

Hintergrundinformationen zum Klimawandel und zum Treibhausgas CO₂

Michael Buchwitz (buchwitz@uni-bremen.de) und Maximilian Reuter (mreuter@iup.physik.uni-bremen.de)

Institut für Umweltphysik (IUP)

<https://www.iup.uni-bremen.de/> https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/

Fachbereich 1 Physik u. Elektrotechnik

Universität Bremen



Institut für
Umweltphysik (IUP)



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Geographisches
Institut



Projektförderung:



Klimawandel: Einige Stichworte

Treibhausgas-Emissionen Klimadaten Treibhauseffekt CO₂-Quellen
Fossile Brennstoffe Essentielle Klimavariablen CO₂-Senken
CO₂-Emissionen N₂O-Emissionen Klimamodelle Klimaprojektionen
Methan-Emissionen Kohlenstoffkreislauf Sonnenstrahlung
Energiebedarf Bevölkerungswachstum Wärmestrahlung Klimazonen
Ressourcenverbrauch Klimaabkommen Klimaschutz Photosynthese
Erderwärmung Energiewende Fridays for Future
Meeresspiegelanstieg Erneuerbare Energien Nachhaltigkeitsziele
Gletscherschmelze Energiesparen Energiespeicher
Extremwetterzunahme Kreislaufwirtschaft Geoengineering
Malariaausbreitung Überschwemmungen Ernährung
Ozeanversauerung Vegetationsveränderungen Verzicht
Dürren Artensterben Atomenergie
Wassermangel Waldsterben ...



Institut für
Umweltphysik (IUP)



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Geographisches
Institut



Projektförderung:



Clim4Edu Handbuch & interaktive Unterrichtsmaterialien



- Hintergrundinformationen zum Klimawandel
- Satellitenmessungen Essentieller Klimavariablen (ECVs: CO₂, Methan, Meeresspiegel, Gletscher, Eisschilde, ...)

Clim4Edu: „Roter Faden“

CO₂ steigt an

Temperatur steigt an

Meeresspiegel steigt an & Weiteres

Zukunft ?

Was tun ?

- Beobachtungsdaten einschließlich globale CO₂-Satellitenmessungen
- Fossile Brennstoffe im Allgemeinen (einschließlich Methan, ...)
- Treibhausgase
- Kohlenstoffkreislauf
- Wie misst man CO₂ aus dem Weltraum ?
- ...

- Treibhauseffekt, Energiebilanz, Strahlung
- Temperaturzeitreihen und räumliche Verteilung
- Wetter und Klima
- Was zeigen die Daten für Deutschland?
- ...
- **Andere Folgen:** Ozeanversauerung, ...

- Was zeigen Satellitenmessungen?
- Was trägt wieviel zum Meeresspiegel-Anstieg bei? (Grönland, Antarktis, Gletscher, ...)
- Essentielle Klimavariablen: Was kann man alles aus dem Weltraum messen?
- ...
- **Andere Folgen:**
 - Meeresisabnahme, Wetterextreme, ...

- Projektionen
- Klimamodelle
- ...

- Pariser Klimaabkommen
- Energiewende
- CO₂ Fußabdruck
- ...

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/Handbuch/

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/



Institut für Umweltphysik (IUP)



Geographisches Institut



Projektförderung:



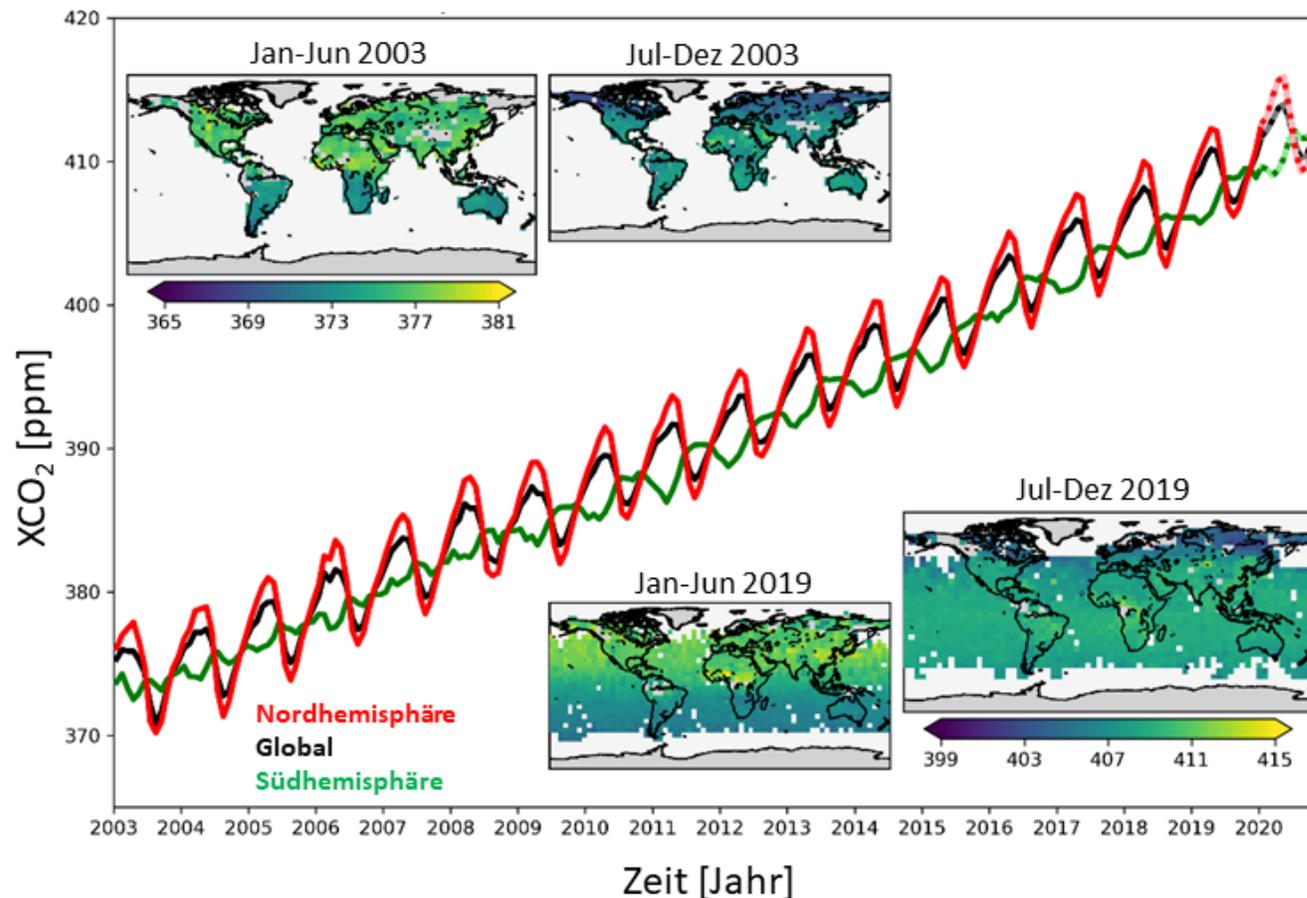
Satellitenbeobachtung des atmosphärischen CO₂

Ungebremster CO₂-Anstieg trotz Klimaabkommen (Kyoto, Paris, ...),
Ausbau erneuerbarer Energien (Windkraftanlagen, Solaranlagen, ...)



- SCIAMACHY auf ENVISAT (2002-2012) – D (DLR), NL, BE
- GOSAT (seit 2009) – Japan (JAXA)
- OCO-2 (seit 2014) – USA (NASA)

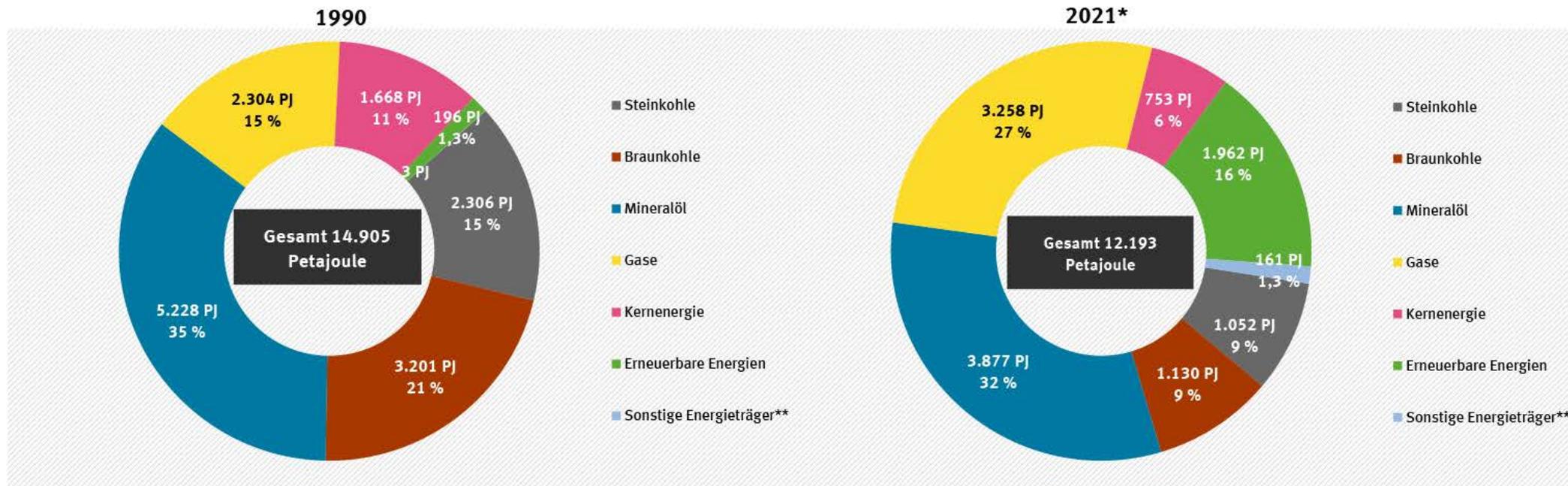
Vertikal gemittelttes CO₂-Mischungsverhältnis („XCO₂“)



CO₂ Mischungsverhältnis in ppm (*parts per million*)
= Anzahl der CO₂-Moleküle pro Millionen Luft-Moleküle (für trockene Luft)

Primärenergie Deutschland

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern



* vorläufige Angaben

** bis 1999 Erneuerbare Energien mit sonstigen Energieträgern, ab 2000 getrennte Erfassung, Sonstige Energieträger sind: Nichterneuerbare Abfälle, Abwärme und Außenhandelsaldo von Fernwärme und Strom

Quelle: Jahr 1990: AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2021; Jahr 2021: AG Energiebilanzen, Primärenergieverbrauch Jahr 2021, 21. Dezember 2021

<https://www.umweltbundesamt.de>

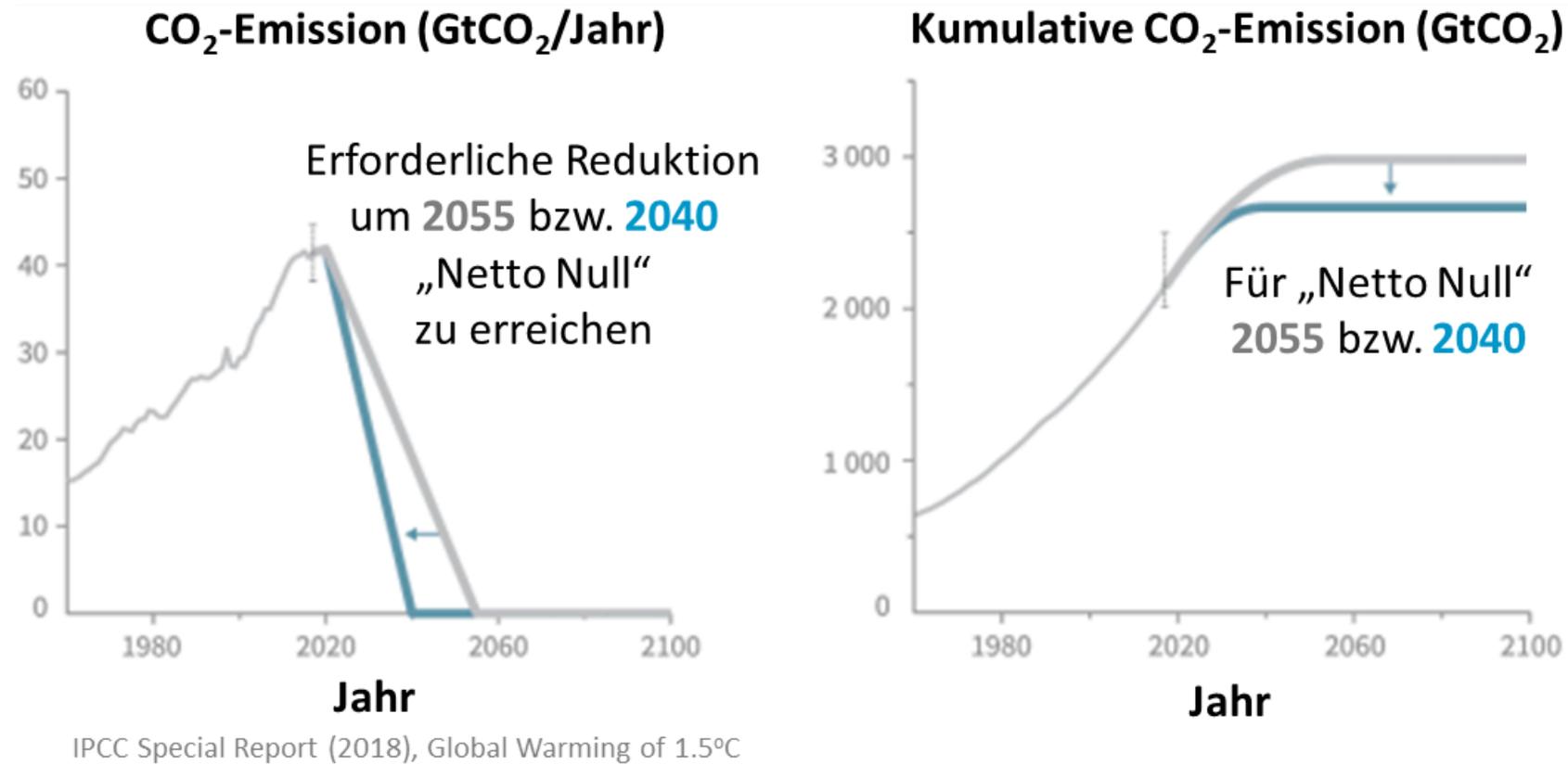
2021: Anteil „Erneuerbare Energien“ an Primärenergie: 16%
(am Stromverbrauch: 41,1%; am Endenergieverbrauch: 19,7%)

Energieverbrauch immer noch dominiert durch fossile Energieträger

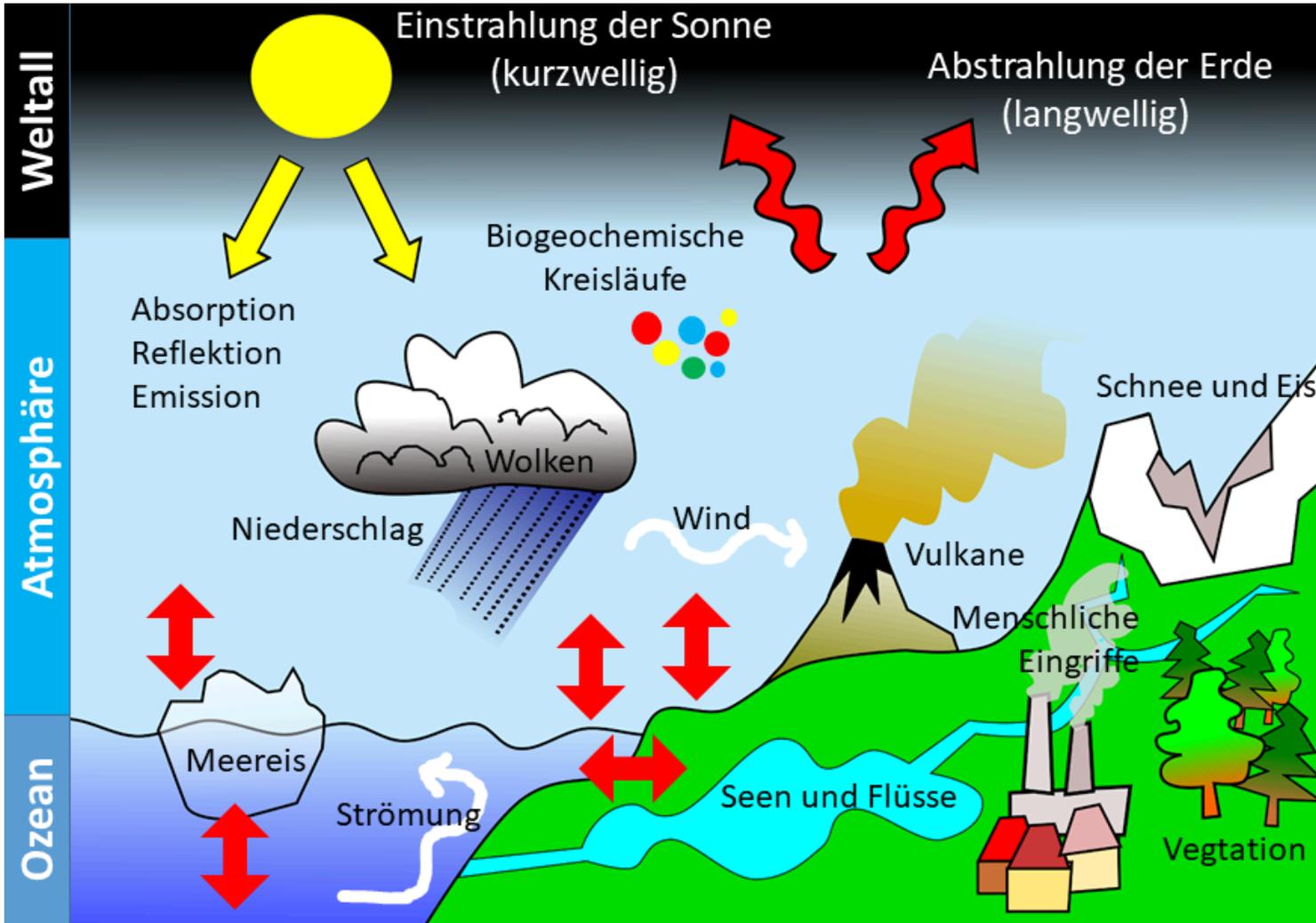
Ziel: „Netto Null“ CO₂-Emissionen

EU beschließt Klimagesetz: Netto-Null-Emissionen als verbindliches Ziel bis **2050**

Deutschland: Treibhausgasneutralität bis **2045**



Klimasystem Erde



„Störung des Systems“, z.B. durch **CO₂-Emissionen** aus der Verbrennung von Öl, Kohle und Erdgas



Änderungen von **Temperatur, Meeresspiegel, Vegetation, Niederschlag, Meereis, Strömungen, ...**

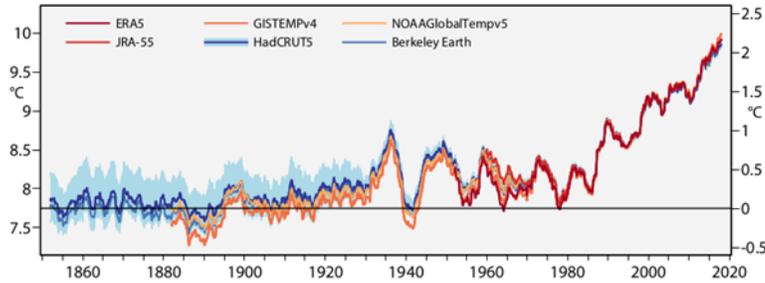
Temperaturanstieg global & verschiedene Regionen

Temperatur-Anstieg:

(a)

Temperatur **Europa**

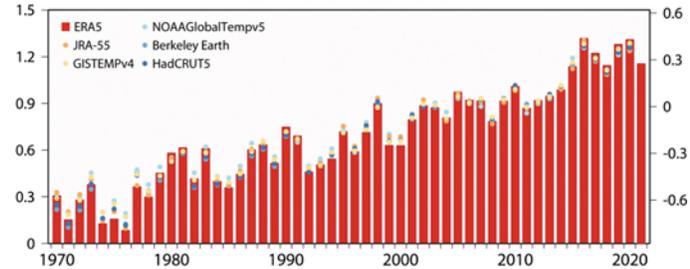
Temperaturänderung relativ zur Referenzperiode 1850-1900
Mittelwert über 60 Monate



(b)

Temperatur **Global**

Referenzperioden: 1850-1900 (links) und 1991-2020 (rechts)
Jährliche Mittelwerte

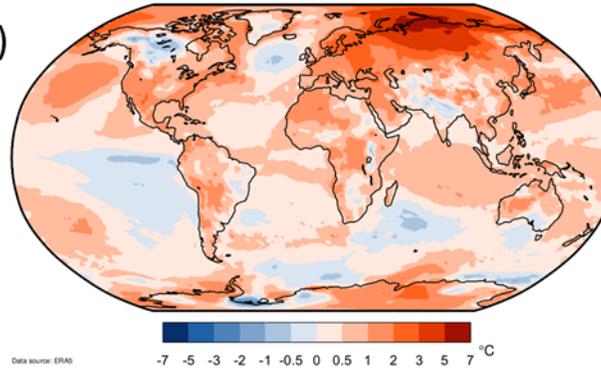


Temperaturanstieg 2016-2020 seit 1850-1900:

- Global etwa +1,2°C
- Europa etwa +2,2°C
- Arktis etwa +3°C

Temperaturdifferenz 2020 und 1981-2010

(c)



Quellen:

- (a) <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>
 (b) <https://climate.copernicus.eu/copernicus-globally-seven-hottest-y>
 (c) <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2020-warmest-year-rec>

Bremen (D)

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

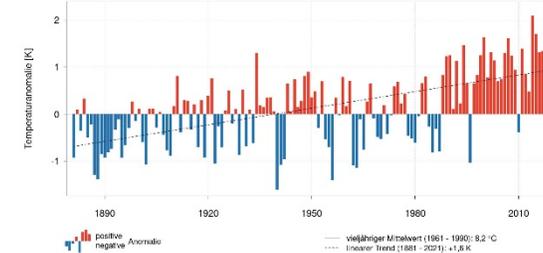


Deutschland

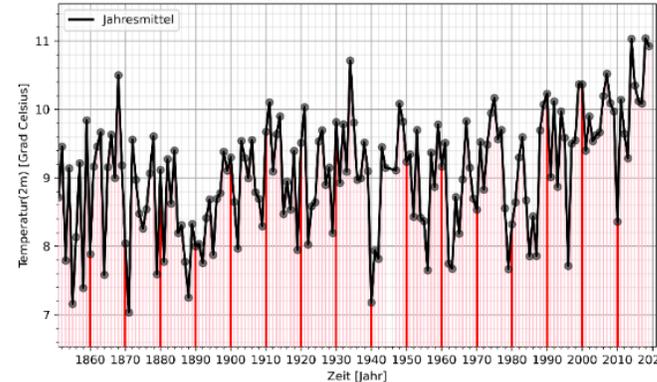
Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



Temperaturanomalie
Deutschland Jahr
1881 - 2021
Referenzzeitraum 1981 - 1990



Temperatur(2m) (DWD) - Bremen



Institut für
Umwelphysik (IUP)



Geographisches
Institut



Projektförderung:

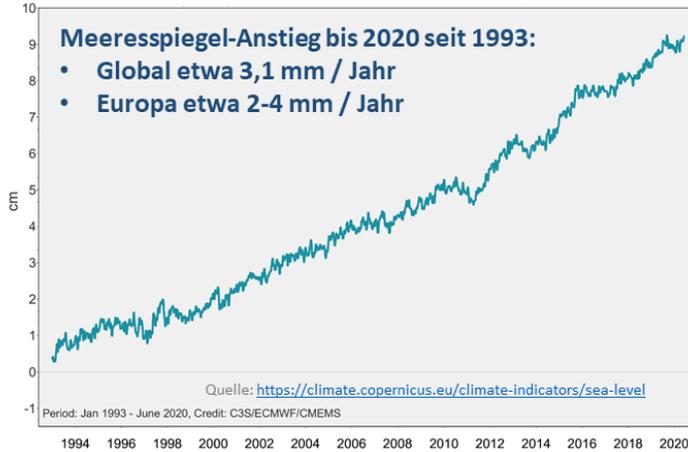


Folgen der globalen Erwärmung:

Meeresspiegelanstieg

Meeresspiegel-Anstieg:

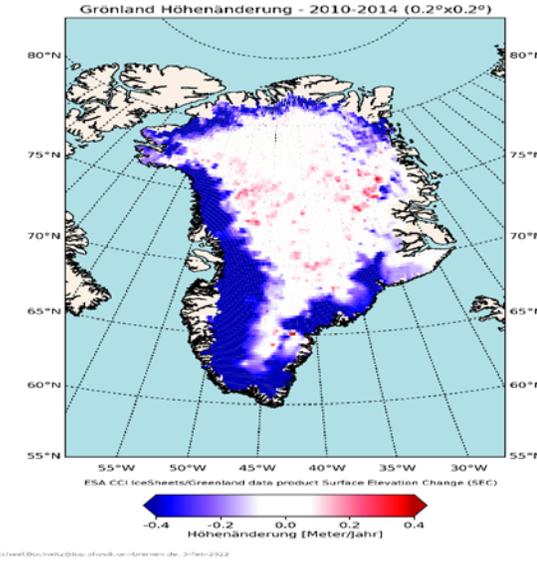
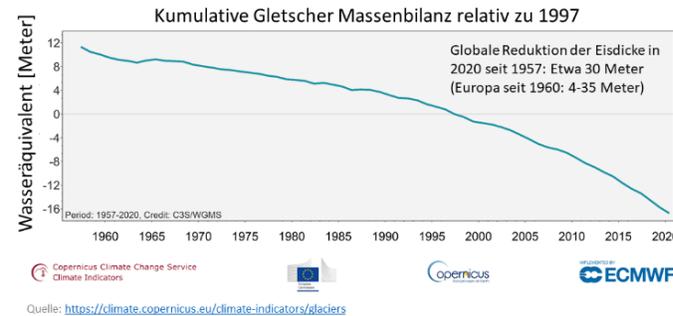
Anstieg globaler Meeresspiegel seit 1993



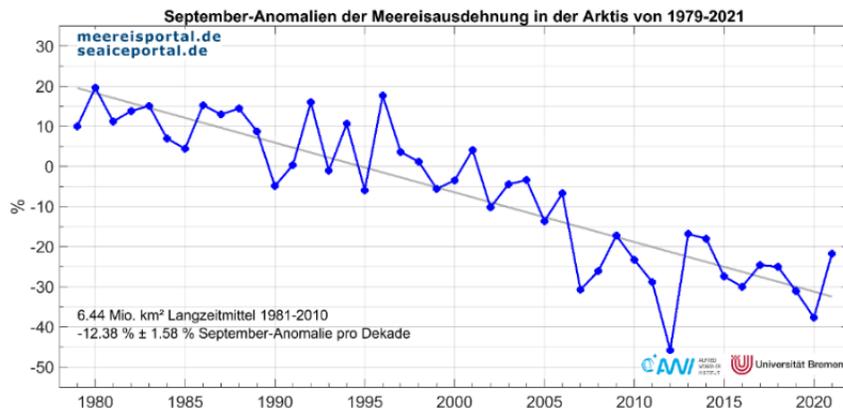
Eisschmelze Grönland

Gletscherschmelze

Massenbilanz der Gletscher (global):

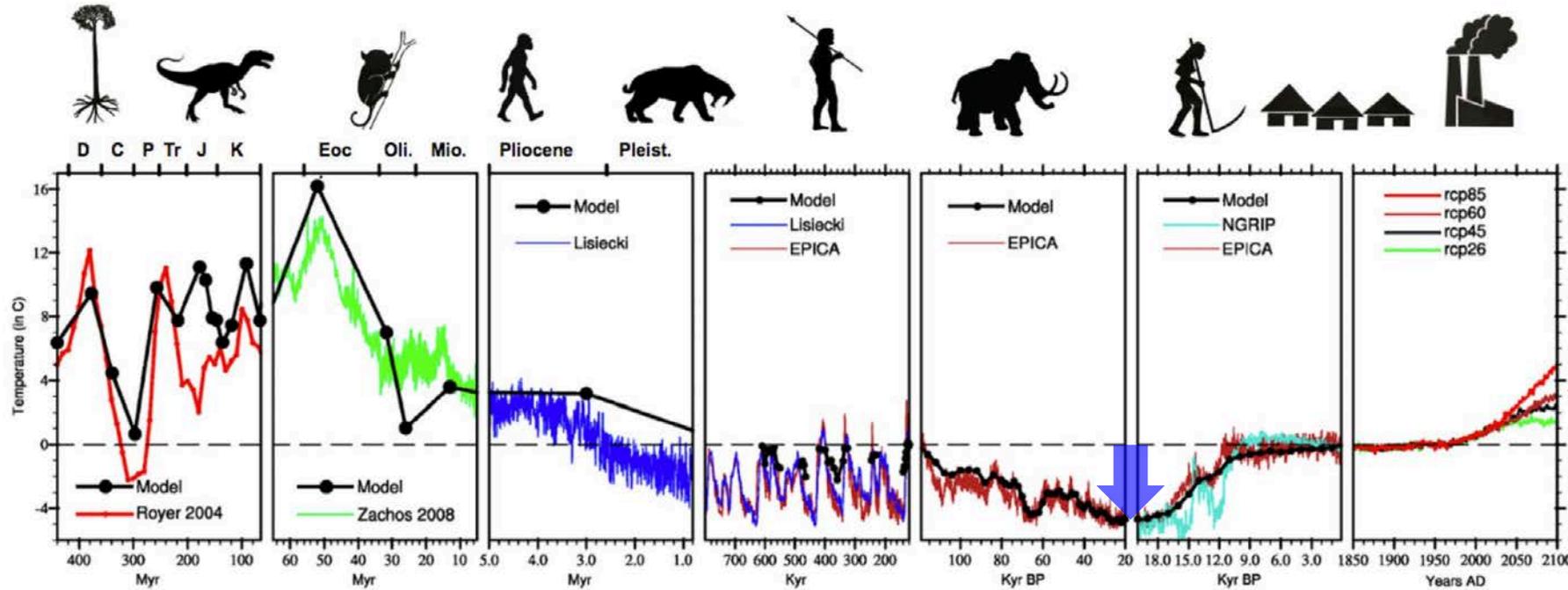


Abnahme arktisches Meereis



- Extremwetterzunahme (Hitzewellen, Stürme, Dürren, Überschwemmungen, ...)
- Verschiebung von Vegetationszonen
- Ernteauffälle
- Ausbreitung Dengue und Malaria
- ...

Temperatur der letzten 450 Millionen Jahre + Projektionen bis 2100



Auf dem Weg in
eine unbekante
Heisszeit

Global war es in der letzten Kaltzeit (Glazial, „Eiszeit“) „nur“ einige Grad kälter als heute, aber große Teile Deutschlands waren von einer mehrere Kilometer dicken Eisschicht bedeckt

Jedes Grad Änderung der globalen Mitteltemperatur ist ein großer Effekt und nicht zu vergleichen mit lokalen kurzfristigen Temperaturschwankungen

Eisbohrkerne:

NGRIP (Grönland), EPICA (Antarktis)

https://schoolsforfuture.net/m/slides/user_1/ff6b2bce4a024199106d_global-annual-mean-temperature-variation-of-the-Earth_P53161Z.png



Institut für
Umwelphysik (IUP)



Geographisches
Institut



Projektförderung:



Pariser Klimaabkommen

Ziel für den maximalen Anstieg der globale Mitteltemperatur:
< 2 °C, besser noch < 1.5 °C



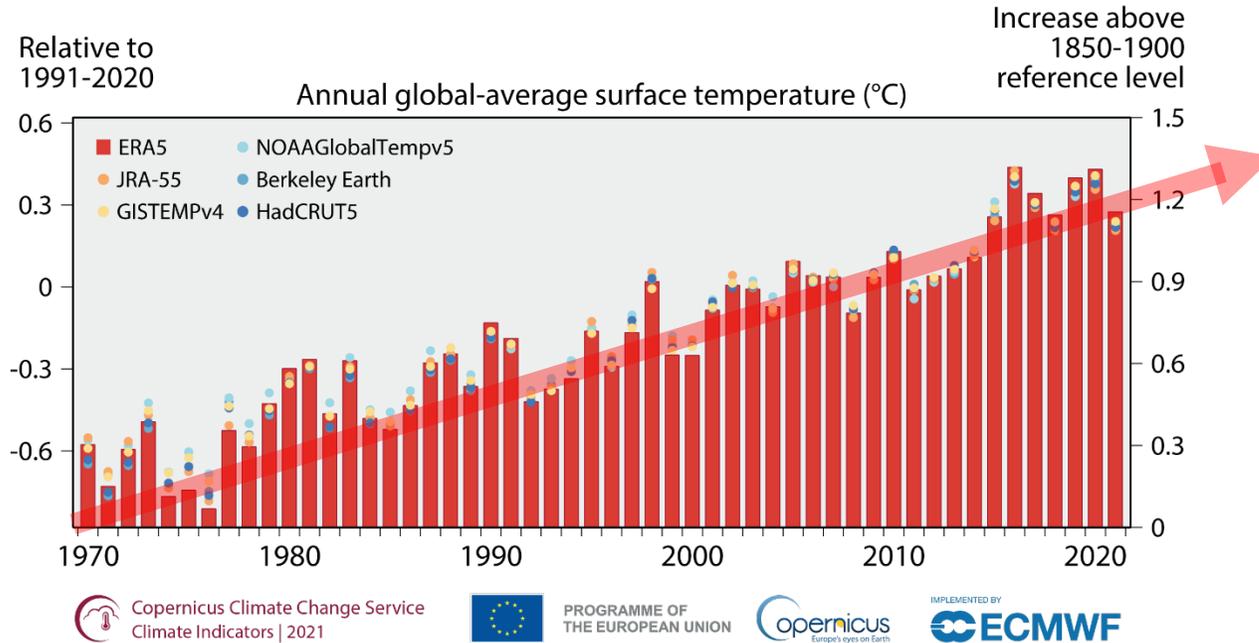
Die Welt geht nicht unter bei +2 Grad aber jedes 0,1 Grad zählt, da Folgen der Klimaänderung zunehmend unbeherrschbarer werden.

	1,5 °C	2 °C
Zunahme von Hitzetagen im Jahr ⁷	Ca. Verdopplung (+ 7 Tage) 	Ca. Vervielfachung (+ 20 Tage)
Häufigere Starkregenfälle an Land ⁸	+ 17 % 	+ 36 %
Menschen, die zusätzlich unter Wasserknappheit leiden ⁹	+ 271 Mio. 	+ 388 Mio.
Zunahme der geeigneten Gebiete für die Übertragung von Malaria ¹⁰	+ 10 % 	+ 15 %
Vergrößerung der Waldbrandflächen im Mittelmeerraum ¹¹	+ 41 % 	+ 62 %
Insektenarten, deren Lebensraum sich mindestens halbiert ⁵	6 % 	18 %
Verlust der tropischen Korallenriffe ¹²	- 70 bis 90 % 	- 99 %

*im Vergleich zu 1971–81

Nelles und Serrer, 2021

Pariser Klimaabkommen und globaler Temperaturanstieg



<https://climate.copernicus.eu/esotc/2021/globe-in-2021>

Wieviel Zeit bleibt uns noch für +1,5 Grad bzw. +2 Grad Paris-Ziel?

Temperaturanstieg:

Etwa 1,2 Grad / 50 Jahre =
0,24 Grad / Jahrzehnt

Schon erreicht: Etwa 1,2 °C

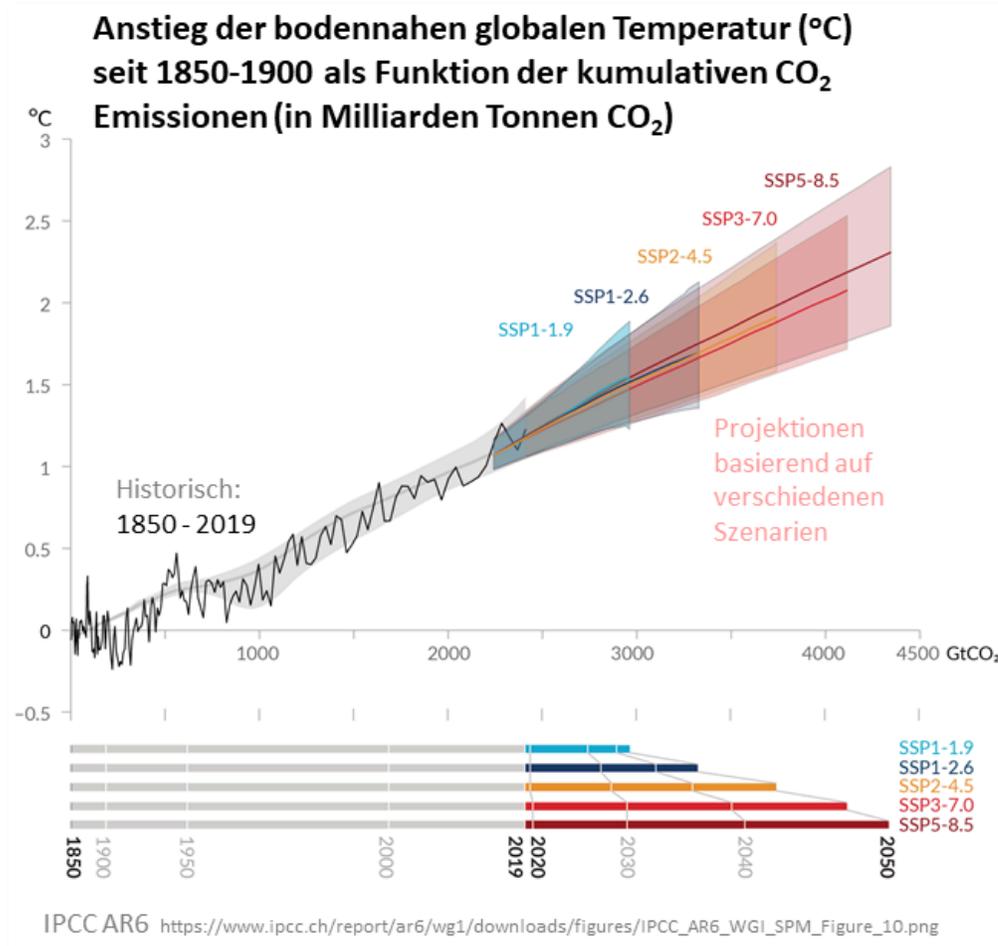
Es verbleiben noch 0,3 Grad bzw. 0,8 Grad

- **1,5 Grad** erreicht in etwa 13 Jahren (= $0,3 \cdot 10 / 0,24$), also etwa um das Jahr 2034 (etwa **Mitte der 2030er Jahre**)
- **2 Grad** erreicht in etwa 33 Jahren (etwa **Mitte der 2050er Jahre**)

Zusammenhang Temperatur und CO₂-Emissionen

Die Erwärmung hängt (fast) nur davon ab, wieviel CO₂ bisher insgesamt emittiert wurde.

Wann und wo das CO₂ emittiert wurde, spielt (fast) keine Rolle.



Eine bestimmte Erwärmung entspricht also einer bestimmten Gesamtmenge des emittierten CO₂.

Man kann daher recht genau vorhersagen, wieviel CO₂ noch emittiert werden darf, bis eine bestimmte Temperatur erreicht sein wird.

Pariser Klimaabkommen und verbleibendes CO₂-Budget

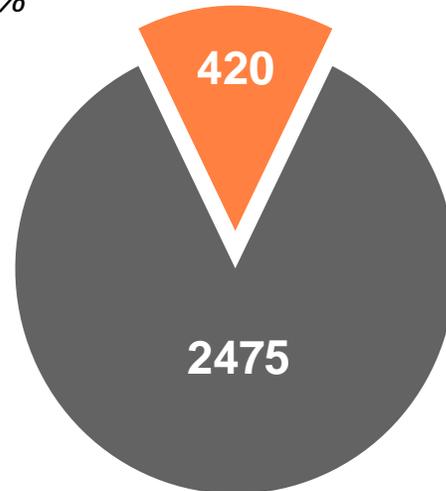
Das verbleibende CO₂-Budget (*carbon budget*) um die global Erwärmung auf 1,5 °C, 1,7 °C bzw. 2 °C zu begrenzen, ist 420 GtCO₂, 770 GtCO₂ bzw. 1270 GtCO₂. Dies entspricht 11, 20 bzw. 32 Jahre ab 2022.

Vermutlich erreicht:

Wahrscheinlichkeit 50%

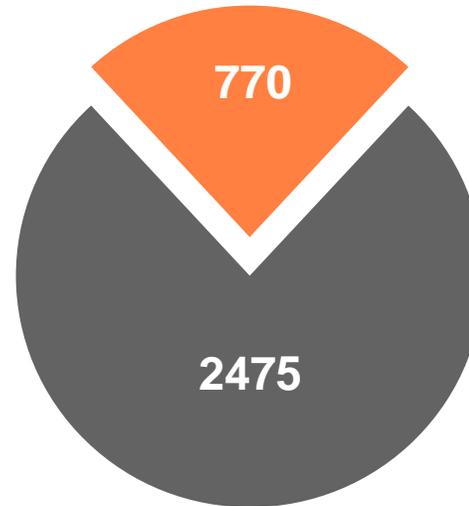
1.5°C

2033



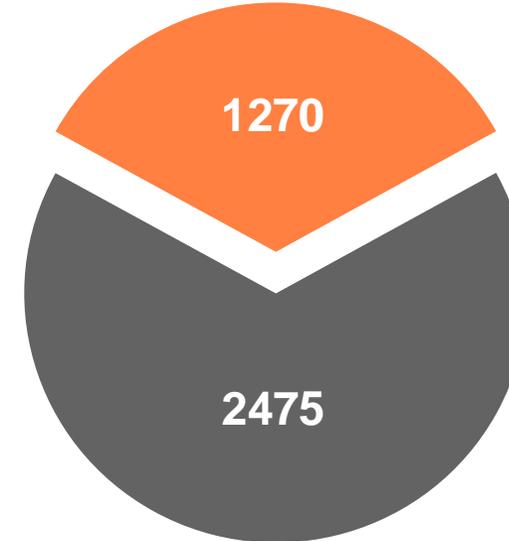
1.7°C

2042



2°C

2054



2475 GtCO₂
wurden bereits seit
1750 emittiert.

- Verbleibend ab 2022
- Bereits verbraucht



Quelle: IPCC AR6 WG1; Friedlingstein et al 2021; Global Carbon Budget 2021

<https://www.globalcarbonproject.org/>



Institut für
Umwelphysik (IUP)



Geographisches
Institut

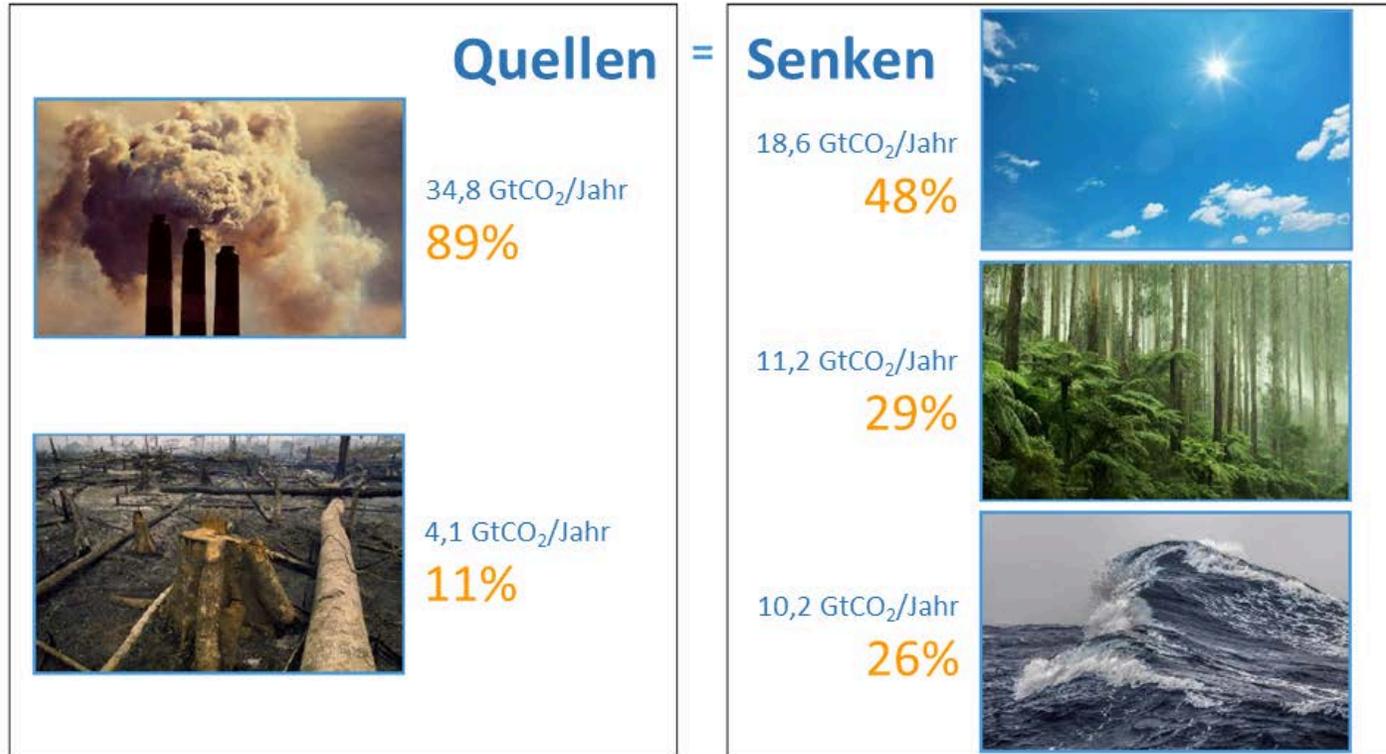


Projektförderung:



CO₂ Quellen und Senken

CO₂ Quellen und Senken 2011-2020:



Budget Ungleichgewicht: -1.0 GtCO₂/Jahr

(= Differenz der geschätzten Quellen und Senken)

3%

Quelle: Friedlingstein et al., 2021, Global Carbon Project

(https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pptx)

Nur etwa die Hälfte unserer CO₂-Emissionen verbleibt (mittelfristig) in der Atmosphäre.

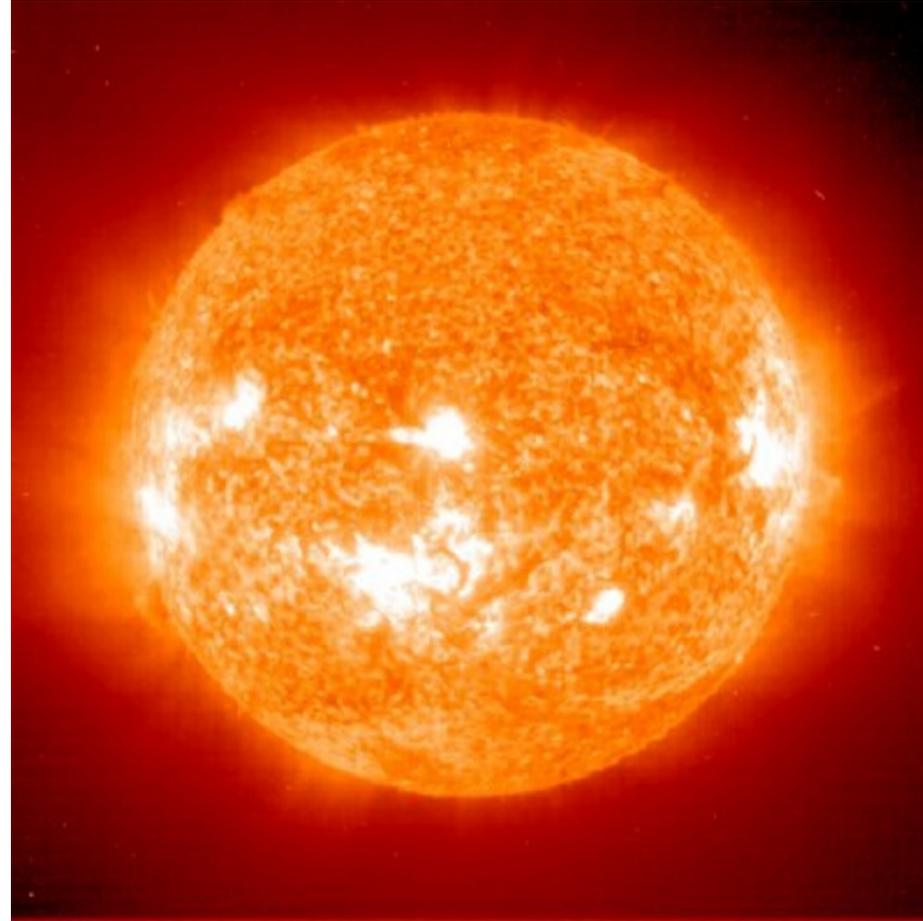
Die andere Hälfte wird von den „natürlichen Senken“ - Wälder und Ozeane – „entsorgt“.

Dies bremst die Erderwärmung aber führt zur Versauerung der Ozeane mit einer Vielzahl negativer Konsequenzen.

Strahlung



<http://www.moments-from-space.com/>



https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/11/The_Sun2

 Universität
Bremen
 Institut für
Umweltphysik (IUP)

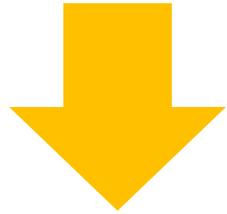
RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM  RUB
Geographisches
Institut 



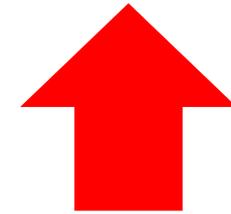
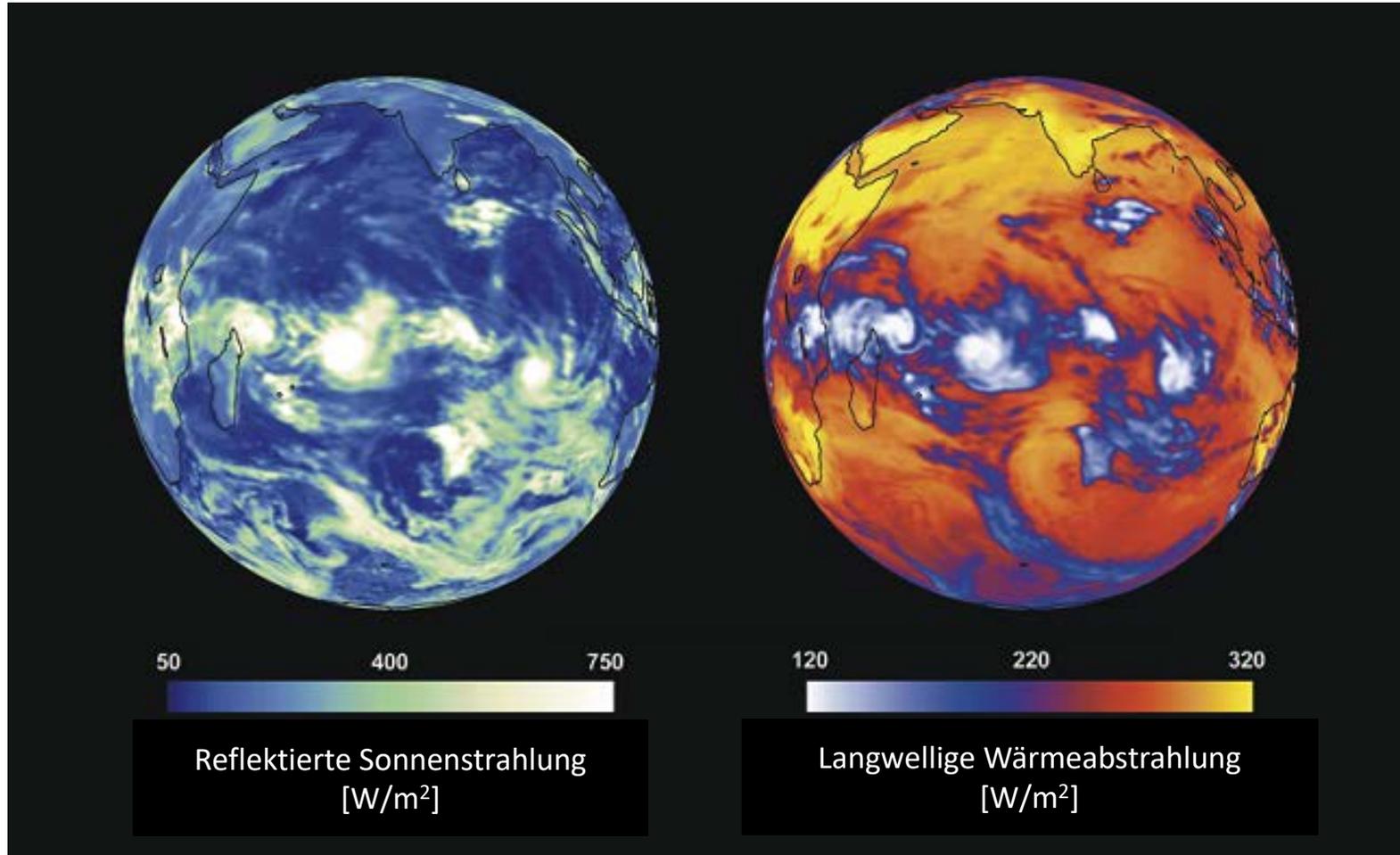
Projektförderung:



Solare Einstrahlung und Wärmeabstrahlung



Energie rein
(Sonne)



Energie raus
(Infrarot)



Institut für
Umweltphysik (IUP)



Geographisches
Institut



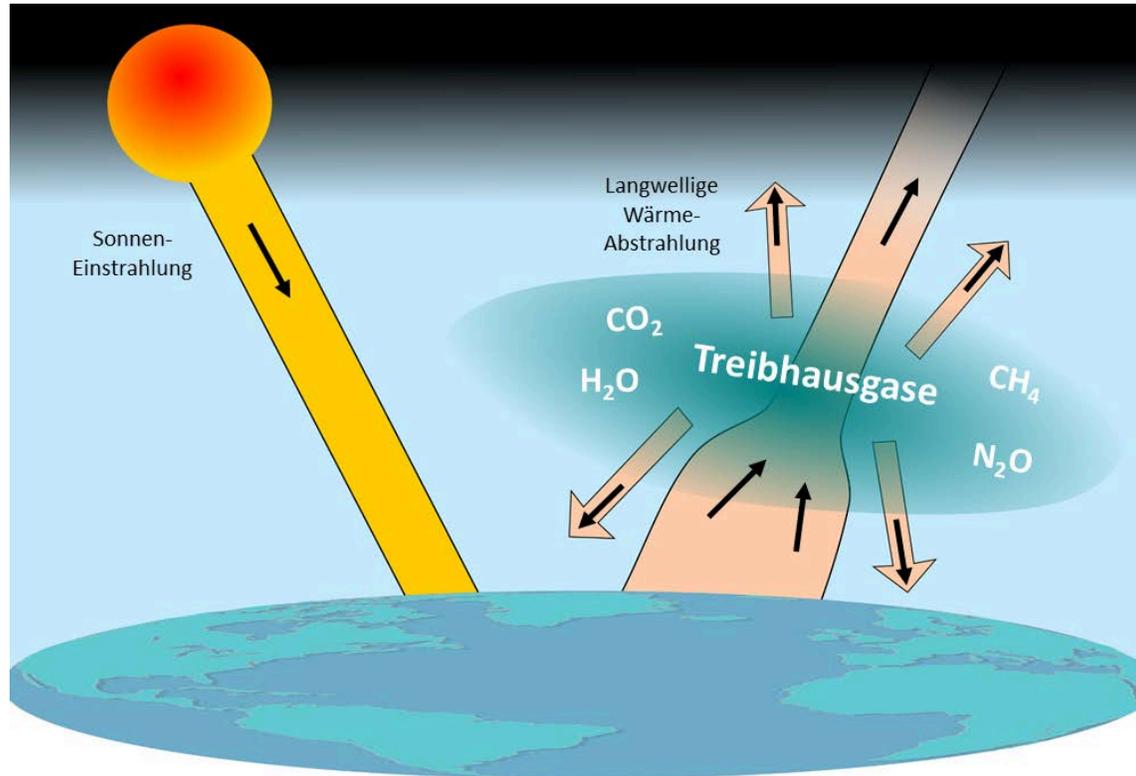
Projektförderung:



<https://www.ecmwf.int/en/learning/workshops-and-seminars/earth-radiation-budget-workshop>

Treibhauseffekt und Treibhausgase


Solar
(kurzwellig)
„Energie rein“




**Wärmestrahlung /
Infrarot (langwellig)**
„Energie raus“

Treibhausgase absorbieren langwellige Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) und sie „blockieren“ damit die Energieabstrahlung in den Weltraum. Sie re-emittieren diese absorbierte Wärmestrahlung in alle Richtungen - auch nach unten.

Diese „Rückstrahlung“ wärmt uns. Die Treibhausgasschicht wirkt wie eine zusätzliche Wärmequelle.

Ohne den natürlichen Treibhauseffekt wäre es 33 °C kälter (es wäre -18 °C statt angenehmer +15 °C). Wir brauchen also die Treibhausgase (Wasserdampf, CO₂, etc.) nur nicht zu viele !

Energieflüsse & Treibhauseffekt

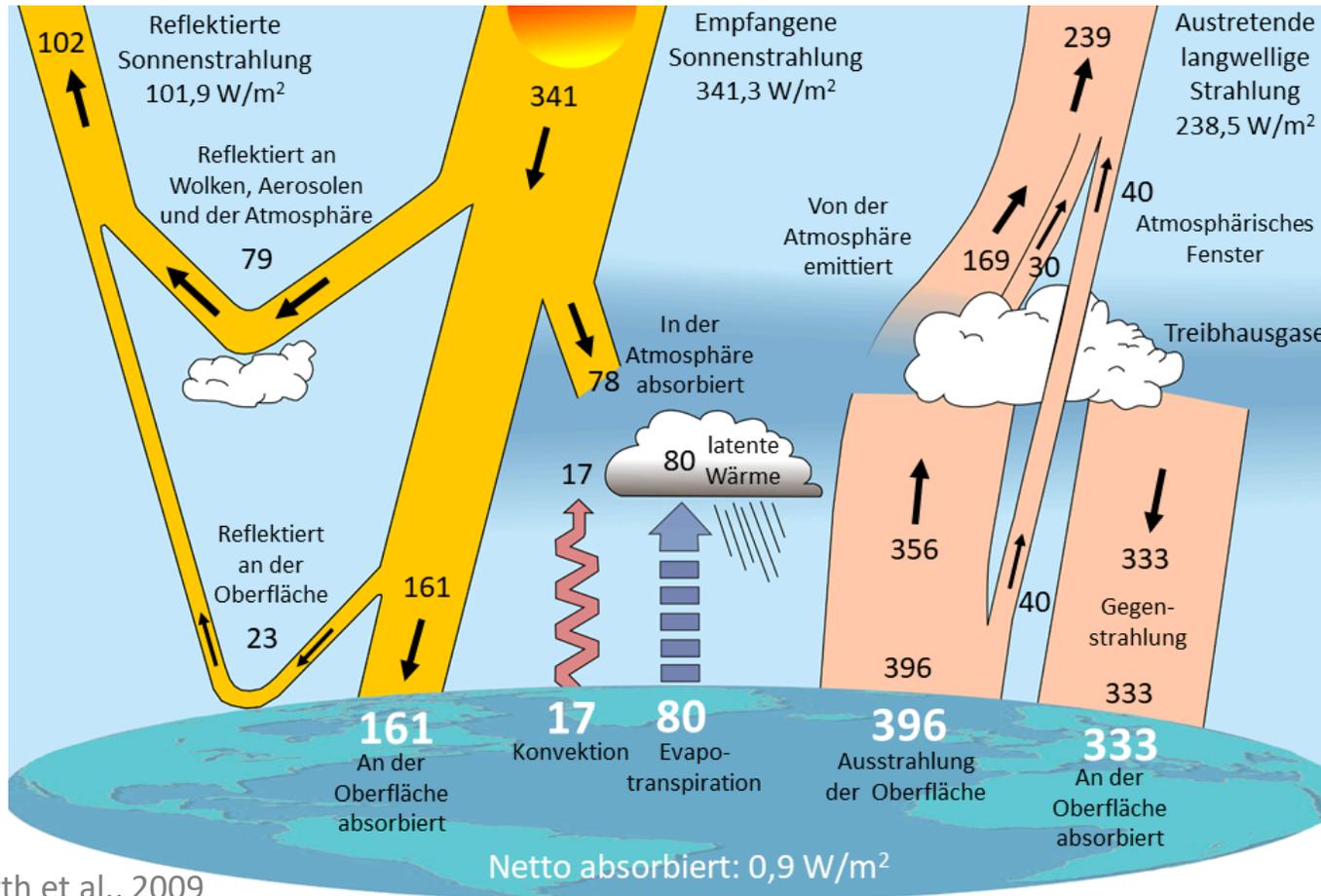
Etwa
 240 W/m^2



1341 W/m^2 Kurzwellige solare Einstrahlung

Langwellige thermische Abstrahlung

Etwa
 240 W/m^2

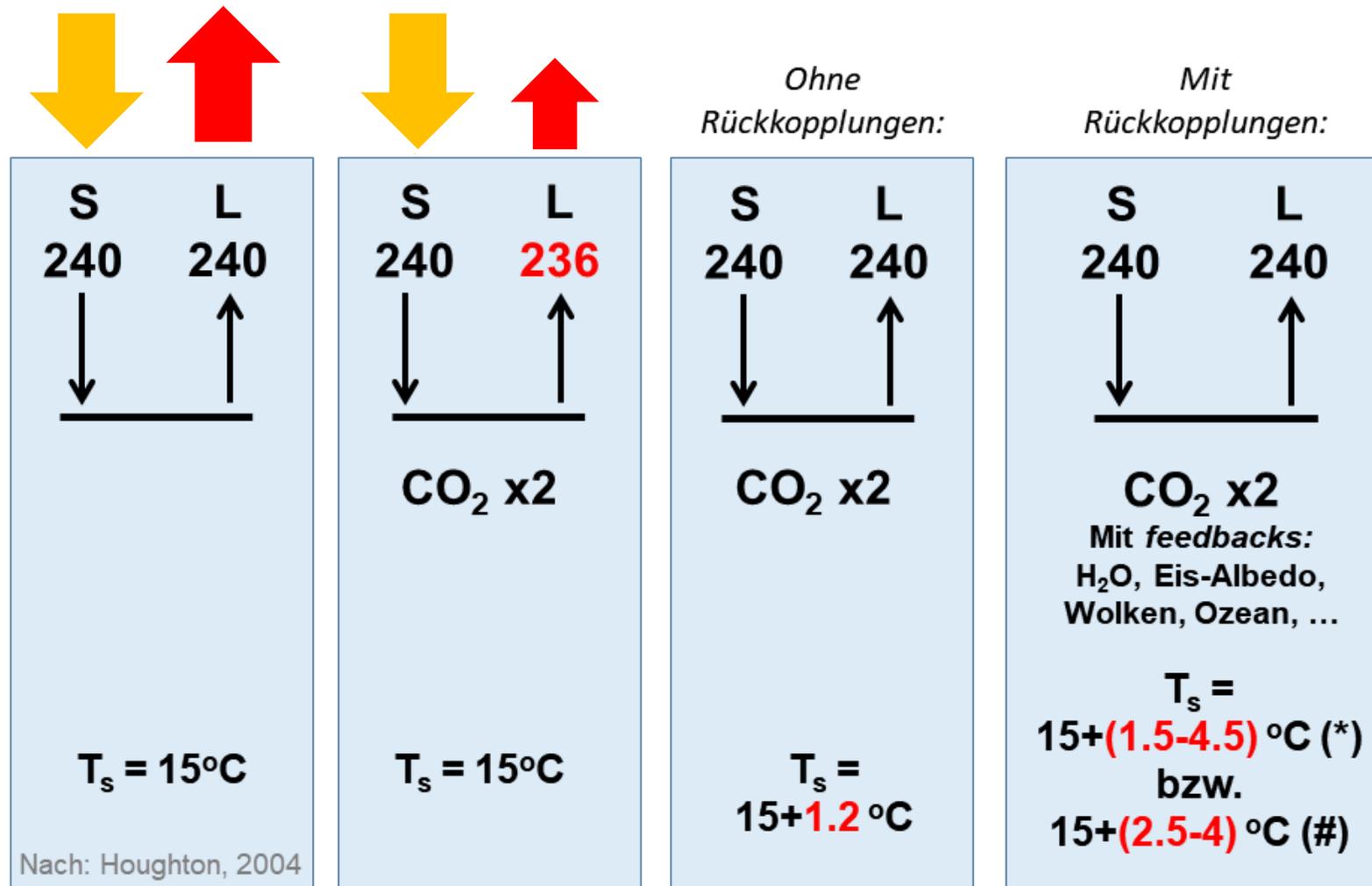


Nach: Trenberth et al., 2009

Treibhausgase blockieren die Abstrahlung von Wärme.

Erwärmung, da Netto Energiezufuhr (hier: $0,9 \text{ W/m}^2$).

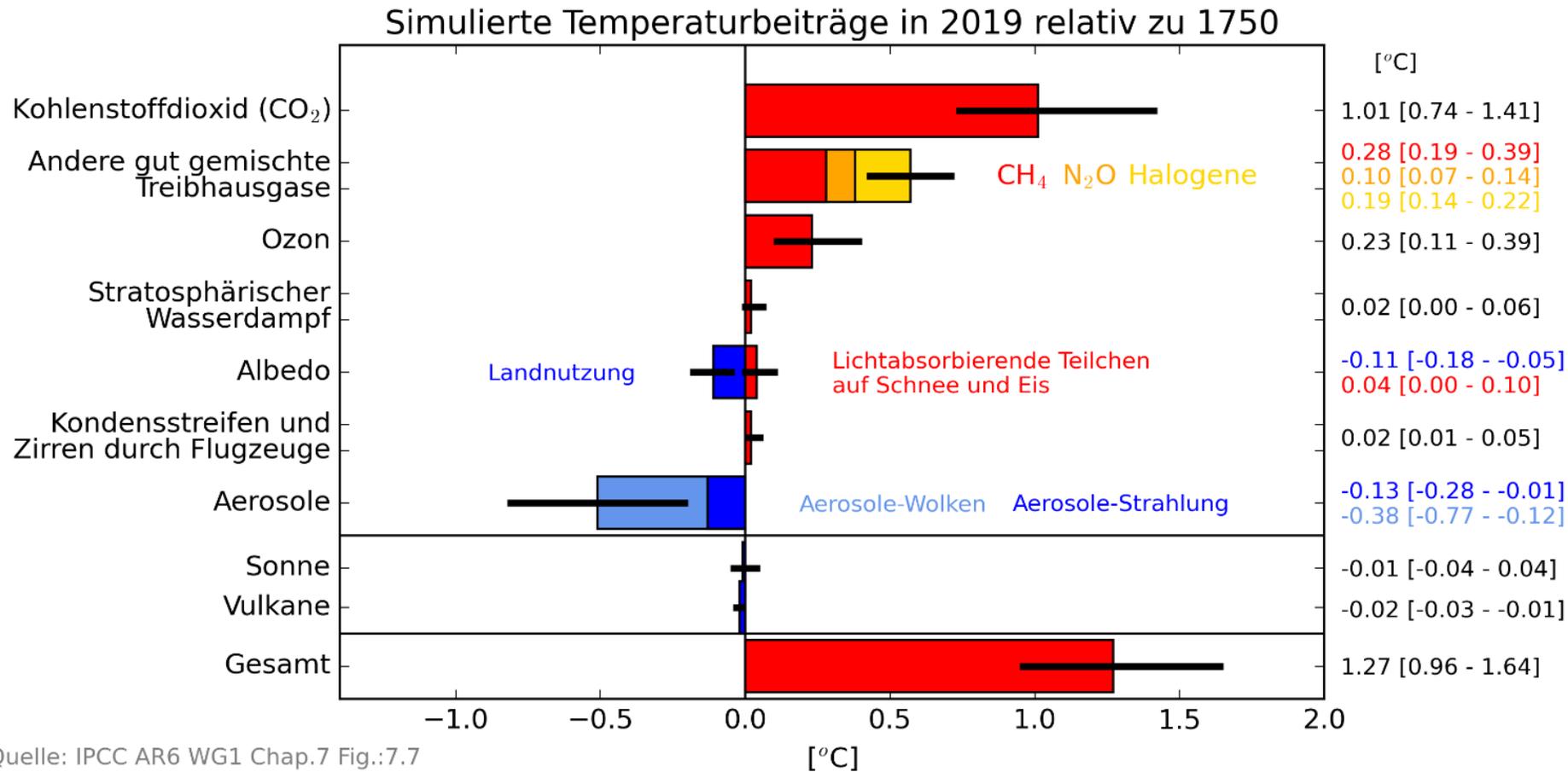
Klimasensitivität: Temperaturänderung bei CO₂-Verdopplung



(*) Temperaturbereich in Rot: IPCC AR5 „likely range“ der „Equilibrium Climate Sensitivity“ (ECS)

(#) Entsprechender IPCC AR6 „likely range“

Beiträge zum Temperaturanstieg



Quelle: IPCC AR6 WG1 Chap.7 Fig.:7.7

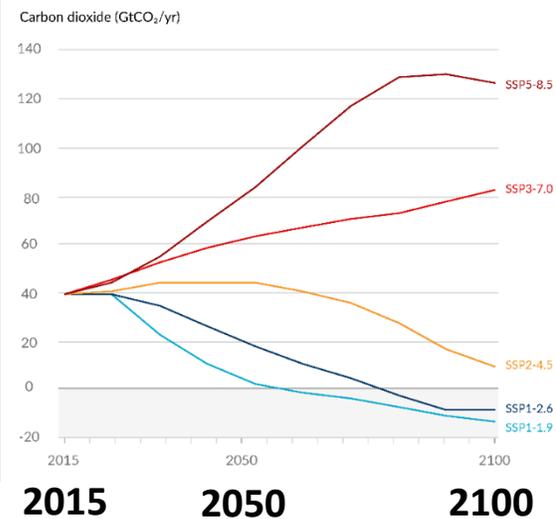
Michael.Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 2-Feb-2022

Die Zukunft ...

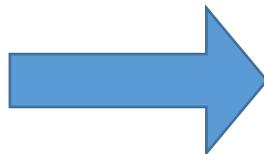
... bleibt unklar aber hängt auch von uns ab !

Verschiedene
CO₂-Emissionsszenarien
(GtCO₂/Jahr):

CO₂-Emissionen

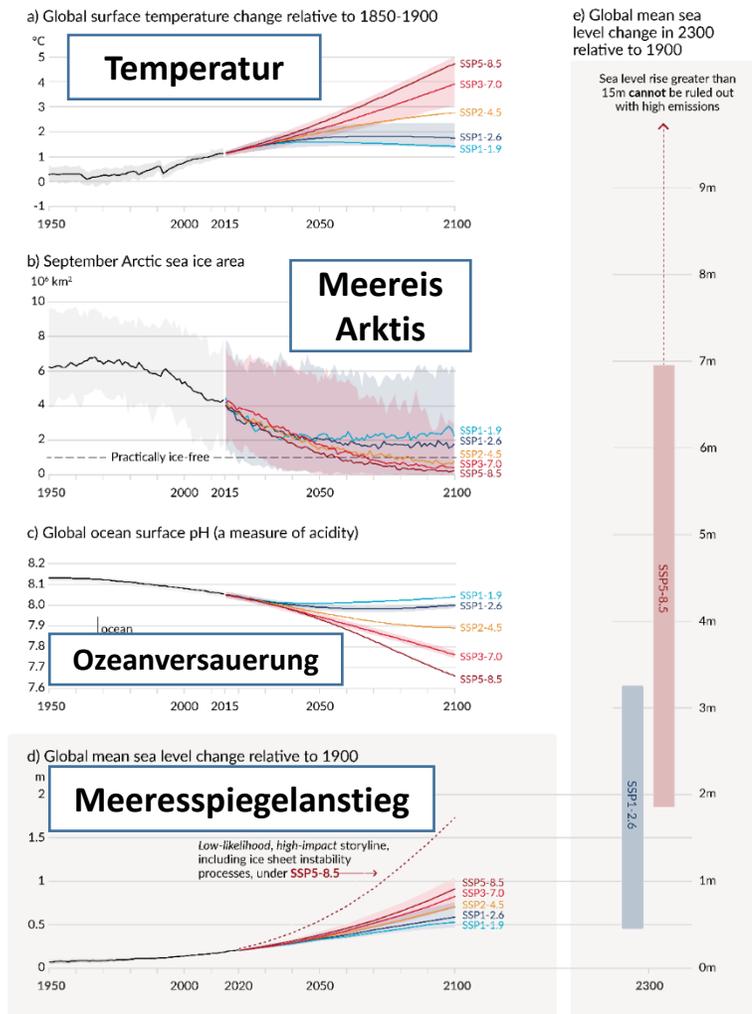


Mögliche
CO₂-Emissionen
und einige
erwartete
Konsequenzen



IPCC, AR6, 2022

Human activities affect all the major climate system components, with some responding over decades and others over centuries



Es muss uns
gelingen, eine
Energieversorgung
ohne fossile
Brennstoffe zu
etablieren !?

Leider haben wir mehr als ein Problem ...

... und wer hungert hat gerade andere Probleme als das Klima in einigen Jahrzehnten.

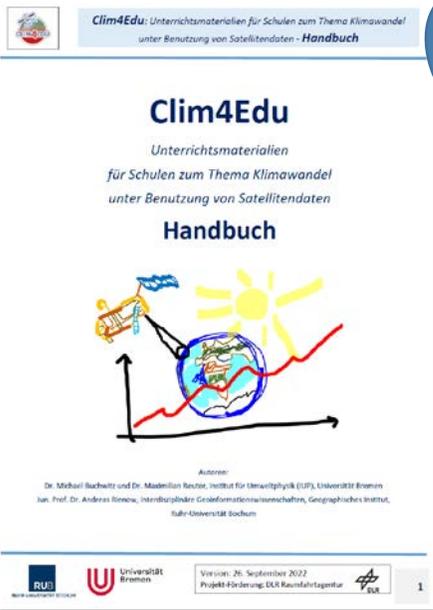
Wir brauchen Lösungen für mehr als ein Problem!



<https://www.unicef.de/informieren/ueber-uns/unicef-international/neue-entwicklungsziele/entwicklungsziele-verstaendlich-erklaert>

<https://www.bmz.de/de/agenda-2030>

Clim4Edu Handbuch & interaktive Unterrichtsmaterialien



- Hintergrundinformationen zum Klimawandel
- Satellitenmessungen Essentieller Klimavariablen (ECVs: CO₂, Methan, Meeresspiegel, Gletscher, Eisschilde, ...)

Clim4Edu: „Roter Faden“

CO₂ steigt an

- Beobachtungsdaten einschließlich globale CO₂-Satellitenmessungen
- Fossile Brennstoffe im Allgemeinen (einschließlich Methan, ...)
- Treibhausgase
- Kohlenstoffkreislauf
- Wie misst man CO₂ aus dem Weltraum?
- ...

Temperatur steigt an

- Treibhauseffekt, Energiebilanz, Strahlung
- Temperaturzeitreihen und räumliche Verteilung
- Wetter und Klima
- Was zeigen die Daten für Deutschland?
- ...
- **Andere Folgen:** Ozeanversauerung, ...

Meeresspiegel steigt an & Weiteres

- Was zeigen Satellitenmessungen?
- Was trägt wieviel zum Meeresspiegel-Anstieg bei? (Grönland, Antarktis, Gletscher, ...)
- Essentielle Klimavariablen: Was kann man alles aus dem Weltraum messen?
- ...
- **Andere Folgen:**
 - Meeresabnahme, Wetterextreme, ...

Zukunft?

- Projektionen
- Klimamodelle
- ...

Was tun?

- Pariser Klimaabkommen
- Energiewende
- CO₂ Fußabdruck
- ...

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/Handbuch/

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/



Institut für Umweltphysik (IUP)



Geographisches Institut



Projektförderung:

