



„Klimawandel: Ist es 5 nach 12?“



Johannes Hübl
Schloss Zeillern bei Amstetten, 14.10.2023



Einleitung

- „Fünf vor Zwölf“



Bedeutung:
es ist höchste Zeit
es ist Eile geboten
es ist beinahe zu spät

- Fünf nach Zwölf



Bedeutung:
es ist wohl schon zu spät
es muss schnellstens etwas gemacht werden
der Prozess ist nicht mehr zu stoppen

"Wir sind an einem Punkt, an dem sich der Charakter des Systems verändert", warnte der Klimaforscher Hans Joachim Schellnhuber laut einem Bericht der Austria Presse-Agentur APA bei der Verbund-Energiekonferenz am Wolfgangsee vergangene Woche.

(5.10.2023 <https://www.heute.at/s/zwei-jahrhundert-projekt-soll-uns-vor-klima-kollaps-retten-100294933>)



Einleitung

- **Was bedeutet Klima?**

Klima ist der statistisch ermittelte Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum. Als Zeitspanne für Untersuchungen des Klimas empfiehlt die Weltorganisation für Meteorologie (WMO – World Meteorological Organization) mindestens 30 Jahre, aber auch Betrachtungen über längere Zeiträume wie Jahrhunderte und Jahrtausende sind bei der Erforschung des Klimas gebräuchlich.

(<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-eigentlich-klima>)

- **Klimaparameter**

Zu den Klimaparametern zählen unter anderem Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Bewölkung

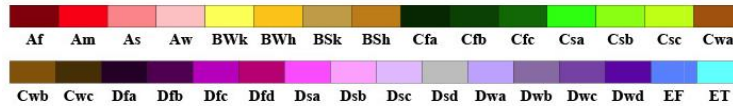
(<https://www.wetter.de/cms/wetterlexikon-klimaparameter-2400324.html>)



Einleitung

- Klimaklassifikation**

Weltkarte der Köppen-Geiger Klimaklassifikation



Hauptklima

- A: äquatoriales Klima
- B: arides Klima
- C: warmgemäßiges Klima
- D: Schneeklima
- E: polares Klima

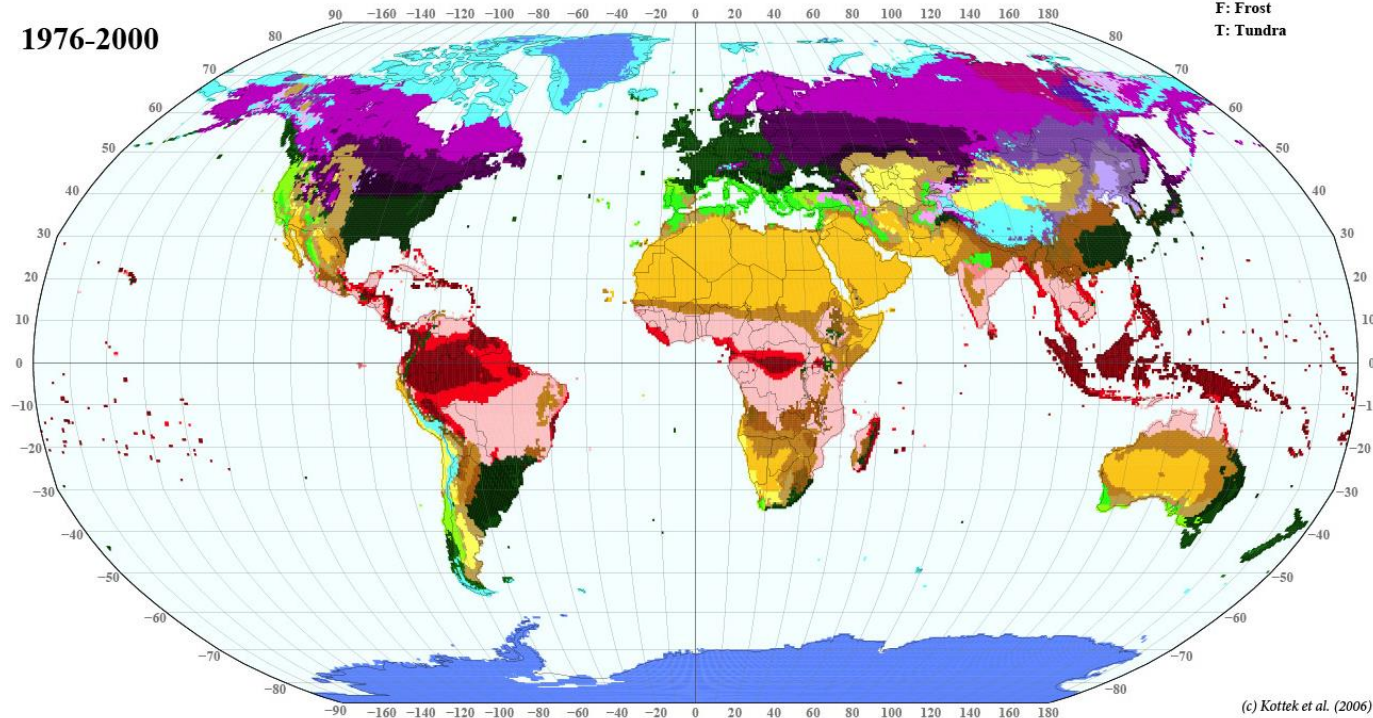
Niederschlag

- W: Wüste
- S: Steppe
- f: feucht
- s: sommertrocken
- w: wintertrocken
- m: monsunartig

Temperatur

- h: heiß und trocken
- k: kalt und trocken
- a: heiße Sommer
- b: warme Sommer
- c: kühle Sommer
- F: Frost
- T: Tundra

1976-2000



(c) Kottek et al. (2006)

Weltkarte der Köppen-Geiger Klimaklassifikation repräsentativ für die Periode 1976-2000 (Kottek et al., 2006).

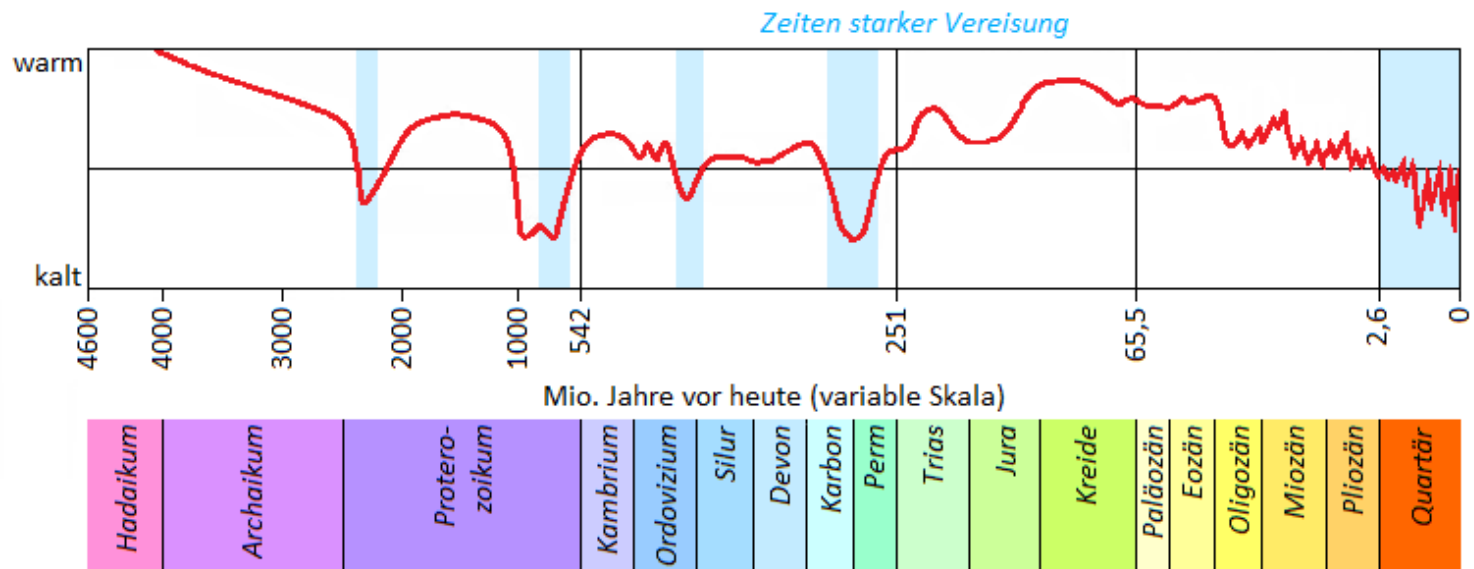


Klima

- **Was bedeutet Klimawandel?**

Der Klimawandel beschreibt die Abkühlung oder Erwärmung des Klimas auf der Erde über einen langen Zeitraum.

Er beschreibt die langfristigen Veränderungen von Faktoren wie der Temperatur, des Niederschlages und der Meeresströmungen.



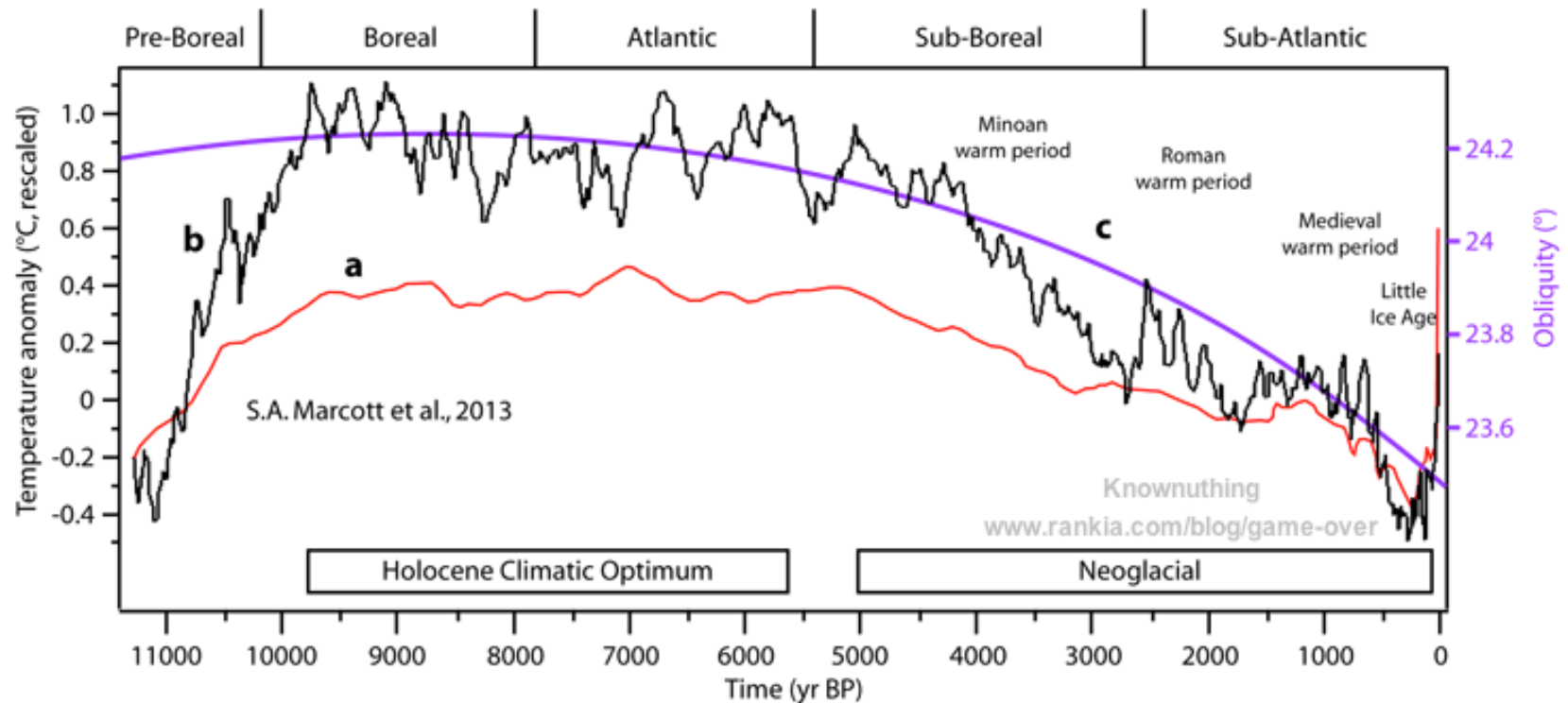
Idealisierter Verlauf der globalen Mitteltemperatur basierend auf geologischen Proxydaten dargestellt über einer variablen Zeitskala (Saltzman 2002, bearb.)

https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima/3-1-1_1_erdgeschichte/



Klima

- Was bedeutet Klimawandel?



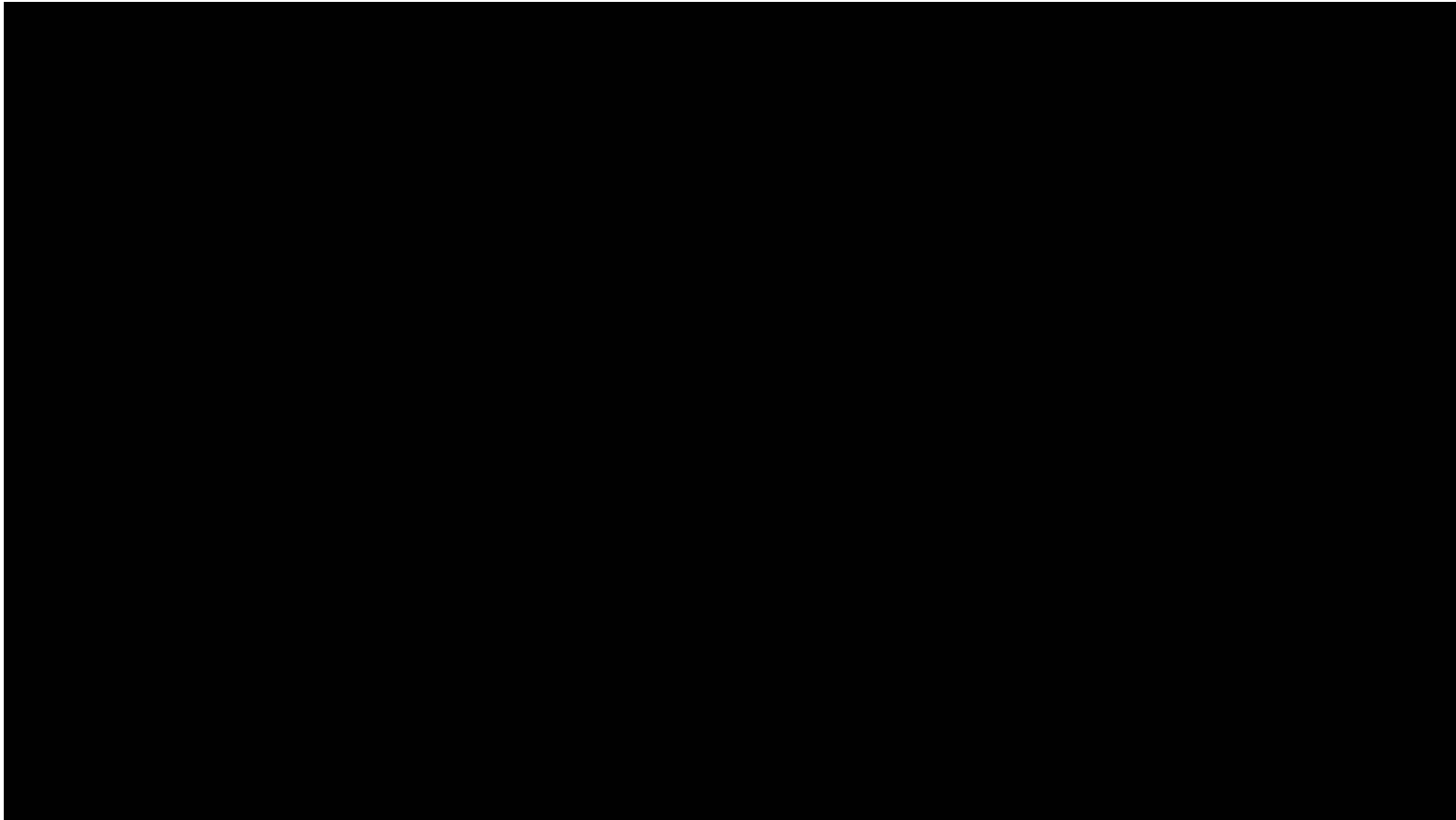
Marcott et al. (2013): Temperaturverlauf im Holozän
(violett: Neigung der Erdachse, schwarz: Temperaturverlauf) S.A.

<https://energieorganismus.de/diskussion-mit-chatgpt-zum-klimawandel/>



Klima

- Was bedeutet Klimawandel?

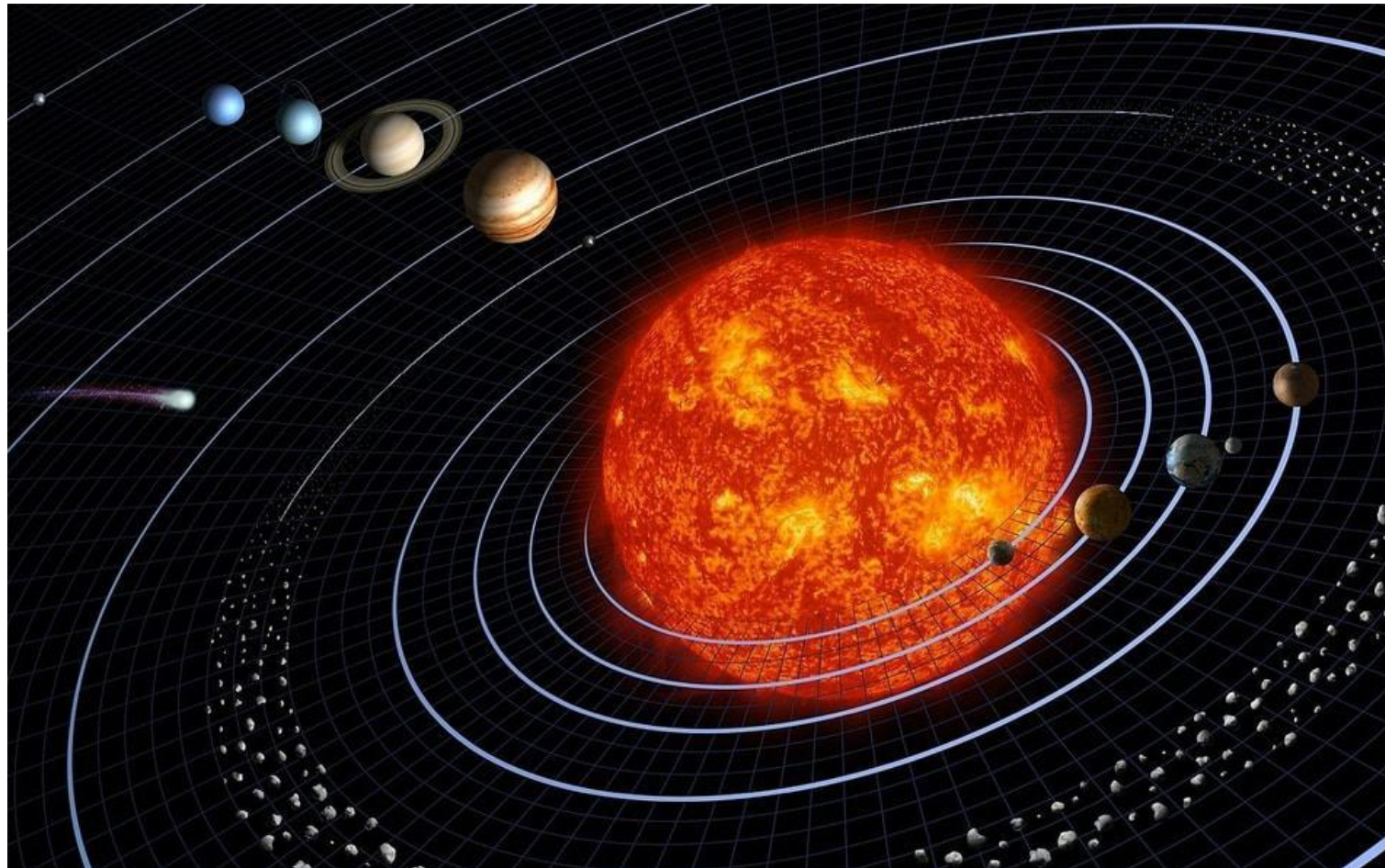


Seguinot, J., Ivy-Ochs, S., Juvet, G., Huss, M., Funk, M., and Preusser, F.: Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps, *The Cryosphere*, 12, 3265–3285, 2018.



Klima

- Was oder wer macht das Klima?

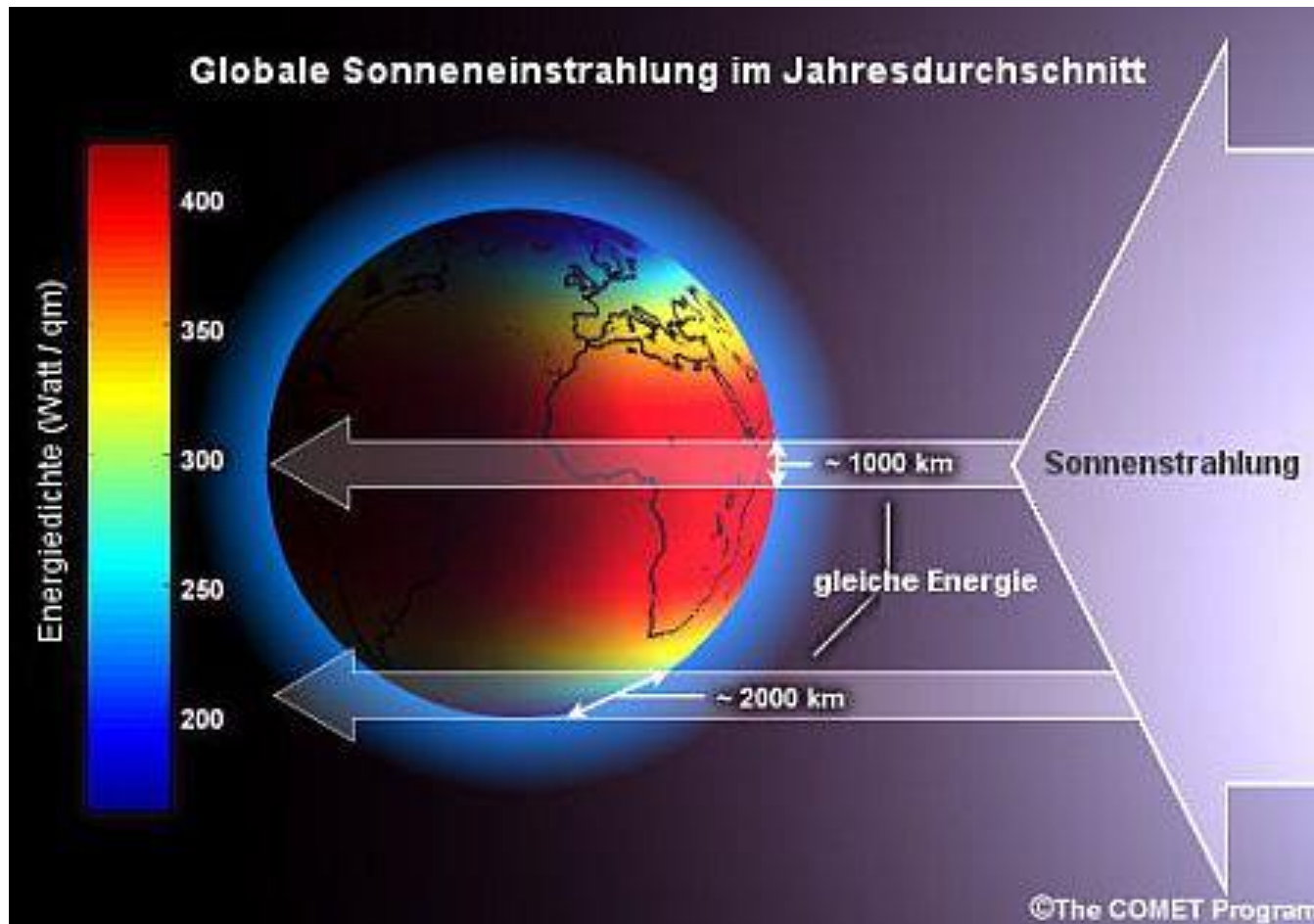


<https://astronomiefans.de/unser-sonnensystem-entstehung-unsere-planeten-zukunft%E2%80%8B>



Klima

- Was oder wer macht das Klima?



https://www.gerd-pfeffer.de/atm_strahlungshaushalt.html
Johannes Hübl



Klima

- **Klimaschwankungen**

Der Wechsel von Glazial zu Interglazial erfolgt in einer Periodizität von 100.000 Jahren. Als zweitstärkstes Signal tritt eines mit 41.000 Jahren, gefolgt von einem mit 23.000 und 19.000 Jahren auf. Dieses Ergebnis führt ... zur Hypothese von Milankovitch zurück....Sie besagt, dass die Änderung der Erdbahnelemente zur Veränderung der eingestrahlten Energiemenge führte.

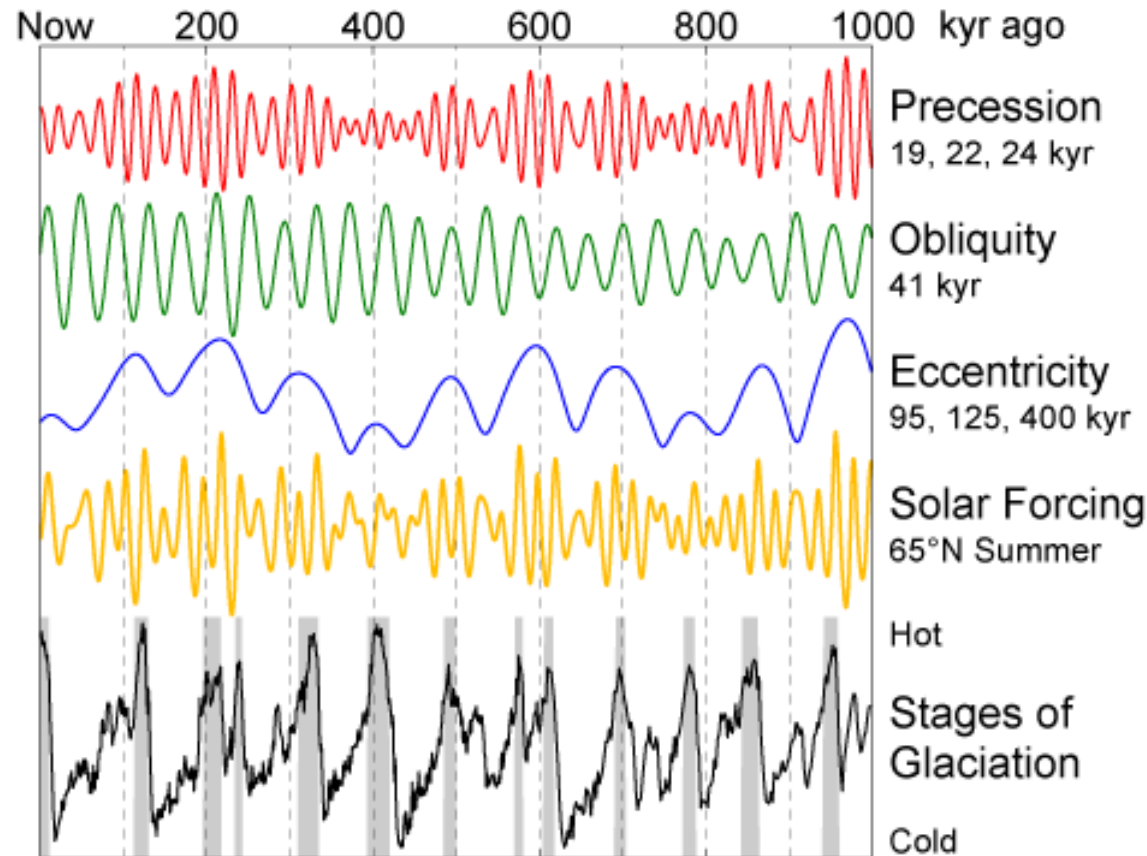
Die 3 variablen Größen sind:

- **Exzentrizität:** Die Schwankung zwischen mehr kreisförmiger oder mehr elliptischer Bahn um die Sonne, die sich mit einem Rhythmus von rund 100.000 Jahren ändert.
- **Ekliptik:** Die Neigung der Erdachse zur Sonne schwankt in einer Periode von rund 41.000 Jahren zwischen Werten von ca. 22° bis 25°.
- **Präzession:** Die orbitale Wanderung der Äquinoczial- und Sonnenwendepunkte (eine Folge des Torkelns der Erde und der Schwankungen der elliptischen Erdbahn um einen Brennpunkt und ihre Beeinflussung durch die Exzentrizität) weist Periodizitäten von rund 23.000 und 19.000 Jahren auf.



Klima

- Klimaschwankungen

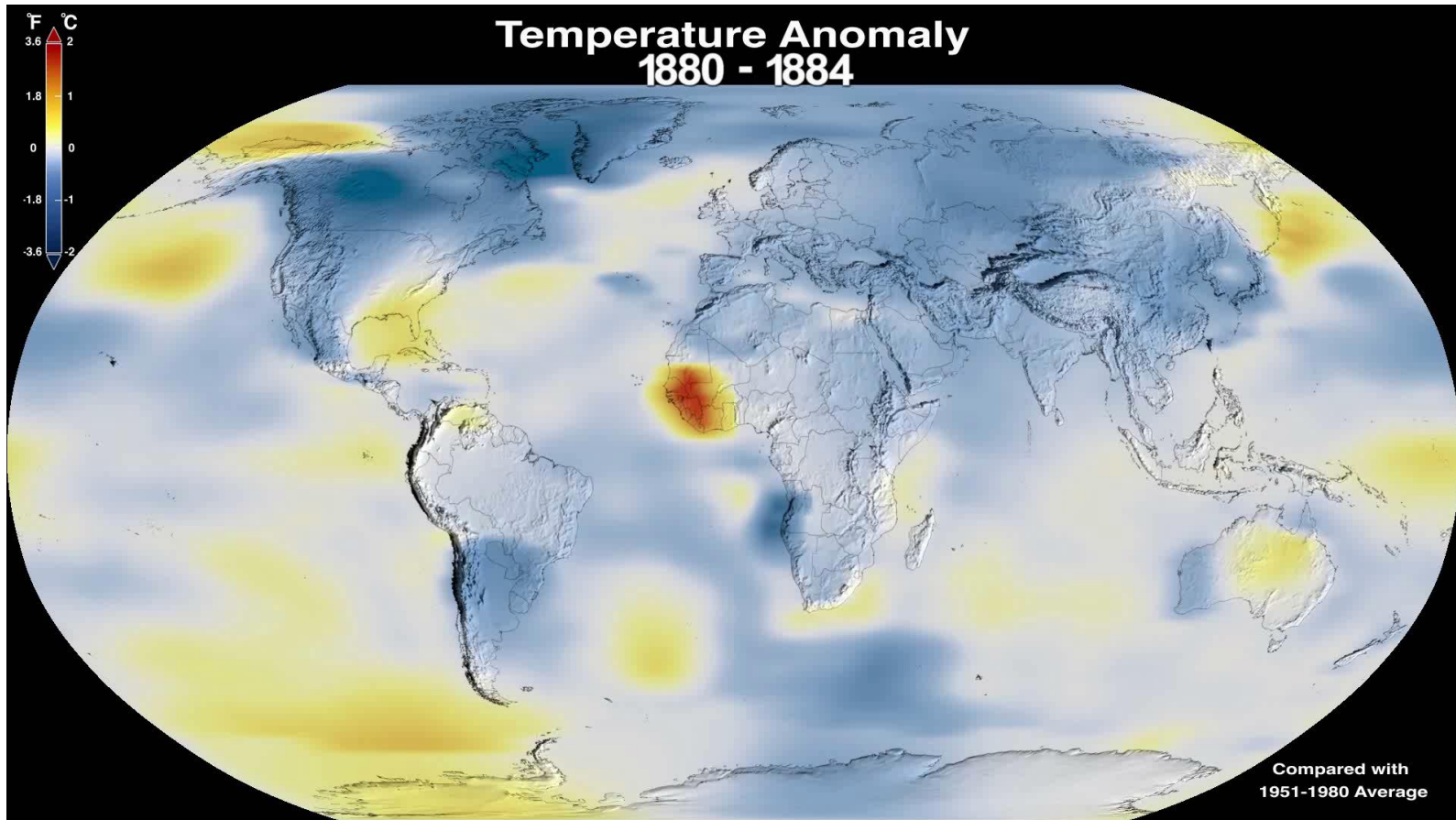


This image was produced by Robert A. Rohde from publicly available data, and is incorporated into the Global Warming Art project.
- Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=567537>



Klima

- Klimaschwankungen

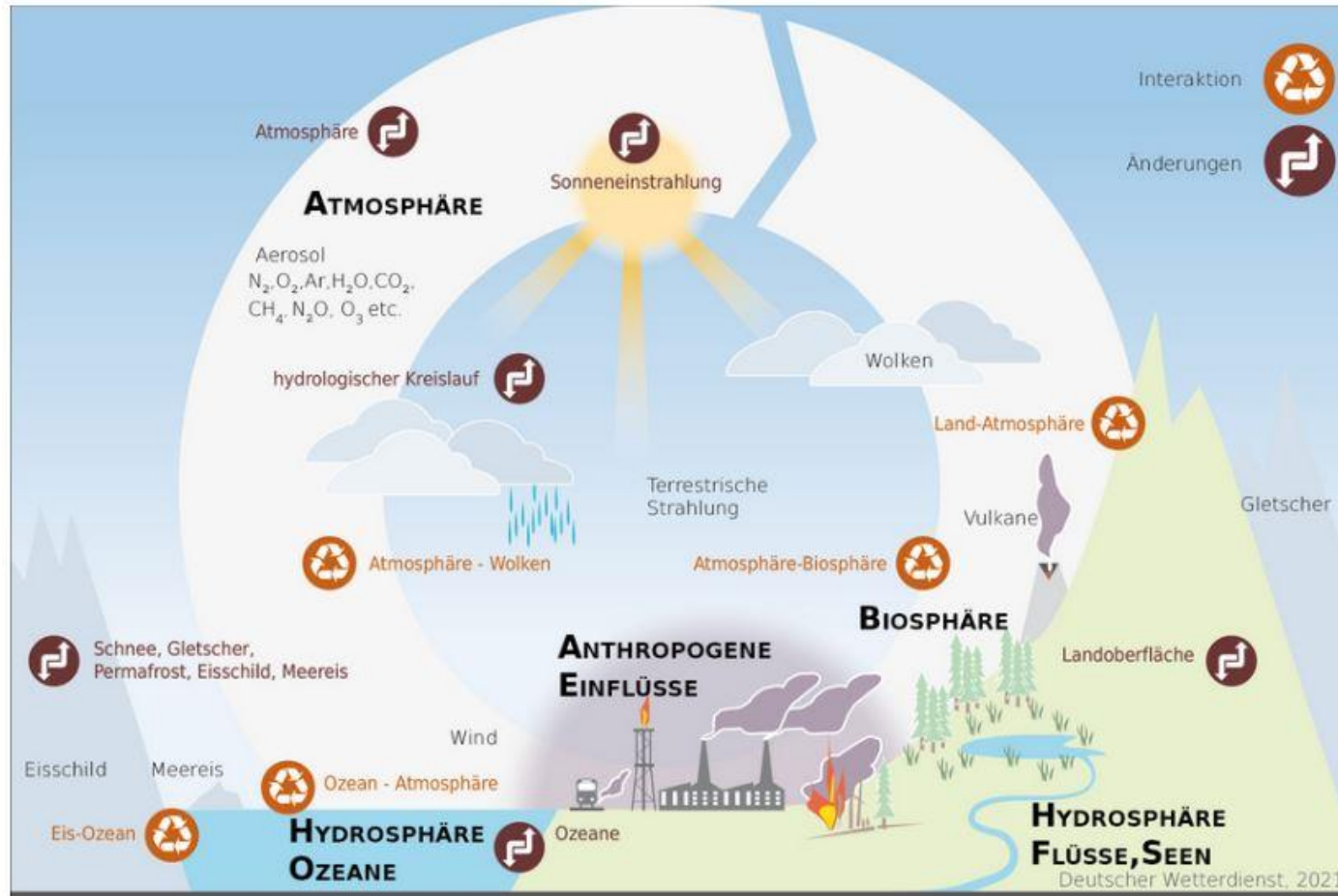


Global temperature anomalies from 1880 to 2018, NASA Climate Change
<https://www.youtube.com/watch?v=gXXOkhoki8s>



Klima

- **Komponenten des Klimasystems**



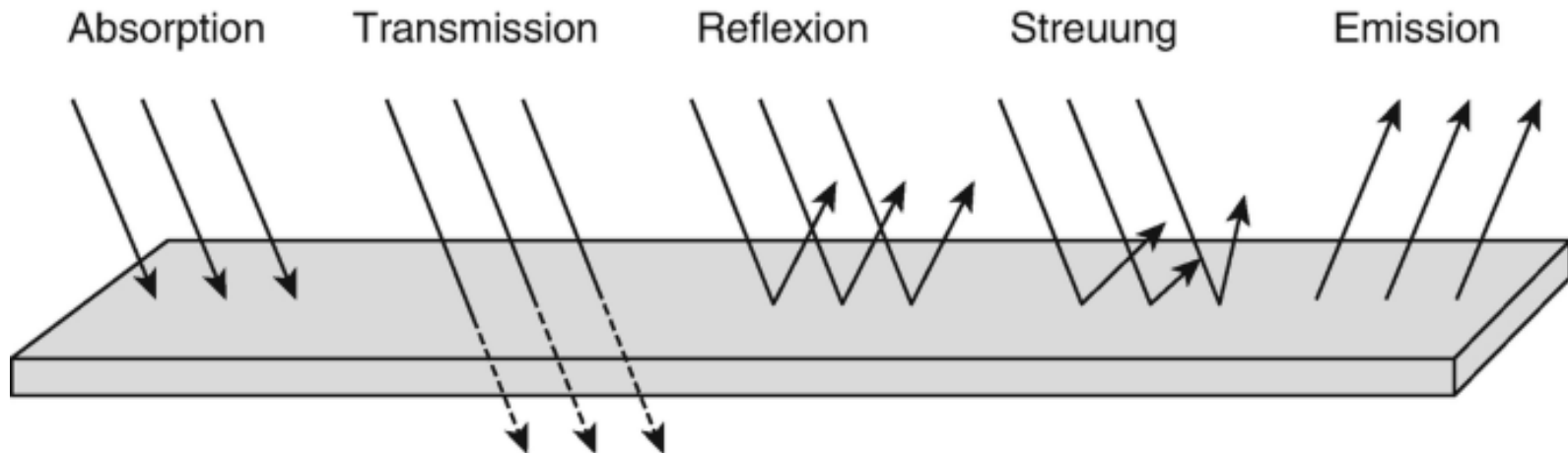
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick_node.html



Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Sonneneinstrahlung**

- **Absorption:** Ein Vorgang, bei dem ein Medium dem durchlaufenden Licht Energie entzieht und es dadurch in seiner Intensität abschwächt
- **Reflexion:** Das einfallende Licht wird gezielt entsprechend den Reflexionsgesetzen der Optik zurückgeworfen.
- **Streuung:** Das Licht wird in ganz verschiedene Richtungen gestreut oder diffus zurückgeworfen.

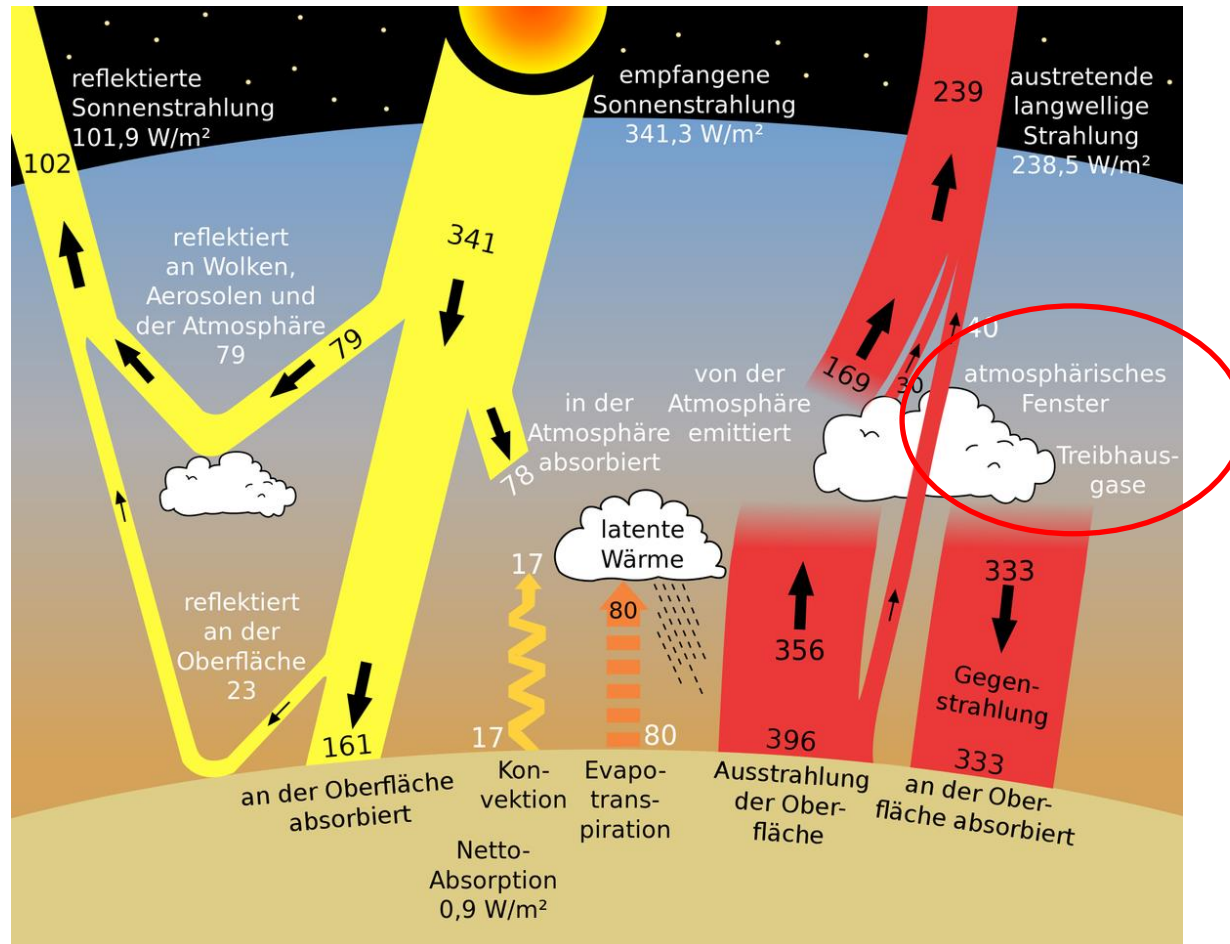


Schabbach, T., Leibbrandt, P. (2021)



Die Sonne als Strahlungsquelle

- Strahlungsbilanz



https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/3540/der-strahlungshaushalt-der-erde

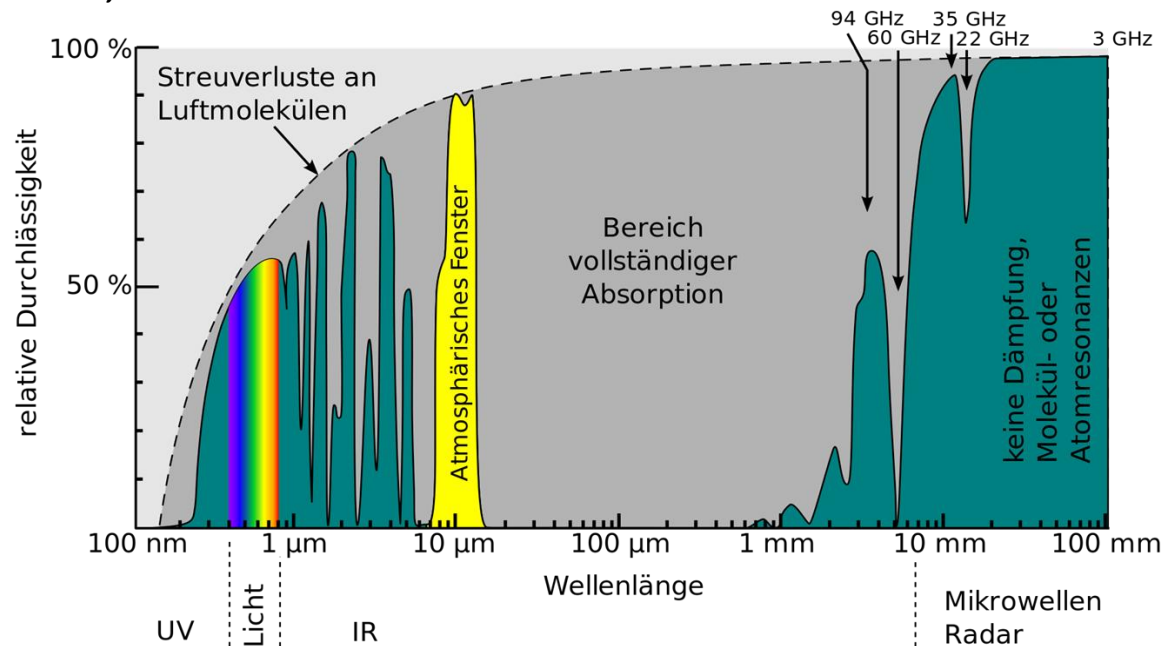


Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Atmosphärische Fenster**

Das Gasgemisch der Atmosphäre, die Luft, enthält verschiedene Gase (Ozon, Kohlendioxid, Wasserdampf usw.).

In Fensterbereichen (Spektralbereichen) ist die Atmosphäre für solare Ein- bzw. terrestrische elektromagnetische Ausstrahlung durchlässig (Transmission).



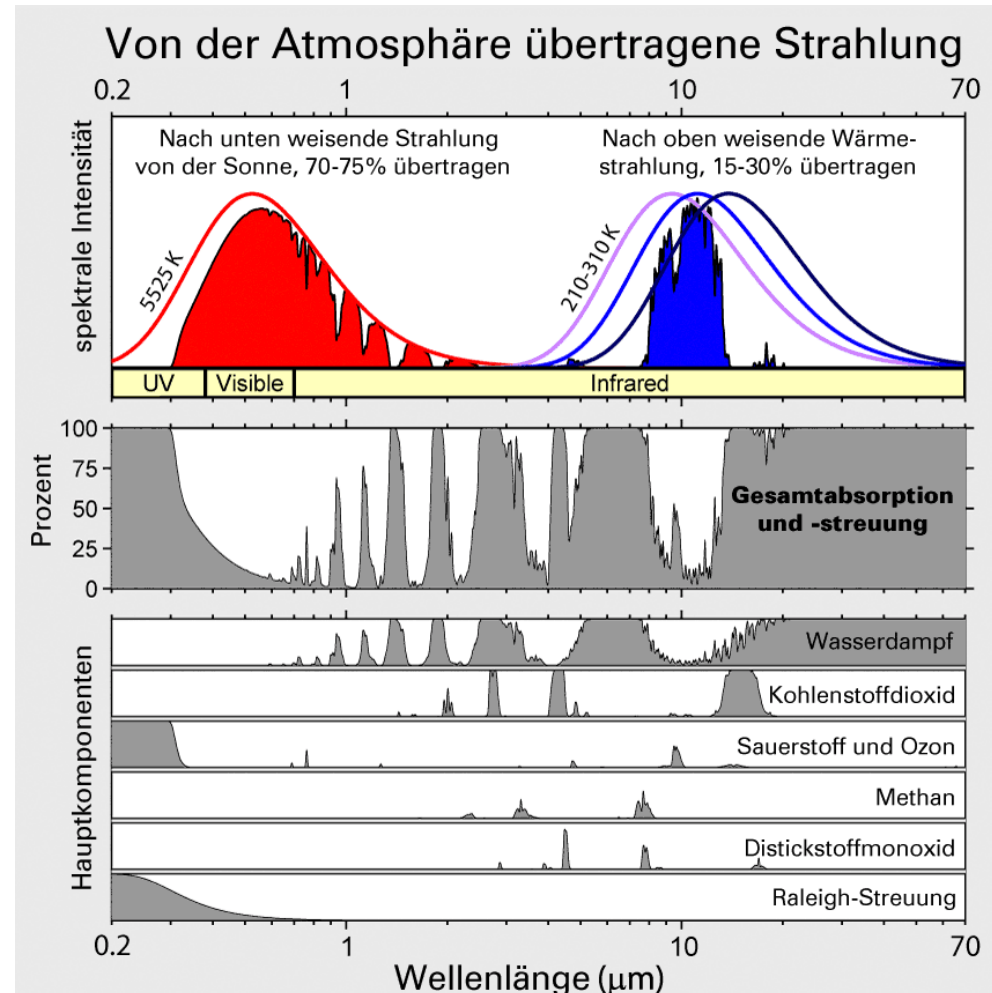
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosph%C3%A4rische_Durchl%C3%A4ssigkeit_DE.svg



Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Atmosphärische Fenster**
Das große Fenster im Infraroten wird in erster Linie durch Absorptionsbanden des Wasserdampfs und des Kohlendioxids dominiert und durch die Ozonbande bei $9,6 \mu\text{m}$ in zwei Bereiche aufgeteilt.
Dieses Fenster hat wesentliche Bedeutung für den Treibhauseffekt, denn die Zunahme der Konzentration der klimarelevanten Spurengase verursacht eine spektrale Verengung des Fensters. Damit wird die Abstrahlung des Erdbodens im IR-Bereich behindert.

(<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/atmosphaerische-fenster/1066>)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosph%C3%A4rische_Durchl%C3%A4ssigkeit_DE.svg



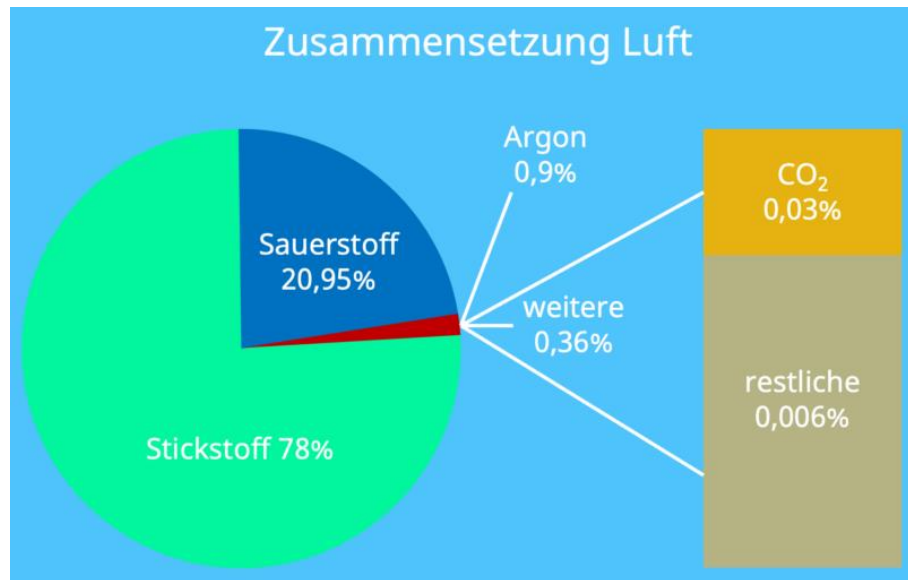
Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Treibhauseffekt**

Die Hauptbestandteile der Atmosphäre (Sauerstoff und Stickstoff) sind für den Strahlungshaushalt kaum von Bedeutung.

Die nur in Spuren vorhandenen Treibhausgase dagegen absorbieren die langwellige Wärmestrahlung. Sie verändern damit stark den Energiehaushalt und die mittlere Temperatur der irdischen Atmosphäre.

(<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhausgase>)



<https://studyflix.de/chemie/zusammensetzung-luft-2796>



Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Treibhauseffekt**

Die Treibhausgase sind durchgängig für den kurzwelligen Anteil der Sonnenstrahlung, langwellige Wärmestrahlung wird hingegen je nach Treibhausgas in unterschiedlichen Wellenlängen absorbiert und emittiert. Die Abstrahlung erfolgt dabei in eine zufällige Richtung (Streuung) und zum Teil zurück zur Erde.

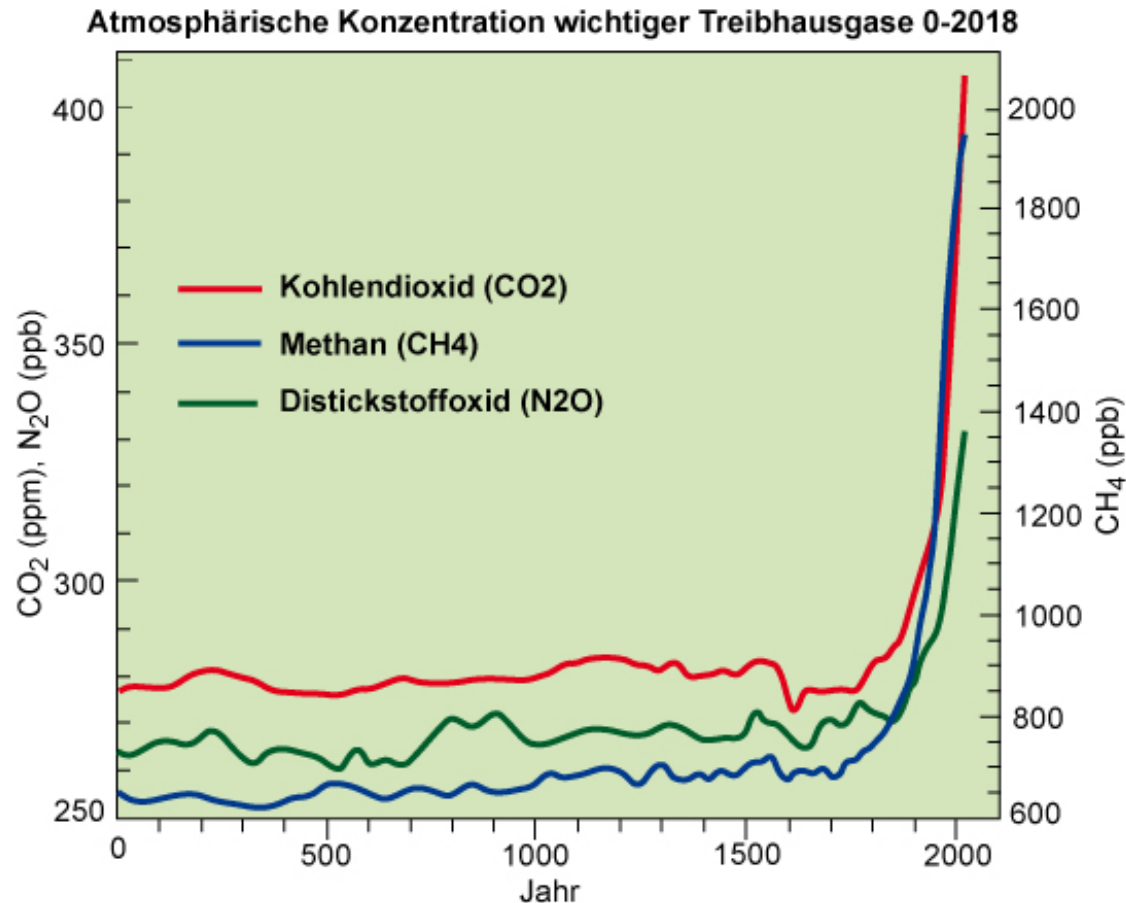
Der größte Teil des Treibhauseffekts wird mit einem Anteil von ca. 36–70 % (ohne Berücksichtigung der Effekte der Wolken) durch Wasserdampf in der Atmosphäre verursacht. Kohlenstoffdioxid in der Erdatmosphäre trägt ca. 9–26 % zum Treibhauseffekt bei, Methan ca. 4–9 % und troposphärisches Ozon ca. 3–7 %.

https://dewiki.de/Lexikon/Treibhauseffekt#Spektren_emittierter_Strahlung



Die Sonne als Strahlungsquelle

- Treibhauseffekt



Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, FAQ 2.1, figure 1



Die Sonne als Strahlungsquelle

- **Treibhauseffekt**

Mit Ausnahme von CO_2 und H_2O werden die Treibhausgase aus der Atmosphäre durch chemische Reaktion entfernt.

Für die Entstehung wie die Entfernung von Treibhausgasen sind teilweise komplexe chemische Interaktionen und photochemische Prozesse verantwortlich. Photochemisch bedeutet, dass für das „Waschen“ der Atmosphäre u.a. Sonnenlicht benötigt wird. Wenn nachts oder in den Polargebieten im Winter kaum bis keine Einstrahlung gegeben ist, wird hier der Abbau von Ozon und anderen Treibhausgasen eingeschränkt.

CO_2 ist dagegen in der Atmosphäre chemisch inert, reagiert also nicht mit anderen Substanzen, und wird nur durch Lösung im Wasser und die Photosynthese der Pflanzen aus der Atmosphäre entfernt.

Auch die FCKWs gehen in der Troposphäre keine chemische Reaktion ein, werden aber in der Stratosphäre unter Einfluss der Sonnenstrahlung chemisch umgewandelt.

Vorwiegend in der Stratosphäre wird auch N_2O abgebaut.

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhausgase>



Klimaprojektionen

- **Kippunkte („Tipping Points“)**

Elemente, bei denen durch fortschreitende Erwärmung eine oftmals unumkehrbare Veränderung (positive Rückkoppelung) ausgelöst wird

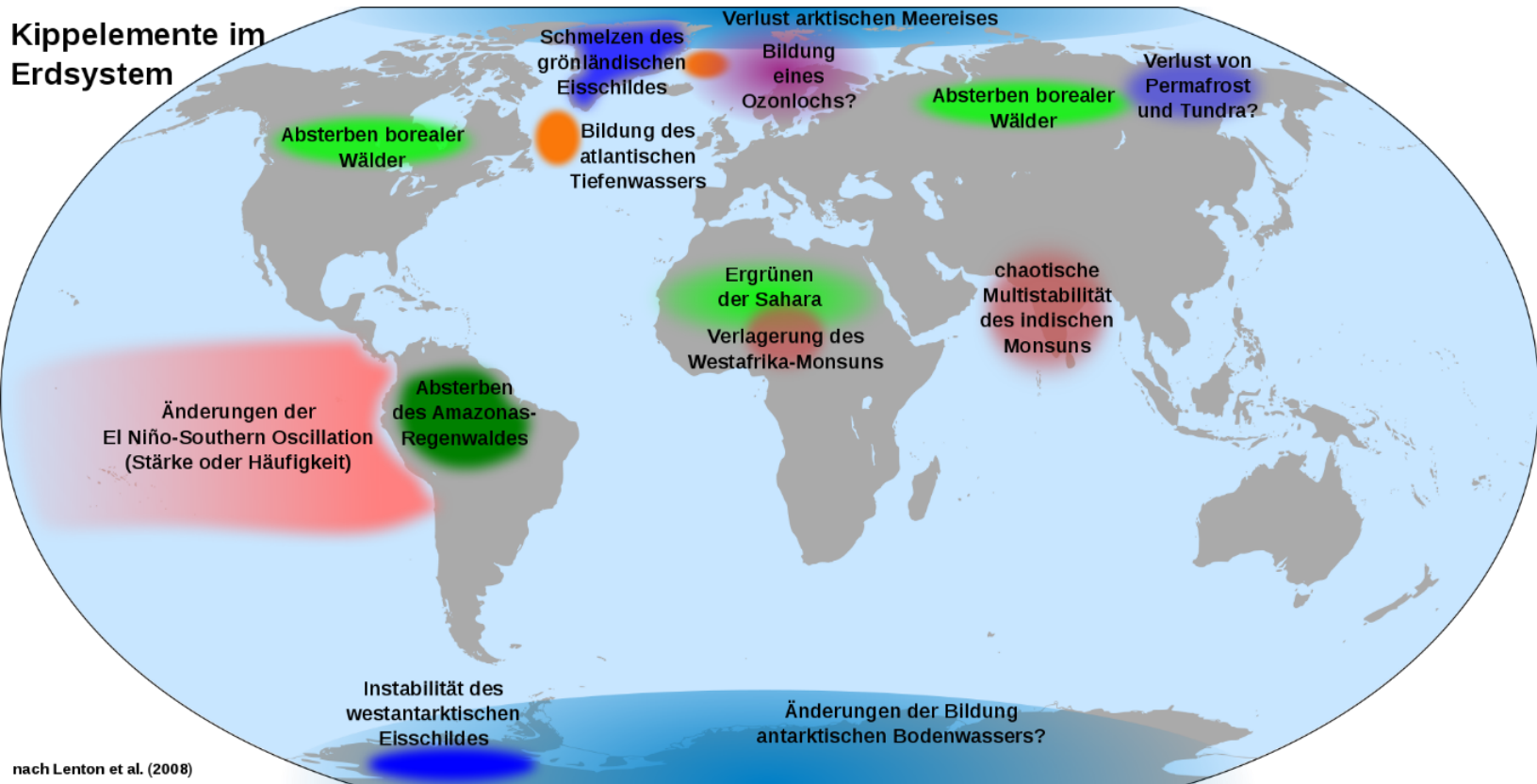
- **Abschmelzen der polaren Eisschilde**
dunklerer Boden bzw. das Wasser unter dem hellen Eis weist eine geringere Reflektionsrate (Albedo) des Sonnenlichts auf, wodurch noch mehr Wärmeenergie im System Erde gespeichert wird.
- **Auftauen von Permafrostböden**
beim Auftauen wird unter dem Permafrost eingeschlossenes Methan in großen Mengen freigesetzt.
- **zunehmenden Waldbrände in den gemäßigten Klimazonen**
- **steigende Trockenheit im tropischen Regenwald**
- **Abschwächung der großen Atlantische Umwälzströmung (globalen ozeanischen Umverteilungssystems für Wärme und Süßwasser)**

<https://www.heute.at/s/zwei-jahrhundert-projekt-soll-uns-vor-klima-kollaps-retten-100294933>



Klimaprojektionen

- Kippunkte ("Tipping Points,,)



nach T.M. Lenton et al. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. In: Proceedings of the National Academy of the Sciences. February 2008, doi:10.1073/pnas.0705414105



Klimaprojektionen

- **RCP Szenarien (representative concentration pathway)**
Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC (2013/14) wurden sogenannte „Repräsentative Konzentrationspfade“ (RCPs) entwickelt. Die RCP-Szenarien legen bestimmte Szenarien von Treibhausgaskonzentrationen fest.

Die vier Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP6 und RCP8.5 zeigen den Strahlungsantrieb (Radiative Forcing) durch anthropogene Treibhausgase im Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 1850 und die Treibhausgaskonzentrationen im Jahr 2100 gegenüber den vorindustriellen Werten von 1850.

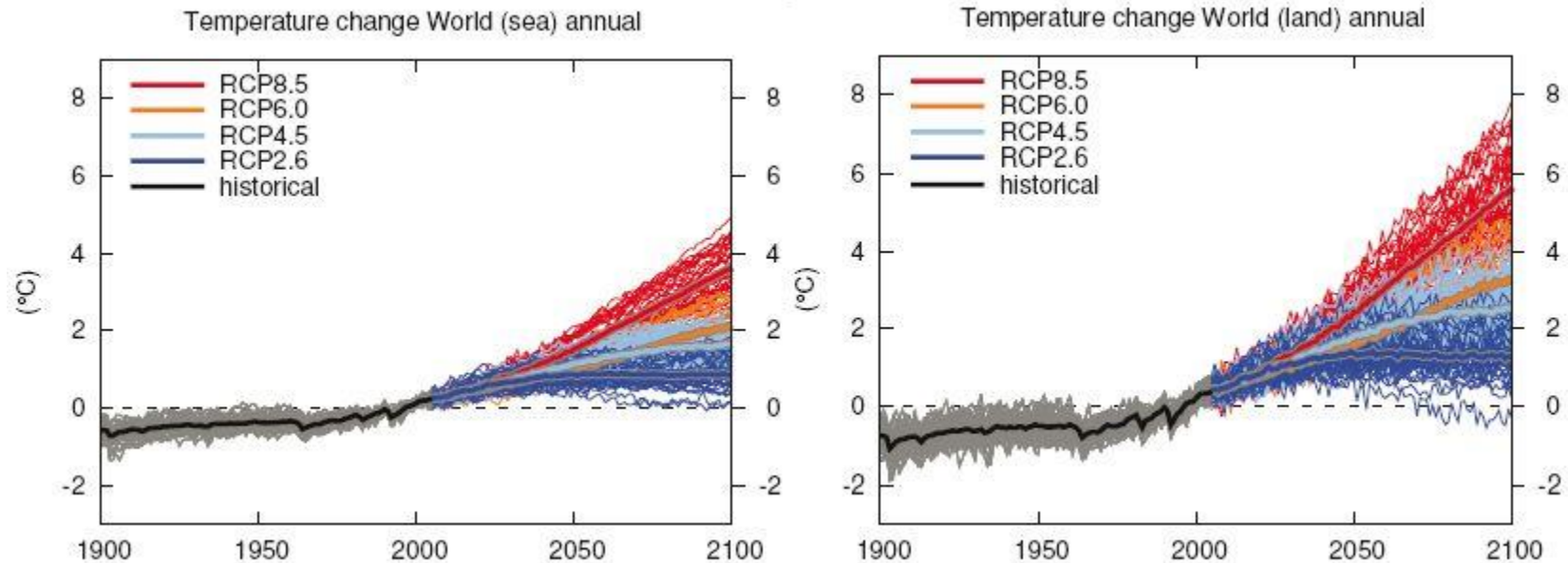
| RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht | | | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bezeichnung | RCP8.5 | RCP6.0 | RCP4.5 | RCP2.6 |
| Treibhausgaskonzentration im Jahre 2100 | 1370 ppm CO ₂ -äq | 850 ppm CO ₂ -äq | 650 ppm CO ₂ -äq | 400 ppm CO ₂ -äq |
| Strahlungsantrieb 1850-2100 | 8,5 W/m ² | 6,0 W/m ² | 4,5 W/m ² | 2,6 W/m ² |
| Einstufung | sehr hoch | hoch | mittel | sehr niedrig |

Quelle: Daten nach Van Vuuren, D.P., et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change 109, 5-31



Klimaprojektionen

- RCP Szenarien
 - Temperatur



Veränderung der Temperatur über dem Meer (links) und über Land (rechts) bis 2100 im Verhältnis zum Mittel 1986-2005.

Dicke Linien: Mittel der Modell-Ensembles; dünne Linien: einzelne Modellrechnungen.

Quelle: IPCC (2013): Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections Supplementary Material RCP8.5, Figure AI.SM2.6.4



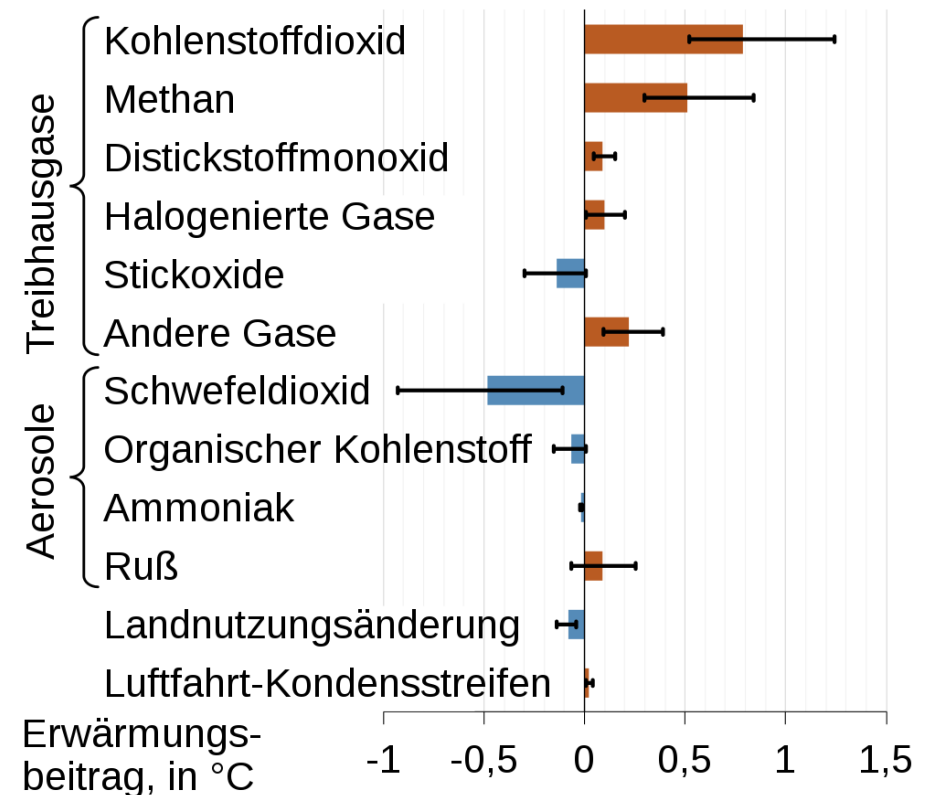
Klimaprojektionen

- RCP Szenarien
 - Strahlungsantrieb (radiative Forcing)

Komponenten des Strahlungsantriebs der globalen Erwärmung in 2010–2019 relativ zu 1850–1900 gemäß Sechstem Sachstandsbericht des IPCC; alle Antriebe resultieren aus menschlicher Aktivität

<https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsantrieb>

Physikalische Antriebe des Klimawandels





Klimaprojektionen

- **SSP Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways)**

Die zukünftigen Emissionen von anthropogenen Treibhausgasen sind von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind.

Deshalb wurden Szenarien (6. IPCC-Bericht, 2021) entwickelt, die eine Kombination von sozioökonomischen Grundlagen und daraus abgeleiteten Treibhausgasemissionen und –konzentrationen sind.

Sie bestehen im wesentlichen aus den fünf Einzelszenarien SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5.

Der erste Teil der Bezeichnungen, SSP1 usw., bezieht sich auf das sozioökonomische Entwicklungsszenario, der zweite Teil, 1.9 usw., auf die Erhöhung des Strahlungsantriebs seit der vorindustriellen Zeit.

Quelle: <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen>



Klimaprojektionen

- **SSP Basisszenarien (SSP1 – SSP5)**

- **SSP1: Der nachhaltige und grüne Weg**

Die Welt beschreitet allmählich einen nachhaltigen Pfad.

Die globalen Gemeinschaftsgüter werden wichtig genommen und bewahrt, die Grenzen der Natur werden respektiert. Statt Wirtschaftswachstum steht zunehmend das menschliche Wohlbefinden im Fokus. Die Einkommensungleichheiten zwischen den Staaten und innerhalb der Staaten werden reduziert. Der Konsum orientiert sich an einem geringen Material- und Energieverbrauch.

- **SSP2: Der mittlere Weg**

Die bisherige Entwicklung setzt sich in die Zukunft fort.

Die Entwicklungen beim Einkommen in den einzelnen Ländern gehen weit auseinander. Es gibt zwar eine gewisse Zusammenarbeit zwischen den Staaten, die jedoch nur geringfügig weiterentwickelt wird. Das globale Bevölkerungswachstum ist moderat und schwächt sich in der zweiten Jahrhunderthälfte ab. Umweltsysteme erfahren eine gewisse Verschlechterung.

Quellen:

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien>



Klimaprojektionen

- **SSP Basisszenarien (SSP1 – SSP5)**
 - **SSP3: Regionale Rivalitäten**
Eine Wiederbelebung des Nationalismus und regionale Konflikte rücken globale Themen in den Hintergrund. Die Politik orientiert sich zunehmend an nationalen und regionalen Sicherheitsfragen. Investitionen in Bildung und technologische Entwicklung nehmen ab. Ungleichheiten nehmen zu. In einigen Regionen kommt es zu starken Umweltzerstörungen.
 - **SSP4: Ungleichheit**
Die Kluft zwischen entwickelten Gesellschaften, die auch global kooperieren, und solchen, die auf einer niedrigen Stufe der Entwicklung mit niedrigem Einkommen und geringem Bildungsstand verharren, nimmt weiter zu. In einigen Regionen ist Umweltpolitik bei lokalen Problemen erfolgreich, in anderen nicht.

Quellen:

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien>



Klimaprojektionen

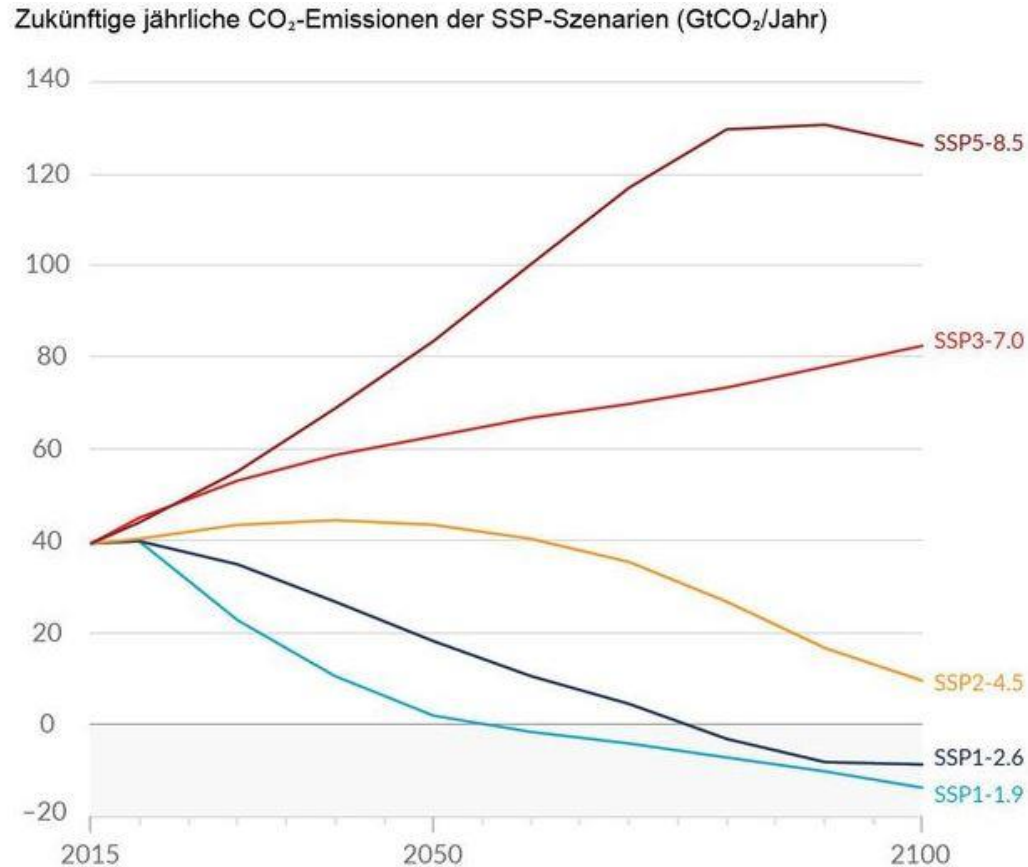
- **SSP Basisszenarien (SSP1 – SSP5)**
 - **SSP5: Die fossile Entwicklung**
Die globalen Märkte sind zunehmend integriert, mit der Folge von Innovationen und technologischem Fortschritt.
Die soziale und ökonomische Entwicklung basiert jedoch auf der verstärkten Ausbeutung der fossilen Brennstoffressourcen mit einem hohen Kohleanteil und einem energieintensiven Lebensstil weltweit.
Die Weltwirtschaft wächst und lokale Umweltprobleme wie die Luftverschmutzung werden erfolgreich bekämpft.

Quellen:
<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien>



Klimaprojektionen

- **SSP Basisszenarien (SSP1 – SSP5)**



IPCC AR6 (2021) Abb. SPM.4a

https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/ueberblick/ueberblick_node.html



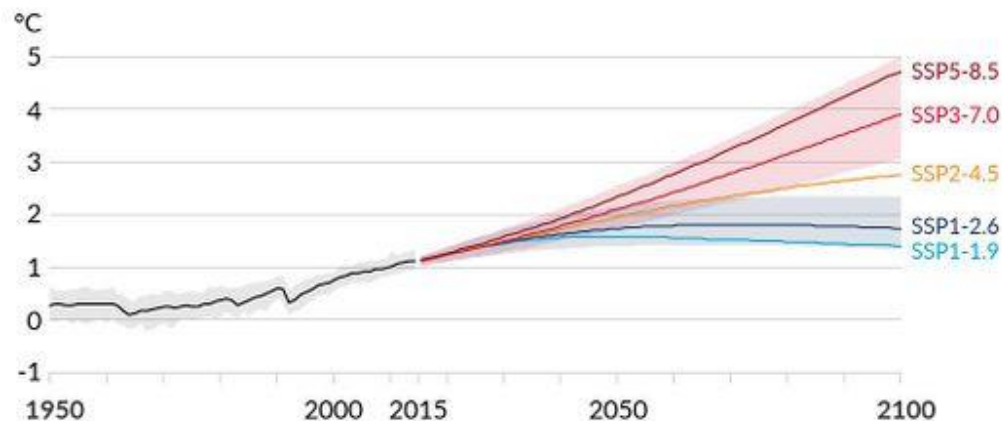
Klimaprojektionen

- **Temperatur (2021-2040, 2041-2060)**

- Keine größeren Vulkanausbrüche (kurzfristige Abkühlung);
- Keine langfristige Änderung der Solareinstrahlung (geringer Einfluss)
- Der Mittelwert von 1850-1900 entspricht ungefähr dem vorindustriellen Wert.

Zwischen 2021-2040 wahrscheinliche Überschreitung der Grenze von 1,5 °C im Vergleich zu 1850-1900 (in den frühen 2030er Jahren). Das wären 10 Jahre früher als bisher von Klimamodellen projiziert wurde.

Global surface temperature change relative to 1850-1900



Erhöhung der globalen Mitteltemperatur 1950 bis 2100; bis 2015 nach Beobachtungen, danach nach verschiedenen SSP-Szenarien.

IPCC (2021): Summary for Policymakers, In: Climate Change 2021, Working Group I: The Physical Science Basis, Figure SPM8

[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)



Klimaprojektionen

- **Temperatur (2081-2100) (IPCC Bericht, 2021)**
 - Die 2-Grad-Grenze wird mit Ausnahme der SSP1-Szenarien im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten.
 - **Mittleres Szenario SSP2-4.5:**
Temperaturerhöhung gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2081-2100) um 2,9 °C über dem vorindustriellen Wert von 1850-1900
 - **Hohe Szenarien SSP3-7.0 und SSP5-8.5:**
Temperaturerhöhung gegen Ende des 21. Jahrhunderts um 3,9 und 4,8 °C über dem vorindustriellen Wert von 1850-1900.
Das sind etwa 0,5 °C mehr als bei den Berechnungen mit den RCP-Szenarien im 5. Sachstandsbericht des IPCC.

Ein wichtiger Grund dafür ist einerseits die höhere Klimasensitivität der neuen Modellgeneration CMIP6, außerdem die starke Temperaturzunahme in den 2010er Jahren.

[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)



Klimaprojektionen

- **Temperatur (2081-2100)**
 - Die Temperaturerhöhung wird über dem Land stärker ausfallen als über dem Ozean (langsamere Erwärmung des Ozeans). Je nach Szenario liegt der Unterschied zwischen 0,4 und 1,7 °C. Die Atmosphäre über dem Arktischen Ozean erwärmt sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 1-2 °C mehr als die angrenzenden Landmassen. Ursache ist das starke Abschmelzen des arktischen Meereises, wodurch ein positiver Rückkopplungseffekt angestoßen wird. Die vom Eis reflektierte Sonnenstrahlung wird nach dem Schmelzen des Eises vom Meerwasser absorbiert und in Wärmestrahlen umgewandelt, die die untere Atmosphäre zusätzlich zum Treibhauseffekt erwärmen.
 - Die Arktis sowie die Tropen und Subtropen werden sich stärker erwärmen als die mittleren Breiten.
Die Landgebiete zeigen die stärksten Erwärmungen in den hohen nördlichen Breiten über Sibirien, Kanada und Alaska. Hier wird der Temperaturanstieg ca. 8,3 °C nach dem Szenario RCP8.5 und 2,2 nach RCP2.6 betragen.

[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)



Klimaprojektionen

- **Temperatur (2081-2100)**

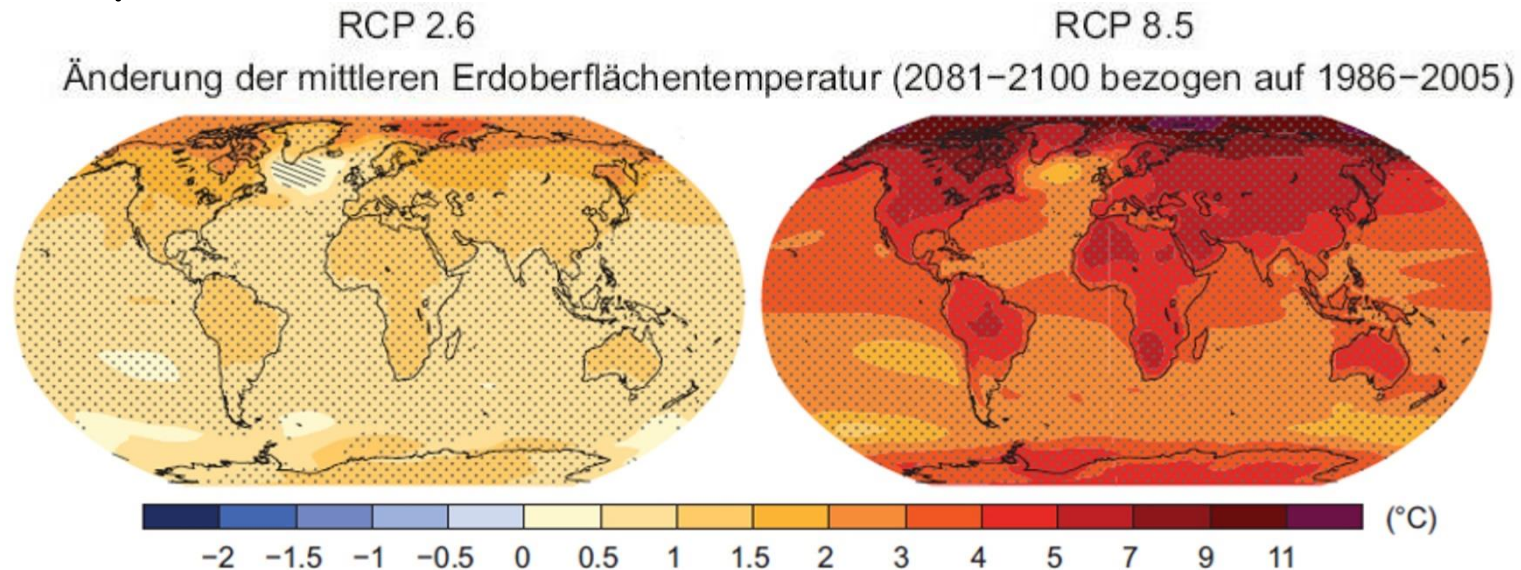
- Die Häufigkeit warmer Tage und Nächte wird in den meisten Landgebieten zunehmen, während die der kalten Tage und Nächte abnehmen wird.
- Hitzewellen werden wahrscheinlich länger anhalten, stärker ausfallen und größere Gebiete umfassen (in Europa werden die hohen Sommertemperaturen stärker steigen als die mittleren Sommertemperaturen).

In einzelnen Regionen können natürliche Klimaschwankungen ebenso wie anthropogene Aerosolemissionen und Landnutzungsänderungen einen größeren Einfluss auf das Klima haben als der externe Antrieb durch Treibhausgase.

[https:// https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)

Klimaprojektionen

- Temperatur



Klimaprojektionen nach den Szenarien RCP2.6 (links) und RCP8.5 (rechts) bis 2081-2100 im Verhältnis zum Mittel 1986-2005. Gepunktet: starke Übereinstimmung der Modellergebnisse und deutliche Abweichung von natürlichen Schwankungen; gestreift: Modellergebnisse liegen unter den natürlichen Schwankungen

[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)

IPCC, 2013: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

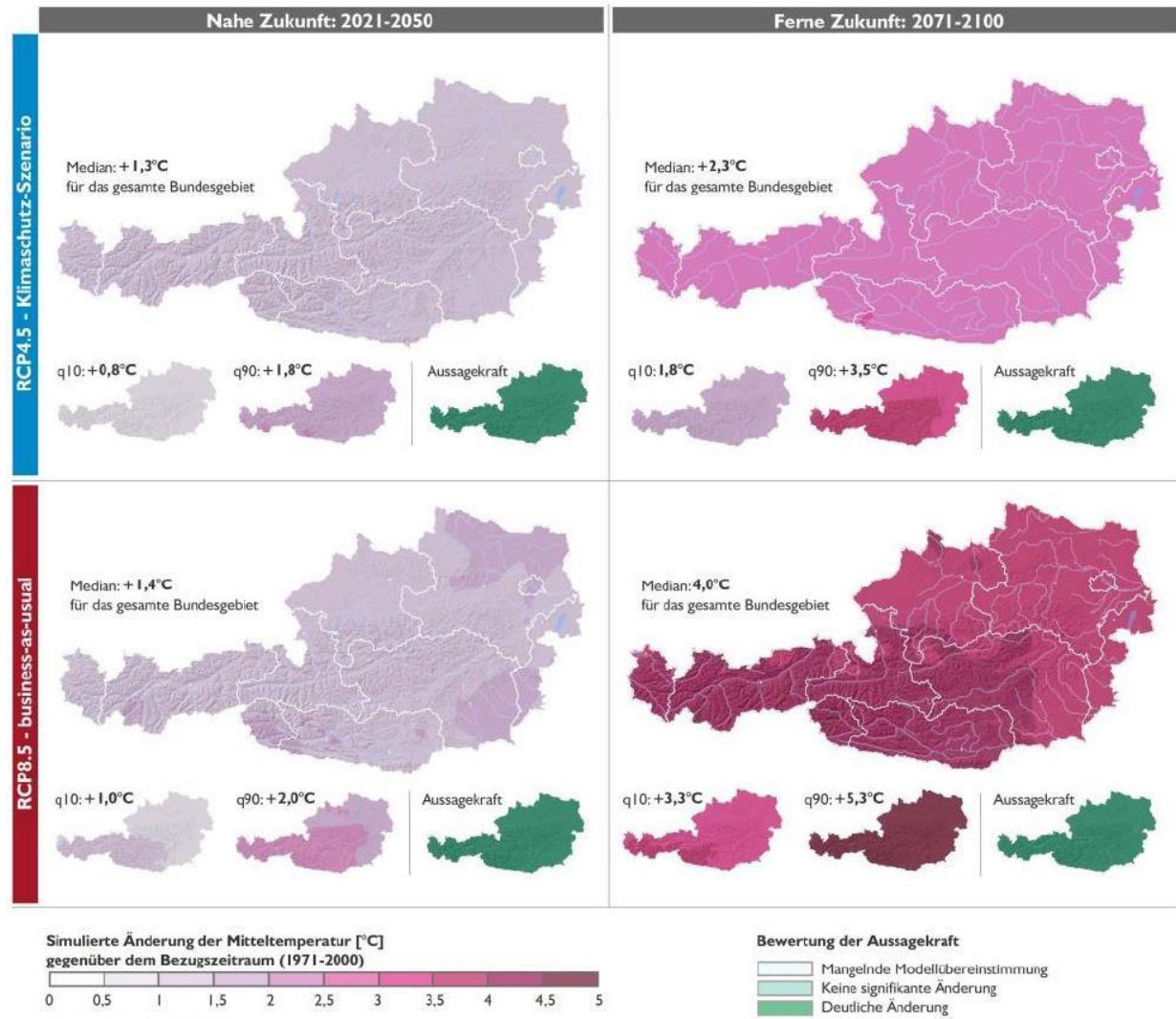


Klimaprojektionen

- Temperatur

Simulierte Änderung der Mitteltemperatur [°C] gegenüber dem Bezugszeitraum (1971-2000)

ÖKS15 Klimaszenarien für Österreich (2016)



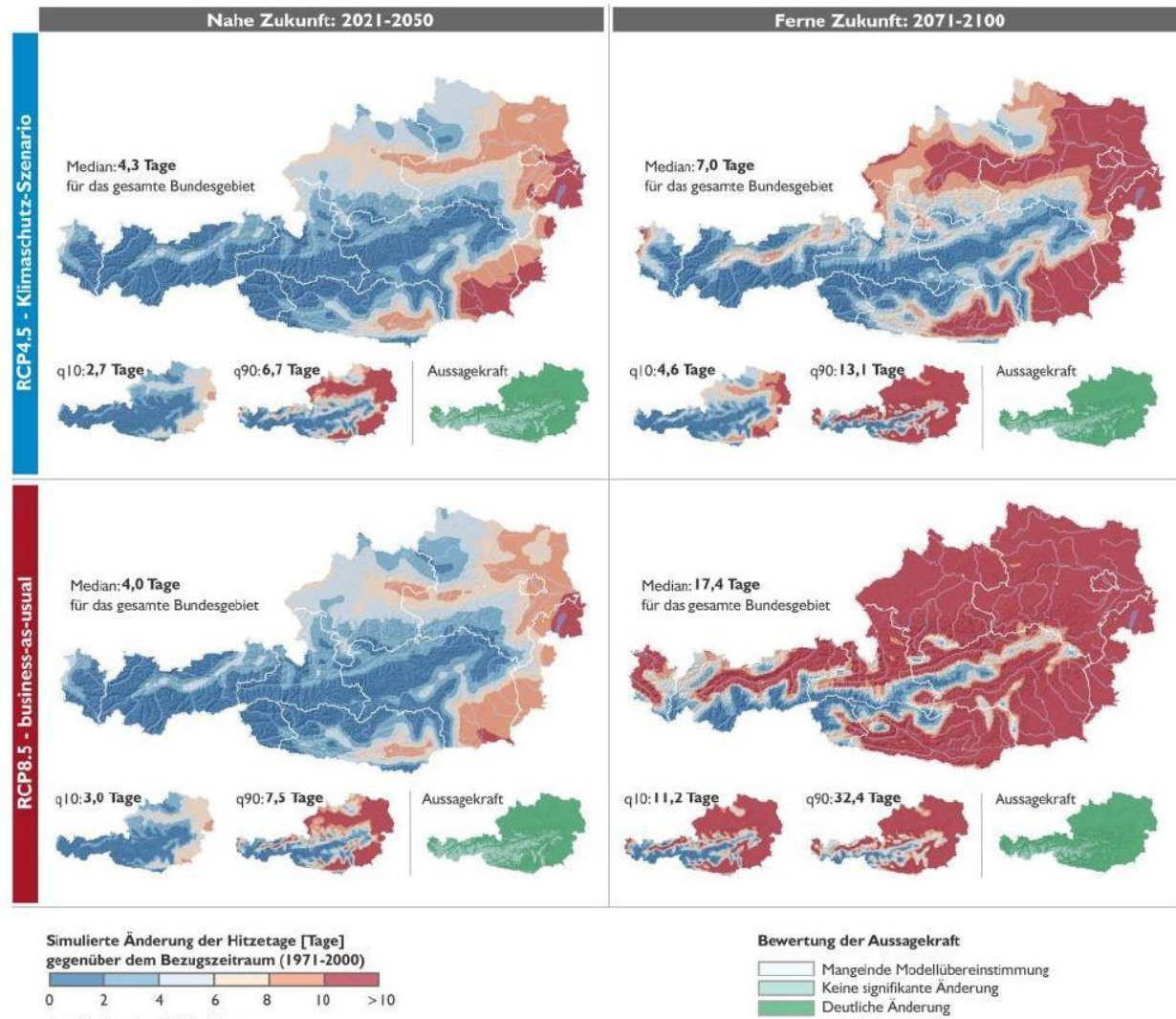


Klimaprojektionen

- Temperatur

Simulierte
Änderung der
Hitzetage [Tage]
gegenüber dem
Bezugszeitraum
(1971-2000)

ÖKS15 Klimaszenarien für
Österreich (2016)





Klimaprojektionen

- **Niederschläge**

Der globale Niederschlag wird mit dem Klimawandel insgesamt zunehmen. Eine globale Erwärmung von 1 °C wird sehr wahrscheinlich zu einer Niederschlagsserhöhung von 1-3% führen. Im Vergleich zu der jüngsten Vergangenheit 1995-2014 werden die globalen Niederschläge nach dem hohen Szenario SSP3-7.0 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 4,7% zunehmen, über dem Land sogar um 5,8%. Bei dem höchsten Szenario SSP5-8.5 wird über dem Land von den Klimamodellen sogar eine Zunahme von 8,3% simuliert.

Atmosphärische Strömungen werden durch unterschiedlich warme Luftmassen angetrieben, z.B. zwischen Meer und Land, die sich verschieden erwärmen können, wodurch sich dann auch die Zirkulation ändert. Eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen, der dann bei Niederschlagsereignissen in größeren Massen zur Verfügung steht. Andererseits erhöht sich bei steigenden Temperaturen die Verdunstung, was je nach Region und Jahreszeit zu mehr Trockenheit führen kann.

[https:// https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)



Klimaprojektionen

- **Niederschläge**

Der Gegensatz zwischen trockenen und feuchten Regionen sowie zwischen trockenen und feuchten Jahreszeiten wird sich durch die globale Erwärmung verstärken (5. Sachstandsbericht des IPCC, 2013). Die subtropischen Regionen werden auch nach dem neuen IPCC-Bericht trockener und die Tropen und mittleren Breiten feuchter. Besonders in den höheren Breiten machen sich mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern die Gegensätze zwischen den Jahreszeiten bemerkbar. In den Tropen nehmen die Niederschläge besonders in den Monsunregionen zu.

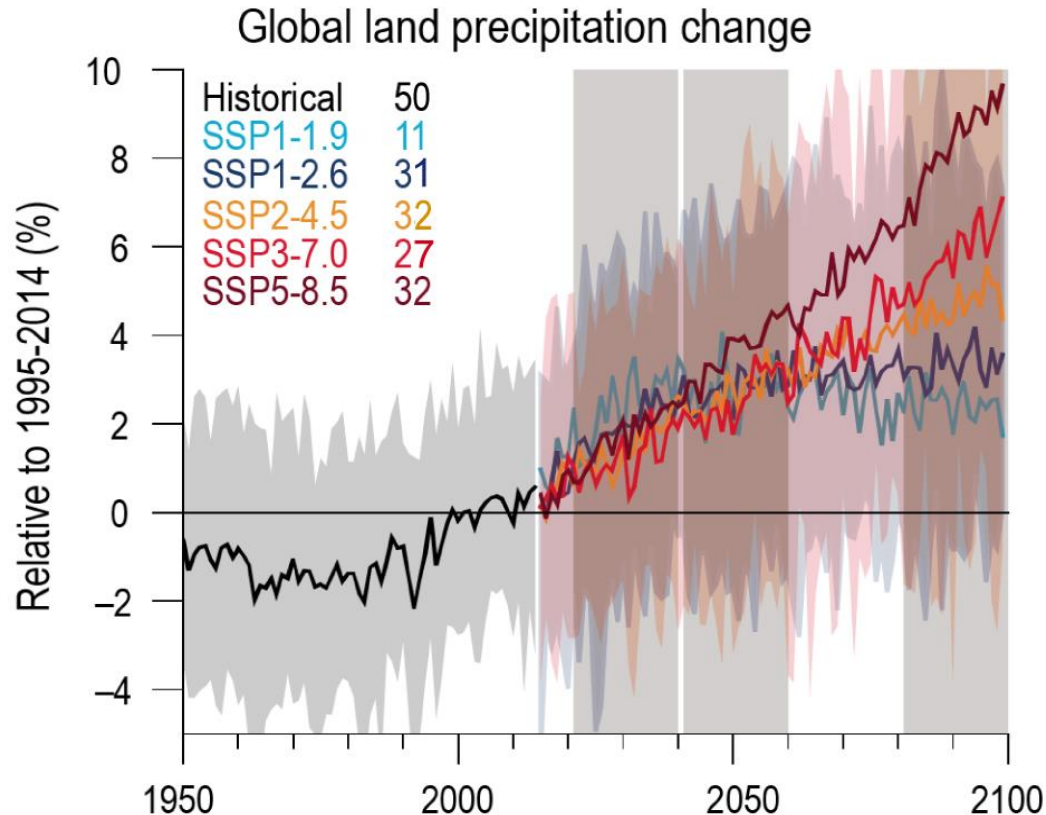
In den höheren Breiten kommt es im Sommer wie im Winter zu höheren Niederschlägen von 20 % und mehr. Ebenso ist mit höheren Niederschlägen über den tropischen Ozeanen und in einigen tropischen Monsungebieten zu rechnen. In den mittleren Breiten wird es im Sommer wahrscheinlich weniger, im Winter mehr Niederschlag geben. Nur im östlichen Asien werden auch im Sommer mehr Niederschläge fallen. In den ohnehin trockenen Subtropen nehmen die Niederschläge in den meisten Gebieten wahrscheinlich ganzjährig ab, so um bis zu 20 % im Mittelmeerraum und in der Karibik.

[https:// https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)



Klimaprojektionen

- Niederschläge



Änderung der globalen Niederschläge über dem Land 1950-2100 nach SSP-Szenarien, relativ zur jüngsten Vergangenheit 1995-2014. Die Zahlen neben den Szenarien geben die Anzahl der Modelle an (auch die historische Änderung der Niederschläge wurde mit Modellen berechnet).

Quelle:

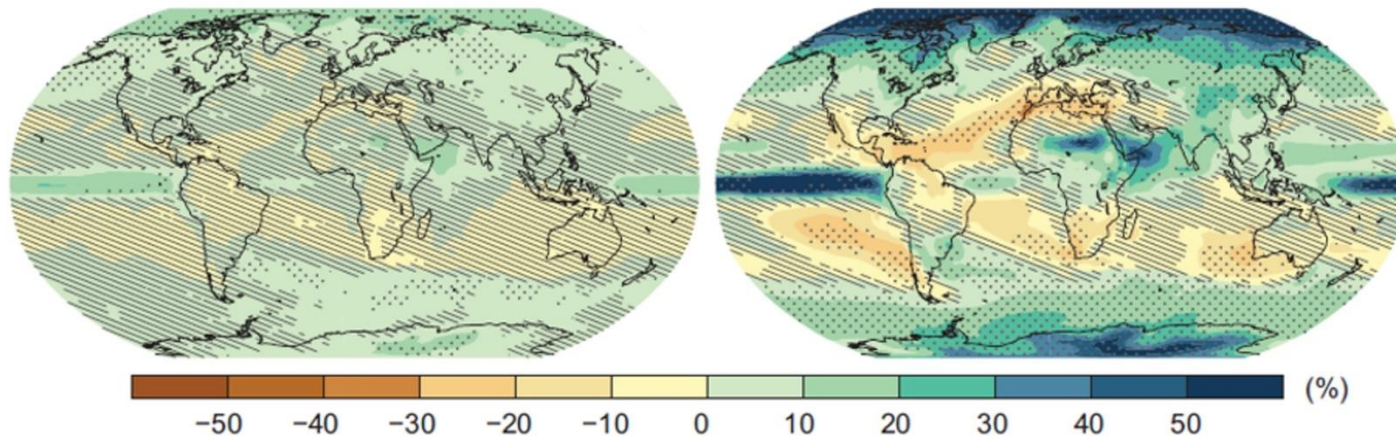
[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)

IPCC AR6 (2021): Climate Change 2021, Working Group I: The Science of Climate Change, Ch. 4, Figure 4.2a

Klimaprojektionen

- Niederschläge

Änderung des mittleren Niederschlags (2081–2100 bezogen auf 1986–2005)



Klimaprojektionen des Niederschlags nach den Szenarien RCP2.6 (links) und RCP8.5 (rechts) bis 2081-2100 im Verhältnis zum Mittel 1986-2005. Gepunktet: starke Übereinstimmung der Modellergebnisse und deutliche Abweichung von natürlichen Schwankungen; gestreift: Modellergebnisse liegen unter den natürlichen Schwankungen.

[https:// wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaprojektionen)

IPCC, 2013: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, Bern/Bonn/Wien, 2014.



Klimaprojektionen

- Niederschläge



Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme in Österreich 1813–2019 (ergänzt durch Daten aus dem nordöstlichen Alpenraum 1800–1812). Dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1961–1990 (dünne Linien) und deren geglättete Trends (dicke Linien, 21-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter) (Auer u.a. 2007 aktualisiert).

<https://www.klimawandelanpassung.at/kwa-allgemein/kwa-aenderung/kwa-beobacht-ns>

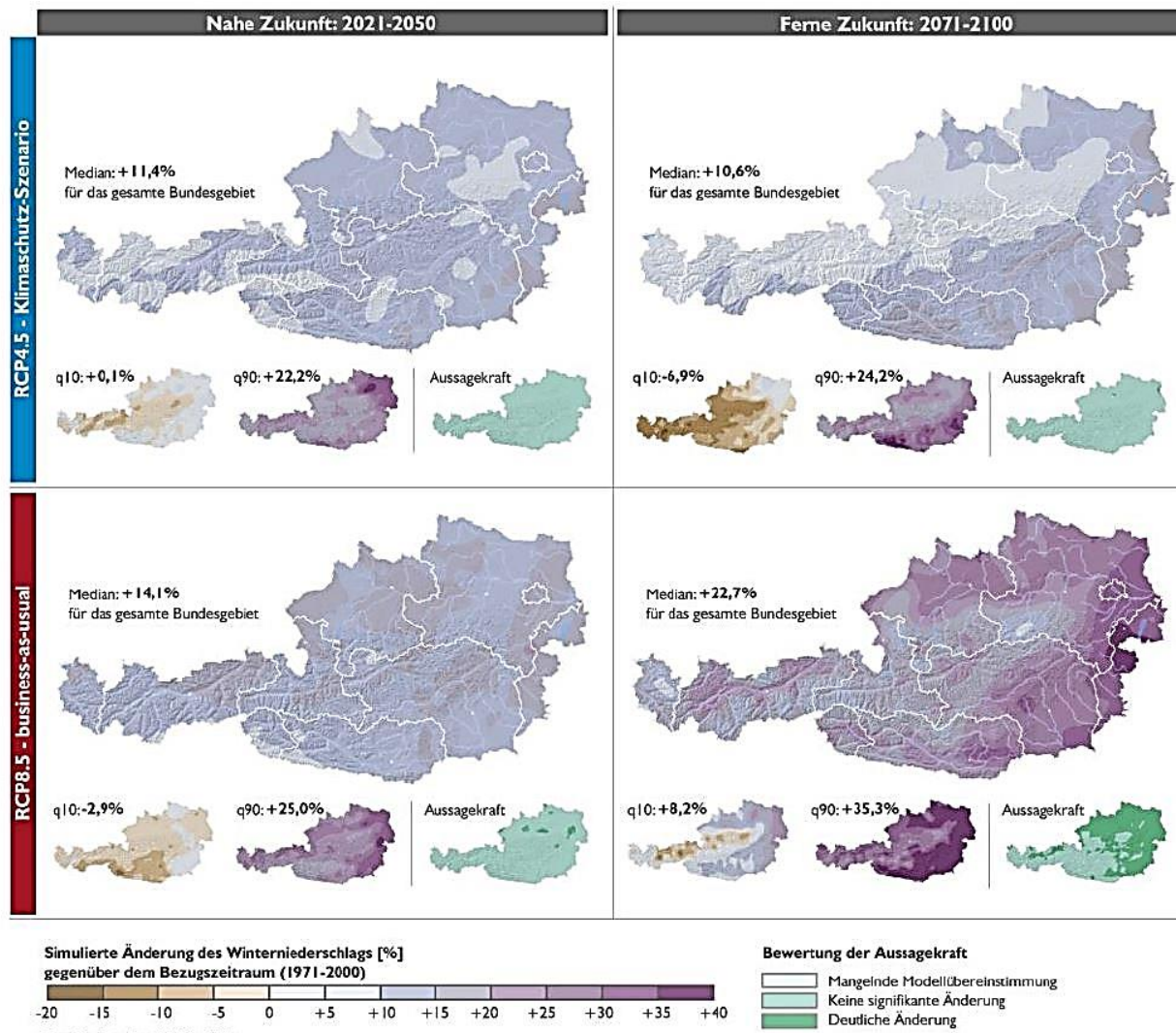


Klimaprojektionen

• Niederschlag

Simulierte Änderung des Winterniederschlags [%] gegenüber dem Bezugszeitraum (1971-2000)

ÖKS15 Klimaszenarien für Österreich (2016)



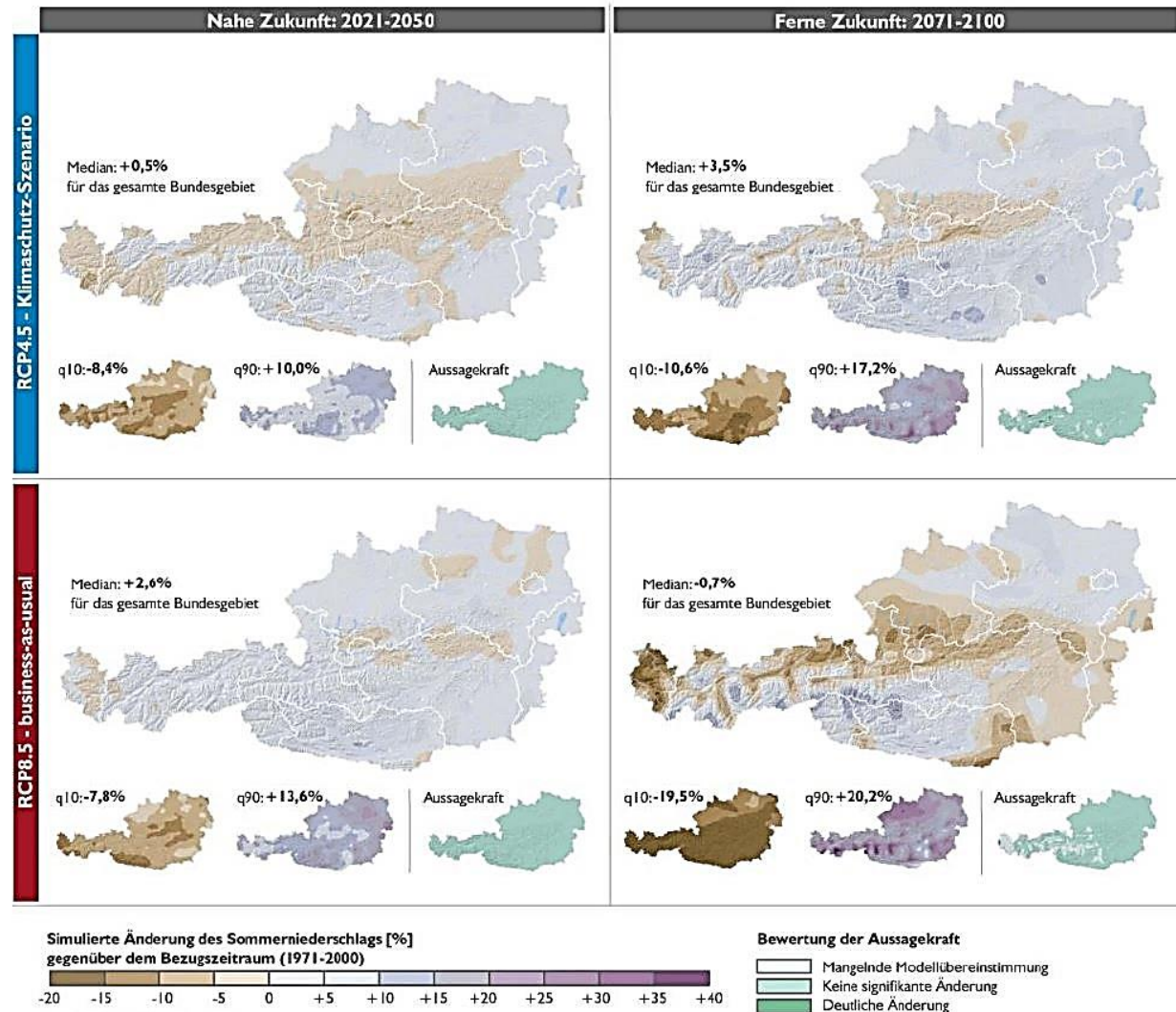


Klimaprojektionen

• Niederschlag

Simulierte Änderung des
Sommerniederschlags
[%] gegenüber dem
Bezugszeitraum (1971-
2000)

ÖKS15 Klimaszenarien für
Österreich (2016)





Klimaprojektionen

- **Niederschläge**

In der Betrachtung einzelner Regionen in Österreich zeigen sich unterschiedliche Niederschlagstrends (ZAMG, 2021):

- **Zunahme in Westösterreich (Vorarlberg, Nordtirol) seit 1858, höhere Niederschlagsmengen im Winter**
- **Abnahme im Südosten Österreichs (Unterkärnten, West- und Oststeiermark, Südburgenland) über die letzten 200 Jahre, stärkerer Rückgang im Winter als im Sommer**
- **schwache Zunahme in Nordösterreich (Flachgau, Oberösterreich, Niederösterreich, Wien, Nordburgenland), höhere Niederschlagsmengen im Winter**
- **kaum Änderungen im inneralpinen Zentrum (Salzburger Gebirgsgaue, Obersteiermark, Osttirol, Oberkärnten)**

<https://www.klimawandelanpassung.at/kwa-allgemein/kwa-aenderung/kwa-beobacht-ns>



Die Klimafolgen

- **Permafrost**

Grundsätzlich spricht man von Permafrost, wenn ein Boden im Untergrund mindestens über zwei Jahre gefroren bleibt.



© adobe.stock.com/ Alexander
<https://www.agrarheute.com/pflanze/permafrost-taut-gefaehrlich-urzeit-viren-klimagase-602158>

Rund 2,5 % der Gesamtfläche Österreichs weisen einen ganzjährig gefrorenen Untergrund mit einer saisonalen Auftauschicht auf, und weitere etwa 1,5% der Fläche unterliegen tiefgründigem saisonalem Bodenfrost mit vergleichbarer Verwitterungswirkung. Das bedeutet, dass etwa 3150 km² der Österreichischen Alpen von Permafrost beeinflusst sind (Boeckli et al., 2012).

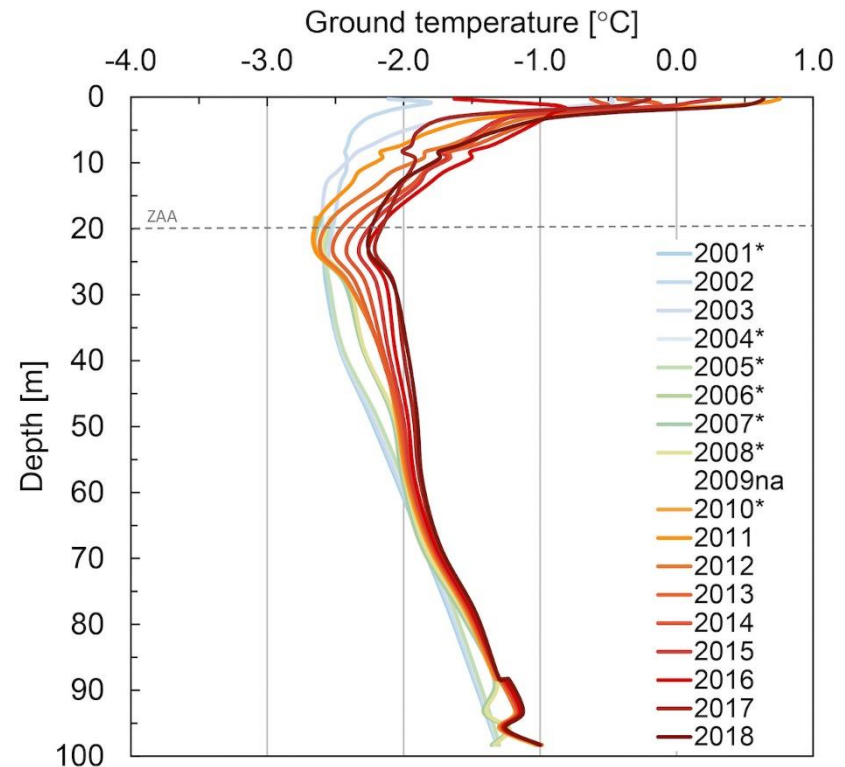
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/permafrost>



Die Klimafolgen

- Permafrost**

Permafrost hat in vielen Hochgebirgsregionen eine große Bedeutung für die Stabilität von Schutt- und Felshängen, insbesondere in hohen Steillagen. Bei verschiedenen Berg- und Felsstürzen in den letzten Jahren gibt es eine Reihe von Indizien, die auf das Abschmelzen (Degradation) von Permafrost zumindest als eine der Ursachen hindeuten.



Bohrlochtemperaturen im Permafrost des Stockhorns (3410 m.ü.M., Mattertal).

<https://www.syntopia-alpina.ch/beitraege/aufgeheiztes-hochgebirge-ueber-permafrost-und-felsstuerze>

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/permafrost>



Die Klimafolgen

- **Permafrost**

Als Folge des Klimawandels ist ein flächenhaftes Abschmelzen des Permafrostes zu erwarten. Dadurch verliert der Untergrund an Stabilität und es kann zu Setzungen, Hangrutschungen, Kriechbewegungen, Steinschlägen oder Felsstürzen kommen.

(<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/permafrost>)



Pizzo Cengalo, Val Bondasca GR (© M. Volken)

https://www.syntopia-alpina.ch/assets/slideshows/slideshow-permafrost-und-felsstuerze/_image/Syntopia_Alpina_Bergsturz_02.jpg



Die Klimafolgen

- **Gletscher**

Gebirgsgletscher kommen weltweit aufgrund von Topografie und Klima in den unterschiedlichsten Größen und Formen vor (Kar- und Hängegletscher, alpine Talgletscher, Auslassgletschern der Antarktis und Grönlands). In den vergangenen fünfzig Jahren stieg der Eisverlust auf etwa 335 Milliarden Tonnen im Jahr an. Die Gletscher der Alpen beispielsweise haben seitdem etwa ein Drittel ihrer Gesamtfläche eingebüßt.

(<https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/gletscherschmelze-weltweit-gletscher-schmelzen-klimawandel-100.html>).

- Entstehung von Gletscherseen und anschließende Ausbrüche (GLOF)
- Geschiebeeintrag in fluviale Systeme
- Verlust von Trinkwasser
- Verlust von Wasser für landwirtschaftliche Bewässerung
- Anstieg des Meeresspiegels
Schmelzende Gletscher machen zwischen 25 und 30 Prozent vom Anstieg des globalen Meeresspiegels aus (Zemp, M. 2019, 2021). Das entspricht einem Millimeter im Jahr.

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/gebirgsgletscher>



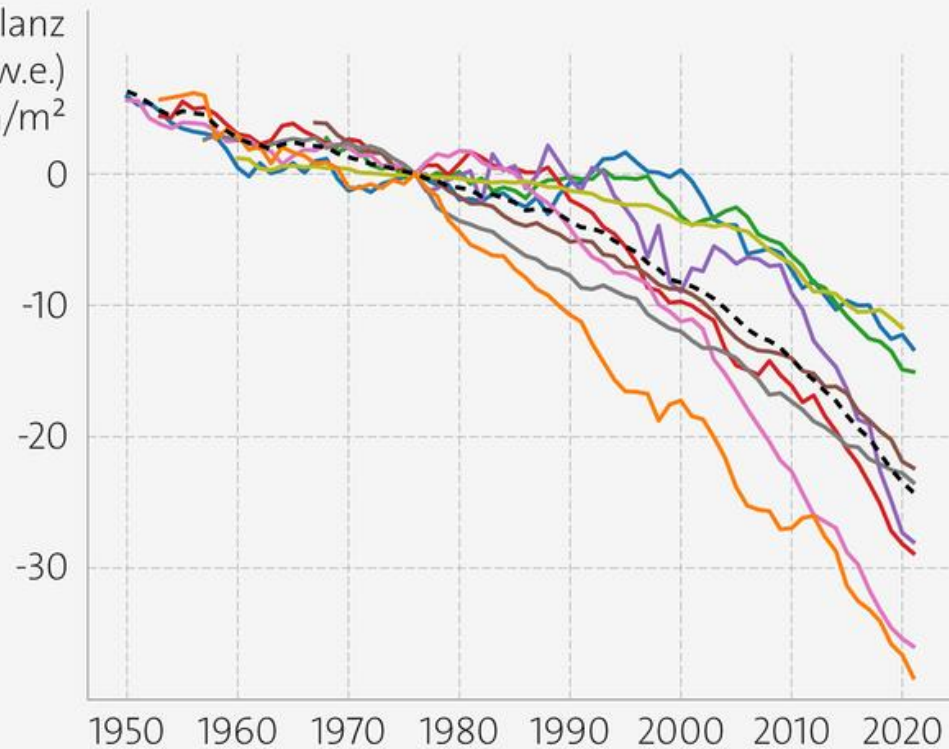
Die Klimafolgen

- Gletscher

Eisverlust der Gletscher weltweit seit 1950 nach Regionen

kumulierte jährliche Massebilanz
in Meter Wasseräquivalent (m w.e.)
oder Tonnen/m²

- Skandinavien
- Westkanada und USA
- Kaukasus und Mittlerer Osten
- Alaska
- Südliche Anden
- Svalbard und Jan Mayen
- Mitteleuropa
- Zentralasien
- Nordkanada
- Mittelwert aller Regionen



Quelle: World Glacier Monitoring Center (WGMS) 2021 | Grafik: BR



Die Klimafolgen

- Gletscher



Melamchi, Nepal © BGC Engineering



Die Klimafolgen

- Gletscher



Sattelkar, Obersulzbach, Neukirchen am Großvenediger



Die Klimafolgen

- **Schnee**

Frischer, weißer Schnee reflektiert 80 % bis 90 % der Sonneneinstrahlung. Im Vergleich dazu reflektieren Vegetation oder Boden nur 10 % bis 20 %. Nimmt die räumliche Ausdehnung der winterlichen Schneedecke ab, wird weniger Energie ins Weltall reflektiert und anstatt dessen von der schneefreien Erdoberfläche absorbiert. Der zusätzliche Energieeintrag trägt zu einer Erwärmung der Erde und somit des Klimas bei. Dieser sich selbst verstärkende Prozess wird Eis-Albedo-Rückkopplung bezeichnet und gehört zur Gruppe der positiven Rückkopplungen des Klimas.

Klimamodelle projizieren bis in die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2070 bis 2099) Zukunft sowohl eine Temperaturerhöhung über alle Seehöhen als auch mehrheitlich eine Zunahme der winterlichen Niederschlagssumme, im Vergleich zu heutigen Verhältnissen (1991 bis 2020).

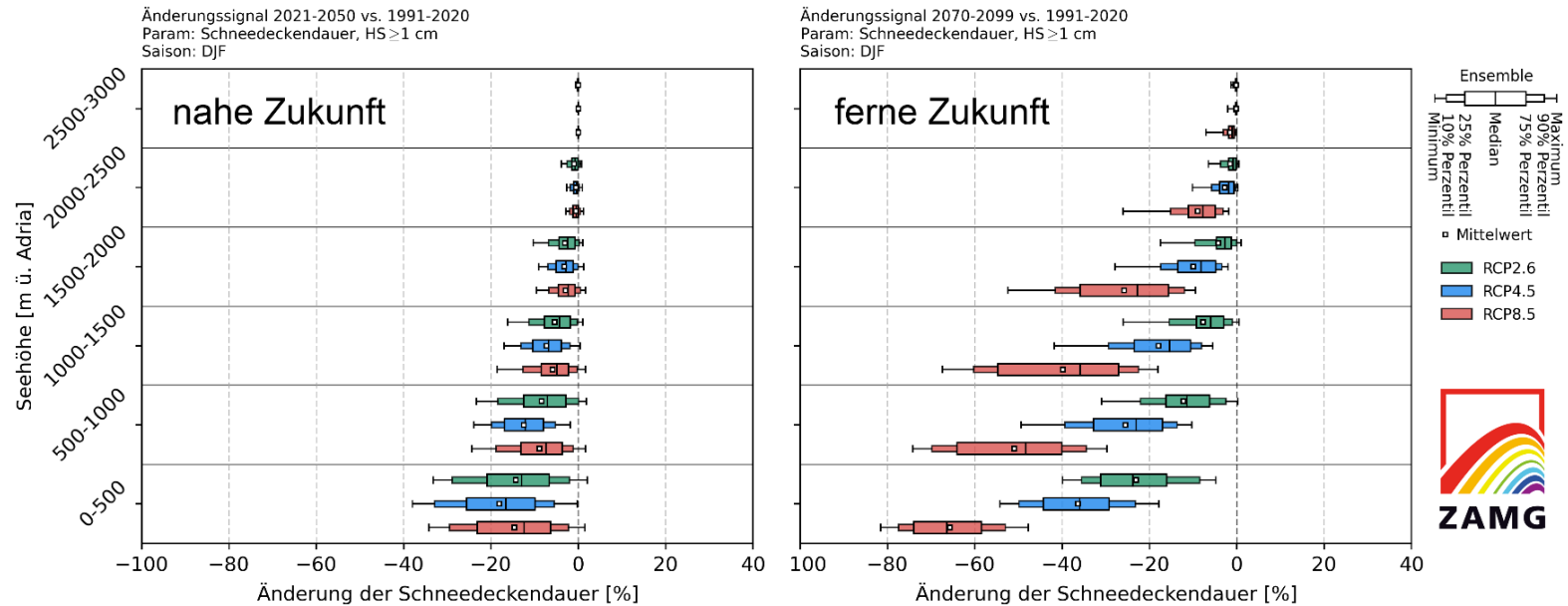
Inwieweit sich die Niederschlagszunahme auf die natürliche Schneehöhe auswirken wird, ist abhängig von Seehöhe und Stärke des zukünftigen Temperaturanstieges.

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee>



Die Klimafolgen

- Schnee



Boxplots zu den projizierten Änderungen der **Schneedeckendauer** (Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 1 cm) für die nahe Zukunft (2021 bis 2050, links) und ferne Zukunft (2070 bis 2099, rechts) über unterschiedliche Höhenbereiche in Österreich im Kernwinter (DJF), im Vergleich zur Klimaperiode 1991 bis 2020. Rot: „Worst Case“-Szenario, kein Klimaschutz (RCP8.5); blau: begrenzter Klimaschutz (RCP4.5); grün: 2-Grad-Ziel Pariser Klimaabkommen 2016, ambitionierter Klimaschutz (RCP2.6).

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee>

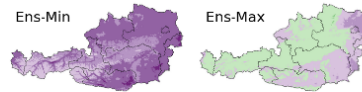


Die Klimafolgen

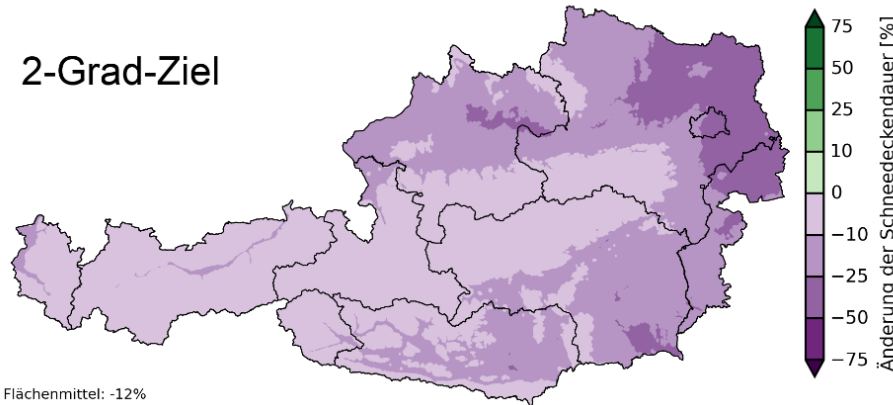
- Schnee



RCP2.6: Änderungssignal 2070-2099 vs. 1991-2020 Ensemble-Median
Param: Schneedeckendauer, HS > 1 cm
Saison: DJF



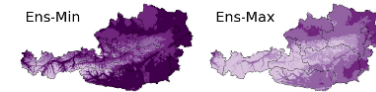
2-Grad-Ziel



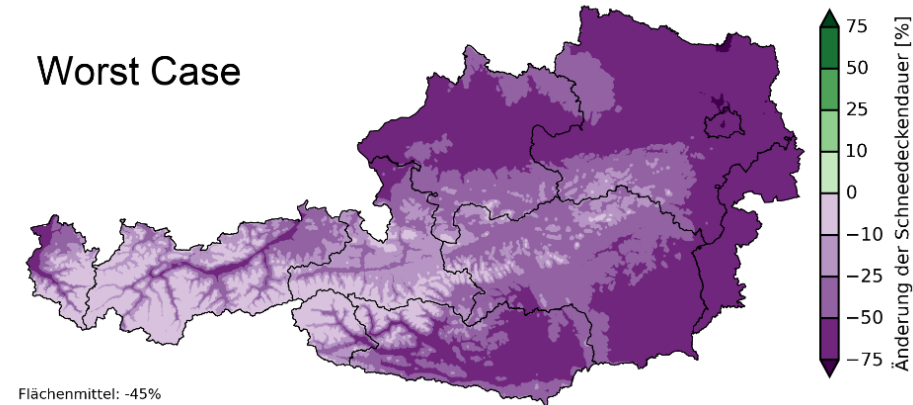
Flächenmittel: -12%



RCP8.5: Änderungssignal 2070-2099 vs. 1991-2020 Ensemble-Median
Param: Schneedeckendauer, HS > 1 cm
Saison: DJF



Worst Case



Flächenmittel: -45%

Projizierte Änderung (Ensemble-Median) der **Schneedeckendauer** (Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 1 cm) für die ferne Zukunft (2070 bis 2099 vs. 1991 bis 2020) bei Einhaltung des 2-Grad-Ziels (RCP2.6, links) und im „Worst Case“-Szenario (RCP8.5, rechts). Die kleinen Grafiken am rechten Oberrand stellen das Minimum und Maximum des Klimamodell-Ensembles dar. Das Flächenmittel ist links unten angegeben.

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee>



Die Klimafolgen

- Lawinen

Aufgrund des zu erwartenden Temperaturanstieges kann davon ausgegangen werden, dass sich der Anteil von Nassschneelawinen in den Alpen erhöhen wird. Bei Nassschneelawinen wird angenommen, dass diese in höheren Lagen früher in der Saison auftreten und dass trockene Lawinen durch Nassschneelawinen ersetzt werden, wodurch die Zahl der Ereignisse konstant bleibt aber deren Größe durch modifizierte Schnee Rheologie reduziert wird.

Da die Schneedecke unter 1500 bis 2000 m deutlich abnehmen wird ist auch mit einem Rückgang von Lawinen zu rechnen.

Ein höherer Regenanteil am Winterniederschlag führt häufiger zu durchfeuchteten Schneedecken, was in den meisten Fällen die Lawinenbildung fördern dürfte.



Die Klimafolgen

- **Hochwasser**

Bei der Beurteilung des Hochwasserrisikos sind die Ereignisse nach ihren auslösenden Prozessen zu unterscheiden.

- **Bäche mit kleinen Einzugsgebieten reagieren rasch auf intensive Niederschläge. Deshalb sind konvektive Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten, kurzer Dauer und kleiner räumlicher Ausdehnung am bedeutendsten. Die generelle Überlegung zum Klimawandel basiert darauf, dass das Wasserspeichervermögen der Atmosphäre um 7% pro Grad Temperaturerhöhung ansteigt. Eine allgemeine Einschätzung ist jedoch schwierig, da die derzeitige Datenlage nicht ausreichend ist. Dennoch sprechen die genannten Gründe dafür, dass der Klimawandel die Hochwassergefahr in kleinen Einzugsgebieten tatsächlich erhöhen kann.**

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/hochwasser>



Die Klimafolgen

- **Hochwasser**

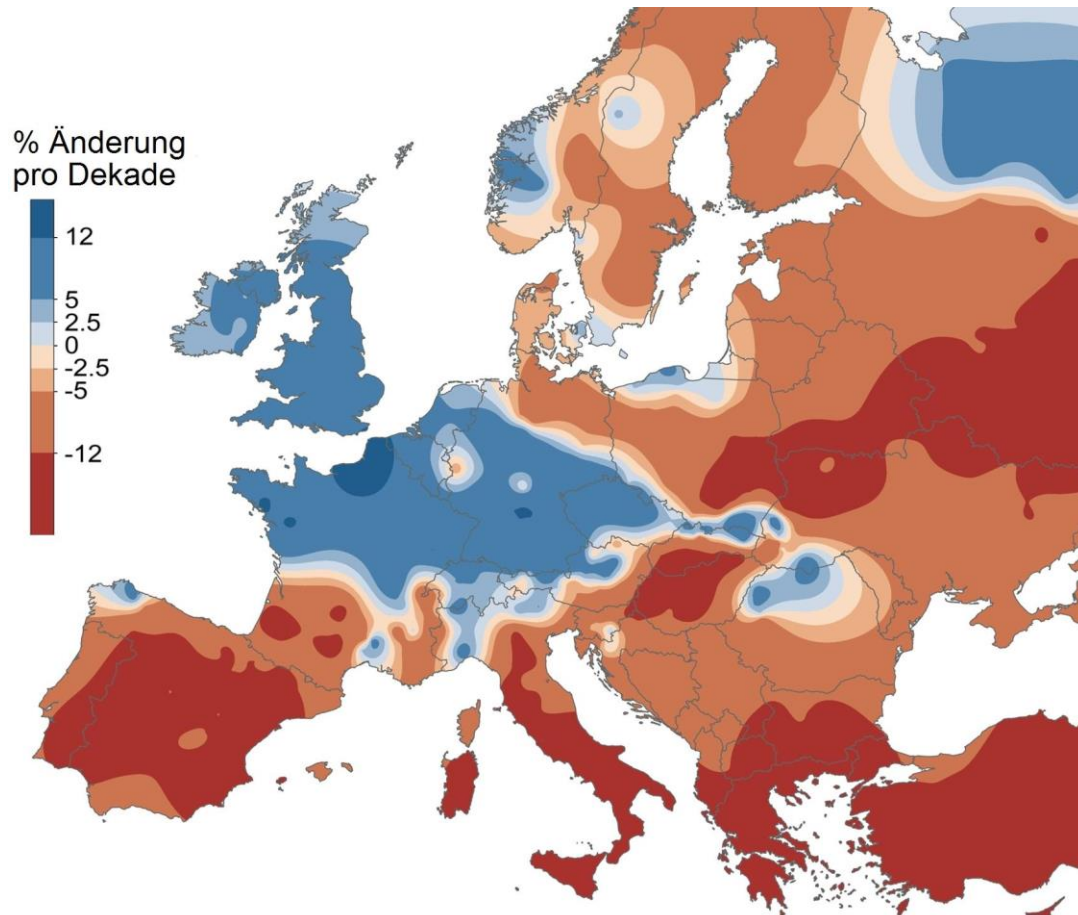
Bei der Beurteilung des Hochwasserrisikos sind die Ereignisse nach ihren auslösenden Prozessen zu unterscheiden.

- **In den größeren Einzugsgebieten, die hydrologisch langsamer reagieren, sind großräumige Niederschläge von längerer Dauer und geringerer Intensität maßgeblich. Die Datenbasis ist hier wesentlich besser. Die Veränderungen der Flusshochwasser in mittleren und großen Einzugsgebieten können durch langjährige Messungen des Abflusses beurteilt werden. Es gibt sehr klare Veränderungsmuster. In Nordwesteuropa hat sich die mittlere Hochwasserspitze für Messstationen mit signifikanten Änderungen um mehr als 5 % pro Dekade erhöht. Im Osten und Süden gibt es Rückgänge in ähnlicher Größenordnung.**



Die Klimafolgen

- Hochwasser



Beobachtete Hochwassertrends im Zeitraum 1960-2010 basierend auf Abflussmessungen an Stationen mit signifikanten Trends mittlerer und großer Einzugsgebiete in Europa. Blaue Farben zeigen einen zunehmenden Trend und rötliche Farben einen abnehmenden Trend. Blöschl et al. (2019).

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/hochwasser>



Die Klimafolgen

- **Weitere Folgen**
 - **Hitzewellen und Dürren**
(<http://www.klimawandel-in-oesterreich.at/hitze.html>)
 - **Waldbrände**
(<http://www.klimawandel-in-oesterreich.at/hitze.html#waldbrand>)
 - **Stürme**
(<http://www.klimawandel-in-oesterreich.at/stuerme.html>)
 - **Hagel**
(<http://www.klimawandel-in-oesterreich.at/kaelte.html#hagel>)
 - **Störungen im Ökoystem Wald**



Die Klimafolgen

- **Ausbruch des Vulkans Tambora (5.-15. April 1815) oder wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte**
 - Die Explosion als Strafe der Götter, Religiosität
 - Entstehung der Klassengesellschaft in England
 - Gespenst des Wuchers, Kornjuden
 - Heer der Bettler wächst, Verbot der Ausfuhr von Grundnahrungsmitteln, Teuerung, Mißernten, Hungersnöte, „Stille Nacht, heilige Nacht“ (1816)
 - Sozialproteste, Revolutionsangst, Progrome, Großdemonstrationen
 - Arbeitsbeschaffungsprogramme, Frauenvereine, Armenvereine Wohlfahrtseinrichtungen, Sparkassen als Selbsthilfe
 - Überschwemmungskatastrophen, Gletscherwachstum, Schnee
 - Hungertyphus, Cholera
 - Binnenmigration in Europa, Auswanderung
 - Erfindung der Wetterkarte, Meteorologie, Kanalisation, Gewässerregulierung,
 - Energiesparen

Behringer, W. (2015) Tambora und das Jahr ohne Sommer



Zum Nachdenken

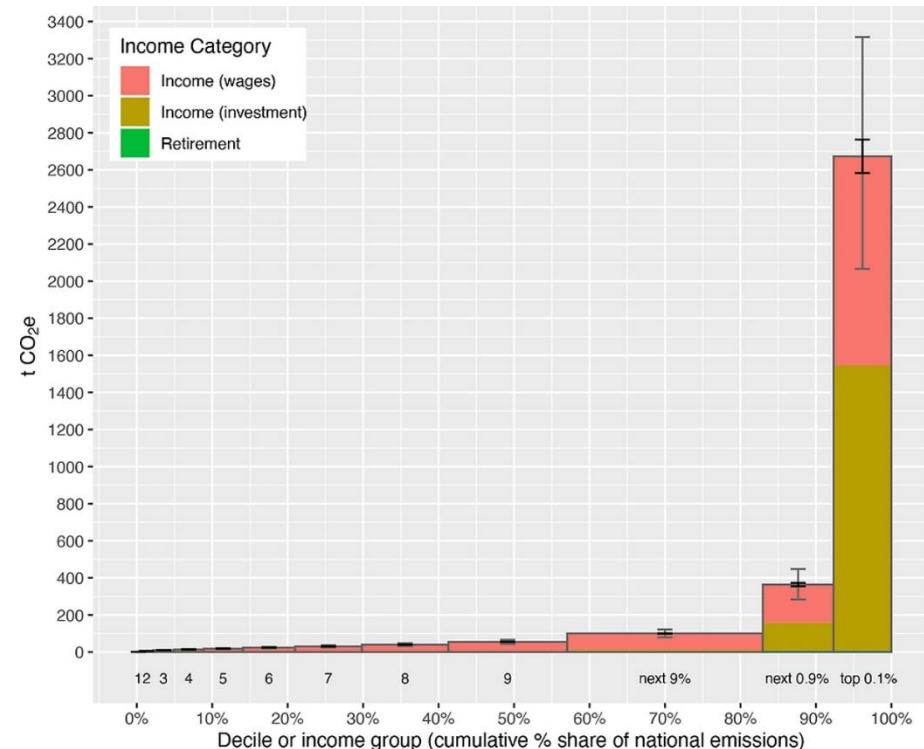
- Aktien der Reichsten sind CO2-Treiber**
Studie: Einkommen von 65.000 US-amerikanischen Haushalten von 1990 bis 2019

Passives Einkommen, das allein durch bestehende Investitionen fließt, ist besonders CO2-intensiv (Investitionen in fossile Energieträger oder Kauf von Aktien von Firmen, die viele Emissionen produzieren).

Die obersten zehn Prozent sind laut der Studie für 40 Prozent der Treibhausgasemissionen der USA verantwortlich.

Die reichsten 0,1 Prozent verursachen mehr als 3.000 Tonnen CO2 im Jahr. (Österreich: durchschnittlicher CO2-Ausstoß pro Jahr und Kopf 8,65 Tonnen)

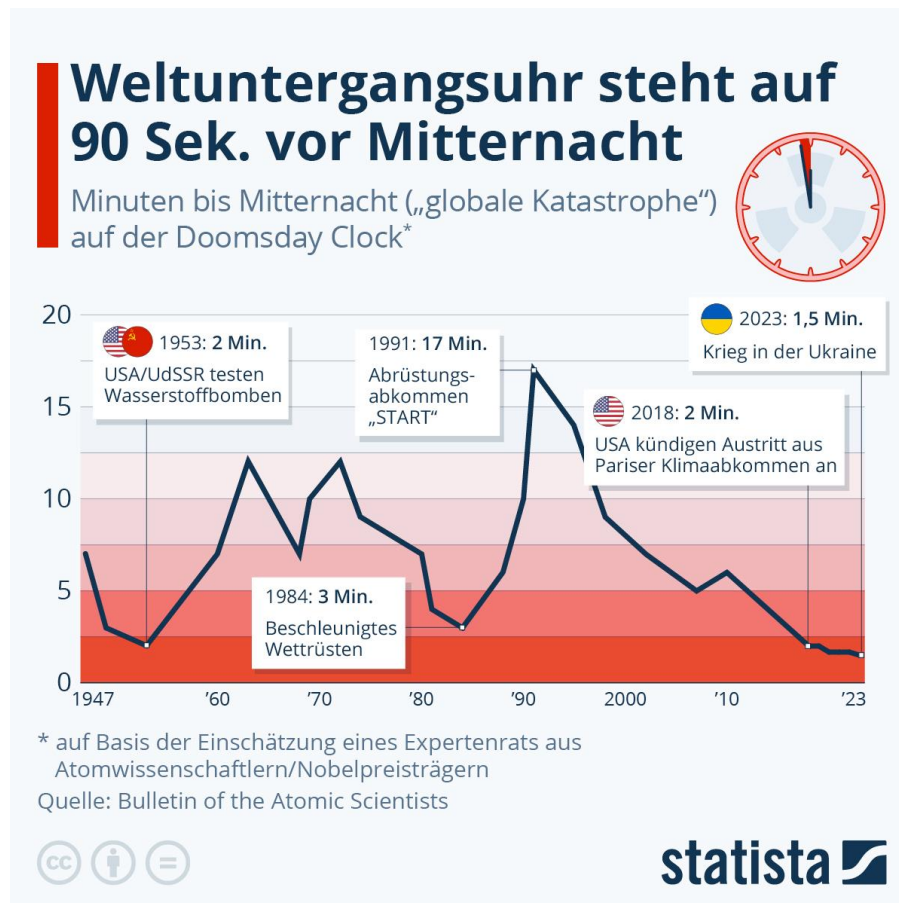
<https://science.orf.at/stories/3220756/>





Zum Nachdenken

- „5 nach 12?“



Die Zeiger der symbolischen Weltuntergangsuhr stehen auf 90 Sekunden vor Mitternacht – und damit so dicht an einer globalen Katastrophe wie noch nie zuvor. Die Weltuntergangsuhr – auch Atomkriegsuhr genannt – beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer möglichen globalen Katastrophe, für die Menschen verantwortlich sind. Es handelt sich um eine symbolische Uhr des "Bulletin of the Atomic Scientists", einem Magazin für Atomwissenschaftler. Die aktuelle Umstellung auf 90 Sekunden vor Mitternacht bezieht sich auf die laut Forschern gestiegene atomare Gefahr im Krieg in der Ukraine.

(<https://de.statista.com/infografik/12700/doomsday-clock/>)

<https://de.statista.com/infografik/12700/doomsday-clock/>