

Wodurch ändert sich das Klima?

Astronomische Einflüsse

Sonstige natürliche Einflüsse

Menschgemachte Einflüsse

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

1/3

- Der Klimawandel ist weltweit in aller Munde. Wissenschaftler versuchen, das Klima zu verstehen und künftige Klimaveränderungen vorherzusagen.
- Die meisten stufen die Folgen dieser Veränderungen als bedrohlich für Mensch und Natur ein und fordern Regierungen auf, entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen.
- Die Politiker reagieren mit weltweiten Klimaabkommen mit Selbstverpflichtungen, die hauptsächlich darauf abzielen, den Ausstoß des Treibhausgases CO₂ zu verringern.
- Es gibt aber auch andere Stimmen, die die Aussagen des IPCC (Weltklimarat) kritisieren, den menschengemachten Anteil am Klimawandel anzweifeln oder die Klimamaßnahmen als ungeeignet bzw. schädlich einschätzen.
- Wort und Wissen wird immer wieder gefragt, zu diesem Themenkomplex eine Stellungnahme herauszugeben. Typische Fragen sind:
 - Welche Klimafakten sind unumstößlich und wo fängt die subjektive Interpretation an?
 - Findet Klimawandel über natürliche Klimaschwankungen hinaus statt?
 - Inwieweit ist der Mensch für den aktuell wahrgenommenen Klimawandel verantwortlich?
 - Sind die IPCC-Berichte wissenschaftlich fundiert und objektiv?
 - Wie zuverlässig sind Klimavorhersagen?

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

2/3

- Zur Beantwortung dieser Fragen hat Wort und Wissen eine Klima-Arbeitsgruppe ins Leben gerufen.
- Diese Arbeitsgruppe, die **W+W KlimaAG**, hat sich der Herausforderung gestellt, auf diese Fragen möglichst neutrale, wissenschaftlich fundierte Antworten zu finden.
- Dies ist in der Tat eine große Herausforderung, da das Thema wissenschaftlich hochkomplex und dazu politisch und emotional sehr geladen ist.
- Das Klima wird von vielen Faktoren beeinflusst, die nichtlinear miteinander interagieren. Dies heißt nicht, dass das Klima nicht verstanden werden kann, aber es hat zur Folge, dass vereinfachte Betrachtungen schnell in die Irre führen können.
- Fast jeder hat zu dem Thema Klimawandel eine Meinung, aber zu oft beruht diese nicht auf wissenschaftlich fundierte Informationen, sondern auf persönliche Überzeugungen, die durch Darstellungen in den Medien gespeist werden.
- Im Internet kann man ungefiltert die unterschiedlichsten Meinungen zum Thema Klimawandel mit Überzeugung dargestellt finden von „Die Welt geht morgen unter“ bis „Es gibt keinen Klimawandel“.
- Ziel und Hoffnung der **W+W KlimaAG** ist es, hier eine solide Orientierungshilfe zu sein.

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

3/3

- Die **W+W KlimaAG** hat ihre Ergebnisse in mehreren Präsentationen zusammengefasst und stellt diese online zu Verfügung, siehe die Übersicht auf der nächsten Seite.
- Diese Ergebnisse sollen helfen, die eigentlichen Fakten zu erkennen, Falschaussagen zu entlarven und eine möglichst objektive Sicht auf das Thema Klimawandel zu bekommen.
- Allgemeine Begriffserklärungen und Verweise:
 - **Wetter und Klima**
Wetter beschreibt den *momentanen Zustand der Atmosphäre* (z.B. Temperatur, Druck, Dichte, Wind).
Klima ist per Definition der *30-Jahre Durchschnitt* des atmosphärischen Zustandes.
 - **Globales Klima**
Es gibt verschiedene Klimazonen, *das über die Erde gemittelte Klima* wird als **globales Klima** bezeichnet.
 - **Klimaerwärmung**
Genau genommen kann sich das Klima nicht erwärmen, sondern: *Die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche nimmt zu und infolgedessen die thermische Energie der Erdatmosphäre.*
In diesem Sinne wird der inzwischen gängige Begriff **Klimaerwärmung** in den Ergebnispräsentationen der **W+W KlimaAG** verwendet.
 - **IPCC AR6** Verweise beziehen sich auf den 6. Sachstandbericht der Arbeitsgruppe 1 des Weltklimarats:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Motivation / Gesamtfazit

Klimawandel findet statt – kein Grund zur Panik

- Das Klima wandelt sich im Laufe der Zeit aufgrund bekannter natürlicher Einflussfaktoren
- Die Vergangenheit zeigt: Die Erde verkraftet erhebliche Klimaschwankungen
- Globaler Temperaturanstieg hat Vor- und Nachteile, Weltuntergangsstimmung ist nicht angebracht
- Der aktuell beobachtete schnelle Klimawandel ist maßgeblich vom Menschen mit verursacht
- Weitere Forschung ist notwendig, z.B. um Wolkenbildung und CO₂-Senken besser zu verstehen
- Es ist sehr fragwürdig, ob der Mensch das Klima kontrollieren und bestimmen kann
- CO₂-Reduktion um jeden Preis ist weder technisch noch wirtschaftlich umsetzbar
- Beidseitige starke Lobbys verzerren wissenschaftliche Ergebnisse und kapern die Klimadebatte
- Folglich ist es unrealistisch zu erwarten, dass Klimaziele politisch umgesetzt werden
- Viel sinnvoller ist es, Industrie und Wirtschaft nachhaltig an Klimaveränderungen anzugleichen
- Verantwortungsvolles Handeln ist angebracht, auch unabhängig vom Klimawandel
- Klimarettung oder Leugnung des Klimawandels wird für viele zur Ersatzreligion
- Christen haben den Auftrag, als Hoffnungsträger auf den einzig wahren Retter hinzuweisen

Ergebnisdokumentation der W+W KlimaAG

Online verfügbar unter www.wort-und-wissen.org/artikel/klimawandel

W+W KlimaAG - Übersichtspräsentation.pdf

W+W KlimaAG - Bekannte Klimafakten.pdf

W+W KlimaAG - Ursachen Klimawandel.pdf

W+W KlimaAG - Unsere Verantwortung.pdf

W+W KlimaAG - Klimamodellierung.pdf

W+W KlimaAG - Temperaturrekonstruktion.pdf

W+W KlimaAG - IPCC, der Weltklimarat.pdf

Inhaltsaufgabe

- Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren
- Astronomische Einflussfaktoren
- Atmosphärische Einflussfaktoren
- Sonstige Einflussfaktoren
- Zusammenfassung

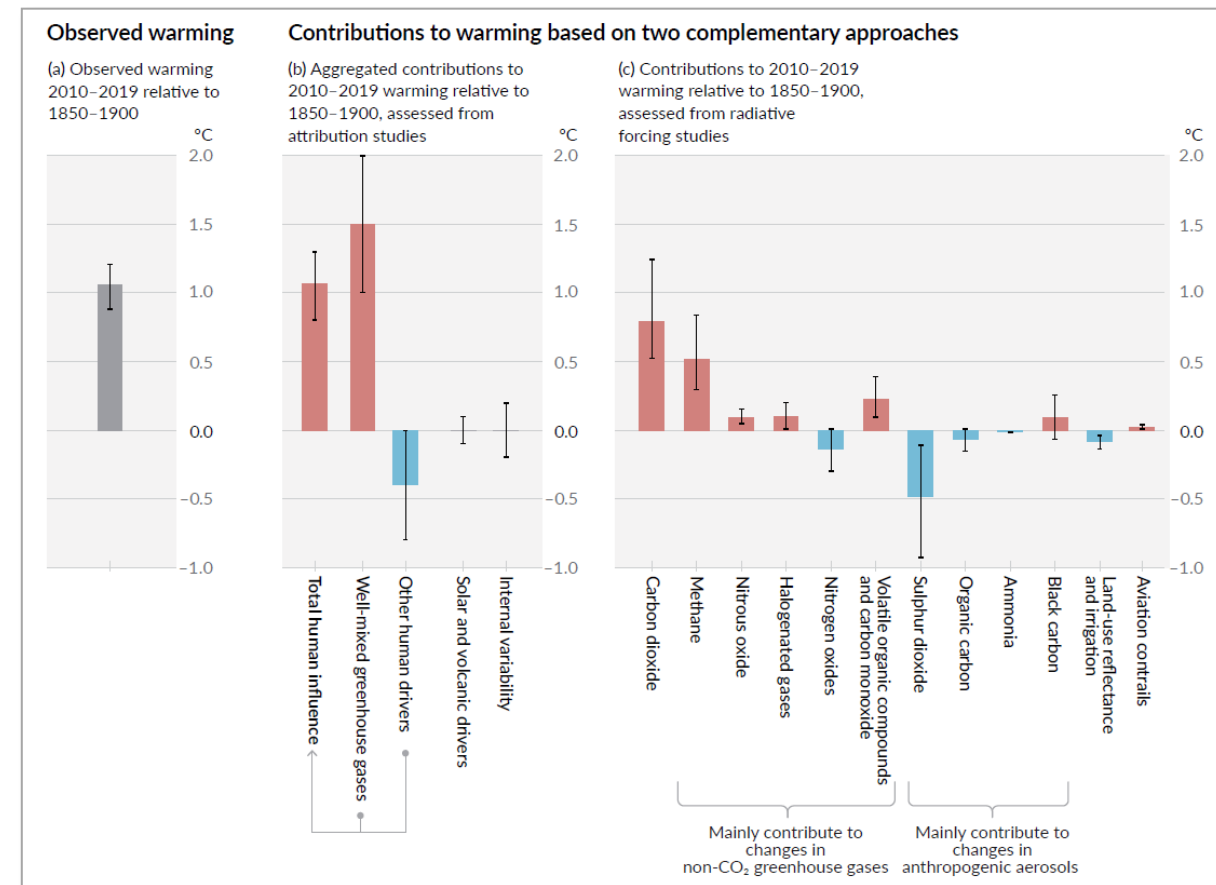
Inhaltsaufgabe

- **Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren**
 - Astronomische Einflussfaktoren
 - Atmosphärische Einflussfaktoren
 - Sonstige Einflussfaktoren
 - Zusammenfassung

Woher ändert sich das Klima

Zusammenfassung Ergebnis Weltklimarat

- Der 6. Sachstandsbericht des IPCC (Assessment Report 6 = AR6) kommt zu dem Schluss, dass die globale Erwärmung der Atmosphäre seit 1850 vom Menschen verursacht wird.
- Der Einfluss von Sonne, Vulkanen und Variabilitätsmoden ist im Durchschnitt vernachlässigbar.
- Die menschengemachte Zunahme von CO₂ und CH₄ führt zu einer Erwärmung von 1,5 °C im Referenzzeitraum 2010-2019 verglichen zum Referenzzeitraum 1850-1900.
- Die menschengemachte Zunahme von Aerosolen führt im gleichen Referenzzeitraum zu einer Abkühlung von 0,4 °C.
- Das Nettoergebnis ist ein Temperaturanstieg von 1,1 °C.
- In dieser Präsentation werden die einzelnen Einflussfaktoren näher betrachtet und erklärt.



Woher ändert sich das Klima

Definition Strahlungsantrieb

- Die Wirkung von Einflussfaktoren auf das Klima wird als „Effektiver Strahlungsantrieb“ bezeichnet.
- Abgekürzt wird der Strahlungsantrieb als ERF (Effective Radiative Forcing), Einheit: W/m^2 .
- ERF enthält sowohl positive als auch negative Beiträge zur Änderung des Netto-Energieflusses der Atmosphäre.
- Gemessen wird die Wirkung von Einflussfaktoren in Bezug auf den Referenzzeitraum 1850-1900.

Strahlungsantrieb

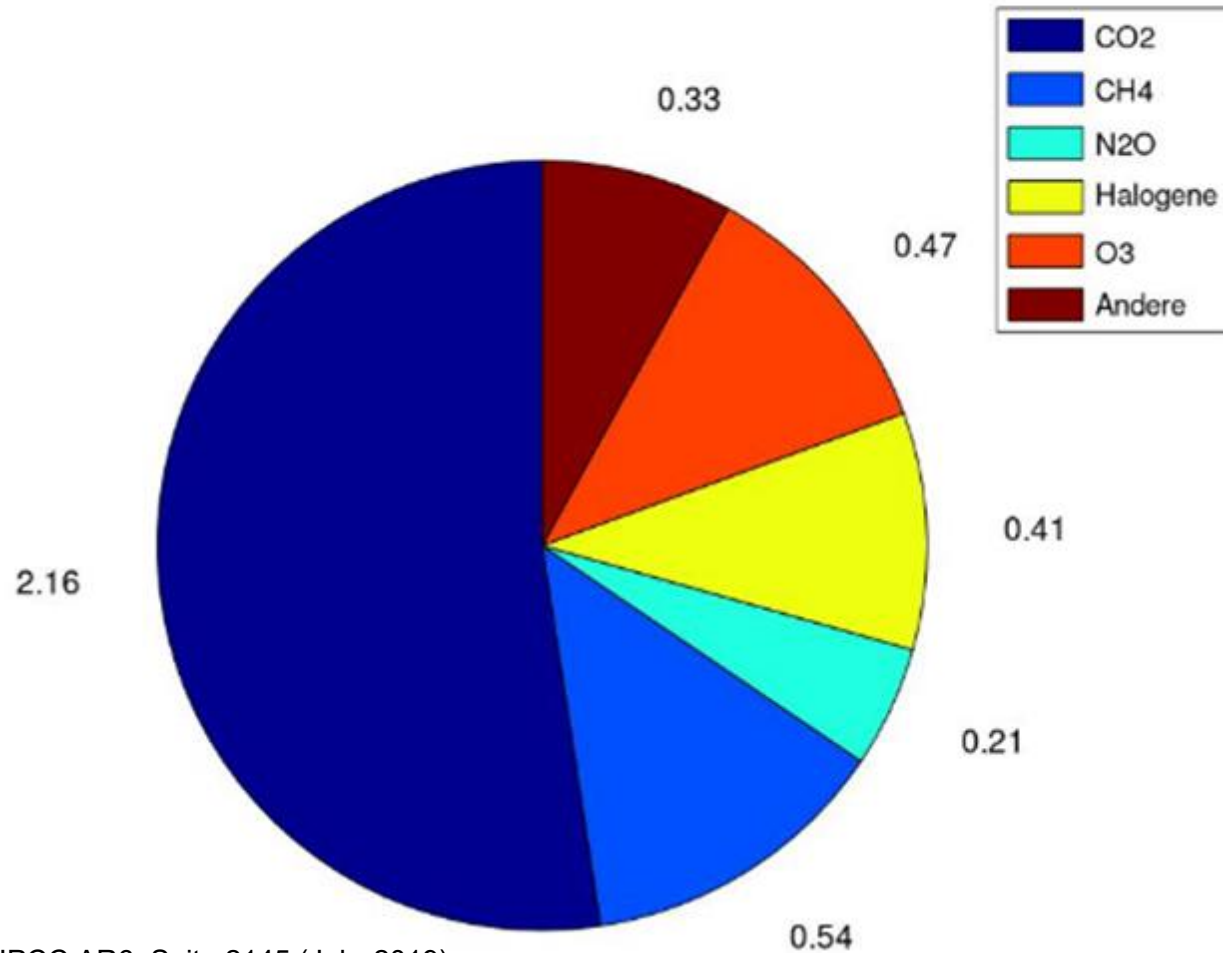
Der **Strahlungsantrieb** (engl. **radiative forcing**) ist ein Maß für die Änderung der **Energiebilanz der Erde** durch Änderung der Wirkung der **Strahlung aus dem Weltraum** und wird in W/m^2 gemessen. Der Begriff *radiative forcing* bzw. *climate forcing* wurde vom **IPCC** eingeführt,^[1] um im Rahmen der Klimastudien den Einfluss externer Faktoren auf die **Strahlungsbilanz** bzw. das **Klimasystem** der Erde zu beschreiben. Solche Faktoren können bspw. die veränderte Konzentration von **Treibhausgasen** und **Aerosolen**, veränderte eingehende (absorbierte) **solare Strahlung** in W/m^2 oder eine veränderte **Albedo** sein.

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

Woher ändert sich das Klima

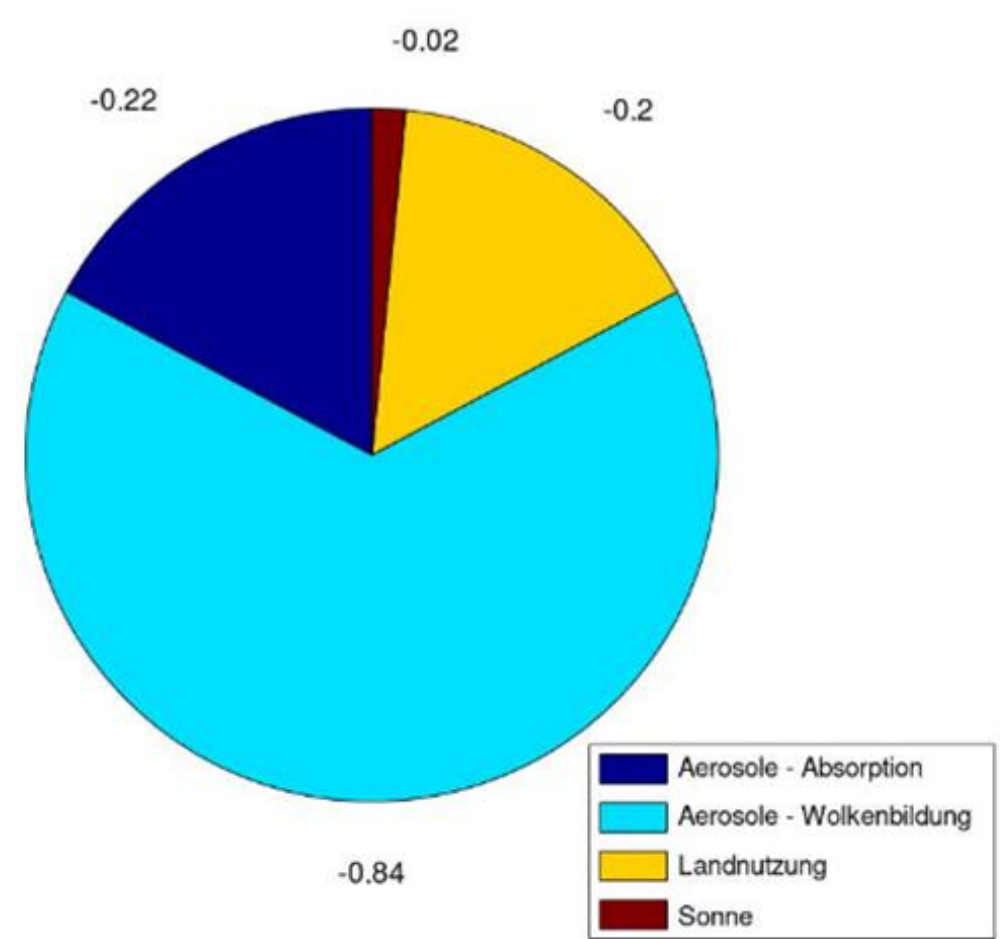
Gemessene Änderungen des Strahlungsantriebs

Positiver Strahlungsantrieb [W/m^2]
(= Erwärmung)



IPCC AR6, Seite 2145 (Jahr 2019)

Negativer Strahlungsantrieb [W/m^2]
(= Abkühlung)



IPCC AR6, Seite 2145 (Jahr 2019)

Einflussfaktoren Übersicht

Im Folgenden werden die bekannten Klimaeinflussfaktoren besprochen:

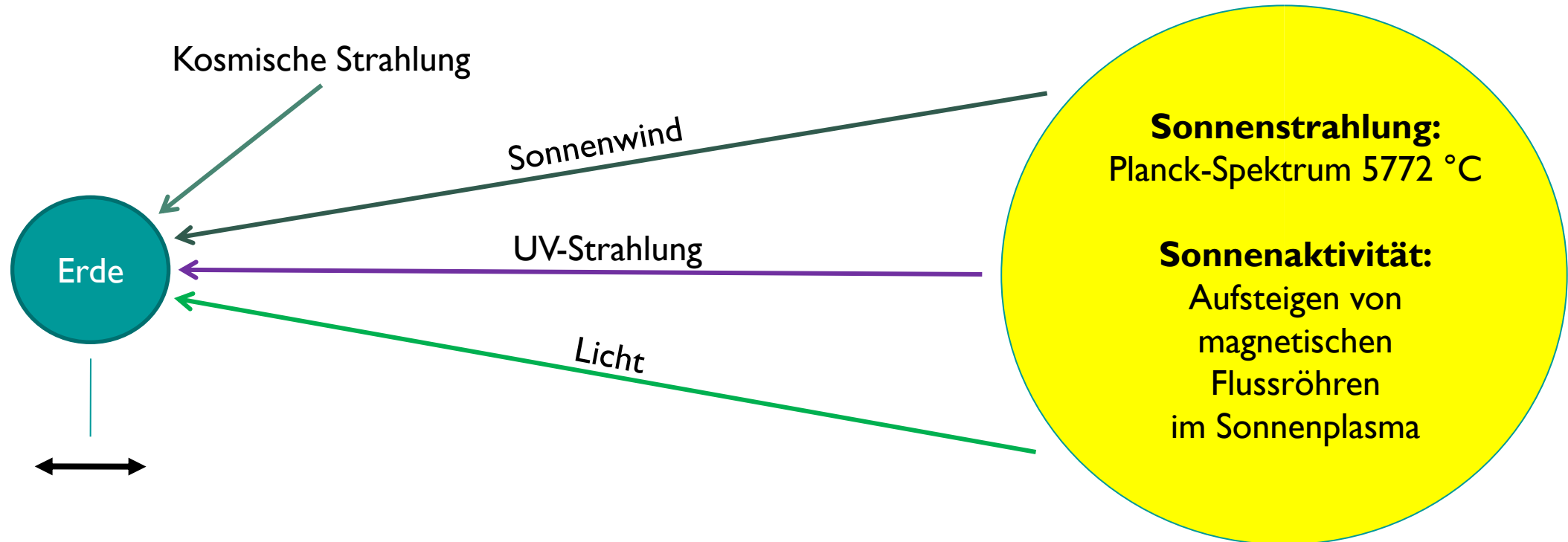
- **Astronomische Einflussfaktoren**
 - Änderungen der Bahnparameter der Erde (Milankovic-Zyklen)
 - Variation der Sonnenstrahlung
 - Kosmische Strahlung
- **Atmosphärische Einflussfaktoren**
 - Treibhausgase
 - Aerosole
 - Wolkenbildung
- **Sonstige Einflussfaktoren**
 - Landnutzung
 - Vulkanismus
 - Intrinsische Variabilität / Moden

Inhaltsaufgabe

- Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren
- **Astronomische Einflussfaktoren**
- Atmosphärische Einflussfaktoren
- Sonstige Einflussfaktoren
- Zusammenfassung

Astronomische Einflussfaktoren

Schwankungen der Sonneneinstrahlung



Schwankungen Erdbahn und -neigung

Schwankungen in Jahrtausenden (Tjr), im Detail:

$\tau \sim 41$ Tjr Neigung der Erdachse 22° bis 24°

$\tau \sim 26$ Tjr Präzession Erdachse

$\tau \sim 112$ Tjr Perihel-Drehung

$\tau \sim 406$ Tjr Exzentrizität 0.0 bis 0.07

Dies sind die sogenannten Milankovic-Zyklen

**Zu langsam
für den aktuellen
Klimawandel**

Sonnenaktivitätsschwankungen

$\tau \sim 11$ Jahre: Schwabezyklus

$\tau \sim 22$ Jahre: Halezyklus

$\tau \sim 85$ Jahre: Gleissbergzyklus

$\tau \sim 200$ Jahre: Suess/de Vries-Z.

$\tau \sim 1470$ Jahre

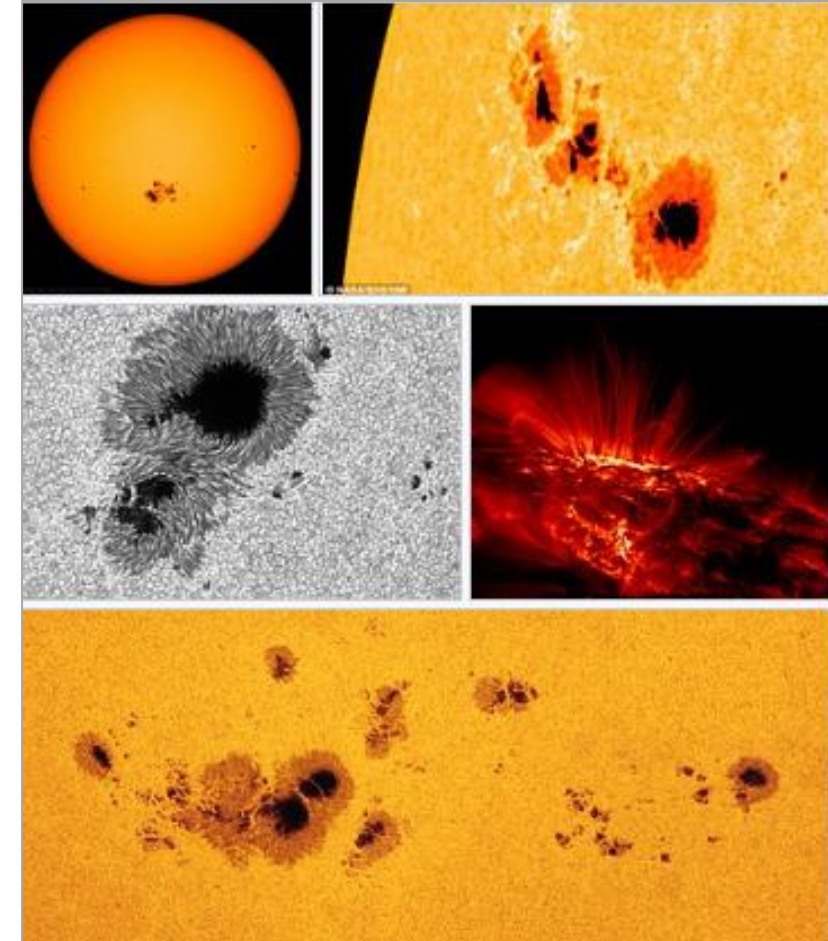
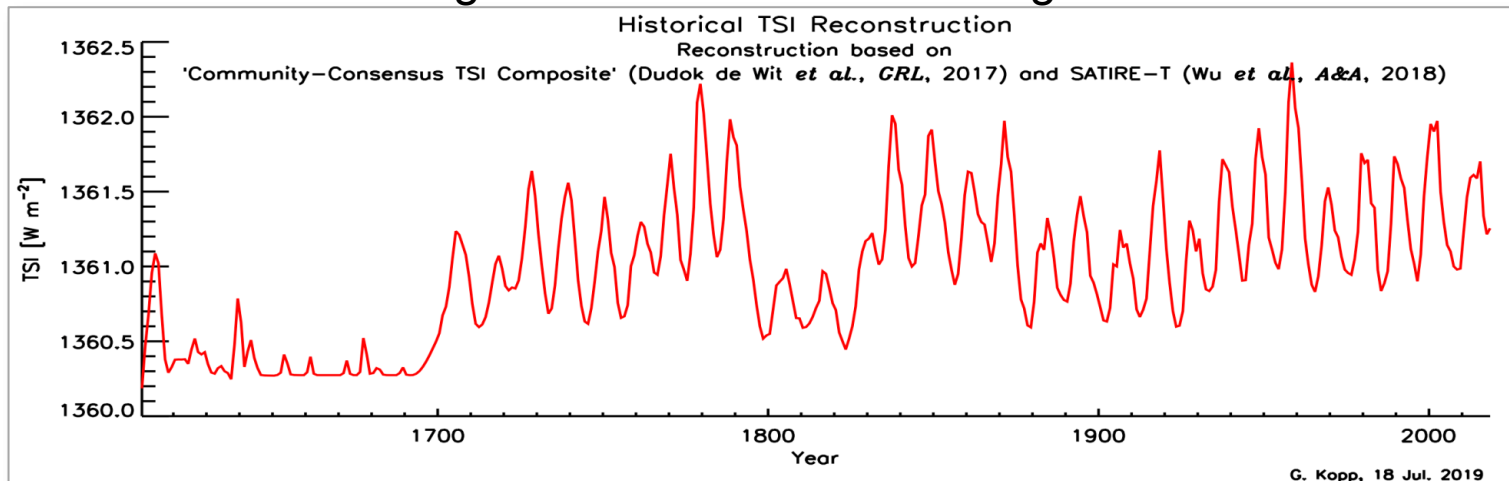
$\tau \sim 2400$ Jahre: Hallstatt/Bray-Z.

Astronomische Einflussfaktoren

Sonnenaktivität

- Der 11-Jahres-Zyklus (Schwabe-Zyklus) ist dominierend.
- Er wird durch die differentielle Rotation der Sonne verursacht.
- Seit 1600: Indikator Sonnenfleckenzahlen
Seit 1978: Satellitenmessungen
- Die Schwankungen sind zu gering und zu regelmäßig,
um den aktuell wahrgenommenen Klimawandel zu erklären.

Schwankungen der Sonneneinstrahlung seit ca. 1600



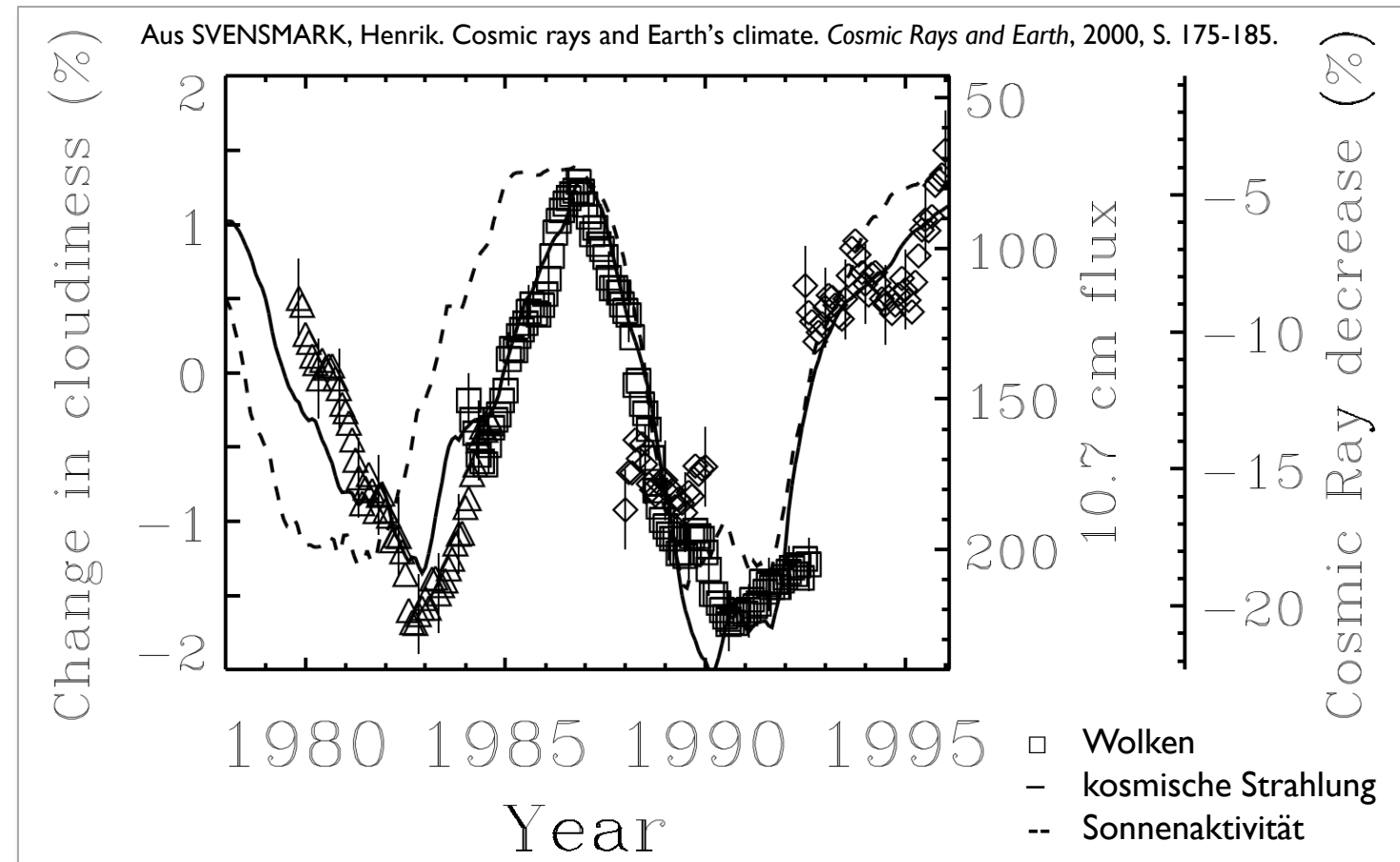
<https://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>

Astronomische Einflussfaktoren

Sonnenzyklen und Kosmische Strahlung

- SVENSMARK et al. (2000) stellten die Hypothese auf, dass durch die Rückkoppelung zwischen Sonne und kosmische Strahlung, die Sonnenaktivität signifikant auf das Klima wirkt.
- Bei höherer Sonnenaktivität soll dabei weniger kosmische Strahlung in die Erdatmosphäre gelangen und dadurch weniger Ionisation und weniger Wolkenbildung stattfinden.
- Die Korrelation ging aber nach 2000 verloren*.
- Außerdem können diese Effekte den aktuellen Klimawandel nicht erklären, weil in den letzten 150 Jahren die kosmische Strahlung konstant war und auch die Sonnenaktivität im Durchschnitt nicht zugenommen hat*.

* Kristjánsson, J.E. et al. (2008) Cosmic rays, cloud condensation nuclei and clouds – a reassessment using MODIS data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(24), 7373–7387, doi:10.5194/acp-8-7373-2008

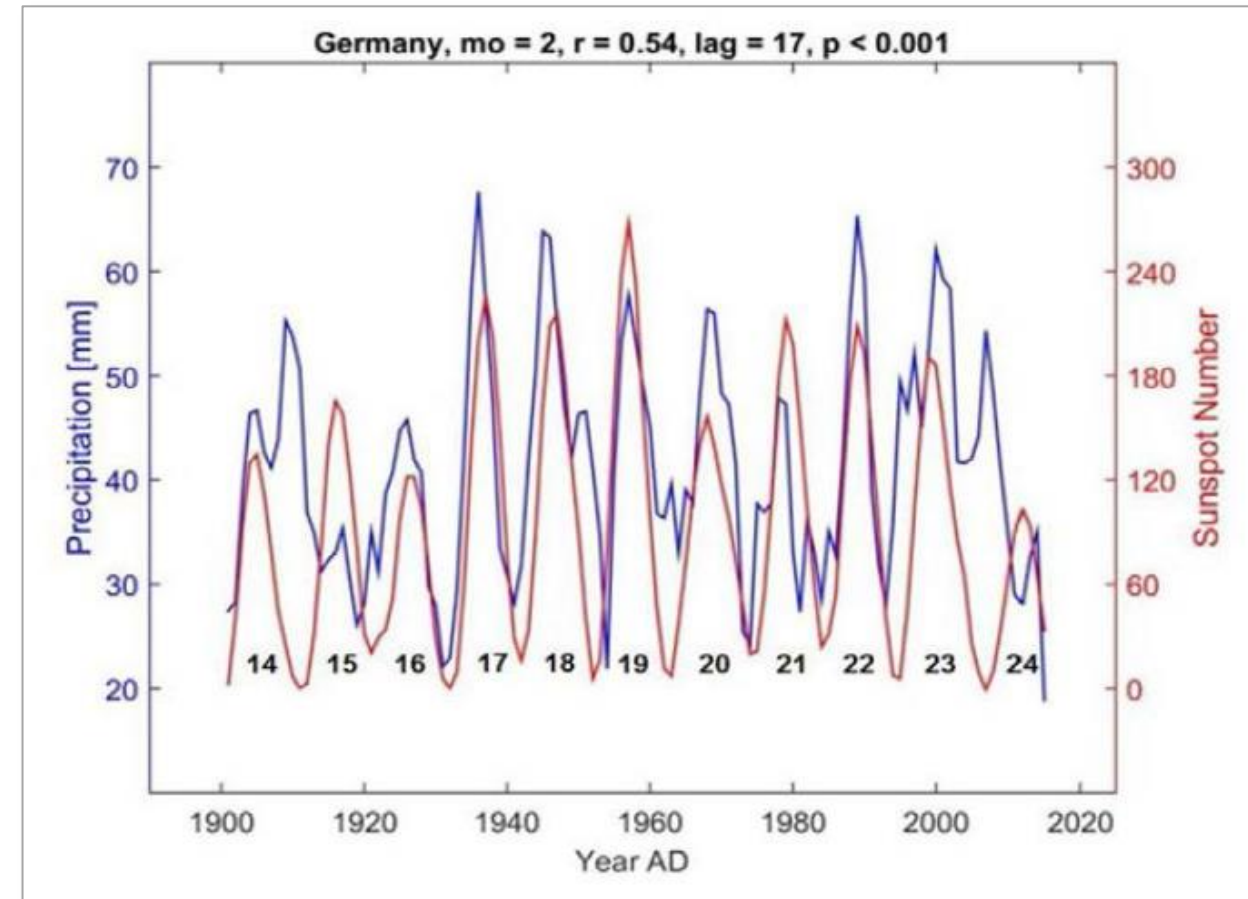


Astronomische Einflussfaktoren

Sonnenzyklen und Niederschlag in Europa 1/2

- Paper von LAURENZ et al. (2019)*
- Befund: Korrelation zwischen den 11-Jahres-Sonnenzyklen und bestimmten Monatsniederschlägen
- Beispiel: Februar, Deutschland
 - Korrelationskoeffizient $r = 0.54$
 - Versatz +17 Monate
 - Wahrscheinlichkeit für Zufall laut Autoren $< 0.1\%$
- Der Wirkungspfad ist unklar, d.h. es gibt keine plausible Erklärung für die gefundene Korrelation.

* LAURENS L, LÜDECKE HJ, LUENING S (2019) Influence of solar activity changes on European rainfall, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, February 2019



Astronomische Einflussfaktoren

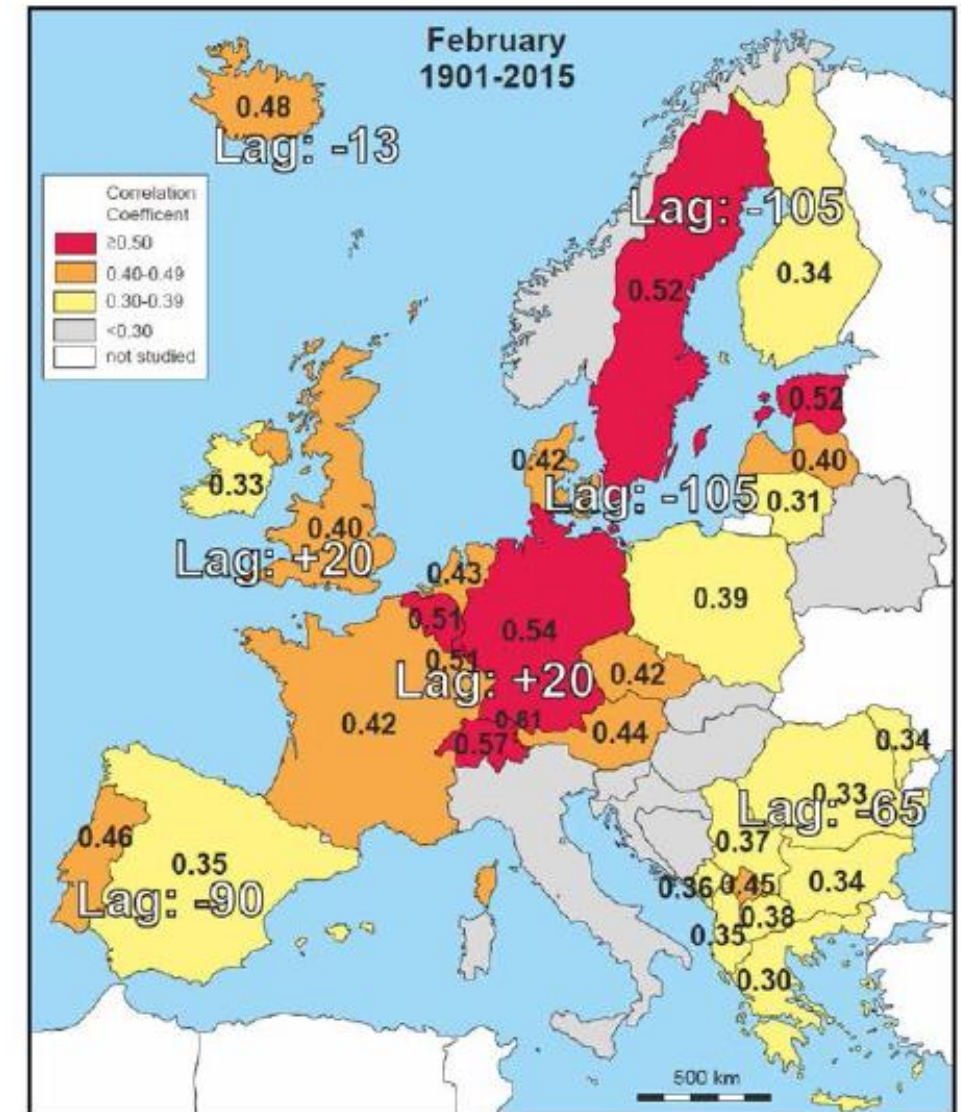
Sonnenzyklen und Niederschlag in Europa 2/2

Korrelationskoeffizienten und Zeitversätzen für verschiedene europäischen Länder:

- Zeitversätze variieren von Land zu Land
- Zwischendrin Länder ohne Korrelation
- Korrelation von 0.5 nicht besonders hoch
- Kein klarer Wirkungspfad
- Fazit: Befund ist nicht stichhaltig

Korrelation $\neq$ kausale Ursache

* LAURENS L, LÜDECKE HJ, LUENING S (2019) Influence of solar activity changes on European rainfall, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, February 2019



Inhaltsaufgabe

- Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren
- Astronomische Einflussfaktoren
- **Atmosphärische Einflussfaktoren**
- Sonstige Einflussfaktoren
- Zusammenfassung

Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 1/7

Wärmestrahlung der Oberflächen

- Die Sonnenstrahlung wird von den Ozeanen, von der Landoberfläche und teilweise auch von der Atmosphäre absorbiert.
- Alle Oberflächen strahlen gemäß ihrer Temperatur und ihrem Emissionsvermögen Wärmestrahlung ab.
- Die Erde hat eine Albedo* von 30%.
- Die Erdoberfläche, d.h. über die ganze Erde gemittelt, wäre ohne Atmosphäre bei -18°C statt bei $+14^{\circ}\text{C}$ im Strahlungsgleichgewicht mit der Sonnenstrahlung.

*Albedo ist der Anteil der einfallenden Strahlung der unverändert direkt wieder in das Weltall abgestrahlt wird

Atmosphärische Einflussfaktoren

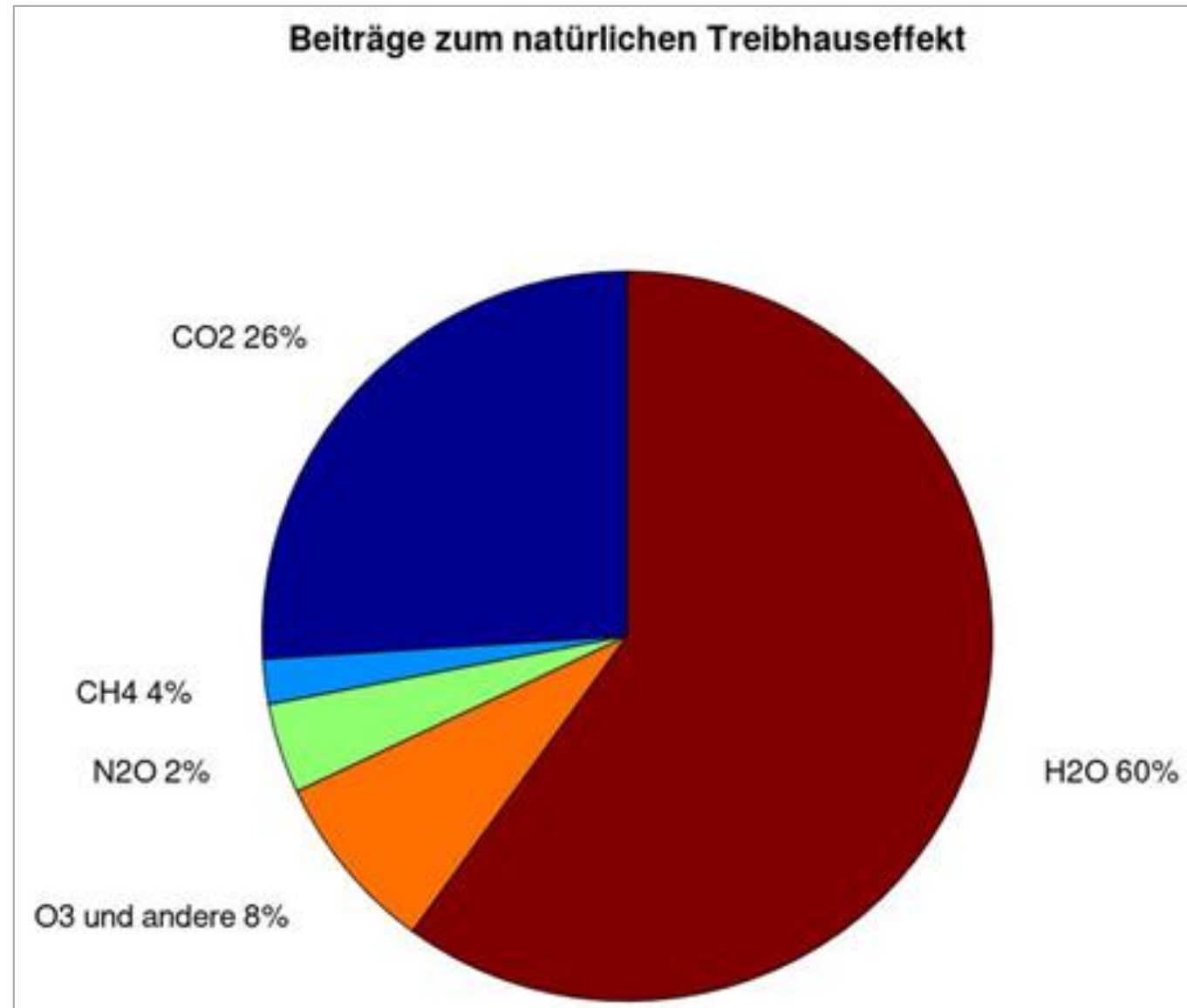
Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 2/7

Einfluss der Atmosphäre

- Stickstoff und Sauerstoff sind transparent im Wellenlängenbereich der irdischen Wärmestrahlung.
- Nur Gase, deren Moleküle ein Dipolmoment haben, absorbieren/emittieren dort.
- Es handelt sich um Strahlungsübergänge zwischen gekoppelten Vibrations- und Schwingungsmoden von Gasmolekülen der Atmosphäre mit einem Dipolmoment.
- Die wichtigsten Treibhausgase sind
 - Wasserdampf H_2O
 - Kohlenstoffdioxid CO_2
 - Methan CH_4
 - Lachgas N_2O
 - Ozon O_3

Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 3/7



Werte entnommen aus:
Lehrbuch Klimatologie
C.D. Schönwiese
4. Auflage, 2013
ISBN 978-3-8252-3900-8

Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 4/7

Spektrum der Grundschiwingung des CO₂-Moleküls

- Durch Kopplung mit Rotation entsteht ein Spektrum mit vielen Peaks.
- Die Linienbreite hängt von Druck und Temperatur ab.
- Unterhalb 20 km Höhe in der Atmosphäre überwiegt Druck (Lorentz-Profil), oberhalb 50 km Temperatur (Gauß-Profil).

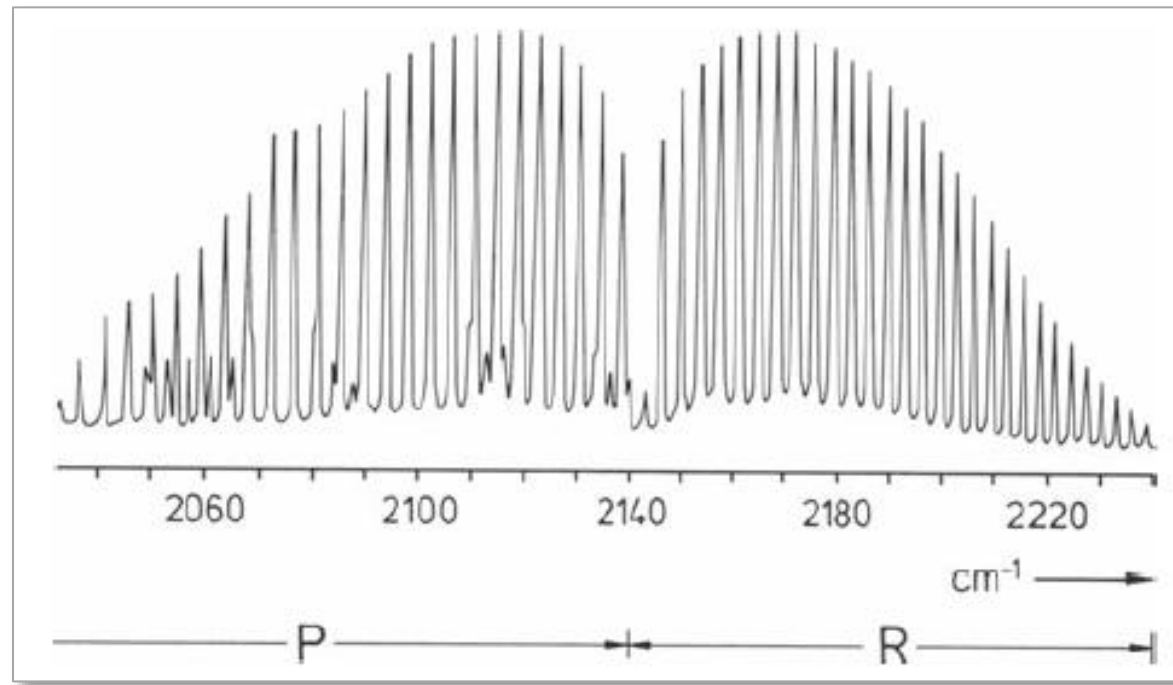


Abb. 10.2 aus Haken/Wolf, Molekülphysik und Quantenchemie, S. 179

Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 5/7

Sättigung, Verbreiterung der Linien

- Behauptung von Kritikern:
Absorption der terrestrischen Wärmestrahlung durch H_2O oder CO_2 fast gesättigt (z.B. 97%).
- Dies trifft für bodennahe Verhältnisse zu.
- Das ist aber nicht der relevante Punkt, denn:
 - Die Höhe, ab der die Atmosphäre nicht mehr optisch dicht* ist, bestimmt die Abstrahlung.
 - Je mehr Treibhausgas, je höher der Grenzbereich, desto kälter, desto weniger Abstrahlung.
- Die Schwingungsspektren der Treibhausgase bestehen aus vielen einzelnen Spektrallinien. Zwischen diesen Linien wird die Wärmestrahlung deutlich weniger absorbiert.
- Durch Druck- und Temperatureinfluss werden die Linien verbreitert. Das führt dazu, dass sie für hohe Drücke und Temperaturen überlappen, was bodennah der Fall ist.
- Beim Treibhauseffekt muss man aber betrachten, welche Strahlung an der Obergrenze der Atmosphäre ankommt. Und dafür spielt eine große Rolle, aus welcher Höhe die Strahlung kommt.
- Näheres dazu auf der nächsten Seite.

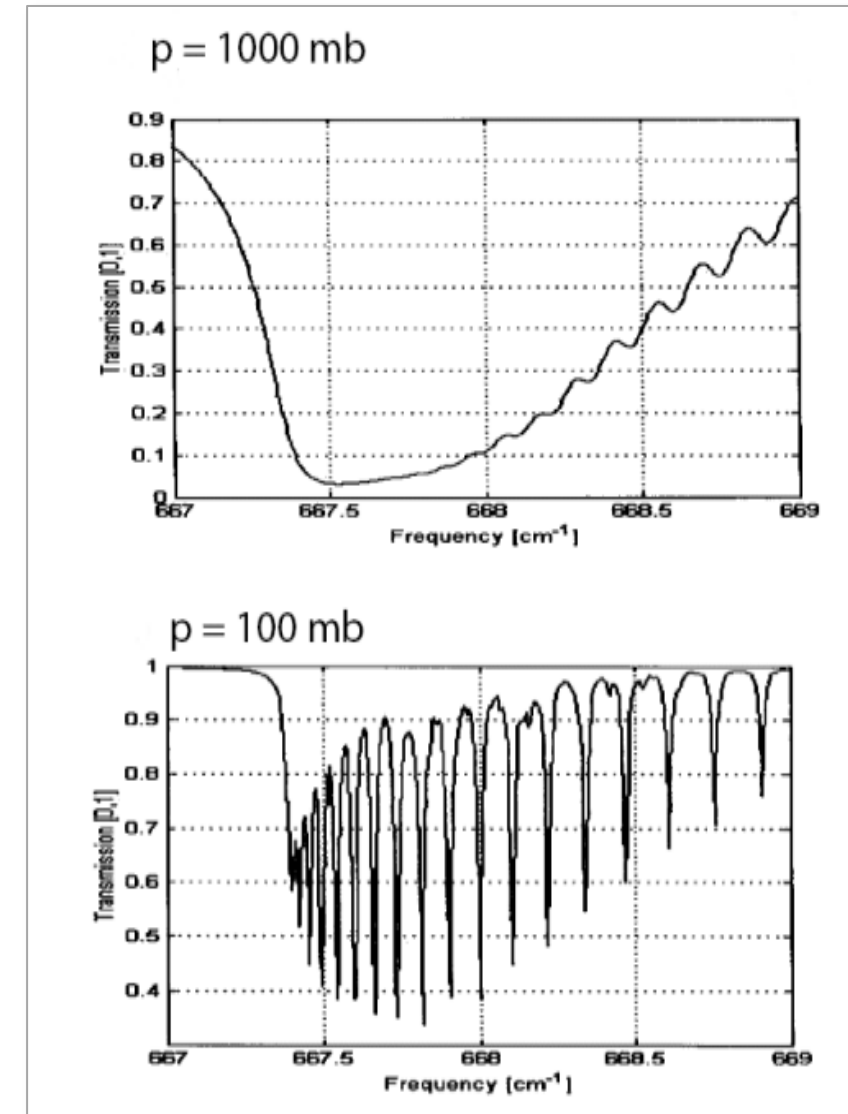
*Optisch dicht bedeutet, dass die Strahlung vollständig zerstreut wird. Ein dichter Nebel ist optisch dicht, ein leichter Nebel teilweise.

Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 6/7

Sättigung, Verbreiterung der Linien

- Die Grafik rechts zeigt den Vergleich der Transmission eines Ausschnitts aus einer CO_2 -Bande von 1 m Luft bei 1000 mbar und 100 mbar und einer jeweils typischen CO_2 -Konzentration.
- Klar ersichtlich ist, dass die Linien bei 1000 mbar so stark verbreitert sind, dass sie fast ein Kontinuum bilden. Dies entspricht dem Luftdruck in Bodennähe. Hier ist das Spektrum fast gesättigt.
- Bei 100 mbar hingegen sind die Linien sehr scharf und lassen die Wärmestrahlung größtenteils durch. Dies entspricht dem Luftdruck in der höheren Atmosphäre, von wo die Wärme ins Weltall abstrahlt. Hier ist also keine Sättigung vorhanden.



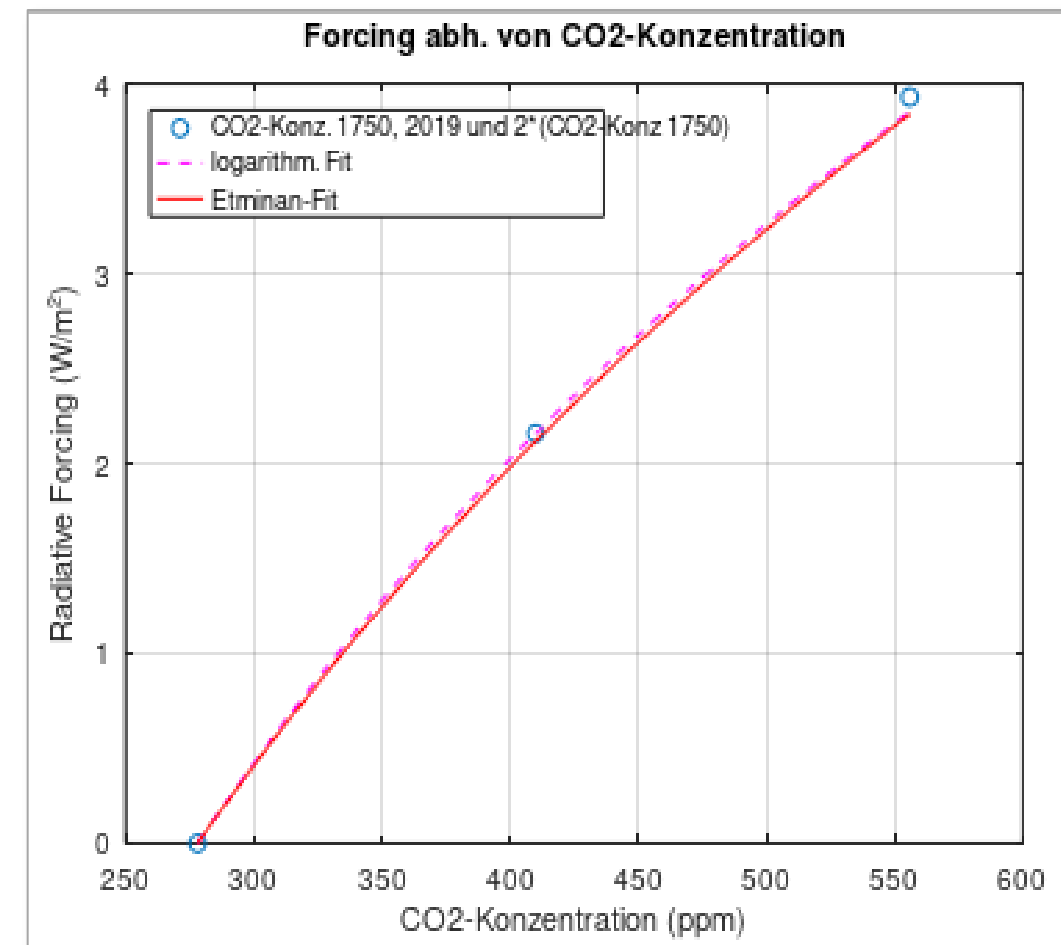
Atmosphärische Einflussfaktoren

Physikalische Grundlagen Treibhauseffekt 7/7

Berücksichtigung in Modellen

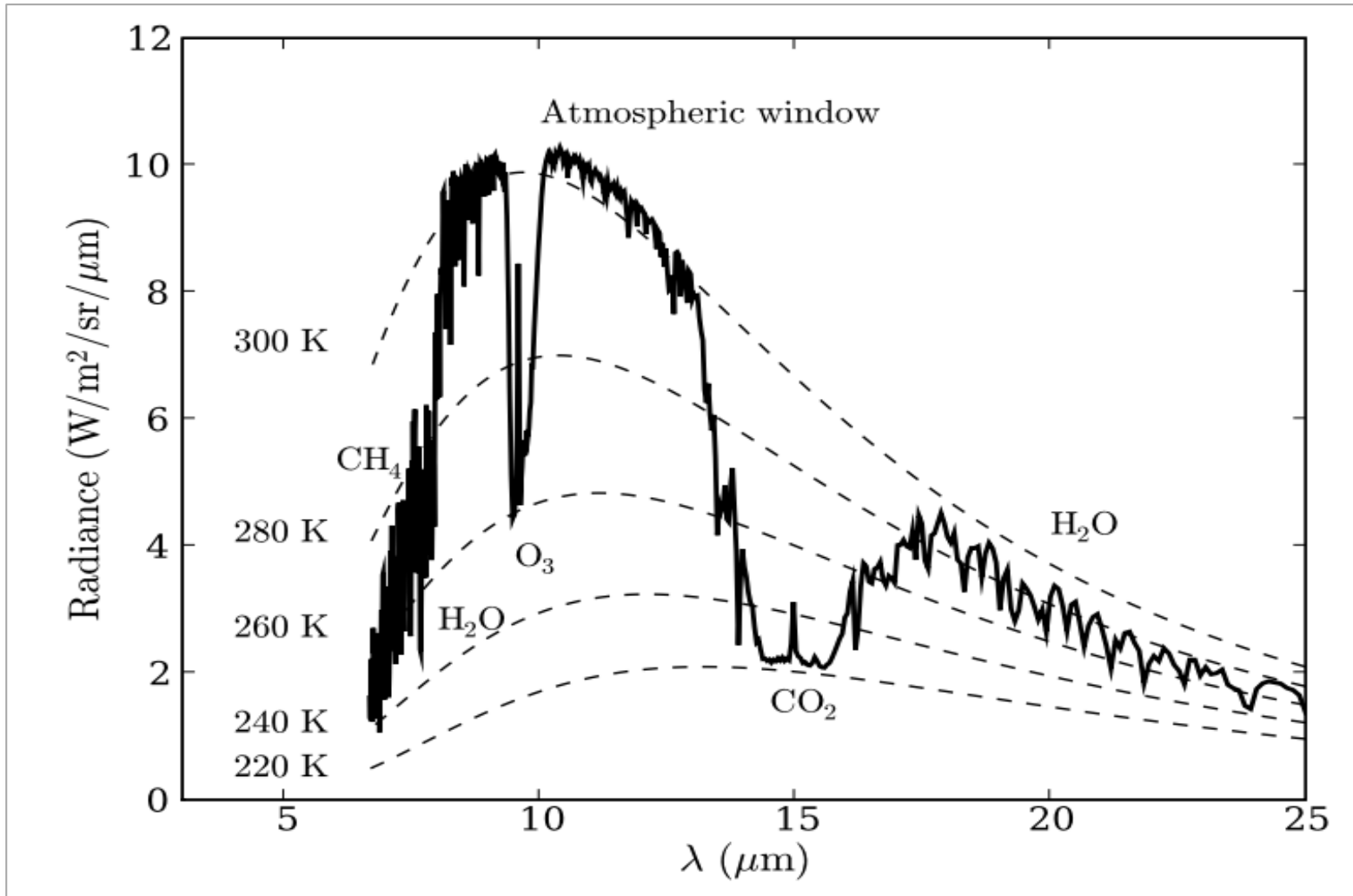
- Die auf den vorherigen Seiten beschriebene Teilsättigung von CO_2 und anderen Treibhausgasen wird in den Modellrechnungen des IPCC berücksichtigt.
- Dies führt dazu, dass der Strahlungsantrieb nicht linear mit der Konzentration eines Treibhausgases anwächst, sondern logarithmisch.
- Grafik (eigene Darstellung):
Darstellung des Strahlungsantriebs von CO_2 mit Werten aus dem IPCC AR6-Report, S. 1642, einer einfachen logarithmischen Fitkurve und einer Fitkurve von Etminan*

* ETMINAN M, MYHRE G, HIGHWOOD EJ, SHINE KP (2016)
Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide:
A significant revision of the methane radiative forcing,
Geophysical Research Letters, 43(24), 12-614.



Atmosphärische Einflussfaktoren

Strahlungsemission der Erde in 70 km Höhe



Spektrum der terrestrischen Infrarotstrahlung, gemessen von einem Sensor in 70 km Höhe über einer Oberfläche mit einer Temperatur von 305 K.

Gestrichelte Linien: Planck'sche Schwarzkörperemissionsspektren für verschiedene Temperaturen, berechnet mit dem numerischen Modell MODTRAN.

Die entsprechenden Treibhausgase sind in der Nähe ihrer Absorptionsspitzen angegeben.

Fig. 2.12 B. Sportisse, Fundamentals of Air Pollution

http://dsrs.atmos.umd.edu/DATA/pinker_home_meto400/radiative_transfer_9789048129690-c2.pdf

Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhausgas Wasserdampf H₂O

- Wasserdampf ist verantwortlich für 60% des gesamten Treibhauseffekts.
- Natürliche Quelle ist Verdunstung über den Meeren, der anthropogene Anteil ist vernachlässigbar.
- Es gibt aber einen wichtigen Rückkoppelungsfaktor von CO₂ auf Wasserdampf:
 - Da Wasser bei normalen Temperaturen flüssig ist, hängt die Menge der gasförmigen Komponente, also Wasserdampf, von der Temperatur ab.
 - Erhöht sich die Temperatur durch die anderen Treibhausgase, wird mehr Wasserdampf von der Atmosphäre aufgenommen (7% mehr pro °C Temperaturanstieg).
 - Dadurch erhöht sich die Treibhauswirkung durch Wasserdampf.
 - Auf dieser Weise wird der Treibhauseffekt der anderen Gase indirekt verstärkt, siehe z.B. <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-8-1.html>
- Das Ausmaß dieses Rückkopplungseffekts wird mit ca. 60% berechnet¹.
- Allerdings schätzen andere Autoren dieses Ausmaß als zu hoch ein².

¹ VAN WIJNGAARDEN W A, HAPPER W (2020) Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases, <https://arxiv.org/pdf/2006.03098>

² SIMPSON I R (2023) Observed humidity trends in dry regions contradict climate models, PNAS Vol. 121/1, 1-12, <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2302480120>

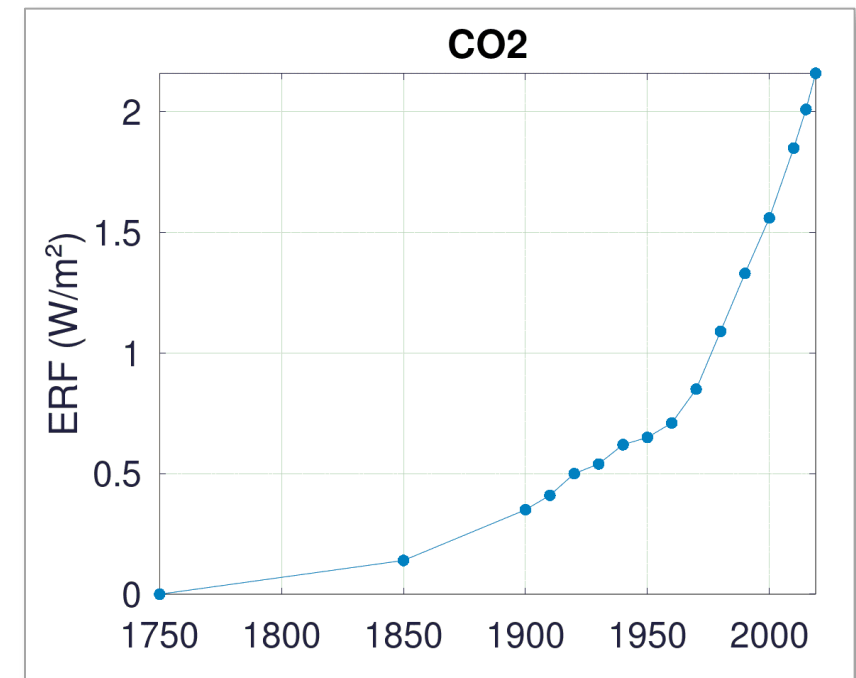
Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 1/9

Übersicht CO₂ als Treibhausgas

- Der vorindustrielle Anteil an CO₂ in der Atmosphäre betrug 280 ppm*.
- Im Jahr 2024 betrug der Anteil 427 ppm.
- Zunahme seit 1750 kommt zu 2/3 aus fossilen Brennstoffen, 1/3 aus Landnutzung.
- Anstieg Nutzung von fossilen Brennstoffen in den letzten 10 Jahren um 81-91%.
- Es gibt mehrere Nachweise für den anthropogenen Anteil:
 - Differenz CO₂-Messwerte Hawaii-Südpol
 - Abnahme des ¹³C-Anteils (Lebewesen bevorzugen ¹²C)
 - Abnahme des ¹⁴C-Anteils (fossiles C enthält kein ¹⁴C)
 - Abnahme vom freien O₂ im Vergleich zu N₂
- Da CO₂ das bekannteste und für den Klimawandel das wichtigste Treibhausgas wird, wird auf den nächsten Seiten weiter darauf eingegangen und werden die Nachweise für den anthropogenen Anteil mit Referenzen erläutert.

*ppm = parts per million, 100 ppm entsprechen 0,01%



Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 2/9

- Dem CO₂ fallen derzeit 26% des Treibhauseffekts zu*.
- CO₂ ist ein farb- und geruchloses Gas, mit einer Konzentration von 0.04% in der Atmosphäre.
- Erst bei 10% Konzentration von CO₂ in der Luft tritt beim Menschen Bewusstlosigkeit ein, bei 25% der Tod, und dies wegen Verdrängung der Luft bzw. des Sauerstoffs.
- Die Luft, die wir ausatmen, enthält 4% CO₂, was sich über den Tag auf ca. 0.7 kg summiert.
- Pflanzen nutzen CO₂ für die Photosynthese.
- CO₂ ist *kein* Umweltgift; es wird nur wegen seiner starken Auswirkung auf den Treibhauseffekt von Klimaaktivisten als „Klimagift“ bezeichnet.
- Es befinden sich derzeit 3337 Mrd. Tonnen CO₂ in der Atmosphäre, davon 1148 Mrd. Tonnen anthropogenen Ursprungs.

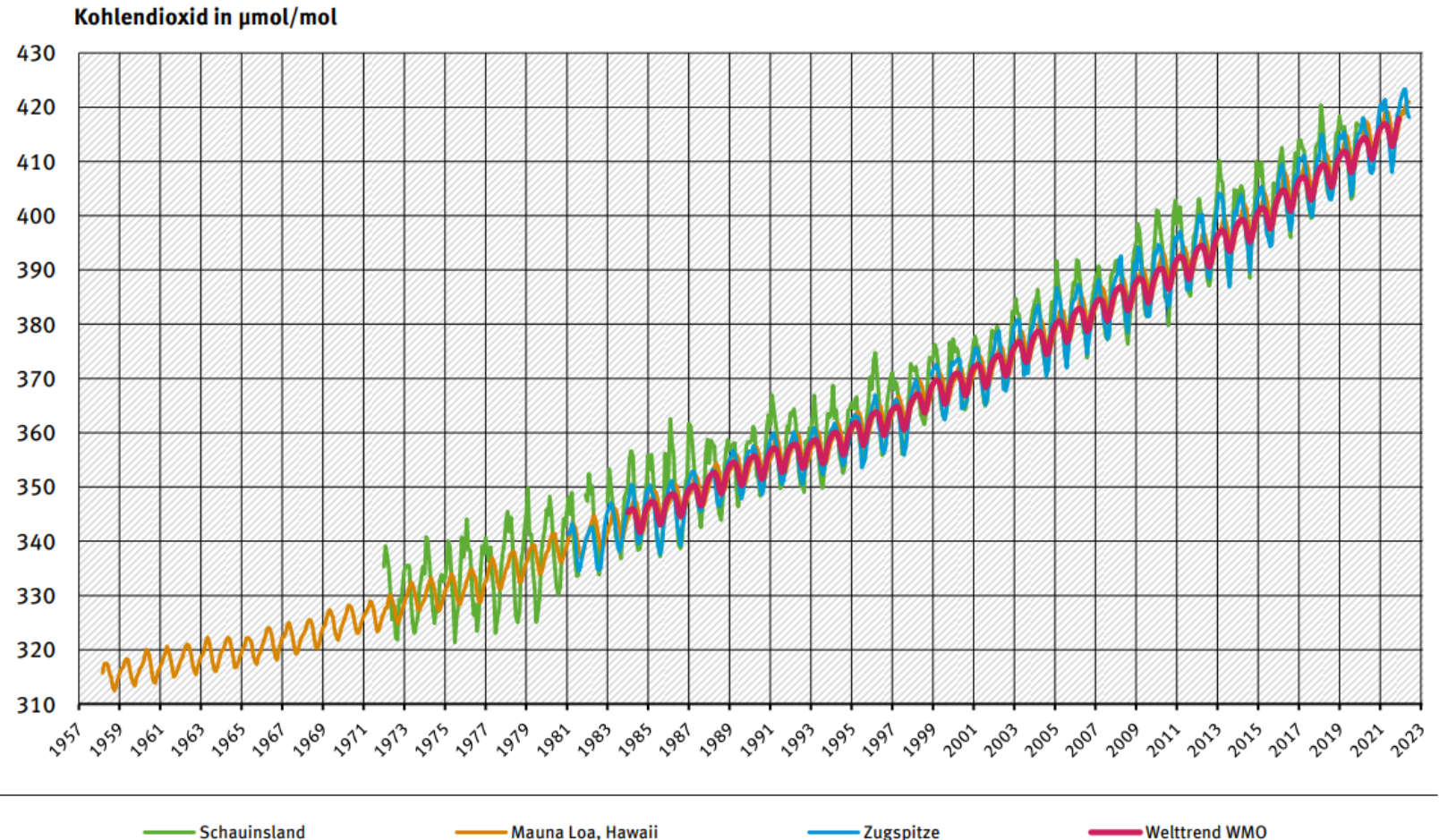
*SCHÖNWIESE C-D (2015) Klimatologie, 4. Auflage, S. 241. Seit kurzem verfügbar: 6. Auflage, ISBN 978-3825261115

Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 3/9

- Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre seit 1958.

Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittelwerte)

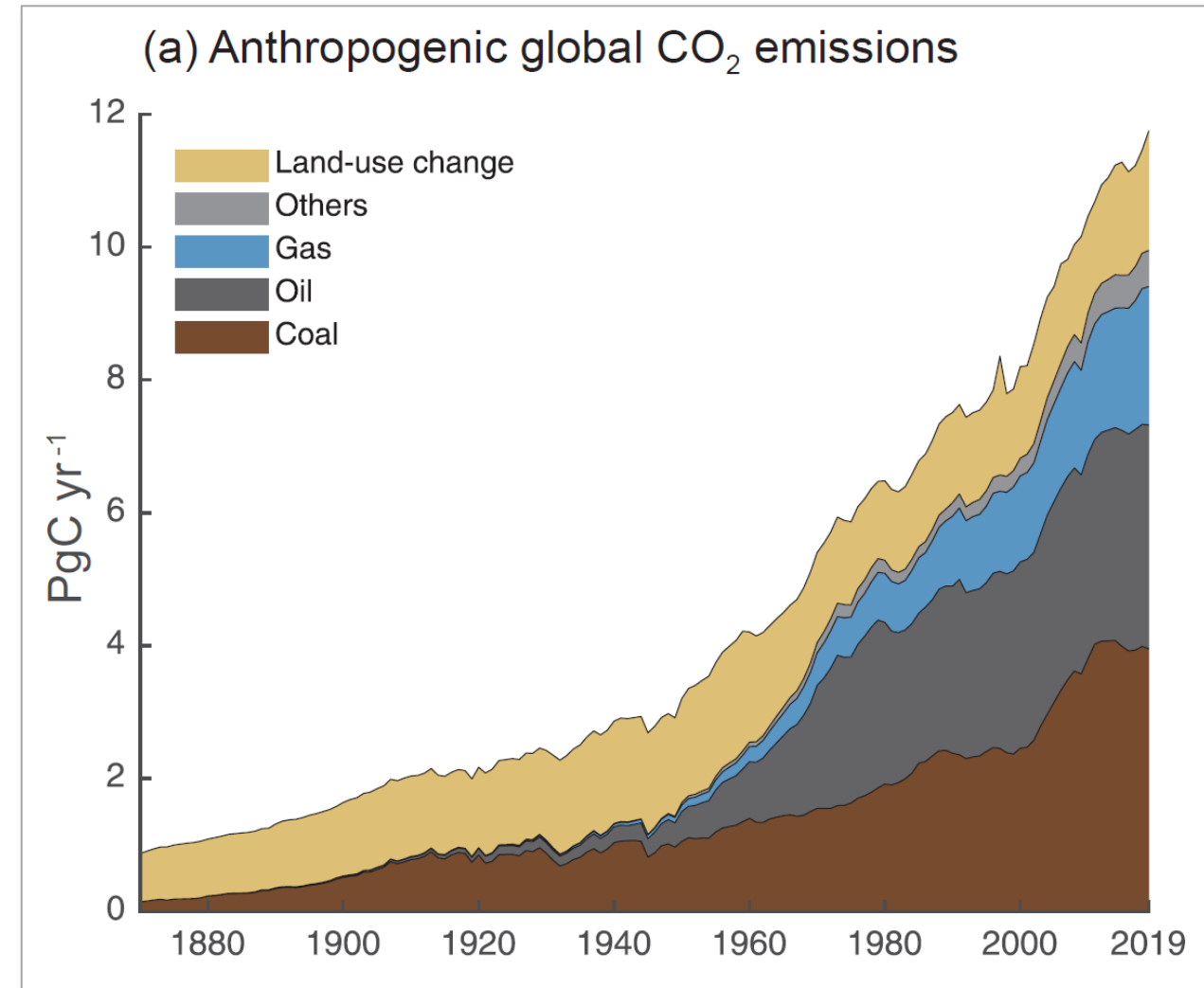


Quelle: Umweltbundesamt (Schauinsland, Zugspitze), NOAA Global Monitoring Division and Scripps Institution of Oceanography (Mauna Loa, Hawaii), World Meteorological Organization, WDCGG (World Trend)

Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 4/9

- Die anthropogen verursachte Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit 1750 stammt zu 2/3 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und zu 1/3 aus der Änderung der Landnutzung, v.a. der Vernichtung von Wäldern.
- In den letzten 10 Jahren sammelten sich 46% des anthropogenen CO₂ in der Atmosphäre an, während 23% vom Ozean und 31% von den Landpflanzen aufgenommen wurden*. Davon stammt 81-91% von der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Rest von Änderungen der Landnutzung (z.B. Entwaldung oder Trockenlegen von Feuchtgebieten)**.



* IPCC Assessment Report 6, Kapitel Carbon Budget, Seite 676.

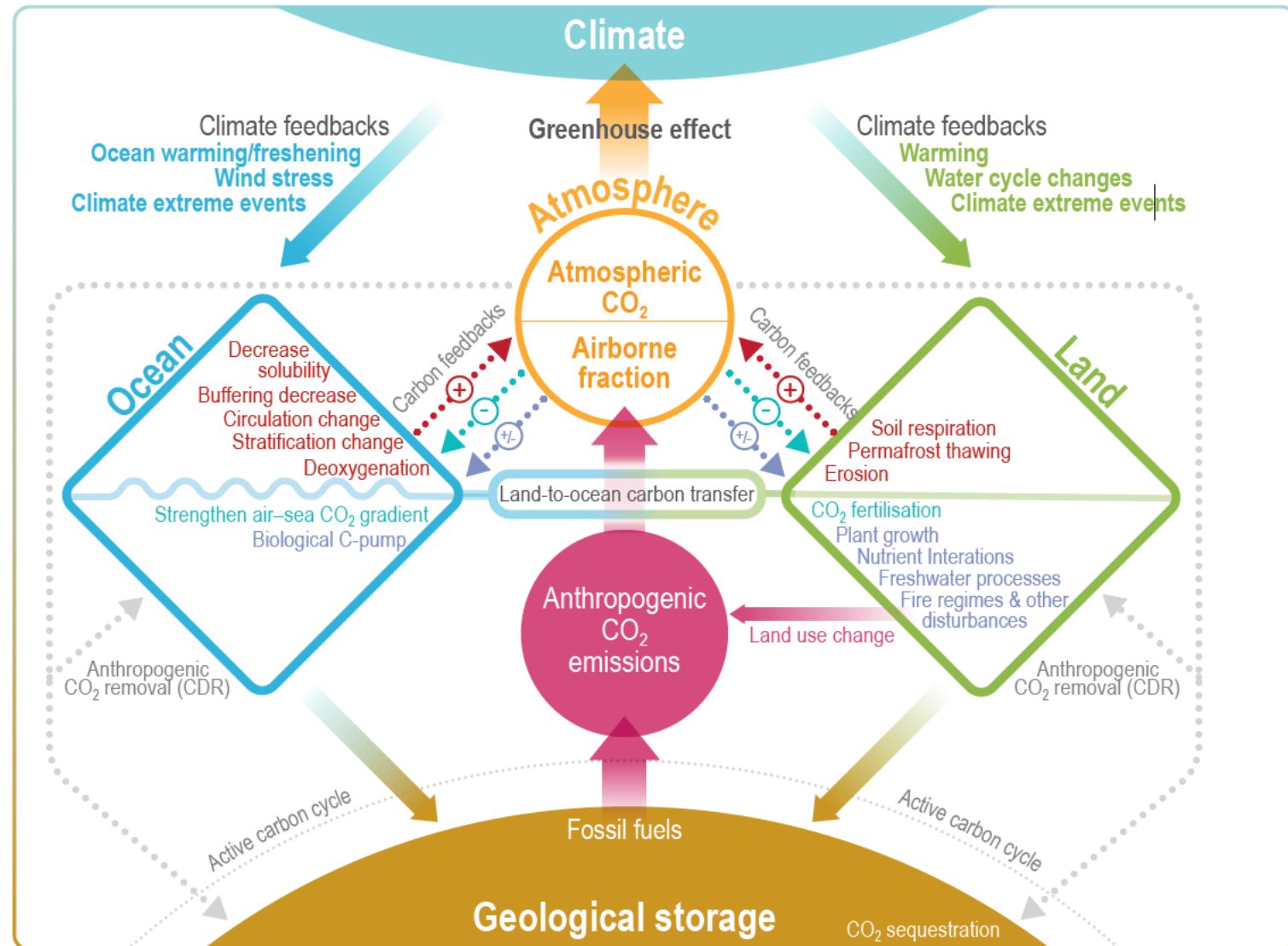
** IPCC Assessment Report 6, Kapitel Carbon Budget, Seite 699.

Atmosphärische Einflussfaktoren

- Anthropogenes CO₂ wird teilweise von den Ozeanen aufgenommen. Dieser Anteil liegt bei 23% aber mit abnehmender Tendenz, weil die Ozeane immer mehr mit CO₂ gesättigt sind*.
- Die Pflanzenwelt nimmt aktuell 31% des anthropogenen CO₂ auf, auch mit abnehmender Tendenz weil die Zunahme der Vegetation aufgrund der wärmeren Atmosphäre nicht mit der CO₂-Zunahme Schritt halten kann*.

* IPCC Assessment Report 6, Kapitel Carbon Budget, Seite 676.

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 5/9

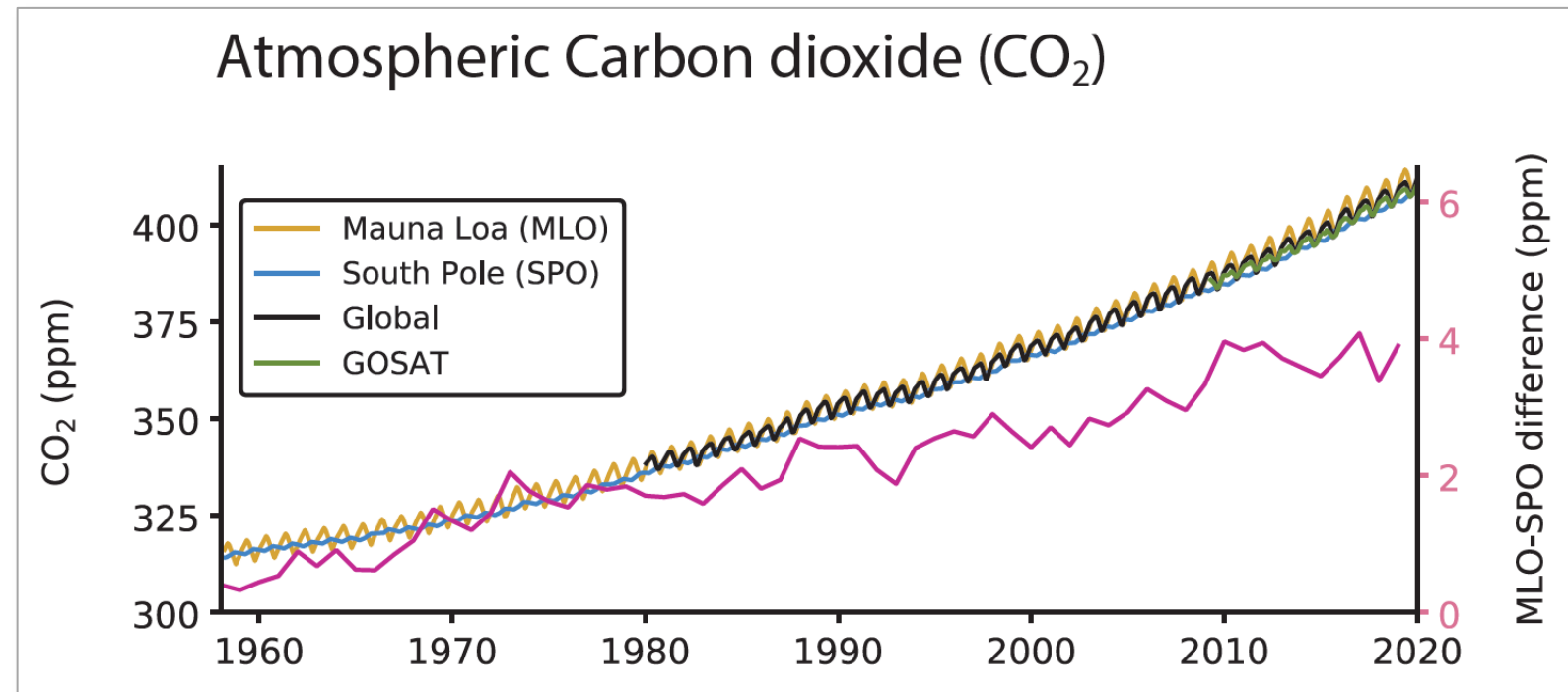


Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 6/9

Beobachtungen, die den anthropogener Anteil CO₂ stark nahelegen

- Der zunehmende Anstieg der Differenz zwischen den Messwerten aus Hawaii und vom Südpol zeigt, dass auf der wesentlich stärker bevölkerten Nordhalbkugel mehr CO₂ ausgestoßen wird.
- Die Grafik zeigt die CO₂-Konzentrationen gemessen auf dem Mauna Loa, Hawaii (MLO) und dem Südpol (SPO). MLO nimmt schneller zu als SPO, wie die rosa Linie zeigt.
- Erklärung:
 - Die Verbrennung von fossilem CO₂ findet vor allem auf der nördlichen Hemisphäre statt.

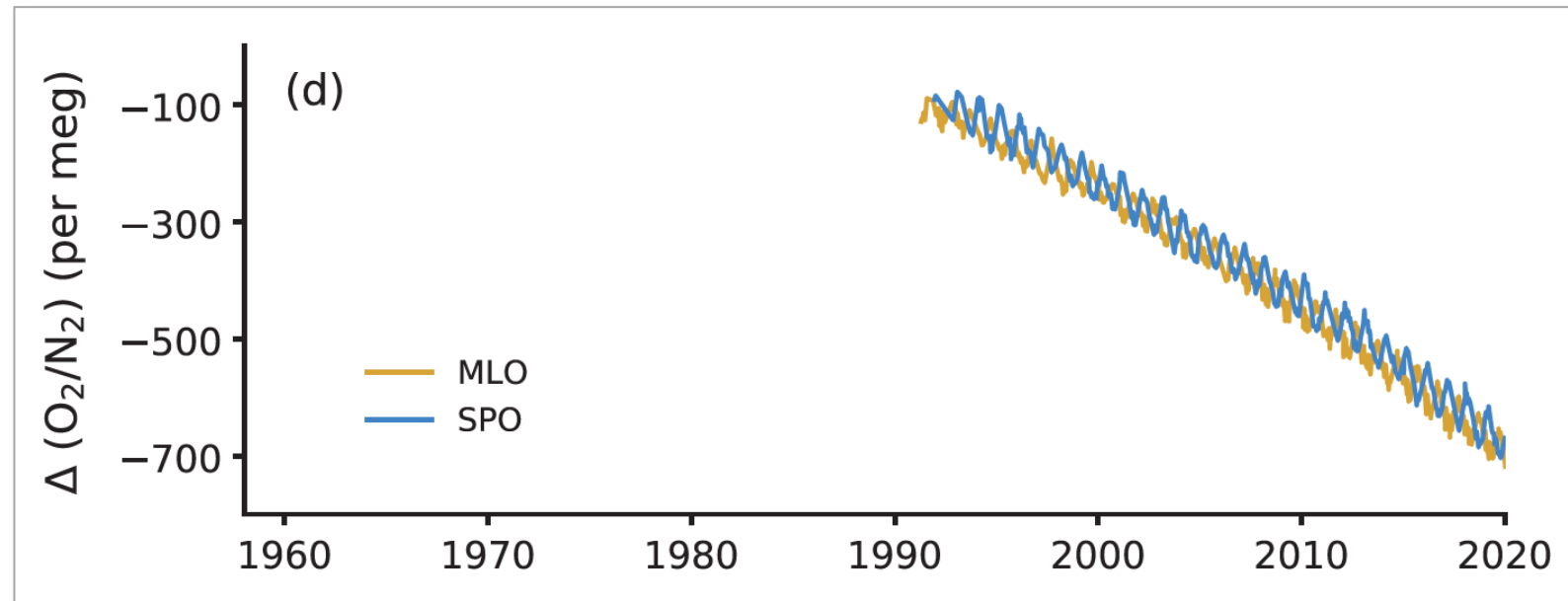


Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 7/9

Beobachtungen, die den anthropogener Anteil CO₂ stark nahelegen

- Die Abnahme vom freien Sauerstoff O₂ im Vergleich zu Stickstoff N₂ zeigt, dass immer mehr Sauerstoff in eine andere Form umgewandelt wird.
- Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wird der Atmosphäre O₂ entzogen und in CO₂ umgewandelt.
- Der Sauerstoffanteil der Atmosphäre nimmt deshalb durch die zunehmende Verbrennung ab.
- Messungen des Verhältnisses O₂/N₂ erfolgen seit den 90-er Jahren systematisch und sie zeigen diese Abnahme.



Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 8/9

Beobachtungen, die den anthropogener Anteil CO₂ stark nahelegen

- Die Abnahme des ¹³C-Anteils zeigt, dass der Anteil fossilen Kohlenstoffs in der Atmosphäre ansteigt.
- Das natürliche Isotopenverhältnis ¹³C/¹²C ist 1,1%. Biogener Kohlenstoff ist um -2,5‰ an ¹³C angereichert, da Pflanzen bei der Photosynthese bevorzugt ¹²C einbauen.
- Bei der Verbrennung fossiler biogener Materialien wie Kohle oder Öl gelangt der angereicherte Kohlenstoff als CO₂ in die Atmosphäre.
- Es wird erwartet, dass dies zu einer Abnahme des Isotopenverhältnisses ¹³C/¹²C führt.
- Proben aus den letzten 170 Jahren bestätigen die erwartete Abnahme.

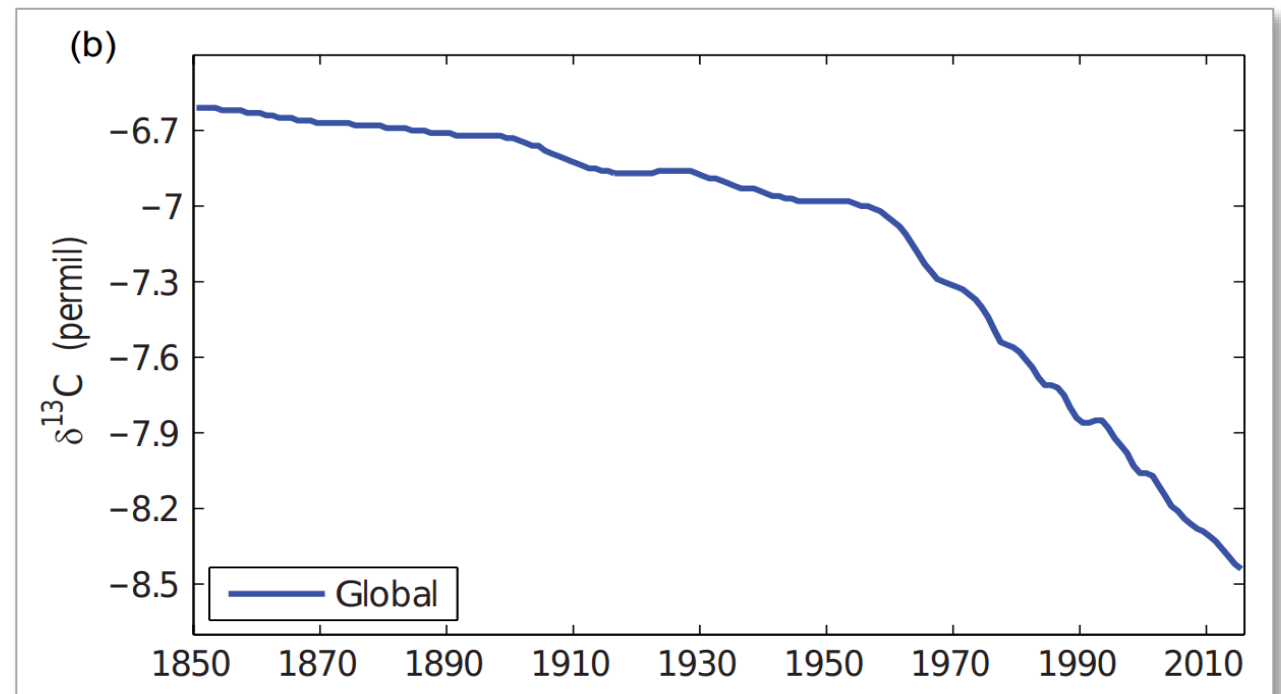


Fig. 1b aus GRAVEN H et al. (2017) Compiled records of carbon isotopes in atmospheric CO₂ for historical simulations in CMIP6, Geoscientific Model Development, 2017, 10. Jg., Nr. 12, S. 4405-4417.

Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Kohlendioxid CO₂ 9/9

Beobachtungen, die den anthropogener Anteil CO₂ stark nahelegen

- Die Abnahme des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis weist auf eine Zunahme von CO₂ aus fossilen Quellen hin.
- Das radioaktive Isotop ^{14}C wird in der Atmosphäre durch Umwandlung von ^{14}N durch kosmische Strahlung gebildet.
- Wird durch Verbrennung fossilen, also weitestgehend ^{14}C -freien Kohlenstoffs, atmosphärisches CO₂ gebildet, sinkt der ^{14}C -Anteil.
- Durch die massive Bildung von ^{14}C durch Kernwaffentests von 1950-1970 wird der Effekt durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs seit 1950 maskiert.
- GRAVEN et al. (2020) haben dies genau untersucht und können beide Effekte voneinander trennen.

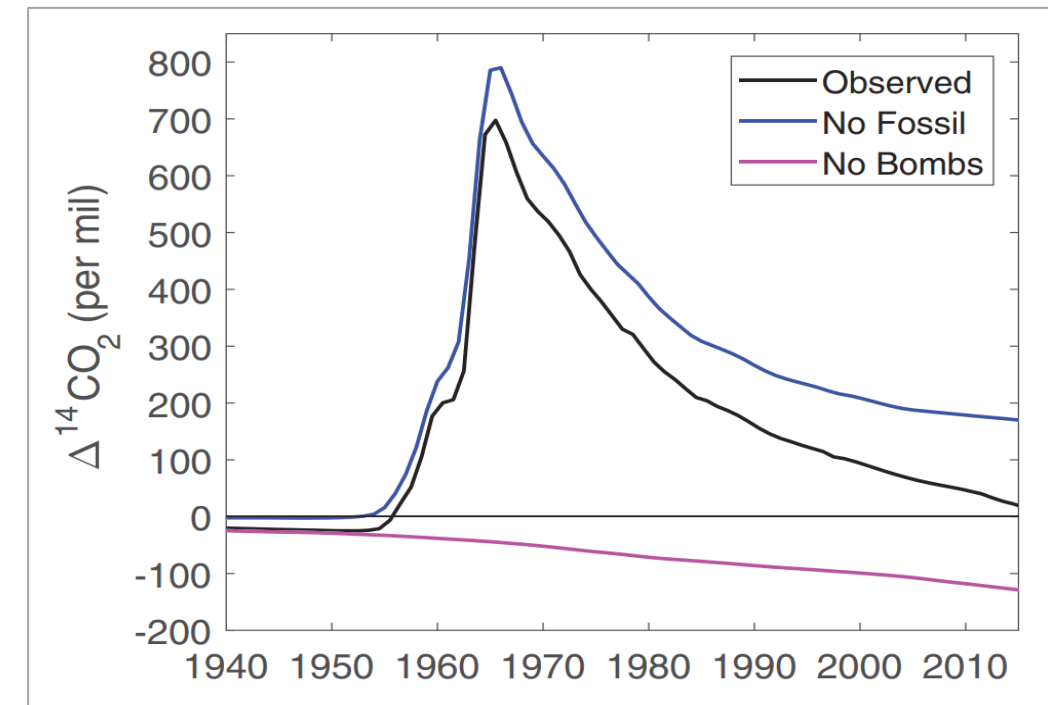


Fig. 4 aus GRAVEN H et al. (2020) Changes to carbon isotopes in atmospheric CO₂ over the industrial era and into the future. Global Biogeochemical Cycles, 2020, 34. Jg., Nr. 11, S. e2019GB006170.

Atmosphärische Einflussfaktoren

CO₂ Budgetmodell vs. Senkenmodell 1/5

Im Jahr 2024 erschien das Buch „Plan B für das Klima“ von Prof. Gerd Ganteför, Uni Konstanz. Er stellt darin das Budgetmodell in Frage und plädiert stattdessen für das Senkenmodell.

- Das Budgetmodell besagt, dass die Atmosphäre nur eine klar bestimmte Menge an CO₂ aufnehmen kann, um z.B. das 2 Grad Ziel des Pariser Abkommens einzuhalten.
- Laut Prof. Ganteför wird dabei verkannt, dass Land und Ozeane ca. 20 Gt CO₂ pro Jahr CO₂ aufnehmen, was 50% des aktuellen anthropogenen CO₂-Ausstoßes entspricht.
- Diese Senken können ca. 40-mal mehr CO₂ aufnehmen als das CO₂-Budget.
- Einziges Problem sei dabei, dass die Geschwindigkeit, mit der die Ozeane das CO₂ aufnehmen kleiner ist als die Geschwindigkeit, mit der die Menschheit aktuell CO₂ in die Atmosphäre bringt.
- Die Lösung „Plan B“ bestehe darin, dass die Menschheit die CO₂-Produktion halbiere, statt auf null zu reduzieren. Dann würden die Ozeane mit dem Aufnehmen von CO₂ mithalten können und somit effektiv die CO₂-Menge in der Atmosphäre nicht weiter ansteigen.
- Wg. der Brisanz dieses Vorschlags wird diese auf den nächsten Seiten bewertet.

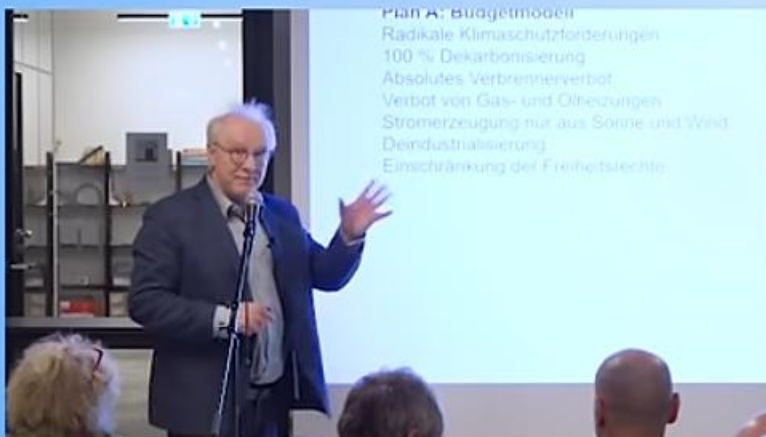
Zwei Ansätze zum Klimaschutz

Plan A: Budgetmodell

Radikale Klimaschutzforderungen
100 % Dekarbonisierung
Absolutes Verbrennerverbot
Verbot von Gas- und Ölheizungen
Stromerzeugung nur aus Sonne und Wind
Deindustrialisierung
Einschränkung der Freiheitsrechte

Plan B: Senkenmodell

Bürger- und wirtschaftsfreundlicher Klimaschutz
50% Dekarbonisierung
Langsame Reduktion der Verbrennerflotte
Anreize zur Modernisierung der Heizungen
Stromerzeugung auch aus Gaskraftwerken
Wirtschaft bleibt größtenteils im Land
Freiheitsrechte bleiben erhalten.



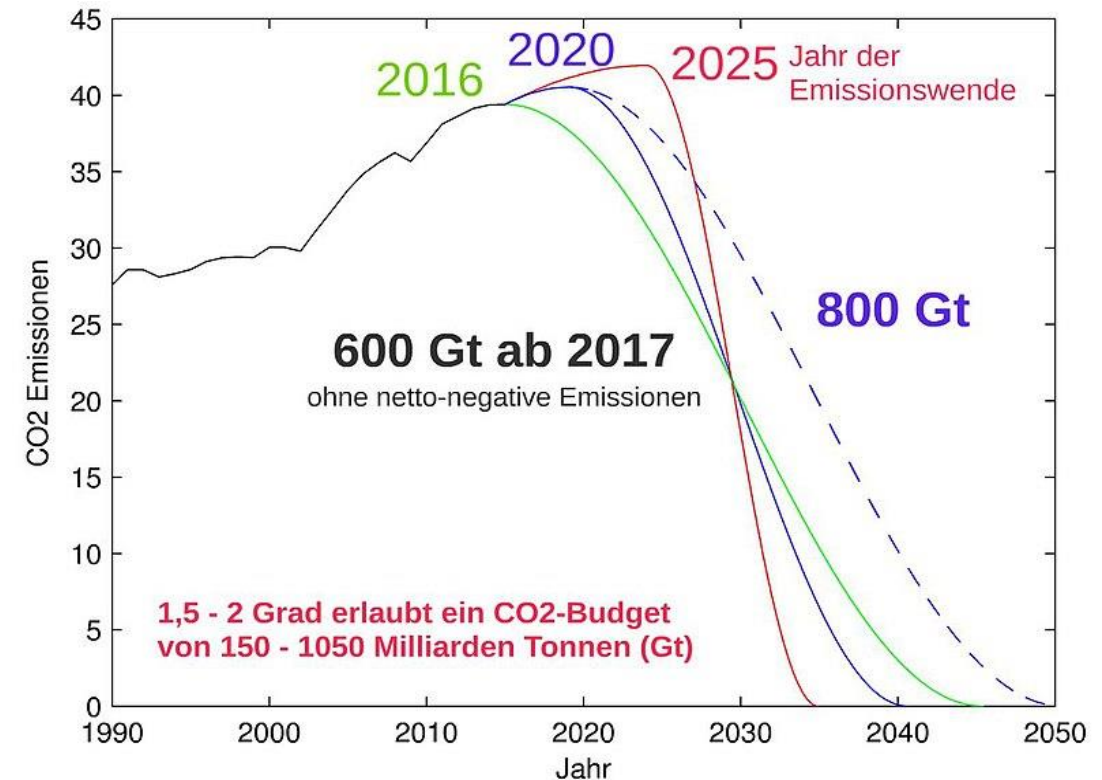
Screenshot bei 33m:33s von <https://www.youtube.com/watch?v=jsCZKjrgYw0>

Atmosphärische Einflussfaktoren

CO₂ Budgetmodell vs. Senkenmodell 2/5

Das Pariser Abkommen* mit Darstellung des CO₂ Budgetmodells**

- Ziel Klimakonferenz Paris (2015):
Begrenzung der Erwärmung auf höchstens 2° C über der Temperatur des Jahrs 1750, prognostiziert für das Jahr 2100
- Um dieses Ziel zu erreichen, dürfen bis 2100 noch maximal einige hundert Gigatonnen anthropogenes CO₂ ausgestoßen werden
- Das würde z.B. eine lineare Absenkung der Emissionen auf Null bis ca. 2035-2050 bedeuten
- Um so mehr CO₂ aktuell in die Atmosphäre gelangt, um so schneller muss die Emission auf null gesenkt werden, siehe Grafik rechts
- Inzwischen kann dieses Ziel unter Berücksichtigung des CO₂-Budgets kaum mehr erreicht werden



Stefan Rahmsdorf, Nötige Emissionspfade, um das Übereinkommen von Paris einzuhalten,
<http://scilog.spektrum.de/klimalounge/koennen-wir-die-globale-erwaermung-rechtzeitig-stoppen>,
CC BY-SA 2.0

* Pariser Abkommen 2015: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

** Erklärung zu CO₂-Budgets: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/31_2024_cc_co2-budget_hintergrundpapier_v2.pdf

Atmosphärische Einflussfaktoren

CO₂ Budgetmodell vs. Senkenmodell 3/5

CO₂-Aufnahmefähigkeit von Land und Ozeanen mit Darstellung des CO₂ Senkenmodells

- Der Mensch hat der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung 1633 Gt CO₂ zugeführt, das zuvor in Form von Kohle, Gas und Öl in der Erde vergraben war und jetzt am Kreislauf von Atmosphäre, Landoberfläche und Ozean teilnimmt. (IPCC AR6, S. 699 Table 5.1, und S. 700, Fig. 5.12)
- Der CO₂-Austausch zwischen Atmosphäre, Ozean und Land puffert die CO₂-Zunahme der Atmosphäre auch weiterhin ab. (IPCC AR6, S. 771)
- Infolgedessen sind davon Stand 2020 in der Atmosphäre 1023 Gt geblieben, während die Land-Vegetation ca. 30% und die Ozeane ca. 25% des anthropogenen CO₂ aufgenommen haben. (IPCC AR6, S. 699 Table 5.1)
- Durch Zunahme der pflanzlichen Produktivität – CO₂ ist Pflanzennahrung, in höheren Breiten ist die Vegetationsperiode länger und die Vegetationszone dehnt sich polwärts aus – sorgt die Land-Vegetation für eine natürliche CO₂-Entnahme. (IPCC AR6, S. 771)
- Bislang ist es nicht zu einer Verringerung der Aufnahmefähigkeit des Ozeans gekommen, die Rate ist stabil geblieben. (IPCC AR6, S. 771/772)
- Dies spricht für die Korrektheit des Senkenmodells

Atmosphärische Einflussfaktoren

CO₂ Budgetmodell vs. Senkenmodell 4/5

Steigt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nicht weiter an, nimmt die Senkenleistung von Land und Ozeanen ab. (IPCC AR6, S. 734 Fig. 5.25 und S. 577, Figure 4.7 und S.643)

- Die obersten 10% der Ozeane sind gut durchmischt, es stellt sich schnell ein Gleichgewicht mit der Atmosphäre ein. (SARMIENTO JL ET AL (2006), Ocean biogeochemical dynamics. Princeton univ. press, Kap. 8.3)
- Der Austausch mit den tieferen Teilen der Ozeane dauert Jahrhunderte, das anthropogene CO₂ wird über diesem Zeitraum größtenteils von den Ozeanen aufgenommen. (SARMIENTO (2006), Kap. 8.4, Fig. 10.2.3)
- Langfristig, über ca. 10.000 Jahre, wird der Kohlenstoff durch Bildung von CaCO₃-Sediment (Kalk) am Ozeanboden dem Kreislauf wieder entzogen. (SARMIENTO (2006), Kap. 9, Fig. 10.2.3)
- Meeresorganismen setzen pro Jahr 50 Gt C um, davon wandern 10 Gt in den tiefen Ozean, es wird aber nur 0,1 Gt im Sediment dem Kreislauf entzogen.
(Middelburg J J (2019), Marine carbon biogeochemistry: A primer for earth system scientists, Springer Nature)
- Der Einfluss der Klimaänderungen auf den ozeanischen biologischen Kreislauf ist in den Modellen noch kaum berücksichtigt. (Séférian et al (2020), Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6, Current Climate Change Reports 6.3: 95-119)
- Es gibt eine nicht unbeträchtliche Unsicherheit, welche Auswirkungen der CO₂-Anstieg und die Klimaerwärmung auf den chemischen und biologischen Kohlenstoff-Kreislauf hat. (IPCC AR6, S. 677)
- Folglich ist das Senkenmodell von Prof. Ganteför mit Vorsicht zu genießen

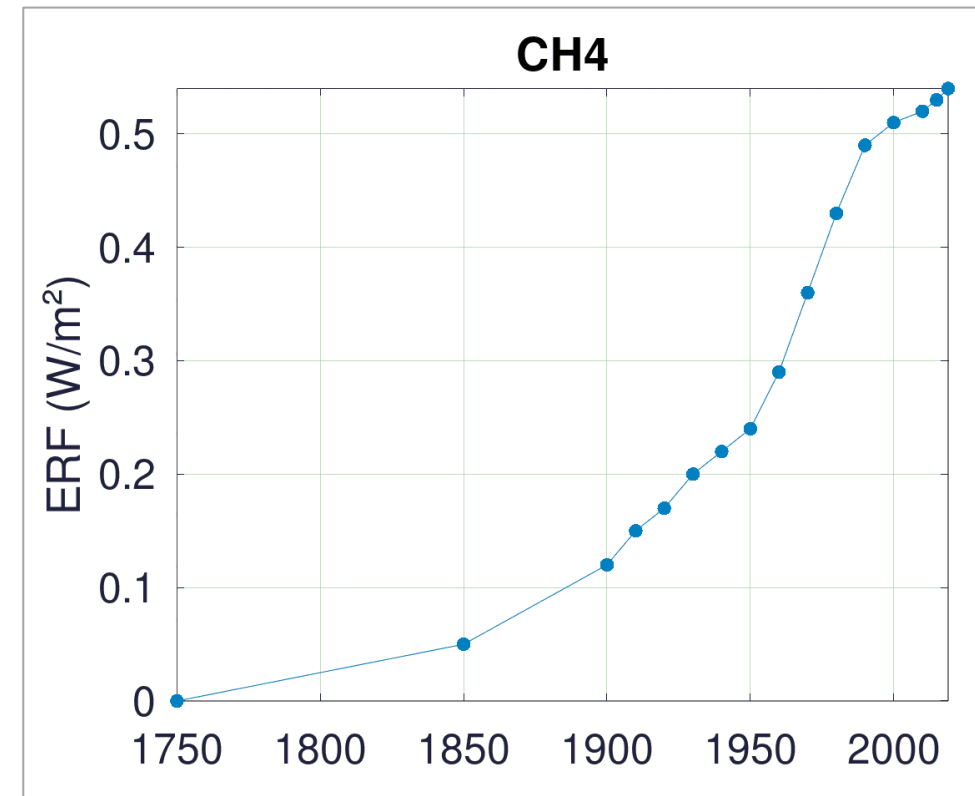
Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Methan CH_4

- Der vorindustrielle Anteil an CH_4 in der Atmosphäre betrug 700 ppb*.
- Im Jahr 2023 betrug der Anteil 1902 ppb.
- Methan trägt 2% zum natürlichen Treibhauseffekt bei und 16% zum anthropogenen Treibhauseffekt.
- Natürliche Methanquellen sind: Sümpfe, Süßwasser, geologische Prozesse.
- Anthropogene Methanquellen sind: fossile Brennstoffe, Viehwirtschaft, Reisanbau, Mülldeponien.
- Nach bisherigen Untersuchungen leistet das Auftauen der Permafrostböden ebenfalls einen Beitrag, die aber noch schwer quantitativ abzuschätzen ist. Es handelt sich dabei allenfalls um ein vorübergehendes Phänomen bis die Permafrostböden ausgegast sind**.

*ppb = parts per billion, 1000 ppb entsprechen 1 ppm

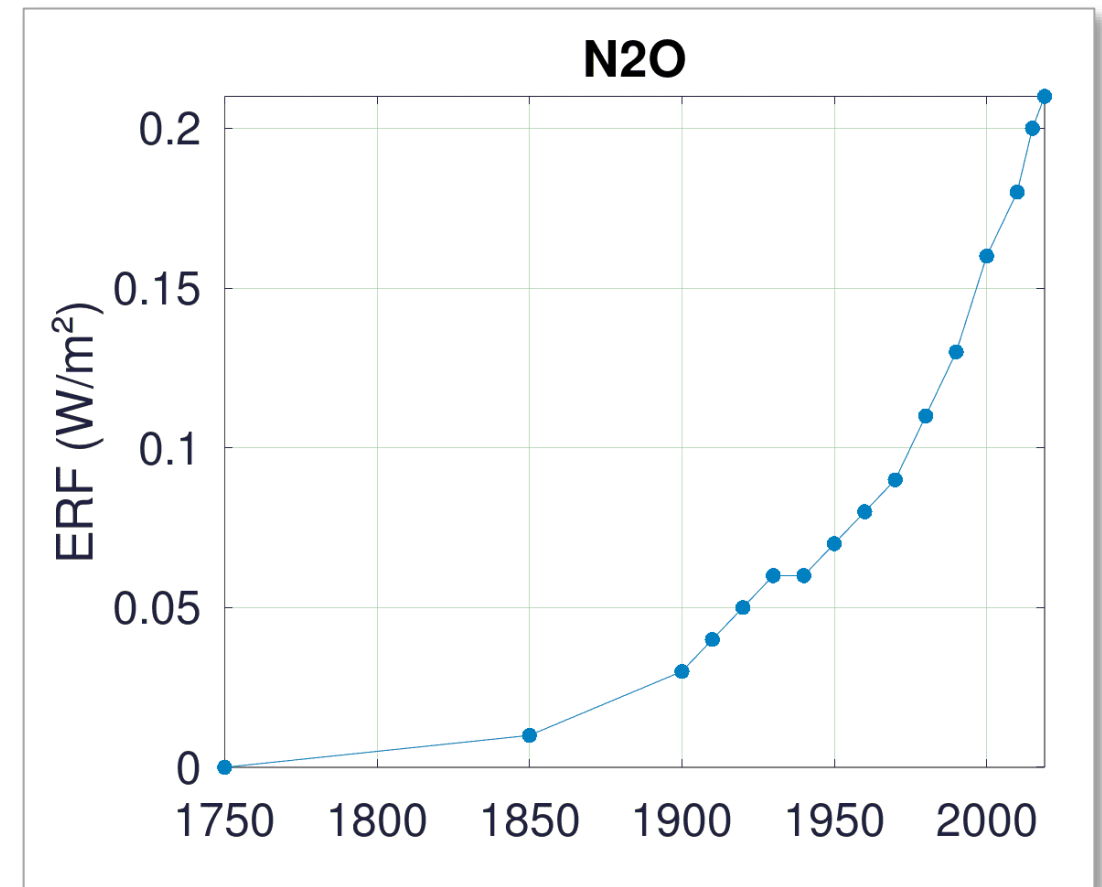
** SCHNEIDER VON DEIMLING et al. (2015) Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity, Biogeosciences 12, 3469–3488



Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Lachgas N_2O

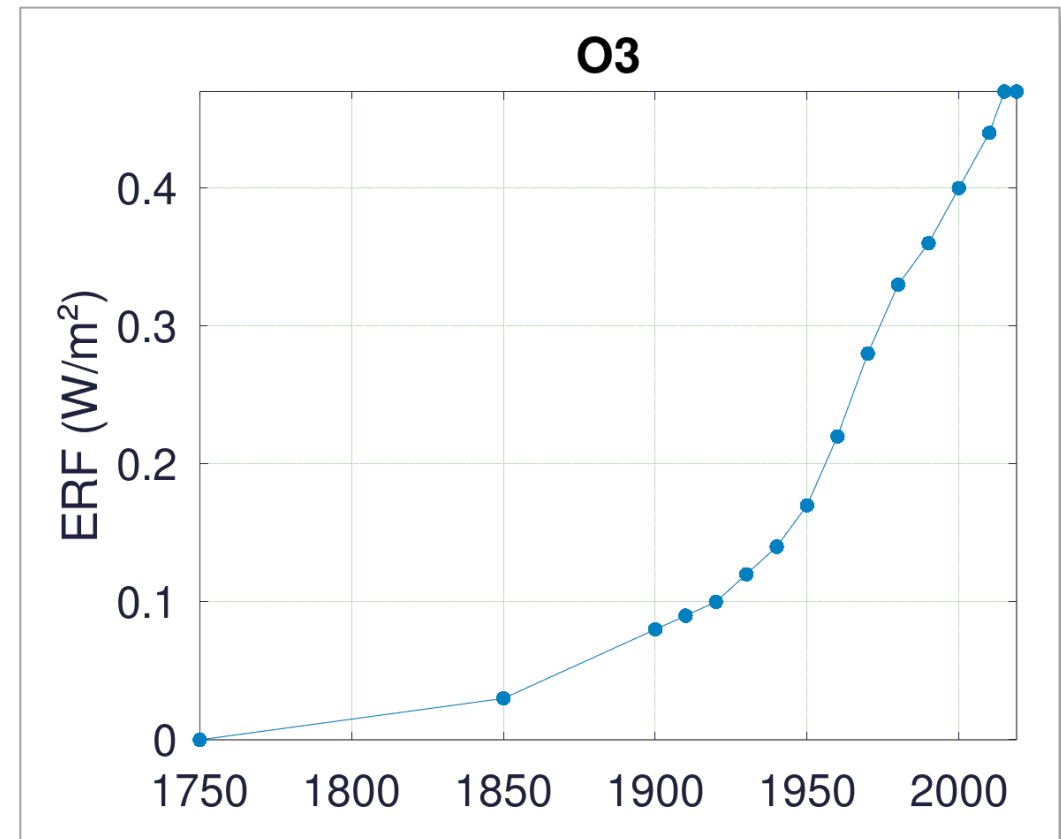
- Der vorindustrielle Anteil an N_2O in der Atmosphäre betrug 270 ppb.
- Im Jahr 2023 betrug der Anteil 336 ppb.
- Lachgas trägt 4% zum natürlichen Treibhauseffekt und 5% zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.
- Natürliche Lachgasquellen sind:
 - Böden
 - Ozeane
- Anthropogene Lachgasquellen sind:
 - Landwirtschaft (Dünger, Jauche)
 - Fossile Brennstoffe
 - Chemische Prozessierung
 - Abwasser



Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Ozon O₃

- Ozon trägt 8% zum natürlichen Treibhauseffekt bei und 11% zum anthropogenen Treibhauseffekt.
- Die Ozonwerte unterscheiden sich je nach Hintergrund (ländlich oder städtisch), aber eine Zunahme ist klar erkennbar, vor allem in städtischen Bereichen, wie das Bild auf der nächsten Seite zeigt.
- Natürliche Ozonquellen sind:
 - UV-Anteil des Sonnenlichts (Stratosphäre)
 - Brände, Blitze (Troposphäre)
- Anthropogene Ozonquellen sind:
 - Kraftstoffverbrennung* (Troposphäre)

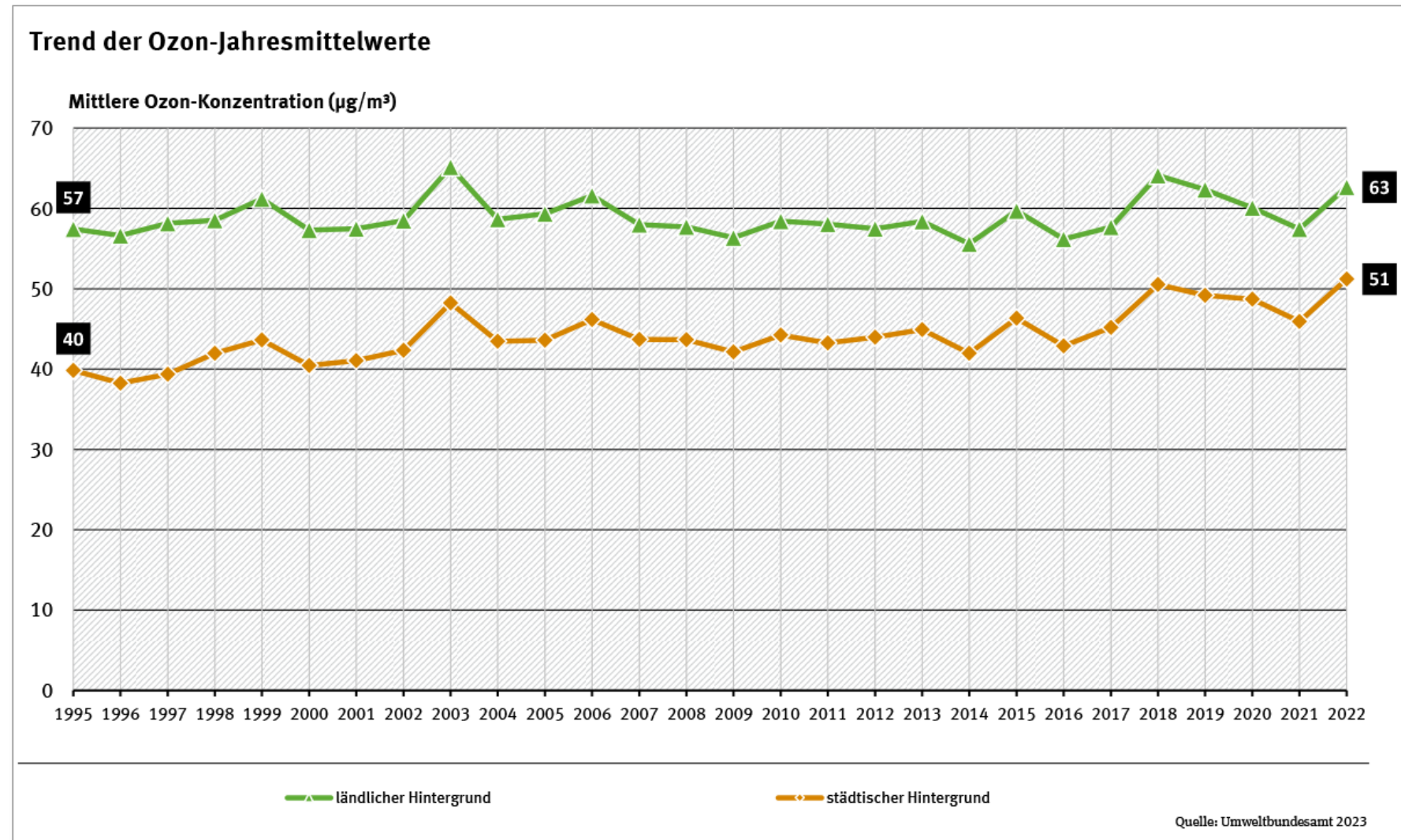


*In der Troposphäre werden Stickstoffoxide NO_x in Ozon O₃ umgewandelt.

Atmosphärische Einflussfaktoren

Treibhauseffekt Ozon O₃

- Entwicklung der Ozon-Jahresmittelwerte in Deutschland, sowohl für den ländlichen als auch für den städtischen Bereich.



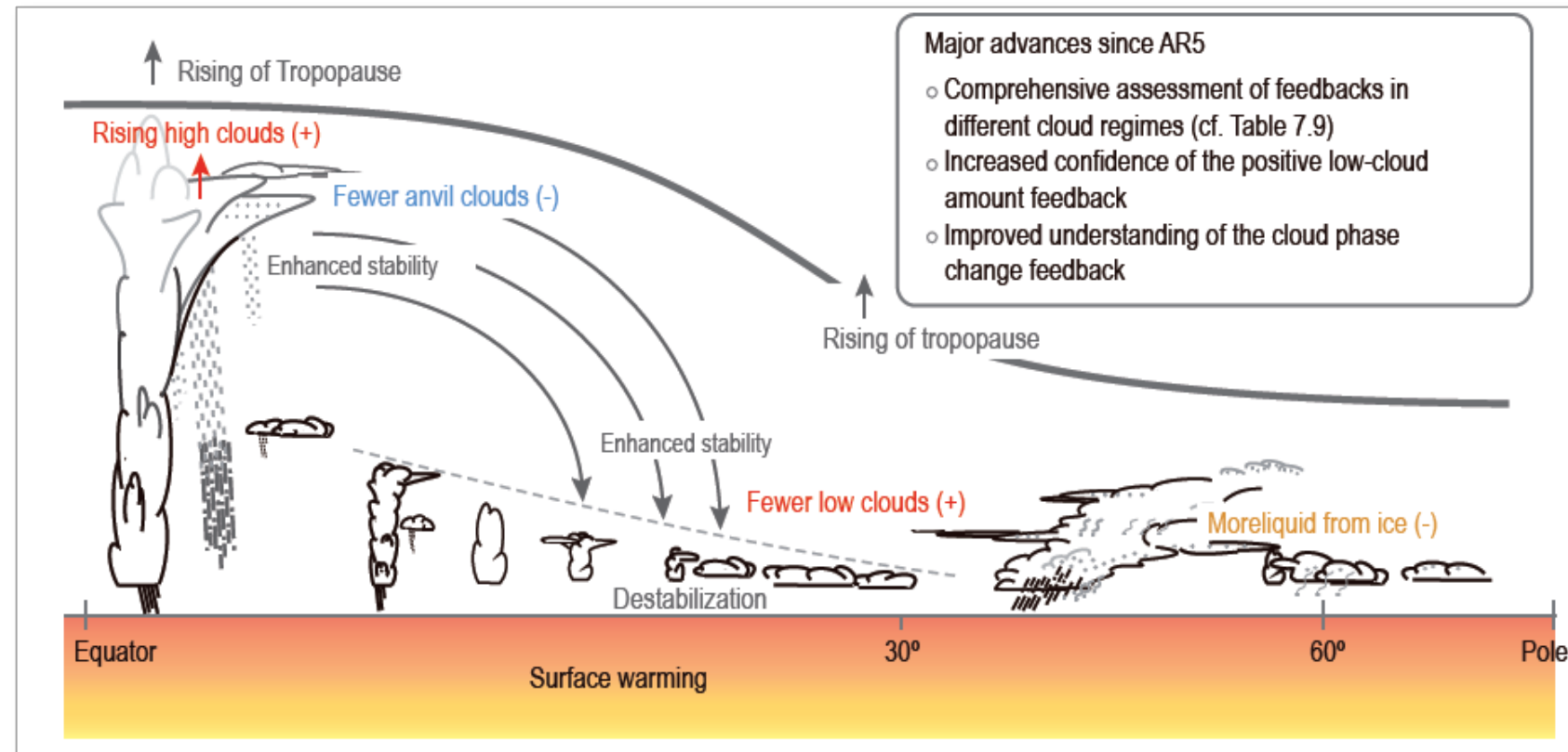
Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung#entwicklung-der-jahresmittelwerte>

Atmosphärische Einflussfaktoren

Netto Wolken-Feedback 1/2

- Hohe Wolken wärmen, niedere Wolken kühlen.
- In Detail ist die Wirkung von Wolken sehr komplex.
- Die IPCC berichtet im letzten Report AR6 über signifikante Fortschritte zum Verstehen der Wirkung von Wolken, das Thema wird weltweit intensiv weiter erforscht.
- Vorläufiges IPCC-Fazit:

Die Veränderungen der Wolkenbildung aufgrund des Klimawandels tragen leicht positiv zur Erderwärmung bei.



Atmosphärische Einflussfaktoren

Netto Wolken-Feedback 2/2

Zusammenfassung Ergebnis IPCC, AR6, Seite 975

- Detaillierte Analyse ergibt: Feedback Wolken bei Temperaturerhöhung ist positiv.
- Ergebnis: $+0.42 \text{ W/m}^2/\text{°C}$
- Likely: $+0.12 - +0.72 \text{ W/m}^2/\text{°C}$
- Very likely: $-0.10 - +0.94 \text{ W/m}^2/\text{°C}$

Feedback	AR5	AR6
High-cloud altitude feedback	Positive (<i>high confidence</i>)	Positive (<i>high confidence</i>)
Tropical high-cloud amount feedback	N/A	Negative (<i>low confidence</i>)
Subtropical marine low-cloud feedback	N/A (<i>low confidence</i>)	Positive (<i>high confidence</i>)
Land cloud feedback	N/A	Positive (<i>low confidence</i>)
Mid-latitude cloud amount feedback	Positive (<i>medium confidence</i>)	Positive (<i>medium confidence</i>)
Extratropical cloud optical depth feedback	N/A	Small negative (<i>medium confidence</i>)
Arctic cloud feedback	Small positive (<i>very low confidence</i>)	Small positive (<i>low confidence</i>)
Net cloud feedback	Positive (<i>medium confidence</i>)	Positive (<i>high confidence</i>)

Inhaltsaufgabe

- Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren
- Astronomische Einflussfaktoren
- Atmosphärische Einflussfaktoren
- **Sonstige Einflussfaktoren**
- Zusammenfassung

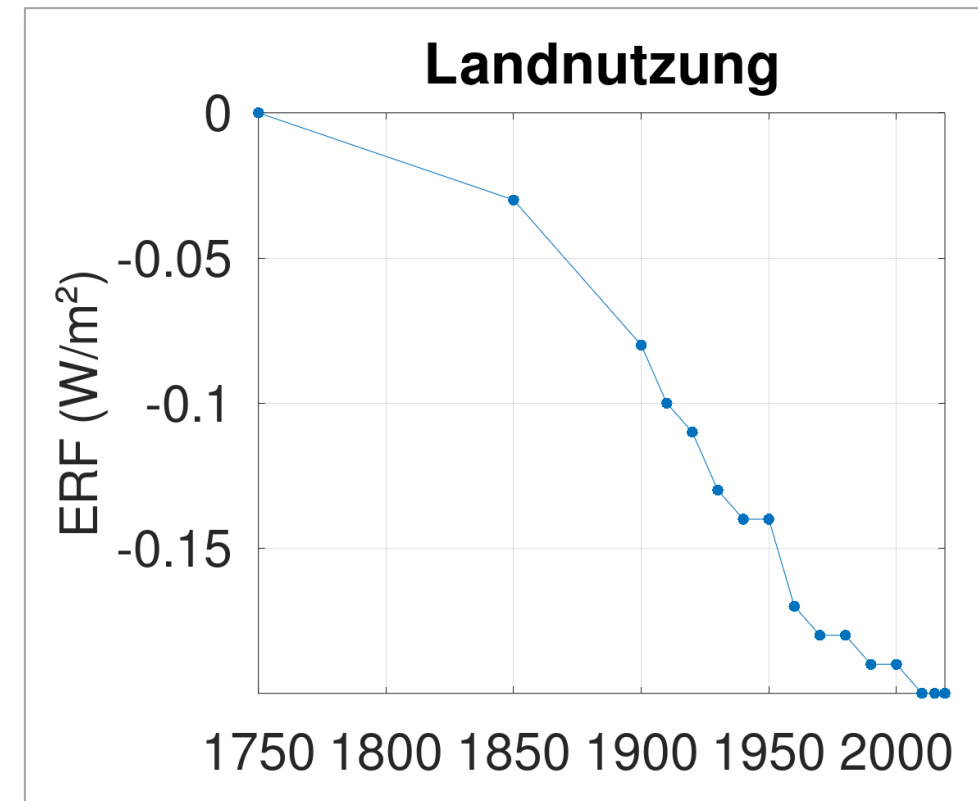
Sonstige Einflussfaktoren

Landnutzung

- Primärer Effekt: Änderung Albedo (= direkte Rückstrahlung der Oberfläche)

▪ Albedo	Wald	5%-18%
	Gras/Feld	18%-26%
	Wüste	30%

- Rodung der Wälder führt zu Zunahme der Albedo.
- In Schnee-Regionen wird dieser Effekt dadurch verstärkt, dass Schnee auf offenen Flächen wirksamer reflektiert.
- Insgesamt hat die Änderung der Landnutzung einen *kühlenden* Effekt.



Sonstige Einflussfaktoren

Vulkanismus

- Explosive Ausbrüche => Partikel und Gase in die Stratosphäre
- Aus SO_2 werden H_2SO_4 -Tröpfchen, die als Aerosol ein bis drei Jahre in der Stratosphäre bleiben
- Streuung des Sonnenlichts in der Stratosphäre
- Folge:
 - Erwärmung der Stratosphäre
 - Abkühlung der Troposphäre
- Beispiel: Ausbruch Tambora, Indonesien
 - 1815 Jahr des Ausbruchs
 - 1816 Jahr ohne Sommer
 - bis zu 3°C kälter
 - Strahlungsantrieb -25 W/m^2
- Effekte auf längere Sicht gemittelt gering
- CO_2 aus Vulkanen entspricht nur 1,6% des anthropogenen Ausstoßes im Jahr 2018



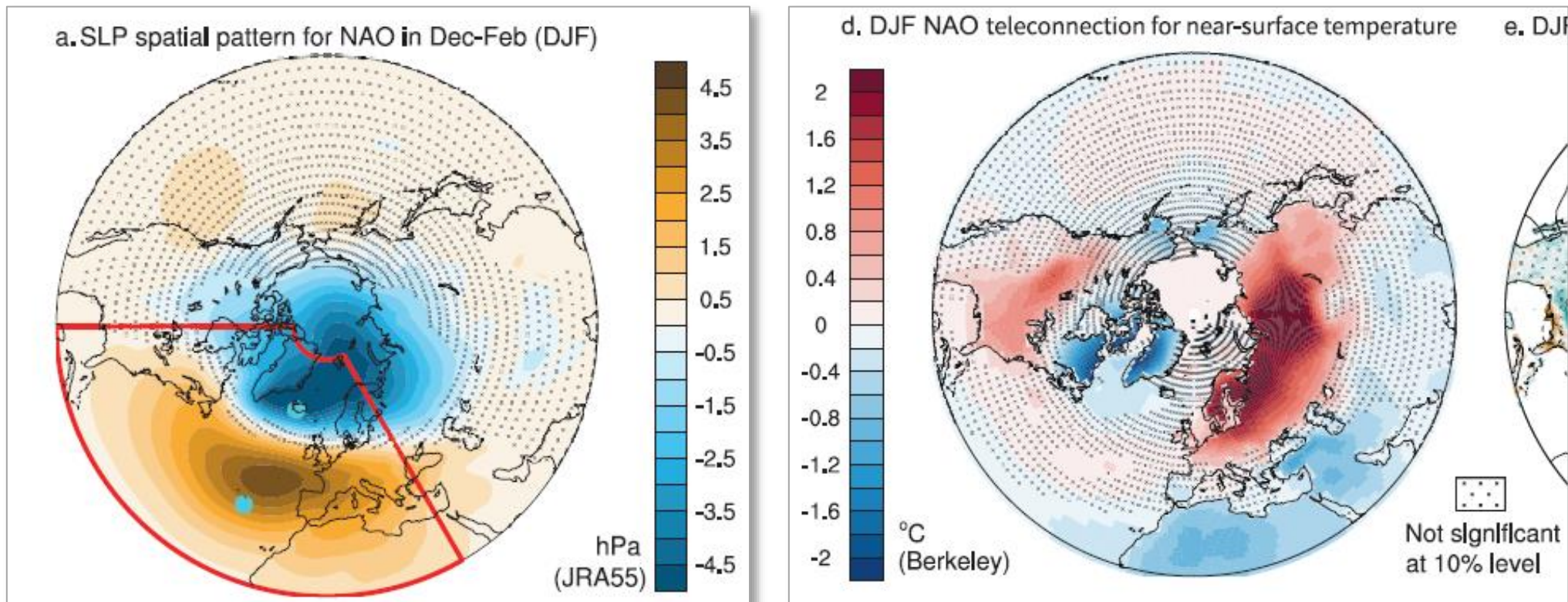
Sonstige Einflussfaktoren

Intrinsische Variabilität / Moden

- Muster in der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Ozeanen beeinflussen das Klima.
- Es handelt sich dabei um in Jahren bis Dekaden wiederkehrende großräumige Muster in Druck, Temperatur, Niederschlag.

Beispiel (NAO = North Atlantic Oscillation)

IPCC AR6, Seite 2157

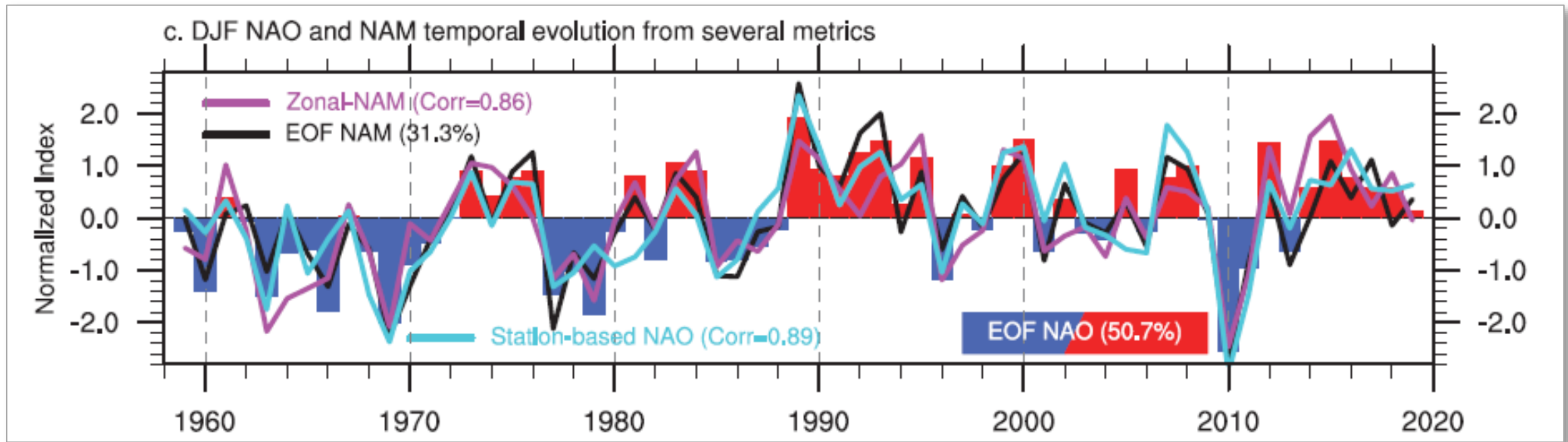


Sonstige Einflussfaktoren

Intrinsische Variabilität / Moden

Wichtige Moden

IPCC AR6, Seite 2157



North Atlantic Oscillation

Atlantic Meridional and Zonal Modes

Southern Annular Mode

Pacific Decadal Variability

El Niño–Southern Oscillation

Atlantic Multi-decadal Variability

Indian Ocean Basin and Dipole Modes

Madden–Julian Oscillation

Sonstige Einflussfaktoren

Intrinsische Variabilität / Moden

Variabilitätsmoden, siehe IPCC AR6, Seiten 2153-2180

- In früheren IPCC-Berichten wurden Variabilitätsmoden nicht berücksichtigt.
- Grund dafür war der unsichere Wissensstand.
- Im neuesten IPCC Report AR6 nehmen Variabilitätsmoden jetzt Raum ein.
- Die Moden entstehen durch intrinsische Effekte in der Atmosphäre oder durch Kopplung mit Ozeanströmungen.
- Ergebnis der Analysen:
 - Die Variabilitätszyklen modulieren die Klimaveränderung mit Periodizitäten oder Quasi-Periodizitäten von einigen Dekaden bis einigen Jahren.
 - Der modulierende Einfluss auf den Temperaturanstieg ist sichtbar.
 - Der Untersuchungszeitraum für Temperatur ist mittlerweile lange genug und der Anstieg steil genug, um auszuschließen, dass die Moden die Ursache für den beobachteten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur sind.

Kippt das Klima durch katastrophische Ereignisse in eine Heißzeit? – Nein!

Es wird oft behauptet, dass es Kipp-Punkte gibt: übersteigt die globale Temperatur bestimmte Schwellen, käme es zu einer irreversiblen, stark beschleunigten weiteren Temperaturerhöhung

- Im IPCC AR6-Bericht findet man dazu folgendes
 - Es gibt keine kurzfristig auftretenden Kipp-Punkte
 - Das Auftauen des Perma-Frost-Bodens, verbunden mit stark erwärmungswirksamer Methanemission, ist nicht abrupt sondern graduell, da die Böden über verschiedene Klimazonen verteilt sind; außerdem ist die daraus zu erwartende jährliche Menge gegenüber den anthropogenen CO₂-Emissionen nicht dominierend
 - Für die Methanvorkommen in Tiefsee-Clathraten lässt sich höchstens ein langsames Ausgasen über Jahrtausende erwarten
 - Das Abtauen arktischen und antarktischen Festlandeises ist zwar mittelfristig irreversibel, aber langsam – es erstreckt sich über Jahrtausende
 - Beim AMOC („Golfstrom“) geht die derzeitig beobachtete Abschwächung nicht über das hinaus, was von natürlichen Schwankungen her zu erwarten ist

Warum CO₂ am meisten diskutiert wird

H₂O ist das stärkste Treibhausgas, aber CO₂ hat den größten Einfluss auf die Erderwärmung

- In der öffentlichen Debatte wird fast ausschließlich über CO₂ gesprochen.
- Dadurch wird der Eindruck erweckt, dass die Wissenschaftler die anderen Einflussfaktoren nicht betrachten; dieser Eindruck ist aber falsch.
- Im IPCC-Report wird nicht nur von CO₂ gesprochen, alle Beiträge werden ausführlich diskutiert.
- CO₂ ist der wichtigste Faktor, weil er quantitativ den größten Beitrag (mehr als die Hälfte) zur Erderwärmung liefert. Dies ist das Ergebnis der wissenschaftlichen Analyse *aller* Einflussfaktoren.
- H₂O ist zwar ein stärkeres Treibhausgas, jedoch weitestgehend gesättigt, weshalb er weniger als CO₂ zur aktuellen Erderwärmung beiträgt, und zwar als Rückkopplungseffekt, siehe Seite 23.
- In der Klimadiskussion werden mancherorts Einflussfaktoren in „CO₂-Äquivalenten“ quantifiziert. Dies ist ein rein technischer Akt, um das Verhältnis zu CO₂ sichtbar zu machen und damit auf einfache Weise ein Gefühl zu bekommen, wie wichtig der Faktor ist.
- In der politischen Diskussion wird gerne vereinfacht. Dort redet man dann deshalb nur über den größten Faktor.

Inhaltsaufgabe

- Strahlungsantrieb und Einflussfaktoren
- Astronomische Einflussfaktoren
- Atmosphärische Einflussfaktoren
- Sonstige Einflussfaktoren
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Die Ursachen für Änderungen des Erdklimas aus physikalischer Sicht wurden besprochen.
- Zunächst wurde der Begriff Strahlungsantrieb eingeführt, mit dem Veränderungen der Energiebilanz der Erde beschrieben werden. Ein positiver Strahlungsantrieb führt zu Erwärmung, ein negativer Strahlungsantrieb führt zu Abkühlung.
- Dann wurden die Einflussfaktoren besprochen, die einen positiven oder negativen Strahlungsantrieb verursachen können.
- Die astronomischen Einflüsse sind entweder zu klein oder zu langsam, um die aktuell gemessenen Klimaveränderungen zu erklären. Das gilt auch für die weiteren natürlichen Einflüsse, wie globale Meeresoszillationen oder Vulkane.
- Die von Menschen verursachten Änderungen beinhalten:
 - Landnutzung und Aerosolen, diese führen zu einem negativen Strahlungsantrieb.
 - Treibhausgase, insbesondere CO₂, diese führen zu einem positiven Strahlungsantrieb.
- Unklarheiten bestehen hinsichtlich Veränderung der Wolkenbildung und der Effektivität der beiden CO₂-Senken Vegetation und Ozeane. Kipp-Punkte werden in näher Zukunft voraussichtlich nicht erreicht.

Wort und Wissen Klima-Arbeitsgruppe

Peter Korevaar
Hanna Ziegler
Albrecht Ehrmann
Maik Böhm

Dank an: Markus Blietz, Reinhard Junker, Markus Merk, Peter Trüb, Henrik Ullrich