

# Kapitel 4

## Der anthropogene Klimawandel

### 4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt

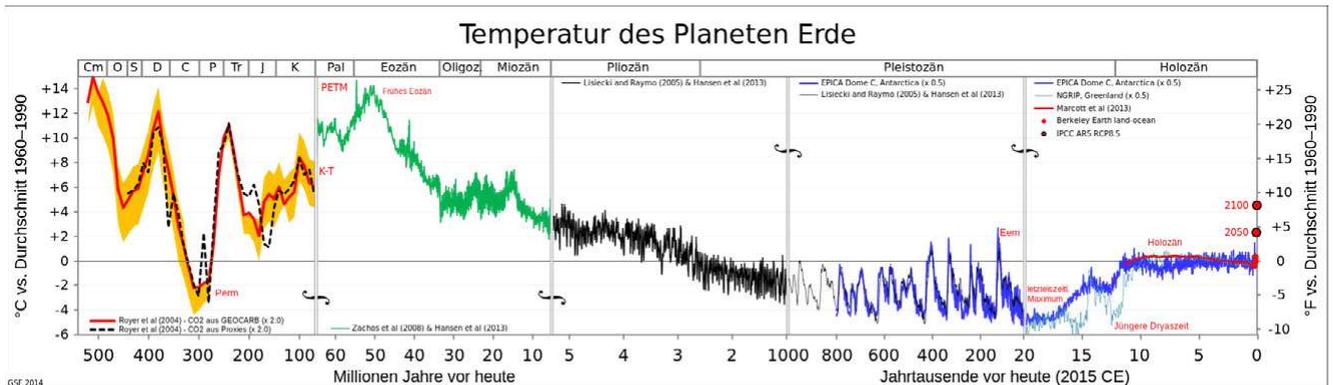


Abbildung 30 – Die globalen Oberflächentemperaturen der letzten 540 Mio. Jahre, ermittelt durch zugrunde liegende Messungen und errechnete Temperaturen für 2050 und 2100 aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (Quelle: Glen Forgas, palaeotemps G2)

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 CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Erdatmosphäre stets unterhalb der 300 ppm<sup>9</sup> 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 Jahren<sup>10</sup>.

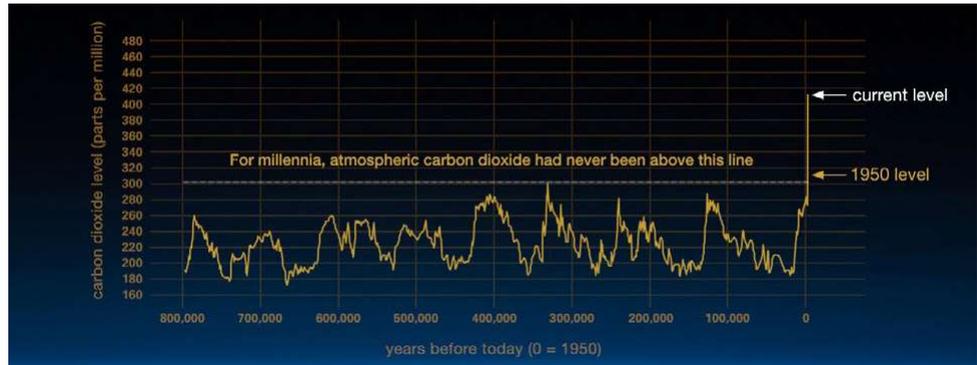


Abbildung 31 – Diagramm zur CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre mit Daten aus aktuellen Messwerten und Rekonstruktionen mittels Eisbohrkernen (Quelle: NASA – Global Climate Change; climate.nasa.gov/evidence/ aufgerufen am 20.01.2019)

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 CO<sub>2</sub> von 2 Gigatonnen (1900) auf den mit 37,1 Gigatonnen im Jahr 2017 bis dahin größten jemals gemessenen Wert [8].

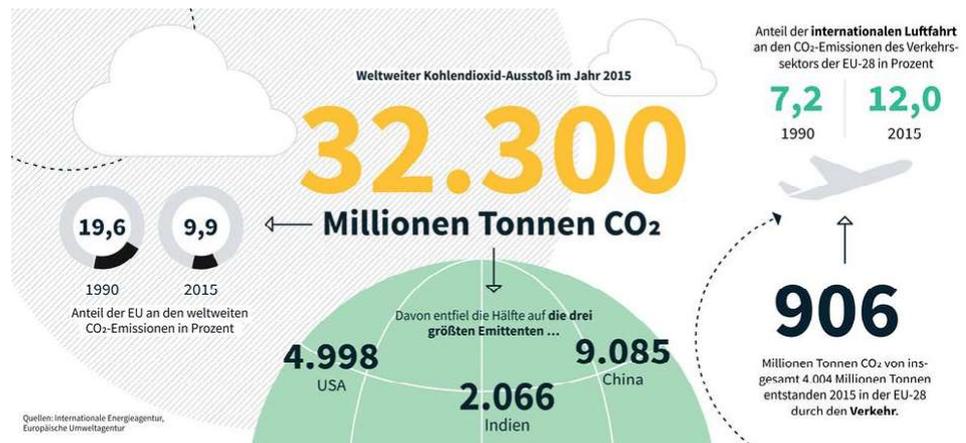


Abbildung 32 – Weltweiter Kohlenstoffdioxid-Ausstoß im Jahr 2015 (Credits: Internationale Energieagentur, Europäische Umweltagentur)

- 9 ppm steht für parts per million, also die Anzahl an CO<sub>2</sub>-Molekülen pro eine Million Moleküle trockener Luft.
- 10 Woher kann man das wissen? Aus dem hunderttausende Jahre alten Eis der Antarktis wurden Bohrkerne 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.

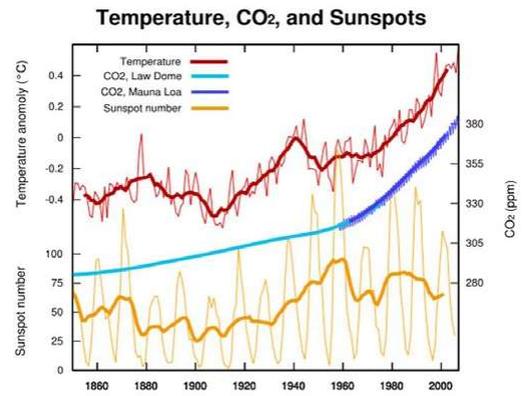


Abbildung 33 – Temperatur und CO<sub>2</sub>-Anstieg (Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Temp-sunspot-co2.svg>, aufgerufen am 01.07.2021)

Eine entscheidende Rolle für den verstärkten Treibhauseffekt spielt auch *Methan* (CH<sub>4</sub>), welches im Vergleich zu CO<sub>2</sub> als Treibhausgas um einen Faktor von ca. 28 bis 72 wirksamer ist, wenn man die Wirkung für die nächsten 100 bzw. 20 Jahre betrachtet.<sup>11</sup> Seit der industriellen Revolution steigerte sich die Methankonzentration in der Erdatmosphäre von rund 700 ppb<sup>12</sup> 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* (N<sub>2</sub>O, 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 N<sub>2</sub>O erfolgt sowohl auf natürlichem, wie auch auf vom Menschen beeinflusstem Wege: In der Natur wird N<sub>2</sub>O 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 CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>e), 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 CO<sub>2</sub> [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 CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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