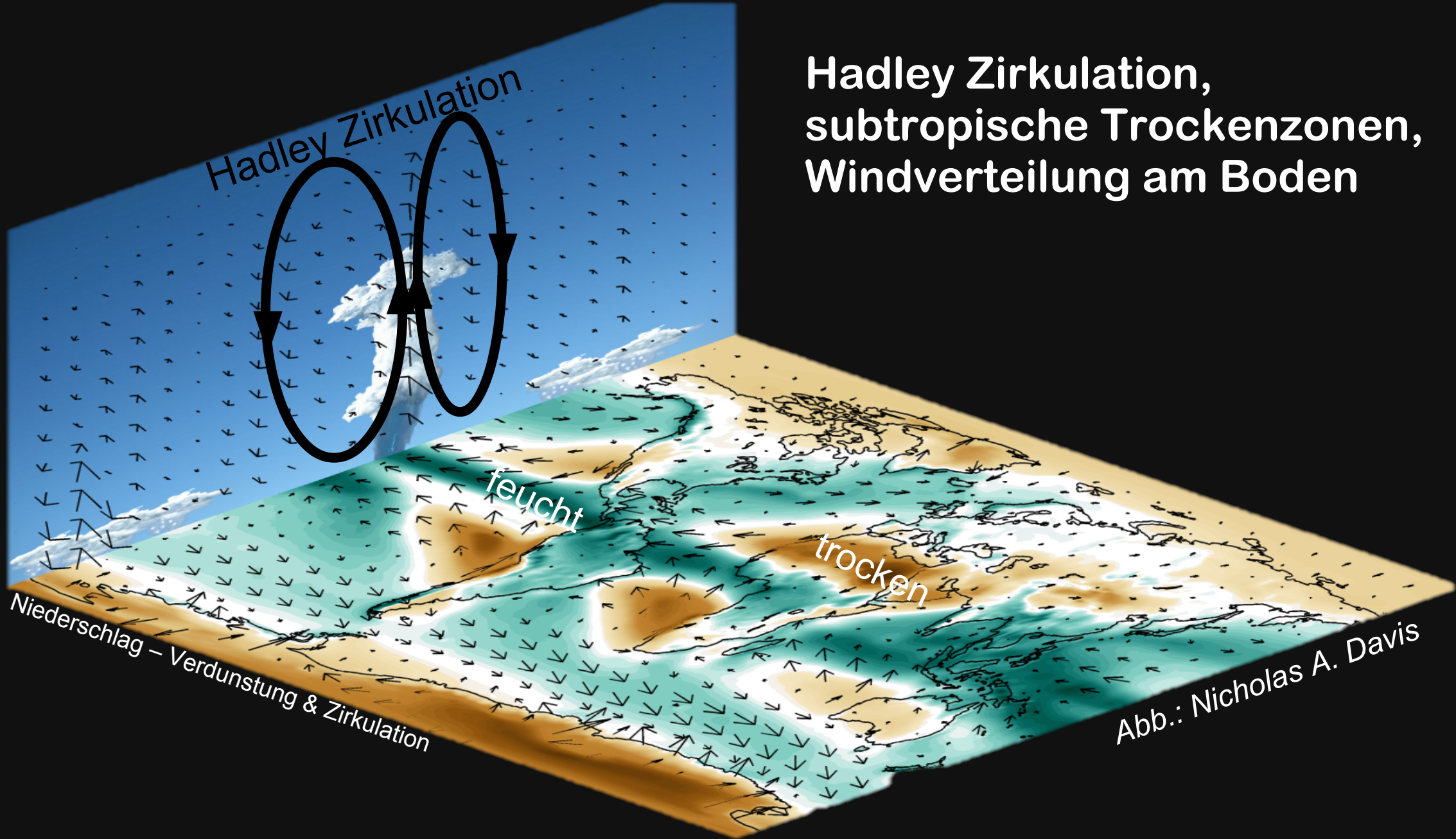


*Hurricane: 600 TW ~ 10.000 Atombomben*



Typhoon aus Sicht der International Space Station

# Hadley Zirkulation, subtropische Trockenzonen, Windverteilung am Boden

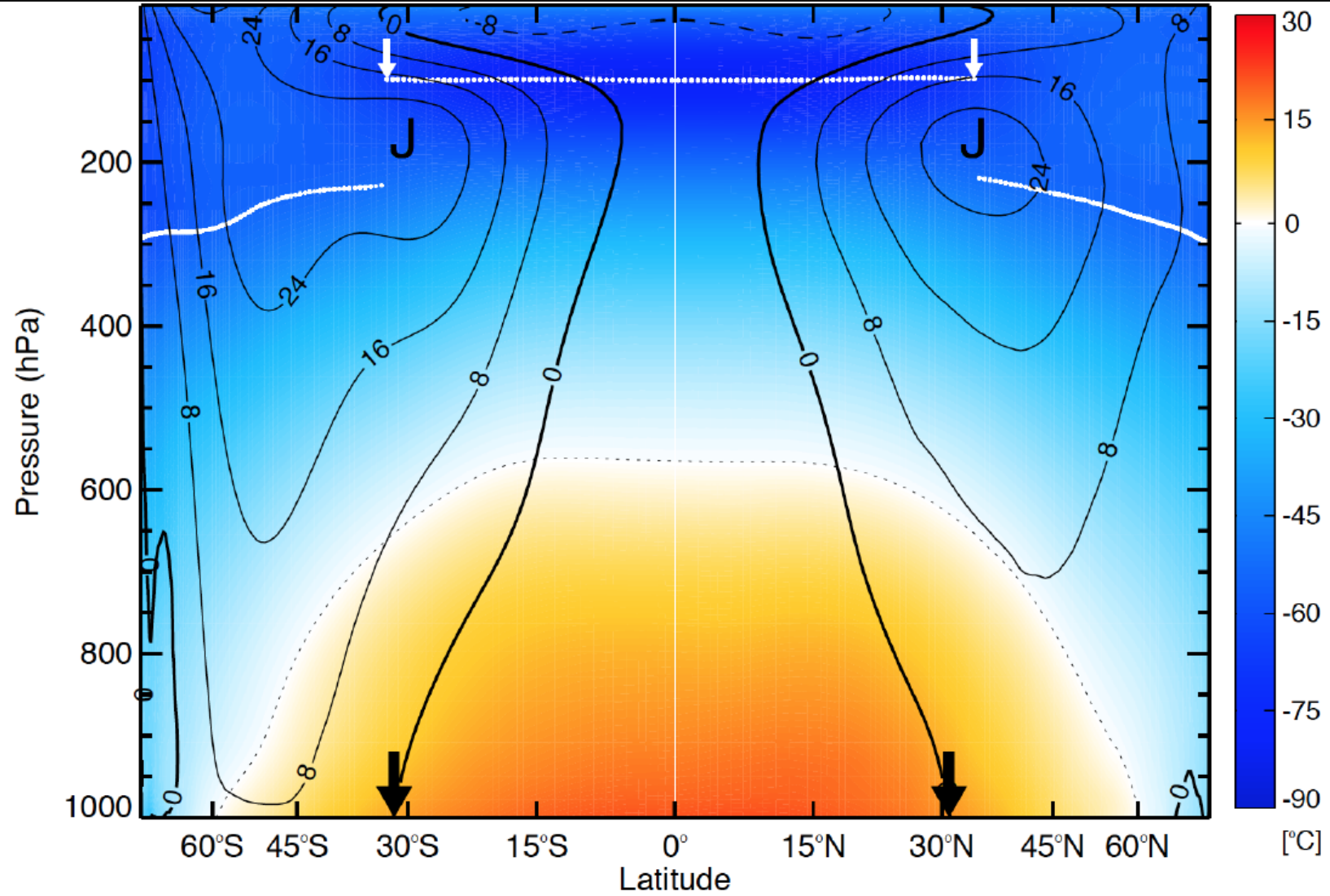


Niederschlag – Verdunstung & Zirkulation

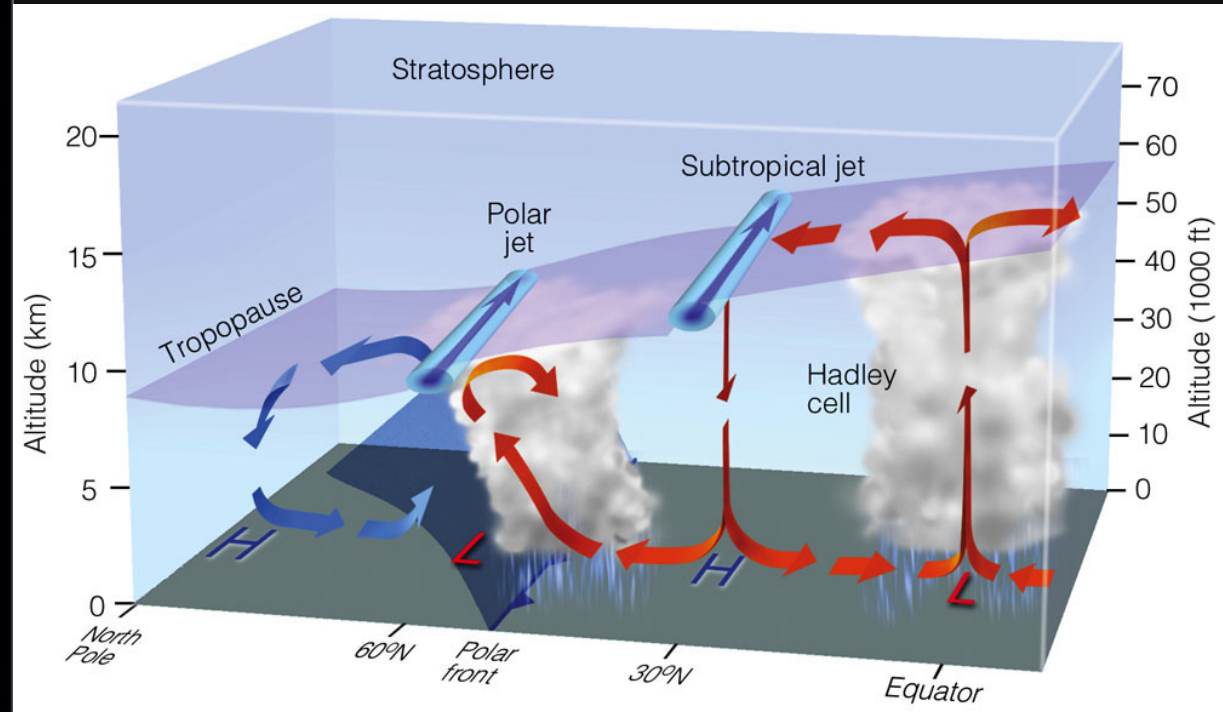
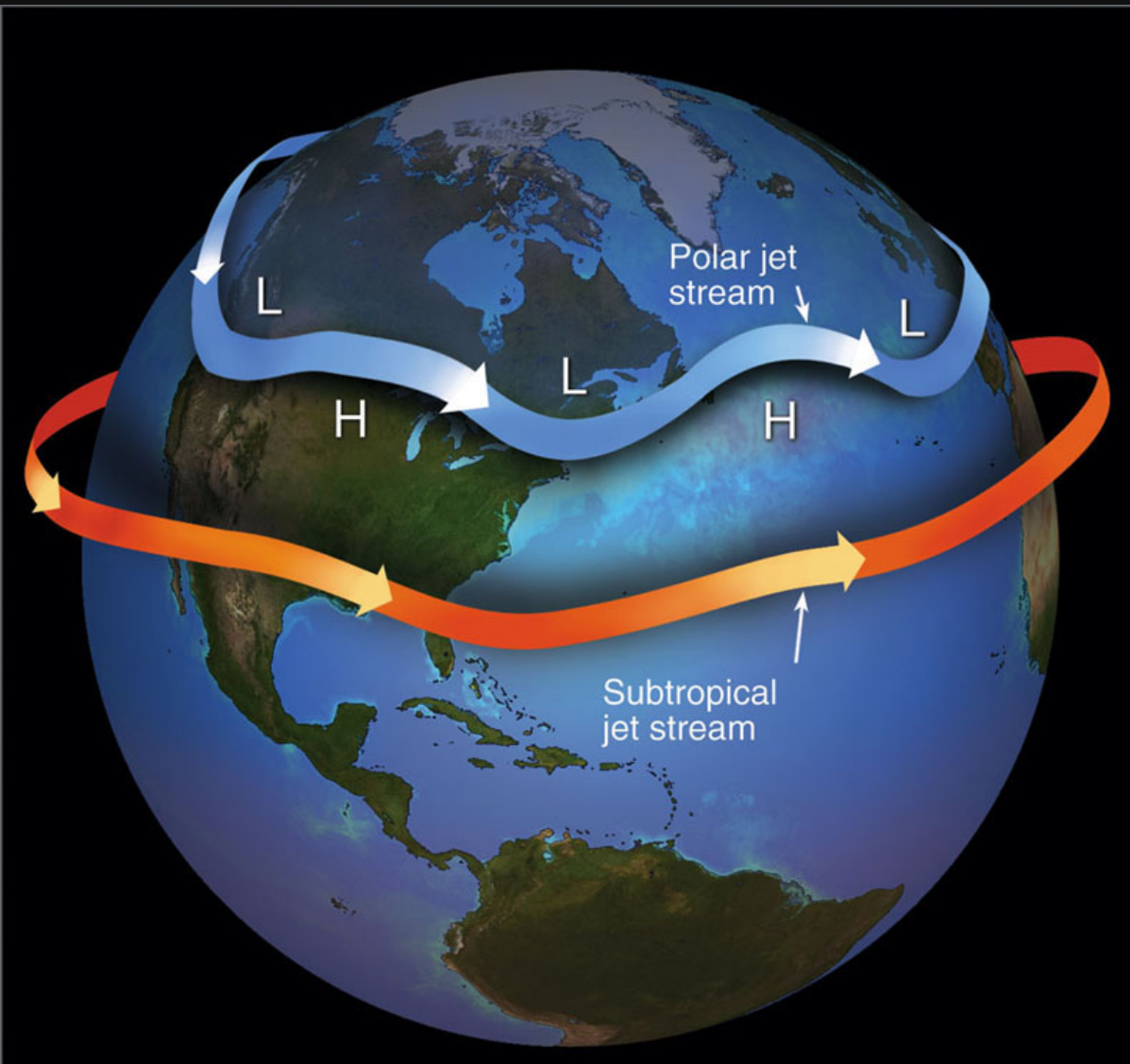
Abb.: Nicholas A. Davis

# Mittlere Temperatur und West $\square$ Ost Wind

Zirkulation wird durch  
Temperaturunterschiede  
angetrieben



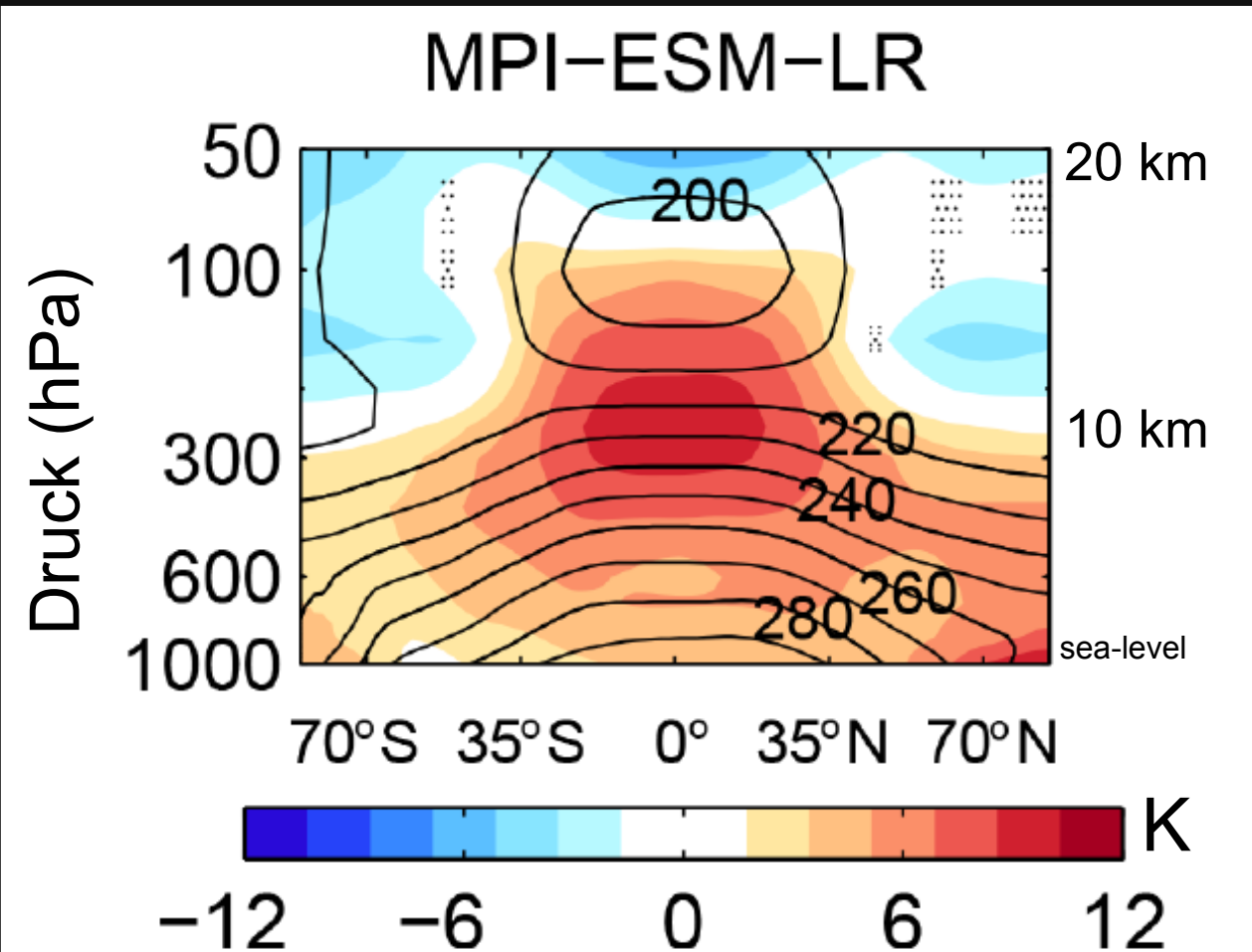
# Strahlströme (jetstreams) und Temperaturkontraste



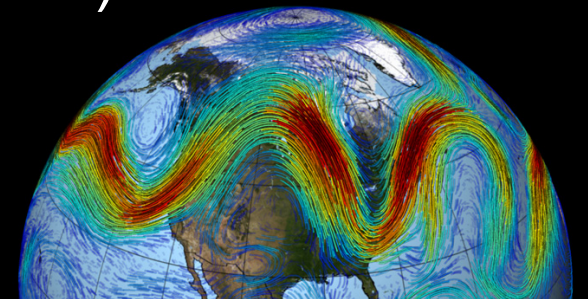
# Auswirkungen des Klimawandels auf die globale Zirkulation

# Veränderte Temperaturstruktur der Atmosphäre

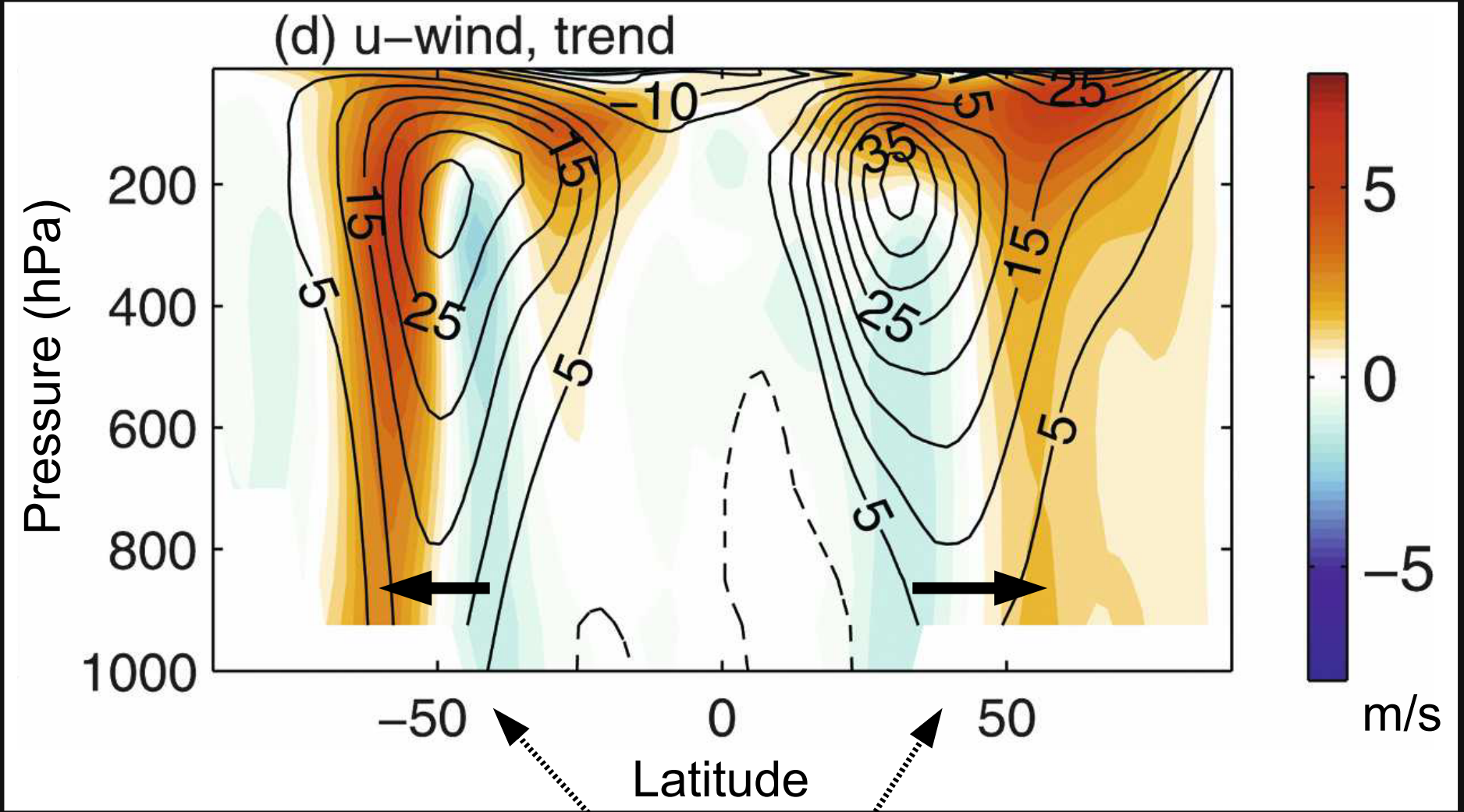
Simulierte Temperaturänderung durch 4-fache CO<sub>2</sub> Erhöhung:



- verstärkte Erwärmung der tropischen oberen Troposphäre
- Abkühlung der Stratosphäre
- Verschiebung der Jetstreams Richtung Pol (aber große Unsicherheiten)



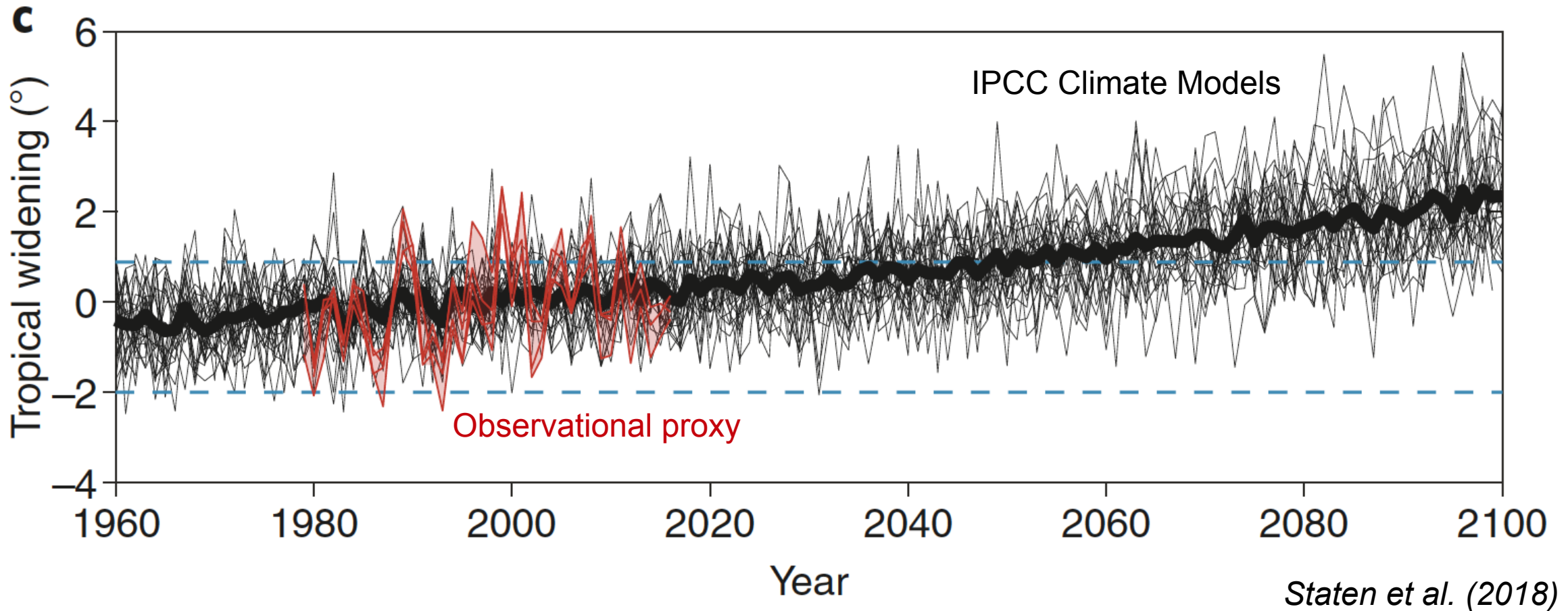
# Multi-Model Mean Climate Change Response “Future – Present”



Lu et al. 2008

**polewärtige Verschiebung der Strahlströme**

# Verschiebung der subtropischen Trockenzonen Richtung Pol



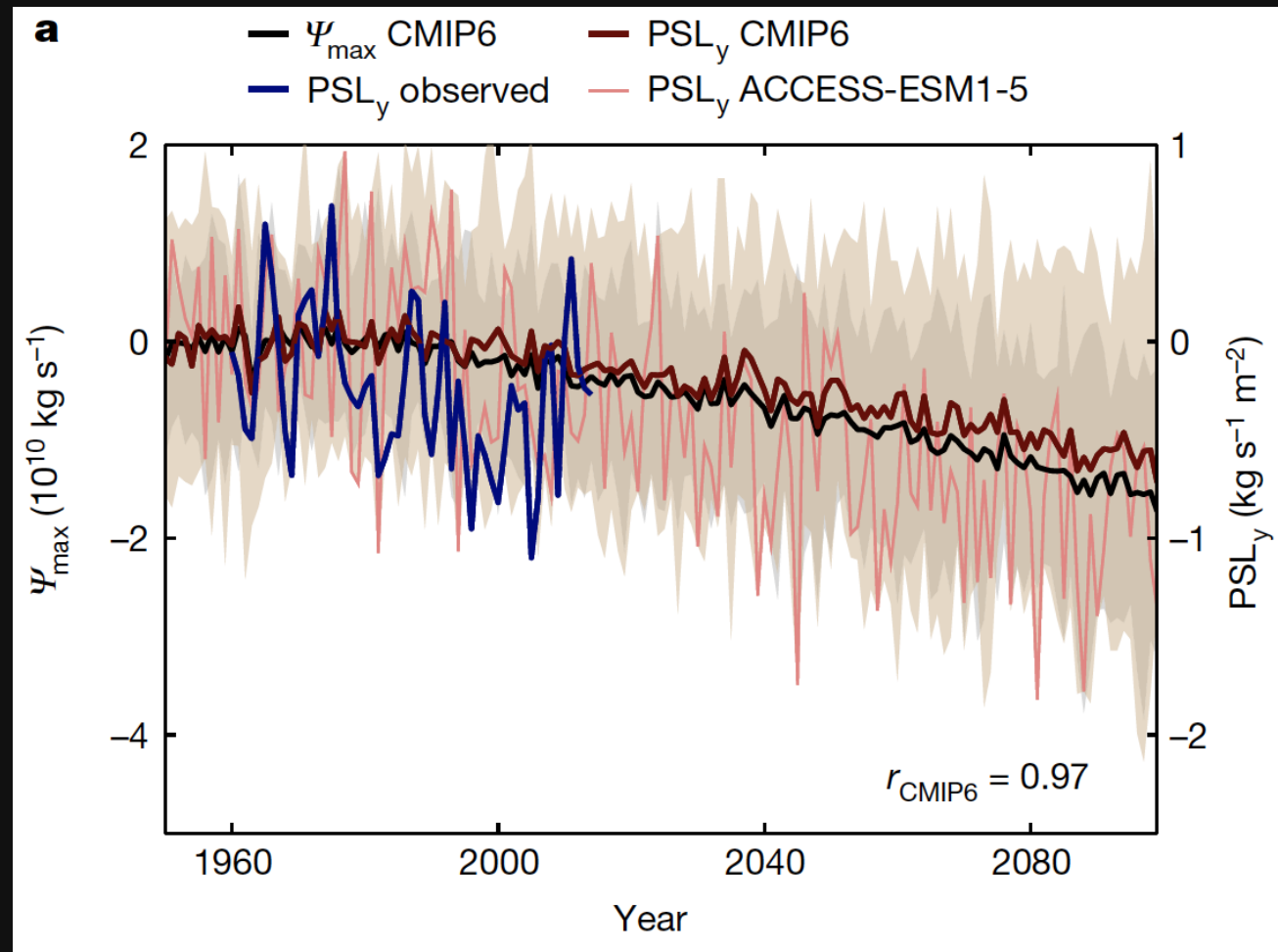


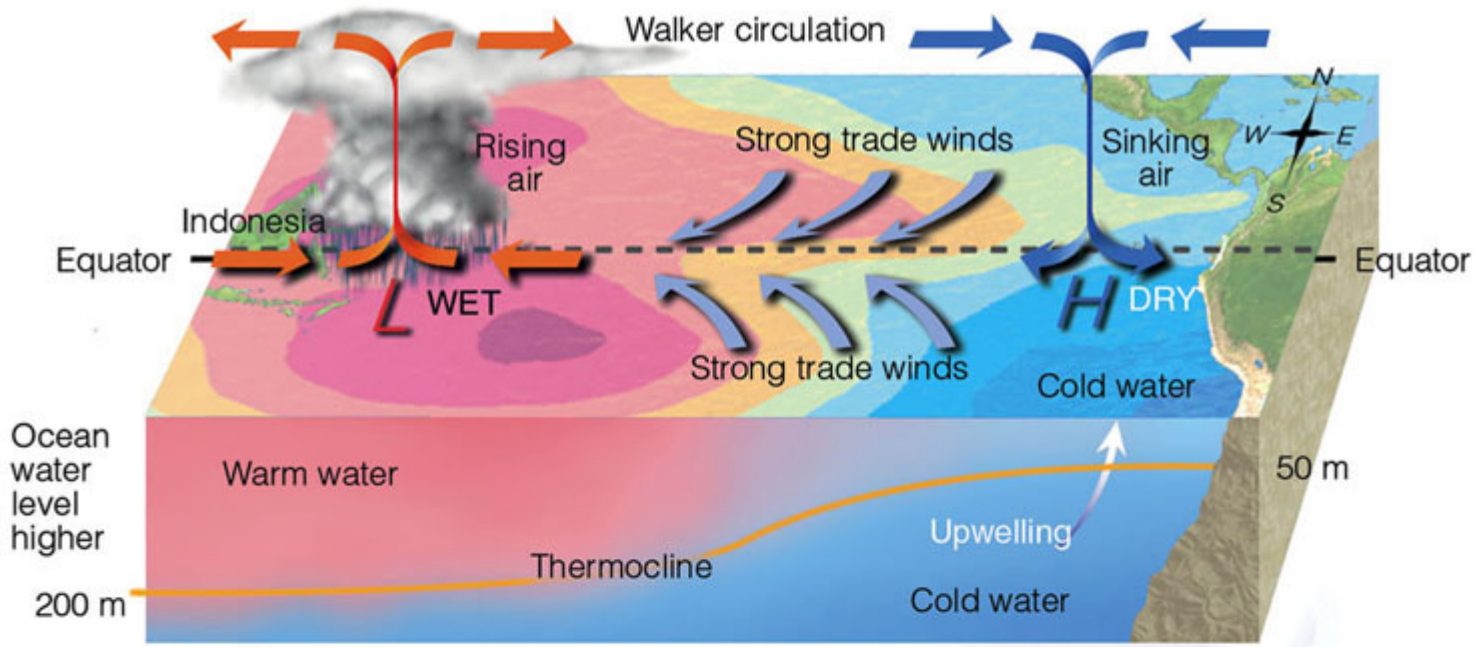
# Abschwächung der allgemeinen Tropenzirkulation

z.B. durch verstärkte Freisetzung latenter Wärme bei Wolkenbildung (→ effizientere Umverteilung von Wärme, d.h. Abschwächung)

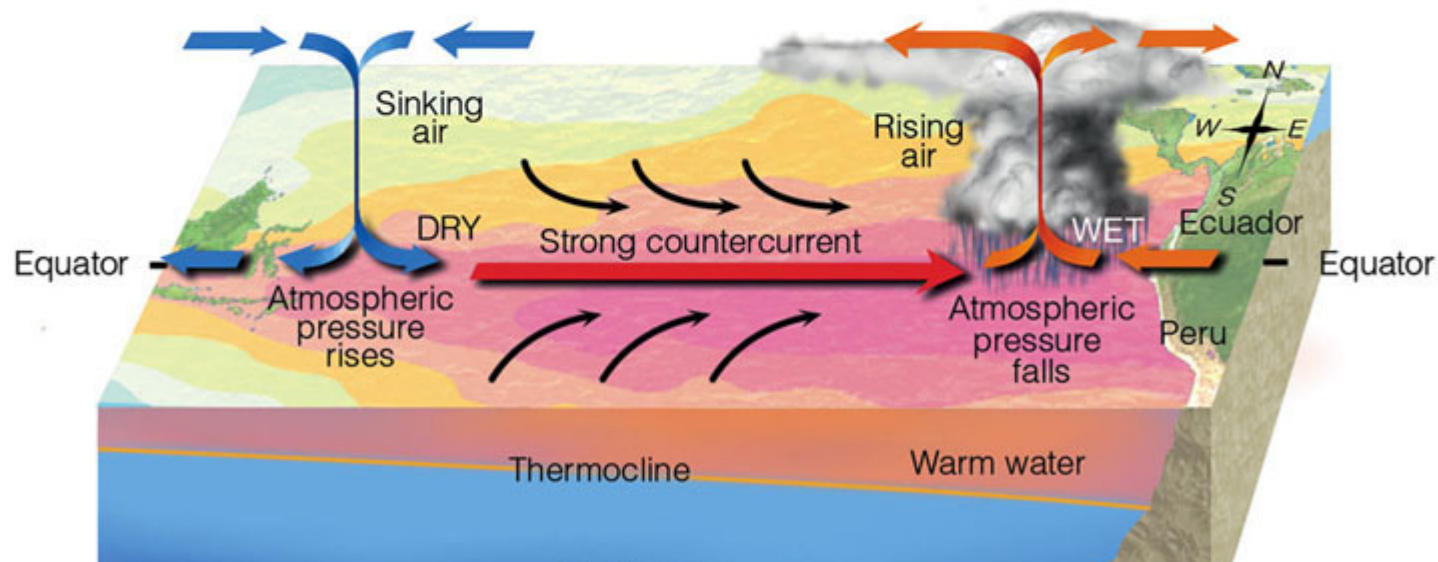
→ Abschwächung der Hadley und Walker Zirkulation

→ verstärkte Erwärmung im Ostpazifik (ähnlich zu El Niño)





(a) Non-El Niño conditions



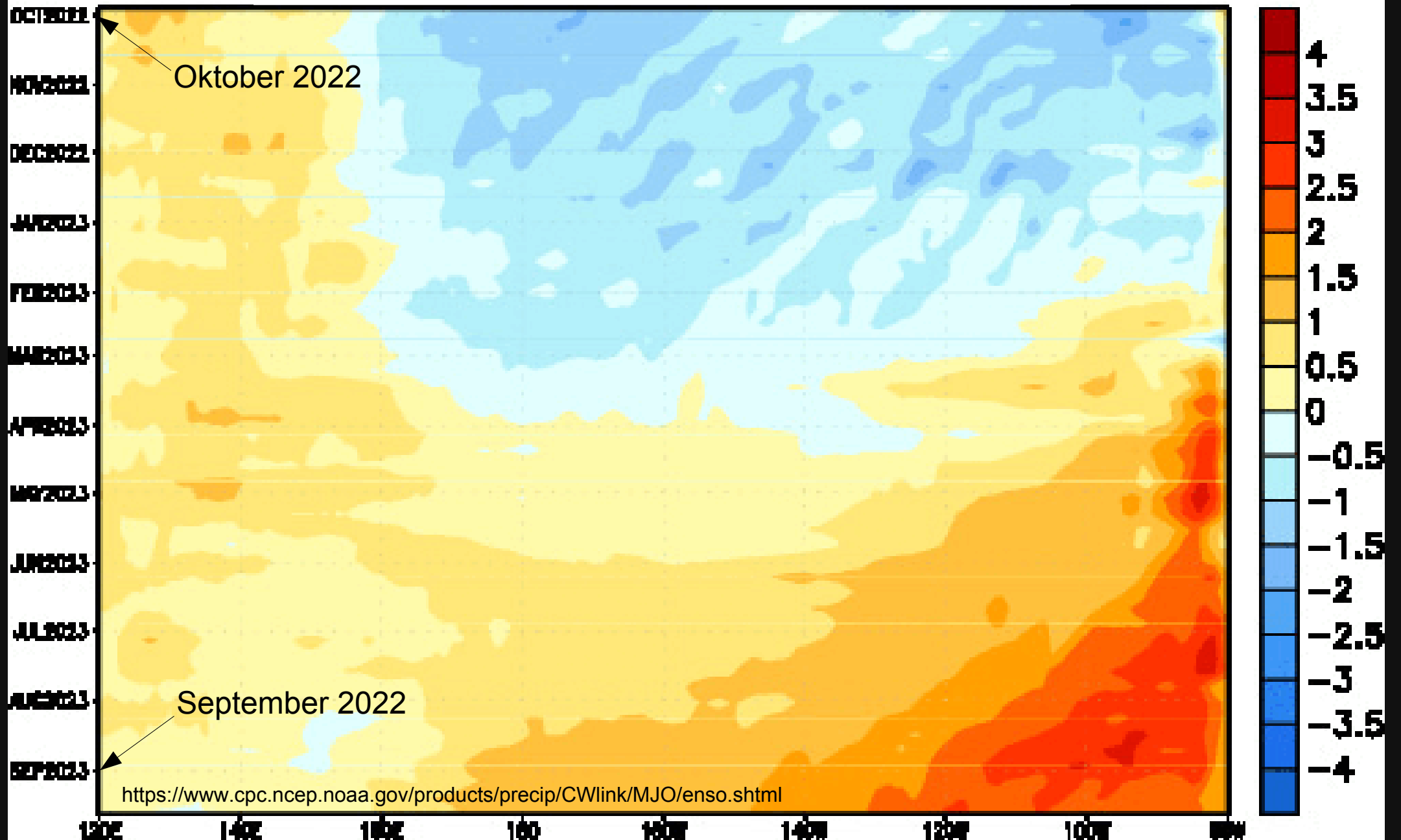
# Neutral

(similar structure but stronger for La Niña)

# El Niño

# Pacific sea surface temperature anomalies (5N–5S)

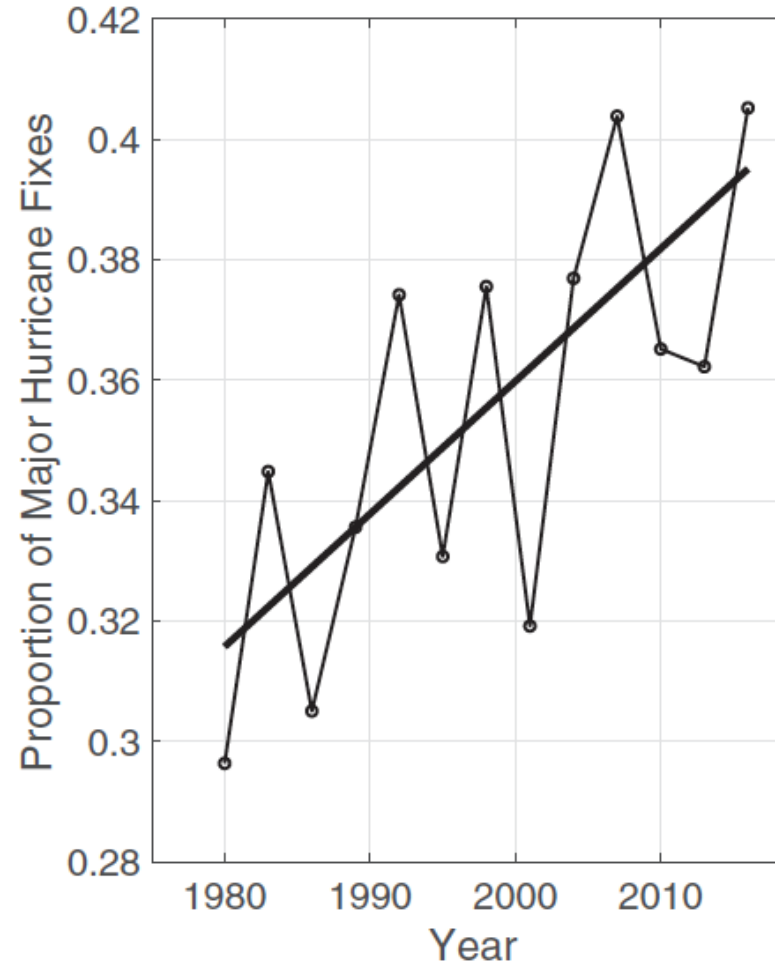
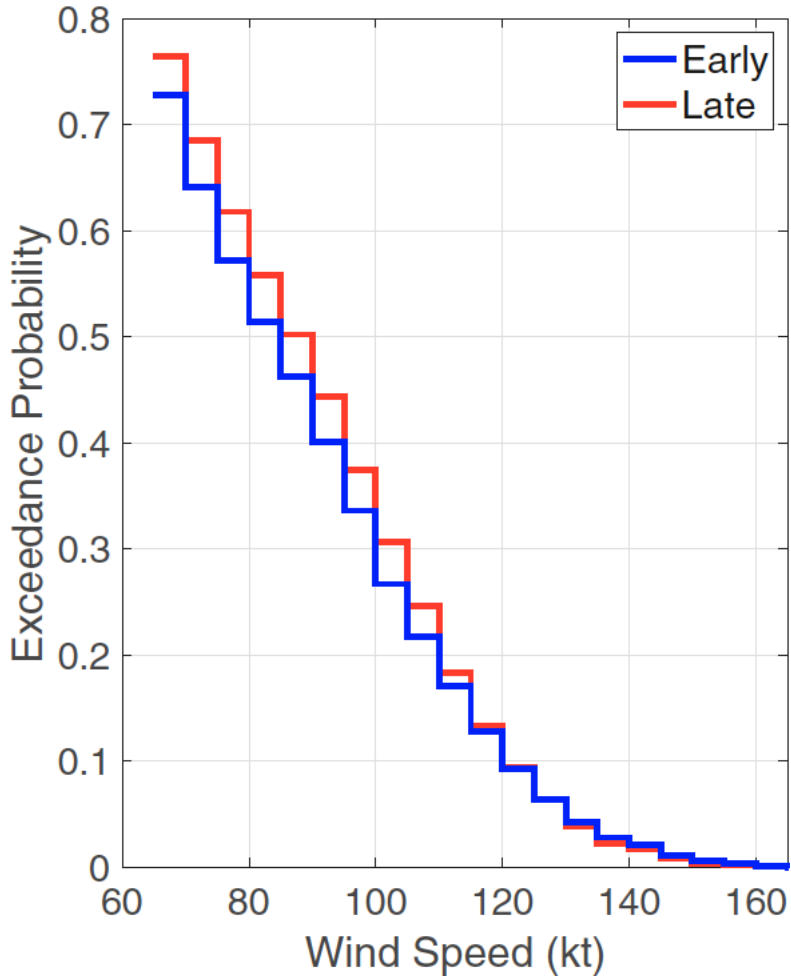
Deg. C



# Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades

James P. Kossin<sup>a,1</sup>, Kenneth R. Knapp<sup>b</sup>, Timothy L. Olander<sup>c</sup>, and Christopher S. Velden<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Center for Weather and Climate, National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, Madison, WI 53706;  
<sup>b</sup>Center for Weather and Climate, National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, Asheville, NC 28801;  
and <sup>c</sup>Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706



# Globale Erwärmung und Tropische Zyklonen

- Verstärkte Energiezufuhr durch wärmere Ozeane + verstärkte Freisetzung latenter Wärme bei Wolkenbildung  
→ Intensivierung
- Erhöhter Niederschlag, Anstieg des Meeresspiegels  
→ stärkere Sturmfluten in Küstenregionen, selbst bei gleicher Intensität
- Verschiebung Richtung Pol durch höhere Ozeantemperatur & Ausdehnung der tropischen Klimazone

<https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>

# Zusammenfassung

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