



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Clim4Edu

*Unterrichtsmaterialien
für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten*

Handbuch



Autoren:

Dr. Michael Buchwitz und Dr. Maximilian Reuter, Institut für Umweltphysik (IUP), Universität Bremen
Jun. Prof. Dr. Andreas Rienow, Interdisziplinäre Geoinformationswissenschaften, Geographisches Institut,
Ruhr-Universität Bochum



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Die neueste Version dieses Handbuchs gibt es hier:

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/Handbuch/Clim4Edu_Handbuch_red.pdf

Die Internet-Version des Handbuchs gibt es hier:

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

*Interaktive Grafiken und entsprechende Hintergrundinformationen
und Aufgaben gibt es hier:*

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

*Weitere Materialien zum Klimawandel gibt es bei
Fernerkundung in Schulen (FIS):*

<https://fis.rub.de/klimawandel>



1 Vorwort

Clim4Edu ist ein von der deutschen Raumfahrtagentur im DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) gefördertes Projekt, welches sich zum Ziel gesetzt hat, Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten zu erstellen. Clim4Edu ist eine Kooperation des Geographischen Instituts der Ruhr-Universität Bochum und des Instituts für Umweltphysik (IUP) der Universität Bremen. Clim4Edu ist Mitte 2021 gestartet und hat eine Laufzeit von 3 Jahren.

Die Problematik des Klimawandels ist interdisziplinär und seine unterschiedlichen Aspekte haben Bezug zu mehreren in der Schule meist separat gelehrt Fächern wie z.B. Physik (Energie, Strahlung, ...), Geografie (Erde, Klima, ...), Biologie (Kohlenstoffkreislauf, Photosynthese, ...), Chemie (CO₂, CH₄, H₂O, ...), Mathematik (Berechnungen aller Art, Statistik, ...), Informatik (Programmierung, Datenanalyse, ...) und Wirtschaft (Emissionshandel, Umstellung auf eine kohlenstofffreie Wirtschaft, ...). Die Thematik Klimawandel eignet sich daher besonders um aufzuzeigen „wie alles zusammenhängt“ bzw. wie Wissen verschiedener Fächer benötigt wird, um ein wichtiges komplexes Problem zu verstehen und (hoffentlich bereits in naher Zukunft) zu lösen.

Ein Schwerpunkt von Clim4Edu ist die Erstellung interaktiver Unterrichtsmaterialien. Dieses Handbuch dient primär dazu, einen Überblick über die Thematik Klimawandel und entsprechende Satellitenbeobachtungen zu liefern. Es richtet sich primär an Lehrpersonal aber sollte auch für Schülerinnen und Schüler höherer Jahrgänge verständlich, interessant und nützlich sein. Originalabbildungen haben oft eine englische Beschriftung und wir haben dies bewusst teilweise so gelassen, denn viele dieser Abbildungen werden regelmäßig auf den neuesten Stand gebracht und es empfiehlt sich nachzusehen, ob Updates existieren.

Die Klimaproblematik ist umfangreich und kann daher nicht in vollem Umfang hier abgehandelt werden, selbst wenn sich primär auf Satellitenmessungen fokussiert wird. Dies ist auch nicht unbedingt notwendig, da es bereits sehr gute Materialien gibt. Dies umfasst Informations- und Arbeits-Materialien zu verschiedenen Themenbereichen einschließlich Satellitenmessungen, welche speziell für Schulen angefertigt wurden. Wenn bereits gute Materialien existieren, dann verweisen wir darauf, natürlich ohne Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu können. Einige wichtige Aspekte decken wir nicht oder nur am Rande ab. Den Bereich Versuche, also z.B. physikalische Experimente, decken wir nicht ab; aber auch hier verweisen wir auf Existierendes. Ähnliches gilt für das wichtige, aber auch sehr umfangreiche Gebiet Klimaschutz bzw. Energiewende und andere Gebiete wie zum Beispiel Geoengineering, also Eingriffe ins Klimasystem, um der Erderwärmung entgegenzuwirken.

Wir wünschen viel Spaß bei der Lektüre. Für Rückmeldungen jeder Art sind wir dankbar.

Michael Buchwitz (buchwitz@uni-bremen.de), Maximilian Reuter (mreuter@iup.physik.uni-bremen.de)
und Andreas Rienow (andreas.rienow@ruhr-uni-bochum.de)



Inhalt

1	Vorwort.....	3
2	Die Klimaproblematik im Überblick.....	7
3	Kurzübersicht Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6) WG1.....	12
4	Quellen von Klimadaten und klimarelevanten Abbildungen.....	14
5	Unterschied Wetter und Klima.....	20
6	Der Treibhauseffekt.....	28
6.1	Was sind Treibhausgase und wie wirken sie?.....	28
6.2	Alles strahlt!.....	36
6.3	Die Energiebilanz der Erde.....	40
6.4	Strahlungsantrieb (<i>radiative forcing</i>).....	48
7	Klimasystem Erde.....	57
7.1	Komponenten bzw. Geosphären.....	57
7.1.1	Atmosphäre.....	57
7.1.2	Hydrosphäre.....	58
7.1.3	Kryosphäre.....	59
7.1.4	Biosphäre.....	60
7.1.5	Pedosphäre.....	61
7.1.6	Lithosphäre.....	61
7.2	Klimasensitivität und Rückkopplungen (<i>feedbacks</i>).....	62
7.3	Kippelemente (<i>tipping elements</i>).....	70
7.4	Kohlenstoff-Kreislauf.....	71
7.4.1	Übersicht.....	71
7.4.2	CO ₂ heute und in der fernen Vergangenheit dargestellt als interaktive Grafik.....	74
8	Essentielle Klimavariablen (ECVs) und ihre Messung durch Satelliten.....	82
8.1	Wie messen Satelliten?.....	83
8.2	ECVs und ESA Klimawandel-Initiative (<i>Climate Change Initiative, CCI</i>).....	84
8.3	ECVs und Copernicus Klimawandel-Service (<i>Climate Change Service, C3S</i>).....	84



8.4	Kohlenstoffdioxid (CO ₂).....	85
8.5	Methan (CH ₄).....	89
8.6	Wasserdampf	93
8.7	Ozon	96
8.8	Wolken	97
8.9	Aerosole	97
8.10	Meeresspiegel	98
8.11	Meeresoberflächen-Temperatur (<i>sea surface temperature</i>)	101
8.12	Ozeanfarbe (<i>ocean color</i>).....	105
8.13	Ozean-Salzgehalt (<i>sea surface salinity</i>).....	106
8.14	Gletscher	108
8.15	Eisschild Grönland	109
8.16	Eisschild Antarktis	112
8.17	Meereis.....	113
8.18	Landoberflächen-Temperatur (<i>land surface temperature</i>)	117
8.19	Bodenfeuchte (<i>soil moisture</i>).....	118
8.20	Landbedeckung (<i>land cover</i>)	119
8.21	Biomasse	121
8.22	Feuer.....	122
8.23	Schnee	123
8.24	Permafrost.....	125
9	Klimaprojektionen mit Klimamodellen.....	126
10	Das 1,5 Grad Ziel: Wieviel Zeit bleibt uns noch?	128
11	Klimaschutz: Was kann man tun?	129
12	Häufige Fragen zum Klimawandel	137
13	Abkürzungen und Akronyme	138
14	Internet-Links zu Klima-Informationen für Schulen (Auswahl)	139
14.1	Fernerkundung in Schulen (FIS)	139
14.2	EO College	139



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

14.3	MARUM (Universität Bremen).....	140
14.3.1	MARUM UNI-Schullabor	140
14.3.2	Schulprojekt: Klima - Ich wandle mich!	140
14.4	Hamburger Bildungsserver.....	140
14.5	DKRZ für Schulen	141
14.6	ESA.....	141
14.6.1	ESERO.....	141
14.6.2	ESA Kids.....	142
14.6.3	Climate Detectives	142
14.6.4	Klima für Schulen (Climate for Schools).....	142
14.7	LMU: Klimawandel verstehen und handeln.....	144
14.8	CLIMate change teacher's academy (CLIMADEMY)	144
15	Bibliographie (Auswahl).....	145
16	Referenzen	147
17	Danksagung.....	152
18	Anhang 1: IPCC AR6 WG1 Klimabericht: Weitere Informationen	153
19	Anhang 2: Kohlenstoffzyklus: Global Carbon Project (GCP).....	156

2 Die Klimaproblematik im Überblick

Die Klimaproblematik ist komplex und kann hier nicht in der vollen Breite und der vollen Tiefe erfasst und behandelt werden. Dies ist auch nicht unser Anspruch. Unser Anspruch ist es jedoch einen guten Überblick über diese wichtige Thematik zu vermitteln. Bei der Erstellung dieses Handbuchs und der anderen Materialien, zum Beispiel den interaktiv am Computer einzusetzenden Materialien, die hoffentlich für den Einsatz in der Schule nützlich sind, hat uns ein „roter Faden“ geleitet, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist. Hauptursache des Klimawandels, über den fast täglich in den Medien berichtet wird, ist der Anstieg der atmosphärischen Konzentrationen des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO₂), welches aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas) resultiert. Als Folge unserer CO₂-Emissionen erwärmt sich die Erde und eine Reihe weiterer Veränderungen finden statt, wie zum Beispiel der Anstieg des Meeresspiegels. Wie dies alles funktioniert, also was zum Beispiel ein Treibhausgas ist, wie genau der Treibhauseffekt funktioniert und welche (Rückkopplungs-)Prozesse hier zu beachten sind, soll in diesem Handbuch möglichst einfach aber doch korrekt erläutert werden. Zum besseren Verständnis dieser Prozesse und der dazu gehörigen Komponenten beizutragen ist ein Ziel dieses Handbuchs. Das andere Ziel ist es, einen Überblick über klimarelevante Satellitenmessungen zu geben. Am Ende gehen wir – allerdings nur recht kurz – auf unsere Zukunft betreffende Fragen ein, u.a. auf die Frage, wieviel Zeit uns noch bleibt den Klimawandel so zu begrenzen, dass die Folgen (hoffentlich) noch beherrschbar bleiben und was diesbezüglich getan werden kann. Zur Vertiefung dieser Thematik haben wir entsprechende Literatur zusammengestellt.

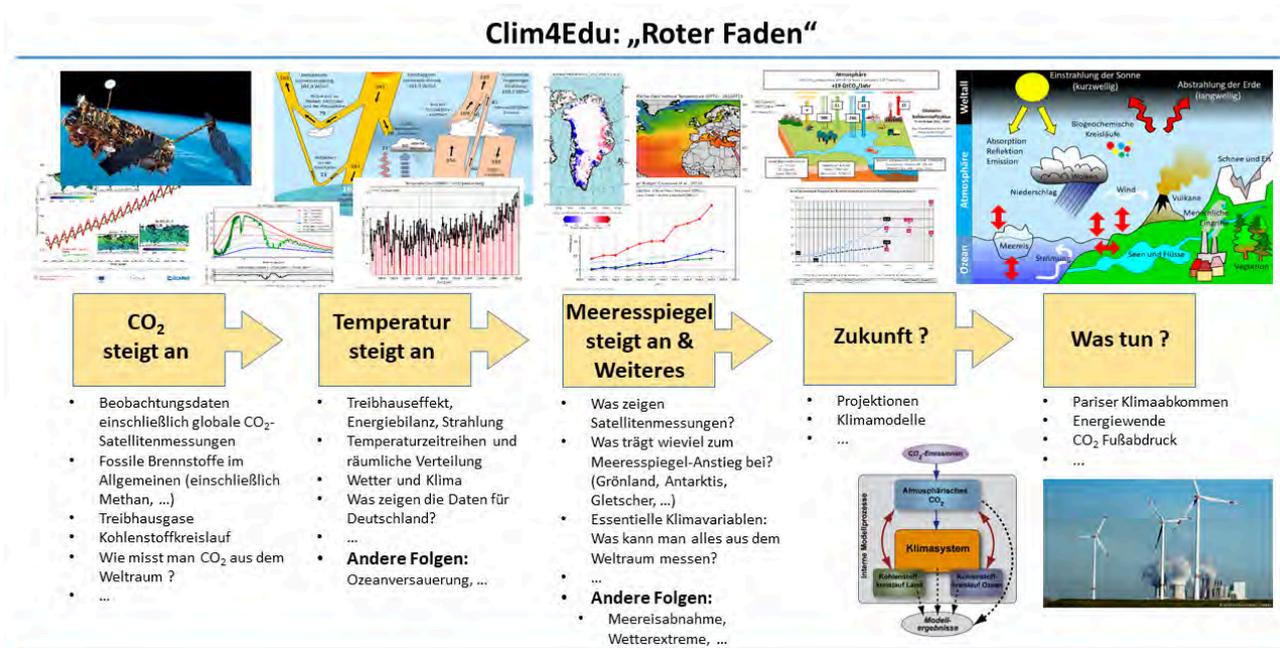


Abbildung 1: Unser „roter Faden“, welcher uns bei der Erstellung dieses Handbuchs als Orientierung gedient hat.



Die Erde wird permanent von der Sonne beschienen und dadurch wird der Erde permanent Energie in Form von energiereicher Sonnenstrahlung zugeführt. Diese Sonnenstrahlen (dargestellt als gelbe Pfeile in Abbildung 2) erwärmen die Erde. Warum wird es dann auf der Erde nicht immer wärmer und wärmer?

Nun, in der Tat wird es insbesondere seit einigen Jahrzehnten immer wärmer – und genau dies ist die Klimaproblematik bzw. ein wichtiger Aspekt davon. Die Sonne ist hier jedoch nicht die Ursache für diese Erwärmung. Ursache hierfür sind steigende atmosphärische Konzentrationen sogenannter Treibhausgase – insbesondere Kohlenstoffdioxid – oft auch einfach Kohlendioxid genannt oder noch einfacher CO_2 . CO_2 entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, also bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas. CO_2 ist ein Treibhausgas, da es die Wärmeabstrahlung der Erde quasi blockiert. Als Folge davon kommt es zu einer Erwärmung. Ursache der derzeitigen Erderwärmung ist also nicht eine Zunahme der Energiezufuhr (durch die Sonne), sondern eine Abnahme der Energieabfuhr (durch die Treibhausgase).

Die (langwellige) Wärmestrahlung der Erde ist in Abbildung 2 als wellige rote Pfeile dargestellt. Entscheidend für die Temperatur der Erde ist nicht nur, wieviel Energie die Erde von der Sonne bekommt, sondern wie groß die Nettozufuhr ist, also ob es eine die Differenz von Energie-Einstrahlung und Energie-Abstrahlung gibt und wie groß diese Differenz ist. Wie noch genauer erklärt werden wird, blockieren Treibhausgase die Abstrahlung der Wärmestrahlung in den Weltraum, indem Treibhausgase diese Strahlung absorbieren („verschlucken“). Dadurch wird die Erde nicht mehr die gesamte absorbierte Sonnenenergie durch Umwandlung in Wärmestrahlung und Abstrahlung in den Weltraum wieder los. Als Reaktion auf diesen Energieüberschuss erwärmt sich die Erde.

Wie dies genau funktioniert, um wieviel die Temperatur zunimmt und was sonst noch alles passiert, z.B. mit dem Meeresspiegel, dass wird in späteren Kapiteln in diesem Handbuch erläutert werden. Die Beantwortung dieser Fragen erfordert ein gutes Verständnis des in Abbildung 2 schematisch dargestellten „Klimasystems Erde“. Ziel dieses Handbuchs ist es zu diesem Verständnis beizutragen. Das Klimasystem besteht aus verschiedenen Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen und sich gegenseitig beeinflussen und sich dadurch verändern können. Diese Veränderungen können sehr schnell vor sich gehen (zum Beispiel bei der Wolkenbildung) oder sehr langsam sein (zum Beispiel das Abschmelzen der Gletscher).

Genau diese vielfältigen Möglichkeiten der gegenseitigen Beeinflussung sind es, welche Klimaprojektionen so schwierig machen, selbst wenn man zum Beispiel die zukünftigen CO_2 -Emissionen schon genau kennen würde bzw. genau vorgibt. Wenn es zum Beispiel aus irgendeinem Grund am Erdboden und in den unteren Schichten der Atmosphäre anfänglich etwas wärmer wird (z.B. durch einen Anstieg der CO_2 -Konzentration), dann passieren in der Folge davon Weiteres und dieses „Weiteres“ kann die anfängliche Erwärmung verstärken aber auch abschwächen.

Als Folge der anfänglichen Erwärmung kann zum Beispiel mehr Wasser verdunsten und die Atmosphäre auch mehr Wasserdampf enthalten (warme Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als kalte Luft). Wasserdampf ist aber auch ein Treibhausgas und zunehmende atmosphärische Konzentrationen werden zu einer weiteren Erwärmung führen. Man sagt, dass es sich hier um einen verstärkenden Prozess – eine positive Rückkopplung – handelt: Mehr CO₂ führt zu einer anfänglichen Erwärmung. Dieses führt zu mehr Wasserdampf in der Atmosphäre und dies wiederum führt zu einer weiteren Erwärmung. Es wird wärmer „weil es wärmer wird“. Umgekehrt gibt es auch negative Rückkopplungen. Diese wirken der ursprünglichen Erwärmung entgegen. Genau diese vielfältigen und komplexen Beziehungen sind es, mit denen sich viele Klimaforscher beschäftigen. Hierbei ist ein Ziel immer genauer zu verstehen, wie sich insbesondere Treibhausgase bisher auf das Klima ausgewirkt haben und in Zukunft wahrscheinlich auswirken werden.

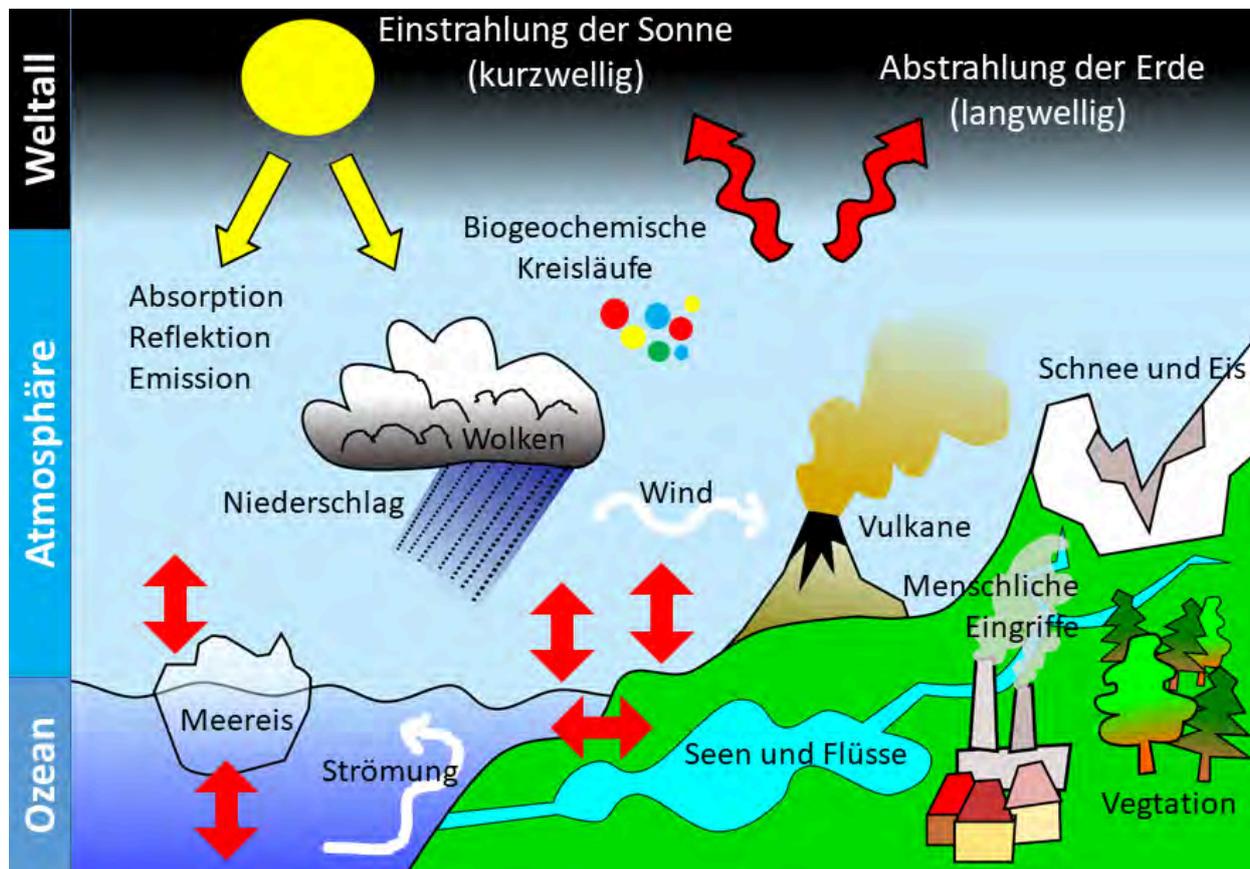


Abbildung 2: Übersicht über das Klimasystem Erde. Als Vorlage diente hier diese Abbildung:
<https://bildungsserver.hamburg.de/das-klimasystem/2063960/klimasystem-und-subsysteme>.



Das Klimasystem Erde besteht aus mehreren Komponenten (Näheres hierzu siehe Abschnitt 7.1):

- die Atmosphäre: die Luft, die wir atmen und die eine Reihe weiterer wichtiger Funktionen erfüllt
- die Hydrosphäre: also alles, was mit Wasser zu tun hat, d.h. die Ozeane aber auch der Regen und verdunstendes Wasser
- die Kryosphäre: Eis und Schnee, also auch die Gletscher und die beiden großen Eisschilde
- die Biosphäre: alle Pflanzen und Tiere und daher auch wir Menschen
- die Pedosphäre: der Erdboden
- die Lithosphäre: die steinerne Hülle der Erde

Alle diese Komponenten spielen für das Klima eine wichtige Rolle, jedoch teilweise auf unterschiedlichen Zeitskalen. Die Atmosphäre reagiert meist sehr schnell auf eine „Störung“ aber die großen Eisschilde Grönland und die Antarktis reagieren sehr langsam. Auch die Böden spielen für den Klimawandel eine wichtige Rolle, da sie große Mengen an Kohlenstoff enthalten (unter anderem in den Permafrost-Gebieten) und auch die Lithosphäre ist wichtig, insbesondere auf sehr langen Zeitskalen, auf denen z.B. die Verwitterung von Steinen abläuft.

Nur mit einem guten Verständnis des Klimasystems Erde lassen sich wichtige Fragen beantworten, wie zum Beispiel:

- Um wieviel wird es wärmer?
- Wie schnell findet die Erwärmung statt?
- Wird die Erwärmung überall auf der Welt gleich sein oder gibt es regionale Unterschiede?
- Was genau passiert mit dem Meeresspiegel, mit den Gletschern und den Eisschilden?

Die Beantwortung dieser Fragen erfordert einerseits geeignete Messungen - zum Beispiel lokal am Erdboden oder global mittels Satelliten - und andererseits entsprechendes Hintergrundwissen, um die Messungen richtig interpretieren zu können. Unverzichtbar ist hier auch Wissen aus anderen Bereichen einschließlich dem Bereich des Klimas der fernen Vergangenheit und der Klimamodellierung. Ein Schwerpunkt dieses Handbuchs ist es hierüber einen kleinen Überblick zu geben und insbesondere zu zeigen, welche Rolle Satellitenmessungen hierbei spielen.

Aber was ist mit der Zukunft? Keiner kann die Zukunft vorhersagen, aber man kann „Projektionen“ machen. Bei Klimaprojektionen macht man zunächst bestimmte Annahmen, z.B. über die zukünftigen CO₂-Emissionen. Konkret definiert man bestimmte Szenarien bzgl. CO₂ und weiteren Parametern und benutzt diese als Eingangsparameter für die Klimaberechnungen. Dadurch erhält man Aussagen wie „Wenn wir in Zukunft dies machen, dann wird aller Wahrscheinlichkeit nach das passieren.“

So wichtig die oben genannten Aspekte sind, sie zeigen primär das Problem auf aber noch nicht dessen Lösung. Das grundlegende Problem liegt in der Emission von Treibhausgasen wie CO₂ aber auch Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und anderen Gasen, welche zur Erderwärmung mit allen negativen Konsequenzen



beitragen. Die Lösung des Klimaproblems liegt in der Vermeidung dieser Treibhausgasemissionen, allen voran die Vermeidung der Emissionen von CO₂.

Leider ist dies leicht gesagt aber nur sehr schwer getan.

Die Vermeidung von Treibhausgasemissionen bedeutet nicht weniger als die Umstellung unseres gesamten Energiesystems auf kohlenstofffreie Energieversorgung plus weitere Maßnahmen, welche zum Beispiel die die Landwirtschaft und andere Bereiche betreffen.

Viele Forscher, Ingenieure, Investoren, Politiker und andere Entscheidungsträger aber auch viele andere und insbesondere auch viele junge Menschen - wie zum Beispiel die vielen bei *Fridays for Future* engagierten Schüler:innen - machen sich derzeit Gedanken darüber, wie diese Umstellung gelingen könnte. In diesem Handbuch gehen wir auch auf diesen sehr wichtigen Aspekt ein, aber nur relativ kurz, da dies nicht der Fokus dieses Handbuchs ist. Primär verweisen wir hier auf bereits existierende Informationsquellen.



3 Kurzübersicht Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6) WG1

Das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) – auf deutsch meist als Weltklimarat bezeichnet – hat 2021 den sechsten Bericht (*Assessment Report 6, AR6*) seiner 1. Arbeitsgruppe (*Working Group 1, WG1*) vorgelegt; siehe die IPCC AR6 Webseite (<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>) sowie die Webseite der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle (<https://www.de-ipcc.de/250.php>).

Der Gesamtbericht „*Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*“ (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>) ist sehr umfangreich (fast 4000 Seiten) und stellt den aktuellen Stand der Klimaforschung dar. Die 42-seitige „*Summary for Policymakers*“ (SPM) (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM.pdf) ist eine Zusammenfassung des Berichts (*IPCC AR6 WG1 SPM*).

In diesem Abschnitt zeigen wir nur eine der vielen Grafiken dieses wichtigen Berichts. Weitere Abbildungen dieses 6ten Sachstandsberichts des IPCC sind in Kapitel 18 zusammengestellt und erläutert.

Abbildung 3 zeigt Beobachtungen und Simulationen der global gemittelten Bodentemperatur der letzten 2000 Jahre (von Jahr 1 bis Jahr 2020) relativ zum Zeitraum 1850-1900 (die mittlere Temperatur in diesem Bezugszeitraum ist daher Null). Wie man klar erkennen kann, ist die Temperatur insbesondere in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen, und zwar um etwas mehr als 1 Grad Celsius relativ zum Bezugszeitraum. Dieser Originaltext findet sich im oben erwähnten SPM-Dokument (*IPCC AR6 WG1 SPM*) bzgl. dieses Temperaturanstiegs und seiner Ursache(n):

„The likely range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is likely that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by –0.1°C to 0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to 0.2°C“.

Auf deutsch:

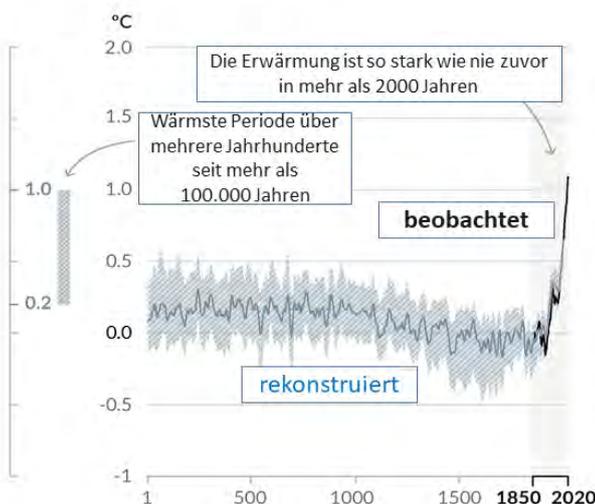
“Die wahrscheinliche Spanne des gesamten vom Menschen verursachten Anstiegs der globalen Oberflächentemperatur von 1850-1900 bis 2010-2019 beträgt 0,8°C bis 1,3°C, wobei die beste Schätzung bei 1,07°C liegt. Es ist wahrscheinlich, dass gut gemischte Treibhausgase zu einer Erwärmung von 1,0°C bis 2,0°C beigetragen haben, dass andere menschliche Faktoren (hauptsächlich Aerosole) zu einer Abkühlung von 0,0°C bis 0,8°C beigetragen haben, dass natürliche Faktoren die globale Oberflächentemperatur um -0,1°C bis 0,1°C verändert haben und dass die interne Variabilität sie um -0,2°C bis 0,2°C verändert hat.“

Anmerkung: „likely range“ bzw. „wahrscheinliche Spanne“ bedeutet hier eine Wahrscheinlichkeit von 66-100%.

Abbildung 3 b) (rechte Seite) zeigt, dass dieser Temperaturanstieg nicht durch natürliche Schwankungen (z.B. Sonnenstrahlung, Vulkane) erklärt werden kann, sondern nur durch die Berücksichtigung menschlicher Aktivitäten, insbesondere durch unsere CO₂-Emissionen resultierend aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas.

Änderung der globalen bodennahen Lufttemperatur relativ zu 1850-1900

a) Veränderung der globalen Oberflächentemperatur (dekadisches Mittel) wie **rekonstruiert** (1-2000) und **beobachtet** (1850-2020)



b) Veränderung der globalen Oberflächentemperatur (Jahresdurchschnitt) wie **beobachtet** und simuliert unter Verwendung **menschlicher & natürlicher** und nur **natürlicher** Faktoren (beide 1850-2020)

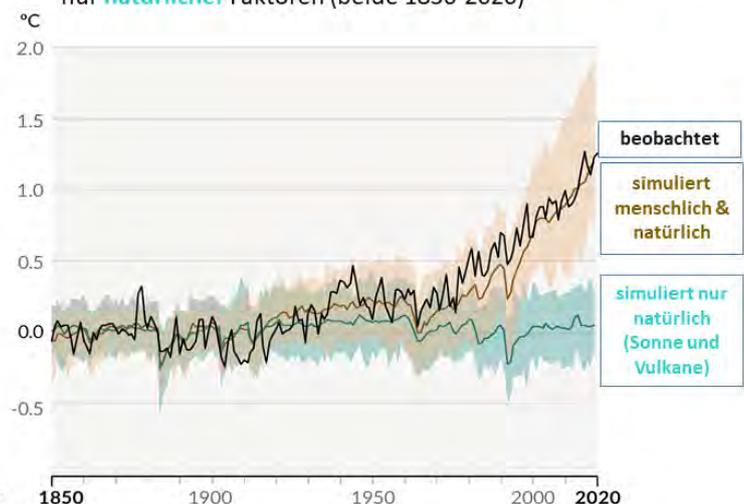


Abbildung 3: Änderungen der globalen Bodentemperatur relativ zum Bezugszeitraum 1850-1900 (Quelle (modifiziert durch Ersetzung des englischen Textes durch deutschen Text): IPCC AR6 WG1 SPM, Abb. SPM.1).

In den folgenden Kapiteln zeigen und erläutern wir weitere Grafiken, welche zum Verständnis der Klimaproblematik wichtig sind. Hierbei geht es einerseits darum ein Verständnis der zugrundeliegenden Komponenten und Prozesse zu erhalten (Treibhausgase, Treibhauseffekt, ...) und andererseits einen Überblick über klimarelevante Beobachtungsdatensätze zu liefern.

4 Quellen von Klimadaten und klimarelevanten Abbildungen

Klimadatenätze und darauf basierende klimarelevante Abbildungen können aus einer Vielzahl von Quellen bezogen werden. In diesem Abschnitt geben wir eine kurze Übersicht über einige dieser Quellen.

Auf den Webseiten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, <https://www.dwd.de>) kann man eine Vielzahl von klimarelevanten Informationen finden einschließlich aktualisierter Grafiken und Originaldaten (mit denen man eigene Abbildungen erstellen könnte). Als Beispiel sei hier die „Zeitreihen und Trends“ Seite des DWD genannt (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>), auf der interaktiv Diagramme und Tabellen für verschiedene klimarelevante Parameter (z.B. Temperatur, Niederschlag), Zeiträume (Monate, Jahreszeiten, Jahre) und Regionen (ganz Deutschland oder einzelne Bundesländer) erstellt werden können. Abbildung 4 zeigt als Beispiel die Jahresmitteltemperatur von Deutschland der Jahre 1881 – 2020. Es ist klar zu erkennen, dass die letzten Jahrzehnte im Mittel wärmer waren als die ersten Jahrzehnte. Der lineare Anstieg (dargestellt als rot gestrichelte Linie) zeigt, dass die Temperatur im dargestellten Zeitraum um 1,6 K bzw. 1,6 °C angestiegen ist. Das wärmste Jahr im gesamten Zeitraum war das Jahr 2018, welches durch einen sehr langen und sehr heißen Sommer gekennzeichnet war. Wie außergewöhnliche das Jahr 2018 in dieser Hinsicht war, das zeigt Abbildung 5. Diese Abbildung zeigt, dass die Temperatur im Zeitraum April bis November im Jahre 2018 um fast 3 Grad höher lag als im Referenzzeitraum 1961 – 1990 bei gleichzeitig stark reduziertem Niederschlag. Kein anderer der dargestellten Zeiträume war so warm und so niederschlagsarm wie derjenige des Jahres 2018. Betrachtet man aber nur die meteorologischen Sommermonate (Juni - August), dann war das Jahr 2003 das Jahr mit dem wärmsten Sommer, wie Abbildung 6 zeigt. Die Hitzewellen der Jahre 2003 und 2018 sind vielen noch sehr gut in Erinnerung.

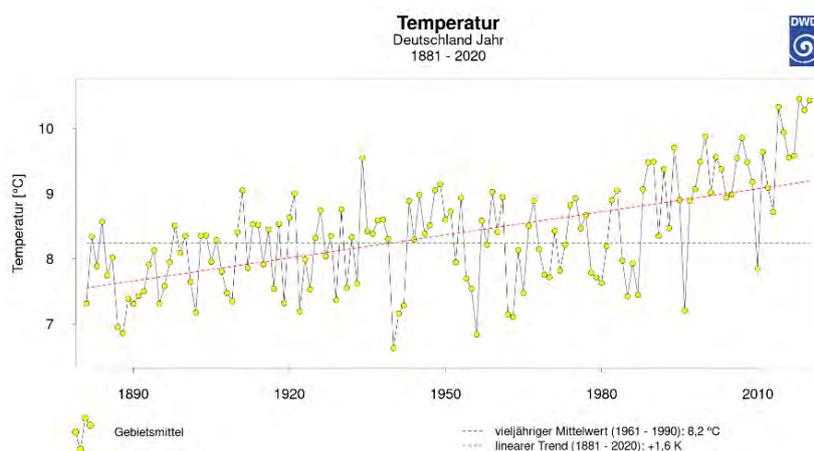


Abbildung 4: Jahresmitteltemperatur von Deutschland der Jahre 1881 – 2020. Quelle: DWD (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>).

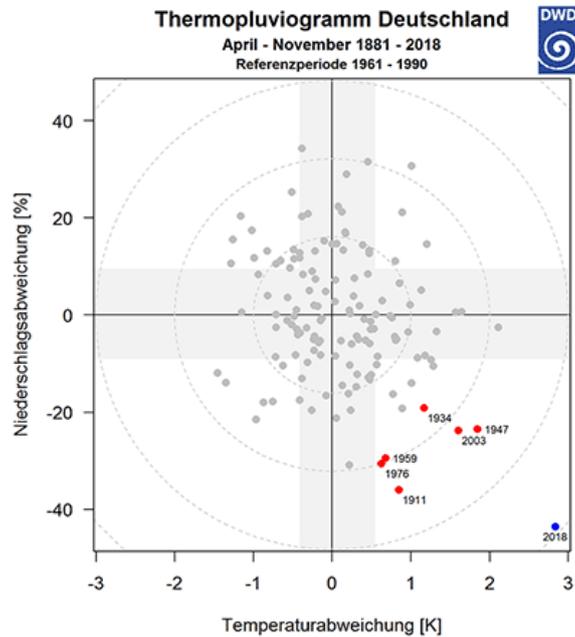


Abbildung 5: Sogenanntes Thermopluviogramm. Aufgetragen als kleine Kreise sind die mittlere Niederschlagsabweichung in Prozent gegen die Temperaturabweichung in Kelvin (oder Grad Celsius) für den Zeitraum April bis November der Jahre 1881 – 2018. Die Abweichungen beziehen sich auf die 30-jährige klimatische Referenzperiode 1961 – 1990. Das außergewöhnliche Jahr 2018 ist als blauer Kreis dargestellt. Quelle: DWD (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/190326/pk_2019.html).

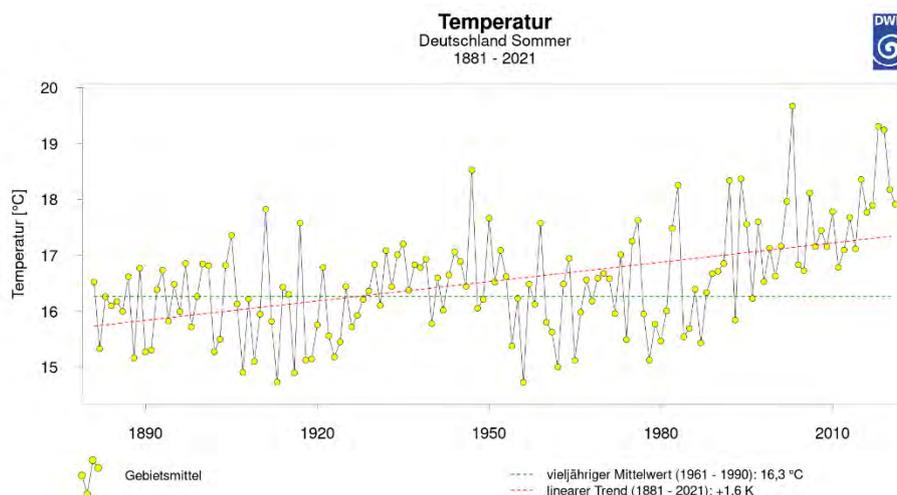


Abbildung 6: Mittlere Sommertemperatur von Deutschland der Jahre 1881 – 2020. Quelle: DWD (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>).



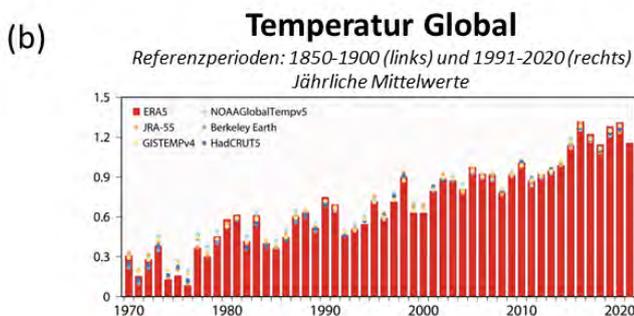
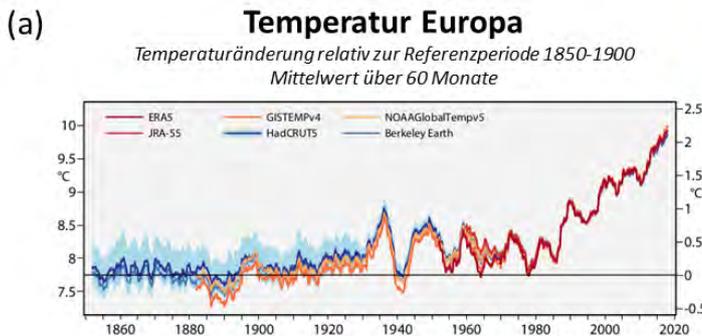
Eine wichtige Quelle für globale Klimadaten und klimarelevante Abbildungen ist der europäische Copernicus Klimawandelservice (*Climate Change Service, C3S*, <https://climate.copernicus.eu>). Der C3S stellt regelmäßig eine Vielzahl von aktualisierten klimarelevanten Abbildungen und anderen Informationen zur Verfügung. Viele dieser Abbildungen basieren auf Satellitenbeobachtungen bzw. anderen Messungen, wie zum Beispiel Radiosonden-Messungen für meteorologische Parameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Abbildung 7 zeigt Temperaturzeitreihen und eine globale Karte der bodennahen Lufttemperatur, wie sie vom C3S zur Verfügung gestellt wurden. Man sieht in Abbildung 7 (a) einen klaren Anstieg der Temperatur in Europa insbesondere seit den 1980er Jahren. Abbildung 7 (b) zeigt global und jährlich gemittelte Temperaturwerte. Man sieht, dass global gesehen die 7 letzten Jahre (2015 -2021) auch die 7 wärmsten Jahre waren. Abbildung 7 (c) zeigt, dass der Temperaturanstieg nicht überall auf der Welt der Gleiche ist. Insgesamt ist die Temperatur seit 1850-1900 global um etwa 1,2°C gestiegen, in Europa um 2,2°C und in der Arktis sogar um 3°C. Diese Abbildung zeigt aber auch, dass es durchaus sein kann, dass die Temperatur über viele Jahre nahezu unverändert bleibt, siehe z.B. den Zeitraum 2003-2013. Dies ist jedoch kein Indiz dafür, dass es den Klimawandel nicht gibt (siehe hierzu z.B. https://de.wikipedia.org/wiki/Pause_der_globalen_Erwärmung).

Für dieses Handbuch wurden verschiedene C3S Datensätze vom Copernicus *Climate Data Store* (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu>) des C3S heruntergeladen. Die mittels dieser Daten erstellten Grafiken werden in verschiedenen Kapiteln dieses Handbuchs verwendet. Weitere Informationen zu C3S sind in Abschnitt 8.3 zusammengestellt.

Eine weitere wichtige Quelle für klimarelevante Informationen und Satelliten-Datensätze sind die Webseiten der Klimawandel-Initiative (*Climate Change Initiative, CCI*, <https://climate.esa.int/de/>) der europäischen Raumfahrtagentur ESA, siehe Abbildung 8. Der ESA CCI Schwerpunkt liegt auf Forschung und Entwicklung, welche erforderlich ist, um aus Satelliten(roh)messungen (welche meist Strahlungsmessungen sind) klimarelevante Datensätze abzuleiten bzw. zu erzeugen. Die Verfahren zur Erzeugung vieler Datensätze, die heutzutage über den CDS des C3S bezogen werden können (siehe oben), wurden ursprünglich im Rahmen von ESA CCI entwickelt (z.B. verschiedene Satelliten CO₂- und Methan-Datensätze). ESA CCI deckt aber noch eine Vielzahl weiterer Aspekte ab einschließlich Erzeugung und Bereitstellung von Lernmaterialien für Schulen (<https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/>). Für dieses Handbuch wurden eine Vielzahl von Abbildungen der ESA CCI Webseiten verwendet. Weitere Informationen zu ESA CCI sind in Abschnitt 8.2 zusammengestellt.

Temperatur-Anstieg:



Temperaturdifferenz 2020 und 1981-2010

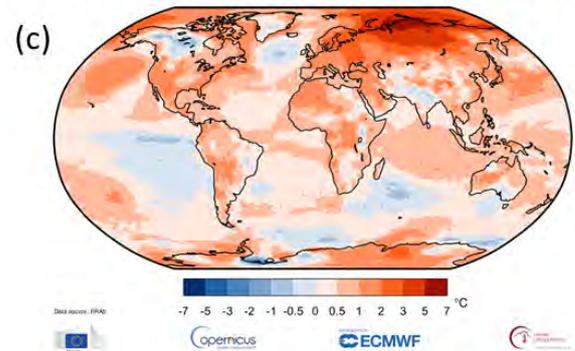


Abbildung 7: Darstellungen verschiedener Temperaturdatensätze, wie sie vom Copernicus Climate Change Service (C3S) bereitgestellt werden. (a) Zeitreihe der bodennahen Lufttemperatur in Europa als Änderung (Anomalie) relativ zum Referenzzeitraum 1850-1900. (b) Die global gemittelte Temperatur dargestellt als jährliche Mittelwerte relativ zu den 2 angegebenen Referenzperioden. Oben rechts: Zahlenwerte von Temperaturänderungen relativ zum Bezugszeitraum 1850-1900. (c) Globale Karte der Änderung der bodennahen Lufttemperatur des Jahres 2020 relative zum Bezugszeitraum 1981-2010. Quelle: C3S (<https://climate.copernicus.eu/>).



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

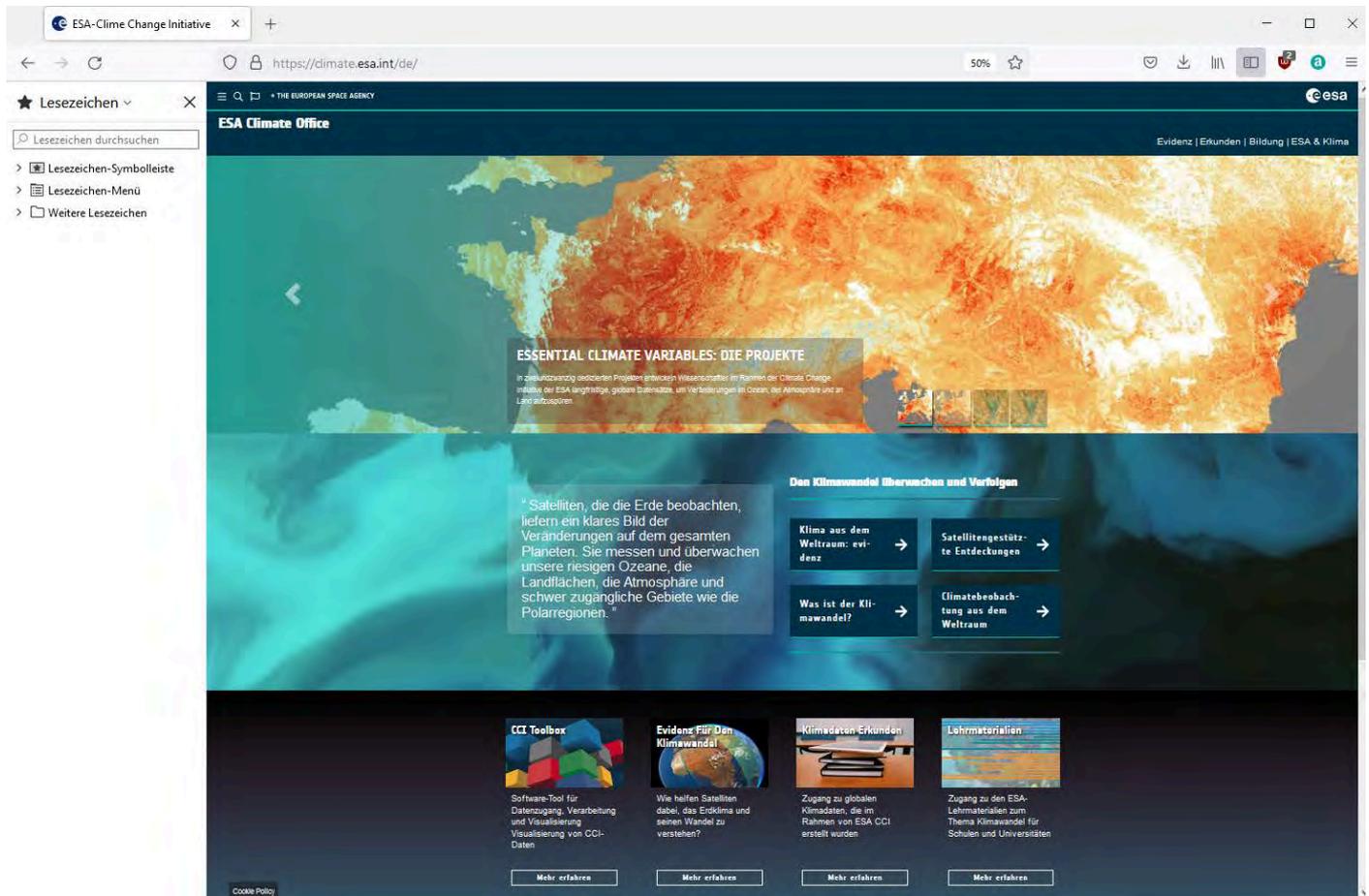


Abbildung 8: Screenshot der deutschen Version der ESA Climate Change Initiative (CCI) Webseite (<https://climate.esa.int/de/>). Schwerpunkt hier sind Satellitenbeobachtungen sogenannter Essentieller Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs). Wie man sieht, enthält diese Webseite eine Vielzahl von Links wie z.B. „Satellitengestützte Entdeckungen“, „Klimadaten erkunden“ und „Lehrmaterialien“ für Schulen.

Neben diesen beiden wichtigen Informationsquellen für globale Klimadaten soll hier noch die *ClimateReanalyzer* Webseite (<https://climatereanalyzer.org/>) der Universität Maine (USA) erwähnt werden (siehe Abbildung 9). Diese Webseite (leider nur auf Englisch) gestattet die interaktive Auswahl und Darstellung vieler Klimaparameter als Zeitreihen oder als Karten. Die Bedienung ist einfach zu verstehen dank der sehr gut gemachten Benutzeroberfläche. Die Resultate können entweder als Bild (in verschiedenen Formaten) aber auch als Datendatei (Formate: csv und json) erzeugt und heruntergeladen werden. Abbildung 9 zeigt als Beispiel die erzeugte Temperaturzeitreihe für Bremen.

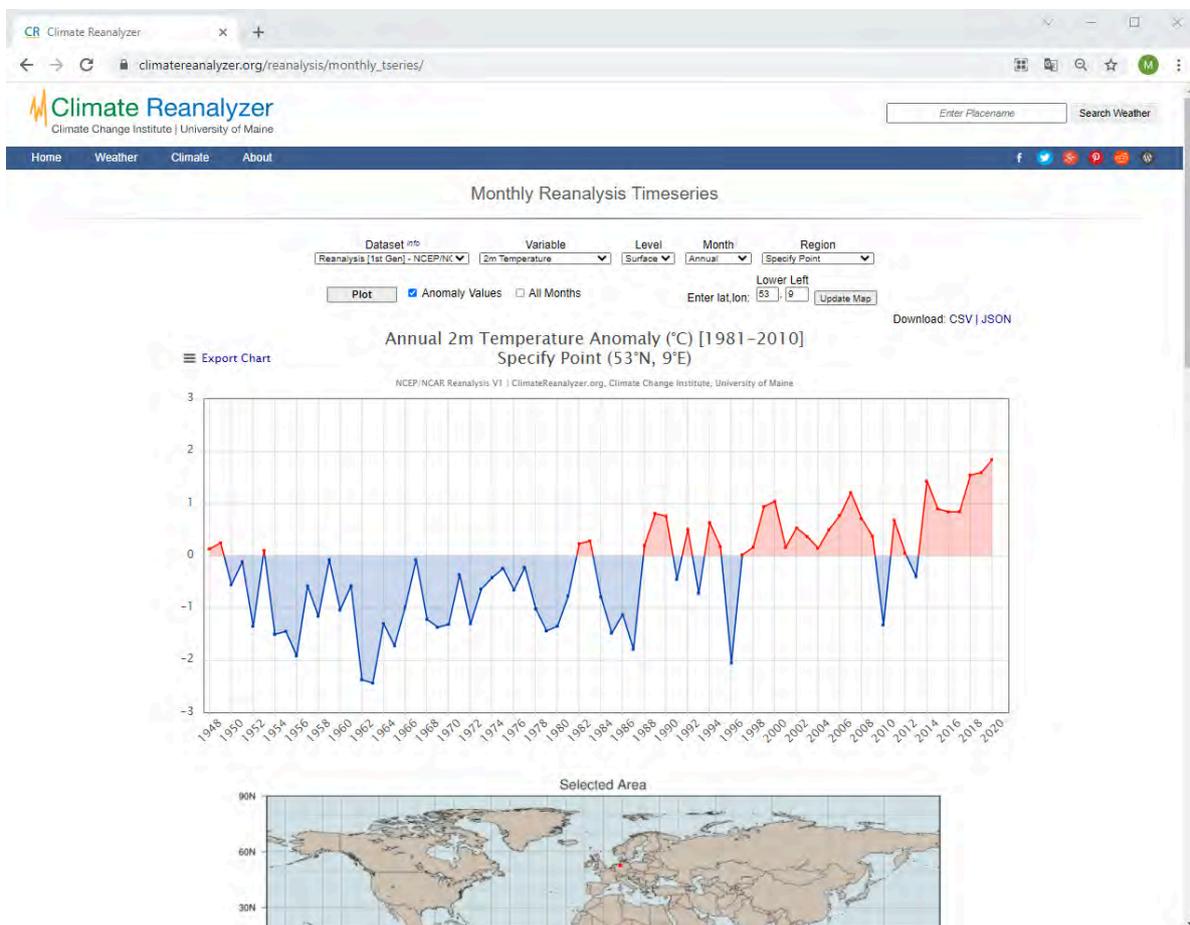


Abbildung 9: Screenshot der *ClimateReanalyzer* Webseite (<https://climatereanalyzer.org/>). Der Nutzer kann zwischen verschiedenen Datensätzen („Dataset“) und Variablen („Variable“) wählen und eine Vielzahl weiterer Einstellungen vornehmen. Hier dargestellt ist eine Zeitreihe der jährlich gemittelten 2-Meter-Temperatur für den „Specific Point“ Bremen, genauer gesagt für den Ort 53°Nord (Breitengrad, latitude) und 9°Ost (Längengrad, longitude), siehe auch den roten Punkt auf der globalen Karte. Wie man klar erkennen kann: auch in Bremen wird es immer wärmer.



5 Unterschied Wetter und Klima

Jede kennt Wetter, denn das sieht und spürt man, wenn man draußen ist. Es ist kalt oder warm, es gibt Wolken oder keine, es regnet oder nicht und der Wind weht mit einer bestimmten Windstärke aus einer bestimmten Richtung. Klima kann man nicht direkt spüren, Klima ist „der mittlere Zustand“ des Wetters gemittelt über einen langen Zeitraum, z.B. über 30 Jahre. Wenn man sagt „Gestern Abend war es sehr warm“, dann meint man das Wetter. Wenn man sagt „Als ich jung war, da war es im Winter sehr kalt“, dann meint man das Klima.

Man sagt: „**Wetter ist was man bekommt, Klima ist was man erwartet**“ (siehe z.B. <https://gutezitate.com/zitat/129964>). Was bedeutet dies? Bekommt man gar kein Klima? Wenn das stimmt, wieso kann es dann ein Klimaproblem geben?

Schauen wir uns eine Definition von Klima an. Auf einer Internetseite des Umweltbundesamtes findet man dies:

„Klima ist der mittlere Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum. Als Zeitspanne 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. Das Klima wird durch statistische Eigenschaften der Atmosphäre charakterisiert, wie Mittelwerte, Häufigkeiten, Andauerverhalten und Extremwerte meteorologischer Größen.“

Quelle: Umweltbundesamt

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

Klima wird also unter anderem durch Mittelwerte charakterisiert, also z.B. dem Mittelwert der Temperatur an einen Ort oder in einem Gebiet über einen langen Zeitraum, z.B. über 30 Jahre. Aussagen wie „früher war es hier deutlich kälter“ sind Aussagen über das Klima. Genauso eine Aussage wie „Man erwartet, dass es hier in Zukunft deutlich wärmer wird“. Ob diese Aussagen stimmen oder nicht, dass ist eine andere Frage. Die letzte Aussage drückt eine Erwartung für die Zukunft aus und passt daher zum oben genannten Zitat. Die Erwartung kann auch sehr konkret sein, zum Beispiel so: „Wenn sich das CO₂ in der Atmosphäre im Vergleich zum vorindustriellen Wert verdoppelt hat, dann wird die neue globale Mitteltemperatur nahe des Erdbodens um 3 Grad gestiegen sein“. Wobei Klimaforscher dies vermutlich nie so sagen würden. Und zwar aus mehreren Gründen. Ein Grund ist, dass das Klimasystem Erde träge reagiert und eine Temperaturänderung als Folge einer bestimmten Ursache (hier die CO₂-Zunahme) Zeit braucht. Die „neue Temperatur“ kann also auch erst viele Jahre später erreicht werden und wann dies der Fall ist hängt von



sehr vielen sehr schwer zu berücksichtigenden Faktoren ab. Aber darum soll es hier nicht gehen (mehr dazu später). Ein anderer Grund ist, dass diese Aussage mit Sicherheit nicht eintreten wird, da keiner Temperaturen exakt vorhersagen kann. Man kann diese nur schätzen und muss die geschätzten Mittelwerte zusammen mit einem Unsicherheitsbereich angeben. Zum Beispiel so: „Die Temperatur wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% im Bereich 1,5 und 4,5 Grad liegen, wobei der wahrscheinlichste Wert nahe 3 Grad liegt. Also kurz gesagt, die zukünftige Temperatur wird aller Voraussicht nach $3 \pm 1,5$ Grad betragen.“ Da dies eine Aussage über das Klima sein soll bedeutet dies, dass „3 Grad“ den erwarteten Mittelwert bezeichnet (welcher mit einer Unsicherheit von etwa $\pm 1,5$ Grad behaftet ist).

Beachte, dass ein Mittelwert nicht unbedingt existieren muss: Bei einem idealen Würfel ist der Mittelwert der Augenzahlen 1 bis 6 nämlich 3,5. Diese Zahl kommt jedoch bei einem Würfel gar nicht vor. Auch dies passt zum obigen Zitat, dass man nämlich nur Wetter bekommt aber kein Klima.

Aber nun wollen wir uns ein konkretes Beispiel ansehen um den Unterschied zwischen Wetter und Klima noch einmal zu verdeutlichen: Hierzu schauen wir uns als konkretes Beispiel die Temperatur der Atmosphäre zwei Meter über dem Erdboden an (also die sogenannte 2-Meter-Temperatur).

Temperatur kann man mit einem Thermometer messen und jeder hat vermutlich schon Thermometer benutzt, sei es im Krankheitsfall, um festzustellen, ob man Fieber hat, oder um die Zimmer- oder Außentemperatur zu bestimmen. Während noch vor einigen Jahrzehnten z.B. zum Fiebermessen fast ausschließlich Quecksilberthermometer benutzt wurden, hat man heute die Wahl und kann sich z.B. für ein digitales kontaktloses Thermometer entscheiden, welche Infrarotstrahlung misst und diese in einen Temperaturwert umrechnet, welcher dann auf dem Display angezeigt wird. Die Temperaturmessung „aus der Ferne“ (also ohne direkte Berührung) mittels Strahlung entspricht genau dem Prinzip der Satellitenmessung der Temperatur von Erdboden und Atmosphäre. Hierzu später mehr. Hier soll es erst einmal nur um das Ergebnis gehen, also um gemessene Temperaturen.

Atmosphärische Temperaturmessungen gibt es schon sehr lange. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) führt zum Beispiel solche Messungen durch und stellt sie auf seinen Internetseiten der Allgemeinheit zur Verfügung (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html>).

Abbildung 10 zeigt eine solche Zeitreihe für die Station Hohenpeißenberg. Gewählt wurde hier eine monatliche zeitliche Auflösung aber eine tägliche Auflösung wäre auch möglich gewesen.

Hohenpeißenberg ist das älteste Bergobservatorium der Welt, liegt 80 km südwestlich von München im Alpenvorland und erfasst seit 1781 meteorologische Daten

(<https://www.dwd.de/DE/derdwd/standorte/observatorien/mohp/mohp.html>).

Die in Abbildung 10 gezeigte Zeitreihe umfasst den Zeitraum 1781 – 2019. Was sieht man? Man sieht die Schwankungen der Temperatur aber keinen offensichtlichen Trend. Erst wenn man genauer hinschaut (siehe Abbildung 11) erkennt man, dass der Grund hierfür die starken jahreszeitlichen Schwankungen sind, insbesondere die hohen Temperaturen im Sommer im Vergleich zu den niedrigeren Temperaturen im

Winter. Große Schwankungen sind typisch für Wetter und würden hier Daten mit noch höherer Zeitauflösung gezeigt (z.B. stündlich), dann wären die Schwankungen sogar noch größer.

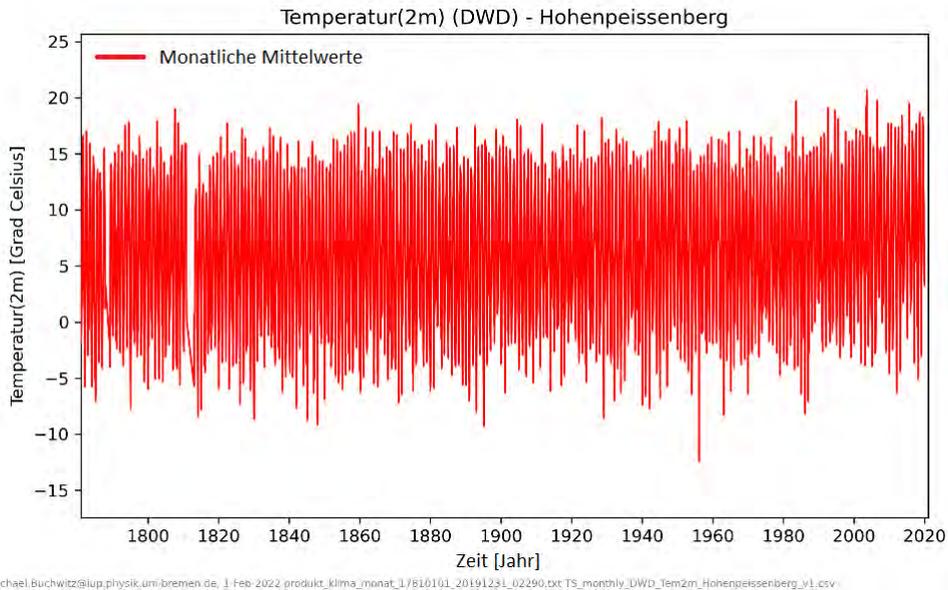


Abbildung 10: Temperatur-Zeitreihe Hohenpeißenberg 1781 – 2019 mit monatlicher Zeitauflösung. Quelle: DWD (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html>).

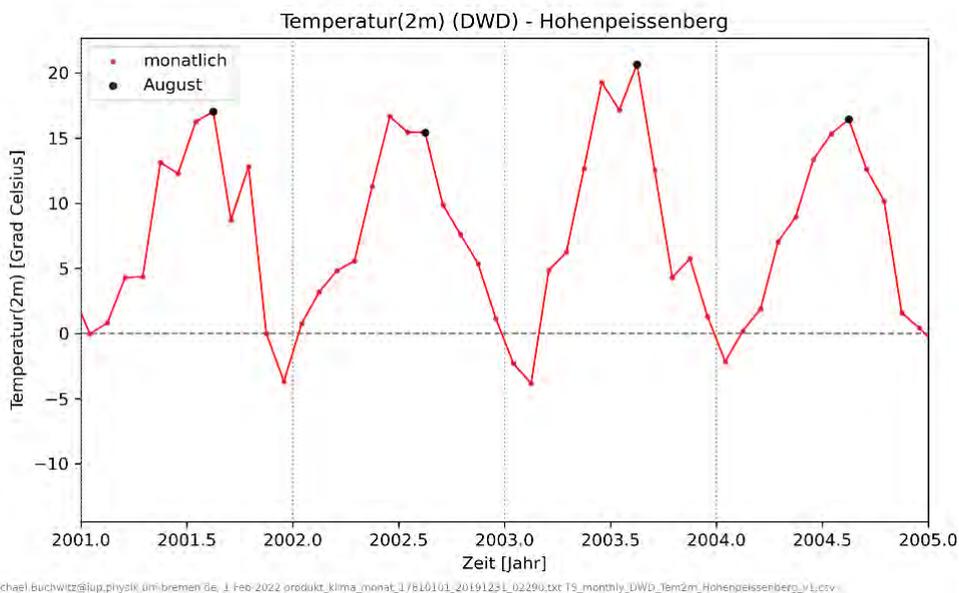


Abbildung 11: Wie Abbildung 10 jedoch nur für den Zeitraum 2001 – 2004. Jeder Punkt entspricht einem Monatsmittelwert. Die Augusttemperaturen sind als schwarze Punkte gekennzeichnet.

Wäre man ein Klimawandel-Skeptiker, dann könnte man hier aufhören und sagen: „Es gibt keinen Klimawandel, siehe Abbildung 10. Die Temperatur schwankt und das hat sie schon immer getan. Insbesondere gibt es keinen Trend. Den behaupteten Temperaturanstieg von etwas über 1 Grad Celsius relativ zur vorindustriellen Zeit gibt es laut dieser Messreihe gar nicht.“ Das stimmt aber so nicht, wie eine weitere Analyse dieser Daten zeigt (siehe z.B. Abbildung 12).

Der Grund dafür, dass man den relativ kleinen Temperaturanstieg - von etwa einen Grad in den letzten Jahrzehnten - nicht in Abbildung 10 erkennen kann, liegt darin, dass Abbildung 10 Monatsmittelwerte der Temperatur zeigt. Diese zeigen Schwankungen im Bereich 20 Grad einfach aufgrund hoher Temperaturen im Sommer und niedrigerer Temperaturen im Winter. Diese Schwankungen innerhalb eines jeden Jahres kann man aber durch Mittelung der Monatswerte eliminieren. Das Resultat, also die jährlichen Temperaturmittelwerte, sind in Abbildung 12 dargestellt. Hier sieht man, dass die Schwankungen von Jahr zu Jahr deutlich kleiner sind als die Schwankungen der Monatsmittelwerte (nämlich nur noch etwa ± 1 Grad anstatt ± 10 Grad). Jetzt sieht man einen klaren Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten von etwa 2 Grad von den 1960er Jahren bis zu den 2010er Jahren. Dieser Anstieg war natürlich bereits auch in den Originaldaten vorhanden, aber nicht deutlich sichtbar, wegen der großen Variabilität der Monatsmittelwerte. Der Temperaturanstieg ist keine Besonderheit dieser Messstation, wie Messungen an anderen Stationen zeigen (Abbildung 13 - Abbildung 15).

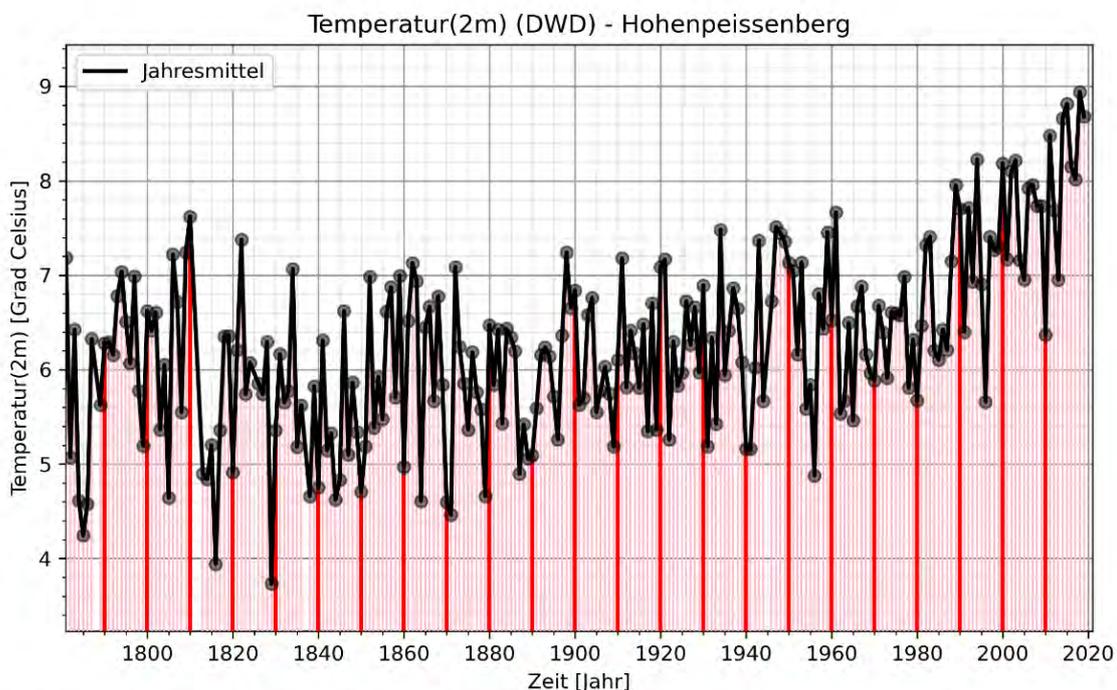


Abbildung 12: Jahresmittelwerte der Temperatur berechnet aus den in Abbildung 10 gezeigten Monatsmittelwerten.

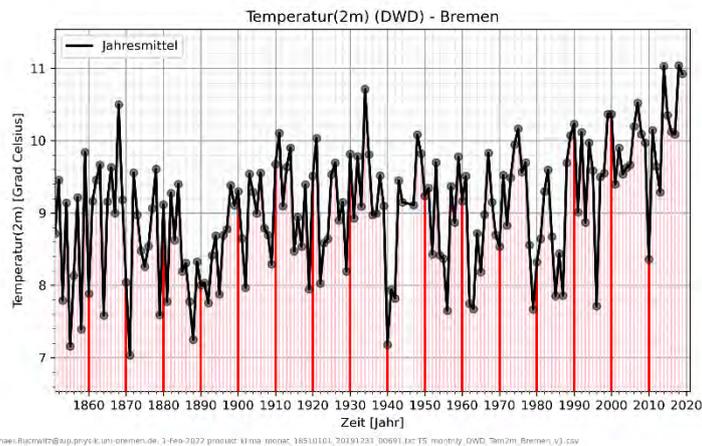


Abbildung 13: Wie Abbildung 12 aber für Station Bremen. Quelle: wie Abbildung 10 ebenfalls DWD.

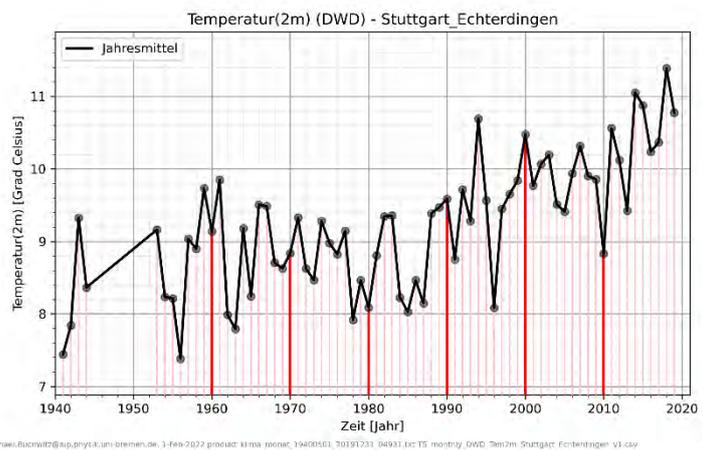


Abbildung 14: Wie Abbildung 12 aber für Station Stuttgart-Echterdingen. Quelle: wie Abbildung 10 ebenfalls DWD.

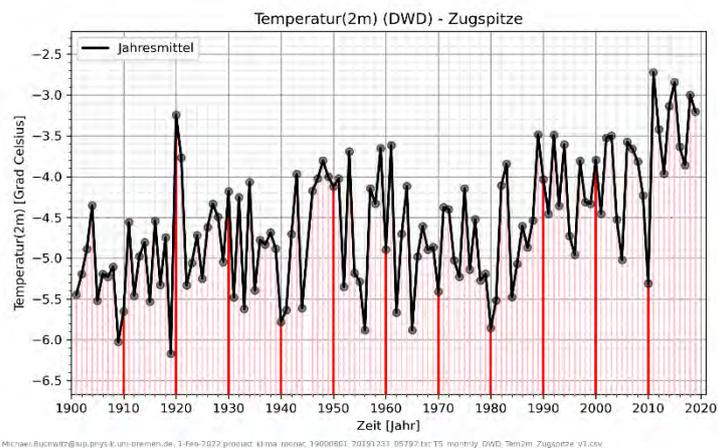


Abbildung 15: Wie Abbildung 12 aber für Station Zugspitze. Quelle: wie Abbildung 10 ebenfalls DWD.

Die erwartete Klimaänderung durch die Emission von Treibhausgasen drückt sich also u.a. durch eine Zunahme des Mittelwertes der Temperatur aus. Misst man die Temperatur an einem Ort in regelmäßigen Abständen in einem bestimmten Zeitraum (z.B. in einem bestimmten Monat), so stellt man fest, dass die Temperaturwerte meist einer glockenförmigen Verteilung folgen. Temperaturen am oder nahe am Mittelwert kommen am häufigsten vor aber es kommen auch Temperaturen vor, die mehr oder weniger deutlich vom Mittelwert abweichen.

Abbildung 16 zeigt schematisch zwei mögliche Häufigkeitsverteilungen, welche sich nur durch eine Verschiebung des Mittelwertes unterscheiden. Es ist hier also angenommen, dass sich das zukünftige Klima vom bisherigen Klima nur durch eine Verschiebung des Mittelwertes unterscheidet. Das ist eine einfache, aber vernünftige Annahme. Aber natürlich kann dies in der Realität komplizierter sein (und ist es auch, siehe Schönwiese, 2020), denn auch die Schwankung um den Mittelwert könnte sich ändern. Wie Abbildung 16 zeigt, kann selbst eine kleine Verschiebung des Mittelwertes eine drastische Änderung der Häufigkeit extremer Werte bedeuten. So kommen in diesem Beispiel Tage sehr großer Hitze (also Tage sehr hoher Temperatur) im neuen Klima sehr viel häufiger vor (roter Bereich) als im früheren Klima (hellblauer Bereich).

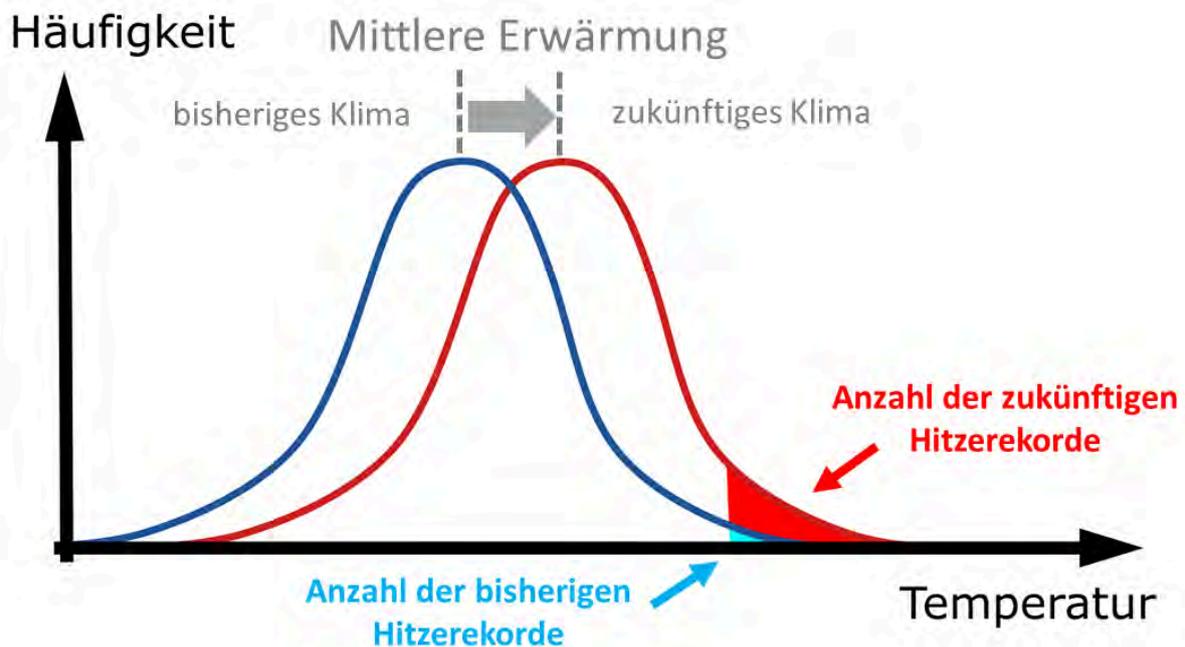


Abbildung 16: Vergleich zweier Häufigkeitsverteilungen, die sich nur durch eine Verschiebung des Mittelwertes unterscheiden. Wie man sieht, ändert sich insbesondere die Häufigkeit extremer Werte, hier die Anzahl sehr heißer und sehr kalter Tage.

Man erwartet also eine Zunahme extremer Werte bestimmter Parameter durch den Klimawandel. Insbesondere erwartet man eine Zunahme von Perioden großer Hitze, also sogenannter Hitzewellen, und eine Zunahme von Ereignissen, welche mit dem Wasser-Kreislauf zu tun haben, also eine Zunahme oder Abnahme der Regenperioden einschließlich Starkregenereignissen mit der Folge von Überschwemmungen oder Dürreperioden.

Beispiel für solche Extremereignisse ist die Hitzewelle in Kanada im Sommer 2021 (Abbildung 17) und die Flutkatastrophe in Deutschland ebenfalls im Sommer 2021 (Abbildung 18).

Wie gesagt, dies ist „Wetter, dass man bekommt“. Man erwartet eine Zunahme solcher Extreme als Folge des Klimawandels, aber man kann bei einzelnen Ereignissen nicht mit Sicherheit sagen, ob dieses oder jenes Ereignis durch den Klimawandel verursacht wurde oder nicht. Bestenfalls kann man eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben. Die Berechnung solcher Wahrscheinlichkeiten ist Gegenstand der Forschung, und zwar der sogenannten Zuordnungsforschung oder Attributionsforschung (siehe z. B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zuordnungsforschung>).

Hitzewelle Kanada

Dutzende Tote durch Hitze in Kanada – Rekordtemperatur von 49,5 Grad Celsius

In der enormen Hitze von fast 50 Grad Celsius an der kanadischen Westküste sind bereits einige Menschen gestorben. Allein in Vancouver gibt es 69 Todesfälle.

30. Juni 2021, 09:07 Uhr · Vancouver

Ein Artikel von



Laura Liboschik



Abbildung 17: Presseartikel zur Hitzewelle in Kanada im Juni 2021. Quelle: <https://www.swp.de/panorama/hitzewelle-kanada-temperaturen-49-grad-celsius-tote-vancouver-hitze-kuppel-gestorben-warnung-57787199.html>.

Internationale Presse

17 Kommentare 📌

Die Welt staunt über Deutschland

20. Juli 2021 um 12:22 Uhr | Lesedauer: 4 Minuten



Titelblatt der „New York Times“ von vergangendem Samstag. Foto: -



Analyse | Düsseldorf. Deutschland galt viele Jahrzehnte als ein Krisenbewältiger und Helfer in der Not. Nun ist das Land selbst überfordert. So schreiben Medien aus aller Welt über die Flut in NRW, Rheinland-Pfalz und Bayern.

Abbildung 18: Presseartikel zu den Überflutungen in Deutschland im Juli 2021. Quelle: https://rp-online.de/panorama/deutschland/hochwasser-in-deutschland-internationale-presse-ueber-flut-in-nrw-rlp_aid-61607071.



6 Der Treibhauseffekt

Wieso führen steigende atmosphärische Konzentrationen von CO₂ und anderen Treibhausgasen wie zum Beispiel Methan zur Erderwärmung?

Was sind überhaupt Treibhausgase?

Diese und weitere hiermit in Zusammenhang stehende Fragen werden in diesem Kapitel beantwortet.

Hierbei wird versucht alles so einfach wie möglich und trotzdem korrekt darzustellen. Dies ist jedoch nicht ganz einfach, da doch eine ganze Menge überwiegend physikalisches Vorwissen erforderlich ist, um den Treibhauseffekt zu verstehen. Wichtige physikalische und chemische Begriffe in diesem Zusammenhang sind „Energie“, „elektromagnetische Strahlung“, „Wellenlänge“, „Absorption“, „Emission“, „Konzentration“, „Molekül“, etc. Es wird für die nachfolgenden Erklärungen angenommen, dass diese Begriffe aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht bereits bekannt sind bzw. dass diese Begriffe hier (vom Lehrpersonal) erläutert werden und die Klimaproblematik als Motivation dient, sich intensiv mit diesen Begriffen zu beschäftigen.

6.1 Was sind Treibhausgase und wie wirken sie?

Der Treibhauseffekt hat viel mit Strahlung zu tun. Strahlung im Allgemeinen - und wenn es um Klimawandel geht wird hierunter fast ausschließlich elektromagnetische Strahlung verstanden (also z.B. keine radioaktive Strahlung) – spielt eine sehr wichtige Rolle für uns.

Die Erde erhält Energie von der Sonne in Form von Sonnenstrahlen und sie strahlt Energie als Wärmestrahlung wieder ins Weltall ab (Abbildung 19). All dies ist elektromagnetische Strahlung genauso wie sichtbares Licht. Mittels des Lichts sehen wir unsere Umgebung „aus der Ferne“ und betreiben damit „Fernerkundung“ genau wie Satelliten, die uns klimarelevante Informationen liefern. Auch deren Messprinzip beruht meist auf der Detektion von Strahlung (ähnlich dem Messprinzip des menschlichen Auges bzw. dem menschlichen Sehen).

Abbildung 19 zeigt im oberen Bereich zwei sogenannte Strahlungs-Spektren, d.h. die Stärke elektromagnetischer Strahlung aufgetragen in Abhängigkeit von deren Wellenlänge. Die Sonnenstrahlung ist links in Rot dargestellt. Die mit „5525 K“ bezeichnete Kurve zeigt die Strahlung eines sogenannten schwarzen Körpers (https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Körper) bei einer Temperatur von 5525 Kelvin, also bei einer Temperatur, welche in etwa der Temperatur der äußeren Schicht der Sonne entspricht. Spektren schwarzer Körper bezeichnet man auch als Planck-Spektren, nach dem deutschen Physiker Max Planck (https://de.wikipedia.org/wiki/Max_Planck), welcher sich intensiv mit der Strahlung schwarzer Körper beschäftigt hat. Die rote Kurve soll hier näherungsweise die bei der Erde angekommene



Sonnenstrahlung darstellen. Teile dieser Strahlung werden von den Bestandteilen der Erdatmosphäre absorbiert (verschluckt) und gelangen daher nicht bis zum Erdboden. Wieviel absorbiert wird hängt von der Wellenlänge ab. Fast vollständig absorbiert werden die sehr kurzen Wellenlängen, also das ultraviolette (UV) Licht, nämlich durch das sich in der Atmosphäre befindliche Ozon. Aber auch bei längeren Wellenlängen wird Sonnenlicht absorbiert, und zwar hauptsächlich durch Wasserdampf. Wo genau im Spektrum welches Gas wieviel absorbiert, ist im unteren Teil des Bildes gezeigt.

Rechts in Blau ist die Wärmestrahlung der Erde dargestellt zusammen mit einigen Planck-Spektren, diesmal aber für die viel niedrigeren Temperaturen, welche für die Erdatmosphäre typisch sind. Wie man sieht, weicht die ins Weltall abgestrahlte Wärmestrahlung in ihrem Spektralverlauf (also in ihrer Wellenlängenabhängigkeit) stark von den „glatten“ Planck-Kurven ab. Dies liegt daran, dass die Atmosphäre Gase enthält, welche diese Wärmestrahlung stark absorbieren, nämlich insbesondere Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Ozon (O₃), Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O). Daneben gibt es eine Vielzahl schwacher Absorber, die hier nicht gezeigt werden, damit die Abbildung nicht überladen wird.

Diese Gase sind Treibhausgase, da sie die Abstrahlung der Wärmestrahlung der Erde vom Erdboden in den Weltraum blockieren (genauer gesagt absorbieren, also „verschlucken“). Dadurch wird die Erde Teile der Energie, welche sie von der Sonne bekommen hat, nicht mehr so einfach wieder los. Die resultierende Nettozufuhr von Energie resultiert in einer Erwärmung, also in einer Zunahme der Temperatur. Und zwar nimmt die Temperatur so lange zu, bis die Nettozufuhr Null ist, die Erde also genau so viel Energie wieder abstrahlt, wie sie vorher absorbiert hat. Die Wärmeabstrahlung nimmt mit steigender Temperatur zu und daher kann umso mehr Energie abgestrahlt werden, je wärmer es ist.

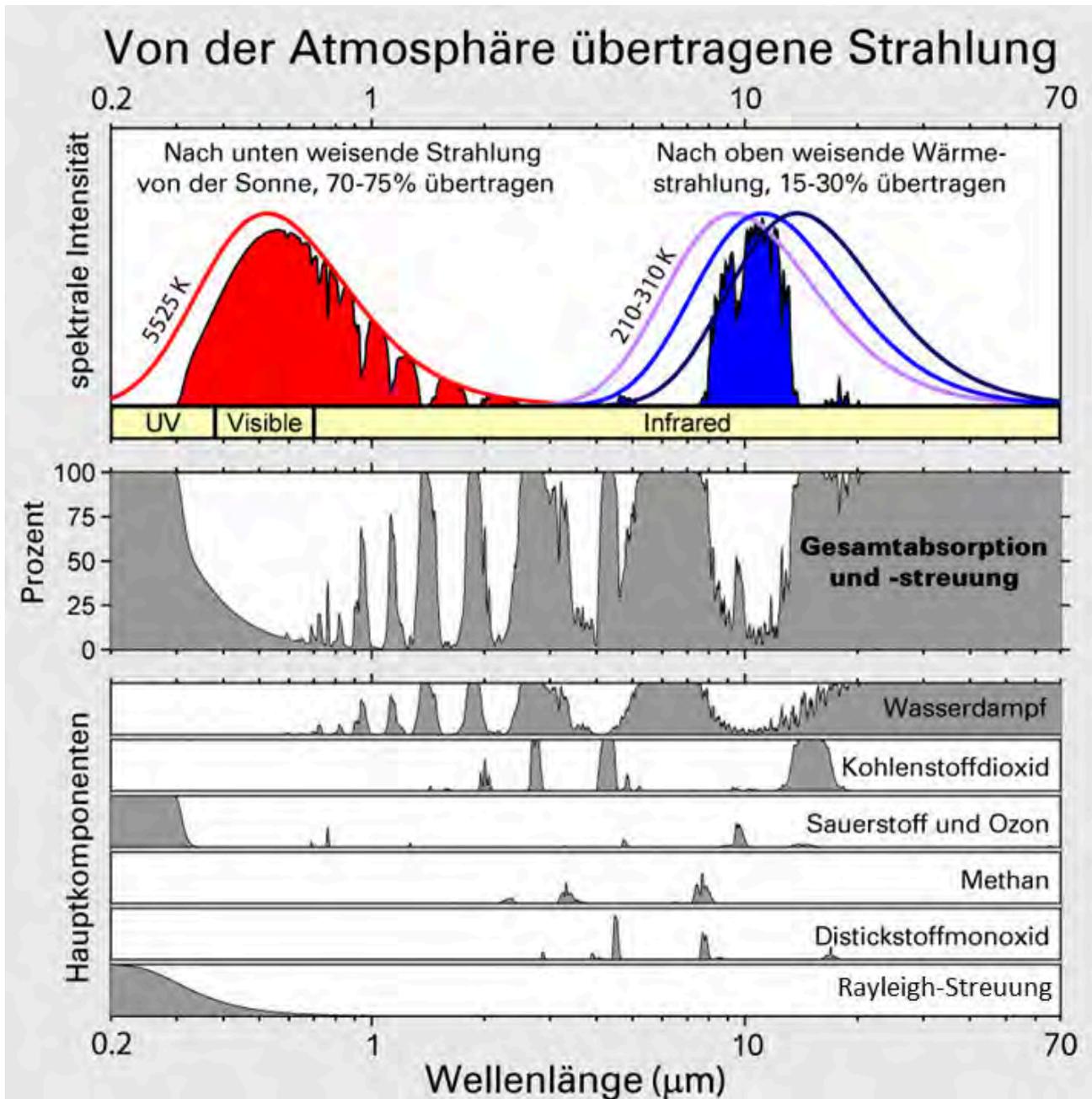


Abbildung 19: Von der Atmosphäre übertragene Strahlung als Funktion der Wellenlänge. Oben: Kurzwellige Sonnenstrahlung in Rot und langwellige Wärmestrahlung in Blau. Mitte: Anteil absorbiertes Strahlung. Unten: Komponenten der absorbierten Strahlung (siehe z.B. <https://de.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Streuung>). Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Idealisiertes_Treibhausmodell#/media/Datei:Atmospheric_Transmission_de.png

Treibhausgase absorbieren also die vom Erdboden kommende Wärmestrahlung. Wärmestrahlung wird auch Infrarotstrahlung genannt und Gase, die atmosphärische Strahlung im infraroten Spektralbereich absorbieren, sind Treibhausgase.

Was machen diese Gase mit der absorbierten vom Erdboden kommenden Wärmestrahlung? Sie erwärmen sich und strahlen die absorbierte Energie in Form von Wärmestrahlung wieder ab - und zwar in alle Richtungen auch nach unten Richtung Erdboden (Abbildung 20). Dadurch wird es in Bodennähe wärmer als es ohne diese Strahlung wäre. Treibhausgase wirken quasi wie eine zweite zusätzliche Wärmequelle (zusätzlich zur Sonne), welche oberhalb von uns in der Atmosphäre liegt und uns mit wärmender Infrarot-Strahlung bescheint. Ähnlich können Wolken wirken und man kann deren wärmende Wirkung unter bestimmten Umständen, z.B. in einer kalten Winternacht, spüren (insbesondere durch den Vergleich der Temperaturen bei klarem und bei bewölktem Himmel).

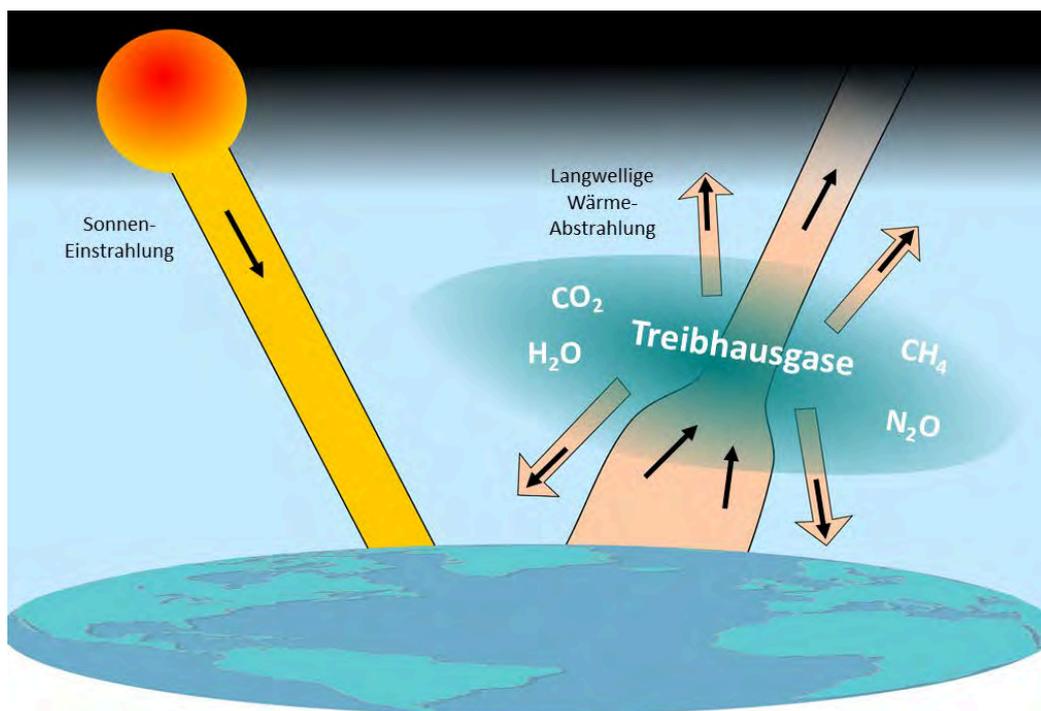


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Die Erde bekommt ihre Energie durch die Sonnenstrahlung (stark vereinfacht links dargestellt), wodurch Atmosphäre, Land und Ozeane erwärmt werden. Mittels Wärmestrahlung (rechts dargestellt), wird im Gleichgewicht die gleiche Energiemenge im Mittel wieder ins Weltall abgestrahlt. Die Treibhausgase blockieren (absorbieren) die vom Erdboden abgestrahlte Wärmestrahlung und geben Wärmestrahlung in alle Richtungen wieder ab (Emission). Die nach unten gerichtete Strahlung wird als Gegenstrahlung (oder Rückstrahlung) bezeichnet. Hierdurch wirken Treibhausgase wie eine zusätzliche Wärmequelle.



Welche Temperatur sich auf der Erde im Mittel einstellt hängt eng mit der Energiebilanz der Erde zusammen (diesem Thema ist Abschnitt 6.3 gewidmet). Einen stabilen Gleichgewichtszustand gibt es z.B. nur, wenn die zugeführte Sonne-Energie („Energie rein“) gleich der abgeführten Wärmestrahlung („Energie raus“) ist. Wenn dies nicht der Fall ist, dann wird es wärmer (wenn z.B. „Energie rein“ größer ist als „Energie raus“) oder kälter (wenn das Gegenteil der Fall ist). Der Ausgleich findet dadurch statt, dass die Erde ihre Temperatur verändert. Wenn „Energie rein“ größer ist als „Energie raus“, dann wird es wärmer und damit steigt „Energie raus“ (entsprechend dem im nachfolgenden Abschnitt 6.2 erläuterten Stefan-Boltzmann-Gesetz), und zwar so lange, bis „Energie raus = Energie rein“ ist. Wenn dies der Fall ist, dann ist ein Gleichgewichtszustand mit einer entsprechenden (neuen) Gleichgewichtstemperatur erreicht.

Zugegeben, der Treibhauseffekt ist recht kompliziert. Daher ist es vielleicht hilfreich eine Analogie aus unserer Alltagswelt zu verwenden. Man kann sich die Wirkung der Treibhausgase, also den Treibhauseffekt, analog der Wirkung eines verstopften Abflusses einer Badewanne vorstellen (diese Analogie basiert auf der in Archer, 2007, geschilderten *sink analogy*):

Man dreht den Wasserhahn der Badewanne auf und dadurch füllt sich die Badewanne mit Wasser. Das einströmende Wasser entspricht hier dem Sonnenlicht. Der Abfluss sein offen, so dass Wasser auch abfließen kann. Die Menge des abfließenden Wassers (angegeben in z.B. Liter pro Sekunde) sei proportional zur Wasserhöhe. Einem bestimmten Wasserstand (z.B. 10 cm) entspricht also eine bestimmte Abflussmenge (z.B. 1 Liter pro Sekunde) und wenn der Wasserstand in der Badewanne doppelt so hoch ist (z.B. 20 cm), dann wird doppelt so viel Wasser durch den Abfluss nach draußen gedrückt (in diesem Fall 2 Liter pro Sekunde). Das genaue Verhältnis von Abflussmenge zu Wasserstand, also der Wert der entsprechenden Proportionalitätskonstanten, hängt von verschiedenen Größen, wie z.B. der Größe (Durchmesser) des Abflusses, ab. Bei der Wärmestrahlung gibt es auch eine solche Proportionalität: Die abgestrahlte Energie (bzw. Leistung pro Flächeneinheit, angegeben in z.B. Watt pro Quadratmeter) ist proportional der 4ten Potenz der Temperatur, d.h. je höher die Temperatur, desto höher die Abstrahlung (dies ist ein physikalisches Gesetz - genannt Stefan-Boltzmann-Gesetz - und wir werden dies im nachfolgenden Abschnitt 6.2 näher erläutern und für Berechnungen verwenden). Das Wasser wird nun so lange ansteigen, bis genauso viel Wasser die Badewanne durch den Abfluss verlässt, wie ihr zugeführt wird. Wenn dies der Fall ist, also die Bedingung „Zufluss gleich Abfluss“ gilt, dann bleibt die Wasserhöhe konstant, d.h. sie ändert sich nicht mehr. Es gibt also einen „Gleichgewichtswasserstand“ welcher unserer „Gleichgewichtstemperatur“ entspricht. Wenn nun der Abfluss teilweise verstopft wird, dann steigt als Folge der Wasserstand, da nun mehr Druck erforderlich ist, um das Wasser durch den engeren Abfluss zu pressen (die oben erwähnte Proportionalitätskonstante ändert sich also). Es stellt sich eine neuer – höherer – Gleichgewichtswasserstand ein. Etwas Analoges passiert in der Atmosphäre, wenn die Konzentration der Treibhausgase steigt: Der Abfluss der Wärmestrahlung vom Erdboden in den Weltraum wird behindert und man benötigt eine höhere Gleichgewichtstemperatur, um die vom Erdboden abgestrahlte Wärmeenergie bildlich gesprochen „durch die verstopfte Atmosphäre zu pressen“.



Sind Treibhausgase nun gut oder schlecht?

Zunächst einmal: Treibhausgase sind sehr wichtig für uns. Ohne Treibhausgase wäre es auf der Erde bitterkalt: etwa -18°C . Die Erde wäre dann ein lebensfeindlicher mit Eis und Schnee bedeckter Ort. Dank der Treibhausgase und des damit verbundenen „natürlichen Treibhauseffektes“ ist es auf der Erde im Mittel etwa 33°C wärmer, also etwa $+15^{\circ}\text{C}$. Das es Treibhausgase gibt, ist also kein Problem. Nur darf ihre Konzentration in der Atmosphäre nicht zu hoch werden. Dann wird es zu warm und dann haben wir ein Problem. Leider passiert genau dies: Zur Energiegewinnung verbrennen wir fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas und dadurch entsteht CO_2 und Methan und deren atmosphärische Konzentrationen steigen.

Dass die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre global ansteigen kann man sogar von Weltraum aus mittels Satelliten beobachten, allerdings erst seit dem Jahre 2002 dank des im Jahre 2002 gestarteten europäischen Umweltsatelliten ENVISAT (<https://de.wikipedia.org/wiki/Envisat>) und dessen Messinstrument SCIAMACHY (<https://de.wikipedia.org/wiki/SCIAMACHY>). Näheres hierzu siehe Kapitel 8.4.

Es ist jedoch schon länger bekannt, dass CO_2 ansteigt, nämlich seit den Messungen von Charles Keeling (https://de.wikipedia.org/wiki/Charles_David_Keeling) auf dem Berg Mauna Loa auf Hawaii, welche 1958 begannen (siehe Abbildung 21).

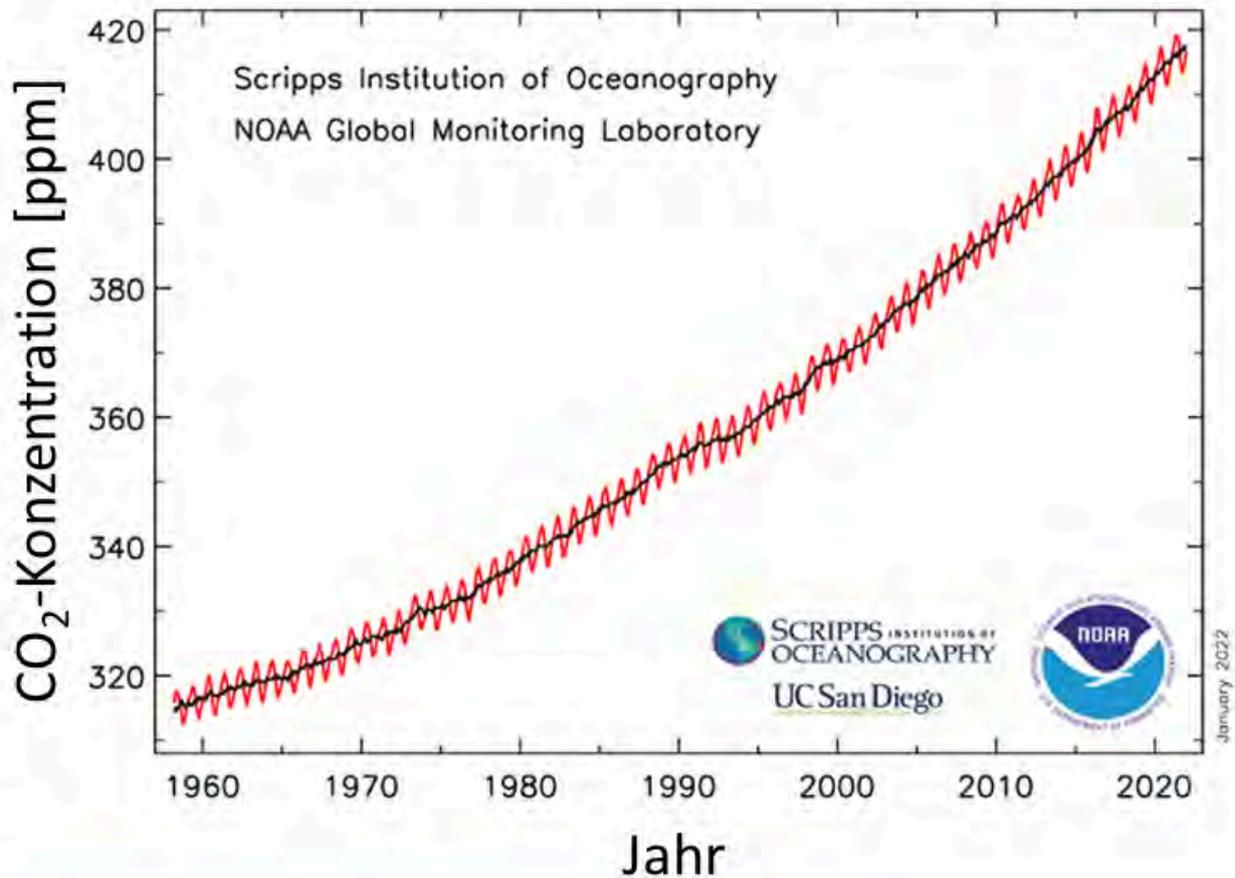
Diese Messreihe wird bis heute fortgesetzt und aktuelle Bilder dieser CO_2 -Zeitreihe sind auf der entsprechenden NOAA Webseite zu sehen (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>).

Die atmosphärische Konzentration ist hier (z.B. Abbildung 21) in „Teilchen pro Millionen“ (*parts per million, ppm*) angegeben. 400 ppm bedeutet, dass 400 von einer Millionen Luftmolekülen CO_2 -Moleküle sind. Ein ppm bedeutet ein Millionstel oder „zehn hoch minus 6“ ($= 10^{-6} = 0,000001$) genauso wie ein Prozent „zehn hoch minus 2“ ($= 10^{-2} = 0,01$) bedeutet. 400 ppm entspricht also hier einem Teilchen- bzw. Molekülanteil von $400 \times 10^{-6} = 0,04 \times 10^{-2} = 0,04\%$. Der Massenanteil ist etwa $0,06\%$, da ein CO_2 -Moleküle etwa 50% schwerer ist als ein mittleres Luftmolekül.

Wie man in Abbildung 21 erkennen kann: die CO_2 -Konzentration zeigt jahreszeitliche Schwankungen und steigt im Laufe der Zeit an. Und nicht nur das: Es wird scheinbar immer schlimmer, denn die Steigung nimmt nicht ab – wie man es vielleicht als Folge der Maßnahmen zum Schutze des Klimas erwarten würde – sondern sie nimmt sogar zu. Dies wird noch deutlicher, wenn man sich die jährliche Wachstumsrate (*growth rate*) ansieht, hier gezeigt als Abbildung 22 (Quelle und weitere Informationen: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html>).

Mehr hierzu siehe spätere Abschnitte, insbesondere Abschnitt 7.4, wo der Kohlenstoffkreislauf erläutert wird, Abschnitt 8.4, wenn die CO_2 -Satellitenmessungen vorgestellt werden und Anhang 2 (Kapitel 19), wo weitere Informationen zum Kohlenstoffkreislauf zusammengestellt sind.

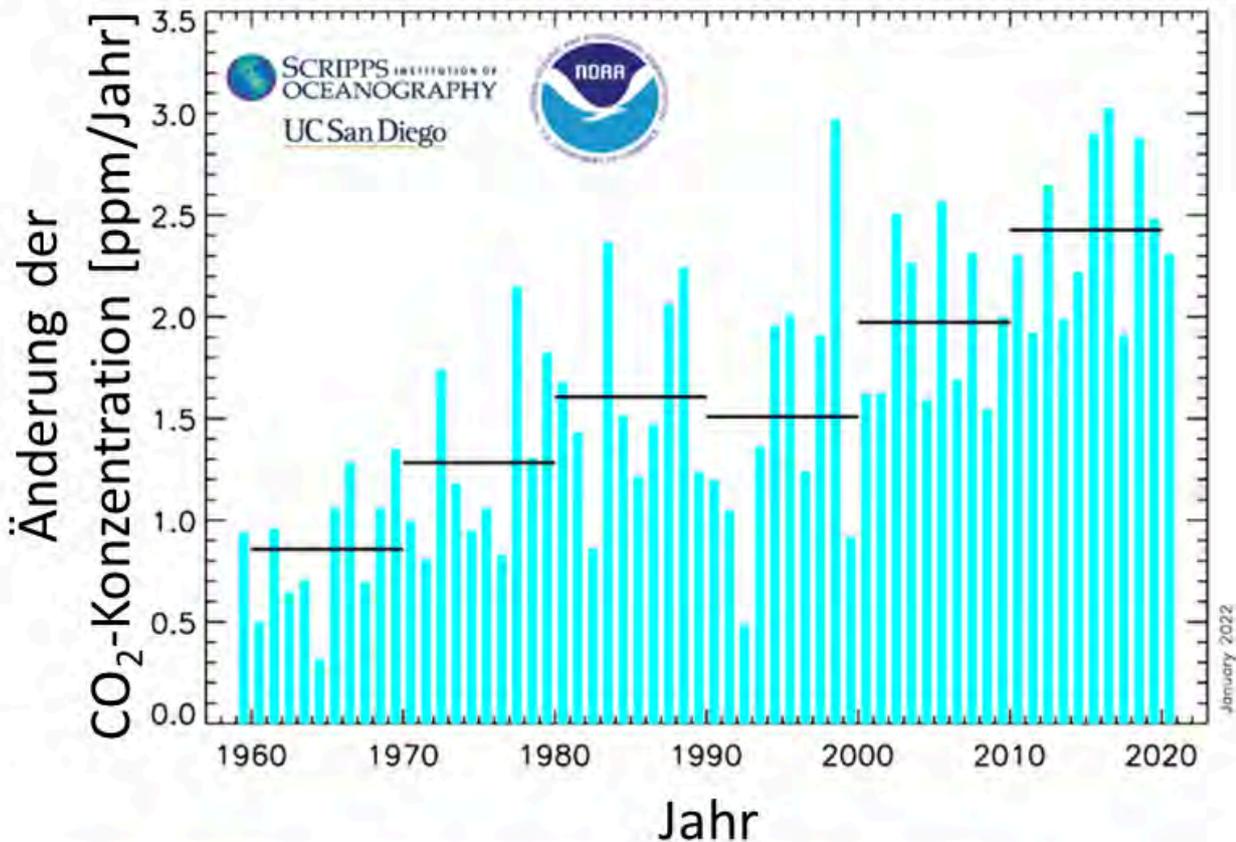
Messungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf Mauna Loa, Hawaii



Quelle: https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png

Abbildung 21: Zeitserie der atmosphärischen CO₂-Konzentration (in parts per million, ppm) gemessen auf Mauna Loa, Hawaii (Quelle (bitte anklicken, um die neueste Version dieser Grafik zu erhalten): https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png).

Jährliche Änderungsrate der atmosphärischen CO₂-Konzentration gemessen auf Mauna Loa, Hawaii



Quelle: https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo_anngr.png

Abbildung 22: Jährliche Änderungs- bzw. Wachstumsrate („annual growth rate“) der atmosphärischen CO₂-Konzentration in ppm/Jahr (Quelle (bitte anklicken, um die neueste Version dieser Grafik zu erhalten): https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo_anngr.png).



6.2 Alles strahlt!

Alles strahlt, d.h. jeder Körper, der eine Temperatur oberhalb von 0 Kelvin hat, also eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von Null Kelvin (also oberhalb von -273,15 Grad Celsius), strahlt Energie ab. Den Zusammenhang zwischen Temperatur und abgestrahlter Energie (genauer gesagt Leistung) beschreibt dieses Gesetz:

$$P = \epsilon \sigma T^4$$

Gleichung 1

Wir werden dieses Gesetz in späteren Abschnitten verwenden, da es eine wichtige Rolle beim quantitativen Verständnis des Klimas und seiner Veränderung spielt. T ist hier die Temperatur eines Körpers (wobei dieser auch ein Gas sein kann, wie z.B. die Erdatmosphäre) und P ist dessen abgestrahlte Energie pro Flächeneinheit (also z.B. pro Quadratmeter) und pro Zeiteinheit (also z.B. pro Sekunde). „Energie pro Zeiteinheit“ bezeichnet man auch als Leistung (englisch *power*, daher hier das P). σ ist eine Konstante, die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante (sie hat den Wert $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$).

ϵ ist die sogenannte Emissivität des betrachteten Körpers. Je nach betrachtetem Körper kann diese Größe einfach eine Konstante sein oder auch eine sehr komplexe Wellenlängenabhängigkeit zeigen. Für sogenannte „Schwarze Körper“ ist $\epsilon = 1$. Für unsere Zwecke ist es meist eine brauchbare Näherung $\epsilon = 1$ zu verwenden. Dies ist der einfachste Fall und damit wird aus der obigen Gleichung das Stefan-Boltzmann-Gesetz (<https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>):

$$P = \sigma T^4$$

Gleichung 2

In dieser Formel müssen die Einheiten der einzelnen Terme natürlich zueinander passen. Mit der Verwendung von $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ folgt, dass die Temperatur T die Einheit Kelvin (also nicht Grad Celsius) haben muss und das resultierende P damit die Einheit W/m^2 hat. P ist also die abgestrahlte Leistung pro Quadratmeter.

Wie dieses Gesetz „aussieht“ zeigen die Abbildung 23 und Abbildung 24. Wie man sieht, nimmt die Strahlung mit zunehmender Temperatur zu und zwar entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit „ T hoch 4“. Das heißt, dass die abgestrahlte Energie um den Faktor 16 ($=2^4$) zunimmt, wenn sich die Temperatur verdoppelt). Wie man Abbildung 24 entnehmen kann, beträgt die Zunahme der Strahlung im Bereich um die -20 °C etwa $3,6 \text{ W}/\text{m}^2$ pro Grad Temperaturzunahme.

Anmerkung: Wie z.B. in Houghton, 2004 (Seite 82) beschrieben, betrug die Störung der Strahlungsbilanz der Erde, der sogenannte „Strahlungsantrieb“ (Näheres hierzu siehe Abschnitt 6.4), $3,3 \text{ W}/\text{m}^2$ in den 2010er Jahren als der Temperaturanstieg im Vergleich zu vorindustrieller Zeit (also um 1750) etwa 1 °C betrug. Diese $3,3 \text{ W}/\text{m}^2$ pro Grad liegen sehr nahe an den hier mittels Stefan-Boltzmann-Gesetz berechneten $3,6 \text{ W}/\text{m}^2$ pro Grad. Die $3,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ hängen in gewisser Weise eng mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz zusammen aber auf kompliziertere Art als durch einfache direkte Anwendung dieser Formel. Nichtsdestotrotz zeigen die nahe beieinanderliegenden numerischen

Werte, mit welcher Strahlung- bzw. Energieänderung man bei einer Temperaturzunahme von 1 Grad zu rechnen hat, nämlich mit einigen Watt pro Quadratmeter bzw. andersherum: Die Temperatur ändert sich um einige 0,1 Grad pro Watt pro Quadratmeter Energieänderung.

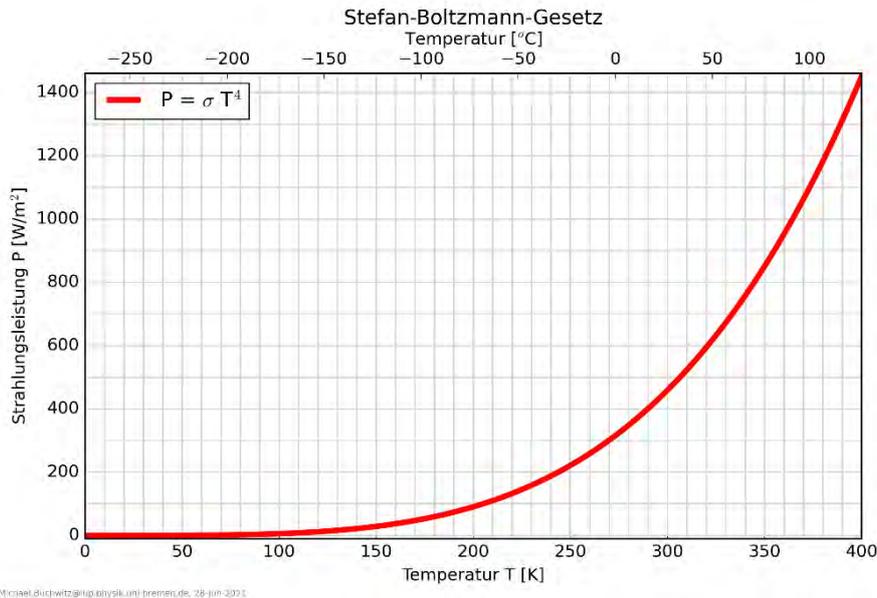


Abbildung 23: Darstellung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes im Temperaturbereich 0-400 Kelvin.

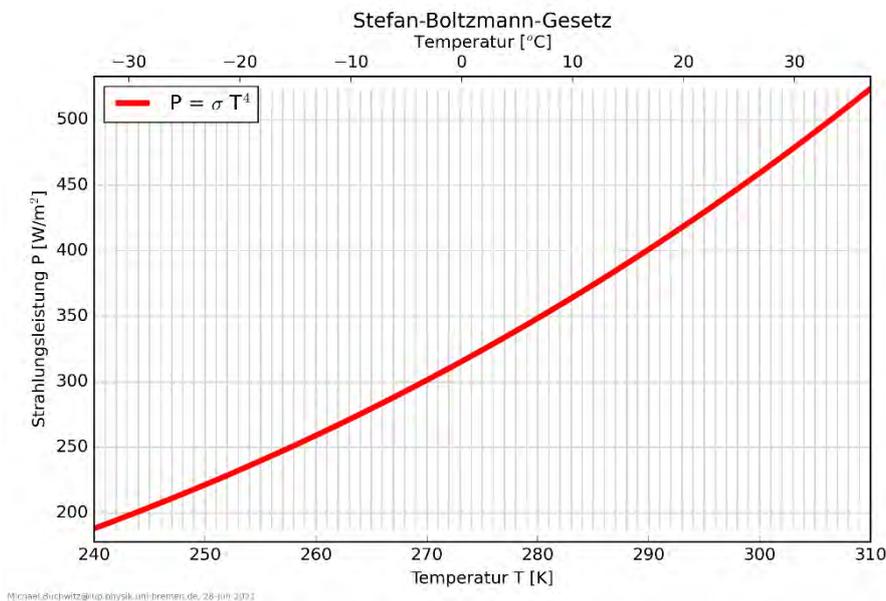


Abbildung 24: Darstellung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes im Temperaturbereich 240-310 Kelvin.

Die Strahlung der Sonne (aber auch die Strahlung aller anderen Körper einschließlich der Erde) hängt von der betrachteten Wellenlänge ab. Strahlung als Funktion der Wellenlänge bezeichnet man als „Spektrum“.

Besonders einfache Spektren sind die Spektren schwarzer Körper, bei denen die Emissivität $\epsilon=1$ ist. Diese Spektren hängen nur von der Temperatur des Körpers ab. Das entsprechende physikalische Gesetz ist das Plancksche Strahlungsgesetz (siehe z.B. [https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches Strahlungsgesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz)).

Abbildung 25 zeigt zwei Planck-Strahlungsspektren, und zwar für die Temperaturen 6000 K (entsprechend der Photosphäre der Sonne) und 300 Kelvin (entsprechend einem warmen Sommertag auf der Erde, zu mindestens für deutsche Verhältnisse). Ebenfalls angegeben ist die entsprechende Gesamtleistung P in W/m^2 . Mathematisch gesprochen ergibt sich P „durch Integration“ über das Spektrum bzw. einfacher gesagt als „Fläche unter der Kurve“ bzw. unter dem Spektrum. Das P der Sonnenstrahlung ist eine sehr große Zahl, nämlich $P = 73489348 W/m^2$, also etwa mehr als 73 Millionen Watt pro Quadratmeter. Diese P kann auch einfach mittels des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet werden, indem man dort $T = 6000 K$ einsetzt. Für die 300 Kelvin der verwendeten Erdtemperatur ergibt sich eine viel kleinere Zahl: $459 W/m^2$. Abbildung 25 zeigt auch sehr deutlich, dass höhere Temperaturen Spektren mit kleineren Wellenlängen entsprechen (genauer gesagt liegt das Maximum des Spektrums bei kleineren Wellenlängen) bzw. niedrigere Temperaturen entsprechen langwelligerer Strahlung. Das eingestrahlte Sonnenlicht wird daher auch als kurzwellige Strahlung bezeichnet (*short wave radiation*) und die Wärmestrahlung der Erde als langwellige Strahlung (*long wave radiation*).

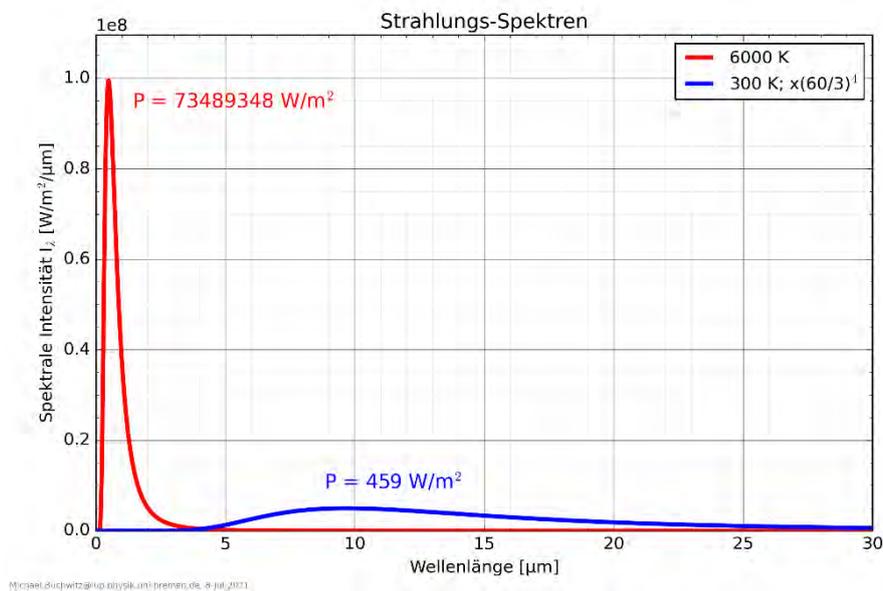
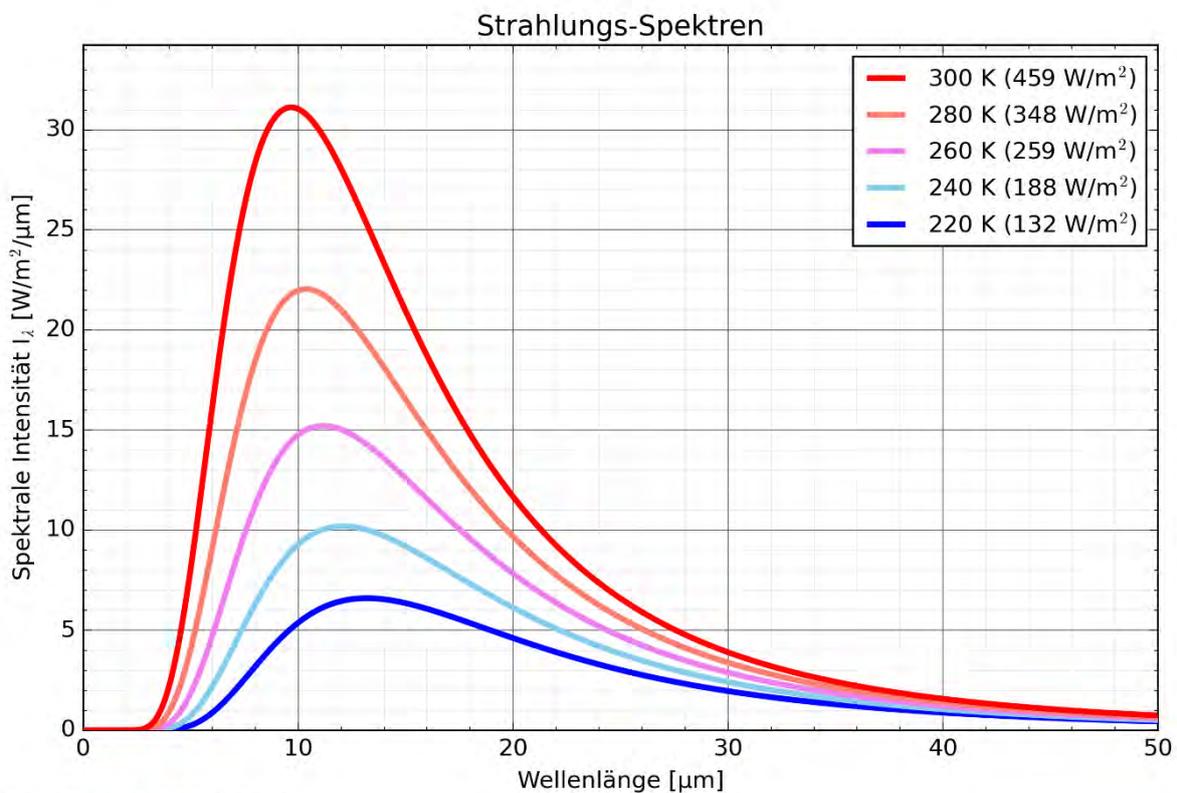


Abbildung 25: Spektren der Planck-Strahlung für 6000 Kelvin (rot) und 300 Kelvin (blau). Die blaue Kurve wurde mit dem Faktor 160000 ($= 20^4$) multipliziert, da sie ansonsten auf der hier verwendeten y-Achse nicht von Null zu unterscheiden wäre.

Um zu sehen, wie die Planck-Strahlung im Bereich atmosphärischer Temperaturen variiert, zeigt Abbildung 26 einige weitere Spektren im Temperaturbereich 220 – 300 Kelvin mit zusätzlicher Angabe der entsprechenden Strahlungsleistungen P .

Wie man sieht, verschiebt sich das Maximum der Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur mit zunehmender Temperatur nach links Richtung kürzerer Wellenlängen (also in Richtung der energiereicheren Strahlung). Wie man ebenfalls sieht, nimmt die Fläche unter den Kurven (und damit die abgestrahlte Leistung P) mit zunehmender Temperatur zu.



Michael.Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 8-Jul-2021

Abbildung 26: Spektren der Planck-Strahlung für Temperaturen im Bereich 220 – 300 Kelvin. Die entsprechenden Strahlungsleistungen in W/m^2 sind ebenfalls angegeben (in Klammern).



6.3 Die Energiebilanz der Erde

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns zur Vertiefung noch einmal mit dem Treibhauseffekt und der Energiebilanz der Erde, aber diesmal etwas quantitativer, das heißt mit einigen Formeln und entsprechenden Zahlen. Wer dies nicht möchte, der kann diesen Abschnitt problemlos überspringen.

Bei der Energiebilanz der Erde betrachtet man die von außen mittels Sonnenstrahlung zugeführte Energie „ E_{rein} “ und die mittels Wärmestrahlung wieder ins Weltall abgestrahlte Energie „ E_{raus} “ und die Differenz dieser beiden Energieflüsse, also die Netto-Energiezufuhr „ $E_{\text{rein}} - E_{\text{raus}}$ “.

Eine näherungsweise Berechnung der aufgenommenen Energie E_{rein} ist in Abbildung 27 dargestellt.

Quelle der Energie ist die Sonne und die von der Sonne gelieferte Energie pro Zeiteinheit (also die Leistung) und pro Flächeneinheit wird als „Solarkonstante“ bezeichnet. Diese Solarkonstante ist in der Abbildung mit S bezeichnet. S hat den Wert 1361 W/m^2 . Dies ist die Energie in Joule, die jede Sekunde (Watt bedeutet Joule pro Sekunde) durch eine Fläche von einem Quadratmeter strömt, wenn diese Fläche senkrecht zur Sonne orientiert ist und diese einen Abstand von einer astronomischen Einheit (AE) von der Sonne hat. Eine AE (https://de.wikipedia.org/wiki/Astronomische_Einheit) ist genau der mittlere Abstand der Erde zur Sonne und beträgt etwa 150 Millionen Kilometer.

Mit welcher Fläche muss man S multiplizieren, um die gesamte Leistung zu erhalten? Dies ist nicht die Oberfläche der Erdkugel, da einerseits nur eine Hälfte der Erde von der Sonne beschienen wird (nämlich nur die Tagseite) und auch auf dieser Tagseite nur die Fläche „genau unterhalb“ der Sonne senkrecht von den Sonnenstrahlen getroffen wird. Mathematisch gesprochen muss man hier ein Integral lösen, aber dies wollen wir hier nicht tun, da dies nur wenigen Schülern aus der Mathematik vertraut sein dürfte. Stattdessen geben wir hier einfach das Ergebnis an: Die relevante Fläche ist einfach die Querschnittsfläche der Erde und diese berechnet sich für einen Kreis mit Radius r einfach als „Pi mal Radius zum Quadrat“, also als πr^2 . Der Radius der Erde ist 6371 km^2 .

Um Missverständnisse zu vermeiden: Nein, wir wissen, dass die Erde keine Scheibe ist und nehmen daher hier nicht an, dass die Erde eine Scheibe ist. Wir nehmen hier jedoch an, dass die Erde in für uns hinreichend guter Näherung eine Kugel ist, obwohl streng genommen auch dies nicht stimmt. Aber diese Näherung ist hier gut genug, denn wir nehmen hier lediglich eine Schätzung mittels eines einfachen Modells vor um das Prinzip zu verstehen und um Zahlen in der richtigen Größenordnung zu erhalten.

Ein Faktor fehlt noch und dieser ist in Abbildung 27 als $(1-\alpha)$ bezeichnet. Hier bedeutet α die Albedo der Erde, also das Reflektionsvermögen der Erde. Albedo 1 bedeutet, dass alles reflektiert wird, also nichts absorbiert wird. In diesem Fall ist der Ausdruck in der Klammer gleich Null. Das andere Extrem ist Albedo gleich Null. In diesem Fall wird nichts reflektiert, sondern alles absorbiert. Der Ausdruck in der Klammer wäre dann 1. Dies zeigt, dass die Klammer den von der Erde absorbierten Anteil der Energie beschreibt. Es hat sich gezeigt, dass ein recht genauer Wert für die Albedo der Erde 0,3 ist, d.h. das 30% des Sonnenlichts



mehr oder weniger direkt in den Weltraum zurückreflektiert werden. Damit wird der Ausdruck in der Klammer zu 0,7. Das heißt, 70% des einfallenden Sonnenlichts werden absorbiert und tragen zur Erwärmung bei.

Jetzt können wir E_{rein} ausrechnen und das Ergebnis ist in Abbildung 27 angegeben: Jede Sekunde absorbiert die Erde Sonnenenergie von $1,2 \times 10^{17}$ Joule, erhält also eine Leistung von 120 PetaWatt (Peta = 10^{15}).

Nun Berechnen wir die abgestrahlte Energie E_{raus} . Wie man dies näherungsweise machen kann, dass ist in Abbildung 28 dargestellt. Hierzu benötigen wir das bereits erläuterte Stefan-Boltzmann-Gesetz (siehe Abschnitt 6.2). Es besagt, dass ein sogenannter schwarzer Körper der Temperatur T pro Quadratmeter die Leistung $P = \sigma T^4$ abstrahlt. σ ist hier die Stefan-Boltzmann-Konstante und der Wert dieser Konstanten beträgt $5,6704 \dots \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{T}^4$. Die Temperatur T ist hier immer als absolute Temperatur anzugeben, also in der Einheit Kelvin.

Diese Strahlung hängt nur von der Temperatur ab (wir nehmen hier an, dass die Erde ein schwarzer Körper ist, also eine Emissivität von 1 hat, was hier eine brauchbare Näherung ist) und wird von der Erde in alle Richtungen abgestrahlt. Die relevante Fläche hier ist also die Oberfläche der Erde und damit in unserer Kugelnäherung $4\pi r^2$.

Im Gleichgewichtsfall muss $E_{\text{rein}} = E_{\text{raus}}$ gelten und mittels dieser Gleichung kann man die Temperatur der Erde berechnen. Dies ist in Abbildung 28 gemacht und es ergibt sich eine Temperatur von $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, was einer Leistung von 240 W/m^2 nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz entspricht.

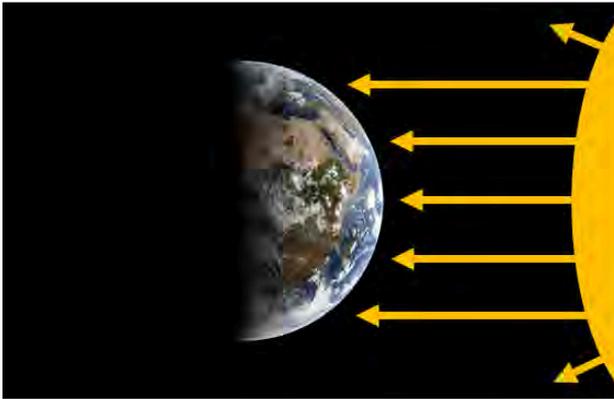
Die Erde muss also permanent 240 W/m^2 in den Weltraum abstrahlen, um die absorbierte Sonnenenergie wieder loszuwerden.

Was bedeuten die $-18 \text{ }^\circ\text{C}$? Wir wissen, dass dies nicht die mittlere Temperatur des Erdbodens oder der bodennahen Luftschichten ist. Dies ist die effektive Strahlungstemperatur, mit der die Erde in den Weltraum abstrahlt. Wenn man die Erde aus dem Weltraum mittels Satelliten beobachtet und mittels Infrarotstrahlung die Temperatur der Erde misst, dann erhält man $-18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Glücklicherweise leben wir am Unterrand der Atmosphäre, wo die Temperaturen deutlich höher sind. Wir befinden uns nämlich unterhalb der uns wärmenden Treibhausgase, die uns wie eine Bettdecke vor der Kälte schützen.

Wie bereits erwähnt, bewirkt der natürliche Treibhauseffekt, dass die Temperatur der Erde deutlich über der Strahlungstemperatur von $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt, nämlich eher bei 15 oder 16 Grad (in Abbildung 29 noch einmal dargestellt). Ursache für den natürlichen Treibhauseffekt ist im Wesentlichen der in der Atmosphäre vorhandene Wasserdampf (mit etwas mehr als 60%) gefolgt von CO_2 (mit etwa 20%). Andere Treibhausgase sind bodennahes Ozon, Lachgas und Methan.

Aufgenommene Energie^(*): E_{rein}



Energieaufnahme der Erde:
 $S \times \text{Absorption} \times \text{Querschnittsfläche}$

$$E_{\text{rein}} = S (1 - \alpha) \pi r^2$$

S : Solarkonstante (1361 W/m²)
 α : Albedo (Reflektionsvermögen)
 $(1 - \alpha)$: Absorption (im Mittel 0.7)
 r : Radius Erde (6371 km)

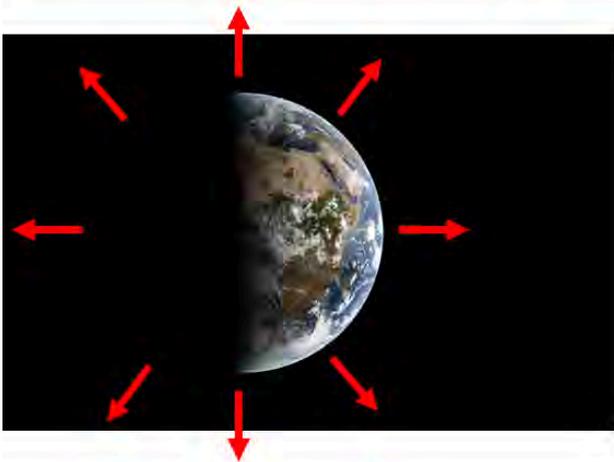
^(*) Genauer gesagt: Energie pro Zeiteinheit
(hier: pro Sekunde) also die Leistung (in
Joule/Sekunde = Watt)

$$1361 \times (1 - 0,3) \times 3.1416 \times (6371 \times 10^3)^2 = 1,2 \times 10^{17} \text{ W} = 120 \text{ PW}$$

(10¹⁵ = Peta (Billiarde)); daher $E_{\text{rein}} = 120 \text{ PW}$

Abbildung 27: Berechnung der pro Zeiteinheit aufgenommenen Energie E_{rein} .

Abgestrahlte Energie^(*): E_{raus}



Energieabstrahlung der Erde:
 $\sigma \times T^4 \times \text{Oberfläche}$

$$E_{\text{raus}} = \varepsilon \sigma T^4 4\pi r^2$$

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante
(5,6704 x 10⁻⁸ W/m²/T⁴)
 T : Temperatur (in Kelvin)
 r : Radius Erde (6371 km)
 ε : Emissivität (hier 1.0)

^(*) Genauer gesagt: Energie pro Zeiteinheit
(hier: pro Sekunde) also die Leistung (in
Joule/Sekunde = Watt)

$$5,6704 \times 10^{-8} \times (-18+273,15)^4 \times 4 \times 3.1416 \times (6371 \times 10^3)^2 = 1,2 \times 10^{17} \text{ W} = 120 \text{ PW}$$

240 W/m²

Abbildung 28: Berechnung der pro Zeiteinheit abgestrahlten Energie E_{raus} .



Die genaue mathematische Modellierung des Treibhauseffektes kann beliebig komplex sein aber ein sehr einfaches Modell hilft hier auch schon weiter. Dieses Modell ist in Abbildung 30 dargestellt. Wir nehmen hier einfach an, dass sich der wesentliche Effekt der Treibhausgase durch einen weiteren Parameter modellieren lässt und dieser ist in Abbildung 30 als τ bezeichnet (*Quelle: Science Blog von Prof. Dr. Peter Lemke: <https://scienceblog.at/book/export/html/496>*). Mit $\tau = 1$ ändert sich nichts, aber wenn man Werte kleiner als 1 wählt, dann reduziert sich E_{raus} bzw. man benötigt eine höhere Temperatur, um das gleiche E_{raus} zu erhalten. Und genau deswegen ist dies ein sinnvolles Model. Treibhausgase blockieren die Abstrahlung und dies führt zu einem neuen Gleichgewicht mit einer neuen, höheren Temperatur. τ entspricht hier der Transmissivität, also der Durchlässigkeit der Atmosphäre. Je mehr Treibhausgase, je geringer die Transmissivität der Atmosphäre, also je kleiner das τ .

Abbildung 31 zeigt, welche Temperaturen man erhält, wenn man verschiedene Werte für die verschiedenen Parameter S (Veränderung der Sonnenstrahlung), α (Veränderung der Reflektivität zum Beispiel durch Schmelzen des Meereises) und τ (Veränderung der Treibhausgaskonzentration) in die Temperaturformel einsetzt.

Treibhauseffekt

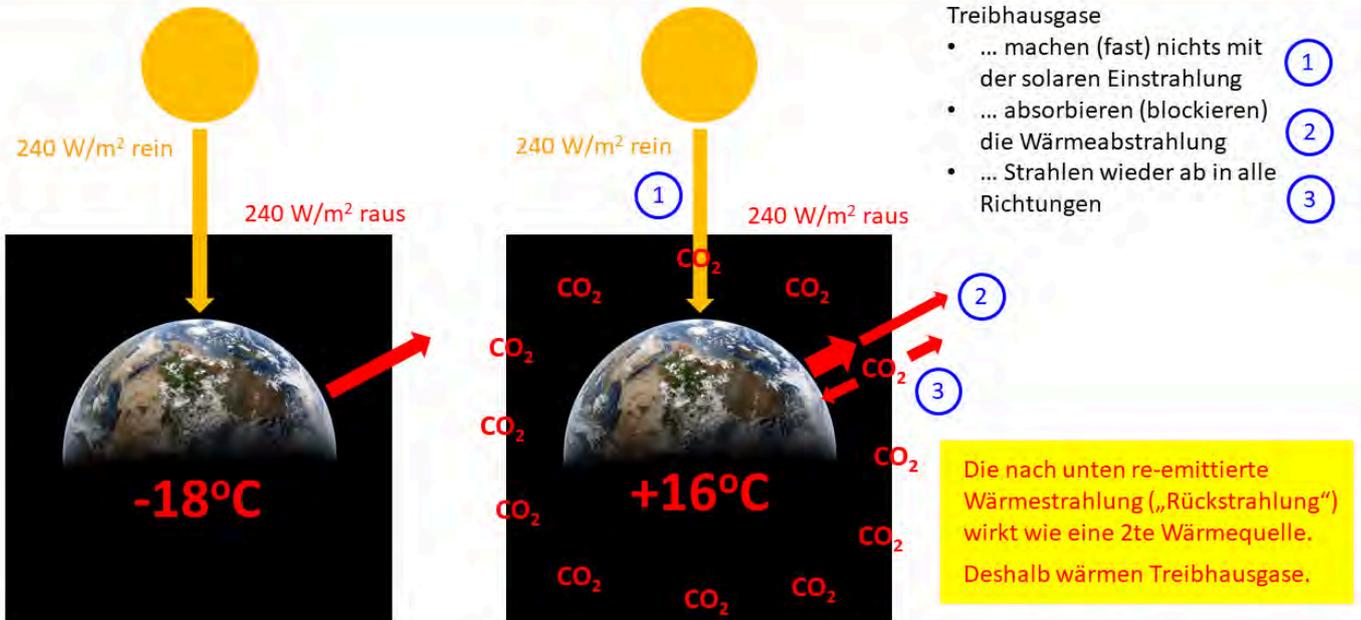


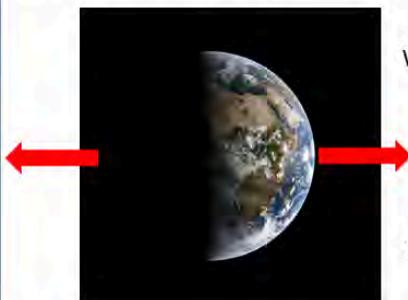
Abbildung 29: Die Wirkung von Treibhausgasen beim Treibhauseffekt.

Energiegleichgewicht

Gleichgewicht: $E_{rein} = E_{raus}$

Erde ohne Atmosphäre:

$$S (1 - \alpha) \pi r^2 = \sigma T^4 4\pi r^2$$

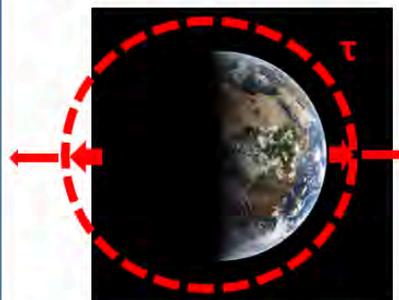


Wenn $\alpha = 0,3$ dann
 $T = -18^\circ\text{C}$

$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1-\alpha)}{4\sigma}}$$

Erde mit Atmosphäre (*):

$$S (1 - \alpha) \pi r^2 = \tau \sigma T^4 4\pi r^2$$



Wenn $\alpha = 0,3$
und $\tau = 0,6$ dann
 $T = +16^\circ\text{C}$

$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1-\alpha)}{\tau 4\sigma}}$$

(*) Peter Lemke: <https://scienceblog.at/book/export/html/496>

Abbildung 30: Energiegleichgewicht mit Treibhauseffekt.

Anwendung der Temperatur-Formel

$$T = \sqrt[4]{\frac{S(1 - \alpha)}{\tau 4 \sigma}}$$

Albedo α [-]	Transmission Atmosphäre τ [-]	S [W/m ²]	Temperatur [°C]	Kommentar
0,3	1,00	1361	-18,57	Keine Atmosphäre
0,3	0,60	1361	+16,11	„Normale“ Atmosphäre
0,3	0,59	1361	+17,32	„Normale“ Atmosphäre + mehr Treibhausgase
0,3	0,60	1384	+17,32	„Normale“ Atmosphäre + heißere Sonne
0,2	0,60	1361	+25,93	„Normale“ Atmosphäre aber niedrigere Albedo (positive Rückkopplung: Erwärmung -> Verringerung der Albedo durch weniger Schnee/Eis -> Erwärmung)

Abbildung 31: Anwendung der Temperaturformel mit Treibhauseffekt.

Abschließend zu diesem Thema wollen wir nun die Energiebilanz und die Energieflüsse noch einmal etwas genauer betrachten. Abbildung 32 zeigt die mittleren globalen Energieströme für den Zeitraum März 2000 bis März 2004 (nach *Trenberth et al., 2009*).

Die Einstrahlung der Sonne beträgt 341,3 W/m². Dies entspricht einem Viertel der Solarkonstanten bzw. dem Verhältnis der Oberfläche der Erde zu ihrer Querschnittsfläche und dieses Verhältnis ist genau 4 bei einer Kugel. Von dieser Strahlung werden 101,9 W/m² durch Reflektion in der Atmosphäre (an Wolken, Aerosolen und den Molekülen der Atmosphäre) sowie am Erdboden wieder in den Weltraum zurückreflektiert. Die Differenz dieser Strahlungen, also die solare Nettoeinstrahlung, beträgt also 239,4 W/m² (= 341,3 – 101,9). Die thermische Ausstrahlung, also die Abstrahlung von Energie durch die langwellige Wärmestrahlung, beträgt 238,5 W/m² (oben rechts). Das ist 0,9 W/m² weniger als die Netto-Einstrahlung von der Sonne.

Dieses Strahlungsungleichgewicht von 0,9 W/m² wirkt wie eine Kraft (englisch *force*), die eine Veränderung bewirkt. Da in diesem Fall die Erde mehr Energie aufnimmt als abgibt, ist die Folge eine Erwärmung, also eine Temperaturerhöhung. Dieses Strahlungsungleichgewicht wird auch Strahlungsantrieb genannt (englisch *radiative forcing*).

Die Erwärmung betrug im betrachteten Zeitraum um das Jahr 2002 etwa 0,7 °C relativ zur vorindustriellen Zeit. Da das Klimasystem Erde aber laut Abbildung 32 im Jahre 2002 nicht im Gleichgewicht war (da der Strahlungsantrieb nicht Null ist), ist eine weitere Erwärmung die Folge (und dies passierte auch).

Was bedeuten die anderen Angaben in Abbildung 32? Was mit dem kurzwelligem Sonnenlicht passiert ist links in oranger Farbe gezeigt. Von den eingestrahlteten 341 W/m^2 werden 79 W/m^2 von der Atmosphäre zurück in den Weltraum gestreut und 23 W/m^2 werden am Erdboden reflektiert und verlassen dann auch die Erde ohne absorbiert zu werden. 78 W/m^2 werden von der Atmosphäre absorbiert, zum Beispiel durch Gase wie Ozon und Wasserdampf. Das heißt, dass die Atmosphäre auch im solaren Bereich nicht vollständig transparent ist, insbesondere nicht im sehr kurzwelligem Spektralbereich (hier absorbiert Ozon einen großen Teil der ultravioletten (UV) Strahlung). Die entscheidende Energiemenge des solaren Spektralbereichs, mit der die Landoberfläche und die Ozeane erwärmt werden, sind die resultierenden 161 W/m^2 .

Rechts sind die Energieströme des thermischen (also des langwelligem) Spektralbereichs dargestellt. Vom Erdboden werden aufgrund seiner Temperatur 396 W/m^2 abgestrahlt. Von dieser Strahlung kommen aber effektiv nur 239 W/m^2 am oberen Rand der Atmosphäre an, insbesondere aufgrund der Absorption dieser Strahlung durch Treibhausgase. Die Treibhausgase emittieren die absorbierte Energie wieder als Wärmestrahlung in alle Richtungen. Die nach unten gerichtete Komponente beträgt 333 W/m^2 und erwärmt Erdboden und untere Luftschichten. Und das ist gut so, denn sonst wäre die Erde sehr kalt und quasi unbewohnbar, wie bereits geschildert.

Abbildung 32 zeigt, dass es noch zwei weitere Energieströme gibt, die sogenannten Wärmeströme. Bei diesen wird Energie nicht durch Strahlung übertragen, sondern durch andere Prozesse. Diese beiden Wärmeströme sind in der Mitte dargestellt. Der größere dieser beiden Energieströme überträgt 80 W/m^2 vom Erdboden in die Atmosphäre und zwar in Form von latenter Wärme mittels Evapotranspiration am Erdboden (Energieaufnahme) und Kondensation bei der Wolkenbildung in der Atmosphäre (Energieabgabe). Evapotranspiration bezeichnet in der Meteorologie die Summe aus Transpiration und Evaporation, also der Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Böden- und Wasseroberflächen (<https://de.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiration>). Der zweite dieser beiden Nichtstrahlungs-Energieflüsse ist mit Konvektion bezeichnet beträgt 17 W/m^2 . Er entspricht der Erwärmung von Luft durch den Kontakt mit dem Erdboden und stellt einen Transport fühlbarer Wärme dar.

Summiert man die am Unterrand der Atmosphäre nach unten verlaufenden Energieflüsse, so erhält man 494 W/m^2 ($= 161 + 333$). Summiert man die nach oben verlaufenden Energieflüsse, so erhält man 493 W/m^2 ($= 17 + 80 + 396$). Das heißt auch hier gibt es einen Netto-Energiefluss nach unten, welcher den Erdboden erwärmt. Die Differenz ist hier 1 W/m^2 , da wir mit gerundeten Zahlen gerechnet haben, aber die genauere Zahl ist $0,9 \text{ W/m}^2$ und in Abbildung 32 angegeben.

Es gibt also einen Nettofluss von Energie aus dem Weltraum zum Erdboden, welcher zu einer Erwärmung der Erde führt.

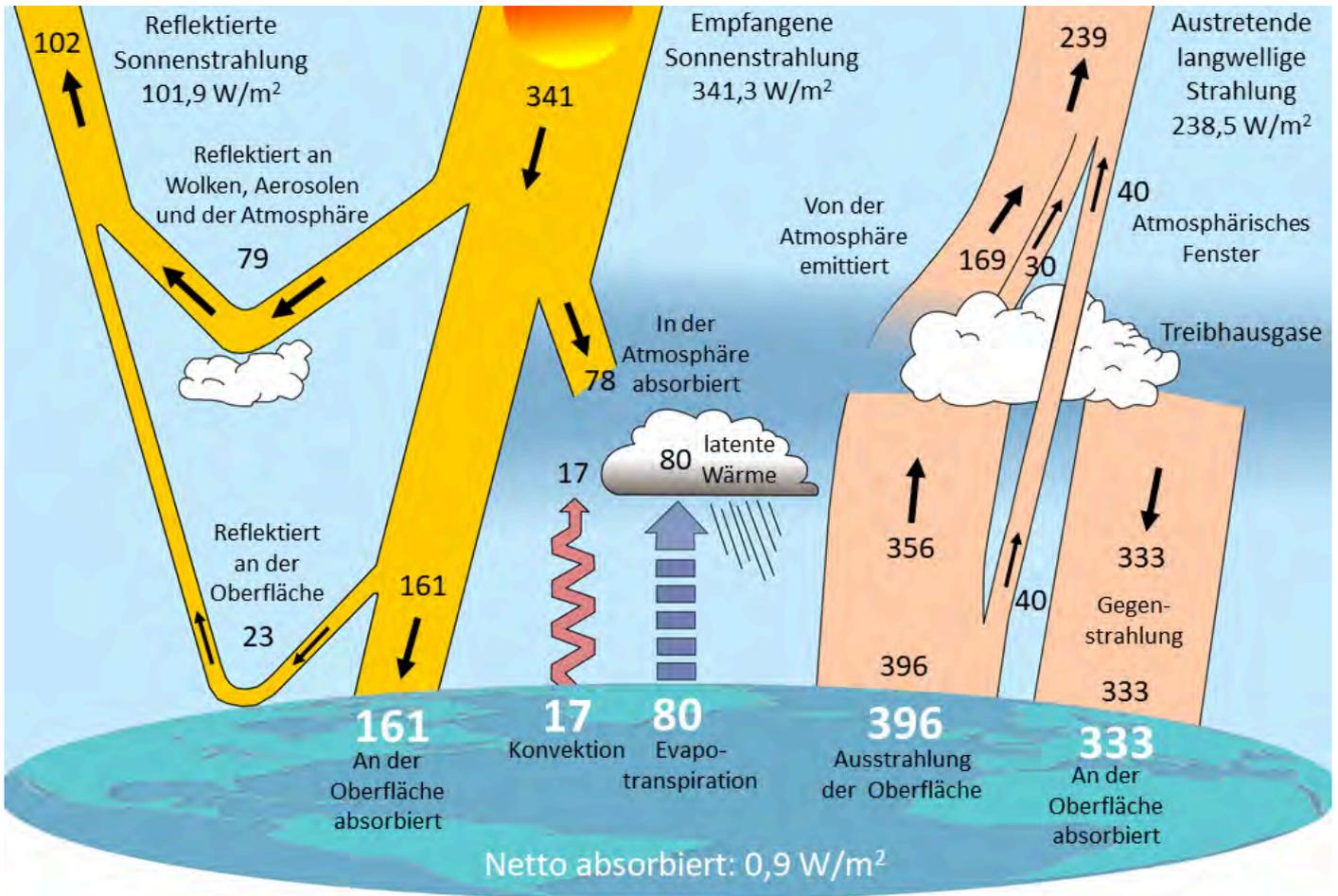


Abbildung 32: Mittlere globale Energieströme in W/m^2 für den Zeitraum März 2000 bis März 2004 (nach Trenberth et al., 2009). Die Gegenstrahlung durch Treibhausgase beträgt hier $333 W/m^2$ und die Nettoenergieaufnahme, welche zu einer Erwärmung führt, ist hier mit $0,9 W/m^2$ angegeben.

6.4 Strahlungsantrieb (*radiative forcing*)

Wie wir schon gesehen haben, spielt (elektromagnetische) Strahlung eine wichtige Rolle beim Klimawandel. Eine gestörte Strahlungsbilanz (z.B. am oberen Rand der Atmosphäre) wirkt wie eine Kraft, welche eine Veränderung in Gang setzt. Dabei werden die Veränderungen so ablaufen, dass das System Erde auf einen neuen Gleichgewichtszustand (mit einer neuen Gleichgewichtstemperatur) zuläuft. Der Gleichgewichtszustand ist dann erreicht, wenn die Strahlungsbilanz wieder ausgeglichen ist. Dann ist die abgeführte Energie im Mittel genau so groß wie die zugeführte Energie. Die Nettoenergiezufuhr ist dann Null.

Eine Störung der Strahlungsbilanz bezeichnet man auch als Strahlungsantrieb (*radiative forcing*) und „Strahlungsantrieb“ ist daher eine sehr wichtige Größe in der Klimaforschung. Sie dient z.B. dazu, die relative Bedeutung verschiedener klimarelevanter Ursachen zu beurteilen bzw. zu quantifizieren.

Am Ende ist man natürlich meist nicht primär an einer so abstrakt erscheinenden Größe wie dem Strahlungsantrieb interessiert, sondern an Auswirkungen, die wir direkt spüren können, wie zum Beispiel Auswirkungen auf die Temperatur und auf den Meeresspiegelanstieg. Dieses sind jedoch meist nur schwer bzw. nur ungenau abzuschätzende Folgen der „verursachenden Kraft“ Strahlungsantrieb.

Abbildung 33 zeigt eine Übersicht über den Strahlungsantrieb verschiedener Komponenten des Klimasystems seit Beginn der Industrialisierung. Wie man sieht, resultiert der größte Beitrag zum positiven Strahlungsantrieb (Erwärmung) aus dem CO₂-Anstieg, gefolgt vom Treibhausgas Methan. Einige Komponenten zeigen negative Werte des Strahlungsantriebs, insbesondere Aerosole. Zunehmende Mengen von bestimmten Arten von Aerosolen haben einen kühlenden Effekt durch Abschwächung der solaren Einstrahlung mittels vermehrter Rückstreuung von Sonnenlicht in den Weltraum.

Die Konzentration von Wasserdampf in den unteren Kilometern der Atmosphäre (der sogenannten Troposphäre) ist typischerweise viel höher als in der relativ trockenen Stratosphäre. Es mag daher verwundern, dass in Abbildung 33 Wasserdampf nur in der Kategorie „Stratosphärischer Wasserdampf“ aufgeführt ist, obwohl die troposphärischen Konzentrationen viel größer sind und Wasserdampf ein starkes Treibhausgas ist. Der Grund liegt darin, dass wir die Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre – im Gegensatz zu (zum Beispiel) CO₂ - nicht beliebig erhöhen können. Bei gegebener Temperatur kann die Atmosphäre nur eine bestimmte Menge Wasserdampf enthalten. Ein möglicher Überschuss fällt zum Beispiel als Regen einfach wieder aus der Atmosphäre heraus. Wenn es wärmer wird, kann mehr Wasser verdunsten und die Atmosphäre kann mehr Wasserdampf enthalten - und dies kann den Treibhauseffekt verstärken. Aufgrund dieser Effekte wird Wasserdampf nicht in der Kategorie anthropogener Strahlungsantrieb (*radiative forcing*) behandelt bzw. aufgelistet, sondern in den Kategorien klimarelevante Antwort (*response*) bzw. klimarelevante Rückkopplungen (*feedbacks*) (Näheres hierzu siehe Abschnitt 7.2).



Abbildung 33 verdeutlicht die Komplexität des Klimasystems und was bei dessen Verständnis zu berücksichtigen ist. Das Klimaproblem ist im Wesentlichen – aber eben nicht nur – ein mit CO₂ verbundenes Problem.

Weniger Abstrakt ist es, wenn man anstelle des Strahlungsantriebs die entsprechenden Temperaturen betrachtet und diese sind in Abbildung 34 angegeben.

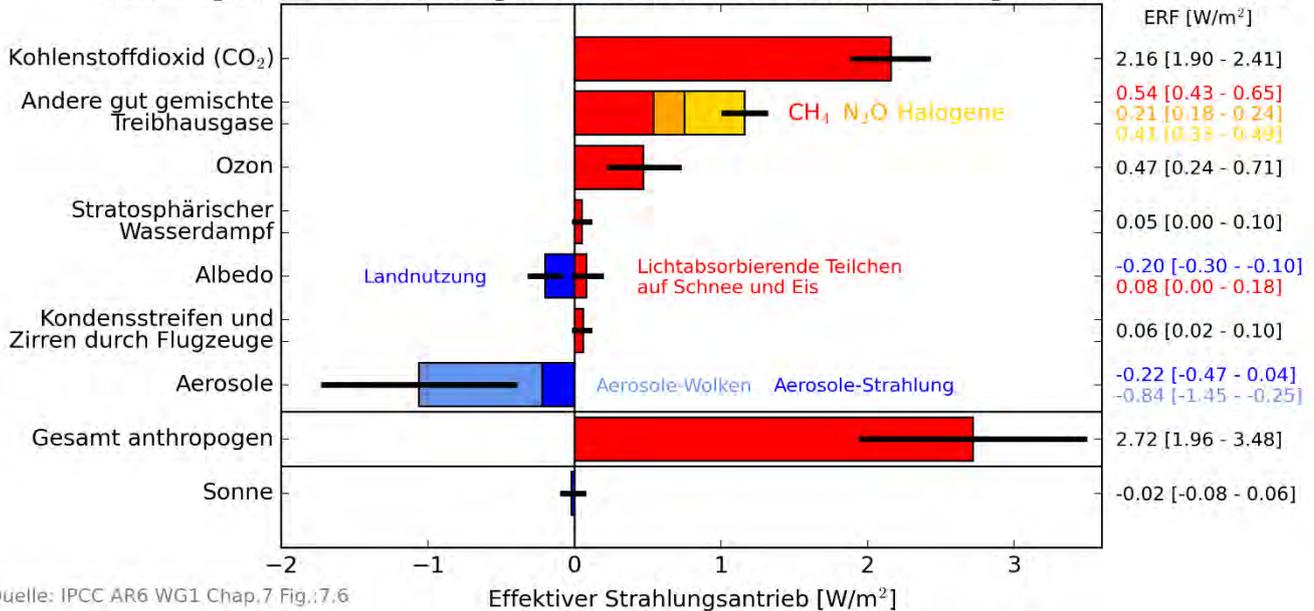
Die Umrechnung von Strahlungsantrieb in eine entsprechende Temperaturänderung ist jedoch nicht trivial, und zwar aufgrund der vielen Wechselwirkungen, welche hierbei berücksichtigt werden müssen, einschließlich komplexer Rückkopplungsprozesse, die sich weiter erwärmend (verstärkend) aber auch abkühlend (abschwächend) auswirken können (Näheres hierzu siehe Kapitel 7.2).

Abbildung 35 ist eine weitere Darstellung der relativen (und absoluten) Beiträge verschiedener Treibhausgase zum anthropogenen Treibhauseffekt. Explizit angegeben sind die entsprechenden Prozentzahlen. Hiernach trägt im Jahre 2020 CO₂ mit 66,1% zur Erwärmung durch die langlebigen Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung bei und Methan mit 16,4%.

Man liest oft, dass Methan eine viel größere Klimawirkung hat als CO₂. Solche Aussagen basieren auf dem sogenannten „Global Warming Potential“ GWP.

Das GWP eines Gases gibt an, wie stark die Treibhausgaswirkung dieses Gases ist Vergleich zur gleichen Menge CO₂ (das GWP von CO₂ ist also immer 1). Mit Menge meint man hier nicht die Anzahl der Moleküle, sondern das Gewicht (das GWP ist also „pro Kilogramm“). Hierbei wird auch ein sogenannter Zeithorizont angegeben, typischerweise 20 Jahre und/oder 100 Jahre. Das ist wichtig, um die typische „Lebensdauer“ eines Gases zu berücksichtigen. So ist das GWP für Methan etwa 84 bei einem Zeithorizont von 20 Jahren und etwa 28 bei einem Zeithorizont von 100 Jahren. Dies bedeutet, dass die Emission von 1 kg Methan nach 20 Jahren zur einer ähnlichen Erwärmung führt, wie die Emission von 84 kg CO₂. Nach 100 Jahre reduziert sich dies auf 28 kg CO₂. Der Grund für die Abnahme der Bedeutung von Methan relativ zu CO₂ bei längerem Zeithorizonten ist, dass Methan in der Atmosphäre chemisch zu anderen Stoffen reagiert und damit (und aus anderen Gründen) im Vergleich zu CO₂ relative schnell aus der Atmosphäre wieder entfernt wird (die Lebensdauer von Methan liegt bei etwa 9 Jahren, wohingegen die Lebensdauer von CO₂ ein Vielfaches davon beträgt). Die hohen Werte des GWP für Methan sagen nichts über die Bedeutung des Methans für seinen derzeitigen Beitrag zur Erderwärmung aus, da das GWP sich auf die Menge bezieht. Die Konzentration von Methan liegt derzeit jedoch bei etwas weniger als 2 ppm wohingegen die Konzentration von CO₂ die 400 ppm Marke bereits überschritten hat. Es gibt also etwa 200 Mal mehr CO₂-Moleküle als Methan-Moleküle. Dies illustriert noch einmal die Bedeutung des Strahlungsantriebs beim Vergleich der Bedeutung verschiedener Treibhausgase, da hier alle Effekte berücksichtigt sind, einschließlich der relevanten Mengenverhältnisse.

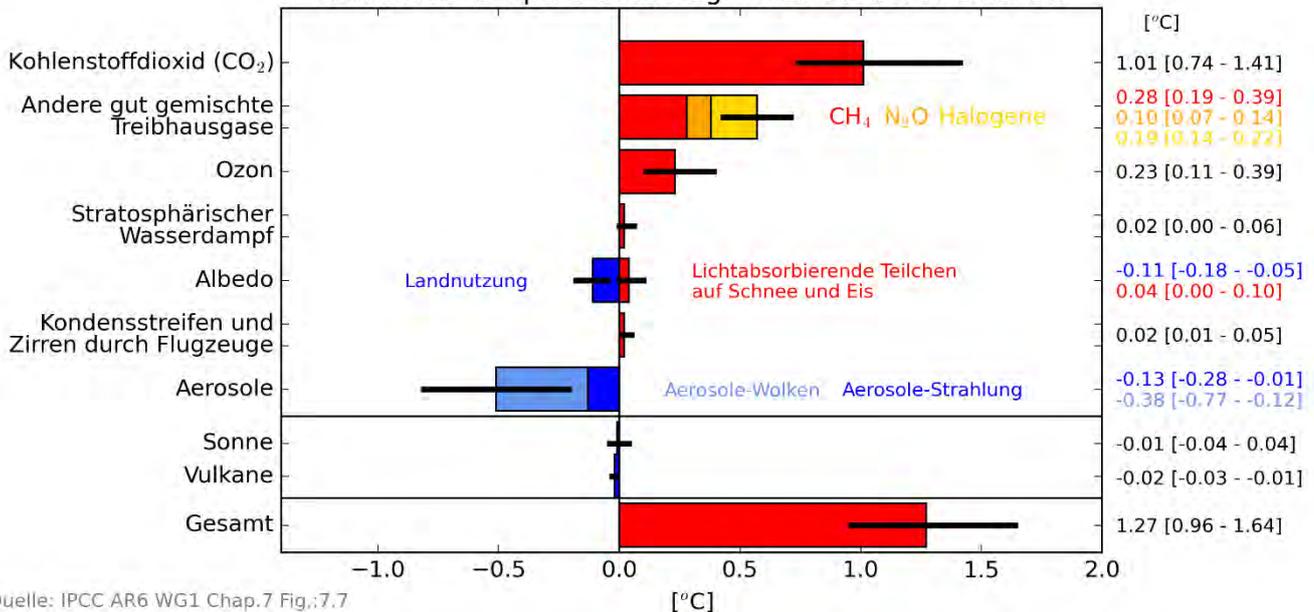
Änderung effektiver Strahlungsantrieb (Effective Radiative Forcing, ERF) 1750 bis 2019



Quelle: IPCC AR6 WG1 Chap.7 Fig.:7.6
 Michael Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 2-Feb-2022

Abbildung 33: Strahlungsantrieb verschiedener Komponenten des Klimasystems seit Beginn der Industrialisierung. Quelle: IPCC AR6 WG1 Kapitel 7, Abb. 7.6.

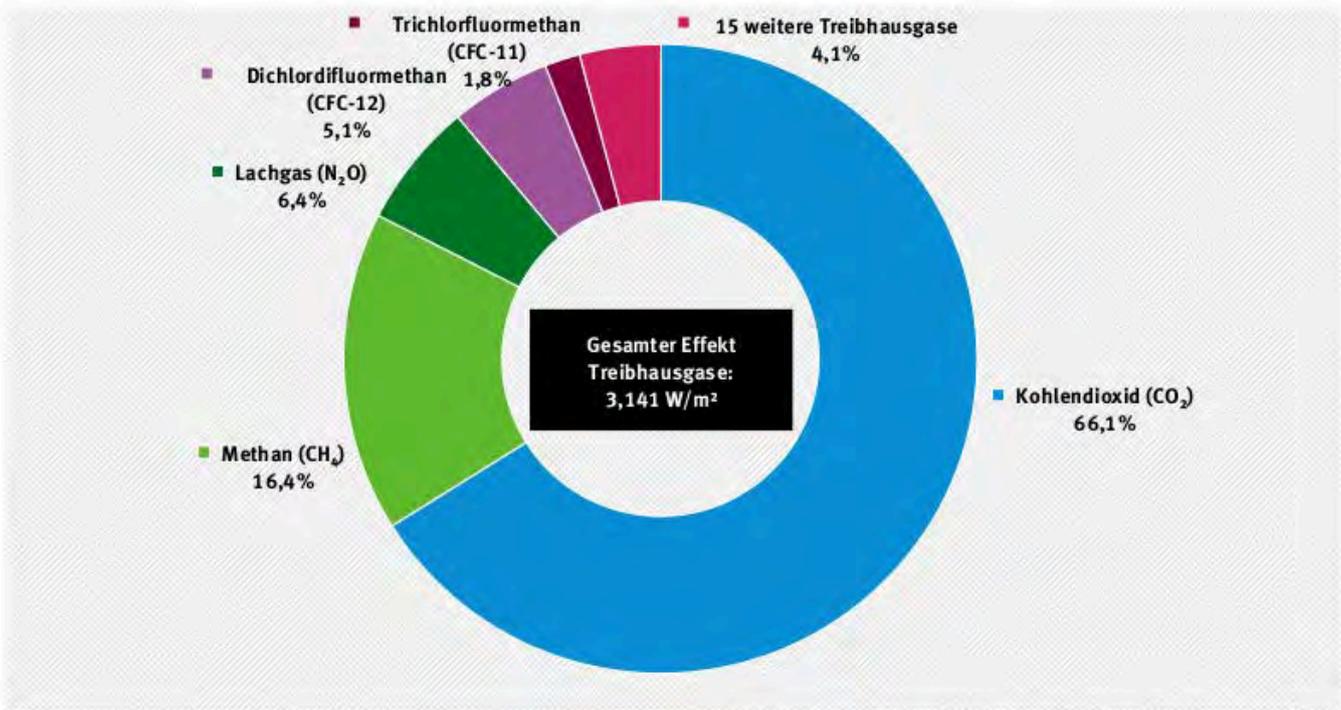
Simulierte Temperaturbeiträge in 2019 relativ zu 1750



Quelle: IPCC AR6 WG1 Chap.7 Fig.:7.7
 Michael Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 2-Feb-2022

Abbildung 34: Simulierte Temperaturänderungen verschiedener Komponenten des Klimasystems seit Beginn der Industrialisierung. Quelle: IPCC AR6 WG1 Kapitel 7, Abb. 7.7.

Beitrag zum Treibhauseffekt durch Kohlendioxid und langlebige Treibhausgase 2020



Quelle: NOAA Earth System Research Laboratory, The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI), <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>

Abbildung 35: Beiträge zum anthropogenen Treibhauseffekt durch CO₂ und andere langlebige Treibhausgase für das Jahr 2020. Der Gesamteffekt ist hier mit 3,141 W/m² angegeben und die Anteile der drei dominierenden Treibhausgase CO₂ mit 66,1%, Methan mit 16,4% und Lachgas (N₂O) 6,4%. Quelle: Umweltbundesamt (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/5_abb_beitrag-treibhauseffekt-co2-thg_2021-05-26.pdf).



Um den Zusammenhang von Strahlungsantrieb und Temperaturänderung etwas näher zu erläutern, wollen wir nachfolgend diese beiden Fragen beantworten:

- Wie verändert sich die ins Weltall abgestrahlte Wärmestrahlung, wenn sich die CO₂-Konzentration erhöht?
- Welche neue Gleichgewichtstemperatur stellt sich dann ein?

Wir nehmen hier an, dass CO₂ nur im langwelligen thermischen Spektralbereich Strahlung (also die Wärmestrahlung) absorbiert. Das ist hier eine brauchbare Näherung. Es ist jedoch nur eine Näherung, denn CO₂ absorbiert auch im kurzwelligeren solaren Bereich Strahlung (hierauf basieren z.B. die in diesem Handbuch gezeigten CO₂-Satellitenmessungen). Diese Absorption ist jedoch viel schwächer als im thermischen Bereich, wie in Abbildung 19 zu sehen ist.

Die erste Frage kann mittels Abbildung 36 beantwortet werden. Das in Hellgrün dargestellte Spektrum entspricht einer vorindustriellen CO₂-Konzentration von 280 ppm. Die tiefe Delle im Bereich um 15 µm entsteht durch Absorption der vom Erdboden kommenden Wärmestrahlung durch atmosphärisches CO₂. Genau in diesem Spektralbereich ändert sich das Spektrum am stärksten, wenn man die CO₂-Konzentration ändert (dunkelgrünes Spektrum). Aufgrund der CO₂-Verdopplung wird in diesem Beispiel die ausgehende Wärmestrahlung um 3,3 (= 300,2 – 296,9) W/m² erniedrigt. Dies entspricht einer Netto-Energiezufuhr für die Erde und das System Erde reagiert daraufhin (u.a.) mit einer Temperaturerhöhung.

Für das hier gezeigte Beispiel ist der Strahlungsantrieb, der einer CO₂-Verdopplung entspricht, die bereits erwähnten 3,3 W/m². Da wir diesen Wert hier nur für einen speziellen Fall ausgerechnet haben, entspricht die hier erhaltene Zahl nicht einem globalen Mittelwert. Genauere Berechnungen ergeben einen Wert von etwa 3,7 W/m² (Myhre et al., 2017), was recht nah an dem von uns berechneten Wert liegt.

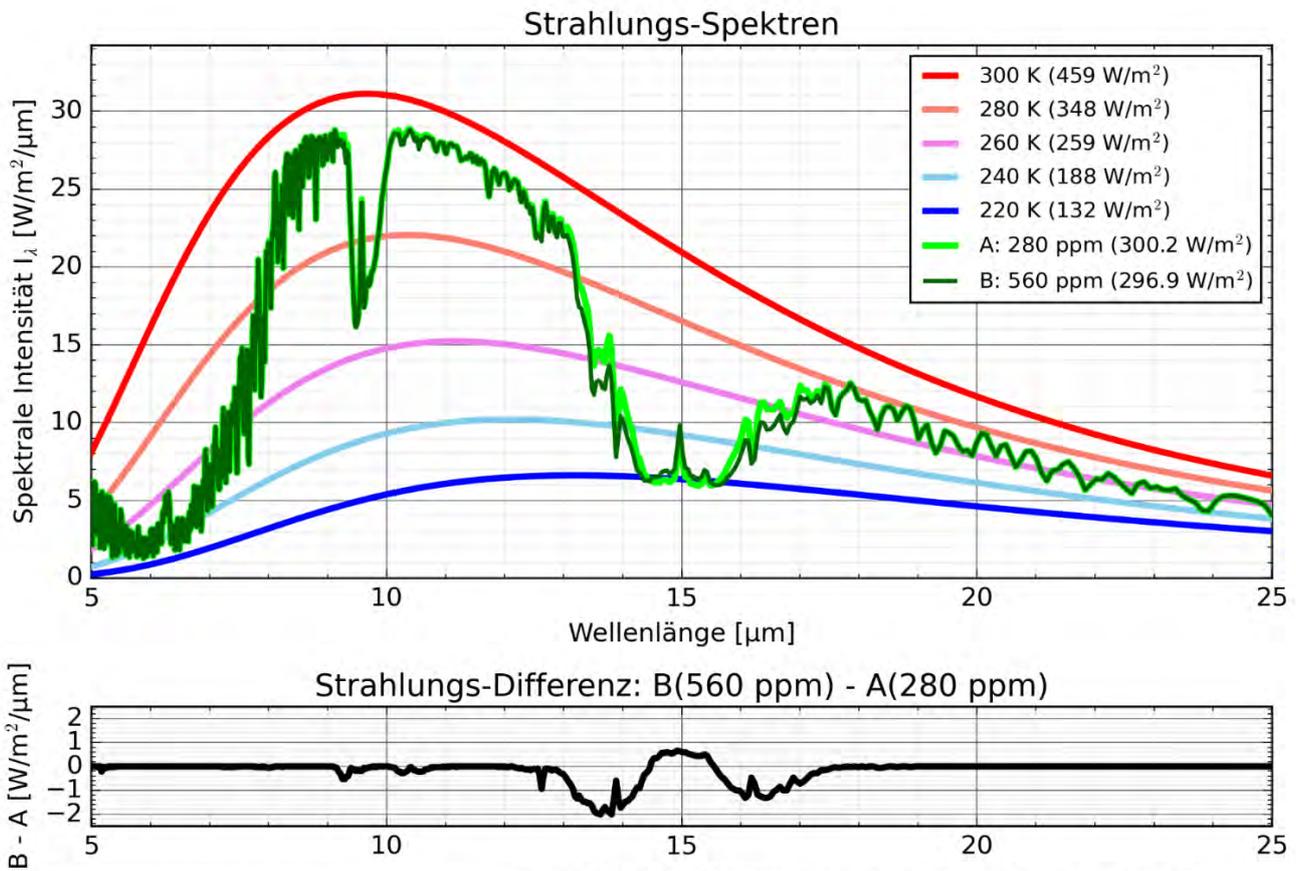


Abbildung 36: Oben: Strahlungs-Spektren im Spektralbereich 5 – 25 μm . Spektren der ins Weltall abgestrahlten Wärmestrahlung berechnet unter der Annahme einer tropischen Atmosphäre mit einer CO_2 -Konzentration von 280 ppm (Hellgrün, gesamte Strahlungsleistung 300,2 W/m^2) und 560 ppm (Dunkelgrün, 296,9 W/m^2). Im Hintergrund sind ergänzend Planck-Spektren (glatte Kurven) für verschiedene Temperaturen im Bereich 220 – 300 K dargestellt. Unten: Differenz der beiden Strahlungsspektren. Quelle der MODTRAN-Berechnungen: <http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/>.



Um wieviel erhöht sich die Temperatur, wenn sich die CO₂-Konzentration verdoppelt?

Die ist in Abbildung 37 erläutert (nach *Houghton, 2004* (Seite 24)). Wir beschreiben diese Grafik von links nach rechts: Unter vorindustriellen Bedingungen war die mittlere Temperatur der Erde etwa 15 °C. Die Energiezufuhr durch die Sonneneinstrahlung (S) betrug 240 W/m². Es herrschte im Mittel ein Gleichgewichtszustand, da die abgestrahlten langwellige (L) Wärmestrahlung ebenfalls 240 W/m² betrug.

Wenn sich nun die CO₂-Konzentration verdoppelt und nichts anderes passieren würde, dann wäre der wesentliche Effekt eine Reduzierung der Ausstrahlung durch die vermehrte CO₂-Absorption und zwar in diesem Beispiel 4 W/m² (gerundet entspricht dies dem bereits erwähnten Strahlungsantrieb von 3,7 W/m² bei CO₂-Verdopplung (*Myhre et al., 2017*)).

Dies entspricht einer Netto-Energiezufuhr von 4 W/m², welche zu einer Erwärmung führt. Bei einer Erwärmung um 1,2 Grad ist die Energiebilanz am oberen Rand der Atmosphäre wieder hergestellt (siehe hierzu auch *Schönwiese, 2020* (Seiten 84-85) und *Cess et al., 1990*).

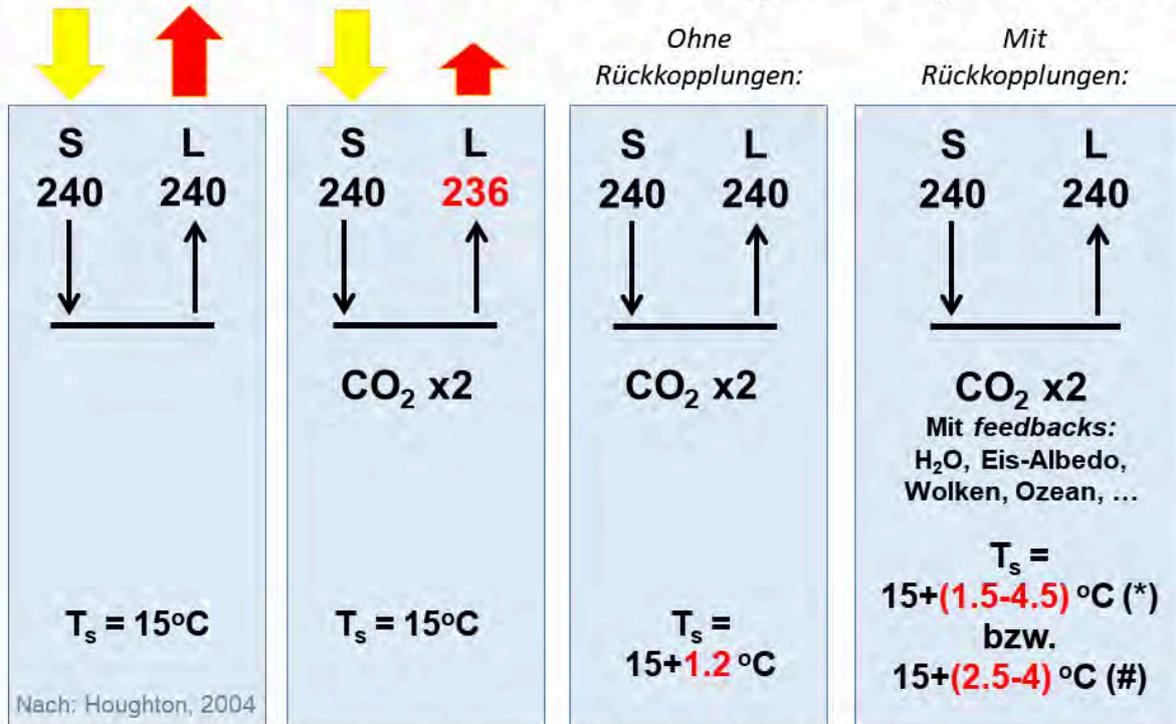
Ohne Rückkopplungen (*feedbacks*) entspricht einem Strahlungsantrieb von 3,7 W/m² eine Temperaturerhöhung von etwa 1,2 °C. Entsprechend ergeben sich 3,1 W/m² pro Grad Celsius (oder 3,1 W/m²/K bzw. W/m²/°C). Ohne Rückkopplungen kann man also den Strahlungsantrieb in W/m² aufgrund einer CO₂-Änderung grob gesagt einfach durch 3 (oder etwas genauer durch 3,1) teilen, um eine Schätzung der entsprechenden Temperaturänderung in Kelvin oder Grad Celsius zu erhalten.

Allerdings ist das Klimasystem Erde komplizierter, denn die Erde reagiert mit einer Reihe weiteren Veränderungen, nämlich u.a. mit einer komplexen Mischung aus verstärkenden aber auch abschwächenden Rückkopplungen (*feedbacks*). Man schätzt, dass die resultierende Temperatur bei einer CO₂-Verdopplung nahe 3 Grad liegt (*IPCC WG1 AR6 SPM*). Mit Rückkopplungen entspricht einem Strahlungsantrieb von 3,7 W/m² aufgrund einer CO₂-Änderung also eine Temperaturerhöhung von 3 °C. Es ergibt sich also 1,2 W/m²/°C. Die numerischen Werte für Strahlungsantrieb in W/m² und Temperaturerhöhung in Grad Celsius (oder Kelvin) sind hier also fast identisch.

Diese Schätzung von 3 Grad bei einer CO₂-Verdopplung ist jedoch mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet. Man schätzte bisher, dass die Temperatur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (nämlich von etwa 66%) im Bereich 1,5 – 4,5 Grad liegt (*Houghton, 2004; IPCC AR5 WG1 SPM; Schönwiese, 2020* (Seiten 84-85)). Entsprechend den aktuellsten Berechnungen (*IPCC AR6 WG1 SPM*) liegt der wahrscheinlichste Wert immer noch bei 3 Grad, der Unsicherheitsbereich wird jedoch nun mit 2,5 – 4 °C („AR6 likely range“) angegeben anstatt bisher mit 1,5 – 4,5 °C („AR5 likely range“), wie beim vorherigen Bericht (*IPCC AR5 WG1 SPM*).

Diese Erläuterungen zeigen bereits, welche Bedeutung die Rückkopplungen (*feedbacks*) haben. Weitere Erläuterungen zu diesem Thema sind in Kapitel 7.2 zusammengestellt.

Klimasensitivität: Temperaturänderung bei CO₂-Verdopplung:

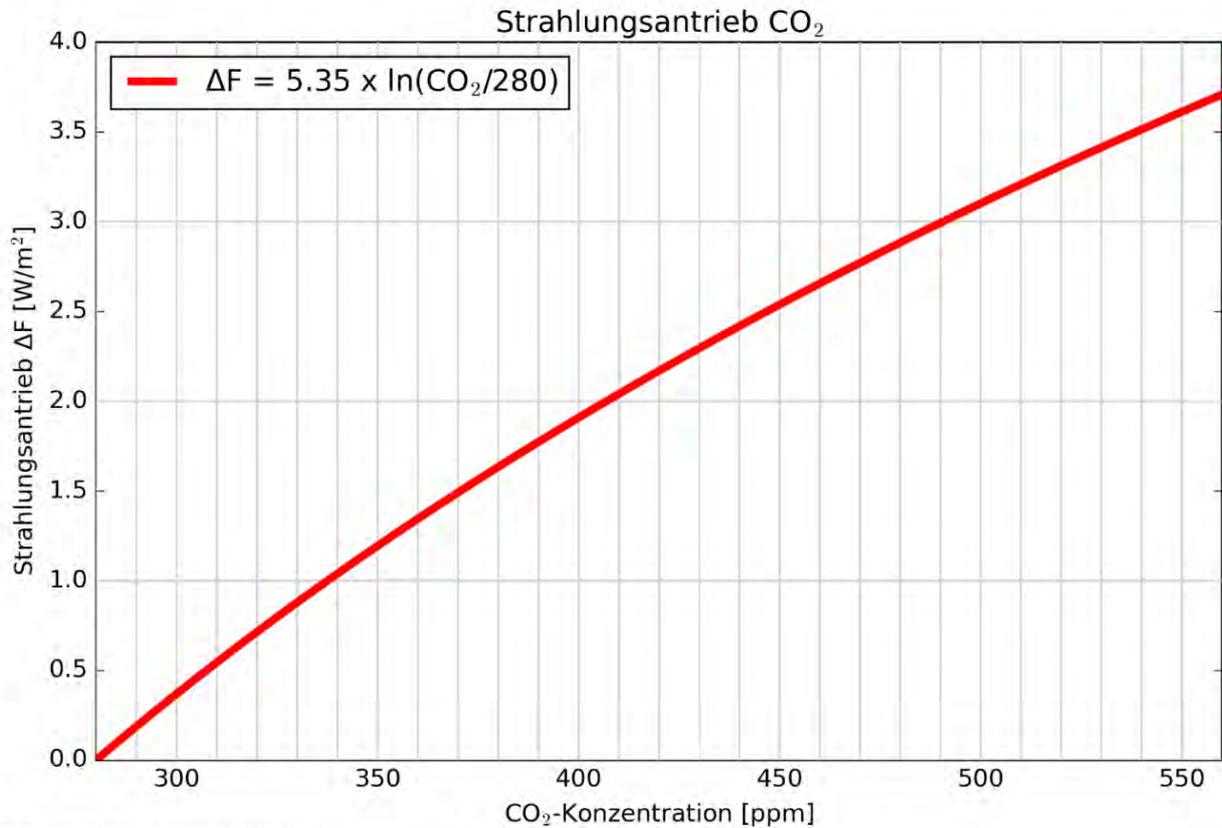


(*) Temperaturbereich in Rot: IPCC AR5 „likely range“ der „Equilibrium Climate Sensitivity“ (ECS)
(#) Entsprechender IPCC AR6 „likely range“

Abbildung 37: Temperaturänderung bei CO₂-Verdopplung. Quelle: Houghton, 2004. Anmerkung: „likely range“ bedeutet hier eine Wahrscheinlichkeit von 66-100%.

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, dass der Strahlungsantrieb etwa 3,7 W/m² beträgt, wenn sich die CO₂-Konzentration verdoppelt. Aber was ist im Fall einer anderen Änderung der CO₂-Konzentration?

Die Antwort auf diese Frage gibt Abbildung 38.



Michael Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 1. Juli 2021

Abbildung 38: Eine einfache Formel zur Berechnung des Strahlungsantriebs von CO₂, hier als ΔF bezeichnet. In die oben links angegebene Formel ist noch die CO₂ Konzentration in ppm einzusetzen. Für die vorindustrielle CO₂-Konzentration von 280 ppm ergibt sich, wie es sein muss, $\Delta F = 0$. Setzt man die doppelte CO₂-Konzentration von 560 ppm ein, so ergibt sich 3,7 W/m² (den $5,35 \cdot \ln(2) = 3,7$). Wie man sieht, hängt der Strahlungsantrieb logarithmisch von der Konzentration ab. Das bedeutet: Wenn sich die CO₂-Konzentration verdoppelt, dann entspricht dies (nicht einer Verdopplung von F , sondern) einer Vergrößerung des Strahlungsantriebs F , also der Energie (bzw. Leistung pro Flächeneinheit), um einen festen Betrag (nämlich um 3,7 W/m²). Quelle: Myhre et al., 2017.

7 Klimasystem Erde

In diesem Kapitel wird ein Überblick über das Klimasystem Erde gegeben. Da es bereits eine Vielzahl von auch für die Schule nützlichen Materialien zu diesem Thema gibt (siehe Abschnitte 14 und 15), wird sich hier lediglich auf einige wichtige Aspekte fokussiert, insbesondere um Hintergrundinformationen für nachfolgende Kapitel liefern.

7.1 Komponenten bzw. Geosphären

Die verschiedenen Komponenten oder Sphären (<https://de.wikipedia.org/wiki/Geosphäre>, https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Erdsphären) des Systems Erde (also Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre, etc.) wurden bereits kurz bei der Diskussion von Abbildung 2 vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden weitere Informationen bezüglich jeder dieser Komponenten bereitgestellt, jedoch nur in sehr knapper Form aber unter Hinweis auf weitere Informationsquellen, welche eine tiefergehende Beschäftigung mit den hier nur angerissenen Themen ermöglichen. Zu beachten ist, dass die Sphären sich teilweise überlappen. So finden sich Lebewesen (Biosphäre) an Land, im Ozean und in der Atmosphäre.

7.1.1 Atmosphäre

Die Atmosphäre ist eine dünne Schicht, welche verschiedene Gase (insbesondere Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂)), Wassertröpfchen (Wolken, Regen) und kleinste Partikel genannt Aerosole enthält. Aus dem Weltraum betrachtet erscheint sie als ein dünner bläulicher die Erde umgebender Schleier (Abbildung 39).



Abbildung 39: Die Erdatmosphäre aus dem Weltraum betrachtet. Quelle:
https://climate.esa.int/media/images/Ozone-CCI-unsplash_1600.min-1280x200.format-jpeg

[Quelle dieses Abschnitts: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosphäre> (leicht modifiziert)]: Die bodennahen Schichten bis in etwa 90 km Höhe haben eine recht gleichförmige Zusammensetzung, weshalb man auch von Homosphäre spricht. Was als Luft bezeichnet wird, besteht im Wesentlichen bei Außerachtlassen des wechselnden Wasserdampfgehalts (d. h. in Volumenprozent trockener, wasserdampffreier Luft) aus: 78,08 % Stickstoff (N₂), 20,95 % Sauerstoff (O₂) und 0,93 % Argon (Ar), dazu Aerosole und Spurengase, darunter Kohlenstoffdioxid (CO₂, mit derzeit (2020) 0,04 %, nach Wasserdampf der wichtigste Verursacher des Treibhauseffekts), ferner Methan (CH₄), Ozon (O₃), Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid (SO₂) und Stickstoffverbindungen. Die Atmosphäre hat eine Masse von etwa $5,15 \cdot 10^{18}$ kg (5,15 Billionen Tonnen), also knapp ein Millionstel der Erdmasse. Sie besteht hinsichtlich ihres vertikalen Temperaturverlaufs, insbesondere dessen Gradienten, aus mehreren Schichten:

- Troposphäre (<https://de.wikipedia.org/wiki/Troposphäre>) von der Erdoberfläche bis zur Tropopause in Höhen zwischen 7 km (Polargebiete) und 17 km (Tropen); näheres siehe <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102820>
- Stratosphäre (<https://de.wikipedia.org/wiki/Stratosphäre>) bis zur Stratopause in 50 km Höhe (hier befindet sich die Ozonschicht)
- Mesosphäre (<https://de.wikipedia.org/wiki/Mesosphäre>) bis zur Mesopause in 80 bis 85 km Höhe

7.1.2 Hydrosphäre

Die Hydrosphäre umfasst die Gesamtheit des Wassers der Erde. Dies umfasst die Ozeane (Abbildung 40), Flüsse und Seen aber auch Bodenwässer und die Bereiche der Atmosphäre, die Wasser enthalten (Wolken, Regen).

[Quelle dieses Abschnitts: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrosphäre> (leicht modifiziert)]: Nach den Aggregatzuständen des Wassers kann die Hydrosphäre der Erde dreigeteilt werden in Kryosphäre, Aquasphäre und irdischen Wasserdampf. Alternativ kann die Hydrosphäre nach den Aufenthaltsorten des Wassers dreigeteilt werden in Ozeanosphäre, Limnosphäre und atmosphärisches Wasser.

Abbildung 40: Eine wichtige Komponente der Hydrosphäre sind die Ozeane. Quelle: https://climate.esa.int/media/images/Sea-State-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg



7.1.3 Kryosphäre

Die Kryosphäre ([https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kryosphäre im Klimasystem](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kryosphäre_im_Klimasystem)) umfasst die beiden großen Eisschilde Grönland und Antarktis, die Gletscher und das Meereis. Praktisch alle Bestandteile der Kryosphäre erfahren Veränderungen aufgrund des Klimawandels. Daher sind sie wichtige Klimaindikatoren. Eine Übersicht über die entsprechenden Veränderungen in den letzten Jahrzehnten ist in Abbildung 42 dargestellt.

Abbildung 41: Die Antarktis und das sie umgebene Meereis sind wichtige Komponenten der Kryosphäre.
Quelle: https://climate.esa.int/media/images/Ice-Sheet-Antartica-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg



Kryosphäre: Eisschilde, Gletscher, Meereis, ...



Abbildung 42: Bestandteile der Kryosphäre wie die Eisschilde, Gletscher und das Meereis und deren Veränderung in den letzten Jahrzehnten (nach unten gerichtete Pfeile entsprechen einer Abnahme des Volumens oder der Fläche der entsprechenden Komponente). Quelle: C3S: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2021/copernicus-climate-change-service-publishes-report-2020>.

7.1.4 Biosphäre

[Quelle für diesen Abschnitt: <https://de.wikipedia.org/wiki/Biosphäre> (leicht modifiziert)]: Als Biosphäre der Erde wird der Bereich bezeichnet, in dem Lebewesen vorkommen. Die Biosphäre wird als dünne Hülle (Sphäre) gedacht, die einen äußeren Bereich der Erde durchwirkt. Sie reicht ungefähr von 5 km unter der Erdoberfläche bis 60 km über die Erdoberfläche, d. h. von der oberen Lithosphäre bis in den unteren Saum der Mesosphäre (einer der obersten Schichten der Atmosphäre). Ihre äußeren Bereiche in der Tiefe und in der Höhe werden ausschließlich von Mikroorganismen bewohnt. Nach derzeitigem Kenntnisstand scheint eine Biosphäre ein sehr seltenes Phänomen zu sein, das zumindest im hiesigen Sonnensystem die Erde einzigartig sein lässt.

Die Vegetation ist ein wichtiger Bestandteil der Biosphäre und es gibt enge Wechselwirkungen zwischen Klima und Pflanzen. So bestimmt das Klima welche Pflanzen wo wachsen und Pflanzen nehmen CO₂ auf und nehmen damit Einfluss auf das Klima. Ein anderer Aspekt sind Mikroorganismen, welche am Aufbau oder am Abbau von Treibhausgasen wie CO₂, CH₄ und N₂O beteiligt sind.

Weiteres zu dieser Thematik siehe zum Beispiel:

[https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Biosphäre_im_Klimasystem_\(einfach\)](https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Biosphäre_im_Klimasystem_(einfach))

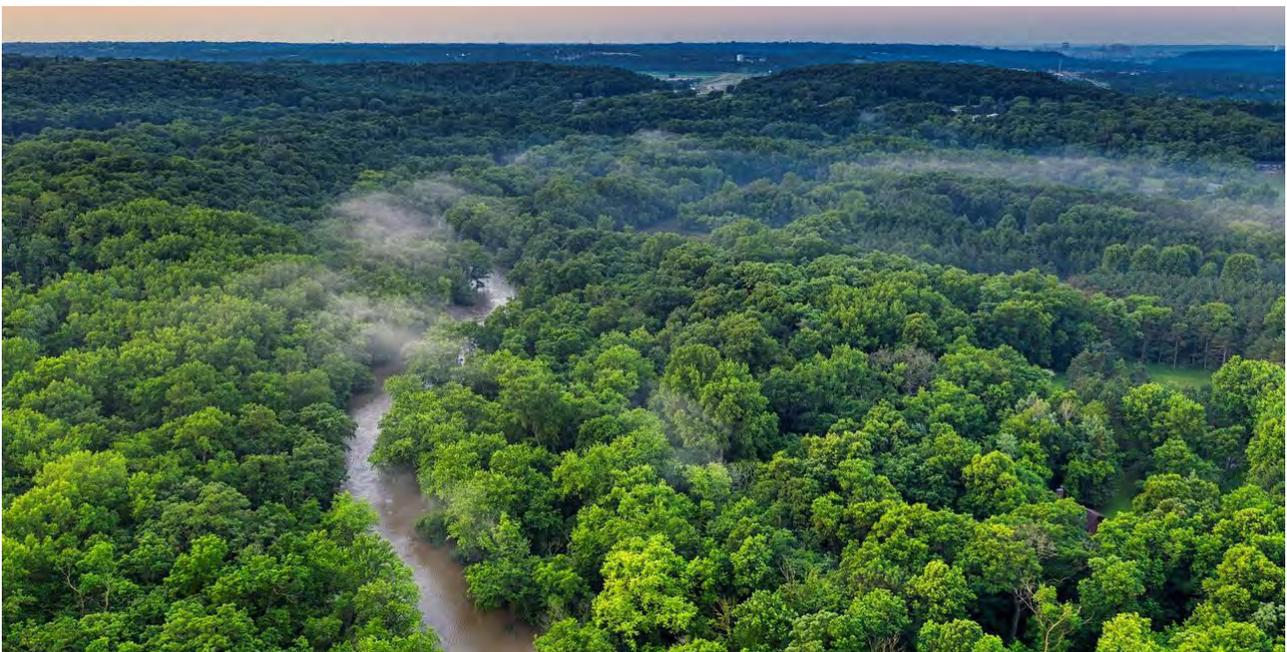


Abbildung 43: Der Regenwald des Amazonas ist eine wichtige Komponente der Biosphäre, zu der auch alles pflanzliche Leben zählt. Quelle: https://climate.esa.int/media/images/amazon-pexels-tom-fisk-2739664_min-1280x200.format-jpeg.jpg



7.1.5 Pedosphäre

Die Pedosphäre umfasst die Gesamtheit der Böden des Planeten Erde.

[Quelle dieses Abschnitts: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pedosphäre> (leicht modifiziert)]: Die Überschneidung von Litho-, Hydro-, Atmos- und Biosphäre spiegelt sich in der Natur der Böden. Die lithosphärische Schnittmenge wird gebildet vom Ausgangsgestein des Bodens: Ist ein Gestein atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt (Niederschläge, wetter- oder tageszeitlich bedingte Temperaturschwankungen usw.), verwittert es. Die verwitterte mineralische Gesteinssubstanz, gemischt mit aerob zersetzter organischer Substanz, überwiegend von Pflanzen geliefert, wird als Boden bezeichnet, der Prozess der Entstehung von Böden als Bodenbildung. Böden enthalten im Porenraum Wasser und Luft, was die Überschneidung der Lithosphäre mit der Hydrosphäre und Atmosphäre repräsentiert. Bodenwasser und -luft wechselwirken mit der mineralischen und organischen Substanz, unter anderem in Form von Lösungs- oder Ausfällungsvorgängen.

Böden spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem, u.a., da sie großen Mengen an Kohlenstoff enthalten können, aber auch wegen der in ihnen enthaltenen Mikroorganismen.

7.1.6 Lithosphäre

[Quelle dieses Abschnitts: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithosphäre> (leicht modifiziert)]: Die Lithosphäre ist die äußerste Schicht im rheologischen Modell vom Aufbau des Erdkörpers. Sie umfasst die Erdkruste und den äußersten Teil des Erdmantels, den lithosphärischen Mantel. Die Lithosphäre kann insgesamt als starr bezeichnet werden. Sie ist aus einzelnen Platten zusammengesetzt, die als Lithosphärenplatten, tektonische Platten oder Kontinentalplatten bezeichnet werden. Direkt unterhalb der Lithosphäre schließt sich die Asthenosphäre an. Das Gestein ist in dieser Schicht zwar fest, verhält sich in geologischen Zeiträumen aber plastisch (duktil).

Die Lithosphäre spielt im Klimasystem auch eine wichtige Rolle, aber im Wesentlichen nur bei Prozessen, die auf einer sehr langen Zeitskala ablaufen, wie die Verwitterung des Gesteins (Näheres hierzu siehe Abschnitt 7.4.2).



7.2 Klimasensitivität und Rückkopplungen (*feedbacks*)

Das Klimasystem Erde besteht aus verschiedenen Komponenten (siehe Abschnitt 7.1), welche miteinander in Beziehung stehen und sich gegenseitig beeinflussen können. Alle Komponenten sind Veränderungen unterworfen und ob eine Veränderung stattfindet oder nicht ist meist keine Frage, sondern nur wie schnell eine Veränderung vor sich geht und wie stark sie ist. Reaktionen auf eine Störung können sehr schnell erfolgen, aber auch so lange dauern, dass sie für uns praktisch keine Rolle spielen.

Wie bereits geschildert, spielen verschiedenste Wechselwirkungen eine wichtige Rolle im Klimasystem. Daher ist es im Allgemeinen schwierig genau vorherzusagen, was genau aufgrund einer anfänglichen Störung passieren wird. Aus einer anfänglichen Störung, z.B. einer Störung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre durch reduzierte Abstrahlung langwelliger Wärmestrahlung als Folge von CO₂-Emissionen (siehe Abschnitt 6.4) - oder durch andere Effekte - kann es zu einer anfänglichen Erhöhung der globalen Mittel-Temperatur des Erdbodens und der bodennahen Luftschichten kommen. Dieses kann nun eine Reihe weiterer Effekte zur Folge haben. Diese können einerseits verstärkend wirken aber auch abschwächend. Bei einem verstärkenden Prozess wird die Temperatur am Ende höher sein, als die Temperaturerhöhung durch die anfängliche Störung. Bei einem abschwächenden Prozess ist das Gegenteil der Fall. Nun gibt es meist eine Vielzahl verstärkender aber auch abschwächender Prozesse und das macht es schwierig abzuschätzen bzw. genau zu berechnen, was aus einer anfänglichen Störung resultieren wird.

Zur Quantifizierung der Effekte von Rückkopplungen (*feedbacks*) werden sogenannte Klima-Rückkopplungs-Parameter (*feedback parameter*) bestimmt bzw. angegeben, welche meist mit α bezeichnet werden. Sie geben an, wie groß der Strahlungsantrieb (siehe Abschnitt 6.4) in W/m² pro Grad Temperaturerhöhung ist. Die Einheit dieses Parameters ist also W/m²/°C. Die aufgrund einer Störung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre resultierende Änderung der globalen bodennahen Lufttemperatur hängt von der Stärke der Störung ab, aber auch von der Stärke der Rückkopplungen, also von α . Man kann zeigen (siehe z.B. *Stocker, 2008*), dass man die Rückkopplungs-Parameter für die verschiedenen Prozesse einfach addieren kann, um den Gesamt-Rückkopplungs-Parameter zu erhalten, welcher den Gesamteffekt aller Rückkopplungs-Prozesse beschreibt (für den unten ebenfalls erwähnten negativen Kehrwert von α , also für die mit S bezeichnete Klimasensitivität, gilt dies nicht).

Der α -Wert ohne Rückkopplungen - genauer gesagt der α -Wert berechnet nur unter Berücksichtigung der Änderung der Planck-Strahlung (oft auch als „Planck-Rückkopplung“ (*Planck feedback*) bezeichnet, obwohl dies eigentlich keine Rückkopplung ist), welcher die Zunahme von langwelliger Wärmestrahlung aufgrund einer Temperaturerhöhung beschreibt - wird oft als α_0 bezeichnet. Der genaue numerische Wert von α_0 hängt etwas davon ab mit welcher Methode bzw. welchem Klimamodell er bestimmt wurde aber ein typischer Wert beträgt -3,2 W/m²/°C (siehe „Planck“ in Abbildung 45, aber auch *Stocker, 2008*, und *Cronin, 2020*, für zusätzliche Informationen).

Was sagt einem solch eine Zahl? Das illustrieren wir hier mittels Abbildung 44:

Bei einer (anfänglichen) Störung der Strahlungsbilanz von $3,7 \text{ W/m}^2$, entsprechend einer (quasi instantanen) Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration (z.B. von 280 ppm auf 560 ppm), entspricht die Planck-Rückkopplung einer Temperaturerhöhung von etwa $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$, den $\Delta T = -\Delta F/\alpha = -3,7 \text{ W/m}^2 / (-3,2 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}) = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Diese Berechnung basiert auf der in Abbildung 44 angegebenen Gleichung $\Delta N = \Delta F + \alpha \Delta T$ (für den Gleichgewichtsfall $\Delta N = 0$). Diese einfache Gleichung liefert einen Zusammenhang von Störung der Strahlungsbilanz (anfänglich ΔF , im Allgemeinen ΔN), Rückkopplungs-Parameter α und Temperaturänderung ΔT .

Unter Berücksichtigung von (weiteren) Rückkopplungen, welche im Folgenden kurz beschreiben werden, steigt der numerischen Wert des Gesamt- α an, wobei α negativ bleibt (sich sein Betrag aber reduziert).

In Abbildung 44 ist gezeigt, welche Temperatur sich eingestellt, wenn α den Wert von $-1,2 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$ annimmt, also einen Wert, welcher unter Berücksichtigung verschiedener Rückkopplungen bestimmt wurde (siehe „Netto“ in Abbildung 45).

Abbildung 45 zeigt Abschätzungen für *feedback parameter* α für verschiedene individuelle Rückkopplungen und deren Summe für den Gesamteffekt. Der Gesamteffekt liegt hier im Bereich $-0,6$ bis $-1,8 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$ mit einem Schwerpunkt bei etwa $-1,2 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$. Dies entspricht einer Klimasensitivität S von $0,6$ bis $1,7 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$ mit einem Schwerpunkt bei etwa $0,8 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$.

Die Störung der Strahlungsbilanz bei einer Verdopplung von CO_2 ist etwa $3,7 \text{ W/m}^2$ (siehe Abschnitt 6.4). Dieser Strahlungsantrieb von $3,7 \text{ W/m}^2$ läßt sich also nun mittels der Klimasensitivität S in eine entsprechende Temperaturänderung umrechnen. Es ergibt sich ein Temperaturbereich von $2,2 - 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dies ist in recht guter Übereinstimmung mit dem bereits erwähnten Bereich (siehe Abschnitt 6.4) von $1,5$ bis $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (IPCC AR5 WG1 SPM) bzw. $2,5 - 4 \text{ }^\circ\text{C}$ (IPCC AR6 WG1 SPM), wobei der wahrscheinlichste Wert der Temperaturerhöhung bei etwa $3 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt (passend zu unserer Berechnung: $3,7 \text{ W/m}^2 \times 0,8 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2) = 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Diese Temperaturerhöhung von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgrund einer Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration ist die beste Schätzung, die es laut des IPCC AR6 Berichts von 2021 gibt (IPCC AR6 WG1 SPM: „The AR6 assessed best estimate is 3°C with a likely range of $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ to $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (high confidence), compared to $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ to $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in AR5.“). Anmerkung: „likely“ bedeutet hier eine Wahrscheinlichkeit bzw. Sicherheit der gemachten Aussage von mindestens 66%.

Definitionen für idealisierte Reaktion auf CO₂-Verdopplung:

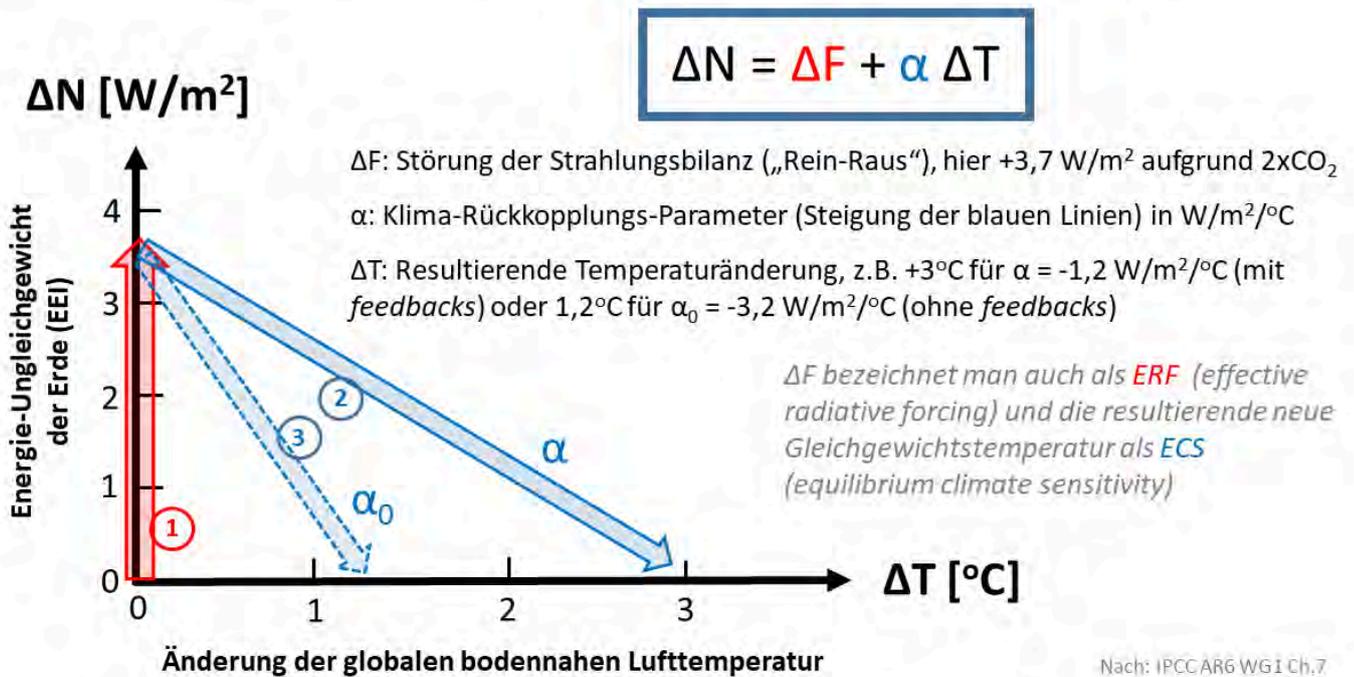


Abbildung 44: Definitionen für eine idealisierte Reaktion auf eine CO₂-Verdopplung (modifiziert nach: IPCC AR6 WG1, Kapitel 7, Box.7.1, Abb. 1). Die Störung der Strahlungsbilanz, ΔN in W/m², ist hier auf der y-Achse aufgetragen und die resultierende Temperaturänderung auf der x-Achse. Die Erde befindet sich zunächst in einem Gleichgewichtszustand, welcher hier im Ursprung des Koordinatensystems liegt. Aufgrund der Störung (hier: Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration) folgt das Klimasystem zunächst dem als 1 bezeichneten Weg „vertikal nach oben“, d.h. nur ΔN ändert sich aber die Temperatur (noch) nicht. ΔN nimmt hier einen positiven Wert an (hier ΔF = 3,7 W/m²), der anzeigt, dass Netto mehr Energie von der Sonne aus dem Weltall eingestrahlt wird als wieder ausgestrahlt wird. Die Erde erhält also einen Energieüberschuss (positive „earth energy imbalance“ (EEI)). Als Reaktion hierauf erwärmt sich die Erde. Welche Temperatur sich einstellen wird hängt vom Wert des Rückkopplungs-Parameters α ab. Der α –Wert ohne Rückkopplungen ist hier mit α₀ bezeichnet und ein möglicher typischer Wert mit Rückkopplungen mit α. Wie man sieht, bestimmt der Rückkopplungs-Parameter ob hier Weg 2 (mit Rückkopplungen) oder Weg 3 (ohne Rückkopplungen) beschritten wird und welche Temperatur im neuen Gleichgewicht (wenn also wieder ΔN = 0 gilt) erreicht wird.



Vermutlich etwas anschaulicher als der *feedback parameter* α ist dessen negativer Kehrwert, meist mit S (*sensitivity*) bezeichnet. Diese Klimasensitivität $S (= -1/\alpha)$ hat die Einheit $^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ und sagt aus, um wieviel sich die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur ändert, wenn sich der Strahlungsantrieb am Oberrand der Atmosphäre um $1 \text{ W}/\text{m}^2$ ändert. Ist zum Beispiel $S = 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ und ist der entsprechende Strahlungsantrieb $\Delta F = 3,7 \text{ W}/\text{m}^2$, dann ist die entsprechende Temperaturänderung $\Delta T = S \times \Delta F = 0,3 \times 3,7 = 1,1$ Grad Celsius.

Wichtige klimarelevante Rückkopplungsprozesse (*climate feedbacks*) sind:

- Planck-Rückkopplung (Schwarzkörper- bzw. Wärmestrahlungs-Feedback): Anpassung der emittierten Strahlung der Erde an ihre Temperaturänderung. Dieser Feedback ist der fundamentalste aller Feedbacks und in jedem Klimamodell enthalten. Die entsprechenden Werte sind hier: Feedback Parameter $\lambda = -3.2 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$ bzw. Klimasensitivität $S = +0,3 \text{ K}/(\text{W}/\text{m}^2)$. Dieser Feedback ist negativ, da er abschwächend (kühlend) wirkt, den eine Temperturerhöhung resultiert in einer Zunahme der Abstrahlung langwelliger Wärmestrahlung in den Weltraum. Siehe hierzu auch *Cronin, 2020*.
- Wasserdampf-Rückkopplung: Warme Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als kalte Luft. Bei Erwärmung verdunstet mehr Wasser und die Konzentration in der Atmosphäre steigt. Da Wasserdampf auch ein Treibhausgas ist nimmt die Temperatur weiter zu. Dieser Feedback ist positiv, d.h. verstärkend.
- Wolken-Rückkopplung: Kann positiv oder negativ sein, je nachdem wie sich welche Wolken ändert. Wolken beeinflussen sowohl die kurzwellige Strahlung (mittels Reflektion, also durch ihre Albedo) als auch die langwellige Strahlung. Optisch dicke tiefliegende Wolken haben typischerweise einen kühlenden Effekt und hohe optisch dünne Wolken haben typischerweise einen wärmenden Effekt. Die Modellierung der Wolken gehört zu den größten Herausforderungen der Klimamodellierung und der Abschätzung zukünftiger Temperaturen.
- Albedo-Rückkopplung: Meereis reflektiert Sonnenlicht viel stärker als das umgebende Ozeanwasser, d.h. die Albedo von Meereis ist höher als die von Wasser. Ähnliches gilt für Schnee und Eis an Land, da auch Schnee und Eis eine höhere Albedo haben als die meisten Landoberflächen. Wird es nun wärmer, dann schmilzt das Eis und dadurch reduziert sich die Albedo. Es wird also mehr Sonnenlicht absorbiert und dies führt zu einer weiteren Erwärmung. Dieser Feedback ist also verstärkend.
- Temperaturgradienten-Rückkopplung (*lapse rate feedback*): Die Temperatur im unteren Bereich der Atmosphäre nimmt typischerweise mit der Höhe ab. Bei einer Zunahme der Temperatur kann die Steigung der Temperaturabnahme verändert werden. Je nach Bedingung kann der Temperaturabfall mit der Höhe zunehmen oder abnehmen. Dieser Feedback kann also positiv oder negativ sein.

Abschätzungen von Klima-Rückkopplungs-Parametern α :

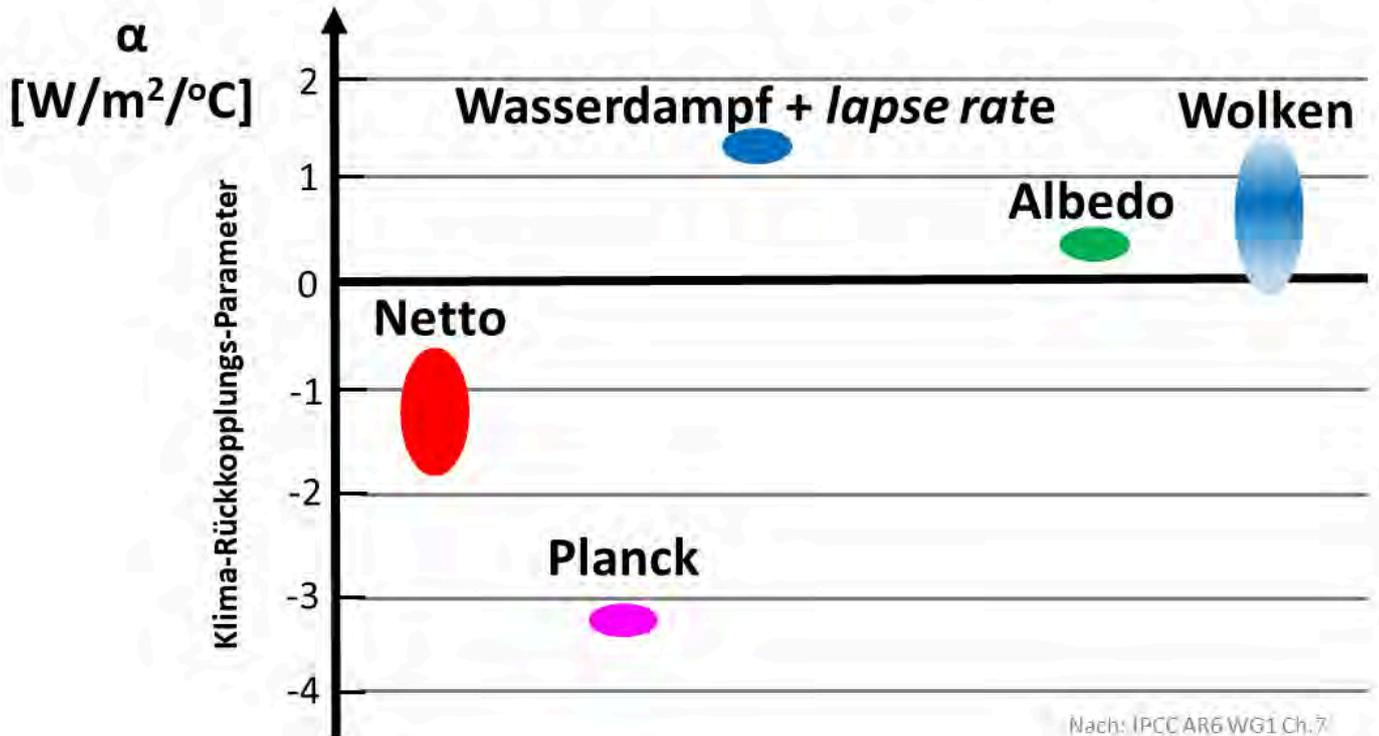


Abbildung 45: Resultat der Abschätzung der Stärke individueller Klima-Rückkopplungen sowie der Gesamteffekt aller Rückkopplungen („Netto“) mittels verschiedener Klimamodelle. Quelle: IPCC AR6 WG1 Kapitel 7, Abb. 7.10 (vereinfacht).



Ob eine Rückkopplung positiv oder negativ ist kann man auch grafisch nachvollziehen bzw. darstellen. Dies ist hier für 2 Rückkopplungen gemacht, und zwar für den Albedo-Feedback (Abbildung 46) und den Wolken-Feedback (Abbildung 47).

Diese Grafiken sind folgendermaßen zu lesen:

Beide Prozesse starten mit einer Temperaturerhöhung aufgrund einer beliebigen Ursache, also mit einer Zunahme des Wertes in der Box „Temperatur“. Beim Albedo-Feedback (Abbildung 46) geht es laut dem Pfeil nach rechts weiter zur „Schnee und Eis“ Box. Das Minus über dem Pfeil bedeutet, dass sich das Verhalten bzgl. der Richtung umdreht. Das heisst: Aus der Zunahme der Temperatur resultiert eine Abnahme der Fläche von Schnee und Eis. Dann geht es weiter zu „Albedo“ und zwar mit einem Plus, d.h. Albedo nimmt genau wie Schnee und Eis auch ab (weniger Reflektion, also mehr Absorption, also mehr Erwärmung). Weiter mit Minus zur „Strahlungsbilanz“ also Zunahme der Strahlungsbilanz, d.h. vermehrte Netto-Energiezufuhr in das Klimasystem Erde, also Erwärmung. Weiter mit Plus zur Temperatur, die damit ebenfalls zunimmt. Bei diesem ersten Umlauf hat sich also die anfängliche Temperaturerhöhung weiter verstärkt. Diese positive Verstärkung ist durch das eingekreiste Pluszeichen in der Mitte dargestellt.

Bei Wolken ist alles komplizierter, wie Abbildung 47 zeigt: Niedrige Wolken schwächen die Temperaturerhöhung ab, hohe Wolken verstärken sie.

Zusammenfassend kann man in Abbildung 48 noch einmal klar erkennen, dass der Gesamteffekt der Klimarückkopplungen darin resultiert, die Klimasensitivität S , welche eine Störung der Strahlungsbilanz mit der resultierenden Temperaturerhöhung verbindet, zu verändern - und zwar nach heutigem Wissensstand hin zu einer verstärkten Sensitivität S ausgehend von einer geringeren Sensitivität S_0 , welche Rückkopplungseffekte nicht berücksichtigt.

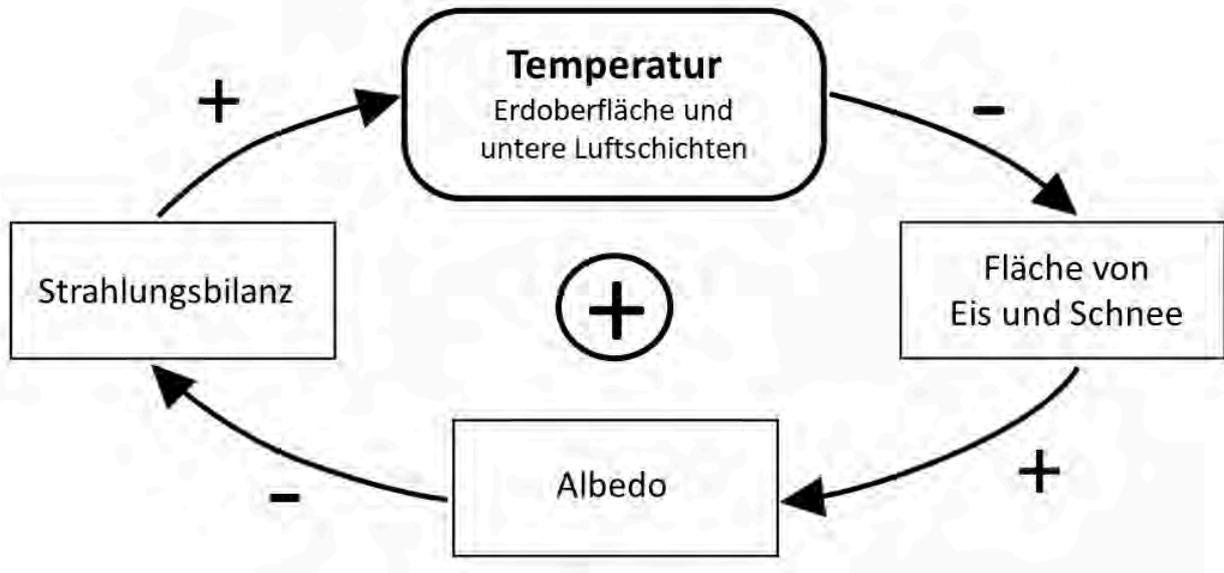


Abbildung 46: Illustration Albedo-Feedback (nach: Stocker, 2008).

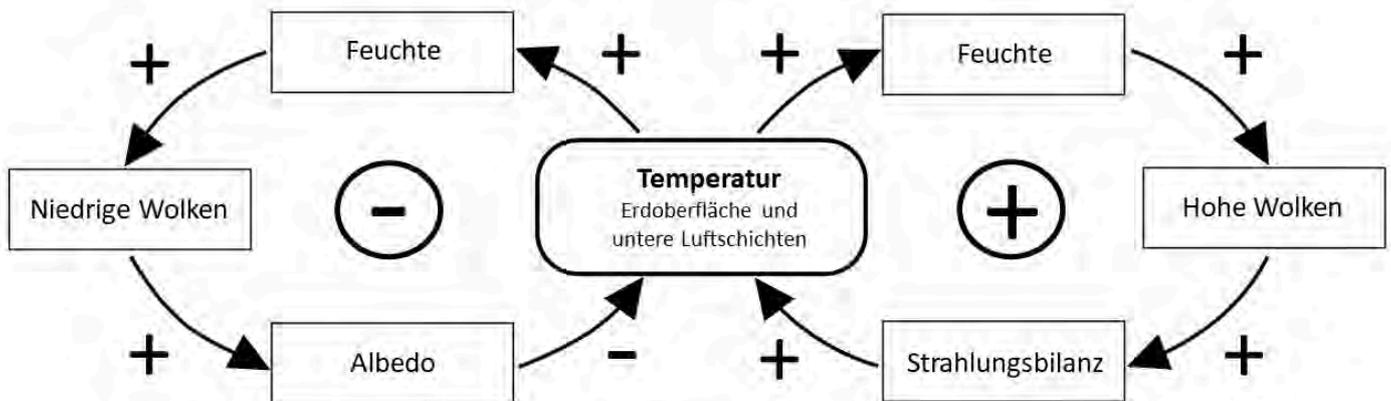
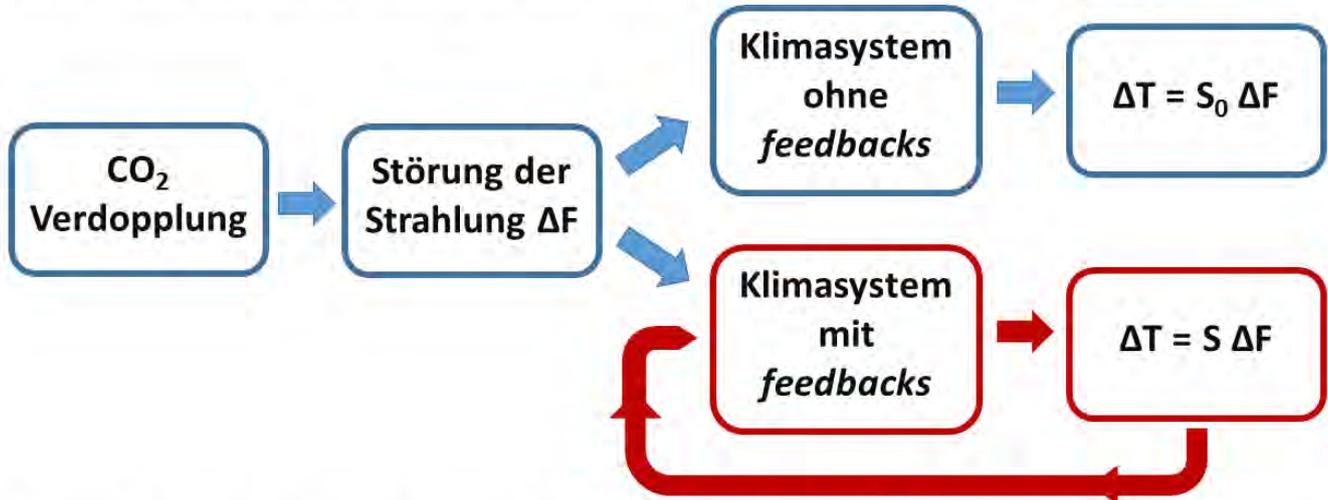


Abbildung 47: Illustration Wolken-Feedback (nach: Stocker, 2008).

Klimasensitivität ohne und mit Rückkopplungen (*feedbacks*):



Planck Sensitivität (*Planck response*) $S_0 = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ -> ca. $+1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ bei CO_2 -Verdopplung

Mit *feedbacks*: S ist größer als S_0 . $S = \Delta T/\Delta F =$ „*Equilibrium Climate Sensitivity*“ (ECS)

Nach: von der Heydt (Univ. Utrecht), Bremer Industriegespräche, Videovortrag, 26.1.2022

Abbildung 48: Klimasensitivität ohne und mit Rückkopplungen.

7.3 Kippelemente (*tipping elements*)

[Nach: *Rahmstorf et al., 2019*]: Die Erderwärmung bringt große Risiken für die Menschheit, u.a. durch die Zunahme von Wetterextremen wie Hitze, Dürren, Starkniederschlag und stärkere Tropenstürme, durch den Meeresspiegelanstieg sowie durch den Verlust von Ökosystemen. Diese Klimafolgen können zu Ernteausfällen mit Hunger, Ausbreitung von Krankheiten, zahlreichen Todesopfern, Massenmigration und im schlimmsten Fall zu internationalen Konflikten sowie zur Destabilisierung von Staaten führen. Die meisten dieser Risiken wachsen graduell mit der weiteren Erwärmung, ohne definierte Kippunkte. Einige Teilsysteme des Klimasystems haben dagegen bestimmte Kippunkte bzw. kritische Schwellenwerte, bei deren Überschreiten es zu starken und teils unaufhaltsamen und unumkehrbaren Veränderungen kommt. Eine einfache Metapher: schiebt man eine Kaffeetasse über den Schreibtischrand passiert erst nichts, bis sie einen kritischen Punkt erreicht, an dem sie kippt und abstürzt. Diese Teilsysteme (zum Beispiel die Atlantikzirkulation) werden „Kippelemente“ genannt („*tipping elements*“).

Abbildung 49 zeigt eine (unvollständige) Übersicht über wichtige Kippelemente des Klimasystems. Ein kurze allgemeinverständliche Erklärung dieser Kippelemente findet sich in *Rahmstorf et al., 2019* (Link: <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kippunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>).

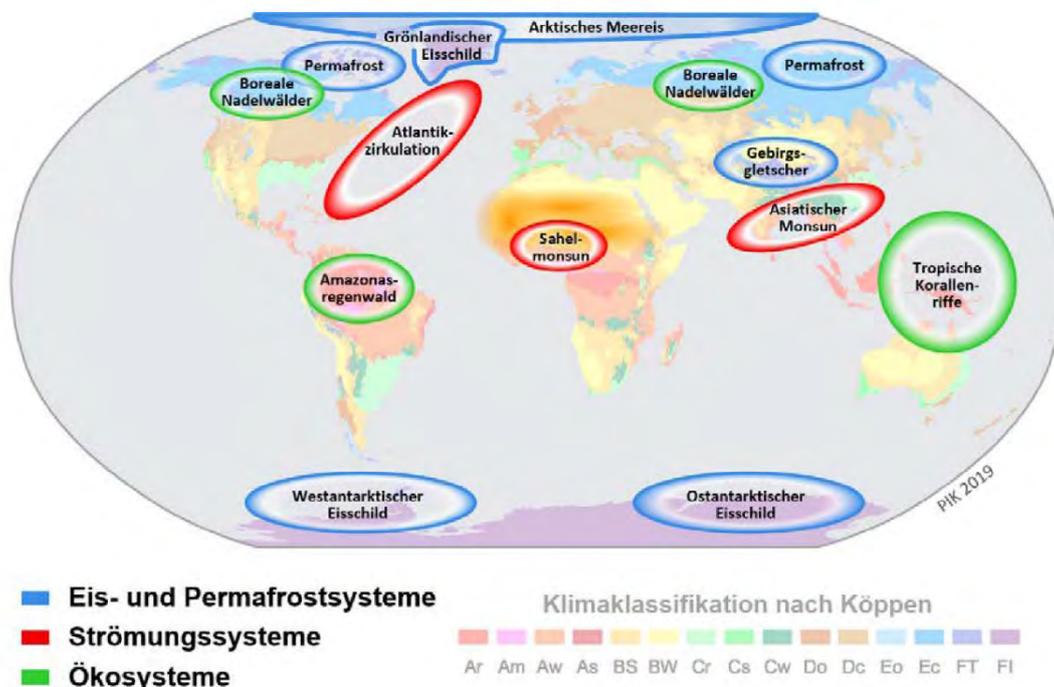


Abbildung 49: Karte der wichtigsten Kippelemente des Klimasystems (Quelle: *Rahmstorf et al., 2019*).

7.4 Kohlenstoff-Kreislauf

7.4.1 Übersicht

Wenn es um CO₂ im Rahmen des Klimawandels geht, dann denken die meisten Menschen zunächst an die entsprechenden CO₂-Emissionen durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas. Abbildung 50 zeigt die Zeitserie der globalen CO₂-Emissionen in der Einheit GigaTonnen (Gt, also Milliarden Tonnen) CO₂-Emissionen pro Jahr. Diese Abbildung ist dem Spiegel Online Artikel „Warum der unaufhaltsame Anstieg der Emissionen ein Ende hat“ von Prof. Dr. Stefan Rahmstorf vom November 2021 entnommen (<https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/uno-klimagipfel-warum-der-unaufhaltsame-anstieg-der-emissionen-ein-ende-hat-a-2dc7e80b-f9e0-4626-a964-8f69d5f67289>). In diesem Artikel wird auf eine gute Nachricht hingewiesen: „Der CO₂-Ausstoß tut nicht mehr das, was er seit Jahrzehnten tut – er steigt nicht mehr“. Hoffen wir, dass dies auch in Zukunft so bleibt und die Emissionen mittel- bzw. langfristig sogar sinken werden.

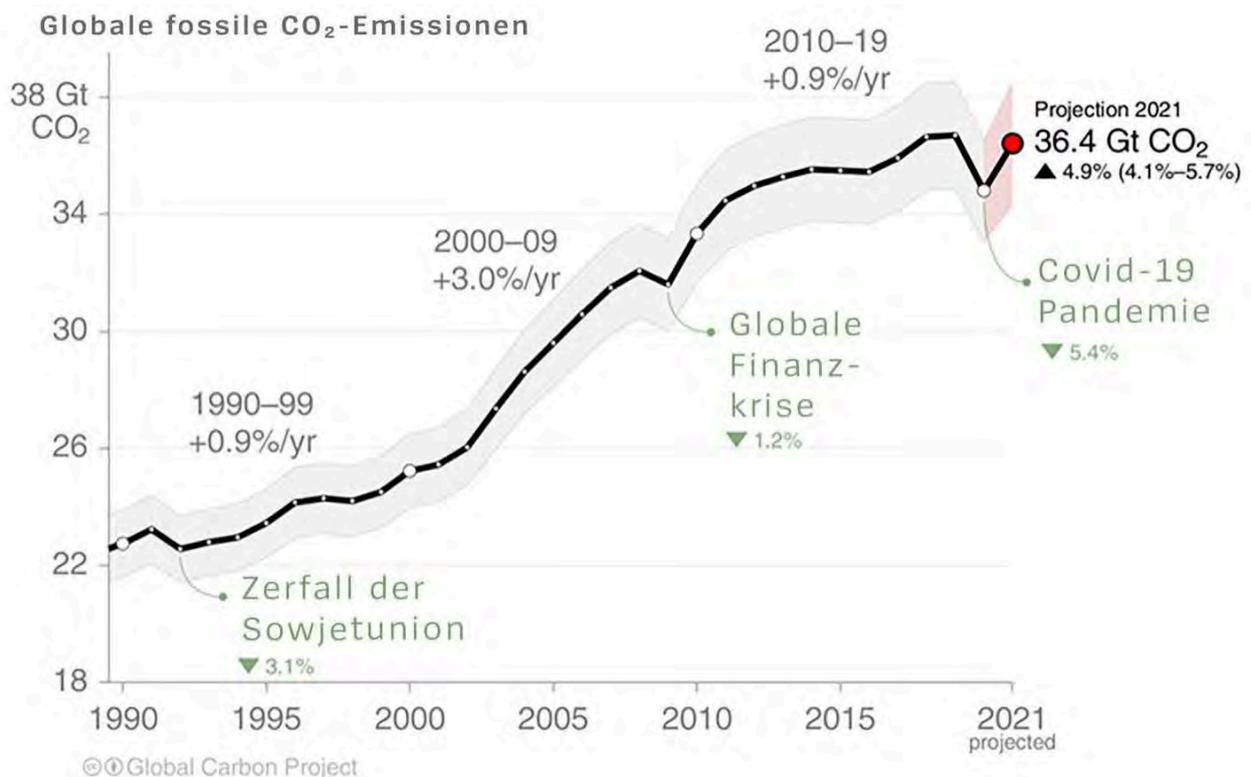


Abbildung 50: Zeitserie der globalen fossilen CO₂-Emissionen mit Anmerkungen zu den Gründen temporärer Emissionsreduktionen. Quelle der Abbildung: Spiegel Online (<https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/uno-klimagipfel-warum-der-unaufhaltsame-anstieg-der-emissionen-ein-ende-hat-a-2dc7e80b-f9e0-4626-a964-8f69d5f67289>). Daten: Global Carbon Project (<https://www.globalcarbonproject.org/>).



Dieser anthropogene Aspekt ist aber nur eine Komponente, wenn es um den globalen Kohlenstoffkreislauf geht. CO₂ ist ein natürlicher Bestandteil unserer Atmosphäre und wird von Pflanzen zum Wachstum mittels Photosynthese aufgenommen und bei der Atmung (Respiration) wieder abgegeben. Diese natürlichen Prozesse und die damit verbundenen Kohlenstoffflüsse sind Bestandteile des „natürlichen Kohlenstoff-Kreislaufs“.

Eine schematische Übersicht über den globalen Kohlenstoffkreislauf zeigt Abbildung 51. Die Daten sind dem Informationsmaterial des Global Carbon Project (GCP, <https://www.globalcarbonproject.org/>) entnommen. Sie entstammen der vom GCP zur Verfügung gestellten Powerpoint-Datei (https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pptx) bzw. der entsprechenden Veröffentlichung (Friedlingstein et al., 2021). Für die entsprechende Originalabbildung siehe Abbildung 100.

Die angegebenen Daten beziehen sich auf die Dekade 2011 – 2020. Die Atmosphäre enthält in dieser Dekade 3211 GtCO₂ (Gt = Gigatonnen = Milliarden Tonnen) entsprechend 875 Gigatonnen Kohlenstoff (vor Beginn der Industrialisierung enthielt die Atmosphäre etwa 589 GtC entsprechend einem Mischungsverhältnis von etwa 280 ppm). CO₂ Mengen und CO₂ Flüsse werden oft in verschiedenen Einheiten angegeben, welche sich aber ineinander umrechnen lassen. Eine Tonne C entspricht 3,67 Tonnen CO₂. Abbildung 51 enthält auch teilweise Angaben in GtC, z.B. für die Kohlereserven, da hier die Angabe GtCO₂ nicht sehr sinnvoll ist (Kohle enthält C-Atome aber keine CO₂-Moleküle, welche erst durch die Verbrennung (Oxidation) entstehen).

Der jährliche Zuwachs in der Atmosphäre betrug in der angegebenen Dekade 19 GtCO₂/Jahr (entsprechend etwa 5,1 GtC/Jahr). Dies ist weniger als die Zufuhr durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (35 GtCO₂/Jahr) und CO₂-Emissionen durch Landnutzungsänderungen zum Beispiel durch die Abholzung tropischer Regenwälder (4 GtCO₂/Jahr). Der Grund hierfür sind die beiden „natürlichen Kohlenstoffsinken“, nämlich die Landvegetation und die Ozeane. Die Landsenke hat im Mittel 11 GtCO₂/Jahr aufgenommen und die Ozeansenke 10 GtCO₂/Jahr.

Die genannten Zahlen sind klein im Vergleich zu den riesigen Mengen, die jedes Jahr zwischen der Atmosphäre und der Landvegetation durch Photosynthese (in die eine Richtung) sowie Pflanzen- und Bodenatmung und Zersetzung organischen Materials (in die andere Richtung) hin und fließen (etwa 500 GtCO₂/Jahr bzw. 138 GtC/Jahr). Auch zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen wird viel CO₂ ausgetauscht (etwa 290 GtCO₂/Jahr bzw. 79 GtC/Jahr). Diese großen CO₂-Austausch-Flüsse (in der Abbildung als dünnere Pfeile mit blasser Farbe dargestellt) sind die Ursache für die Schwankungen der atmosphärischen CO₂-Menge innerhalb eines Jahres. Sie sind nicht die Ursache für die langfristige Zunahme des atmosphärischen CO₂, welcher den anthropogenen Klimawandel verursacht. Die Ursache für die langfristige Zunahme des atmosphärischen CO₂ liegt in der Verbrennung fossiler Brennstoffe (roter Pfeil in Abbildung 51) und (zum kleineren Teil) in der Landnutzungsänderung (oranger Pfeil in Abbildung 51).

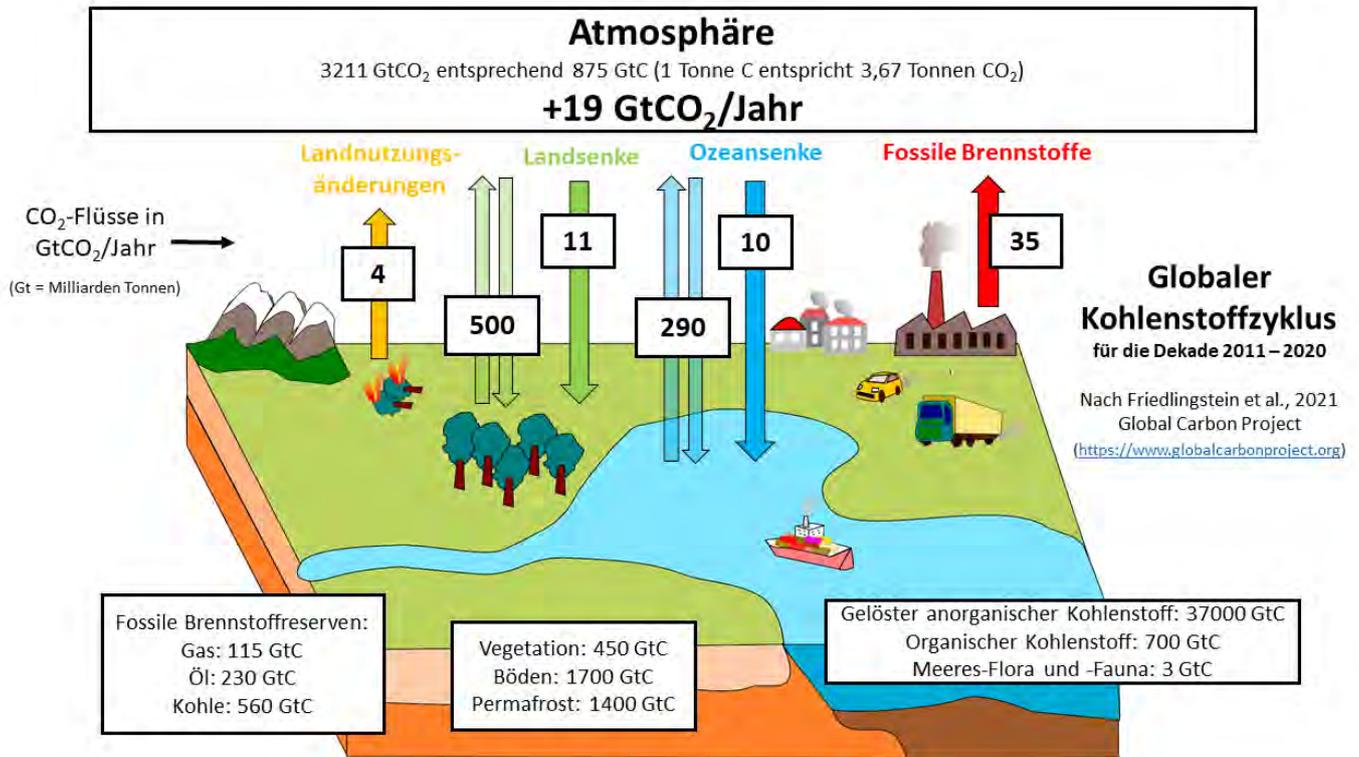


Abbildung 51: Schematische Darstellung des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs. Daten: Global Carbon Project (<https://www.globalcarbonproject.org/>) bzw. Friedlingstein et al., 2021. Für eine ähnliche Abbildung basierend auf früheren Daten siehe auch diese Abbildung, welche uns für die hier gezeigte Abbildung als Vorlage diente: https://mpimet.mpg.de/fileadmin/communication/Mediathek/Bilder_und_Grafik/2020/Kohlenstoffkreislauf/Kohlensstoffkreislauf_oT_IPCC_2013_2020_de.X3.pdf

Weitere Abbildungen zum globalen Kohlenstoffzyklus sind in Abschnitt 19 zusammengestellt. Diese basieren auf den Informationen des *Global Carbon Project* (GCP) und werden vom GCP regelmäßig aktualisiert und erweitert.

Relevant in diesem Zusammenhang ist auch der folgende Link, welcher auf Lernmaterialien für Schulen zum Thema Kohlenstoffkreislauf verweist: <https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/carbon-cycle/>.

Zur weiteren Vertiefung und Illustration dieser Thematik weist der nachfolgende Abschnitt auf eine im Rahmen dieses Projektes erstellte interaktive Grafik des Zeitverlaufs der atmosphärischen CO₂-Konzentration hin und erläutert entsprechende Aspekte des Kohlenstoffzyklus für verschiedene Zeiten und Zeitskalen.



7.4.2 CO₂ heute und in der fernen Vergangenheit dargestellt als interaktive Grafik

Im Rahmen von Clim4Edu haben wir eine interaktive Grafik zum Zeitverlauf der atmosphärischen CO₂-Konzentration der letzten 450 Millionen Jahre erzeugt, siehe

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/CO2_im_Laufe_der_Zeit.html

Auf dieser Webseite gibt es auch entsprechende Hintergrundinformation zu dieser Thematik, wie die Grafik zu verstehen ist, wie sie im Unterricht benutzt werden kann, etc.

In Folgenden präsentieren wir einen kleinen Überblick über dieses interaktive Tool aber wir empfehlen die oben genannte Webseite zu besuchen und sich mit dem dort präsentierten Material vertraut zu machen, da dieses jeweils dem letzten Stand der Entwicklung entspricht. Der verbleibende Text dieses Abschnitts kann also auch problemlos übersprungen werden.

Zur Illustration zeigen wir hier einige Screenshots (Abbildung 52 - Abbildung 55). Man sieht insbesondere den rasanten Anstieg der CO₂-Konzentration seit Beginn der Industrialisierung. In vielen Jahrtausenden davor war die Konzentration nahezu konstant. Während der letzten großen Vereisung lag die CO₂-Konzentration nur bei etwa 200 ppm. In den Jahrhundertausenden davor schwankte die Konzentration etwa im Bereich 180 – 280 ppm. Nur wenn man zeitlich sehr weit zurückgeht (siehe Abbildung 55), gibt es Konzentrationen, welche die heutige Konzentration deutlich übersteigen.

Die in den Abbildungen dargestellte Messgröße entspricht dem CO₂-Mischungsverhältnis in Luft, in „Teilchen pro Millionen“ (*parts per million*, ppm). 1 ppm entspricht einem CO₂-Molekül pro eine Millionen Luftmoleküle.

Im Folgenden geben wir einige Hintergrundinformationen, welche zu einem tieferen Verständnis der interaktiven Grafik benötigt werden:

Ähnliche Zeitreihen, wie in der interaktiven Grafik verwendet, existieren bereits in Form von publizierten statischen Grafiken z.B. im 6. Sachstandsbericht des IPCC (*IPCC AR6 WG1, Figure 2.3*). Aufgrund der sehr ausgedehnten Zeitperiode, die sowohl auf Skalen von einigen 100 Millionen Jahren, wie auch auf Skalen von wenigen Jahren wichtige Informationen enthalten, wird die Zeitreihe meist auf mehrere Grafiken mit unterschiedlichen Zeitachsen aufgeteilt. Dies erschwert dem ungeübten Betrachter die zeitliche Einordnung der Ereignisse und den Vergleich zeitlicher Konzentrationsänderungen.

Hier ermöglicht ein Schieberegler (siehe Abbildung 52 unten) die Länge des angezeigten Zeitraums dynamisch von 10 Jahren bis etwa 450 Millionen Jahren zu variieren, indem das Anfangsjahr der Zeitreihe verändert wird. Die vertikale Y-Achse wird dabei dynamisch angepasst. Um sowohl im Bereich weniger Jahre wie auch im Bereich vieler Millionen Jahre die Länge der Zeitserie gut einstellen zu können, weist der Schieberegler ein exponentielles Ansprechverhalten auf. D.h. unabhängig davon, ob gerade 100.000 oder nur 100 Jahre angezeigt werden, entspricht eine Verzehnfachung des Zeitbereichs immer der gleichen



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - Handbuch

zurückgelegten Strecke des Schiebereglers. Die horizontale X-Achse der Grafik ist jedoch linear um die dargestellte Zeitreihe besser interpretieren zu können.

Als Datengrundlage für die Grafik dienen wissenschaftlich etablierte Datensätze, die auch im 6. Sachstandsbericht des IPCC (*IPCC AR6 WG1*) verwendet wurden sowie Daten, welche über den *Climate Data Store* (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu/>) des europäischen *Copernicus Climate Change Service* (C3S, <https://climate.copernicus.eu/>) verfügbar sind.

Die verwendeten In-situ-Daten (Laboranalyse der Umgebungsluft) stammen von einer Messstation auf dem Mauna Loa auf Hawaii, die vom GML (*Global Monitoring Laboratory*) der NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) betrieben wird (siehe <https://gml.noaa.gov/>). Hier wird seit dem Ende der 1950er Jahre der CO₂ Gehalt von lokal gewonnenen Luftproben im Labor bestimmt (siehe auch Abbildung 21).

Eisbohrkerndaten werden mit vergleichbaren Labor-Methoden erzeugt, jedoch wird hier nicht der CO₂ Gehalt der Umgebungsluft, sondern von im Eis eingeschlossenen Luftbläschen bestimmt. Die Tiefe im Eis erlaubt die Datierung der Messdaten. Die interaktive Grafik verwendet eine Zusammenstellung aus Daten von verschiedenen antarktischen Eisbohrkernen, aus denen die atmosphärische CO₂ Konzentration der letzten 800.000 Jahre bestimmt wurde (*Bereiter et al., 2015*).

Bei der Bestimmung der CO₂ Konzentration vom Satelliten wird reflektiertes Sonnenlicht im nah-infraroten Spektralbereich analysiert. CO₂ absorbiert das Sonnenlicht in sehr spezifischen Spektralbändern (Farben). Die Stärke der Absorption lässt Rückschlüsse auf die atmosphärische CO₂ Konzentration zu. Die hier gezeigten Satellitendaten bestehen aus einer Zusammenstellung verschiedener Datensätzen von unterschiedlichen Satelliteninstrumenten und Auswerteverfahren (*Reuter et al., 2020, 2021*) und können über den *Climate Data Store* (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu/>) des *Copernicus Climate Change Service* (C3S, <https://climate.copernicus.eu/>) bezogen werden. Wie man sieht, gibt es einen Unterschied zwischen den CO₂ NOAA Messungen und den Satellitenmessungen. Dies liegt daran, dass die Daten unterschiedlichen Höhenbereichen entsprechen. Die NOAA Daten entsprechen der CO₂ Konzentration in der Höhe der Boden-Messstation. Die Satellitenmessungen entsprechen dem Mittelwert über die gesamte Atmosphäre.

Für sehr weit in der Vergangenheit liegende Zeiten gibt es keine direkten Messungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration. Hier macht man sich zunutze, dass es Stellvertreter-Größen gibt, sogenannte Proxy-Größen, von denen man weiß, dass sie eine Aussage über die atmosphärischen CO₂ Konzentration zulassen (<http://www.p-co2.org>).

Ein Beispiel ist die aus Fossilien bestimmbare Dichte der Spaltöffnungen (Stomata) von Blättern, die umso geringer ist, je mehr CO₂ in der Luft war (<https://www.paleo-co2.org/proxiesStomatal>). Die hier gezeigten Daten basieren auf einer Zusammenstellung von verschiedenen Proxy-Datensätzen, die auch für den 6. Sachstandsbericht des IPCC (*Foster, 2022; IPCC AR6 WG1 (Figure 2.3)*) verwendet wurden.



Die verwendeten Datensätze (Proxy, Eisbohrkerne, In-situ, Satellit) basieren alle auf mehr oder weniger lokalen Messungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration und weisen deshalb unterschiedlich starke Abweichungen vom globalen Mittelwert auf. Die verwendeten Eisbohrkerndaten wurden in der Antarktis gewonnen und überrepräsentieren Monate mit starken Niederschlägen. Die verwendeten In-situ-Daten stammen von einer einzigen Messstation auf dem Mauna Loa auf Hawaii. Die verwendeten Satellitenmessungen ermöglichen zwar prinzipiell globale Beobachtungen, müssen aber sehr stark qualitätsgefiltert werden und stehen z.B. nur tagsüber und in wolkenfreien Gebieten zur Verfügung. Proxy-Daten haben zusätzliche Unsicherheiten aufgrund der Annahmen über den Zusammenhang zwischen dem atmosphärischen CO₂ und der tatsächlich gemessenen Stellvertreter-Größe. Für die dargestellten Proxy-Daten wird außerdem für Zeiten, die länger als eine halbe Millionen Jahre zurück liegen, eine geglättete Kurve gezeigt (*Foster et al., 2017*), die eine kontinuierliche Darstellung ermöglicht.

Aufgrund der starken Glättung kann diese jedoch Messwerten, welche für kürzere Zeiträume deutlich höhere/niedrigere Werte zeigen, nicht ohne weiteres folgen. Z.B. betrug die atmosphärische CO₂ Konzentration im Zeitraum des PETM (*Paleocene-Eocene thermal maximum*) vor etwa 55,9-55,7 Millionen Jahren kurzfristig vermutlich mehr als 2000 ppm (*Anagnostou et al., 2020*). Es sei außerdem erwähnt, dass die dargestellten Unsicherheitsbereiche (95%) nur die Genauigkeit der Messungen berücksichtigen, nicht jedoch eine mögliche Abweichung zum globalen Mittelwert. Aus diesen Gründen stellen Unterschiede zwischen den Datensätzen - auch über die dargestellten 95% Unsicherheitsbereiche hinaus - nicht notwendigerweise einen Widerspruch dar.

CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den momentan stattfindenden Klimawandel (*IPCC AR6 WG1 SPM, Figure SPM.2*). Hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger, stieg die atmosphärische CO₂ Konzentration seit der industriellen Revolution von 278 ppm im Jahr 1750 auf 412 ppm im Jahr 2019 (*IPCC AR6 WG1 SPM (A1.1.1)*). Möchte man diese Steigerung beurteilen, ist es naheliegend, sie im Kontext mit natürlichen Änderungen in der Vergangenheit zu betrachten. So kann man feststellen, dass es ähnlich hohe Konzentrationen in den letzten Millionen Jahren nicht gegeben hat und die Konzentration vor der Industrialisierung etwa zehntausend Jahre lang relativ konstant war. Außerdem ist die aktuelle Steigerungsrate wahrscheinlich größer als sie in mindestens den letzten 56 Millionen Jahren jemals war (*Canadell et al., 2021; Executive Summary*).

Die atmosphärische CO₂ Konzentration ist untrennbar mit den Prozessen des Kohlenstoffzyklus verbunden, so dass für das Verständnis ihres zeitlichen Verlaufs einige Grundlagen nötig sind. Im Erdsystem gibt es verschiedene Reservoirs für Kohlenstoff. Die Atmosphäre enthält derzeit etwa 875 Gt Kohlenstoff (entsprechend 3211 Milliarden Tonnen (Gt) CO₂) (siehe Abbildung 51), der in Form von CO₂ vorliegt. Die Vegetation auf den Landmassen enthält etwa 450 GtC, Böden inklusive Permafrost etwa 3.100 GtC und in den Ozeanen sind etwa 40.000 GtC gebunden.



Die bei weitem größten Reservoirs für Kohlenstoff befinden sich jedoch in der Lithosphäre (Erdkruste und äußerer Teil des Erdmantels). Hier befinden sich etwa 60.000.000 Gt in Form von Carbonaten, 15.000.000 Gt in Form von Kerogenen (z.B. Ölschiefer) und 10.000 Gt Kohlenstoff in Form von Gashydraten (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>). Außerdem befindet sich in der Lithosphäre das Reservoir an fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl und Gas), welches etwa 1.329 Gt Kohlenstoff enthält (*Canadell et al., 2021 (Figure 5.12)*).

Der Kohlenstoff kann zwischen den Reservoirs durch biologische, chemische, physikalische, oder geologische Prozesse ausgetauscht werden.

CO₂ ist in der Atmosphäre chemisch sehr stabil und gut durchmischt, so dass die Quellen und Senken an der Erdoberfläche der Haupttreiber für die globale atmosphärische Konzentration sind. Dabei wird Kohlenstoff zwischen dem atmosphärischen und einem anderen Reservoir ausgetauscht. Diese Kohlenstoffflüsse sind Teil des globalen Kohlenstoffzyklus, den man - je nachdem auf welchen Zeitskalen die Austauschprozesse stattfinden - in einen schnellen und einen langsamen Kohlenstoffzyklus unterteilt (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>).

Ein wichtiger Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus ist der Carbonat-Silikat-Zyklus (https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonate%E2%80%93silicate_cycle). Atmosphärisches CO₂ und Regenwasser bilden Kohlensäure. Diese zersetzt über lange Zeiträume Silikatgesteine an der Erdoberfläche, die der Hauptbestandteil der Erdkruste sind. Dabei entstehen unter anderem gelöstes Siliziumdioxid, sowie Hydrogencarbonat- und Calcium-Ionen, die über Fließgewässer in die Ozeane gelangen. Dort werden sie z.B. von tierischem Plankton zum Skelettaufbau aus Calciumcarbonat verwendet. Nach dem Absterben bildet ein Teil der Skelette am Ozeanboden Carbonatsedimente, die infolge der Plattentektonik in den Subduktionszonen (<https://de.wikipedia.org/wiki/Subduktion>) in das Erdinnere transportiert werden. Durch die im Erdmantel vorherrschenden hohen Drücke und Temperaturen reagieren die Carbonate mit Siliziumdioxid erneut zu Silikatmineralen wobei CO₂ abgespalten wird, welches über Vulkanismus wieder in die Atmosphäre gelangt. Die Verwitterung silikathaltiger Steine, also die Silikat-Verwitterung, stellt eine wichtige CO₂-Senke dar.

Obwohl die jährlichen Kohlenstoff-Austauschraten mit der Atmosphäre relativ klein sind, ist der Carbonat-Silikat-Zyklus der entscheidende Faktor für die atmosphärischen CO₂ Konzentrationen auf Zeitskalen im Bereich vieler Millionen Jahre (*Walker et al., 1981*). Ändert sich z.B. die vulkanische Aktivität, oder die der Verwitterung ausgesetzte Landfläche, ändert sich langfristig auch die atmosphärische CO₂ Konzentration. So führte der Nordwärtsdrift des Superkontinents Pangea (<https://en.wikipedia.org/wiki/Pangaea>) im späten Trias vor etwa 220 Millionen Jahren dazu, dass mehr Landmassen einer stärkeren Verwitterung unter tropischen Bedingungen ausgesetzt waren, was eine Reduktion der atmosphärischen CO₂ Konzentration zur Folge hatte (*Goddéris et al., 2014*).

Auch der vor etwa 50 Millionen Jahren einsetzende Abwärtstrend ging mit Änderungen am Carbonat-Silikat-Zyklus einher. So wird diskutiert, dass die Auffaltung des Himalaya und anderer Gebirgsketten



Verwitterungsprozesse begünstigte und so CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wurde (*Hilton et al., 2020; Raymo et al., 1992*).

Der Carbonat-Silicat-Zyklus stellt außerdem einen wichtigen negativen Feedbackeffekt (Rückkopplungseffekt) dar, der das Klima der Erde langfristig stabilisiert (*Walker et al., 1981; <http://www.columbia.edu/~vjd1/carbon.htm>*). Gelangt z.B. mehr CO₂ in die Atmosphäre, wird mehr Kohlensäure im Regenwasser gebildet und die Oberflächentemperatur erhöht sich aufgrund des Treibhauseffekts. Beides erhöht die Rate der Silikat-Verwitterung, wodurch Kohlenstoff langfristig aus der Atmosphäre entfernt wird.

Auch die Entstehung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas ist Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus (https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile_Energie, <https://socratic.org/questions/how-do-fossil-fuels-form>, *Chen et al., 2021*). Ihr Ursprung ist organisches Material, welches vor bis zu mehreren 100 Millionen Jahren abgestorben und unter anaeroben (ohne Sauerstoff) Bedingungen sedimentiert ist, was eine vollständige Zersetzung verhinderte. Bei Kohle stammt die Biomasse von Bäumen oder baumähnlichen Landpflanzen, während Erdöl und -gas hauptsächlich aus ehemaligen Algen besteht. Durch Absinken der Sedimente in tiefere Bereiche der oberen Erdkruste erhöhten sich Druck und Temperatur, was die chemische Umwandlung der organischen Verbindungen in Kohle bzw. Erdöl und Erdgas ermöglichte.

Auch externe Einflüsse können den Kohlenstoffzyklus beeinflussen. Dazu zählen z.B. Änderungen des Erdorbits um die Sonne, die die atmosphärischen CO₂ Konzentrationen beeinflussen. Sie werden durch die Milanković-Zyklen (<https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovic-Zyklen>, <https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>) beschrieben und sind der Grund für die in Eisbohrkerndaten sichtbaren Glazial- und Interglazialphasen (Kalt- und Warmzeiten) die in den letzten 800.000 Jahren etwa einem 100-Tausend-Jahres-Zyklus folgten (*Abe-Ouchi et al., 2013*). Hier führt z.B. die sich aufgrund des Erdorbits ändernde Sonneneinstrahlung zu Änderungen der Ozeantemperaturen und damit zu Änderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration (*Bereiter et al., 2018; Khatiwala et al., 2019*). In den dargestellten geglätteten Proxy-Daten sind diese Zyklen nicht sichtbar, da die zeitliche Auflösung der Proxy-Daten dafür nicht hoch genug ist.

Der schnelle Kohlenstoffzyklus (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>, https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Terrestrischer_Kohlenstoffkreislauf, *Canadell et al., 2021, Figure 5.12*) ist dominiert durch biologische Prozesse, in die alle Lebensformen der terrestrischen und marinen Ökosysteme involviert sind.

Die größten Austauschraten von Kohlenstoff mit der Atmosphäre entstehen dabei durch Photosynthese (<https://de.wikipedia.org/wiki/Photosynthese>) und Respiration (Atmung) (<https://de.wikipedia.org/wiki/Zellatmung>). Vereinfacht dargestellt erzeugen Pflanzen bei der Photosynthese aus Wasser und CO₂, welches sie der Atmosphäre entziehen, Glucose (Traubenzucker) und Sauerstoff. Das bedeutet, Pflanzen verwenden den Kohlenstoff des CO₂ aus der Luft, um Biomasse



aufzubauen. Parallel zu diesem Prozess atmen Pflanzen, genau wie Menschen, Sauerstoff ein und CO₂ aus. Bei diesem, autotrophe Respiration genannten Vorgang, erzeugt die Pflanze Energie aus einem Teil des in ihr gespeicherten Zuckers. Solange eine Pflanze wächst, also Biomasse aufbaut, bindet sie mehr Kohlenstoff als sie abgibt. Stirbt die Pflanze ab, wird der in ihrer Biomasse gebundene Kohlenstoff in Form von CO₂ wieder frei, wenn z.B. Mikroorganismen die Biomasse der Pflanze zersetzen, oder die Pflanze verbrannt wird. Die in diesem Zyklus genannten Prozesse laufen auf Zeitskalen von Stunden bis zu Jahrhunderten ab und - da sie von Umweltbedingungen wie der Sonneneinstrahlung und der Temperatur abhängen - erzeugen sie einen Jahresgang der globalen atmosphärischen CO₂ Konzentration, der deutlich in den gezeigten In-situ- und Satellitendaten sichtbar ist. Der größte Teil der Landoberfläche und damit auch die meisten Pflanzen befinden sich auf der Nordhalbkugel, weshalb auch die globale CO₂-Konzentration ihr Jahresminimum typischerweise im September am Ende der nordhemisphärischen Wachstumsperiode erreicht. Das Jahresmaximum wird zum Beginn der Wachstumsperiode im Mai erreicht.

Seit der industriellen Revolution, die in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts begann, wurden mehr und mehr fossile Brennstoffe zur Energieerzeugung eingesetzt. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wird Kohlenstoff dem langsamen Zyklus entnommen und dem schnellen Kohlenstoffzyklus zugeführt. Infolgedessen stiegen die atmosphärischen CO₂ Konzentrationen zunächst langsam, dann immer schneller. Nicht nur die zeitliche Übereinstimmung, sondern auch die räumliche Verteilung mit höheren CO₂ Konzentrationen auf der Nordhalbkugel, wo die meisten fossilen Brennstoffe eingesetzt werden, und Isotopenanalysen belegen den anthropogenen Ursprung des beobachteten Anstiegs (*Canadell et al., 2021*).

Vergleicht man den jährlichen Anstieg der globalen atmosphärischen CO₂ Konzentration mit der vom Menschen emittierten Menge an CO₂, stellt man fest, dass nur etwa die Hälfte des emittierten CO₂ in der Atmosphäre verbleibt (*Friedlingstein et al., 2020, Canadell et al., 2021, Section 5.1*). Die andere Hälfte wird zu ungefähr gleichen Anteilen von der terrestrischen und der marinen Biosphäre bzw. den Ozeanen aufgenommen. Somit beeinflussen die anthropogenen CO₂ Emissionen schon jetzt die Prozesse im schnellen Kohlenstoffzyklus. Im Fall der terrestrischen Biosphäre bewirkt eine höhere CO₂ Konzentration z.B. eine Steigerung des Pflanzenwachstums (CO₂ Düngung). Diese Steigerung ist auch der Grund für die Zunahme der Amplitude des Jahresganges, die man in den In-situ-Daten beobachten kann. In den gezeigten Satellitendaten ist dies aufgrund der kürzeren Zeitreihe und aufgrund wechselnder Satelliteninstrumente mit unterschiedlicher räumlicher Abdeckung nicht ohne weiteres sichtbar. Im Fall der Ozeane folgt aus einer höheren CO₂ Konzentration z.B., dass mehr CO₂ im Wasser der Ozeane gelöst wird (höherer Partialdruck). Die Tatsache, dass sowohl die terrestrische wie auch die marine Biosphäre auf die derzeit steigenden atmosphärischen Konzentrationen mit einer erhöhten Aufnahme von CO₂ reagieren stellt ein stabilisierendes Feedback dar. Inwieweit dies jedoch auch unter Klimaänderungs-Bedingungen erhalten bleibt, ist Gegenstand aktueller Forschung.

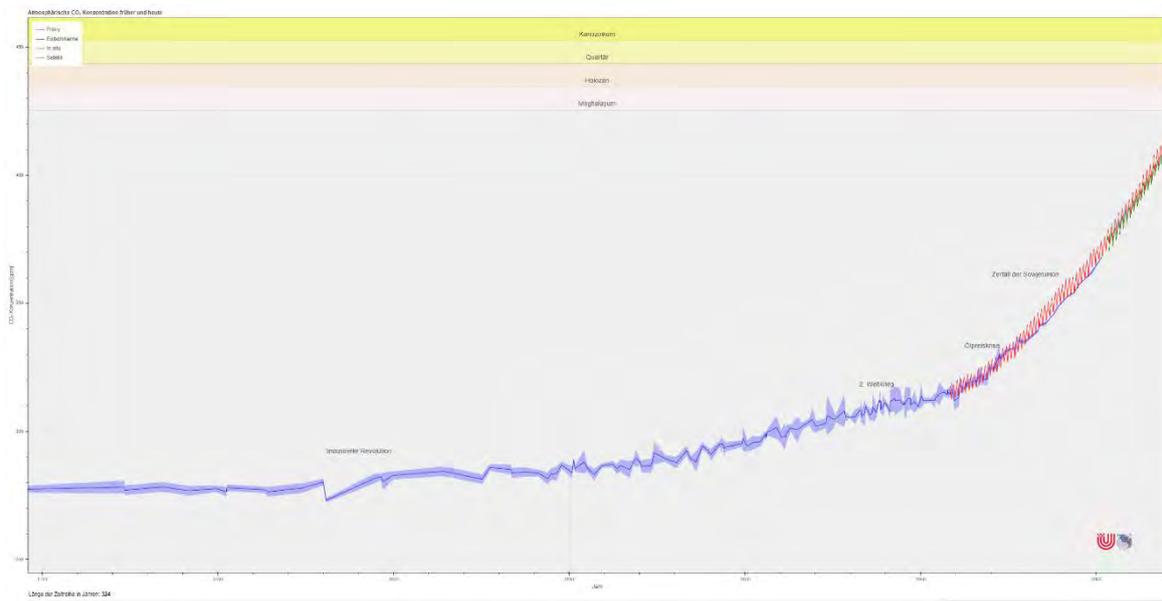


Abbildung 52: Atmosphärische CO₂-Konzentration seit Beginn der industriellen Revolution. Quelle: Interaktive browserbasierte Clim4Edu Grafik der atmosphärische CO₂ Konzentration von vor etwa 450 Millionen Jahre bis zum Jahr 2020, https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/CO2_im_Laufe_der_Zeit.html.

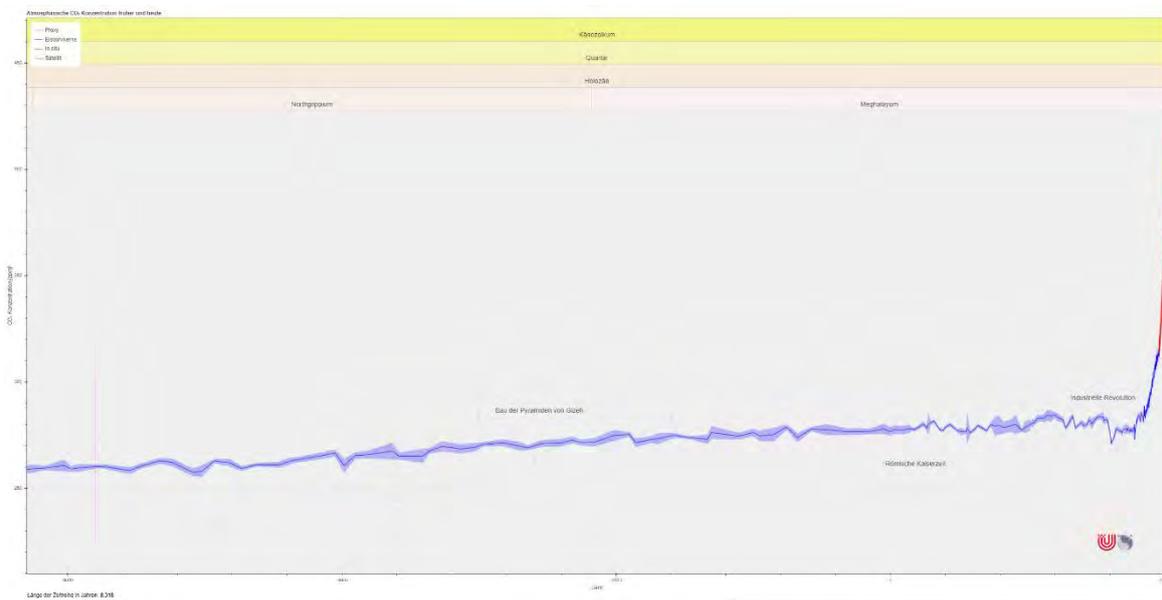


Abbildung 53: Wie Abbildung 52 aber für die atmosphärische CO₂-Konzentration seit fast 6000 Jahren.



8 Essentielle Klimavariablen (ECVs) und ihre Messung durch Satelliten

Eine essentielle Klimavariablen oder ECV (*Essential Climate Variable*) ist eine physikalische, chemische oder biologische Variable oder eine Gruppe verknüpfter Variablen, die entscheidend zur Charakterisierung des Erdklimas beiträgt (siehe https://www.dwd.de/DWD-GCOS/DE/nationalebeitraege/beobachtungen/ecv_beschreibung.html).

Viele ECVs lassen sich mittels Satelliten beobachten und in diesem Kapitel gibt es je ein Unterkapitel zu einigen dieser ECVs.

Das *Global Climate Observing System* (GCOS) spezifiziert derzeit mehr als 50 ECVs. Details hierzu finden sich auf der GCOS ECV Webseite: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen kleinen Überblick über diejenigen ECV zu geben, welche heutzutage mittels Satelliten gemessen werden können. Hierbei wird sich auf diejenigen ECVs fokussiert, die von der europäischen Klimawandel-Initiative (*Climate Change Initiative*, CCI, <https://climate.esa.int/de/>) der ESA erfasst und bearbeitet werden.

Eine kurze Übersicht wie Satellitenmessungen von ECVs funktionieren ist in Abschnitt 8.1. zusammengestellt.

Zur Beantwortung der Frage „Wie messen Satelliten CO₂?“ haben wir ein interaktives Tool entwickelt, mit dem man selbst Satellitendaten auswerten kann bzw. mit dem man spielerisch ein gutes Verständnis des Auswerteverfahrens erlangen kann: https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/Wie_messen_Satelliten_CO2.html.

Wichtige Quellen für ECV Datensätze sind einerseits das bereits erwähnte ESA CCI Programm (Details siehe Abschnitt 8.2) und andererseits der EU Klimawandel-Dienst C3S (Details siehe Abschnitt 8.3).

Entsprechende Datensätze bzw. Abbildungen dieser beiden wichtigen europäischen Klimawandelinitiativen werden für die Erläuterung verschiedene Aspekte des Klimawandels in diesem Dokument verwendet.

8.1 Wie messen Satelliten?

Satelliten wie z.B. der europäische Umweltsatellit ENVISAT (siehe Abbildung 56) sind mit einem oder mehreren Instrumenten bestückt, welche meistens Strahlung in verschiedenen Spektralbereichen messen. Dies kann „aktiv“ oder „passiv“ geschehen.

Aktive Messmethoden wie Radar (<https://de.wikipedia.org/wiki/Radar>) oder Lidar (<https://de.wikipedia.org/wiki/Lidar>) basieren auf der aktiven Aussendung von Strahlung und dem Empfang der rückgestreuten bzw. der rückreflektierten Strahlung. Misst man die Zeit, welche die Strahlung benötigt, um vom Satelliten zum Erdboden und zurück zum Satelliten zu laufen, so kann man mittels der gemessenen Laufzeit und bei bekannter Höhe des Satelliten und weiteren Informationen z.B. die Höhe des Meeresspiegels zu bestimmen (siehe z.B. <https://www.dw.com/de/sentinel-6-meeresspiegel-unter-beobachtung/a-55573000>). Aus der relativen Stärke des Rückstreusignals lässt sich auf Bodeneigenschaften zurückschießen. So lassen sich Informationen über die Ozeane, Landoberflächen und das Meereis etc. gewinnen.

Passive Messmethoden nutzen vorhandene Lichtquellen wie die Sonne (siehe z.B. SCIAMACHY Instrument: <https://de.wikipedia.org/wiki/SCIAMACHY>) oder die thermische Wärmestrahlung der Erde (siehe z.B. das IASI Instrument: <https://www.eumetsat.int/iasi>). Die Wellenlänge der gemessenen Strahlung muss zur gewünschten Anwendung passen. So absorbiert z.B. das Treibhausgas CO₂ nur in bestimmten Spektralbereichen und nur wenn die Strahlung in diesen Spektralbereichen in geeigneter Weise gemessen wird, dann kann man Informationen über das atmosphärische CO₂ aus diesen Messungen erhalten. Die Stärke der gemessenen Strahlung hängt dann von der Menge des atmosphärischen CO₂-Gehaltes ab: Je mehr CO₂ die Atmosphäre enthält, je geringer ist die gemessene Strahlung bei denjenigen Wellenlängen, bei denen das CO₂ Sonnenlicht absorbiert („verschluckt“) (siehe https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/Wie_messen_Satelliten_CO2.html). Mittels Strahlungsmessung kann also die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt werden oder – je nach Spektralbereich – Informationen über Bodeneigenschaften gewonnen werden. Wie schnell ein Satellit Informationen über die gesamte Erde erhält, hängt z.B. von seinem Orbit ab. Näheres hierzu und weitere Informationen zu klimarelevanten Satellitenmessungen siehe https://climate.esa.int/media/documents/ESA_CCI_Education_Resource_Pack_Earth_Pulse.pdf

Abbildung 56 : Der europäische Umweltsatellit ENVISAT (2002-2012), welcher mit einer Vielzahl von Messinstrumenten zur Überwachung von Atmosphäre, Land und den Ozeanen ausgestattet war. Eins dieser Instrumente war das SCIAMACHY Instrument, welches wissenschaftlich von der Universität Bremen betreut wurde.





8.2 ECVs und ESA Klimawandel-Initiative (*Climate Change Initiative, CCI*)

Eine wichtige Datenquelle für Satellitenmessungen von essentiellen Klimavariablen, also ECVs, ist die ESA Klimawandel-Initiative (*Climate Change Initiative, CCI*, <https://climate.esa.int/de/>). Entsprechende Datenprodukte bzw. Abbildungen oder andere Informationen der ESA CCI Webseiten wurden zur Beschreibung verschiedene Aspekte in diesem Dokument verwendet.

Siehe insbesondere auch diese ESA CCI Webseite, auf der ein Überblick über klimarelevante Satellitenmessungen zusammengestellt wurde: <https://climate.esa.int/de/evidence/observations-change/>. Einige Abbildungen dieser Webseite - nämlich insbesondere diejenigen, welche Satellitenmessungen von CO₂ und Methan darstellen - basieren auf Datenprodukten, welche die Universität Bremen im Rahmen des GHG-CCI Projekts (<https://climate.esa.int/en/projects/ghgs/>) erzeugt und bereitgestellt hat.

8.3 ECVs und Copernicus Klimawandel-Service (*Climate Change Service, C3S*)

Eine weitere wichtige Datenquelle für globale Satellitenmessungen von ECVs ist der *Climate Data Store* (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu/>) des europäischen Klimawandel-Service (*Copernicus Climate Change Service, C3S*, <https://climate.copernicus.eu/>).

Entsprechende Datenprodukte bzw. Abbildungen oder andere Informationen der C3S Webseiten wurden zur Erläuterung verschiedene Aspekte in diesem Dokument verwendet.

Eine wichtige Aktivität von C3S sind Assessments (also „Bewertungen“) des Klimas bzw. dessen Zustands im Allgemeinen und bezüglich verschiedener klimarelevanter Parameter im Speziellen.

Eines dieser Assessments ist das jährlich durchgeführte „*European State of the Climate*“ (ESOTC) Assessment (<https://climate.copernicus.eu/ESOTC>). Im Rahmen dieses Assessments werden eine Vielzahl aussagekräftiger Abbildungen erzeugt. Einige dieser Abbildungen sind in diesem Dokument wiedergegeben. Abbildungen, welche Satellitenmessungen der Treibhausgase CO₂ und Methan zeigen (siehe <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/greenhouse-gas-concentrations>) basieren auf Daten bzw. Abbildungen, welche die Universität Bremen für C3S erzeugt hat.

8.4 Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und daher eine sogenannte essentielle Klimavariablen (ECV).

CO₂ entsteht in großen Mengen – derzeit etwa 40 Milliarden Tonnen pro Jahr – bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Bodenmessungen des atmosphärischen CO₂ gibt es seit 1958 (<https://de.wikipedia.org/wiki/Keeling-Kurve>) und Satellitenmessungen seit dem Start des ENVISAT-Satelliten (<https://de.wikipedia.org/wiki/Envisat>) im Jahre 2002 dank des deutsch/niederländisch/belgischen Satelliten-Instruments SCIAMACHY (<https://de.wikipedia.org/wiki/SCIAMACHY>), welches eines von 10 Instrumenten auf diesem Satelliten war.

Relevante ESA CCI Webseiten:

<https://climate.esa.int/de/projekte/ghgs/>
<https://climate.esa.int/en/projects/reccap-2/>



Foto: <https://climate.esa.int/media/images/G.2e16d0ba.fill-400x400-c100.format-webp.webpquality-75.webp>

Hier erfährt man ...

- ... dass man den weltweiten Anstieg des CO₂ auch aus dem Weltraum beobachten kann
- ... wie stark der CO₂-Anstieg ist
- ... was der Grund für die jahreszeitlichen CO₂-Schwankungen sind, die den Anstieg überlagern

Wir haben zu dieser Thematik auch ein webbasiertes interaktives Tool entwickelt:

https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/Wie_messen_Satelliten_CO2.html

Auf dieser Webseite gibt es auch entsprechende Hintergrundinformationen einschließlich Informationen zur Benutzung des Tools im Unterricht.

Abbildung 57 zeigt Zeitreihen und globale Karten des atmosphärischen CO₂ von 2003 bis 2020, gemessen mit mehreren Satelliteninstrumenten (SCIAMACHY/ENVISAT 2003-2012

(<https://de.wikipedia.org/wiki/SCIAMACHY>), GOSAT

(https://de.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_Gases_Observing_Satellite) seit 2009 und NASA's OCO-2

(https://de.wikipedia.org/wiki/Orbiting_Carbon_Observatory_2) seit 2014).

Die in der Abbildung dargestellte Messgröße ist das vertikal gemittelte CO₂-Mischungsverhältnis, genannt XCO₂, in „Teilchen pro Millionen“ (*parts per million*, ppm). 1 ppm entspricht einem CO₂-Molekül pro eine Millionen Luftmoleküle. Wenn XCO₂ also an einem Ort den Wert 400 ppm hat, dann bedeutet dies, dass

sich oberhalb dieses Ortes im Mittel über die gesamte Atmosphäre (vom Erdboden bis zum Weltraum) 400 CO₂ Moleküle pro eine Millionen Luftmoleküle befinden. In dieser vertikalen Luftsäule sind also 0.04% aller Moleküle CO₂-Moleküle.

Satellitenbeobachtung des CO₂-Anstiegs:

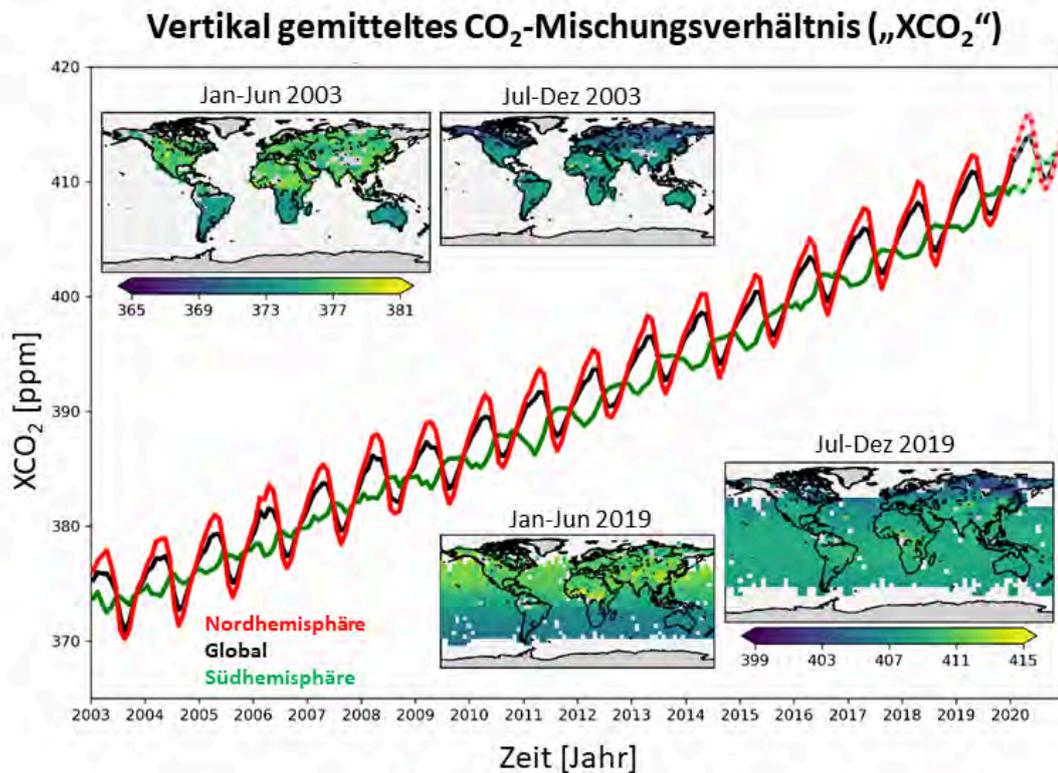


Abbildung 57: Zeitreihen und globale Karten von CO₂-Satellitenmessungen. Dargestellt ist das (vertikal gemittelte) atmosphärische Mischungsverhältnis von CO₂ in ppm (parts per million). Klar zu erkennen ist der Anstieg des CO₂ aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die jahreszeitlichen Schwankungen des CO₂ aufgrund der Aufnahme und Abgabe durch Pflanzen innerhalb eines jeden Jahre durch Pflanzenwachstum und Pflanzenatmung sowie Zersetzung absterbender Pflanzenreste. Quelle: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/Indicators/ghg_concentrations/C3S_indicators_ghg_concentrations_fig2_April21_branded.pdf

Die hier gezeigten Satelliten-Beobachtungen basieren auf der Messung und Interpretation von reflektiertem Sonnenlicht in Spektralbereichen, in denen CO₂ Sonnenlicht absorbiert (das Messprinzip heißt „Absorptions-Spektroskopie“). Je mehr CO₂ sich in der Atmosphäre befindet, je mehr Sonnenlicht wird (bei den entsprechenden Wellenlängen) absorbiert und je weniger „CO₂-Lichtsignal“ kommt beim Satelliten an. Daher kann man aus den Satelliten Fernerkundungs-Messungen auf die atmosphärische CO₂-



Menge zurückrechnen. Hierdurch kann die gesamte CO₂-Menge (die „vertikale Säule“) gut bestimmt werden, aber nicht in welcher Höhe genau wieviel CO₂ vorhanden ist. Die Konzentration direkt am Erdboden wird lokal mittels Bodenmessungen erfasst (siehe z.B. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>) und vertikale Profile, also die Höhenverteilung, mittels Flugzeugmessungen oder anderen Messungen. Dies zeigt, dass sich die verschiedenen Messmethoden sehr gut ergänzen, wobei der große Vorteil der Satellitenbeobachtungen die globale Abdeckung ist. Wie die globalen Karten zeigen, ändert sich die CO₂-Konzentration räumlich nur sehr wenig. Dies hat mit der langen atmosphärischen Verweildauer von CO₂ zu tun und mit der damit verbundenen guten Durchmischung sowie der relativ hohen Konzentration von CO₂ in der derzeitigen Atmosphäre.

Die in der Abbildung gezeigten räumlichen aber auch die zeitlichen Schwankungen haben viel mit der Aufnahme und der Abgabe von CO₂ durch Pflanzen zu tun. Über der Nordhemisphäre ist die CO₂-Konzentration typischerweise am höchsten im Mai (siehe die rote Zeitreihe). In den darauffolgenden (Sommer-)Monaten werden riesige Mengen CO₂ aus der Atmosphäre für das Pflanzenwachstum entnommen (Photosynthese). Pflanzen atmen wie wir Menschen aber auch CO₂ wieder aus (Respiration). Hierdurch wird CO₂ wieder an die Atmosphäre zurückgegeben. Zusammen mit weiteren Prozessen, wie z.B. die Zersetzung des heruntergefallenen Laubes im Herbst, ergibt sich näherungsweise ein Kreislauf, der sogenannte Kohlenstoffkreislauf. Auf der Südhemisphäre gibt es weniger Pflanzen und daher sind dort die jahreszeitlichen Schwankungen viel kleiner als nördlich des Äquators (siehe die grüne Kurve im Vergleich zur roten).

Bei einem ungestörten Kohlenstoffkreislauf (beim sich Aufnahme und Abgabe im Mittel ausgleichen) könnte bzw. würde am Ende eines Jahres genau so viel CO₂ in der Atmosphäre sein wie zu Beginn dieses Jahres. Aber wie die Abbildung zeigt, ist dies nicht der Fall: Das CO₂ steigt unaufhörlich an. Das liegt daran, dass wir durch kontinuierliche Emissionen den Kohlenstoffkreislauf stören: Wir verbrennen fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl und das dabei entstehende CO₂ sammelt sich in der Atmosphäre an. CO₂ ist chemisch sehr träge und wird daher kaum abgebaut. Ein großer Teil wird hunderte oder sogar tausende von Jahren in der Atmosphäre verbleiben. Der Anstieg des CO₂ schwankt etwas von Jahr zu Jahr aber liegt derzeit bei etwa 2,3 ppm/Jahr. Da CO₂ sehr langlebig und daher in der Atmosphäre gut gemischt ist, ist dieser Anstieg in guter Näherung überall auf der Welt der Gleiche, siehe z.B. die in der Abbildung gezeigten Zeitreihen: alle Kurven (rot Nordhemisphäre, grün Südhemisphäre, schwarz global) haben in etwa die gleiche Steigung. Da CO₂ in der ganzen Atmosphäre typischerweise sehr gut gemischt ist, kann man eine Mischungsverhältniszunahme einfach in die entsprechende Massenzunahme umrechnen: Ein Anstieg von 1 ppm entspricht 7,77 Milliarden Tonnen CO₂. Dies wird oft angegeben in der Einheit GtCO₂, wobei G für Giga (also Milliarde) steht, aber oft auch als 2,12 GtC (= 2,12 Milliarden Tonnen Kohlenstoffatome).

Ein Teil des von uns emittierten CO₂ – derzeit etwa 50% - wird von den sogenannten natürlichen Kohlenstoffsenken aufgenommen, den Ozeanen und der Landbiosphäre. Ohne diese Senken wäre die CO₂



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Konzentration in der Atmosphäre bereits viel höher und die Erderwärmung schon weiter fortgeschritten. Vermehrtes Pflanzenwachstum durch CO₂-Düngung mittels erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration ist sicherlich ein eher positiver Effekt aber die CO₂-Anreicherung im Wasser führt zu einer Versauerung der Ozeane mit deutlichen negativen Konsequenzen für viele Meeresbewohner. Die Ozeane nehmen derzeit etwa 26% des emittierten CO₂ auf und die Landbiosphäre 29% (siehe Abbildung 101).

8.5 Methan (CH₄)

Methan (CH₄) ist nach CO₂ das wichtigste anthropogene Treibhausgas und damit ebenfalls eine essentielle Klimavariablen (ECV).

Satellitenmessungen des atmosphärischen Methans gibt es seit dem Start des ENVISAT-Satelliten (<https://de.wikipedia.org/wiki/Envisat>) im Jahre 2002 dank des deutsch/niederländisch/belgischen Satelliten-Instruments SCIAMACHY (<https://de.wikipedia.org/wiki/SCIAMACHY>).

Diese Messungen werden derzeit durch den japanischen GOSAT Satelliten weitergeführt sowie durch den europäischen Sentinel-5-Precursor (S5P) Satelliten und weitere Satelliten.

Relevante ESA CCI Webseiten:

<https://climate.esa.int/de/projekte/ghgs/>
<https://climate.esa.int/en/projects/reccap-2/>



Foto: <https://climate.esa.int/media/images/G.2e16d0ba.fill-400x400-c100.format-webp.webpquality-75.webp>

Abbildung 58 zeigt eine globale Karte der atmosphärischen Methanverteilung. Wie man sieht, ist die Konzentration über der Nordhemisphäre (meist grün) höher als in der Südhemisphäre (meist blau). Dies liegt daran, dass sich die meisten bzw. wichtige Methan-Quellen auf den nordhemisphärischen Landflächen befinden (Öl-, Gas- und Reisfelder, Kohleminen, Mülldeponien, Tierhaltung (Rinder, Schafe, ...), Sümpfe, etc.). Klar durch regional erhöhte Konzentrationen zu erkennen (oft rot) sind auch wichtige Quellregionen wie China, Indien und Turkmenistan aber auch große Teile der USA, Russlands und der Tropen.

Abbildung 59 zeigt globale Karten und Zeitserien der atmosphärischen Methan-Konzentration für die Jahre 2003 – 2020. Wie man sieht, unterliegt das Methan jahreszeitlichen Schwankungen. Methan entsteht u.a. bei Fäulnisprozessen unter Luftabschluss zum Beispiel in Sümpfen und Reisfeldern, insbesondere wenn es gleichzeitig warm und feucht ist. Über der Nordhemisphäre ist die atmosphärische Methankonzentration typischerweise um den September herum am höchsten.

In den Jahren 2000 - 2007 war die atmosphärische Konzentration nahezu konstant, aber vorher und nachher stieg sie an (siehe https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). Dieses Zeitverhalten der atmosphärischen Methan-Konzentration ist nicht sehr gut verstanden und ein Gegenstand aktueller Forschung. Weitere Bilder hierzu siehe auch https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/cg_img.html.

Eine Übersicht über die verschiedenen Quellen und Senken des Methans zeigt Abbildung 60.

Satellitenbeobachtung von Methan (CH₄):

Vertikal gemitteltes Methan-Mischungsverhältnis („XCH₄“)

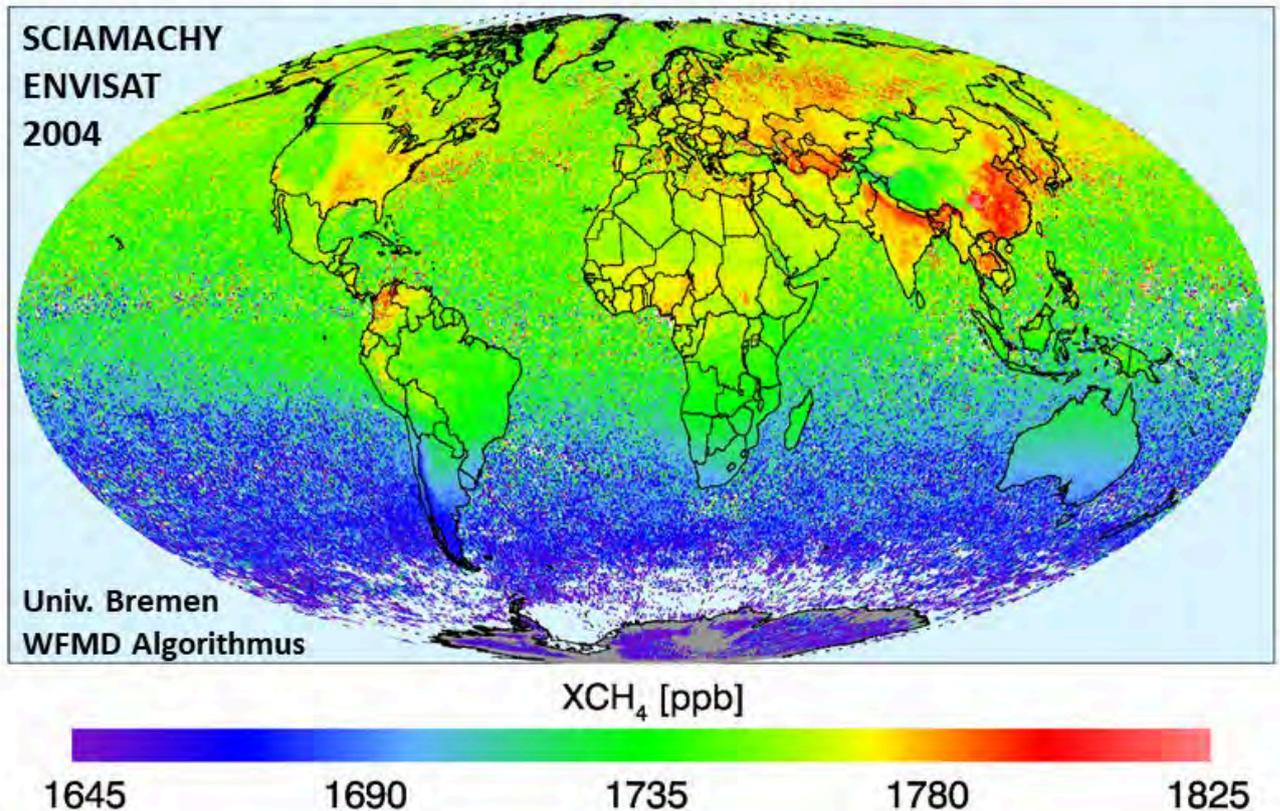


Abbildung 58: Globale Karte der atmosphärischen Methan-Konzentration des Jahres 2004. Gezeigt ist das vertikal gemittelte Mischungsverhältnis in Teilchen pro Milliarde bzw. Anzahl der CH₄-Moleküle pro Milliarden Luftmoleküle (parts per billion, ppb) hier als XCH₄ bezeichnet. Das XCH₄ wurde mittels des WFMD-Algorithmus aus den Strahlungsmessungen des SCIAMACHY Satelliteninstrumentes auf dem europäischen ENVISAT Satelliten abgeleitet. Klar zu erkennen sind starke Quellregionen des Methans, wie zum Beispiel Teile von China, Indien, Russland, Turkmenistan und den USA. Quelle: Universität Bremen (https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/cg_img.html).

Satellitenbeobachtung von Methan (CH₄):

Vertikal gemittelt Methan-Mischungsverhältnis („XCH₄“)

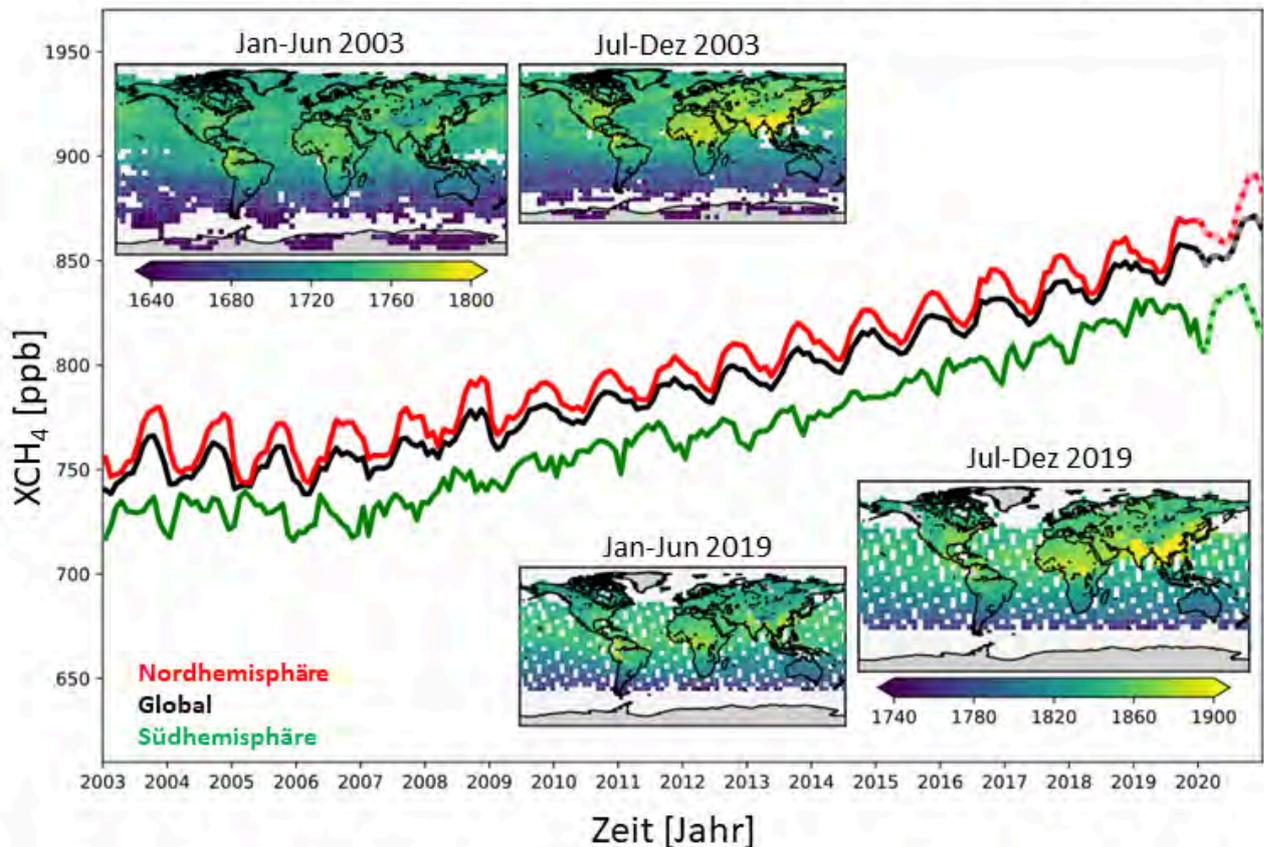


Abbildung 59: Zeitserien und globale Karten der atmosphärischen Methan-Konzentration (Quelle: Copernicus Climate Change Service (C3S) (Details siehe <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/greenhouse-gas-concentrations>)). Wie man sieht, nimmt die atmosphärische Konzentration etwa seit 2007 stark zu. Warum dies so ist, das ist ein Gegenstand der aktuellen Forschung. Aufgrund der Vielzahl der natürlichen und anthropogenen Quellen des Methans, aber auch aufgrund des Abbaus durch komplexe chemische Reaktionen in der Atmosphäre, ist diese Frage nicht leicht zu beantworten.

8.6 Wasserdampf

Wasserdampf ist ein wichtiges Treibhausgas, denn Wasserdampf trägt am stärksten zum natürlichen Treibhauseffekt bei. Wasserdampf kann durch positive Rückkopplung eine anfängliche Erwärmung verstärken. Erwärmung führt zu vermehrter Verdunstung und warme Luft kann mehr Wasserdampf enthalten als kalte Luft; und da Wasserdampf ein Treibhausgas ist, führt dies zu einer weiteren Erwärmung.

Es kann sich jedoch nicht beliebig viel Wasserdampf in der Atmosphäre aufhalten. Dies wird durch Kondensation mit Wolken- bzw. Regenbildung verhindert.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/en/projects/water-vapour/>

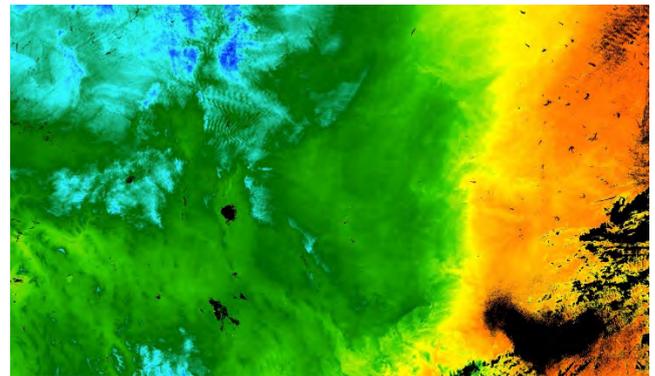


Bild: https://climate.esa.int/media/images/Water-Vapour-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Abbildung 61 zeigt globale Satellitenmessungen des atmosphärischen Wasserdampfs (in der Einheit kg/m^2 entsprechend der Menge Wasserdampf, welche jeweils in einer vertikalen Säule mit einer Grundfläche von einem Quadratmeter enthalten ist). Die Wasserdampfmenge ist am höchsten in den Tropen und nimmt zu den Polen hin stark ab.

Satellitenmessungen von Wasserdampf:

Wasserdampf Vertikalsäule in Kilogramm / Quadratmeter

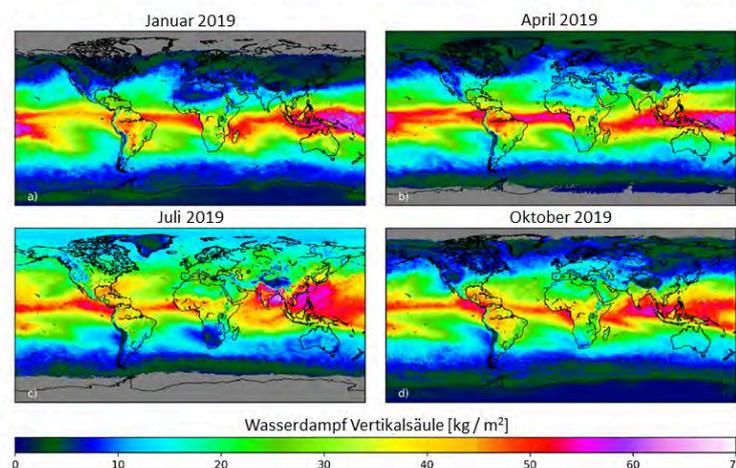


Abbildung 61: Globale Karten der atmosphärischen Wasserdampfverteilung in verschiedenen Monaten des Jahres 2019 basierend auf den Messungen des Sentinel-5-Precursor (S5P) Satelliten. Dargestellt ist die Gesamtmenge Wasserdampf in Kilogramm Wasserdampf pro Quadratmeter. Quelle: Küchler et al., 2021.



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Wenn Wasserdampf so wichtig für das Klima ist, wieso wird dann im Rahmen der Klimaproblematik immer nur CO₂ erwähnt und nie Wasserdampf?

Das liegt daran, dass die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre nicht beliebig zunehmen kann. Mehr als 100% geht nicht. Bei 100% relativer Luftfeuchte ist die Luft maximal mit Wasserdampf gesättigt und statt weiterer Zunahme kondensiert der Wasserdampf zum Beispiel zu Wolken oder Regen (und fällt damit aus der Atmosphäre heraus). Wieviel Kilogramm Wasserdampf die Luft pro Kubikmeter enthalten kann hängt von der Temperatur ab. Je wärmer die Luft ist, je mehr Wasserdampf kann sie enthalten. Siehe hierzu auch: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/2/13.html

Relevant ist hier auch der folgende Link, welcher auf Lernmaterialien für Schulen zum Thema Wasserkreislauf verweist: <https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/water-cycle/>.

Der Copernicus C3S Service (<https://climate.copernicus.eu/>) Climate Data Store (CDS, <https://cds.climate.copernicus.eu>) stellt eine Vielzahl von Wetter- und Klima-relevanten Daten bereit, u.a. den ERA5 Reanalyse-Datensatz (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>).

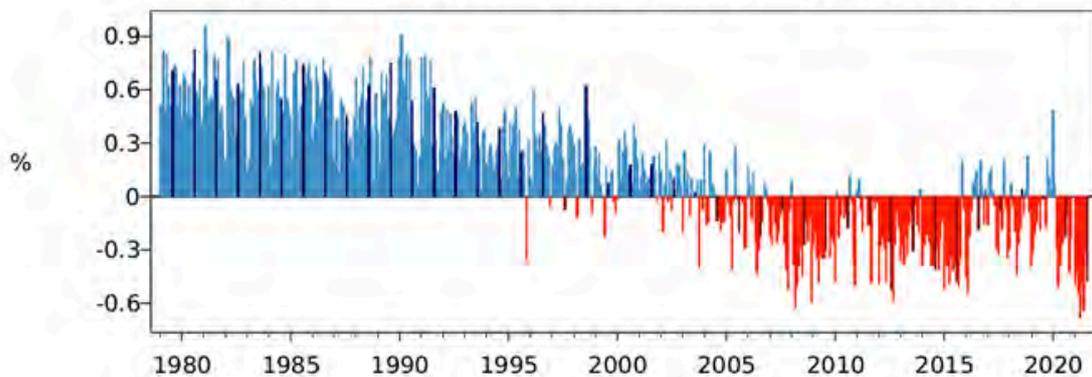
Die in Abbildung 62 gezeigt eine Analyse basierend auf ERA5. Wie man sieht, gibt es einen abnehmenden Trend der relativen Luftfeuchte.

Eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf speichern, und zwar etwa 7% mehr pro Grad Celsius entsprechend der Clausius-Clapeyron-Gleichung, siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Clausius-Clapeyron-Gleichung> und <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wasserdampf>.

Warum gibt es dann einen abnehmenden Trend und keinen zunehmenden Trend? Aufgrund der Erwärmung gibt es einen zunehmenden Trend – aber nicht der relativen Luftfeuchte – sondern der absoluten Luftfeuchte. Siehe hierzu auch: <https://www.weforum.org/agenda/2020/12/climate-change-humidity-paradox/>

Relative Luftfeuchtigkeit bodennaher Luft:

Monatliche Anomalie Global relativ zu 1991-2020



Monatliche Anomalie Europa relativ zu 1991-2020

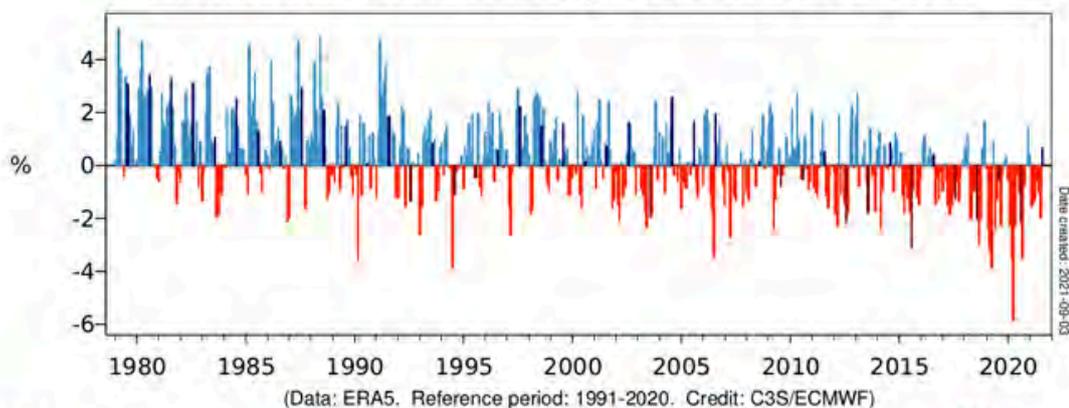


Abbildung 62: Monatliche Anomalien der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent global (oben) und für Europa (unten) relativ zum Bezugszeitraum 1991-2020. Quelle: <https://climate.copernicus.eu/precipitation-relative-humidity-and-soil-moisture-august-2021>.

8.7 Ozon

Ozon absorbiert die ultraviolette (UV) Strahlung der Sonne und schützt uns daher vor dieser gesundheitsschädlichen Strahlung. Diese UV-Absorption findet überwiegend in höheren Luftschichten statt, nämlich in der Stratosphäre. Ozon absorbiert aber auch Strahlung im infraroten Spektralbereich und ist damit auch ein Treibhausgas, wenn auch ein deutlich schwächeres als zum Beispiele CO₂ oder Methan. Ozon ist sehr reaktiv und spielt eine wichtige Rolle in der Atmosphärenchemie. Es ist ein giftiger Bestandteil des sogenannten „Sommersmogs“.

Der Zustand der Ozonschicht wird mit Satelliten eng überwacht (Abbildung 63).

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/ozone/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Ozone-CCI-unsplash_1600.min-1280x200.format-jpeg.jpg

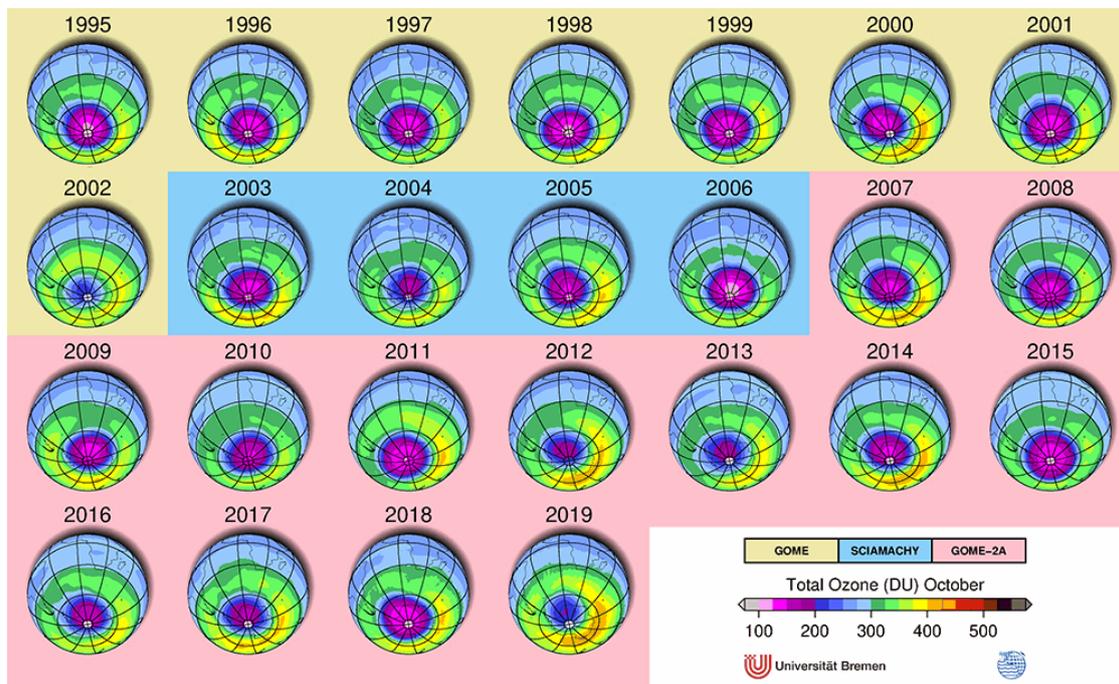


Abbildung 63: Satellitenbeobachtung des Ozonlochs über der Antarktis. Quelle: <https://www.iup.uni-bremen.de/UVSAT/>.

Siehe auch diese Lernmaterialien für Schulen zum Thema Ozon:

<https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/ist-ozon-gut-oder-schlecht/>.

8.8 Wolken

Wolken spielen eine große Rolle für das Klima auf der Erde (siehe zum Beispiel [https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wolken im Klimasystem](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wolken_im_Klimasystem)).

Wolken reflektieren einerseits Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und haben daher einen kühlenden Effekt auf Erdboden und bodennahe Luftschichten aber andererseits Strahlen Wolken auch Infrarotstrahlung ab und haben dadurch eine erwärmende Wirkung.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/cloud/>

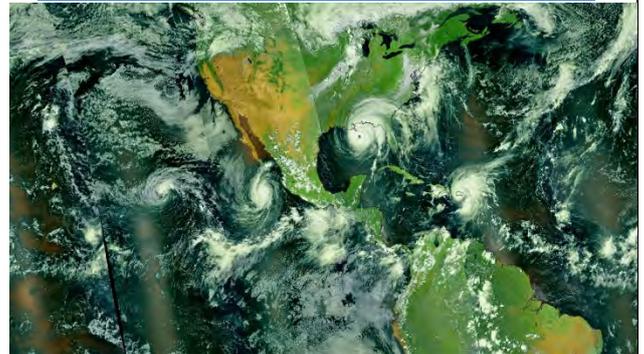


Bild: https://climate.esa.int/media/images/Clouds-banner_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Näheres zu „Wie beeinflussen Wolken das Klima und den Klimawandel?“ siehe <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-1.html>

8.9 Aerosole

Atmosphärische Aerosole sind kleine flüssige oder feste Schwebeteilchen in der Atmosphäre.

Wie Wolken können Aerosole Sonnenstrahlung in den Weltraum zurückreflektieren und wirken daher kühlend. Je nach Zusammensetzung können sie auch Sonnenstrahlung absorbieren und haben dann eine erwärmende Wirkung.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/aerosol/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Aerosol-CCI-banner-St-Marks_192.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Aerosole beeinflussen das Klima einerseits direkt mittels ihres Einflusses auf die Strahlung und andererseits indirekt durch Interaktion mit Wolken. Näheres zu „Wie beeinflussen Aerosole das Klima und den Klimawandel?“ siehe z.B. <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-2.html>.

8.10 Meeresspiegel

In den letzten 30 Jahren ist der Meeresspiegel um etwa 8 cm angestiegen. Die Anstiegsgeschwindigkeit liegt derzeit bei etwa 3 mm/Jahr.

Zum Meeresspiegelanstieg trägt einerseits die thermische Ausdehnung der Ozeane bei und andererseits das Schmelzwasser von Gletschern und der beiden großen Eisschilde Grönland und Antarktis. Ein steigender Meeresspiegel stellt ein großes Problem dar, da viele Menschen in Küstennähe wohnen.

Der Meeresspiegel wird weiter steigen. Um wieviel, dass hängt u.a. von unseren zukünftigen CO₂-Emissionen ab.

Relevante ESA CCI Webseiten:

<https://climate.esa.int/de/projekte/sea-level/>
<https://climate.esa.int/en/projects/sea-level-budget-closure/>

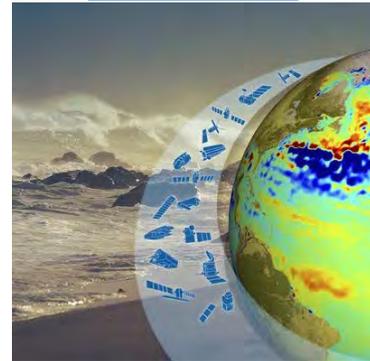


Bild: <https://climate.esa.int/media/images/S.2e16d0ba.fill-400x400-c100.format-webp.webpquality-75.webp>

Meeresspiegel-Anstieg:

Anstieg globaler Meeresspiegel seit 1993

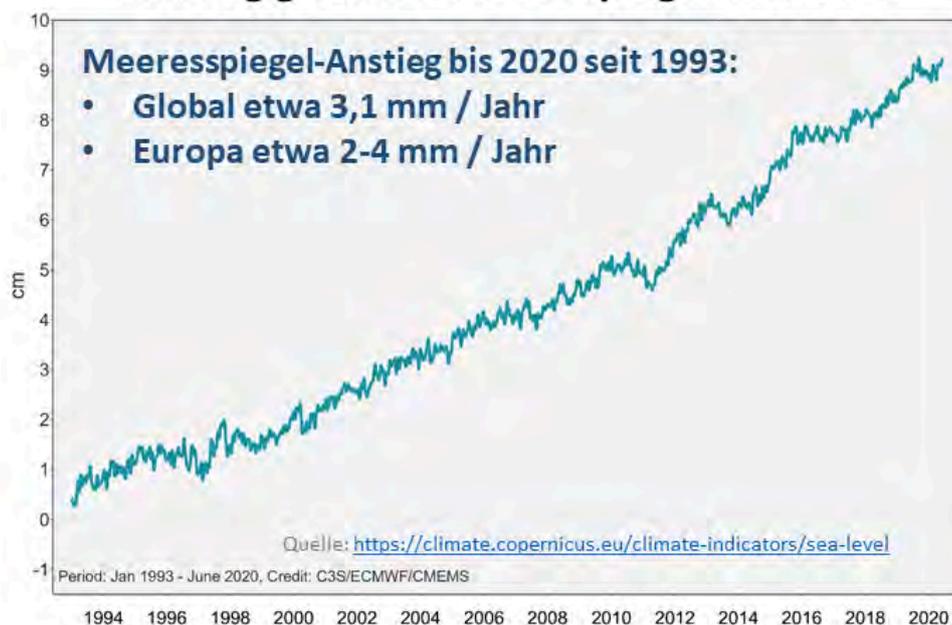


Abbildung 64: Änderung der Höhe des mittleren globalen Meeresspiegels. Quelle: C3S: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-level>.

Abbildung 65 zeigt, welche Beiträge zum Meeresspiegelanstieg wie stark beitragen (Cazenave et al., 2018).

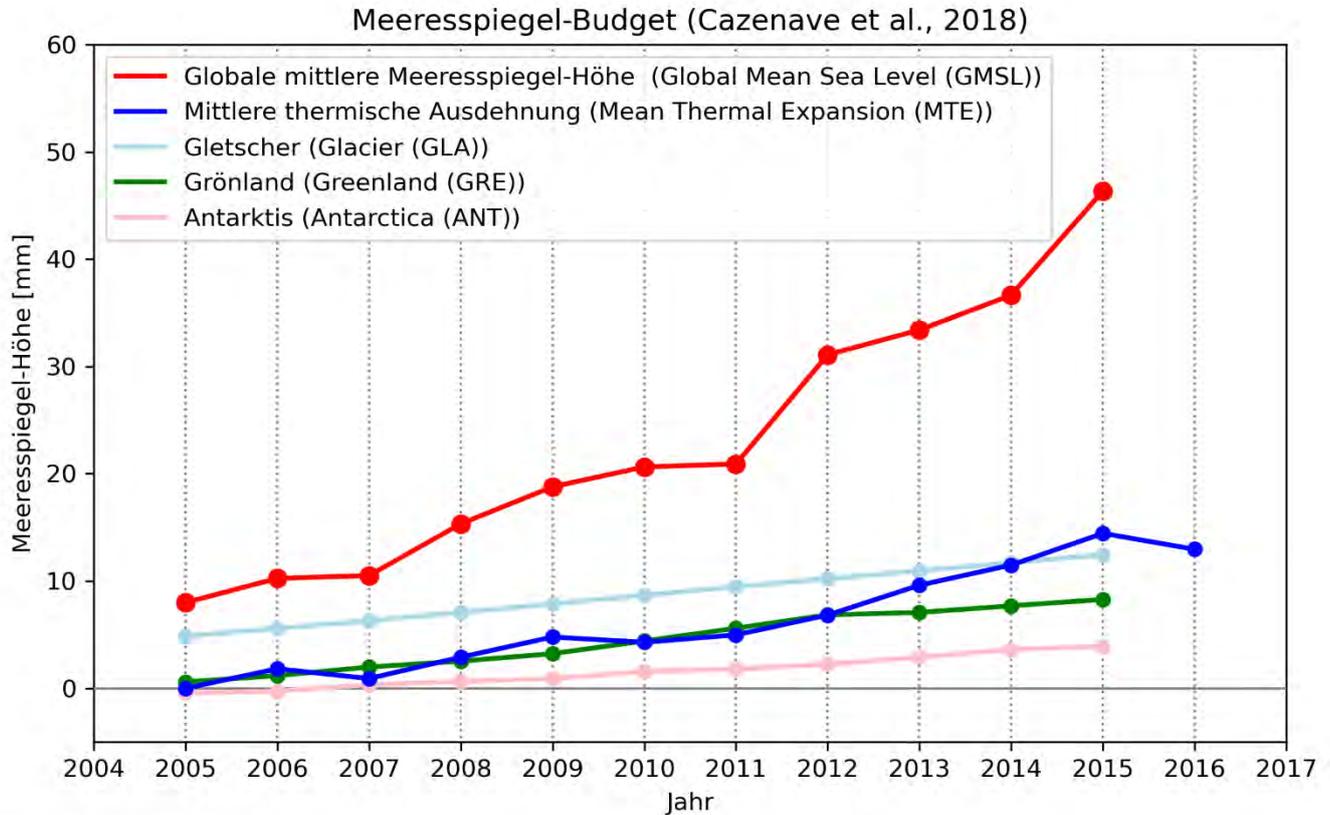


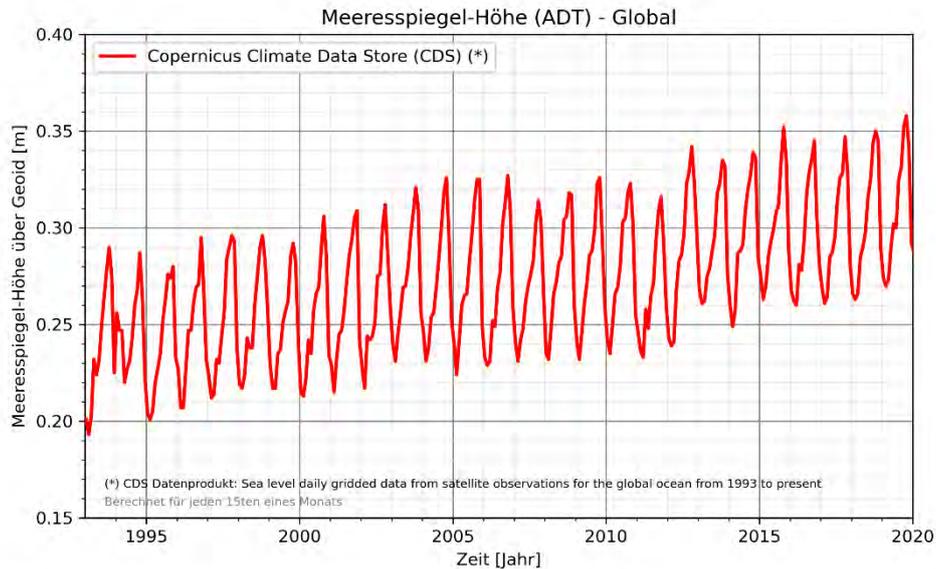
Abbildung 65: Mittlerer globaler Meeresspiegel (rot) und Beiträge durch thermische Ausdehnung (MTE = Mean Thermal Expansion) und Schmelzwasser von Gletschern, Grönland und der Antarktis (basierend auf Daten von Cazenave et al., 2018).

Abbildung 66 zeigt, dass der Meeresspiegel sowohl zeitlich (oben) als auch räumlich (unten) stark variiert.

Bezüglich der zukünftigen Höhe des Meeresspiegels siehe Abbildung 99 (d) und (e).

Siehe auch diese Lernmaterialien für Schulen zum Thema Meeresspiegelanstieg:

<https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/country-under-threat/>.



Michael.Buchwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 3-Febr-2022 ts_SL_GLO.csv

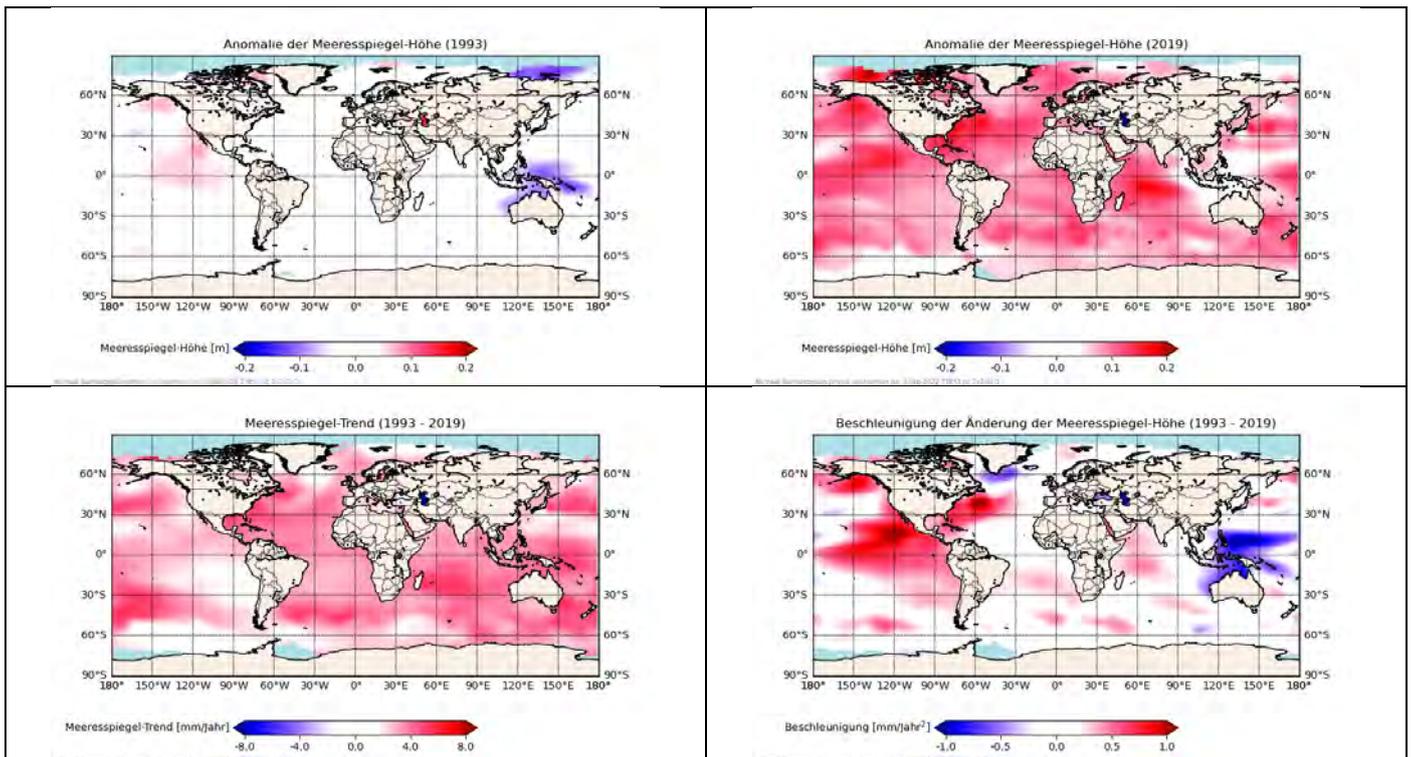


Abbildung 66: Verschiedene Abbildungen bezüglich des Meeresspiegels, welche mit Daten des Copernicus Climate Data Store (CDS) angefertigt wurden (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-sea-level-global?tab=overview>).

8.11 Meeresoberflächen-Temperatur (*sea surface temperature*)

Die Ozeane bedecken etwa 70% der Erdoberfläche und sie spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem.

Aufzeichnungen der Meeresoberflächen-Temperatur (*sea surface temperature, SST*) sind u.a. wichtig, um zu verstehen, wie genau der Ozean mit der Erdatmosphäre in Verbindung steht und diese beeinflusst, z.B. bei der Entstehung und der Entwicklung von tropischen Wirbelstürmen.

Die SST liefert grundlegende Informationen über das globale Klimasystem. Die SST ist ein wesentlicher Parameter für Wettervorhersagen und atmosphärische Modellsimulationen und ist auch für die Untersuchung mariner Ökosysteme wichtig. SST-Daten sind besonders nützlich, um das Einsetzen von El-Niño- und La-Niña-Zyklen zu erkennen.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/sea-surface-temperature/>



Bild: https://en.wikipedia.org/wiki/Sea_surface_temperature

Satellitenmessungen der Meerestemperatur:

Temperatur der Meeresoberfläche

Datenprodukt ESA CCI Sea Surface Temperature (SST)

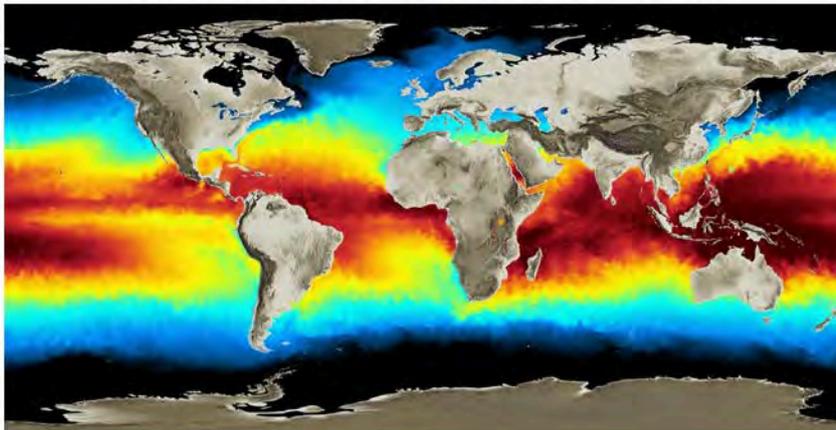


Abbildung 67: Satellitenmessungen der Meeresoberflächen-Temperatur. Quelle: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2011/07/Sea-surface_temperature_from_ERS

Siehe hierzu auch diese Lernmaterialien für Schulen zum Thema Ozeanströmungen:

<https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/planetary-heat-pumps/>.

Abbildung 68 zeigt, dass sich der Anstieg der Meeresoberflächen-Temperatur auch aus dem Weltraum beobachten lässt und Abbildung 68 - Abbildung 70 zeigen die räumlichen Muster der Meeresoberflächen-Temperatur.

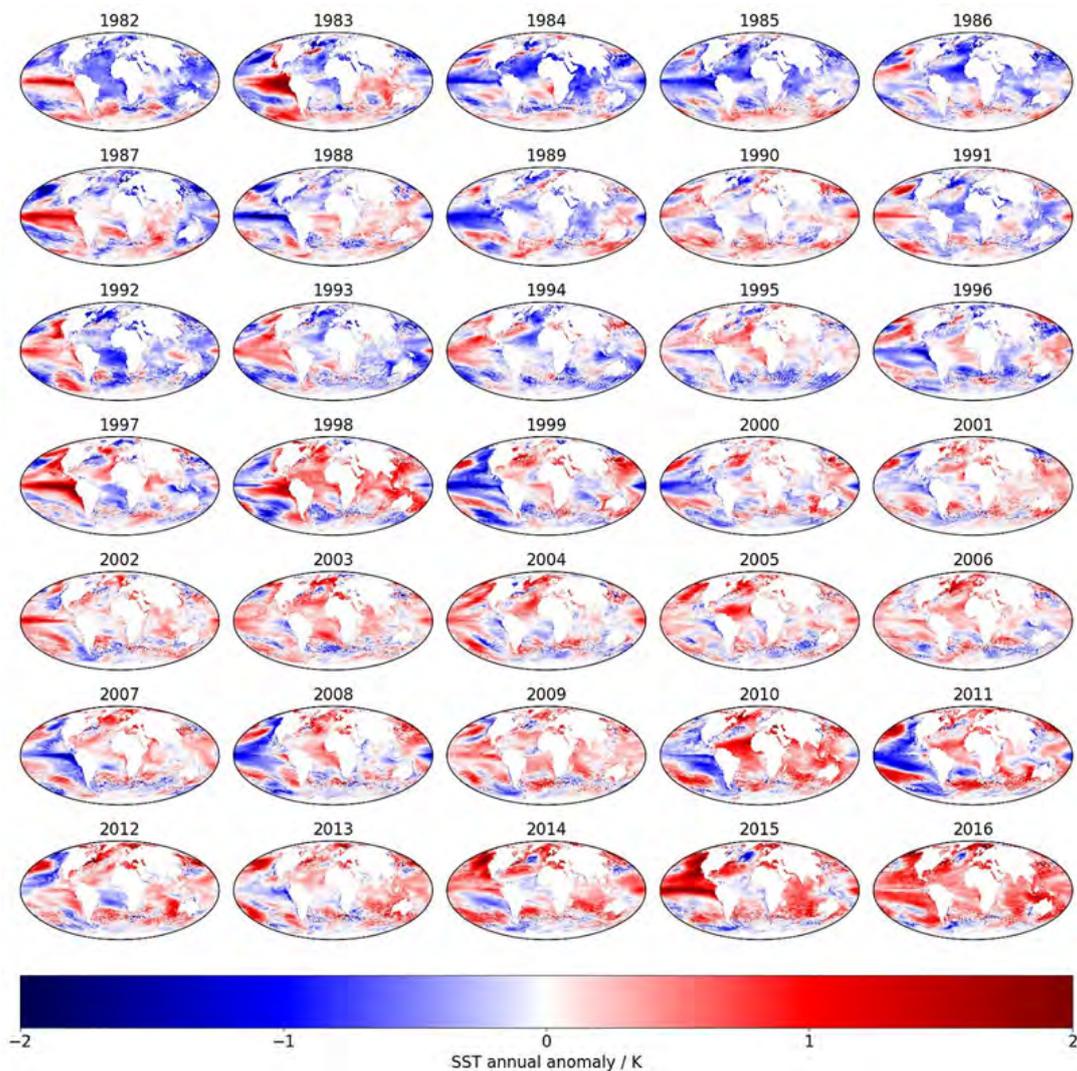
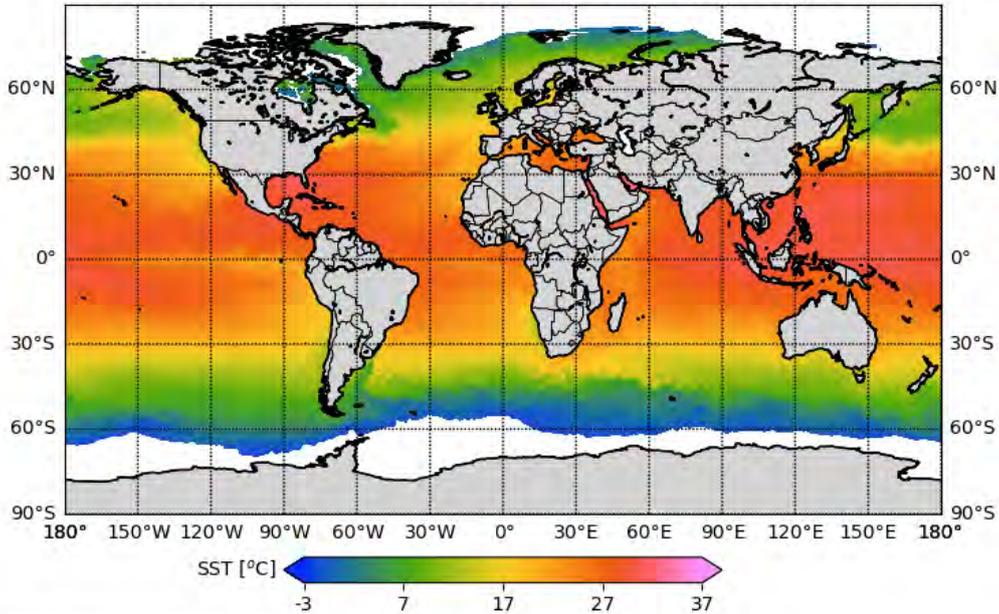


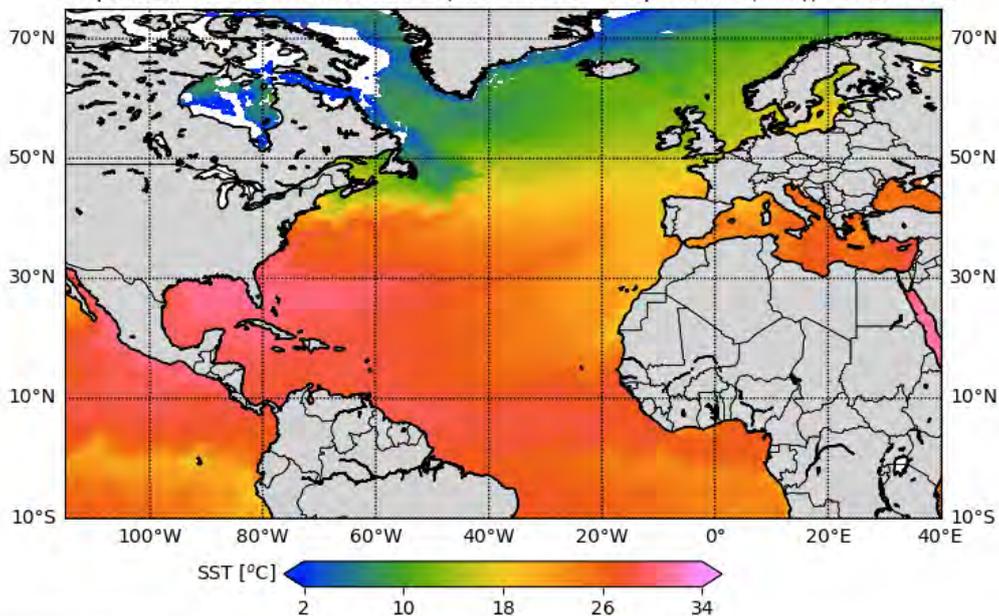
Abbildung 68: Anomalien der Meeresoberflächen-Temperatur von 1982 – 2016 gemessen mit Satelliten. Quelle: <https://climate.esa.int/en/projects/sea-surface-temperature/about/>

Temperatur der Meeresoberfläche (Sea Surface Temperature (SST)): 20160715



Michael Bucliwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 3-Feb-2022

Temperatur der Meeresoberfläche (Sea Surface Temperature (SST)): 20160715



Michael Bucliwitz@iup.physik.uni-bremen.de, 3-Feb-2022

Abbildung 69: Karten der Meeresoberflächen-Temperatur vom 15-Juli-2016 (oben: global, unten: Atlantik) basierend auf den Daten des Copernicus Climate Data Store (CDS). Datenprodukt: "Sea surface temperature daily gridded data from 1981 to 2016 derived from a multi-product satellite-based ensemble" (<https://www.copernicus.eu/en/access-data/copernicus-services-catalogue/sea-surface-temperature-daily-gridded-data-1981-2016>).

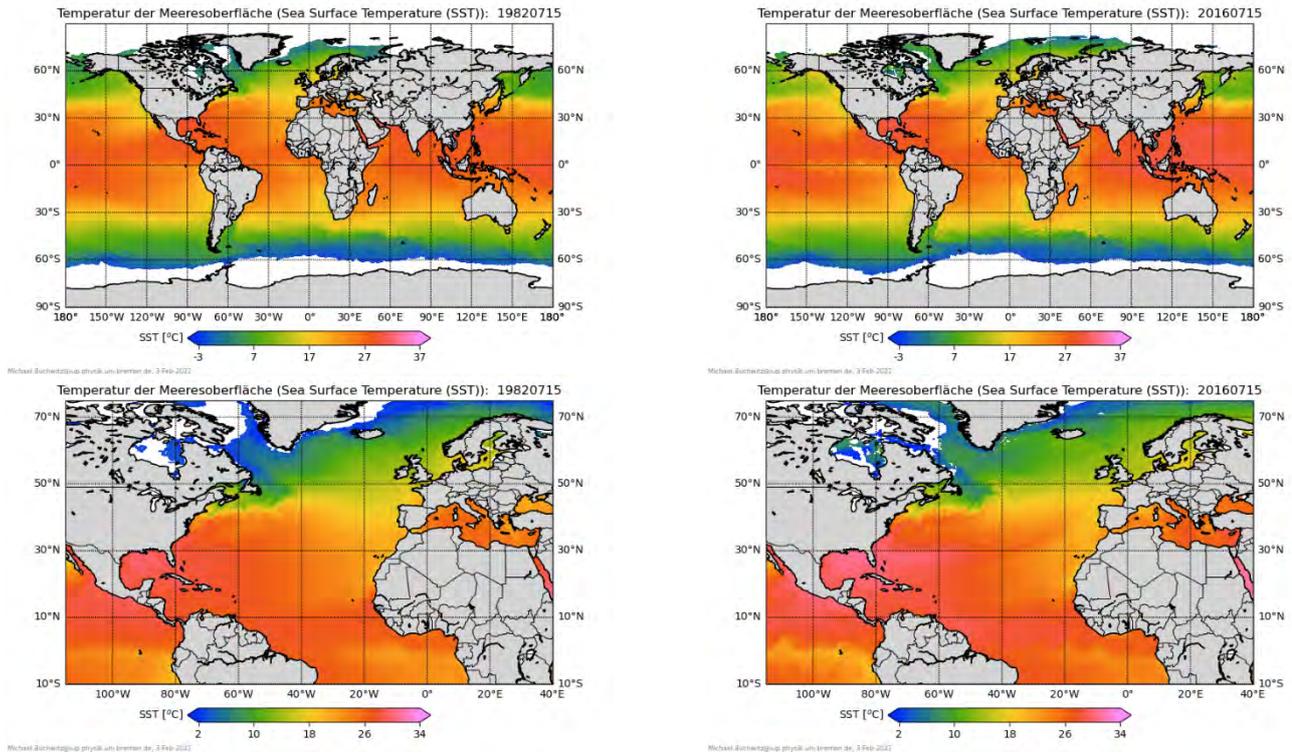


Abbildung 70: Karten der Meeresoberflächen-Temperatur - links 15-Juli-1982, rechts 15-Juli-2016 - basierend auf den Daten des Copernicus Climate Data Store (CDS). Datenprodukt: "Sea surface temperature daily gridded data from 1981 to 2016 derived from a multi-product satellite-based ensemble" (<https://www.copernicus.eu/en/access-data/copernicus-services-catalogue/sea-surface-temperature-daily-gridded-data-1981-2016>).

8.12 Ozeanfarbe (*ocean color*)

Wissenschaftler messen die Farbe der Ozeane, unter anderem, um das Phytoplankton, die mikroskopisch kleinen Meerespflanzen, die die Grundlage des ozeanischen Nahrungsnetzes bilden, (indirekt) zu beobachten.

Phytoplankton nutzt Sonnenlicht und Kohlendioxid zur Produktion von organischem Kohlenstoff. Dieser Prozess, genannt Photosynthese, ist möglich, da Pflanzen Chlorophyll enthalten, welches Pflanzen grün erscheinen lässt und welches die Energie des Sonnenlichts einfangen kann.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/ocean-colour/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Ocean-Colour-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Satellitenmessungen von Chlorophyll:

Chlorophyll-a Verteilung im Juli 2003

Datenprodukt ESA CCI Ocean Color (OC) Version 3.1

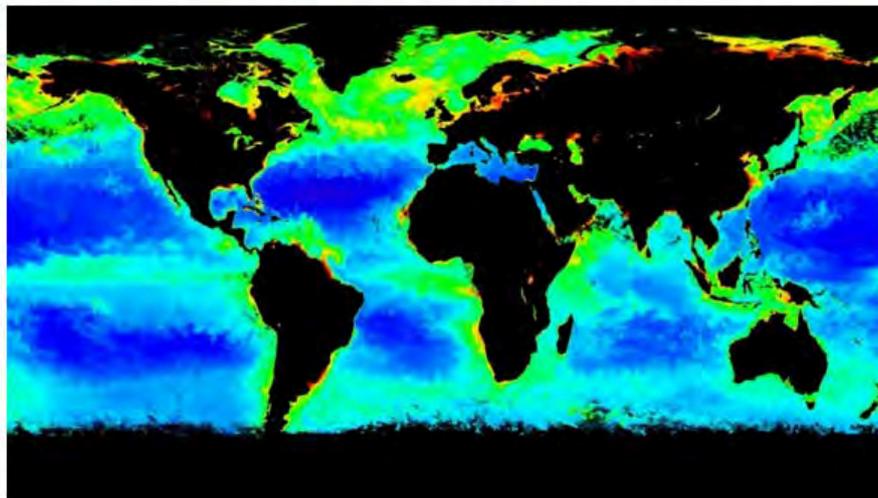


Abbildung 71: Satellitenbeobachtung der Chlorophyll-a Verteilung im Juli 2003. Quelle: <https://climate.copernicus.eu/ocean>. Bild: [https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/inline-images/Ocean colour figure1.jpeg](https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/inline-images/Ocean%20colour%20figure1.jpeg).

8.13 Ozean-Salzgehalt (*sea surface salinity*)

Die ozeanische Zirkulation wird nicht nur von der Wirkung des Windes auf die Meeresoberfläche angetrieben, sondern insbesondere auch von Dichteunterschieden. Kaltes und salzhaltiges Wasser (siehe Abbildung 72) ist dichter als warmes und salzarmes Wasser und sinkt daher ab, z.B. im nördlichen Atlantik und an einigen Stellen nahe der Antarktis.

Diese sogenannte „thermohaline Zirkulation“ (siehe Abbildung 73) sorgt für einen permanenten Transport von Wärme von den Tropen zu den Polargebieten. Teil dieser Strömung ist der Golfstrom, welcher warme Wassermassen Richtung Europa transportiert und daher wesentlich für unser Klima ist.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/sea-surface-salinity/>



Bild: https://climate.esa.int/media/images/Sea-Surface-Salinity-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Satellitenmessungen des Salzgehalts der Ozeane:

Salzgehalt in Gramm/Kilogramm

“Global sea surface salinity” abgeleitet aus verschiedenen Satellitenmessungen (SMOS, SMAP und NASA’s Aquarius Instrumenten)

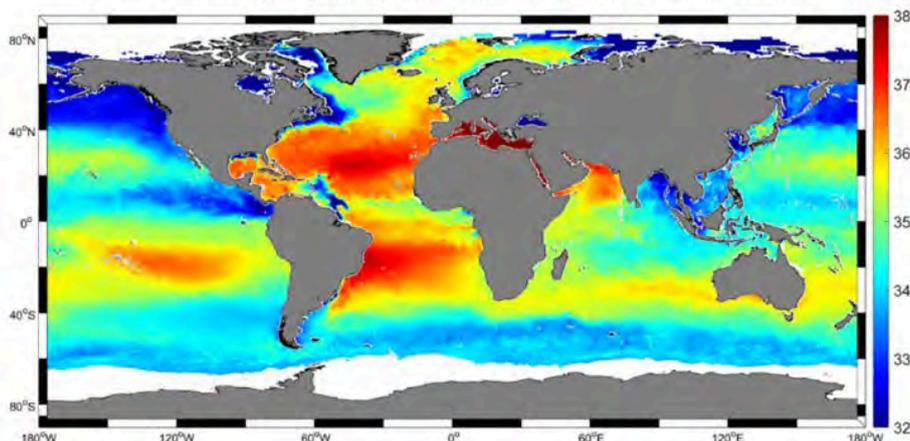


Abbildung 72: Globale Karte des Ozean-Salzgehalts in Gramm Salz pro Kilogramm Wasser abgeleitet aus verschiedenen Satellitenmessungen. Quelle: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Space_for_the_oceans. Bild: https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2019/05/global_sea-surface_salinity/19390092-1-eng-GB/Global_sea-surface_salinity_pillars.png

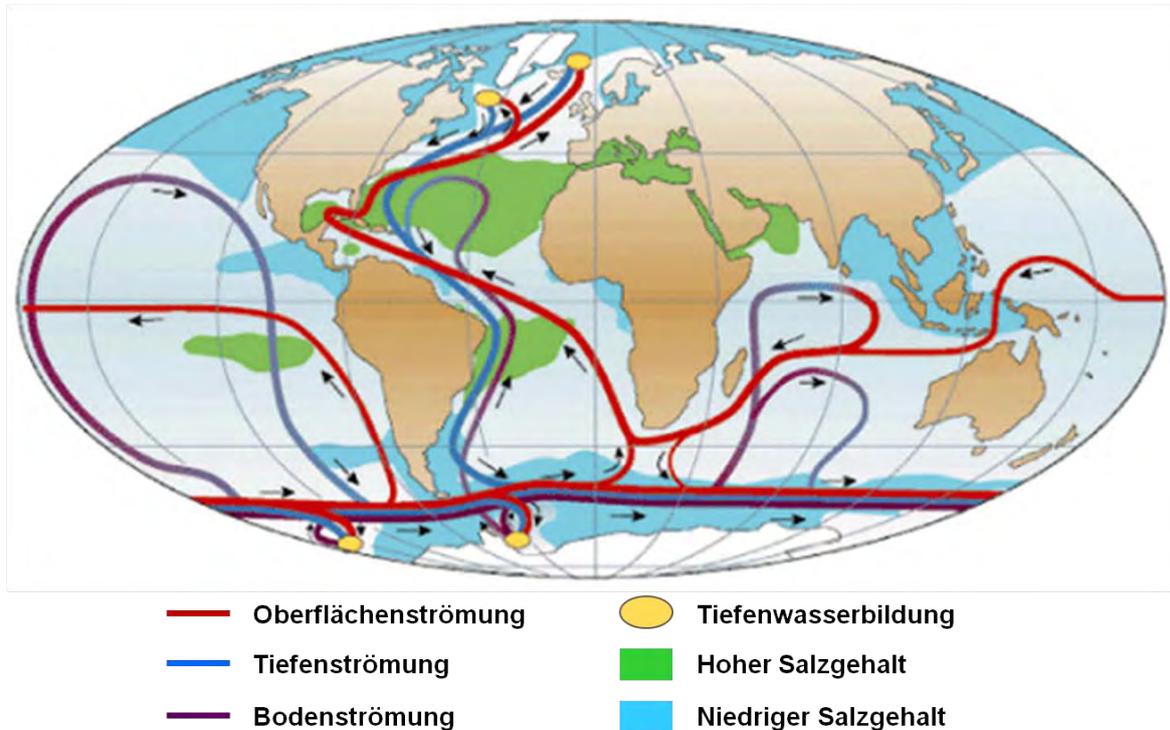


Abbildung 73: Die thermohaline Zirkulation. Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/ozeanische-zirkulation>. Bild: https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/2-3-4_1_thermohaline_zirkulation

Siehe auch diese Lernmaterialien für Schulen mit weiteren Informationen u.a. zu Ozeanströmungen: <https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/planetary-heat-pumps/>.

8.14 Gletscher

Die Erderwärmung führt zu einem Abschmelzen von Gletschern (Abbildung 74) und dies trägt zum Meeresspiegelanstieg bei (Abbildung 65).

Gletscher sind ein wichtiger Indikator für globale Klimaveränderungen, da sie aufgrund ihrer Trägheit nur auf sehr langfristige Klimaveränderungen reagieren.

Gletscher sind wichtige Süßwasserspeicher. Das Schmelzwasser der Gletscher ist ein bedeutender Wasser-Lieferant für viele Flusssysteme und Trinkwasserquellen. Ein Verschwinden der Gletscher hätte daher sehr negative Auswirkungen auf die Wasserversorgung an vielen Orten.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/glaciers/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Glaciers-rieserferner_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Die Änderung der Eisdicke von Gletschern wird meist in „Metern Wasseräquivalent pro Jahr“ angegeben und dies kann als „durchschnittliche Änderung der Eisdicke“ aufgefasst werden. Global hat die Eisdicke der Gletscher seit 1957 im Mittel um etwa 30 Meter abgenommen (Abbildung 74). Für einen knappen aber guten Überblick über Gletscher im Rahmen des Klimawandels siehe auch:

https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Gletscher_im_Klimawandel.

Massenbilanz der Gletscher (global):

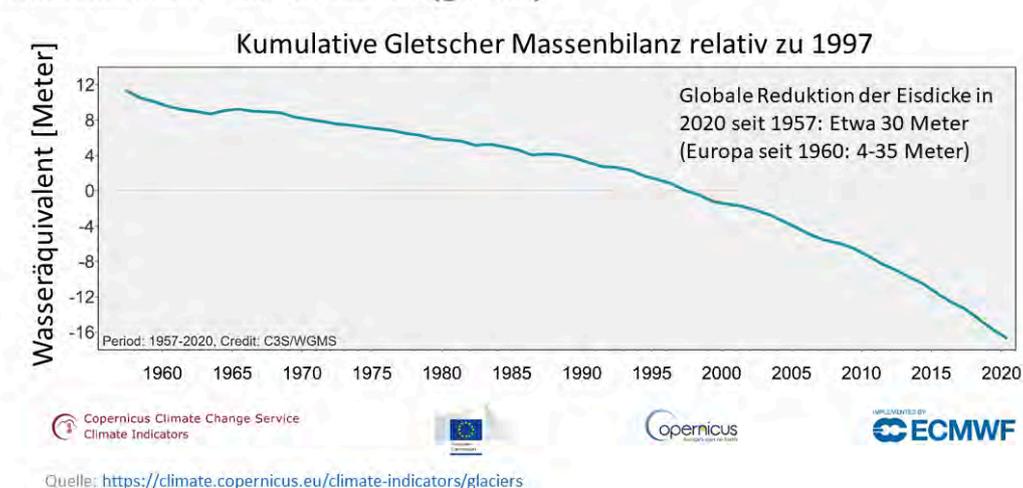


Abbildung 74: Veränderung der globalen Eisdicke von Gletschern seit 1957 in Metern Wasseräquivalent. Quelle: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/glaciers>.

8.15 Eisschild Grönland

Grönland ist ein autonomer Bestandteil des Königreichs Dänemark. Der größte Teil der Landesfläche besteht aus der größten Insel der Erde, gelegen im Nordatlantik bzw. im Arktischen Ozean. Grönland ist nur spärlich besiedelt. Die gesamte Bevölkerung lebt an der Küste, vor allem im Westen des Landes. Das Inland ist von einem Eisschild bedeckt. Die eisfreien Küstenbereiche sind in der Fläche etwas größer als Deutschland.

(<https://de.wikipedia.org/wiki/Grönland>).

In den letzten Jahrzehnten hat sich das grönländische Inlandeis rasant verändert, gekennzeichnet durch eine rasche Ausdünnung entlang der Ränder, eine Beschleunigung der Gletscherabflüsse und einen insgesamt zunehmenden Massenverlust.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/ice-sheets-greenland/>

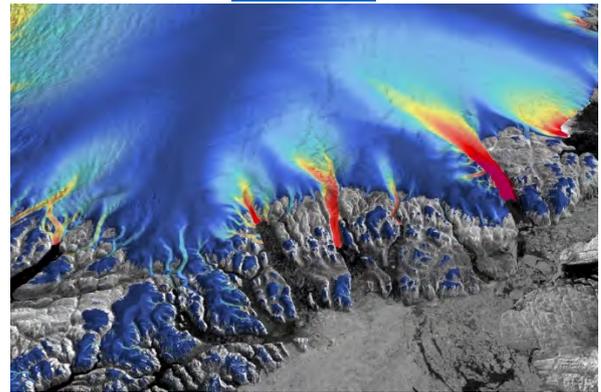


Foto: https://climate.esa.int/media/images/Greenland-Ice-Sheet-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Abbildung 75 zeigt Resultate von Satellitenbeobachtungen der Abnahme der Masse des grönländischen Eisschildes.

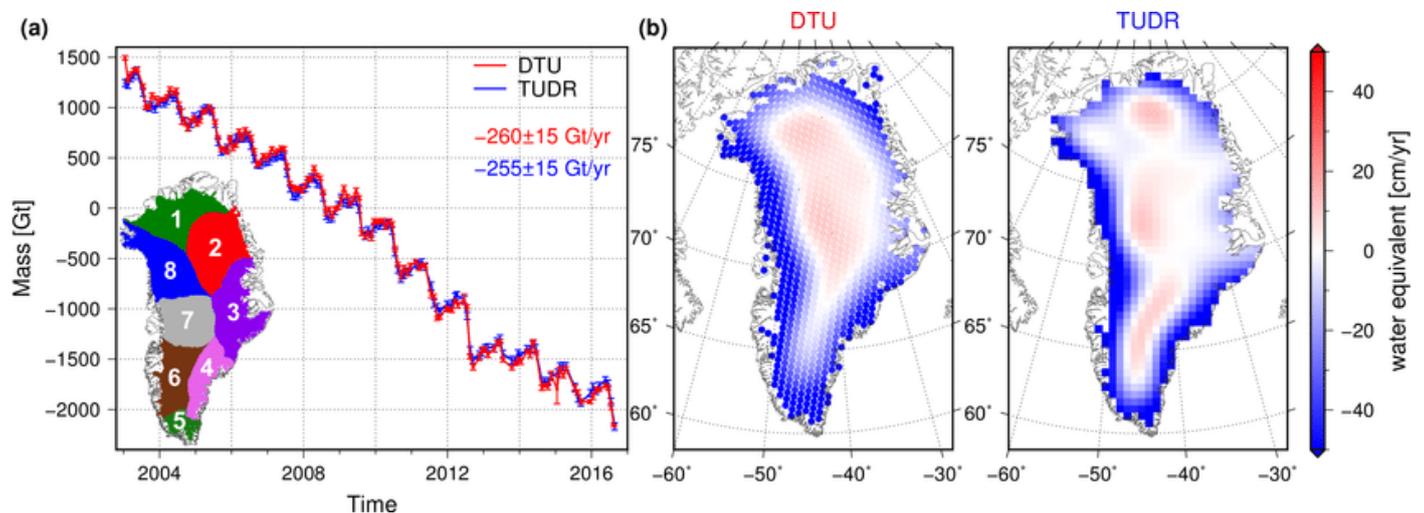


Abbildung 75: Zeitreihen (links) und räumliche Karten (rechts) grönländischer Massenbilanz-Datenprodukte, welche im Rahmen des ESA-Projekts "Greenland ice sheet CCI" (<https://climate.esa.int/de/projects/ice-sheets-greenland/>) bereitgestellt werden. Wie man klar erkennen kann, nimmt die Eismasse Grönlands quasi kontinuierlich ab, insbesondere an den Rändern. Die beiden Produkte (hier mit DTU und TUDR bezeichnet) zeigen sehr ähnliche Trends. Quelle: Mottram et al., 2019.

Abbildung 76 zeigt eine Karte der Höhenänderungen von Grönland in Metern pro Jahr für den 5-Jahres-Zeitraum 1992-1996. Blau eingefärbt sind Gebiete, in denen eine Höhenabnahme gemessen wurde; rot eingefärbte Gebiete entsprechen einer Höhenzunahme. Wie man sieht, dominiert die Höhenabnahme.

Karten für weitere 5-Jahres-Zeiträume sind in Abbildung 77 gezeigt. Auch hier dominiert die Höhenabnahme. Die Karten zeigen aber auch die Komplexität der Situation, da die Höhenänderungen zeitliche Schwankungen aufweisen, deren genaue Interpretation nicht trivial ist und einen wichtigen Gegenstand der aktuellen Forschung darstellt.

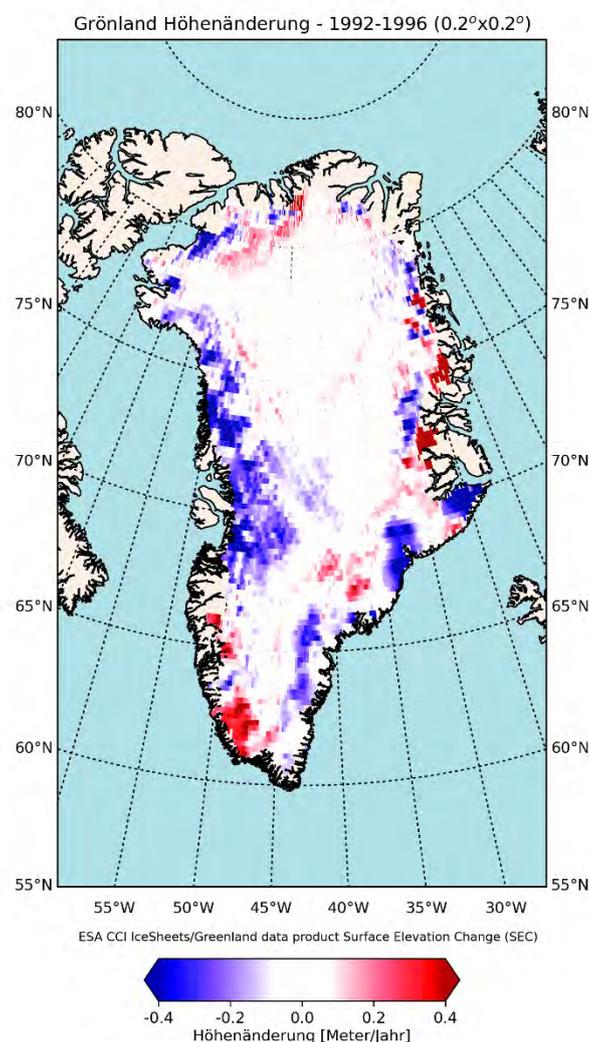


Abbildung 76: Mittels Satelliten beobachtete Höhenänderungen (Surface Elevation Change (SEC)) von Grönland in Metern pro Jahr im Zeitraum 1992 – 1996 (Daten: ESA CCI-IceSheets/Greenland, <https://climate.esa.int/de/projects/ice-sheets-greenland/>).

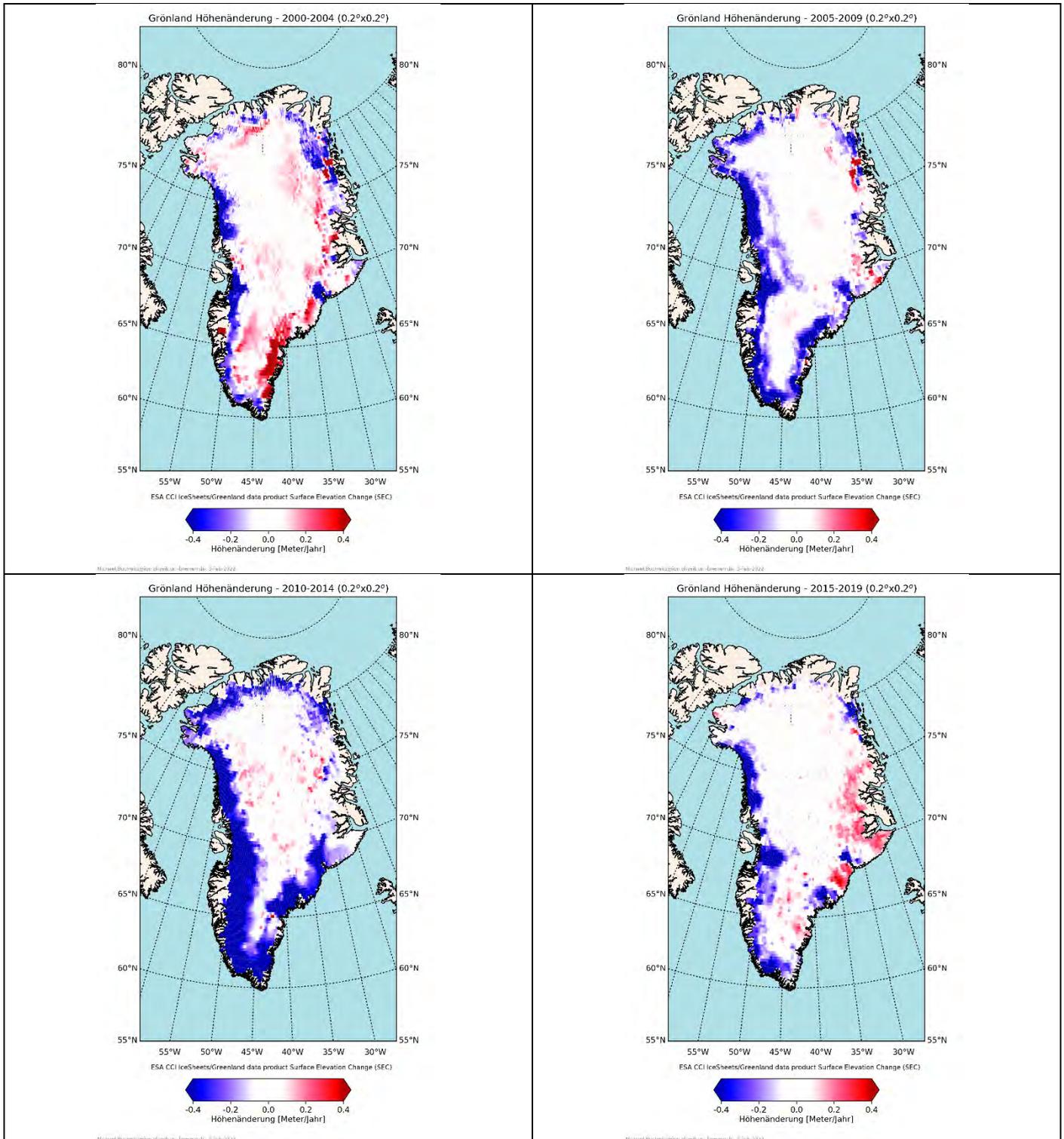


Abbildung 77: Weitere Karten der Höhenänderungen von Grönland für verschiedene 5-Jahres Zeiträume: von oben links nach unten rechts: 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014, 2015-2019.

8.16 Eisschild Antarktis

Der Kontinent Antarktika ist mit fast 13,2 Millionen km² um etwa 2,7 Millionen km² größer als Europa. Antarktika bezeichnet den Kontinent, der oft umgangssprachlich als "Antarktis" bezeichnet wird. Der antarktische Eisschild ist die größte eigenständige Eismasse der Erde und bedeckt den antarktischen Kontinent nahezu vollständig (<https://de.wikipedia.org/wiki/Antarktis>)

Würde das große antarktische Eisschild abschmelzen, dann würde der Meeresspiegel um etwa 60 Meter ansteigen. Davon sind wir jedoch noch weit entfernt. Trotzdem ist es natürlich wichtig, den Zustand dieses großen Eisschildes zu überwachen und dies geschieht mittels verschiedener Satelliteninstrumente.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/en/projects/ice-sheets-antarctic/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/l_2e16d0ba.fill-400x400-c100.format-webp.webpquality-75.webp

Abbildung 78 zeigt Satelliten-basierte Resultate der Höhenänderung des antarktischen Eisschildes. Wie man sieht, gibt es Gebiete in denen die Höhe – also die Eismasse - abnimmt (blau) und andere Gebiete in denen die Höhe zunimmt (rot). Insgesamt ist eher eine Abnahme der Eismasse zu beobachten.

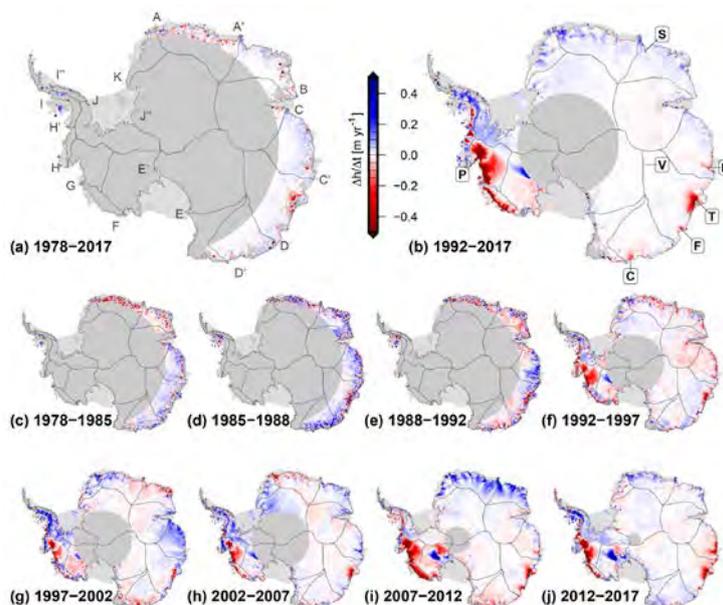


Abbildung 78: Mittels Satelliten beobachtete Höhenänderungen (Surface Elevation Change (SEC)) der Antarktis in Metern pro Jahr. Quelle: Schröder et al., 2019.

8.17 Meereis

Meereis spielt eine große Rolle für das Klimasystem Erde und für die Biologie der polaren Breiten.

Seit Jahrzehnten beobachten wir eine Abnahme des Meereises in der Arktis (siehe Abbildung 79).

Es wird erwartet, dass die Arktis in einigen Jahrzehnten in den Sommermonaten eisfrei sein wird.

Im Vergleich dazu ist das Meereis der Antarktis deutlich stabiler (Abbildung 83).

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/sea-ice/>



Foto: <https://climate.esa.int/media/images/MOSAIC.min-1280x200.format-jpeg.jpg>

Eine Vielzahl von Informationen über das Meereis einschließlich Animationen und aktualisierten Grafiken gibt es auf der Meereisportal Webseite (<https://www.meereisportal.de/>) des Alfred-Wegener-Instituts (AWI, <https://www.awi.de/>) und des Instituts für Umweltphysik der Universität Bremen (<https://www.iup.uni-bremen.de/deu/>). Interessante Resultate zeigen die Abbildung 79 - Abbildung 83.

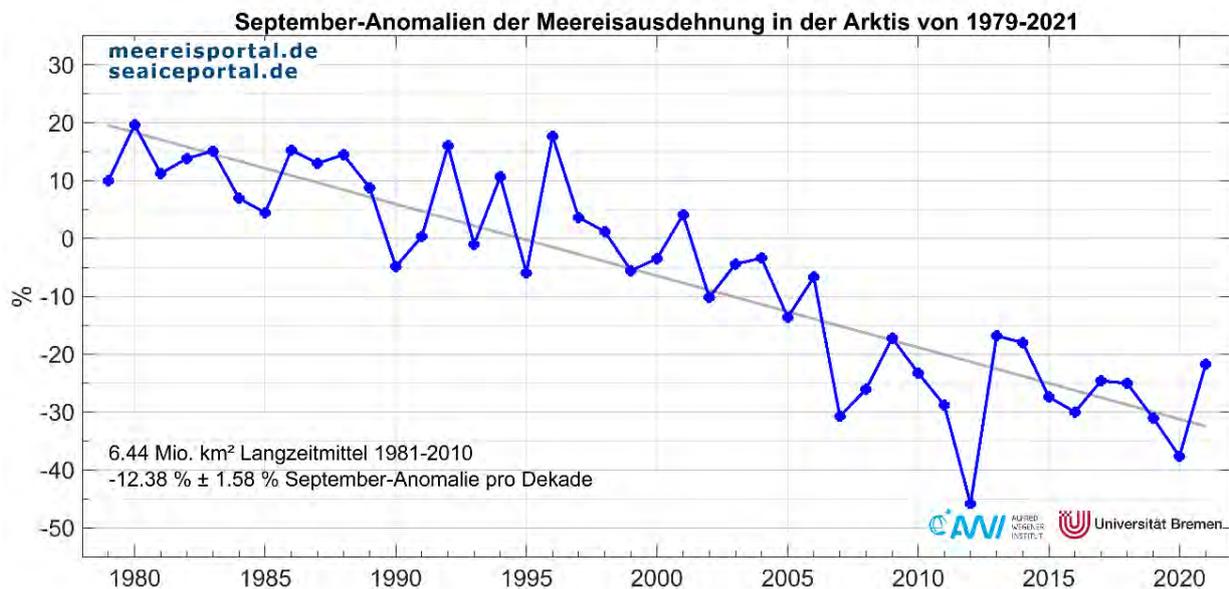


Abbildung 79: Relative Meereisausdehnung in der Arktis im September. Quelle: Meereisportal (<https://www.meereisportal.de/meereisentwicklung/anomalien-der-monatsmittelwerte-der-meereisausdehnung-arktis/>).

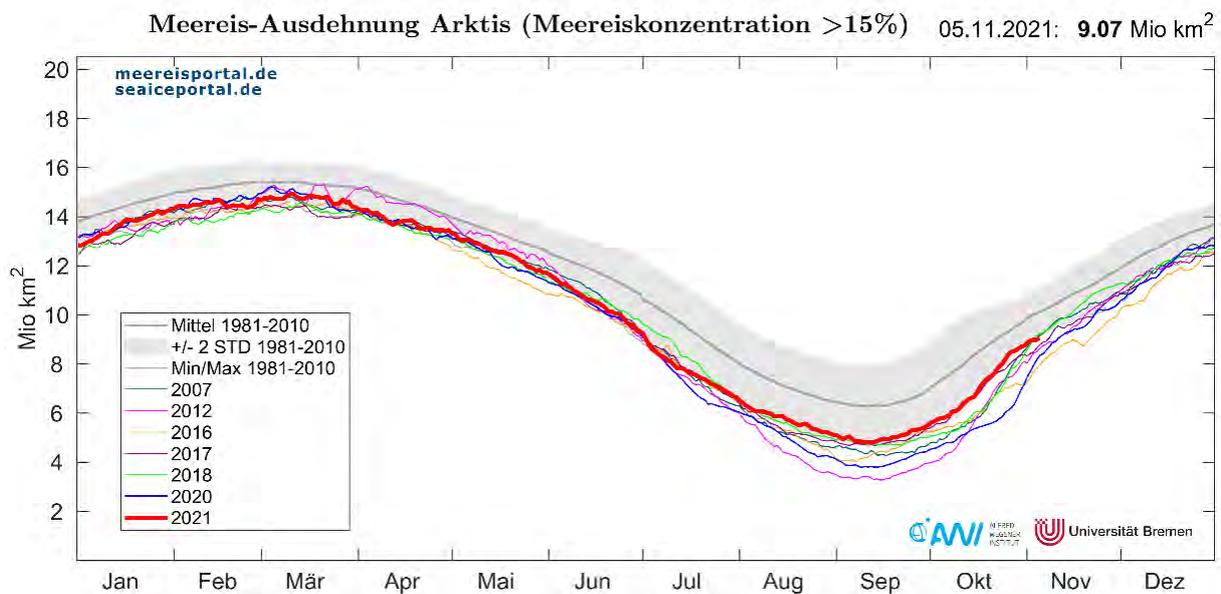
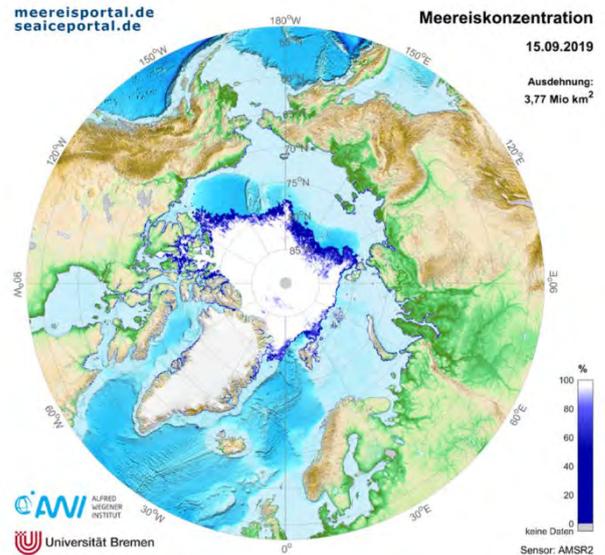
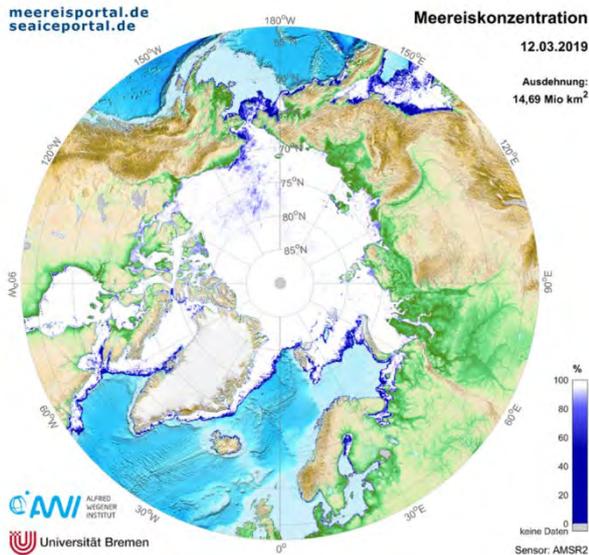
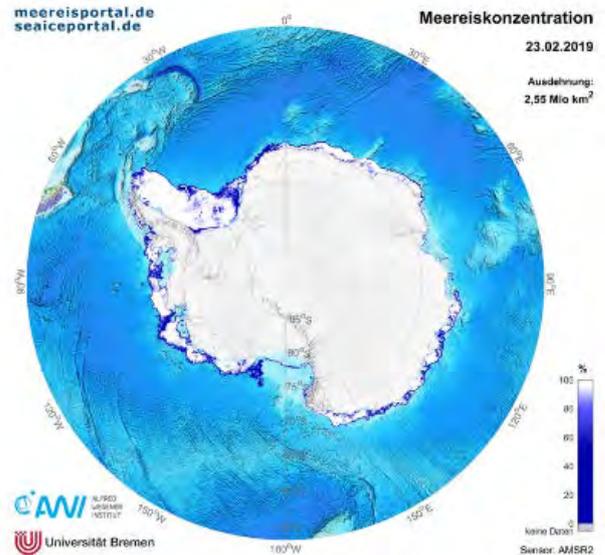
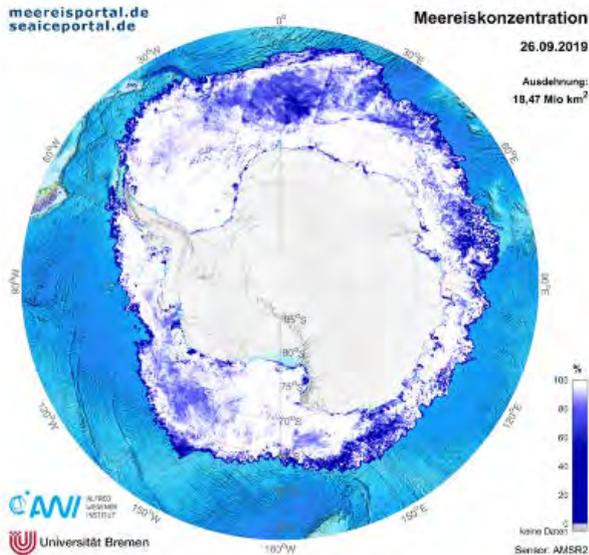


Abbildung 80: Oben: Maximum (links) und Minimum (rechts) der Ausdehnung des arktischen Meereises im Jahre 2019. Unten: Jahresgang der Meereis-Ausdehnung für verschiedene Jahre und im Mittel der Jahre 1981-2010. Quelle: Meereisportal (<https://www.meereisportal.de/meereisentwicklung/arktis-maximum-und-minimum-ab-2012/>).



Meereis-Ausdehnung Antarktis (Meereiskonzentration >15%) 05.11.2021: 16.29 Mio km²

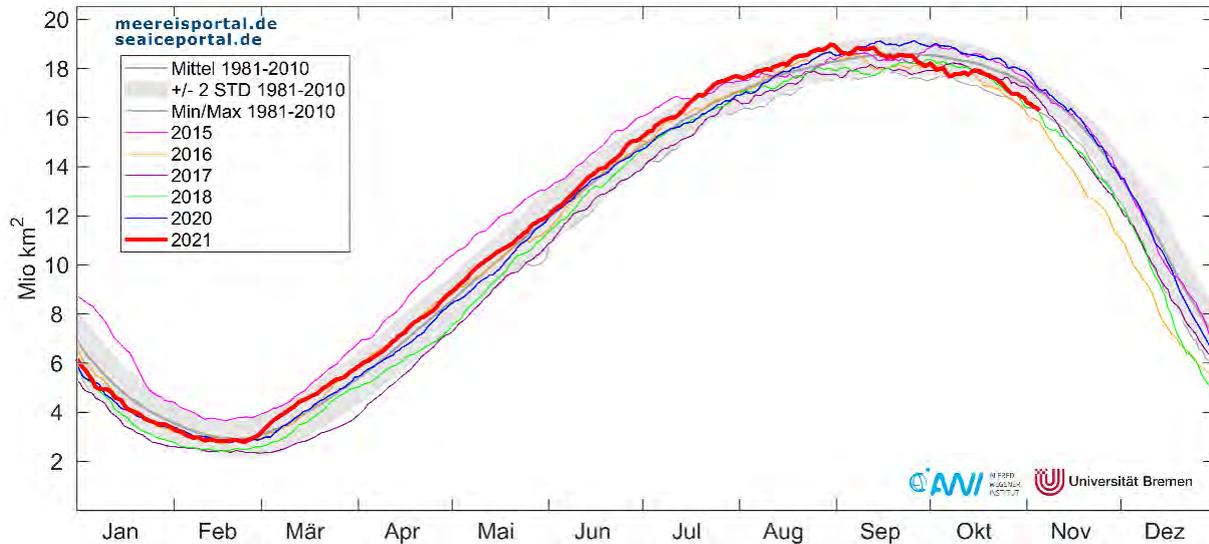


Abbildung 81: Oben: Maximum (links) und Minimum (rechts) der Ausdehnung des arktischen Meereises im Jahre 2019. Unten: Jahrgang der Meereis-Ausdehnung für verschiedene Jahre und im Mittel der Jahre 1981-2010. Quelle: Meereisportal (<https://www.meereisportal.de/meereisentwicklung/antarktis-maximum-und-minimum-ab-2012/>).

Ausdehnung Meereis Arktis 1972 – Januar 2022

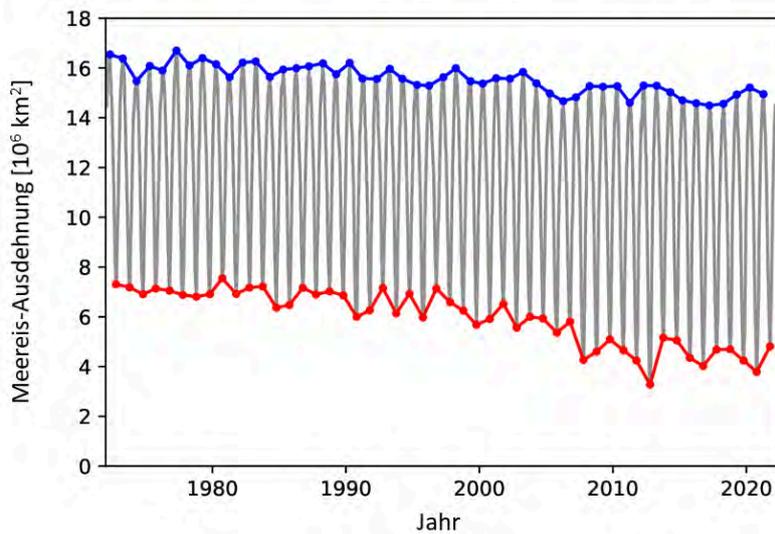


Abbildung 82: Ausdehnung des arktischen Meereises (grau: jahreszeitliche Schwankung, blau: Wintermaximum, rot: Sommerminimum). Quelle: Meereisportal (<https://www.meereisportal.de/meereisentwicklung/zeitreihen/>).

Ausdehnung Meereis Antarktis 1973 – Januar 2022

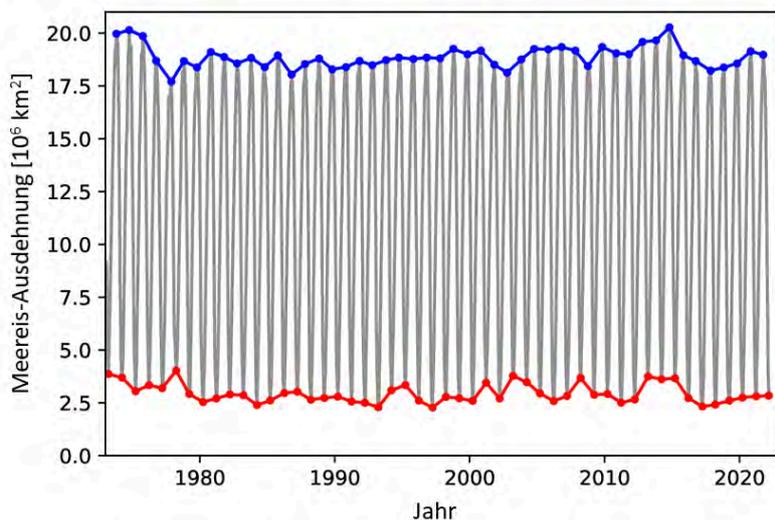


Abbildung 83: Ausdehnung des arktischen Meereises (grau: jahreszeitliche Schwankung, blau: Wintermaximum, rot: Sommerminimum). Quelle: Meereisportal (<https://www.meereisportal.de/meereisentwicklung/zeitreihen/>).

8.18 Landoberflächen-Temperatur (*land surface temperature*)

Die Landoberflächen-Temperatur (*land surface temperature*, LST) ist eine wichtige Variable im Klimasystem der Erde.

Die LST ist die aus der Infrarotstrahlung abgeleitete Strahlungshauttemperatur (*radiative skin temperature*) der Landoberflächen. Abbildung 84 zeigt als Beispiel eine globale Karte von LST Satellitenmessungen.

Die LST bestimmt Prozesse wie den Austausch von Energie und Wasser zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre und beeinflusst die Geschwindigkeit und den Zeitpunkt des Pflanzenwachstums.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/land-surface-temperature/>

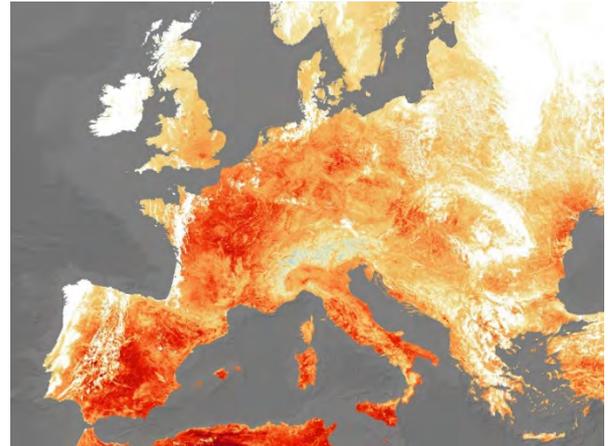


Bild: https://climate.esa.int/media/images/Land-Surface-Temp-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

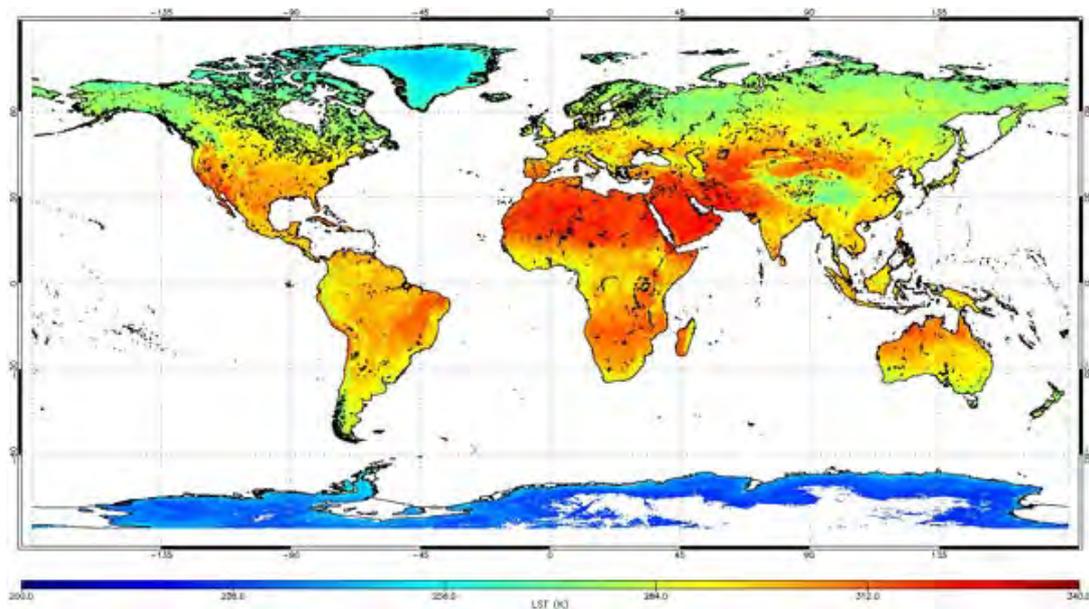


Abbildung 84: Globale Karte der Landoberflächen-Temperatur (LST) im September 2016 basierend auf Sentinel-3A/SLSTR Tagmessungen (Algorithmus und Datenauswertung: University of Leicester, UK). Quelle: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/overview/geophysical-measurements/land-surface-temperature>.

8.19 Bodenfeuchte (*soil moisture*)

Die Bodenfeuchtigkeit (*soil moisture*, SM) ist eine Schlüsselvariable bei der Steuerung des Austauschs von Wasser und Wärmeenergie zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre durch Verdunstung und Transpiration der Pflanzen. Folglich spielt die Bodenfeuchtigkeit (Abbildung 85) eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Wettermustern und der Erzeugung von Niederschlägen. Natürlich ist die Bodenfeuchte auch ein entscheidender Parameter für das Pflanzenwachstum.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/soil-moisture/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Soil-Moisture-CCI-banner_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Satellitenmessungen der Bodenfeuchte:

Bodenfeuchte Januar 2020

Anomalie relativ zur Referenzperiode 1991-2010

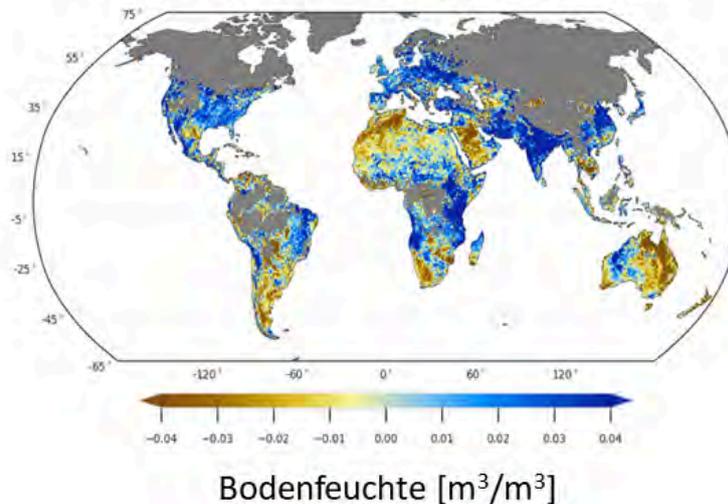


Abbildung 85: Aus Satellitenmessungen abgeleitete räumliche Verteilung der Bodenfeuchte (in Kubikmeter Wasser pro Kubikmeter Boden) für den Januar 2020 dargestellt als Anomalie relativ zur Referenzperiode 1991-2010. Blaue Farben zeigen Regionen, in denen die Bodenfeuchte zugenommen hat und bräunliche Farben entsprechen Regionen, in denen die Bodenfeuchte abgenommen hat. Graue Gebiete entsprechen Regionen, in denen keine zuverlässigen Satellitenmessungen der dargestellten Messgröße gewonnen werden konnten (z.B. wegen zu starker Bewölkung). Datenprodukt „ESA CCI SM v06.1 COMBINED“. Quelle: <https://climate.esa.int/nl/projecten/soil-moisture/about/>. Bild: https://climate.esa.int/media/images/v06.1_combined_monthly_anomalies_2020.width-800.png.

8.20 Landbedeckung (*land cover*)

Genauere und aktuelle Karten der Landbedeckung (*land cover*, LC) spielen eine wichtige Rolle in vielen Bereichen einschließlich der Erfassung klimabedingter Änderungen, der Ernährungssicherheit, der Flächennutzungsplanung, der hydrologischen Modellierung und beim Management natürlicher Ressourcen.

Abbildung 86 zeigt als globale Karte das ESA CCI Land Cover Datenprodukt für das Jahr 2015. Dieses Datenprodukt hat eine räumliche Auflösung von 300 Metern. Sehr gut zu erkennen sind zum Beispiel Vegetationszonen, Wüstengebiete und Gebiete permanenter Eisbedeckung.

Relevante ESA CCI Webseiten:

<https://climate.esa.int/de/projekte/land-cover/>
<https://climate.esa.int/en/projects/high-resolution-land-cover/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/High-Resolution-Land-Cover-CCI_min-1280x200.format-jpeg.jpg



Abbildung 86: Das ESA CCI Land Cover (LC) Datenprodukt 2015 mit 300 Metern Auflösung. Quelle: https://www.esa-landcover-cci.org/index.php?q=webfm_send/90

Hier zwei weitere Abbildungen basierend auf dem ESA CCI LandCover (LC) Datenprodukt (<https://climate.esa.int/fr/projects/land-cover/>):

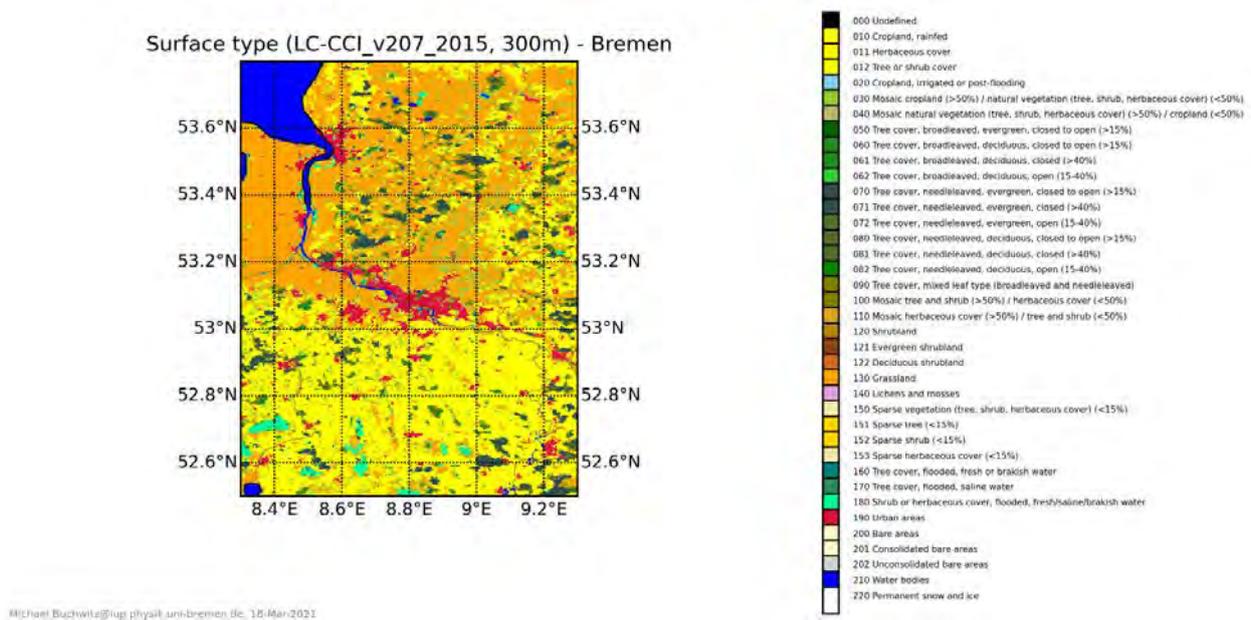


Abbildung 87: Bodentypen laut ESA CCI LandCover Datenprodukt in der Gegend um Bremen in Norddeutschland.

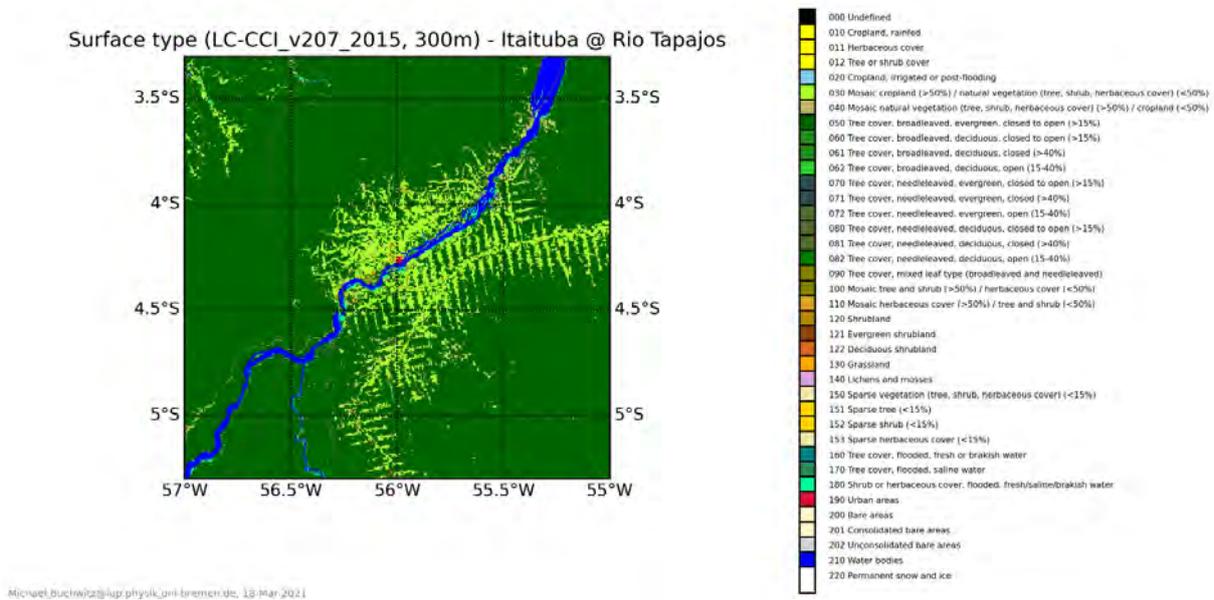


Abbildung 88: Bodentypen laut ESA CCI LandCover Datenprodukt in einem Gebiet des Amazonas Regenwaldes. Deutlich zu erkennen sind Wege und Schneisen im Regenwald, welche vermutlich zum Zwecke der Abholzung des Regenwaldes oder zur Gewinnung landwirtschaftlicher Flächen angelegt wurden.

8.21 Biomasse

Die oberirdische Biomasse (*Above Ground Biomass*, AGB) ist der sichtbarste aller Kohlenstoffpools und AGB-Veränderungen müssen detektiert und quantifiziert werden, u.a. um lokale oder globale Kohlenstoff-Budgets zu erstellen oder zu verbessern.

Abbildung 89 zeigt eine aus Satellitenmessungen abgeleitete Karte der oberirdischen Biomasse. Klar zu erkennen sind die großen (Regen-)Waldgebiete in den Tropen sowie die großen Wälder der mittleren und höheren nördlichen Breiten (Kanada, Russland, ...).

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/biomass/>

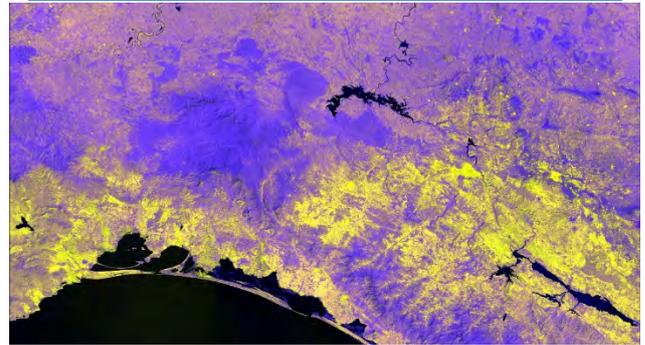


Bild: https://climate.esa.int/media/images/Biomass-CCI-banner_1920.min_1280x200.format-jpeg.jpg

Satellitenmessungen von Biomasse:

Oberirdische Biomasse in 2017 in Tonnen/Hektar

ESA CCI „Above Ground Biomass“ (AGB) Datenprodukt in Mg/ha

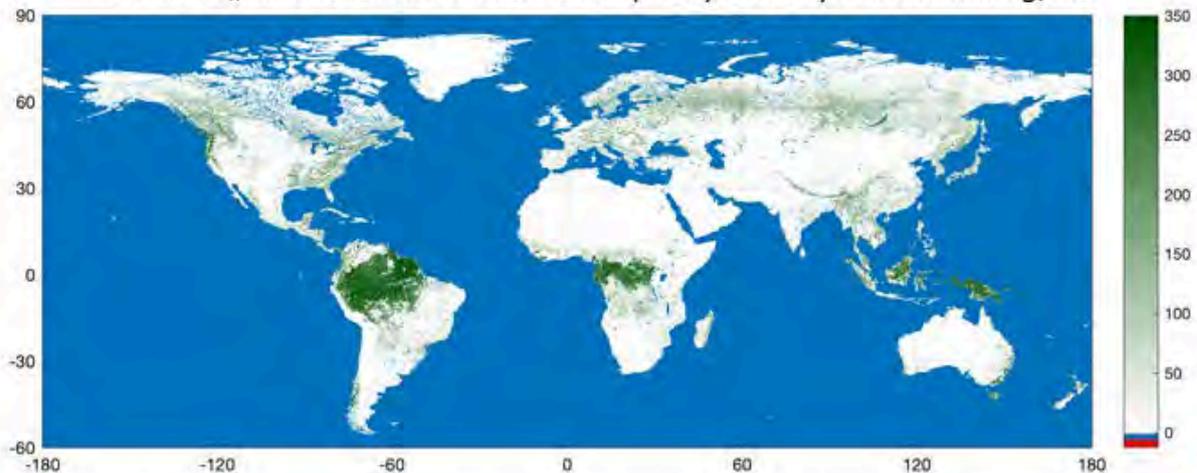


Abbildung 89: Mittels Satellitenmessungen bestimmte Verteilung der oberirdischen Biomasse im Jahres 2017 in Millionen Gramm (= Tonnen) Biomasse pro Hektar (ESA CCI Above Ground Biomass (AGB) Datenprodukt). Quelle: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/New_biomass_map_to_take_stock_of_the_world_s_carbon. Mg = Mega-Gramm = 1000 kg = 1 Tonne.

8.22 Feuer

Eine rechtzeitige und genaue Kartierung verbrannter Gebiete (z. B. Abbildung 90) ist von wesentlicher Bedeutung aus einer Vielzahl von Gründen einschließlich der Ausarbeitung kurzfristiger präventiver Wiederherstellungsmaßnahmen zur Milderung der negativen Auswirkungen der Brände (z. B. gegen Überschwemmungen) sowie für die Ausarbeitung effizienter kurz- bis mittelfristiger Wiederherstellungsmaßnahmen.

Feuer emittieren auch eine Vielzahl von Stoffen in die Atmosphäre, wie z.B. Kohlenmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Methan.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/fire/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Fire-CCI-banner_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Satellitenmessungen verbrannter Flächen:

Verbrannte Flächen in 2019 in Quadratkilometern

ESA CCI Fire „Burned Area“ (BA) Datenprodukt

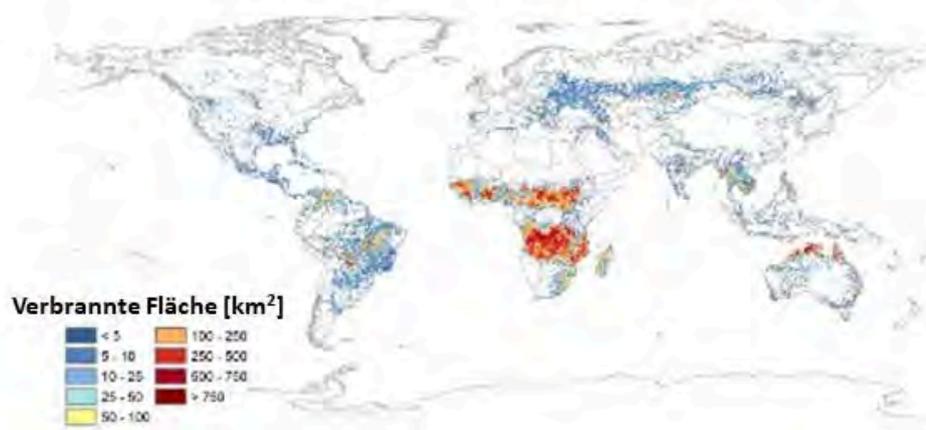


Abbildung 90: Durch Feuer im Jahre 2019 verbrannte Flächen in Quadratkilometern. Hier dargestellt ist das aus Satellitenmessungen abgeleitete ESA CCI Fire Burned Area (BA, verbrannte Fläche) Datenprodukt. Quelle: https://geogra.uah.es/fire_cci/firecci51.php.

8.23 Schnee

Die Bestimmung der Höhe der Schneedecke und anderer Schneeeigenschaften ist wichtig für hydrologische Anwendungen wie die Modellierung und Vorhersage des Abflusses aus der Schneeschmelze sowie für das Verständnis von Veränderungen in lokalen und regionalen Klimaregimen.

Weiterhin spielt Schnee auch aus einer Vielzahl von anderen Gründen eine wichtige Rolle für das Klimasystem (Albedo, ...).

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/snow/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Snow-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg

Satellitenmessungen (Abbildung 91) und andere Beobachtungen zeigen, dass die Schneemenge je nach Ort in den letzten Jahrzehnten entweder unverändert geblieben ist, abgenommen hat (z.B. in großen Teilen Europas; siehe auch Abbildung 92 und Abbildung 93) hat oder sogar zugenommen hat (z.B. in Teilen Russlands). Es gibt also keinen weltweit einheitlichen Trend.

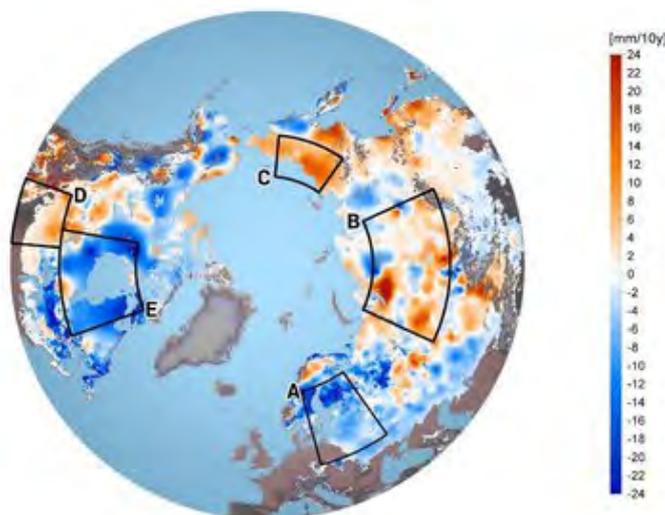


Abbildung 91: Veränderungen der Schneehöhe in der Nordhemisphäre von 1980 bis 2018 in Millimeter pro Dekade (aus Pulliainen et al., 2020). Siehe auch: <https://climate.esa.int/de/evidence/observations-change/>. Bild: https://climate.esa.int/media/images/Changes_in_snow_mass_1980_to_2018.width-400.jpg

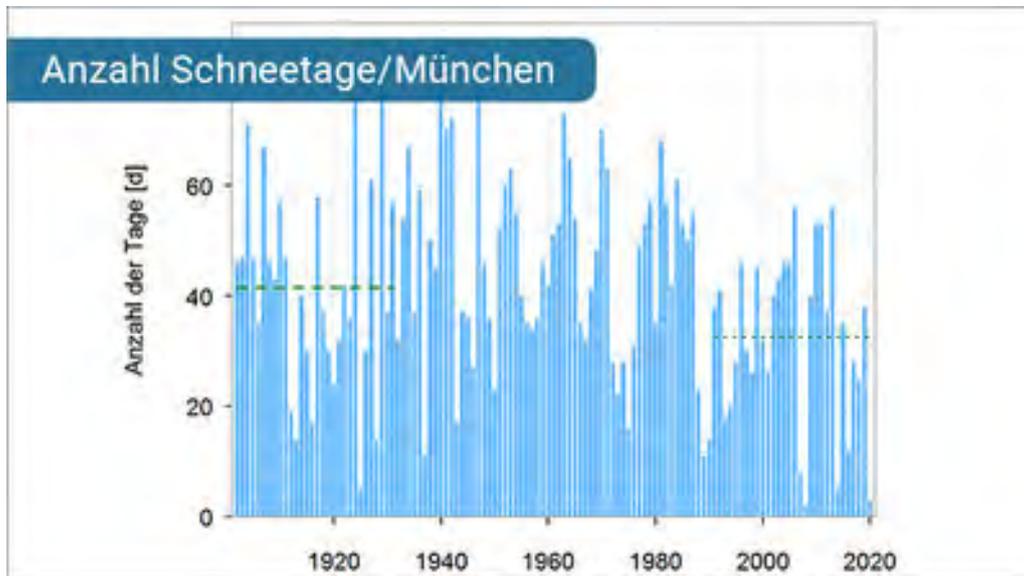


Abbildung 92: Anzahl der Schneetage pro Jahr in München. Quelle: Wetteronline, DWD (<https://www.wetteronline.de/wetternews/klimawandel-in-deutschland-winter-immer-weniger-schnee-2020-11-22-vl>).

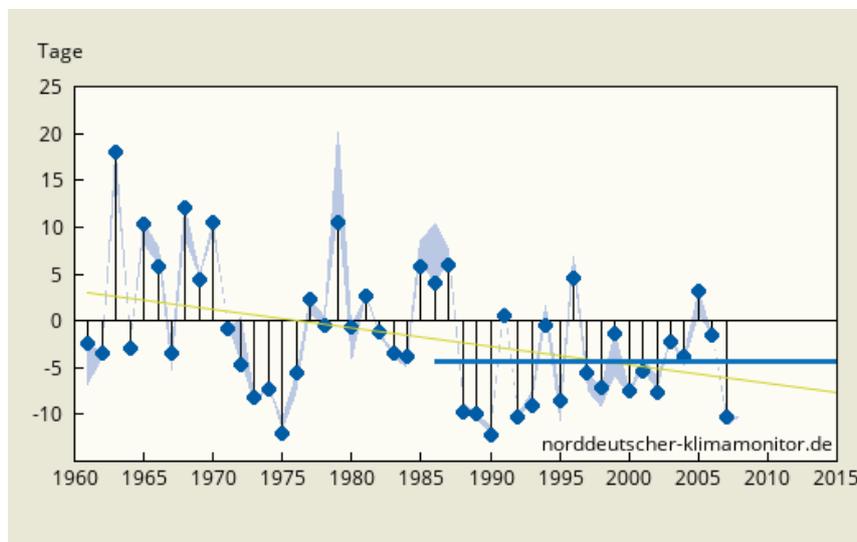


Abbildung 93: Anzahl der Schneetage pro Jahr relativ zur Klimanormalperiode 1961-1990 für die Metropolregion Bremen-Oldenburg. Quelle: norddeutscher Klimamonitor (<https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klimaentwicklung/1961-2015/winter/schneetage/metropolregion-bremen-oldenburg/coastdat-1/zeitreihe.html>).

8.24 Permafrost

Da sich die Erde erwärmt, befürchten Wissenschaftler, dass ein großer Teil des Kohlenstoffs, welcher sich derzeit im Permafrostboden befindet, als Kohlendioxid oder Methan in die Atmosphäre entweichen könnte.

Ein Anstieg dieser Gase in der Atmosphäre könnte zu einer weiteren Erwärmung des Klimas der Erde führen. Das Auftauen der Permafrostböden stellt daher durch die Freisetzung von Treibhausgasen einen wichtigen positiven Rückkopplungsmechanismus dar, durch welchen sich eine anfängliche Erwärmung verstärken kann.

Daher ist es wichtig, Permafrost-Gebiete (Abbildung 94) gut zu überwachen, z.B. mittels Satelliten und anderen Messungen.

Relevante ESA CCI Webseite:

<https://climate.esa.int/de/projekte/permafrost/>



Foto: https://climate.esa.int/media/images/Permafrost-CCI_1920.min-1280x200.format-jpeg.jpg

Siehe auch: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Picturing_permafrost_in_the_Arctic



Abbildung 94: Verteilung der Permafrostgebiete der Nordhemisphäre. Quelle: <https://frozen.earth/wp-content/uploads/2019/02/permafrost-arctic-distribution.png>

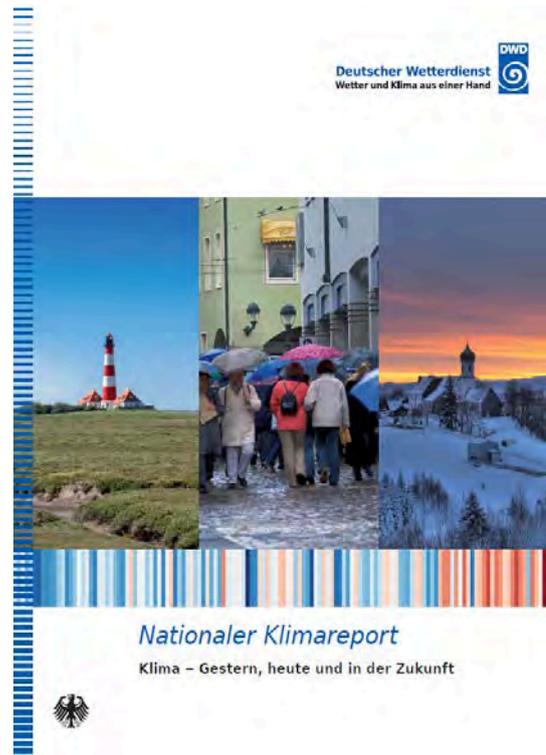
9 Klimaprojektionen mit Klimamodellen

Die Thematik Klimaprojektionen wurde bereits an einigen Stellen in diesem Handbuch angesprochen bzw. es wurden entsprechende Resultate vorgestellt (siehe z.B. Abschnitt 3).

Hier soll nur kurz auf dieses wichtige aber auch komplexe Thema eingegangen werden.

Zum Einstieg in diese Thematik empfehlen wir die folgende Broschüre des Deutschen Wetterdienstes (DWD): „Klimavorhersagen und Klimaprojektionen – Wie entstehen Aussagen über das zukünftige Klima?“ (Link: https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/broschuere_klimaforschung.pdf).

Desweiteren empfehlen wir die DWD Broschüre “Nationaler Klimareport, Klima – Gestern, heute und in der Zukunft“ (Link: https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report_aufgabe-4.pdf).



Wie Klimamodellierung funktioniert kann man auch online am Computer erlernen. *Dommenget und Flöter, 2011*, haben hierfür das „Monash Simple Climate Model“ (MSCM) entwickelt, welches man mittels eines Internetbrowsers (also ohne lokale Installation einer App) bedienen kann (siehe <http://mscm.dkrz.de/>). Die Startseite des MSCM gibt einen guten Überblick darüber, was alles hiermit gemacht werden kann:





10 Das 1,5 Grad Ziel: Wieviel Zeit bleibt uns noch?

Laut Pariser Klima-Abkommen (*Paris Agreement*, siehe <https://www.bmu.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen> und https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_de) soll die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit begrenzt werden; wenn irgend möglich, dann sollte 1,5 °C nicht überschritten werden.

Da einmal emittiertes CO₂ sehr lange in der Atmosphäre verbleibt und jede zusätzliche Erhöhung der atmosphärischen Konzentration zu einem Anstieg der Erwärmung führt, bedeutet dies, dass wir den (Netto-)Eintrag von CO₂ in die Atmosphäre praktisch auf Null reduzieren müssen. Wieviel Zeit verbleibt uns dafür? Das hängt natürlich davon ab, wieviel CO₂ wir pro Jahr in der Zukunft emittieren werden (und wieviel davon in der Atmosphäre verbleibt) und wie sich die CO₂-Emissionen auf die Erderwärmung auswirken.

Untersuchungen mit Klimamodellen haben gezeigt, dass die entscheidende Größe, welche die Temperaturzunahme bestimmt, die Gesamtmenge des emittierten CO₂ ist, also die kumulierte (oder kumulative) CO₂-Menge. Es ist daher nicht entscheidend, wann und wo genau wieviel CO₂ emittiert wurde, sondern nur welche Menge insgesamt emittiert wurde. Es gibt daher in guter Näherung einen linearen Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Gesamt-CO₂-Emission. Dieser Zusammenhang ist natürlich mit einer gewissen Unsicherheit behaftet (und diese ist in den entsprechenden Publikationen angegeben).

Bis zum Jahre 2019 wurden bereits etwa 2390 GtCO₂ emittiert und dies entspricht in etwa einer globalen Erwärmung von 1,2°C. Daher entspricht einer Erwärmung um ein Grad in etwa einer kumulative Emission von 2000 GtCO₂. Hiernach können also noch etwa 600 GtCO₂ emittiert werden, bis das Paris-Ziel von 1,5°C erreicht sein wird. Derzeit emittieren wir etwa 40 GtCO₂ pro Jahr. Wenn alles so bleibt wie bisher, dann werden die 1,5°C also bereits in etwa 15 Jahren erreicht sein (genauer gesagt: 15 Jahre nach dem Jahr 2019), also um das Jahr 2034. Natürlich kann man derzeit das genau Jahr nicht mit Sicherheit vorhersagen, sondern nur grob schätzen. Bezüglich einzelner Jahre wird erwartet (siehe <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-update-5050-chance-of-global-temperature-temporarily-reaching-15C2%B0c-threshold>) das eine Temperaturerhöhung von 1,5°C mindestens in einem Jahr im Zeitraum bis 2028 mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% eintreten wird.

Sollten wir es aber schaffen, unsere CO₂-Emissionen in den nächsten Jahren deutlich zu reduzieren, dann werden wir die Erderwärmung verzögern können. Ob wir es jedoch schaffen werden, die Erderwärmung längerfristig wirklich auf unter 2 °C oder sogar auf unter 1,5 °C zu begrenzen, dass wird erst die Zukunft zeigen.

Was wir bezüglich Klimaschutz tun können bzw. tun müssten, dass ist das Thema des nächsten Abschnitts.



11 Klimaschutz: Was kann man tun?

Die Umsetzung des Pariser Klimaabkommens (<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>) soll dafür sorgen, dass die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit beschränkt wird; die Staaten sollen möglichst versuchen, die Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.

Da wir bereits eine globale Erwärmung von etwa 1,2 °C in 2020 erreicht haben und der derzeitige Erwärmungstrend bei etwa 0,3°C in 13 Jahren liegt, wird - wenn alles so weiter geht wie in den letzten Jahren - bereits um das Jahr 2034 die Erwärmung bei 1,5°C liegen (für eine Abbildung, die dies illustriert, siehe <https://climate.copernicus.eu/how-close-are-we-reaching-global-warming-15degc>; für eine Animation siehe: <https://www.globalcarbonproject.org/global/multimedia/CarbonBudgetBucket2020.mp4>).

Um dies zu vermeiden, müssen wir unsere Treibhausgas-Emissionen - also insbesondere die CO₂- aber auch die Methan-Emissionen - so schnell wie möglich und so stark wie möglich reduzieren. Die Emissionen müssen effektiv auf Null reduziert werden oder sogar irgendwann „negativ“ werden, d.h. es muss sogar CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden. Dies kann man zum Beispiel aus den Abbildung 98 und Abbildung 99 (a) erkennen (siehe insbesondere die blau dargestellten Zeitserien der SSP1 Szenarien).

Die effektive Vermeidung (fast) aller Treibhausgasemissionen erfordert nicht weniger als die Umstellung unseres gesamten Energie-Systems und großen Teilen unseres Wirtschafts-Systems einschließlich Stahlproduktion, Landwirtschaft, etc. Und diese Umstellung „weg von den fossilen Energieträgern“ muss relative schnell passieren, und zwar innerhalb der nächsten Jahrzehnte.

Kann dies gelingen und wenn ja, wie? Das ist die große Frage und hier herrscht keineswegs Einigkeit.

Zwar nehmen die erneuerbaren Energien in Deutschland einen immer größeren Anteil am Stromverbrauch und auch am Bruttoendenergieverbrauch ein (siehe Abbildung 95) aber der überwiegende Teil der Energie (etwa 80% im Jahre 2020) entstammt anderen Energiequellen und zwar im wesentlichen fossilen Energiequellen plus Kernenergie, wie in Abbildung 96 und Abbildung 97 gezeigt.

Es nicht damit getan, hier und da ein paar Prozent der Emissionen einzusparen. Natürlich ist es gut, die Umwelt möglichst nicht zu verschmutzen und Energie zu sparen, wo es geht. Aber dies alleine wird nicht reichen. Die Möglichkeiten jedes Einzelnen sind zwar nicht Null, aber doch sehr beschränkt. Wir benötigen nun einmal Energie und der Energiebedarf der Menschheit wird in Zukunft eher zunehmen als abnehmen.

Die große Frage ist also: Woher soll die Energie kommen, wenn nicht aus fossilen Quellen?

Kandidaten sind die erneuerbaren Energien, insbesondere Windenergie und Solarenergie (aber auch einige andere Quellen wie Wasserkraft und Geothermie), aber auch Kernenergie in den Varianten Kernspaltung und Kernfusion.



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Kernenergie ist für Deutschland derzeit keine Option. Deutschland setzt auf den Ausbau der erneuerbaren Energien und einen Mix verschiedener Maßnahmen, welche die Quellen der Treibhausgase aber auch die natürlichen CO₂-Senken betreffen. Einen Überblick über die deutsche Klimaschutzpolitik ist auf dieser Webseite gegeben: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html>. Hier steht unter anderem:

„Am 24.06.2021 hat der Deutsche Bundestag ein neues Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen. Mit dem novellierten Gesetz wird das deutsche Treibhausgasminderungsziel für das Jahr 2030 auf minus 65 Prozent gegenüber 1990 angehoben. Bislang galt ein Minderungsziel von minus 55 Prozent. Bis 2040 müssen die Treibhausgase um 88 Prozent gemindert und bis 2045 Treibhausgasneutralität verbindlich erreicht werden. Auch die Vorgaben zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren (Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr Landwirtschaft und Abfall) wurden verschärft. Darüber hinaus wurde erstmals ein verbindliches Ziel für natürliche Senken, also die Bindung von CO₂ durch zum Beispiel Wälder oder Moore, festgelegt. Mit den deutlich ambitionierteren Zielen setzt Deutschland neben den Vorgaben des Bundesverfassungsgerichts als erster EU-Staat auch die neuen europäischen Klimaziele um, die im vergangenen Jahr unter deutscher Ratspräsidentschaft beschlossen wurden.

Um die Erreichung der neuen Klimaziele zu unterstützen hat Bundesregierung am 23.06.2021 ein Klimaschutzsofortprogramm 2022 verabschiedet. Mit dem Sofortprogramm werden in den kommenden Jahren rund 8 Milliarden Euro zusätzlich für Klimaschutzmaßnahmen in allen Sektoren zur Verfügung gestellt. Dabei stehen vor allem die Sektoren Industrie, Energiewirtschaft und Gebäude im Mittelpunkt. Die Maßnahmen in diesen Sektoren haben ein Gesamtvolumen von knapp 6,5 Milliarden Euro. Zusätzliche Mittel fließen unter anderem in die Bundesförderung energieeffiziente Gebäude (BEG), das Investitionsprogramm Stahlindustrie und das Programm Dekarbonisierung der Industrie.“

Wird dies reichen, um das Pariser 1,5 Grad Ziel einzuhalten?

Eine vielbeachtete Initiative, die sich zum Ziel gesetzt hat zu beurteilen, inwieweit die Klimamaßnahmen der Regierungen verschiedener Länder mit dem Paris Ziel verträglich sind, ist die Climate Action Tracker (CAT) Initiative (<https://climateactiontracker.org/>). CAT stellt politischen Entscheidungsträgern seit 2009 unabhängige Analyse zur Beantwortung dieser Frage zur Verfügung. CAT quantifiziert und bewertet Klimaschutzziele, Strategien und Maßnahmen. Außerdem werden die Maßnahmen der einzelnen Länder auf globaler Ebene zusammengefasst und der wahrscheinliche Temperaturanstieg im 21. Jahrhundert mit Hilfe eines Klimamodells ermittelt. CAT entwickelt außerdem sektorale Analysen, um die erforderlichen Wege zur Erreichung der globalen Temperaturziele aufzuzeigen. Die CAT Analyse zeigt, dass die globalen (effektiven) CO₂-Emissionen nicht mit dem Paris-Ziel kompatibel sind, denn die angestrebten Emissionen bis 2030 liegen deutlich über den mit dem Paris-Ziel kompatiblen Emissionen (siehe



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

<https://climateactiontracker.org/media/images/CAT-Graph-EmissionsGaps2030-PNGMedium-2021.05.original.png>). Die Zusammenfassende CAT Beurteilung für Deutschland (Stand: Oktober 2021) ist, dass Deutschland derzeit nicht auf dem Weg ist, das Paris-Ziel einzuhalten. Die geplanten Anstrengungen Deutschlands dieses Ziel zu erreichen werden zusammenfassend als „ungenügend“ (*insufficient*) klassifiziert. Dies kann sich in Zukunft natürlich ändern.

Eine weitere Initiative, welche weltweit den Stand verschiedener Staaten bzgl. Klimaschutz bewertet ist Germanwatch (<https://germanwatch.org/de>). Detaillierte Informationen einschließlich interaktiver Karten und Tabellen (auf Englisch) gibt es auf der *Climate Change Performance Index* (CCPI) Webseite (<https://ccpi.org/>). Zusammengefasst ist dies der Stand November 2021 (Quelle (leicht ergänzt, siehe Text in eckigen Klammern [...]): <https://germanwatch.org/de/21110>):

„Seit 2005 bietet der Climate Change Performance Index (CCPI) jährlich ein unabhängiges Kontrollinstrument, um die Klimaschutzbemühungen von 60 Ländern und der EU zu messen. Damit verbessert er die Transparenz in der internationalen Klimapolitik und ermöglicht einen Vergleich der Klimaschutzleistungen und Fortschritte der einzelnen Länder.“

Auch im diesjährigen Klimaschutz-Index (CCPI 2022) schneidet kein Land in allen Indexkategorien gut genug ab, um eine „sehr gute“ Bewertung im Gesamtranking zu erhalten. [Grund: Kein Land ist auf einem Pfad, um die Temperaturerhöhung auf 1,5 Grad zu begrenzen] Daher bleiben die ersten drei Ränge leer. Dänemark erreicht die beste Platzierung und wurde in den Kategorien Treibhausgasemissionen, Erneuerbare Energien und Klimapolitik als „gut“ eingestuft. In diesem Jahr schafft es außerdem mit Norwegen erstmals ein Land in der Kategorie Erneuerbare Energien als „sehr gut“ eingestuft zu werden. In der Gesamtrangliste folgen auf Dänemark Schweden (Platz 5), Norwegen (Platz 6), Großbritannien (Platz 7) und Marokko (Platz 8).

Der CCPI 2022 zeigt, dass das Rennen zur Klimaneutralität begonnen hat und erste Staaten vorangehen.

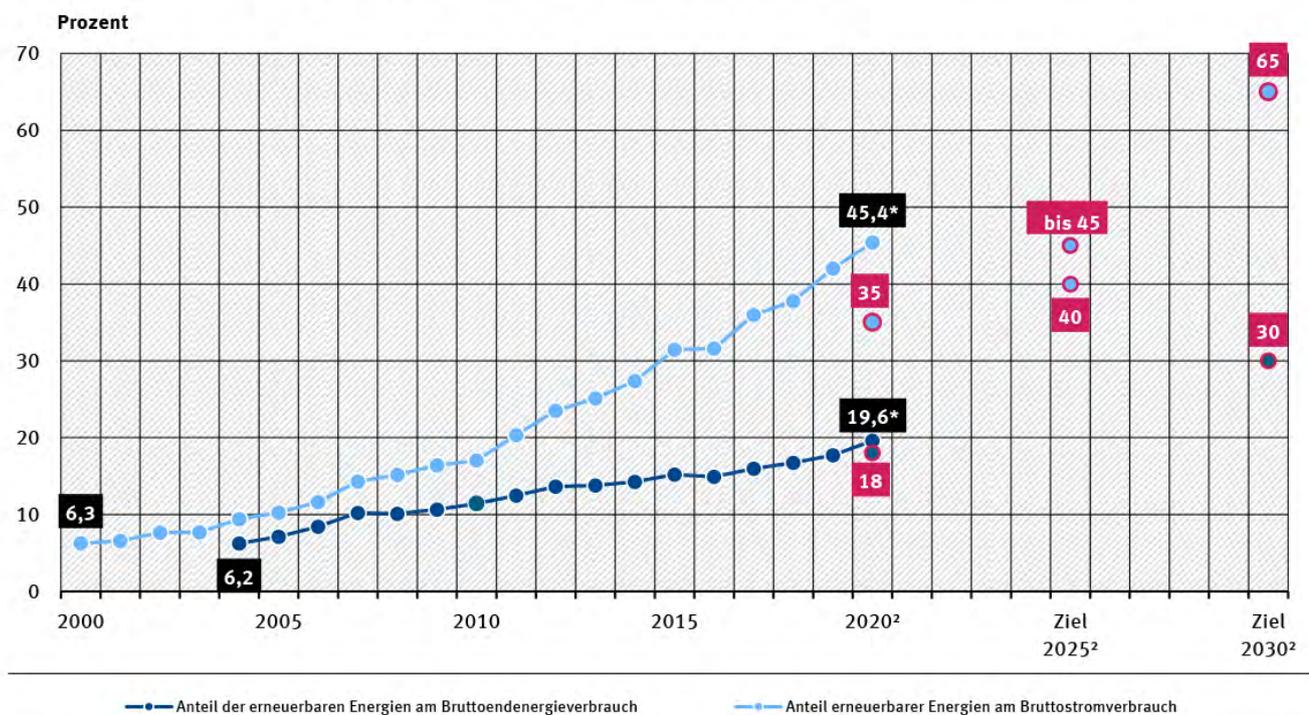
Zu den diesjährigen Verlierern gehört Australien. Seit 2014 wird die Leistung des Landes im CCPI als „sehr schlecht“ bewertet und rutscht in diesem Jahr weitere vier Plätze nach unten. Die insgesamt schlechteste Leistung zeigen Saudi-Arabien und Kasachstan.

Der CCPI bewertet die einzelnen Länder in vier Bereichen: Treibhausgas-Emissionen (40% der Gesamtwertung), Erneuerbare Energie (20%), Energieverbrauch (20%) und Klimapolitik (20%). Zudem wird die Frage beantwortet, inwieweit das jeweilige Land in den Bereichen Treibhausgas-Emissionen, Erneuerbare Energien und Energieverbrauch adäquat handelt, um die Pariser Klimaziele erreichen zu können. Das Alleinstellungsmerkmal des CCPI liegt in den Indikatoren zur Klimapolitik. Die Bewertung der nationalen und internationalen Klimapolitik der einzelnen Länder im CCPI ist nur

möglich aufgrund der kontinuierlichen Unterstützung und der Beiträge von rund 450 ExpertInnen für Klima- und Energiepolitik.“

In diesem Klimaschutz-Index belegt Deutschland Platz 13 (Jahr 2021), nach Platz 19 im Vorjahr (2020).
Details siehe <https://ccpi.org/country/DEU/>.

Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch¹

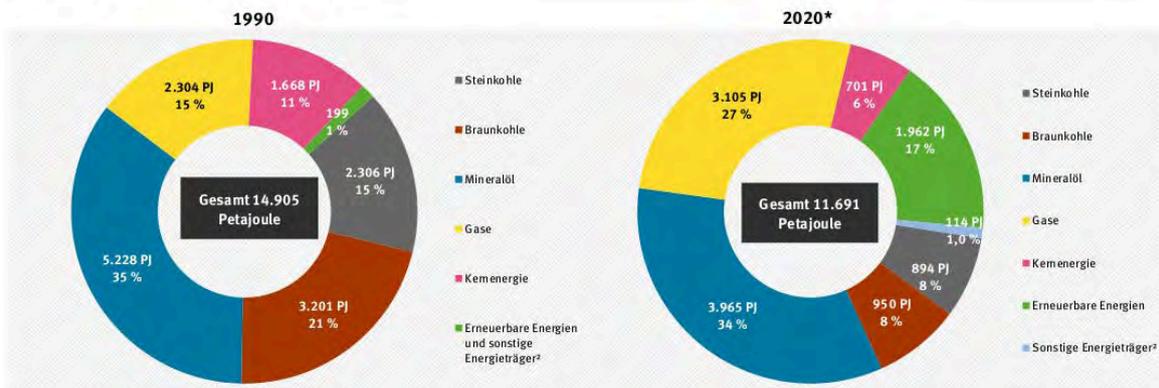


¹ Anteil am Bruttoendenergieverbrauch berechnet nach Berechnungsregeln gemäß Energiekonzept der Bundesregierung
² Quelle Zielwerte: EU-Richtlinie 2009/28/EG, Energiekonzept (2010), Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) 2021
 * vorläufige Angaben

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - Statistik (AGEE-Stat), Stand 02/2021

Abbildung 95: Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch in Deutschland. Quelle: Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegeren-sektoren#anteil-erneuerbarer-energien-am-gesamten-bruttoendenergieverbrauch>).

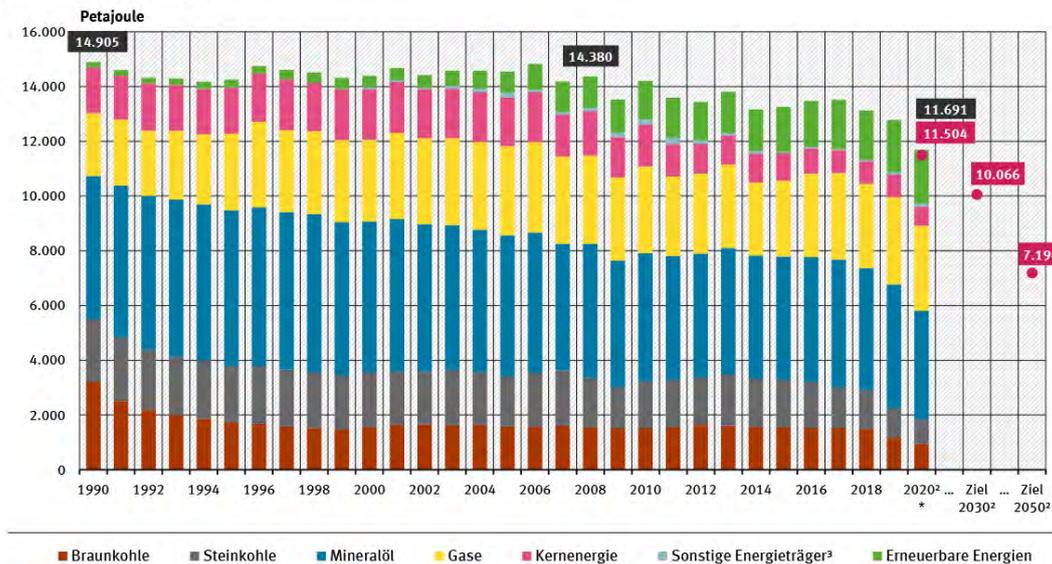
Primärenergieverbrauch¹ nach Energieträgern



¹ Berechnungen auf der Basis des Wirkungsgradansatzes.
² bis 1999 Erneuerbare Energien mit sonstigen Energieträgern, ab 2000 getrennte Erfassung, Sonstige Energieträger sind: Nicht-energetische Abfälle, Abwärme und Außenhandelssaldo von Fernwärme und Strom
³ vorläufige Angaben
 Quelle: für 1990-Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungsstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019, Stand 09/2020; für 2020-Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Primärenergieverbrauch, Stand 12/2020

Abbildung 96: Primärenergieverbrauch von Deutschland 1990 (links) und 2020 (rechts). Quelle: Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>).

Primärenergieverbrauch¹



¹ vorläufig
² Ziele des Energieeffizienzkonzeptes der Bundesregierung: Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% (Basisjahr 2008)
³ Ziel der Energieeffizienzstrategie 2050: Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2030 um 30% und bis 2050 um 50% (Basisjahr 2008)
³ sonstige Energieträger: Grubengas, nicht-erneuerbare Abfälle und Abwärme sowie der Stromausgleichsbedarf
 Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungsstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019, Stand 09/2020; für 2019, 2020, AG Energiebilanzen, Primärenergieverbrauch, Stand 12/2020

Abbildung 97: Jährlicher Primärenergieverbrauch von Deutschland. Quelle: Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>).



Die in diesem Kapitel adressierte Thematik ist komplex und kann hier nur sehr kurz angerissen werden. Diese Thematik ist nicht der Schwerpunkt dieses Handbuchs. Wir belassen es daher bei den hier gemachten Anmerkungen.

Aber wie bereits angekündigt, hier eine kleine und sicherlich nicht repräsentative Auswahl an deutschsprachiger Literatur zur Thematik Klimaschutz und Energiewende:

Ebert, Vince, Lichtblick statt Blackout: Warum wir beim Weltverbessern neu denken müssen, 224 Seiten, dtv Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2022.

Mit kritisch humoristischer Feder hinterfragt der Physiker Vince Ebert den Zeitgeist und unseren Ehrgeiz, die Welt zu retten. Tun wir möglicherweise aus den richtigen Gründen das Falsche?

Figueres, Christiana und Tom Rivett-Carnac, Die Zukunft in unserer Hand – Wie wir die Klimakrise überleben, Verlag C. H. Beck oHG, 216 Seiten, ISBN 978 3 406 77560 4, 2021.

10 Maßnahmen zum Klimaschutz von der ehemaligen Generalsekretärin des Sekretariats der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und ihres Mitarbeiters.

Gates, Bill: Wie wir die Klimakatastrophe verhindern – Welche Lösungen es gibt und welche Fortschritte nötig sind, Piper Verlag, 316 Seiten, ISBN: 978-3-492-07100-0, 2021.

So fängt die Einführung an:

„Es gibt zwei Zahlen, die Sie über den Klimawandel kennen sollten. Die erste ist 51 Milliarden. Die andere ist null. Die 51 Milliarden beziffern die Menge der Tonnen an Treibhausgasen, die typischerweise weltweit jedes Jahr in die Atmosphäre freigesetzt werden ... Null ist das Ziel, das wir uns setzen müssen. Um die Erderwärmung zu stoppen ... Die Menschheit hat noch nie so etwas Großes unternommen ...“

In den nachfolgenden Kapiteln geht es um Stromerzeugung, Industrieproduktion und weitere Themen bis zu was jeder Einzelne tun kann. Ein Kapitel lautet „Ein Plan zur Dekarbonisierung“.

Herrmann, Ulrike: Das Ende des Kapitalismus – Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind – und wie wir in Zukunft leben werden, Kiepenheuer & Witsch, 352 Seiten, ISBN: 978-3-462-00255-3, 2022.

Die Autorin argumentiert, dass wir „grünes Schrumpfen“ brauchen, da „grünes Wachstum“ auf zu optimistischen Annahmen beruht.

Jugendrat der Generationen-Stiftung: Ihr habt keinen Plan - Darum machen wir einen – 10 Bedingungen für die Rettung unserer Zukunft, Verlagsgruppe Random House GmbH, ISBN 978-3-89667-656-6, 272 Seiten, 3. Auflage, 2019.



Aufruf mit Plänen für eine gerechtere und ökologisch handelnde Gesellschaft.

Kleinknecht, Konrad: Wer im Treibhaus sitzt – Wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen, Piper Verlag, 256 Seiten, ISBN: 978-3-492-05011-1, 2007.

Ein schon etwas älteres Buch in dem aber auch kurz und klar viele Grundlagen erklärt werden und welches deshalb immer noch aktuell ist. Ein Kernthema ist die „Enttabuisierung der Kernenergie“.

Latif, Mojib, Heisszeit – Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten, Verlag Herder GmbH, 221 Seiten, ISBN Print 978-3-451-38684-8, 2020.

Latif präsentiert knapp und engagiert die Fakten zum Klimaproblem und dessen Lösung einschließlich Zehn-Punkte-Plan zum Klimaschutz und benennt die Gründe, warum ein globaler Klimaschutz bisher nicht gelang.

Nelles, David und Christian Serrer: Machste dreckig – machste sauber - Die Klimalösung, <https://www.klimawandel-buch.de/>, 125 Seiten, ISBN: 978-3-9819650-1-8, 2021.

Die Fortsetzung des erfolgreichen Spiegel Bestsellers „Kleine Gase – Grosse Wirkung – Der Klimawandel“. Kurze klare Texte und viele hilfreiche Grafiken. Sehr guter Überblick zu allem was man wissen muss: Klimawandel (Ursache, Folgen, Pfad zum 1.5 Grad Ziel, ...), Energie (Grundlagen, Elektrizität, Wärme, ...), Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Industrie, CO₂-Entfernung und Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Mehr als 250 Wissenschaftler haben zu diesem Buch beigetragen, einschließlich zwei Autoren dieses Handbuchs (Dr. Maximilian Reuter und Dr. Michael Buchwitz von der Universität Bremen) und der Initiator dieses Clim4Edu Projekts Dr. Achim Friker von der DLR Raumfahrtagentur in Bonn.

Neubauer, Luisa und Alexander Repenning: Vom Ende Klimakrise – Eine Geschichte unsere Zukunft, Tropen Sachbuch, 303 Seiten, ISBN: 978-3-608-50479-8, 2020.

Ein Buch einer der deutschen Ikonen von Fridays for Future und ein Spiegel Bestseller. Bringt laut Cover „Theorie und Praxis“ zusammen.

Quaschnig, Volker: Erneuerbare Energien und Klimaschutz, Carl Hanser Verlag München, 394 Seiten, 5te aktualisierte Auflage, ISBN: 978-3-446-46293-9, 2020.

Ein umfangreicher aber allgemeinverständlicher Überblick über erneuerbare Energien. Kann die Energiewende gelingen und wenn ja, wie? Ein Experte auf diesem Gebiet versucht diese Frage zu beantworten.

Schellhuber, Hans Joachim: Selbstverbrennung – Die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff, C. Bertelsmann Verlag, 778 Seiten, ISBN: 978-3-570-10262-6, 2015.



**Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel
unter Benutzung von Satellitendaten - *Handbuch***

Sehr dick. Sehr lesenswert. Sehr viele Hintergrundinformationen aus verschiedenen Bereichen.

Scorza, Cecilia, H. Lesch, M. Strähle, D. Sörgel: Der Klimawandel: verstehen und handeln – Ein interdisziplinäres Schulprojekt der Fakultät Physik – Mit Experimenten im Klimakoffer, 104 Seiten, https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf, Dezember 2020.

Der Schwerpunkt hier ist Klimawandel verstehen und Experimente aber das Handbuch enthält auch ein „Was tun“-Kapitel „Der Klimawandel: verstehen und HANDELN“.

Sinn, Hans-Werner: Das grüne Paradoxon – Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik, Econ Verlag Berlin, 477 Seiten, ISBN: 978-3-430-20062-2, 2008.

Bringt eine wirtschaftswissenschaftliche Perspektive in die Klimadiskussion ein einschließlich – laut Cover – „blinden Flecken“ und „fatalen Irrtümern“.

Sommer Jörg, und Michael Müller (Herausgeber): Unter 2 Grad? Was der Weltklimavertrag wirklich bringt, Hirzel Verlag, 320 Seiten, ISBN: 978-3-7776-2570-6, 2016.

Verschiedene Expert:innen aus Wissenschaft, Politik, Medien und NGOs äußern sich zu dieser Thematik.

Thess, André D.: Sieben Energiewendemärchen? – Eine Vorlesungsreihe für Unzufriedene, Springer, 216 Seiten, ISBN: 978-3-662-61999-5, 2019.

Das Buch hat den Anspruch sieben kontroverse Energiewendethemen unter die Lupe zu nehmen, z.B. „Der böse Verbrennungsmotor“, „Das gute Elektroauto“, „Die billige Energiewende“.

Vahrenholt, Fritz: Die große Energiekrise: ... und wie wir sie bewältigen können, 208 Seiten, Langen-Müller (Herausgeber), 2023.

Dort steht: Die Antwort auf die drängenden Energiefragen unserer Zeit muss eine technologische Energie-Offensive in Deutschland sein, die alle Alternativen einbezieht, von der Schiefergas-Förderung über die CO₂-freie Nutzung heimischer Braunkohle bis zur Entwicklung einer neuen Generation sichererer Kernkraftwerke.



12 Häufige Fragen zum Klimawandel

Kompetente Antworten auf häufig gestellte Fragen gibt es zum Beispiele hier:

Webseite Deutsches Klima Konsortium (DKK):

<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq.html>

Webseite Umweltbundesamt (UBA):

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel>

Webseite Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):

<https://www.ipcc.ch/sr15/faq/>

13 Abkürzungen und Akronyme

AR	Assessment Report (z.B. IPCC AR5 oder AR6)
UB	Universität Bremen
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service (https://atmosphere.copernicus.eu/)
CAT	Climate Action Tracker
CDS	Copernicus Climate Data Store (https://cds.climate.copernicus.eu/)
C3S	Copernicus Climate Change Service (https://climate.copernicus.eu/)
CCI	Climate Change Initiative (der ESA) (https://climate.esa.int/de/)
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECV	Essential Climate Variable
EEI	Earth energy imbalance
ENVISAT	Environmental Satellite (europäischer Umweltsatellit)
EO	Earth observation
ESA	European Space Agency (Europäische Raumfahrtbehörde)
ESERO	European Space Education Resource Office
FIS	Fernerkundung in der Schule
GCOS	Global Climate Observing System
GEO	Geostationär (Satelliten)
IPCC	Intergovernmental Panel in Climate Change
IUP	Institut für Umweltphysik (der Universität Bremen)
LC	Land cover
LEO	Low Earth Orbit (Satelliten)
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität-München
LST	Land surface temperature
LuL	Lehrerinnen und Lehrer
MARUM	Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (an der Universität Bremen)
OC	Ocean color
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographyY
SSS	Sea surface salinity
SST	Sea surface temperature
SuS	Schülerinnen und Schüler
RUB	Ruhr-Universität Bochum
UB	Universität Bremen
UBA	Umweltbundesamt



14 Internet-Links zu Klima-Informationen für Schulen (Auswahl)

In diesem Abschnitt findet sich eine Auswahl von Internet-Links auf Webseiten, welche die für dieses Handbuch relevanten Themen Klima und Satelliten für Schulen adressieren und für den Unterricht geeignete Materialien zur Verfügung stellen.

Zu jedem Link ist auch eine Kurzbeschreibung angegeben, welche auf den dort angegebenen Informationen basiert.

14.1 Fernerkundung in Schulen (FIS)

<https://fis.rub.de/>

Das Ziel des Projektes besteht in der Integration des Themas Fernerkundung in den Schulunterricht. Lernen mit digitalen Satellitenbildern ist ein Schwerpunkt. Auf der Webseite gibt es interaktive Lernmodule, Recherche- und Analysetools zum Thema Satellitenfernerkundung für den Schulunterricht sowie wichtige Tipps und didaktische Kommentare.

<https://fis.rub.de/klimawandel>

Der Klimawandel ist eine generationenübergreifende globale Herausforderung und der Wissenschaft kommt bei der Bewältigung dieser Aufgabe eine zentrale Bedeutung zu. Sie ist die Methode um komplexe Phänomene und Zusammenhänge zu verstehen und Strategien zu entwickeln mit ihnen umzugehen. Und die Mechanismen des Klimawandels sind komplex und nicht immer einfach zu verstehen! Deswegen haben wir uns mit den Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen des Institutes für Umweltphysik in Bremen zusammengetan, die echte Experten auf diesem Gebiet sind. Gemeinsam entwickeln wir Materialien, die helfen, den Klimawandel in den naturwissenschaftlichen Unterricht zu integrieren.

14.2 EO College

<https://eo-college.org/>

EO College ist eine Drehscheibe für digitale Lerninhalte zu Erdbeobachtung, Fernerkundung und verwandten Themen. Die Plattform ist als Repository für offene Bildungsressourcen und Online-Kurse konzipiert. Verschiedene Kurse, meist auf Englisch aber teilweise auch auf Deutsch, wie z. B. „Grundlagen der Radarrückstreuung“.



14.3 MARUM (Universität Bremen)

<https://www.marum.de/Entdecken.html>

Das MARUM, das Zentrum für Marine Umweltwissenschaften an der Universität Bremen, bietet auf seiner „Entdecken“-Webseite eine Vielzahl unterrichtsrelevanter Materialien und Aktivitäten an. Einige dieser Angebote sind nachfolgend kurz beschrieben:

14.3.1 MARUM UNI-Schullabor

<https://www.marum.de/Entdecken/MARUM-UNISchullabor.html>

Das UNI-Schullabor ist eine Initiative des MARUM - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften an der Universität Bremen - um eine Brücke zwischen Schule und Wissenschaft zu bauen. In mehrstündigen Kursen werden Schulklassen ab Klassenstufe 1 Grundlagen und Highlights der universitären Forschung präsentiert.

Das Ziel ist, Schülerinnen und Schüler mit der Universität vertraut zu machen und sie an Naturwissenschaften und Studium heranzuführen. So sollen die Bedenken vor dem "Elfenbeinturm" Universität bereits in der Schule zerstreut werden. Die Themen werden allgemein verständlich und dem Bildungsniveau der jeweiligen Schulklassen angepasst präsentiert. Der Schwerpunkt liegt darauf, komplexe Vorgänge durch praktische Übungen zu veranschaulichen. Versuche und Arbeiten werden von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt.

14.3.2 Schulprojekt: Klima - Ich wandle mich!

<https://www.marum.de/Entdecken/Schulprojekt-Klima-Ich-wandle-mich.html>

Klimabezogenes Schulprojekt in enger Kooperation mit verschiedenen Bremen Schulen. Das Pilotprojekt "Klima - Ich wandle mich!" unterstützt Schulen bei der wissenschaftsbasierten Auseinandersetzung mit den Themen "Klimaschutz und Nachhaltigkeit" und welche (positiven) Folgen es für die Umwelt und Gesellschaft haben kann, wenn jeder einzelne sich dafür einbringt.

14.4 Hamburger Bildungserver

<https://bildungserver.hamburg.de/klimawandel/>

Umfangreiche Materialsammlung (Bilder, Poster, Texte, ...) für Schulen zum Thema Klimawandel.



14.5 DKRZ für Schulen

Das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) ist eine nationale Serviceeinrichtung und ein wichtiger Partner der Klimaforschung. Es stellt aber auch unterrichtsrelevante Informationen und Materialien bereit:

<https://www.dkrz.de/de/kommunikation/fuer-schulen>

So kann man zum Beispiel online ein vereinfachtes Klimamodell laufen lassen:

<https://www.dkrz.de/de/kommunikation/fuer-schulen/ein-einfaches-klimamodell>

14.6 ESA

Die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) stellt eine Vielzahl von unterrichtsrelevanten Materialien zur Verfügung und vieles davon ist auch auf Deutsch. Hier eine Auswahl:

14.6.1 ESERO

http://www.esa.int/Education/Teachers_Corner/European_Space_Education_Resource_Office

Diese Information befindet sich auf der Webseite unter "What is ESERO?":

The European Space Education Resource Office (ESERO) project is ESA's main way of supporting the primary and secondary education community in Europe. ESERO uses space related themes and the genuine fascination felt by young people for space to enhance school pupils' literacy and competence in STEM-related subjects. The ESERO project also highlights the associated applications from space and raises awareness of the large range of career prospects in the space domain.

Der Link zur deutsche Webseite ist dieser:

<http://esero.de/>

ESERO hat zum Ziel, Raumfahrt spannend und innovativ in die Klassenzimmer zu bringen und die Kompetenzen von Schüler*innen in den Fächern Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT-Fächer) zu fördern. ESERO entwickelt Unterrichtsmaterialien, bieten Fortbildungen für Lehrerinnen und Lehrer in Weltraumthemen wie Erdbeobachtung, Navigation, Kommunikation sowie der Erforschung des Weltalls an und beteiligt sich an nationalen Schulwettbewerben und -projekten von ESA und DLR.



14.6.2 ESA Kids

<https://www.esa.int/kids/de/home>

<https://www.esa.int/kids/de/Lehrer>

14.6.3 Climate Detectives

<https://climatedetectives.esa.int/>

14.6.4 Klima für Schulen (Climate for Schools)

<https://climate.esa.int/de/educate/climate-for-schools/> (deutsche Webseite)

<https://climate.esa.int/en/educate/climate-for-schools/> (englische Webseite)

Umfangreiche Materialsammlung u.a. in der Form von pdf-Dateien zu verschiedenen Themen einschließlich Versuchsanleitungen und Anleitungen zur Arbeit mit Satellitendaten.

Alle Unterrichtsmaterialien gibt es in mehreren Sprachen einschließlich Deutsch.

Diese Informationen findet man auf der deutschen Webseite:

Klima für Schulen - Lehr- und Lernmittel der ESA Klimawandel-Initiative:

Eine Reihe von inspirierenden Unterrichtsmaterialien, die Schüler dazu anregen, etwas über den Klimawandel auf der Erde zu lernen und darüber, wie man unseren Planeten aus dem Weltraum beobachten kann.

Die im Rahmen der ESA-Klimawandel-Initiative (CCI) entwickelten Ressourcen helfen Lehrern, wichtige Aspekte des Klimasystems zu behandeln und unterstützen Themen aus den Bereichen Wissenschaft, Technologie, Ingenieurwesen und Mathematik (MINT), die in den Lehrplänen von elf Bildungssystemen der ESA-Mitgliedstaaten unterrichtet werden.

Jedes Unterrichtsmaterial besteht aus einem Leitfaden für Lehrer, Arbeitsblättern für Schüler und Links zu weiteren Informationsquellen. Es enthält fesselnde Klimageschichten, praktische Experimente und integriert die Webanwendung *Climate from Space* der ESA. Auf diese Weise können die Schüler mehr als 40 Jahre globaler Satellitendaten erforschen, die verwendet werden, um (i) Schlüsselaspekte des Erdklimas zu verstehen und (ii) Frühwarnungen vor Veränderungen zu geben.



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Abgestimmt auf die Lehrpläne der Primar- und Sekundarstufe in ganz Europa wurde ein komplettes Paket von 10 Ressourcen entwickelt, die in fünf europäischen Sprachen verfügbar sind: Englisch, Französisch, Spanisch, Deutsch und Niederländisch.

Ressourcen für die Grundschulbildung (8-11 Jahre alt):

- **Ist Ozon gut oder schlecht?** – Die Rolle der menschlichen Verschmutzung bei der Schädigung der Ozonschicht
- **Der Wasserkreislauf** – Die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Hochwasser und Dürren
- **Bedrohtes Land** – Die Rolle der globalen Erwärmung beim Anstieg des Meeresspiegels und der Überflutung von Küstenstädten und kleinen Inseln

Unterer Sekundarbereich (11-14 Jahre alt):

- **Eine Passage öffnet sich** – Die Bedrohung durch schmelzendes Meereis aufgrund der globalen Erwärmung
- **Der Kohlenstoffkreislauf** – Wie sich der verstärkte Ausstoß von Kohlendioxid auf Wälder, Ozeane und unser Leben auswirkt
- **Dem Planeten auf den Puls fühlen** – Wie Satellitendaten zu unserem Verständnis des Klimawandels beitragen

Obere Sekundarstufe (14-16 Jahre alt):

- **Dem Planeten auf den Puls fühlen** – Wie Satellitendaten zu unserem Verständnis des Klimawandels beitragen
- **Urban Hotspots** – Wie städtische Gebiete die Häufigkeit von Hitzewellen erhöhen
- **Biologische Vielfalt und Verlust von Lebensräumen** – Wie der Klimawandel die biologische Vielfalt und den Verlust von Lebensräumen verursacht
- **Planetarische Wärmepumpen** – Wie die globale Erwärmung die Rolle der Ozeane als Wärmeregulator beeinflusst



14.7 LMU: Klimawandel verstehen und handeln

Bildungsprogramm für Schulen der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München zum Thema Klimawandel.

<https://klimawandel-schule.de/>

Verschiedenste klimarelevante Materialien und Lerneinheiten zu den drei Bereichen (i) Klima und Klimawandel verstehen, (ii) Zukunftsgestaltung und (iii) Zusammen handeln.

Sehr zu empfehlen ist zum Beispiel dieses Handbuch:

https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf

Versuche, welche klimarelevanten Fragestellungen adressieren (z.B. zu CO₂ und dem Treibhauseffekt), können mittels des „Klimakoffers“ durchgeführt werden:

<https://klimawandel-schule.de/klimakoffer/>

14.8 CLIMAtE change teacher's academy (CLIMADEMY)

EU Projekt, welches folgendes Ziel hat (siehe <https://climademy.eu/about/>): Ziel der CLIMADEMY ist es, ein umfassendes Programm für Lehrer anzubieten, das zu einem besseren Verständnis des Klimawandels und zu einer effizienten Methodik für den Unterricht der nächsten Generation europäischer Bürgern führt. Letztlich sollen die neuen Generationen darauf vorbereitet werden, die Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte im Bereich der nachhaltigen Entwicklung, der Begrenzung und Anpassung an den Klimawandel, des Umweltschutzes und der Bekämpfung von Ungleichheiten zu meistern. Mit der vorgeschlagenen Maßnahme wird ein europäisches Netz von Anbietern von Lehreraus- und -weiterbildung geschaffen. Das Konsortium (4 EU-Länder) wird ein starkes europäisches Netz und eine Praxisgemeinschaft im Bereich der Lehrerbildung entwickeln und aufbauen. Es bringt Universitäten zusammen, die in der Forschung zum Klimawandel führend sind und eine qualitativ hochwertige Lehrererstausbildung und berufliche Weiterbildung anbieten. Es bezieht auch andere national anerkannte Anbieter von Lehreraus- und -weiterbildung sowie Schulen ein, um die für die Lehreraus- und -weiterbildung wichtige praktische Ausbildung zu ermöglichen.



15 Bibliographie (Auswahl)

- Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Herausgeber):
Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung – Zukunft sichern – Jetzt handeln, Economica Verlag / Verlag C.F.Müller, 238 Seiten, ISBN: 3-87081-332-6 (Economica Verlag) und 3-7880-7448-5 (Müller), 1992.
- Ganteför, Gerd: Klima – Der Weltuntergang findet nicht statt, WILEY-VCH Reihe Erlebnis Wissenschaft, 289 Seiten, ISBN: 978-3-527-32863-5, 1. Auflage, 2021.
- Gates, Bill: Wie wir die Klimakatastrophe verhindern, Piper Verlag, 316 Seiten, ISBN: 978-3-492-07100-0, 2021.
- Herrmann, Ulrike: Das Ende des Kapitalismus – Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind – und wie wir in Zukunft leben werden, Kiepenheuer & Witsch, 352 Seiten, ISBN: 978-3-462-00255-3, 2022.
- Houghton, John: Global warming – The complete briefing, 3rd edition, Cambridge University Press, 351 Seiten, ISBN: 0 521 52874 7 (paperback), 2004.
- Kleinknecht, Konrad: Wer im Treibhaus sitzt – Wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen, Piper Verlag, 256 Seiten, ISBN: 978-3-492-05011-1, 2007.
- Latif, Mojib: Klima, Fischer Taschenbuch Verlag, 128 Seiten, ISBN: 3-596-16125-8, 2004.
- Latif, Mojib: Heisszeit – Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten, Verlag Herder GmbH, 221 Seiten, ISBN Print 978-3-451-38684-8, 2020.
- Lynas, Mark: 6 Grad mehr – Die verheerenden Folgen der Erderwärmung, Rowohlt Polaris, 412 Seiten, ISBN: 978-3-499-00442-1, Deutsche Erstausgabe, 2021.
- Mann, Michael E.: The Hockey Stick and the Climate Wars – Dispatches from the Front Lines, Columbia University Press New York, 423 Seiten, ISBN: 978-0-231-15255-6, 2014.
- Müller, Michael, Ursula Fuentes, Harald Kohl (Herausgeber): Der UN-Weltklimareport – Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe, Kiepenheuer & Witsch (KiWi) Paperbacks, 429 Seiten, ISBN: 978-3-462-03960-3, 2007.
- Nelles, David und Christian Serrer: Kleine Gase – Grosse Wirkung: Der Klimawandel, <https://www.klimawandel-buch.de/>, 132 Seiten, ISBN: 978-3-9819650-0-1, 2018.
- Nelles, David und Christian Serrer: Machste dreckig – machste sauber - Die Klimalösung, <https://www.klimawandel-buch.de/>, 125 Seiten, ISBN: 978-3-9819650-1-8, 2021.
- Neubauer, Luisa und Alexander Repenning: Vom Ende Klimakrise – Eine Geschichte unsere Zukunft, Tropen Sachbuch, 303 Seiten, ISBN: 978-3-608-50479-8, 2020.



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Plöger, Sven und Frank Böttcher: Klima Fakten, Westend Verlag, 168 Seiten, ISBN 978-3-86489-048-2, 2013.

Quaschnig, Volker: Erneuerbare Energien und Klimaschutz, Carl Hanser Verlag München, 394 Seiten, 5te aktualisierte Auflage, ISBN: 978-3-446-46293-9, 2020.

Schellnhuber, Hans Joachim: Selbstverbrennung – Die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff, C. Bertelsmann Verlag, 778 Seiten, ISBN: 978-3-570-10262-6, 2015.

Schönwiese, Christian-D.: Klima – Grundlagen, Änderungen, menschliche Eingriffe, B.I. Taschenbuch Verlag, 128 Seiten, ISBN: 3-411-10391-4, 1994.

Schönwiese, Christian-D.: Klimawandel kompakt – Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt, 3.Auflage, Bornträger (Herausgeber), 132 Seiten, ISBN: 978-3-443-01169, 2020.

Scorza, Cecilia, H. Lesch, M. Strähle, D. Sörgel: Der Klimawandel: verstehen und handeln – Ein interdisziplinäres Schulprojekt der Fakultät Physik – Mit Experimenten im Klimakoffer, 104 Seiten, https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf, Dezember 2020.

Sinn, Hans-Werner: Das grüne Paradoxon – Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik, Econ Verlag Berlin, 477 Seiten, ISBN: 978-3-430-20062-2, 2008.

Sommer, Jörg, und Michael Müller (Herausgeber): Unter 2 Grad? Was der Weltklimavertrag wirklich bringt, Hirzel Verlag, 320 Seiten, ISBN: 978-3-7776-2570-6, 2016.

Stocker, T.: Einführung in die Klimamodellierung, Vorlesungsskript Universität Bern, 146 Seiten, <https://climatehomes.unibe.ch/~stocker/papers/stocker08EKM.pdf>, 2008.

Thess, André D.: Sieben Energiewendemärchen? – Eine Vorlesungsreihe für Unzufriedene, Springer, 216 Seiten, ISBN: 978-3-662-61999-5, 2019.



16 Referenzen

- Abe-Ouchi et al., 2013: Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kawamura, K. et al. Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature* 500, 190–193 (2013).
<https://doi.org/10.1038/nature12374>, 2013.
- Anagnostou et al., 2020: Anagnostou, E., John, E.H., Babila, T.L. et al., Proxy evidence for state-dependence of climate sensitivity in the Eocene greenhouse. *Nat Commun* 11, 4436 (2020).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17887-x>, 2020.
- Archer, 2007: Archer, David: *Global Warming: understanding the forecast*, Blackwell Publishing, 197 Seiten, ISBN-10: 1-4051-4039-9, ISBN-13: 978-1-4051-4039-9, 2007.
- Bereiter et al., 2015: Bereiter, B., S. Eggleston, J. Schmitt, C. Nehrbass-Ahles, T. F. Stocker, H. Fischer, S. Kipfstuhl, and J. Chappellaz, Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 542–549, doi:10.1002/2014GL061957, <https://doi.org/10.1002/2014GL061957>, 2015.
- Bereiter et al., 2018: Bereiter, B., Shackleton, S., Baggenstos, D. et al. Mean global ocean temperatures during the last glacial transition. *Nature* 553, 39–44 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25152>, 2018.
- Canadell et al., 2021: Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press., 2021.
- Cazenave, A., et al.: Global sea-level budget 1993-present, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1551–1590, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>, pp. 40, 2018.
- Cess, R.D., et al.: Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.* 95, 601 – 616, 1990.
- Chen et al., 2021: Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, 2021: Framing, Context, and Methods. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen,



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - Handbuch

L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press, 2021.

Cronin, T. W., How well do we understand the Planck feedback?,
http://web.mit.edu/~twcronin/www/document/Cronin2020_PlanckQJ.pdf,
<https://agu.confex.com/agu/fm20/meetingapp.cgi/Paper/756253>, 2020.

Dommenget et al., 2011: Dommenget, D., J. Flöter, Conceptual understanding of climate change with a globally resolved energy balance model, *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-011-1026-0, pp. 23, 2011.

Foster et al., 2017: Foster, G., Royer, D. & Lunt, D., Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years., *Nat Commun* 8, 14845 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms14845>, 2017.

Foster, 2022: Professor Gavin Foster, Ocean and Earth Science, National Oceanography Centre Southampton, <https://www.southampton.ac.uk/oes/about/staff/ghf1u08.page>, personal communication, 2022.

Friedlingstein et al., 2020: Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H. C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P. M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R. A., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A. J. P., Sutton, A. J., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, X., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>, 2020.

Friedlingstein et al., 2021: Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T. T. T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djeutchouang, L., Dou, X., Evans, W., Feely, R. A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijkx, I. T., Jain, A. K., Jones, S. D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A. J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A., Willis, D., Wiltshire, A. J.,



Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., and Zeng, J.: Global Carbon Budget 2021, Earth Syst. Sci. Data Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>, in review, 2021.

Goddéris et al., 2014: Yves Goddéris, Yannick Donnadieu, Guillaume Le Hir, Vincent Lefebvre, Elise Nardin, The role of palaeogeography in the Phanerozoic history of atmospheric CO₂ and climate, Earth-Science Reviews, Volume 128, 2014, Pages 122-138, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.11.004>, 2014.

Hilton et al., 2020: Hilton, R.G., West, A.J. Mountains, erosion and the carbon cycle. Nat Rev Earth Environ 1, 284–299 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>, 2020.

Houghton, 2004: Houghton, John: Global warming – The complete briefing, 3rd edition, Cambridge University Press, 351 Seiten, ISBN: 0 521 52874 7 (paperback), 2004.

IPCC AR5 WG1 SPM: Summary for Policy Makers, International Panel on Climate Change, Assessment Report 5, Working Group 1, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf, 2013.

IPCC AR5 WG1: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>, 2013.

IPCC AR6 WG1: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>, 2021.

IPCC AR6 WG1 SPM: Summary for Policy Makers, International Panel on Climate Change, Assessment Report 6, Working Group 1, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf, 2021.

Khatiwala et al., 2019: Khatiwala, S., A. Schmittner, and J. Muglia: Air-sea disequilibrium enhances ocean carbon storage during glacial periods. Science Advances, 5(6), eaaw4981, doi:10.1126/sciadv.aaw4981, 2019.

Küchler et al., 2021: Küchler, T., Noël, S., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Wagner, T., Borger, C., Borsdorff, T., and Schneider, A.: Total water vapour columns derived from Sentinel 5p using the AMC-DOAS method, Atmos. Meas. Tech. Discuss., <https://doi.org/10.5194/amt-2021-144>, in review, 2021.

Latif 2020: Latif, Mojib, Heisszeit – Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten, Verlag Herder GmbH, 221 Seiten, ISBN Print 978-3-451-38684-8, 2020.

Mottram, R., S. B. Simonsen, S. H. Svendsen, V. R. Barletta, L. S. Sørensen, T. Nagler, J. Wuite, A. Groh, M. Horwath, J. Rosier, A. Solgaard, C. S. Hvidberg and R. Forsberg: An Integrated View of Greenland Ice Sheet



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - *Handbuch*

Mass Changes Based on Models and Satellite Observations, *Remote Sens.*, 11(12), 1407;
<https://doi.org/10.3390/rs11121407>, 2019.

Myhre et al., 2017: Myhre, G., Myhre, C., Forster, P. et al.: Halfway to doubling of CO₂ radiative forcing, *Nature Geosci* 10, 710–711, <https://doi.org/10.1038/ngeo3036>, 2017.

Paris Agreement: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

Pulliainen et al., 2020: Pulliainen, J., et al.: Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018, *Nature*, Vol 581, 21 May 2020, pp. 15, <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2258-0.pdf>, 2020.

Rahmstorf et al., 2019: Rahmstorf, S., A. Levermann, R. Winkelmann, J. Donges, L. Caesar, B. Sakschewski, K. Thonicke, Kippunkte im Klimasystem - Eine kurze Übersicht, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, im Juni 2019, <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kippunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>, 2019.

Raymo et al., 1992: Raymo, M., Ruddiman, W. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature* 359, 117–122 (1992). <https://doi.org/10.1038/359117a0>, 1992.

Reuter et al., 2020: Reuter, M., M. Buchwitz, O. Schneising, S. Noël, H. Bovensmann, J.P. Burrows, H. Boesch, A. Di Noia, J. Anand, R.J. Parker, P. Somkuti, L. Wu, O.P. Hasekamp, I. Aben, A. Kuze, H. Suto, K. Shiomi, Y. Yoshida, I. Morino, D. Crisp, C.W. O'Dell, J. Notholt, C. Petri, T. Warneke, V.A. Velazco, N.M. Deutscher, D.W.T. Griffith, R. Kivi, D.F. Pollard, F. Hase, R. Sussmann, Y.V. Té, K. Strong, S. Roche, M.K. Sha, M. De Mazière, D.G. Feist, L.T. Iraci, C.M. Roehl, C. Retscher, and D. Schepers: Ensemble-based satellite-derived carbon dioxide and methane column-averaged dry-air mole fraction data sets (2003-2018) for carbon and climate applications, *Atmos. Meas. Tech.*, <https://www.atmos-meas-tech.net/13/789/2020>, 2020.

Reuter et al., 2021: Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising-Weigel, O.: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) – ANNEX D for products XCO₂_EMMA, XCH₄_EMMA, XCO₂_OBS4MIPS, XCH₄_OBS4MIPS (v4.3, 01/2003-06/2020), C3S_312b_Lot2_DLR – Atmosphere, Date: 18/02/2021, Ref: C3S_D312b_Lot2.1.3.2-v3.0_ATBD-GHG_ANNEX-D_v5.0,

https://wdc.dlr.de/C3S_312b_Lot2/Documentation/GHG/ATBD/C3S_D312b_Lot2.1.3.2-v3.0_ATBD-GHG_ANNEX-D_v5.0.pdf, 2021.

Saunois et al., 2020: Saunois, M., A. R. Stavert, B. Poulter, P. Bousquet, J. G. Canadell, R. B. Jackson, P. A. Raymond, E. J. Dlugokencky, S. Houweling, P. K. Patra, P. Ciais, V. K. Arora, D. Bastviken, P. Bergamaschi, D. R. Blake, G. Brailsford, L. Bruhwiler, K. M. Carlson, M. Carrol, S. Castaldi, N. Chandra, C. Crevoisier, P. M. Crill, K. Covey, C. L. Curry, G. Etiope, C. Frankenberg, N. Gedney, M. I. Hegglin, L. Höglund-Isaksson, G. Hugelius, M. Ishizawa, A. Ito, G. Janssens-Maenhout, K. M. Jensen, F. Joos, T. Kleinen, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, G. G. Laruelle, L. Liu, To. Machida, S. Maksyutov, K.C. McDonald, J. McNorton, P. A. Miller, J. R.



Clim4Edu: Unterrichtsmaterialien für Schulen zum Thema Klimawandel unter Benutzung von Satellitendaten - **Handbuch**

Melton, I. Morino et al., 2020: Morino, J. Müller, Fa. Murgia-Flores, V. Naik, Y. Niwa, S. Noce, S. O'Doherty, R. J. Parker, C. Peng, S. Peng, G. P. Peters, C. Prigent, R. Prinn, M. Ramonet, P. Regnier, W. J. Riley, J. A. Rosentreter, A. Segers, I. J. Simpson, H. Shi, S. J. Smith, L. P. Steele, B. F. Thornton, H. Tian, Y. Tohjima, F. N. Tubiello, A. Tsuruta, N. Viovy, A. Voulgarakis, T. S. Weber, M. van Weele, G. R. van der Werf, R. F. Weiss, D. Worthy, D. Wunch, Y. Yin, Y. Yoshida, W. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhao, B. Zheng, Q. Zhu, Q. Zhu, and Q. Zhuang, The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>, 2020.

Schröder et al., 2019: Schröder, L., Horwath, M., Dietrich, R., Helm, V., van den Broeke, M. R., and Ligtenberg, S. R. M.: Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry, *The Cryosphere*, 13, 427–449, <https://doi.org/10.5194/tc-13-427-2019>, 2019.

Scorza et al., 2020: Scorza, Cecilia, H. Lesch, M. Strähle, D. Sörgel: Der Klimawandel: verstehen und handeln – Ein interdisziplinäres Schulprojekt der Fakultät Physik – Mit Experimenten im Klimakoffer, 104 Seiten, https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf, Dezember 2020.

Schönwiese, 2020: Schönwiese, Christian-D.: Klimawandel kompakt – Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt, 3. Auflage, Bornträger (Herausgeber), 132 Seiten, ISBN: 978-3-443-01169, 2020.

Stocker, T.: Einführung in die Klimamodellierung, Vorlesungsskript Universität Bern, 146 Seiten, <https://climatehomes.unibe.ch/~stocker/papers/stocker08EKM.pdf>, 2008.

Trenberth et al., 2009: Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., and Kiehl, J.: Earth's Global Energy Budget, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 311–323, <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>, 2009.

Walker et al., 1981: Walker, J. C. G., Hays, P. B., and Kasting, J. F., A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 86(C10), 9776– 9782, doi:10.1029/JC086iC10p09776 , 1981.



17 Danksagung

Dieses Dokument wäre ohne die finanzielle Unterstützung durch die deutsche Raumfahrtagentur DLR in Bonn nicht zustande gekommen. Wir bedanken uns daher sehr herzlich insbesondere bei Herrn Dr. Friker, welcher die Idee für dieses Projekt hatte.

Wir bedanken uns auch bei der Europäischen Raumfahrtagentur ESA und den vielen mit der ESA zusammenarbeitenden Forschungseinrichtungen für das umfangreiche Material, welche insbesondere über die Webseiten der ESA *Climate Change Initiative* (CCI) allen interessierten Nutzern – also auch uns – kostenlos zur Verfügung gestellt wurde.

Dank auch an alle Mitarbeiter des europäischen Copernicus Programms, insbesondere den Mitarbeitern des *Copernicus Climate Change Service* (C3S) und des *Copernicus Climate Data Stores* (CDS) für die kostenlose Bereitstellung umfangreicher klimarelevanter Datensätze, Abbildungen, etc.

Sehr nützlich waren für uns auch diverse Informationen und Datensätze, welche der Deutsche Wetterdienst (DWD) kostenlos über seine Webseiten allen interessierten Nutzern zur Verfügung stellt.



18 Anhang 1: IPCC AR6 WG1 Klimabericht: Weitere Informationen

Dieser Abschnitt enthält einige Zusatzinformationen bzgl. möglicher zukünftiger CO₂-Emissionszenarien und entsprechende Szenarien-abhängige Projektionen verschiedener Klimaparameter.

Hierzu werden 2 recht komplexe Originalgrafiken (auf Englisch) gezeigt. Dieser Abschnitt ist nicht erforderlich um andere Kapitel dieses Handbuchs zu verstehen und kann daher auch problemlos übersprungen werden.

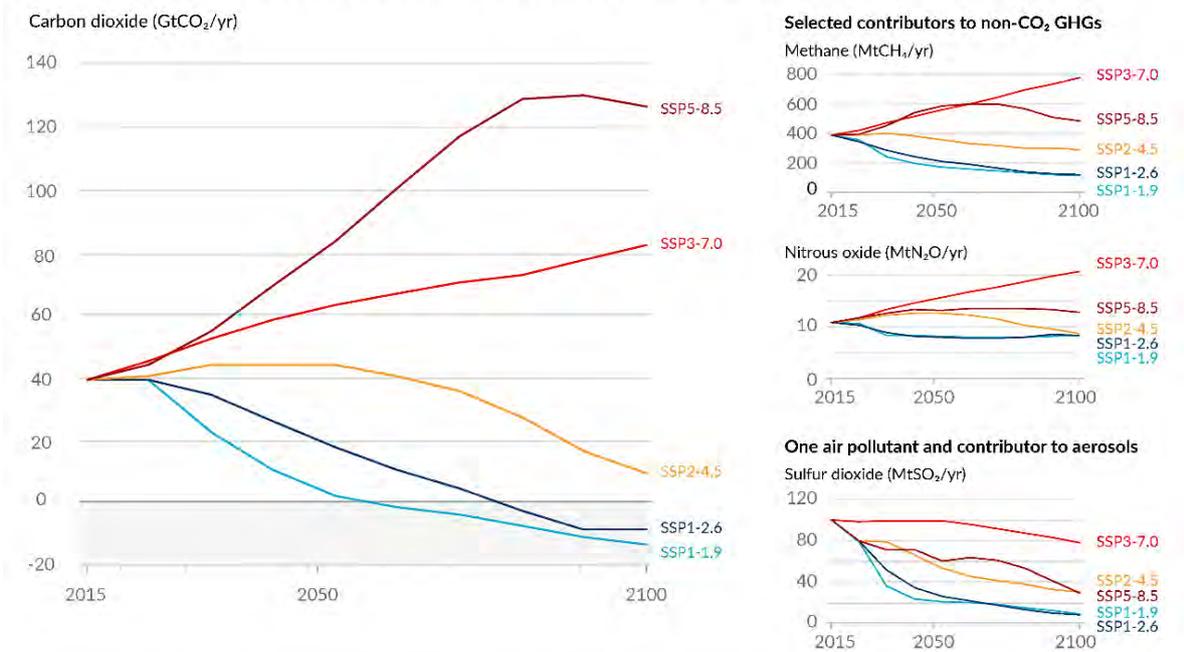
Die beiden Abbildungen sind dem 6ten Sachstandsberichts (*Sixth Assessment Report, AR6*) des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Arbeitsgruppe 1 (*Working Group 1, WG1*), mit dem Titel „*Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*“ entnommen. Sie entstammen der „*Summary for Policymaker*“ (*IPCC AR6 WG1 SPM*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf) dieses IPCC Berichts. Zusätzliche Informationen einschließlich des gesamten Berichts sowie weitere Berichte und Grafiken sind auf dieser Webseite zu finden: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.

Abbildung 98 zeigt unter anderem Zeitserien von möglichen zukünftigen CO₂-Emissionszenarien. Die gezeigten Zeitserien werden z.B. als Inputdaten für Klimasimulationen benötigt und verwendet. Sie werden mit SSP1 bis SSP5 bezeichnet gefolgt von einem Bindestrich und einer weiteren Zahl (z.B., 1.9 oder 8.5), welche den entsprechenden „Klimaantrieb“ (*radiative forcing*) im Jahre 2100 angibt. Je höher der Klimaantrieb, je wärmer wird es aller Wahrscheinlichkeit nach werden. Aufgrund der Komplexität des Klimasystems mit diversen positiven und negativen Rückkopplungen (*feedbacks*) kann man jedoch nicht exakt voraussagen, wie warm es im Jahre 2100 bei gegebenem Klimaantrieb sein wird. Um eine sehr grobe Schätzung für die erwartete Erwärmung in Grad Celsius zu erhalten, kann man den in W/m² angegebenen Wert für den Klimaantrieb durch 2 teilen, d.h. 8.5 W/m² entspricht in etwa einer Erwärmung von 4-5 Grad Celsius (siehe Abbildung 98 b sowie Abbildung 99 a).

Abbildung 99 zeigt Szenarien-abhängige Projektionen verschiedener Klimaparameter wie z.B. der globalen Bodentemperatur, der Fläche des arktischen Meereises, des Säuregehalts der Ozeane und des Meeresspiegels.

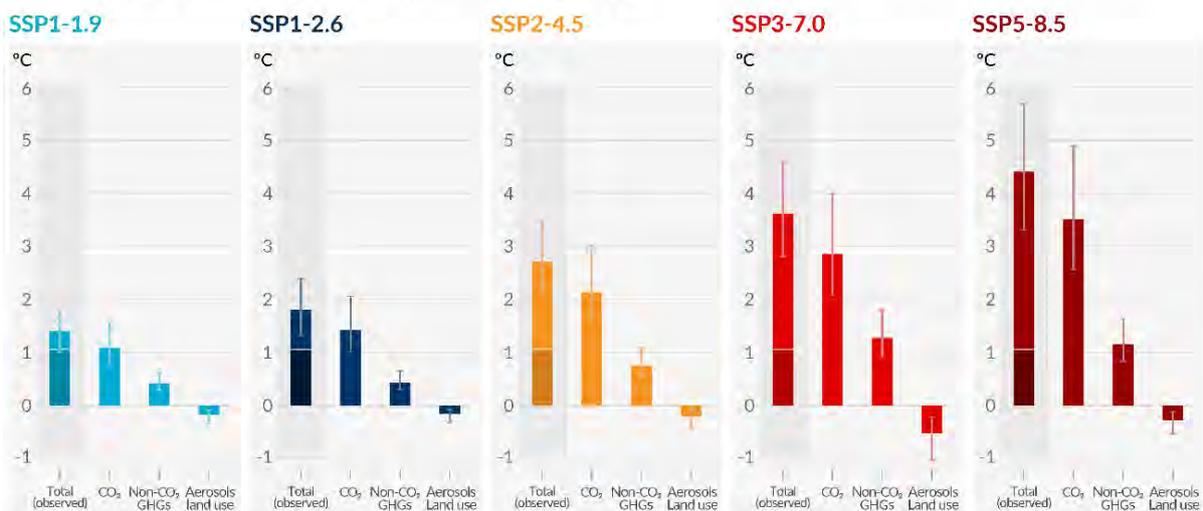
Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions

a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios



b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081-2100 relative to 1850-1900 (°C)



Total warming (observed warming to date in darker shade), warming from CO₂, warming from non-CO₂ GHGs and cooling from changes in aerosols and land use

Abbildung 98: Emissionsszenarien und entsprechende Temperaturänderungen (Quelle: IPCC AR6 WG1 SPM, Abb. SPM.4).

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

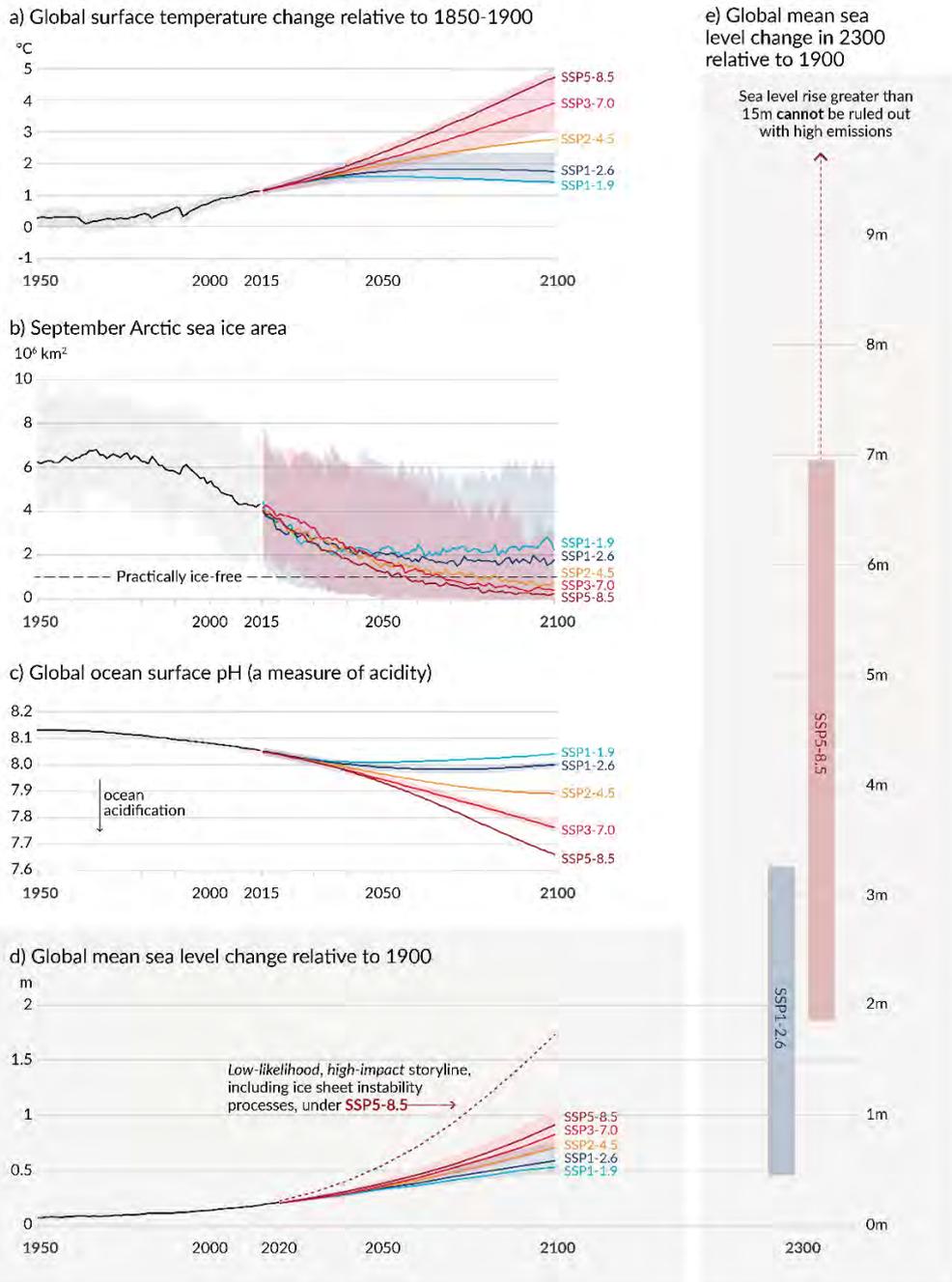


Abbildung 99: Szenarien-abhängige Projektionen verschiedener Klimaparameter (Quelle: IPCC AR6 WG1 SPM, Abb. SPM.8).



19 Anhang 2: Kohlenstoffzyklus: Global Carbon Project (GCP)

Für diesen Abschnitt wurden weitere Informationen zur Vertiefung des Verständnisses des globalen Kohlenstoffzyklus zusammengestellt. Diese Informationen entstammen dem Informationsmaterial des *Global Carbon Project* (GCP, <https://www.globalcarbonproject.org/>), welches regelmäßig aktualisierte Abbildungen u.a. zum globalen Kohlenstoffbudget erzeugt und bereitstellt. Wer also am aktuellen Stand interessiert ist, der sollte die Website des GCP (<https://www.globalcarbonproject.org/>) besuchen, auf der neueste Versionen der Grafiken und eine Vielzahl weiterer Informationen zu finden sind.

Die nachfolgenden Abbildungen sind dem Informationsmaterial des GCP entnommen (Quelle: https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pptx). Sie liefern Informationen zu den Quellen und Senken von CO₂, insbesondere zeigen die Zeitserien die Jahr-zu-Jahr Schwankungen dieser Größen und den längerfristigen Trend. Die Abbildungen entsprechen (bis auf die sprachliche Anpassung) den Originalabbildungen des GCP. Weitere Informationen finden sich auch in der entsprechenden GCP Publikation: *Friedlingstein et al., 2021* (<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2021-386/essd-2021-386.pdf>).

Abbildung 100 zeigt einen Überblick über die von uns Menschen verursachten Störungen des globalen Kohlenstoffkreislauf in der Dekade 2011-2020. „Anthropogene Flüsse“ (*anthropogenic fluxes*) entspricht hier den von uns Menschen emittierten CO₂-Mengen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe („Fossiles CO₂“) und durch Landnutzung. Unter „Flüsse“ sind hier die CO₂-Austauschflüsse zwischen der Atmosphäre und anderen Komponenten des Klimasystems (Vegetation, Ozeane, ...) zu verstehen. Diese können in beide Richtungen verlaufen, also zum Beispiel auch von der Atmosphäre zur Biosphäre, da Pflanzen mittels Photosynthese große Mengen CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Unter CO₂-Emissionen versteht man hier CO₂-Flüsse in die Atmosphäre.

Was mit dem emittierten CO₂ passiert, ist auch in Abbildung 101 gezeigt. Wie man sieht, verbleiben nur etwa die Hälfte unserer CO₂-Emissionen in der Atmosphäre; die verbleibenden etwa 50% werden von der Landbiosphäre und den Ozeanen aufgenommen, den beiden sogenannten natürlichen CO₂-Senken. In den Ozeanen führt die CO₂-Aufnahme zu einer Versauerung des Wasser. Die genauen Werte der (absoluten und der prozentualen) Aufteilung der emittierten CO₂-Menge zwischen Atmosphäre, Landbiosphäre und den Ozeanen schwankt (quasi wetterbedingt) von Jahr zu Jahr wie in den Abbildung 102 und Abbildung 103 zu sehen.

Abbildung 104 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Quellen (links) und Senken (rechts), welche seit dem Jahre 1850 zu einer Veränderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration beigetragen haben.

Anthropogene Störungen des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs 2011-2020:

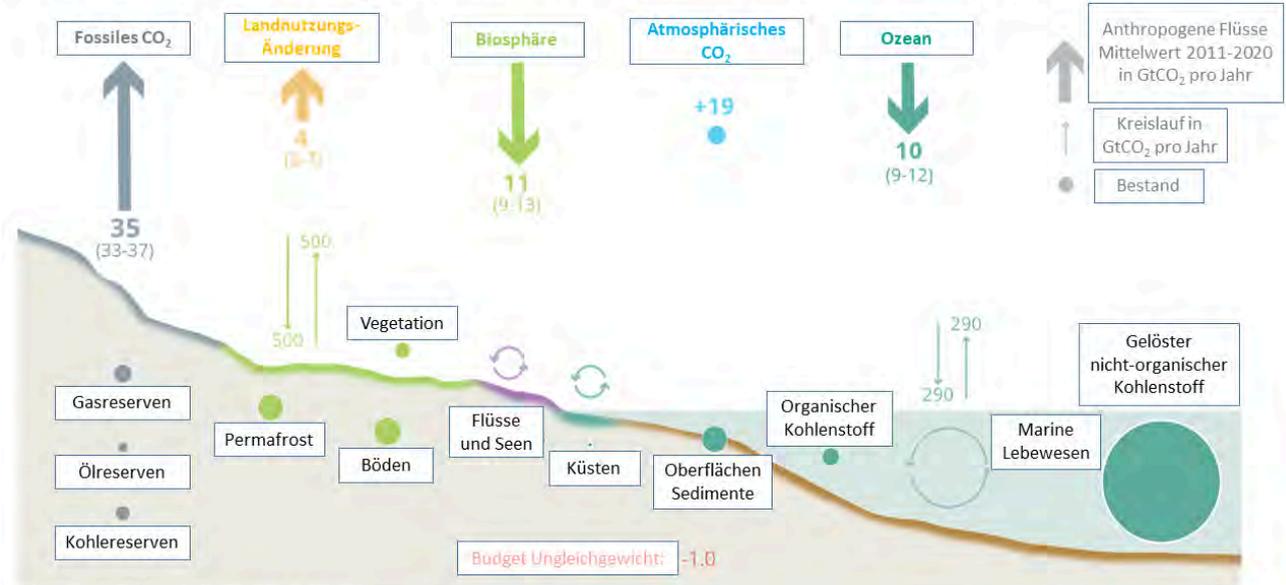


Abbildung 100: Anthropogene Störung des globalen Kohlenstoffzyklus für die Dekade 2011-2020 in GtCO₂/Jahr.

CO₂ Quellen und Senken 2011-2020:

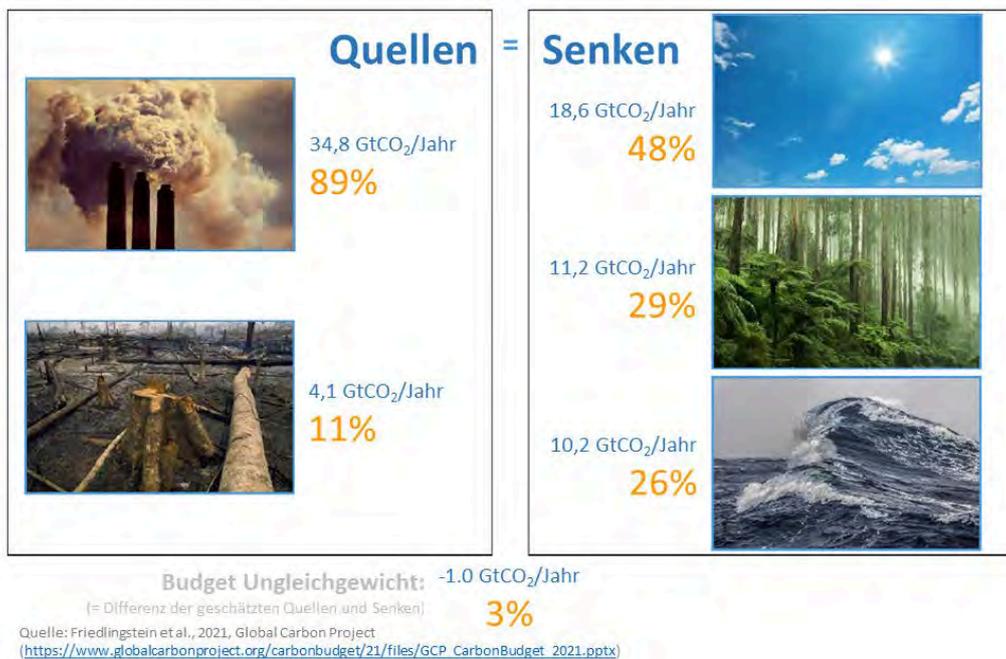


Abbildung 101: CO₂ Quellen (links) und Senken (rechts) in der Dekade 2011-2020.

CO₂ Quellen und Senken seit 1960:

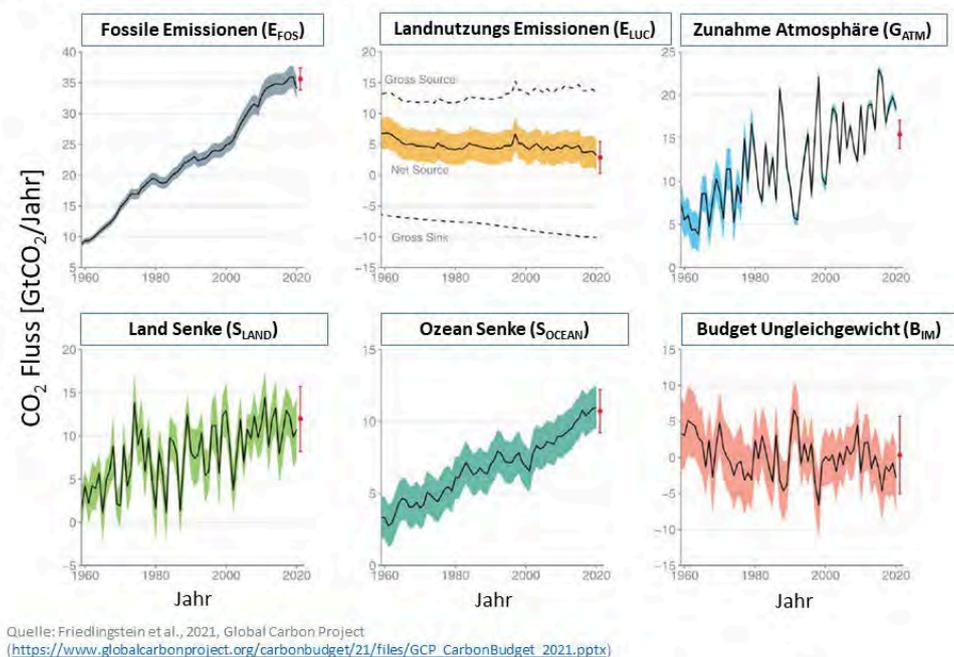


Abbildung 102: Zeitserien der verschiedenen CO₂ Quellen und Senken seit 1960.

CO₂ Quellen und Senken seit 1850:

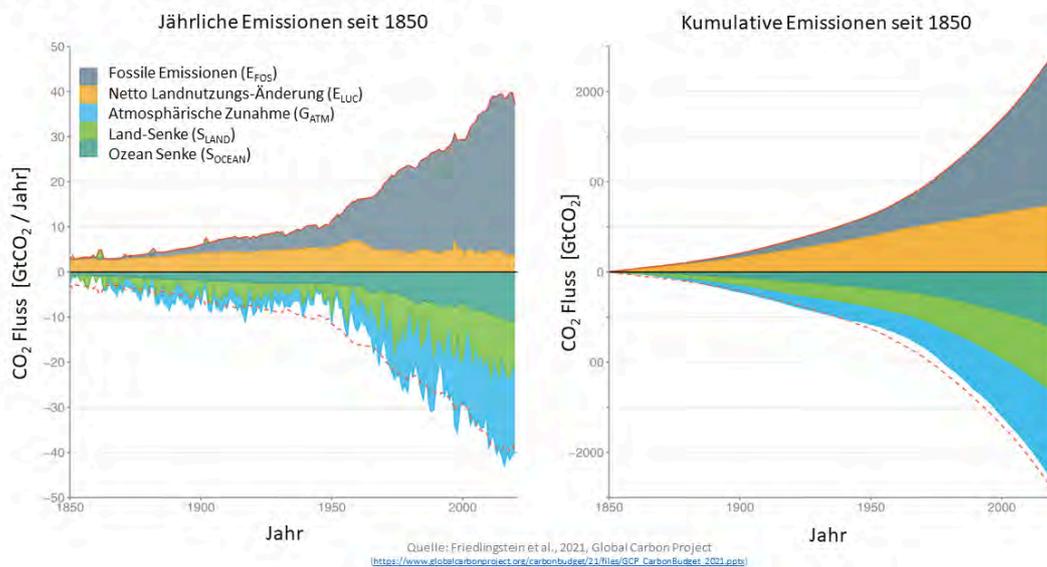
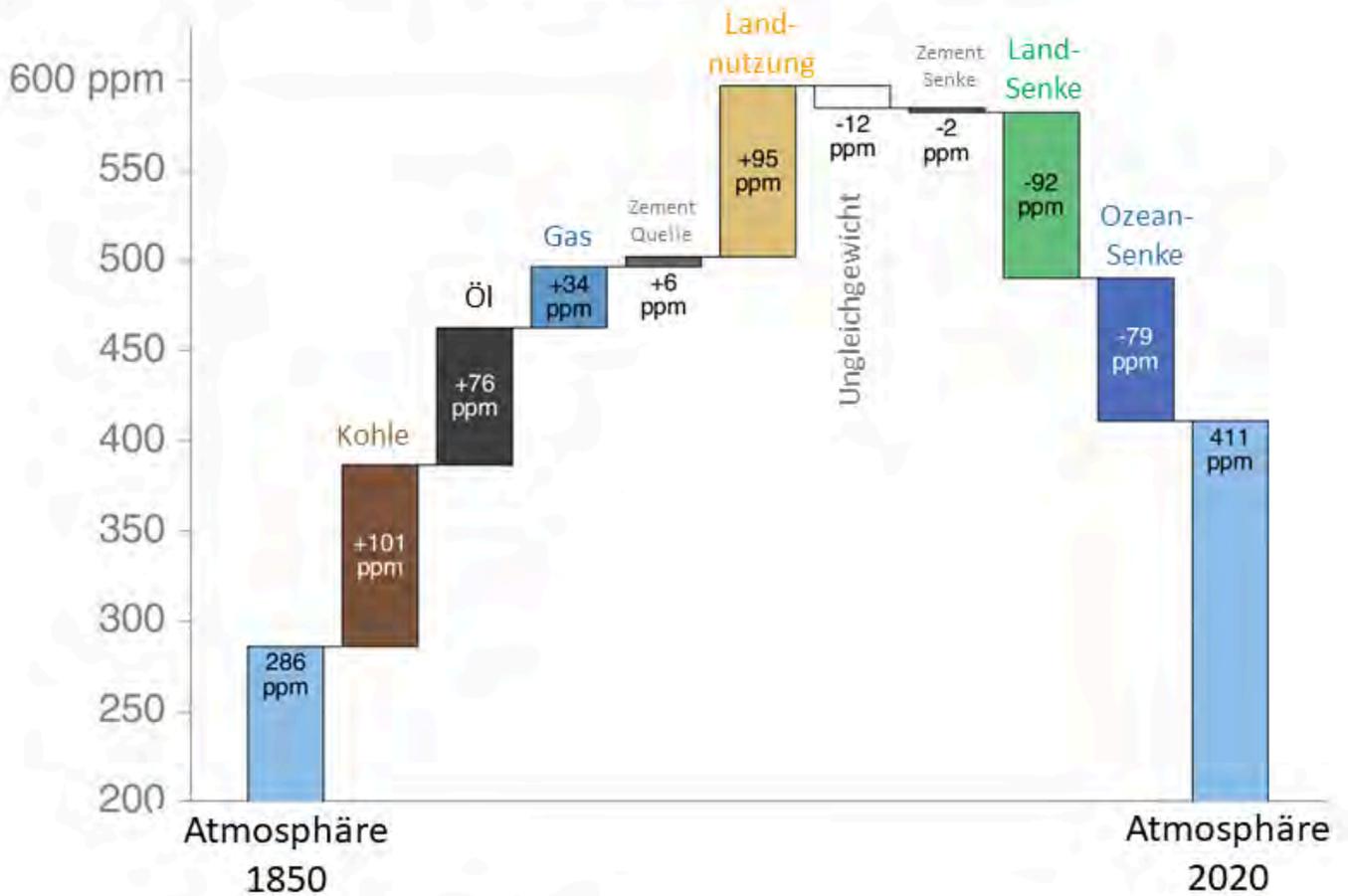


Abbildung 103: Zeitserien der CO₂ Quellen und Senken seit 1850. Links: Die CO₂-Emissionen (positive Zahlen) und Stärke der Senken (negative Zahlen) pro Jahr. Rechts dargestellt sind die kumulativen CO₂-Flüsse, also die über alle Jahre bis zum angegebenen Jahr summierten (integrierten) CO₂-Flüsse.

CO₂ Quellen und Senken seit 1850:



© Global Carbon Project

Quelle: Friedlingstein et al., 2021, Global Carbon Project
(https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pptx)

Abbildung 104: Beiträge zur Änderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration (in ppm) seit 1850. Von links aufsteigend die CO₂-Emissionen (Quellen) und rechts absteigen die CO₂-Senken.