

Kapitel 4

Der anthropogene Klimawandel

4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt

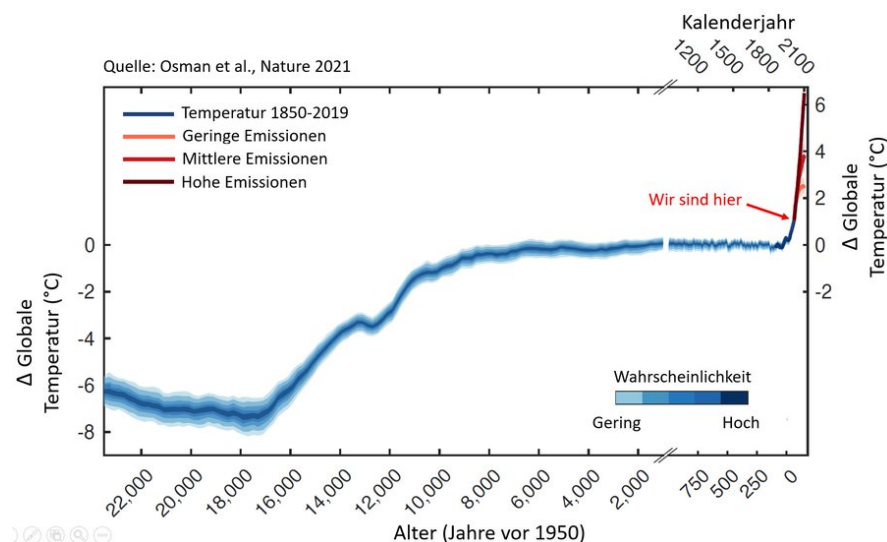


Abbildung 30 – Die Grafik zeigt den globalen Temperaturverlauf seit der letzten Eiszeit, mit Zukunftsszenarien. Die letzten 2000 Jahre sind höher aufgelöst (Quelle: Osman et al., Nature 2021).

Die Erde ist vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstanden. In dieser langen Zeit gab es immer wieder Klimaschwankungen und große Veränderungen auf dem Planeten. Seit dem Beginn des Holozäns vor rund 12.000 Jahren und damit seit der letzten Eiszeit, ist unser Klima, verglichen mit früheren Zeitabschnitten, relativ stabil (siehe Abbildung 30). Seit 1980 aber ist ein signifikanter Anstieg der mittleren Atmosphärentemperatur zu beobachten.

Heute herrscht in der Klimaforschung der Konsens, dass der aktuelle Klimawandel ohne die Aktivitäten des Menschen nicht zu erklären ist:

„Unter denen, die die Nuancen und die wissenschaftlichen Grundlagen von langjährigen Klimaprozessen verstehen, gibt es anscheinend so gut wie keine Debatte über die Tatsache der Erderwärmung und die Rolle der menschlichen Aktivitäten dabei. Die Herausforderung scheint eher zu sein, wie diese Tatsache wirksam an Politiker und die Allgemeinheit vermittelt werden kann, die fälschlicherweise von einer Debatte unter Wissenschaftlern ausgehen.“

Zitat aus einer Studie in der die Übereinstimmung unter Geowissenschaftlern zur Frage „Meinen Sie, dass menschliche Aktivitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung der durchschnittlichen globalen Temperaturen haben?“ untersucht wurde. [6]

Dabei spielt insbesondere Kohlenstoffdioxid eine ausschlaggebende Rolle für den anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt [7]. Über Jahrtausende war der CO₂-Gehalt in der Erdatmosphäre stets unterhalb der 300 ppm⁹ Marke (siehe Abbildung 31). Seit der industriellen Revolution um 1800 jedoch nimmt die Konzentration von etwa 280 ppm um mehr als 40 %, auf heute über 400 ppm, schnell zu und liegt heute höher als zu irgendeinem Zeitpunkt in den letzten 400.000 Jahren¹⁰.

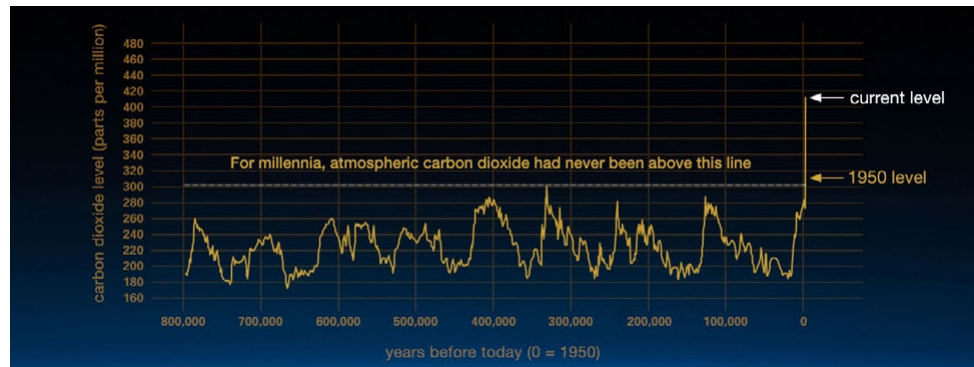


Abbildung 31 – Diagramm zur CO₂-Konzentration in der Atmosphäre mit Daten aus aktuellen Messwerten und Rekonstruktionen mittels Eisbohrkernen (Quelle: NASA – Global Climate Change; climate.nasa.gov/evidence/ aufgerufen am 20.01.2019)

Der Hauptgrund hierfür ist, dass der Mensch zur Erzeugung nutzbarer Energie kohlenstoffhaltige fossile Brennstoffe verbrennt und dabei unter Sauerstoffzufuhr Kohlenstoffdioxid freisetzt. Zunächst geschah dies hauptsächlich in Europa und Nordamerika, später auch in Russland, China, Indien und Brasilien. In den letzten vier Generationen stieg der jährliche Ausstoß von CO₂ von 2 Gigatonnen (1900) auf den mit 37,1 Gigatonnen im Jahr 2017 bis dahin größten jemals gemessenen Wert [8].

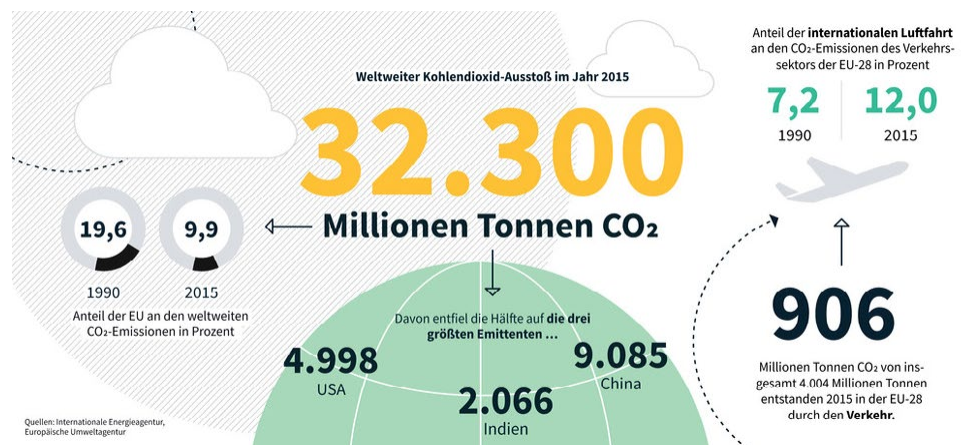


Abbildung 32 – Weltweiter Kohlenstoffdioxid-Ausstoß im Jahr 2015 (Credits: Internationale Energieagentur, Europäische Umweltagentur)

- 9 ppm steht für parts per million, also die Anzahl an CO₂-Molekülen pro eine Million Moleküle trockener Luft.
- 10 Woher kann man das wissen? Aus dem hunderttausende Jahre alten Eis der Antarktis wurden Bohrkern aus einer Tiefe von mehr als 3 km entnommen. Aus den darin enthaltenen Luftblasen lassen sich Rückschlüsse über die Zusammensetzung der Atmosphäre in verschiedenen Zeitaltern der Erdgeschichte ziehen.

Abbildung 33 zeigt den globalen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in den letzten rund 150 Jahren. Dem von Skeptikern des anthropogenen Klimawandels oft vorgebrachten Einwand, die Schwankungen der Sonnenflecken, mit ihren erhöhten Strahlungswerten, wären für den messbaren Temperaturanstieg der letzten vier Jahrzehnte verantwortlich, kann eindeutig widersprochen werden. Die Sonnenaktivität sinkt, während die Temperatur und der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre steigen. Sonnenaktivität und globale Erwärmung sind entkoppelt, sie entwickeln sich sogar gegenteilig.

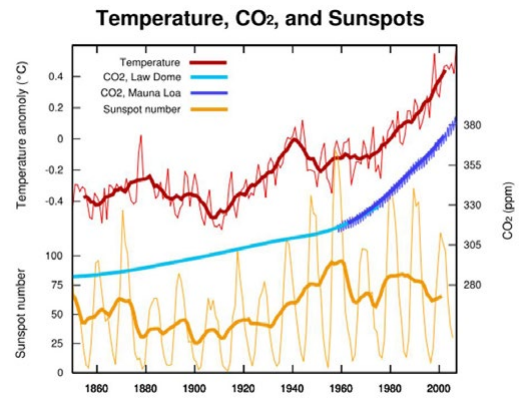


Abbildung 33 – Temperatur und CO₂-Anstieg (Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Temp-sunspot-co2.svg>, aufgerufen am 01.07.2021)

Eine entscheidende Rolle für den verstärkten Treibhauseffekt spielt auch *Methan* (CH₄), welches im Vergleich zu CO₂ als Treibhausgas um einen Faktor von ca. 28 bis 72 wirksamer ist, wenn man die Wirkung für die nächsten 100 bzw. 20 Jahre betrachtet.¹¹ Seit der industriellen Revolution steigerte sich die Methankonzentration in der Erdatmosphäre von rund 700 ppb¹² auf heute über 1800 ppb [9]. Die weltweite Emission von Methan ist zu 37 % direkt oder indirekt auf Viehhaltung zurückzuführen [10] und heute trägt Methan mit etwa 16 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei [11]. Dieser Wert könnte durch das Auftauen des Permafrostbodens in Sibirien und Kanada (siehe „Wasserdampf und Rückkopplungseffekte“ unten) bald stark ansteigen. Methan ist ein kurzlebiger Treibhausgas. Der größte Teil davon oxidiert in der Atmosphäre innerhalb eines Jahrzehnts zu Kohlenstoffdioxid, welches dann die Atmosphäre über einen Zeitraum von Jahrtausenden zusätzlich erwärmt.

Ein weiteres Treibhausgas ist *Distickstoffmonoxid* (N₂O, Lachgas), welches ein ca. 265-mal höheres Treibhauspotential hat als Kohlenstoffdioxid. In der Erdatmosphäre ist die Konzentration dieses Gases seit der industriellen Revolution um ca. 20 % angestiegen und trägt heute mit ca. 6 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei [11]. Die Emission von N₂O erfolgt sowohl auf natürlichem, wie auch auf vom Menschen beeinflusstem Wege: In der Natur wird N₂O von Bakterien im Boden und in Gewässern und Urwäldern freigesetzt. Der Mensch trägt allerdings mit dem Einsatz von Düngemitteln auf Stickstoffbasis, der Industrieproduktion von Chemikalien und dem Verbrennen fossiler Brennstoffe zur erhöhten Freisetzung dieses Treibhausgases bei.

11 Um die Klimaschädlichkeit ausgestoßener Treibhausgase über eine gewisse Zeitdauer vergleichen zu können, ordnet man ihnen jeweils ein CO₂-Äquivalent (CO₂e), auch Treibhausgaspotenzial genannt, zu. Normalerweise geht man von einem Zeitraum von 100 Jahren aus, dann beträgt dieser Faktor für Methan 28. Geht man hingegen von einem Zeitraum von 20 Jahren aus, also einem Zeitraum, in dem wir das Klima noch vor dem Kippen bewahren können, hat Methan das 72-fache Wirkungspotenzial verglichen mit CO₂ [43].

12 ppb steht für parts per billion, also Teile pro eine Milliarde Moleküle trockener Luft.

Des Weiteren spielen *fluorierte Treibhausgase* eine Rolle. Anders als die oben genannten Gase entstehen sie nicht bei natürlichen Vorgängen, sondern wurden eigens für die Industrie entwickelt. Obwohl ihr Anteil am gesamten Ausstoß von Treibhausgasen der Industrienationen sehr gering ist, sind ihre Auswirkungen durch die lange Verweildauer in der Atmosphäre (u.U. einige tausend Jahre) und ihrer Effektivität als Treibhausgas pro Molekül (12.000- bis 25.000-mal stärker als die von CO₂) nicht zu unterschätzen.

Aktivität 12

4.2. Rückkopplungsprozesse

Aus der Erhöhung der globalen Temperatur und der Veränderung des Klimas resultieren Effekte, die selbst wiederum zur Verstärkung ihrer Ursache beitragen, also zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur führen können. Man spricht von Rückkopplungsprozessen. Diese stellen den eigentlichen „Knackpunkt“ des Klimawandels dar. Es geschieht etwas und das Klimasystem reagiert darauf mit Veränderungen. Die natürlichen Vorgänge im Wechselspiel der Atmosphäre, der Meere und Ozeane, der Eismassen und der Biosphäre vollzogen sich schon immer, auch in Zeiten als es noch keine Menschen gab. In Abhängigkeit von der Landmassenverteilung, Vulkanismus und verschiedener astronomischer Parameter, änderte sich das Klima ständig – der Wandel des Klimas ist also völlig natürlich. In den letzten Jahrzehnten wurde allerdings die Konzentration an Molekülen mit der Fähigkeit Wärmestrahlung zu absorbieren durch anthropogene Einflüsse drastisch erhöht. Mitten hinein in ein vernetztes, vielschichtiges und deshalb komplexes natürliches Geschehen verändert der Mensch die Rand- und Anfangsbedingungen der Atmosphäre durch den Abbau fossiler Ressourcen. Kohlenstoff, der vor hunderten von Millionen Jahren tief im Boden gebunden war, wird durch Kohleabbau, Öl- und Gasförderung zunächst an die Erdoberfläche und durch Verbrennungsprozesse schließlich in die Atmosphäre gebracht. Auf diese allmähliche Veränderung reagieren alle natürlichen Systeme durch Rückkopplungen, und zwar ganz natürlich.

Beispiele für solche Rückkopplungen sind:

WASSERDAMPF IN DER ATMOSPHÄRE

Wasserdampf ist das stärkste natürliche Treibhausgas. Er hat jedoch nur eine sehr kurze Verweildauer in der Erdatmosphäre, hält sich dort meist nur einige Tage und kehrt dann als Regen zurück auf die Erde. Im Gegensatz zu CO₂ stellt Wasserdampf keine direkte Ursache für die vom Menschen verursachte Verstärkung des Treibhauseffekts dar – der anthropogene Treibhauseffekt kommt schließlich nicht durch den vermehrten Ausstoß von Wasserdampf zustande. Allerdings verdunstet aufgrund der globalen Erwärmung mehr Wasser und je heißer es wird, desto höher ist

die Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf in der Luft.¹³ Eine erhöhte Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre verstärkt den Treibhauseffekt, was wiederum zu höherer Erderwärmung führt und so weiter [7].

VERRINGERTE ALBEDO

Die globale Erwärmung führt zum Abschmelzen von Eisflächen auf der Erdoberfläche, zum Beispiel im arktischen Ozean. Das Sonnenlicht wird nicht mehr vom glitzernden Schnee ins Weltall zurückgeworfen, sondern verliert sich in den Tiefen des Polarmeers bzw. erwärmt den freigelegten dunklen Untergrund. Die Energie heizt das Wasser bzw. den Boden auf und bleibt im Erdsystem, wodurch die globale Erwärmung weiter vorangetrieben wird [12].

ABSCHMELZEN DES GRÖNLÄNDISCHEN EISPANZERS

In den letzten Jahren hat der Eisverlust in Grönland durch ins Meer fließende Gletscher und verstärktes Abschmelzen im Sommer stark zugenommen. Der stellenweise drei Kilometer starke Eisschild verliert dadurch langfristig an Höhe. Seine Oberfläche, die sich jetzt noch in hohen und damit kalten Luftschichten befindet, sinkt und wird somit wärmeren Temperaturen ausgesetzt. Das wiederum verstärkt das Abschmelzen weiter. Außerdem beschleunigt das vermehrte Schmelzwasser an der Gletschersohle wie ein Schmierfilm das Abgleiten der Eismassen ins Meer. Der völlige Kollaps des Grönländischen Eisschildes würde über Jahrhunderte bis Jahrtausende einen Meeresspiegelanstieg von 7 Metern verursachen und natürlich auch zu einer Verringerung der Albedo beitragen (vgl. [13]).

VERSTEPPUNG DES AMAZONAS-REGENWALDES

Der Regenwald ist auf riesige Mengen Wasser angewiesen, die verdunsten. Ein Großteil der Niederschläge im Amazonasbecken stammt aus über dem Wald wieder kondensierendem Wasser. Der Rückgang der Niederschläge in einem wärmeren Erdklima einerseits oder die Rodung des Waldes andererseits könnten diesen Kreislauf an eine kritische Grenze bringen: Je weniger Waldflächen Wasser verdunsten, desto trockener wird die Region und desto weniger Wasser steht dem Wald zur Verfügung. Eine Umwandlung des Amazonas-Regenwaldes in einen an die Trockenheit angepassten saisonalen Wald oder eine Graslandschaft hätte außerdem grundlegende Auswirkungen auf das Erdklima: Immerhin etwa ein Viertel des weltweiten Kohlenstoff-Austausches zwischen Atmosphäre und Biosphäre findet hier statt. Bei einem Verlust würden gigantische Mengen an bisher gebundenem Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt, das als Treibhausgas die Klimaerwärmung weiter antreiben würde (vgl. [14]).

¹³ Dieser Effekt ist z. B. im Winter an schlecht isolierten Fensterscheiben zu beobachten. Da die warme und relativ feuchte Raumluft in Fensternähe abkühlt, sinkt ihre Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf und das Wasser kondensiert an der Glasscheibe.

RÜCKGANG DER NORDISCHEN NADELWÄLDER

Die nordischen Nadelwälder umfassen fast ein Drittel der weltweiten Waldfläche. Mit dem Klimawandel erhöht sich bereits jetzt der auf sie wirkende Stress durch Pflanzenschädlinge, Feuer und Stürme deutlich. Zugleich beeinträchtigen Wassermangel, erhöhte Verdunstung und menschliche Nutzung die Regeneration der Wälder. Wenn die Belastung charakteristische Schwellenwerte überschreitet, könnten sie von Busch- und Graslandschaften verdrängt werden. Das Verschwinden der Wälder würde nicht nur den Lebensraum vieler Tiere und Pflanzen vernichten, sondern auch eine massive Freisetzung von Kohlenstoffdioxid bedeuten, welche zur beschleunigten Erderwärmung beitragen kann (vgl. [12]).

TAUENDER PERMAFROST

Im sibirischen und kanadischen Permafrostboden sind in Tiefen von mehr als drei Metern vermutlich mehrere hundert Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Sie stammen aus organischem Material, das während und seit der letzten Eiszeit hier eingelagert wurde. Erwärmt sich der Permafrost, so setzt er riesige Mengen an Kohlenstoffdioxid und Methan, also Treibhausgasen, in die Atmosphäre frei (vgl. [12]).

ABSCHWÄCHUNG DER MARINEN BIOLOGISCHEN KOHLENSTOFFPUMPE

Die Weltmeere nehmen riesige Mengen an Kohlenstoff auf – rund 40 % der bisherigen anthropogenen CO₂-Emissionen wurden so der Atmosphäre wieder entzogen. Einen großen Teil davon nutzen Algen zum Wachstum. Sie sinken nach dem Absterben in die Tiefsee und speichern auf diese Weise den Kohlenstoff. Diese Funktion könnte durch Erwärmung und Versauerung des Wassers sowie häufiger auftretende Sauerstoffarmut eingeschränkt werden, sodass mehr CO₂ in der Atmosphäre verbleibt (vgl. [15]).

Aktivität 10

ABNAHME DER AUFNAHMEFÄHIGKEIT VON CO₂ IM MEERWASSER

Die Temperatur der Ozeane steigt durch die globale Erwärmung. Da aber die Aufnahmefähigkeit des Wassers für Kohlenstoffdioxid mit zunehmender Wassertemperatur sinkt, erhöht sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (vgl. [16]).

4.3. Kippunkte

Der Klimawandel hat also Prozesse zur Folge, die selbstverstärkend wirken. Diese Rückkopplungsprozesse treten ein, wenn bestimmte Temperaturen überschritten werden. An diesen Schwellen können kleine Veränderungen das Erdsystem in einen qualitativ neuen Zustand übergehen lassen. Man spricht von einem Kippunkt. „Kippen“ bedeutet, dass diese Veränderungen eine Dynamik entwickeln, die nicht mehr aufzuhalten also irreversibel ist. Das Phänomen solcher Kippprozesse spielt auch für manche Rückkopplungseffekte eine Rolle, wenn man diese isoliert betrachtet. Das bedeutet, dass eine fortschreitende Temperaturerhöhung zu einer Kaskade sich gegenseitig auslösender Kippunkte führen kann („Dominoeffekt“). Abbildung 34 zeigt einige dieser Kippunkte.

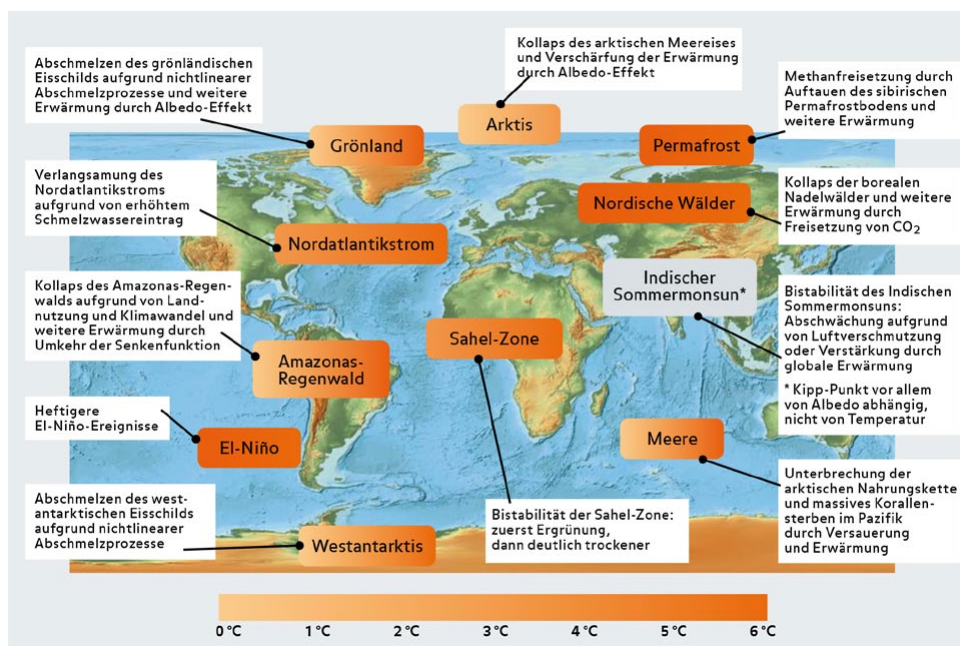


Abbildung 34 – Kippelemente des Klimasystems (Credits: Globaler Klimawandel, Germanwatch verändert nach Lenton et al.)