

Kapitel 1

Physik des Klimas IV

Treibhausgase

Als Hauptursache für den anthropogenen (d.h., vom Menschen erzeugten) Klimawandel wird heute die Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre angesehen. Dazu tragen hauptsächlich die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdgas) und die damit verbundene Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2) sowie die Freisetzung von Methan (CH_4) im Zusammenhang mit der Landwirtschaft (insbesondere der Anbau von Reis sowie große Viehherden) bei. Andererseits werden Senken von CO_2 , d.h. Bereiche, die Kohlendioxid abbauen und den Kohlenstoff binden, beispielsweise Regenwälder, abgebaut bzw. vernichtet.

Reservoir	Menge	Tabelle 1.1: Relative Verteilung von Kohlenstoff in verschiedenen Bereichen nahe der Erdoberfläche. Die Menge an Kohlenstoff in der heutigen Biomasse an Land bzw. im Meer wird willkürlich als 1 definiert. (Aus [6])
Biosphäre - Meer	1	
Biosphäre - Land & Atmosphäre	1	
Atmosphäre (in Form von CO_2)	20	
Ozean (als gelöstes CO_2)	4 000	
Fossile Brennstoffe	800	
Ton (shales)	800 000	
karbonhaltiger Fels (z.B. Graphit, Schiefer)	2 000 000	

Wichtig im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist nicht der Kohlenstoff, der sich im Biozyklus der Erde befindet (in organischen Substanzen), sondern der Kohlenstoff, der in gebundener Form in Reservoiren vorliegt (z.B. in fossilen Brennstoffen; siehe Tab. 1.1) und nun (hauptsächlich vom Menschen) freigesetzt wird. Dieser Kohlenstoff erhöht die Konzentration in der Luft (in Form von CO_2 oder CH_4) oder im Wasser (was z.B. zur Versauerung der Meere führt).

1.1 Zur frühen Geschichte der Erforschung der Treibhausgase

Die Geschichte der Erforschung von Treibhausgasen und ihrem Einfluss auf das Klima der Erde beginnt mit Joseph Fourier (1768–1830), nach dem auch die Fourier-Transformation benannt ist. Fourier untersuchte die Ausbreitung von Wärme. In diesem Zusammenhang stieß er auf die Diffusionsgleichung und erkannte, dass harmonische Funktionen (Sinus und Kosinus) und ihre Linearkombinationen zur Lösung verwendet werden können. In diesem Zusammenhang stellt er sich die Frage, welche Ver-

teilungsfunktionen sich nach harmonischen Funktionen entwickeln lassen. Im Jahre 1824 beschrieb er in einem Aufsatz das Grundprinzip des Treibhauseffekts.

Oft vergessen wird der Beitrag der US-Amerikanerin Eunice Newton Foote (1819–1888). Im Jahre 1856 veröffentlichte sie einen Artikel mit dem Titel *Circumstances Affecting the Heat of the Sun's Rays* im American Journal of Science and Arts [2]. Darin beschreibt sie die Ergebnisse ihrer Versuche mit trockener Luft, feuchter Luft und mit Kohlendioxid versetzter Luft, die sie in einem Glaszylinder dem Sonnenlicht aussetzte. Das Gasgemisch mit erhöhtem CO_2 -Gehalt in der Luft erwärmte sich am stärksten. Sie kommt zu dem Schluss: *An atmosphere of that gas would give to our earth a high temperature; and if as some suppose, at one period of its history the air had mixed with it a larger proportion than at present, an increased temperature from its own action ... must have necessarily resulted.* Ihr Artikel ist erst im Jahr 2010 im Zusammenhang mit der Untersuchung von Treibhausgasen entdeckt worden, seither gilt sie als erste Wissenschaftlerin, die den Zusammenhang zwischen der Konzentration von Kohlendioxid in der Luft und der globalen Erwärmung der Atmosphäre erkannte.

Der irische Naturforscher John Tyndall (1820–1893) hat 1859 ausführliche systematische Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Gase sowie dem Einfluss von infraroter Strahlung auf die Erwärmung von Luft durchgeführt. Er galt bis zur Entdeckung der Arbeit von Eunice Foote als Begründer der Theorie des Einflusses von Kohlendioxid auf die globale Erwärmung der Erdatmosphäre.

Die nächsten wichtigen Schritte in der Erforschung von Treibhausgasen auf das Klima unternahm der schwedische Forscher Svante August Arrhenius (1859–1927). Er interessierte sich für die damals allgemein diskutierte Frage, weshalb es überhaupt Eiszeiten gegeben hat und vermutete einen Zusammenhang zwischen der CO_2 -Konzentration in der Luft und den Kälteperioden der Eiszeiten. Er erstellte sehr ausführliche Tabellen zum Einfluss der Konzentration verschiedener Gase in Luft auf deren Erwärmung unter der Einstrahlung infraroter Strahlung. Zusammen mit seinem Kollegen Arvid Gustaf Högbom (1857–1940) stellte er auch als erster die Vermutung auf, dass die Freisetzung von CO_2 durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zu einer anthropogenen globalen Erwärmung des Klimas führen könnte.

1.2 Die Keeling-Kurve

Mitte der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts untersuchte der amerikanische Chemiker Charles David Keeling (1928–2005) den CO_2 -Gehalt der Luft an der Westküste Amerikas und stellte tageszeitliche Schwankungen fest. Um genauere und vom Straßenverkehr und industriellen Einflüssen unabhängige Daten zu erhalten, ging er 1957 nach Hawaii und begann dort mit Messungen des Kohlendioxidgehalts der Luft auf dem Mauna Loa, dem zweithöchsten Vulkan auf der Hauptinsel von Hawaii. Seit 1958 werden von einem Observatorium auf dem Mauna Loa stündlich CO_2 -Messungen durchgeführt (siehe Abb. 1.1).

Die Kohlendioxidkonzentrationen sind in ppm (parts per million) angegeben. Im Mai 2022 wurde zum ersten Mal die 420 ppm Marke überschritten. Begonnen hat die Kurve 1958 bei Werten von rund 315 ppm. Die Kurve zeigt deutliche jahreszeitliche Schwankungen: In den Monaten Mai bis September nimmt die Konzentration ab, in den Monaten von Oktober bis April nimmt die Konzentration wieder zu. Dieses Verhalten wird mit der vermehrten Aufnahme von Kohlendioxid durch die Pflanzenwelt auf der nördlichen Halbkugel in den Frühjahrs- und Sommermonaten erklärt. Die Nordhalbkugel hat deutlich mehr bepflanzte Landflächen als die Südhalbkugel, sodass hauptsächlich dieser Einfluss sichtbar wird.

Erstaunlich ist auch, dass beispielsweise während der Corona-Pandemie, wo der Flugverkehr sowie der Autoverkehr deutlich geringer waren, kaum ein Effekt auf die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre sichtbar ist. Auch die angeblich intensiven Bemühungen der Staatengemeinschaft, den

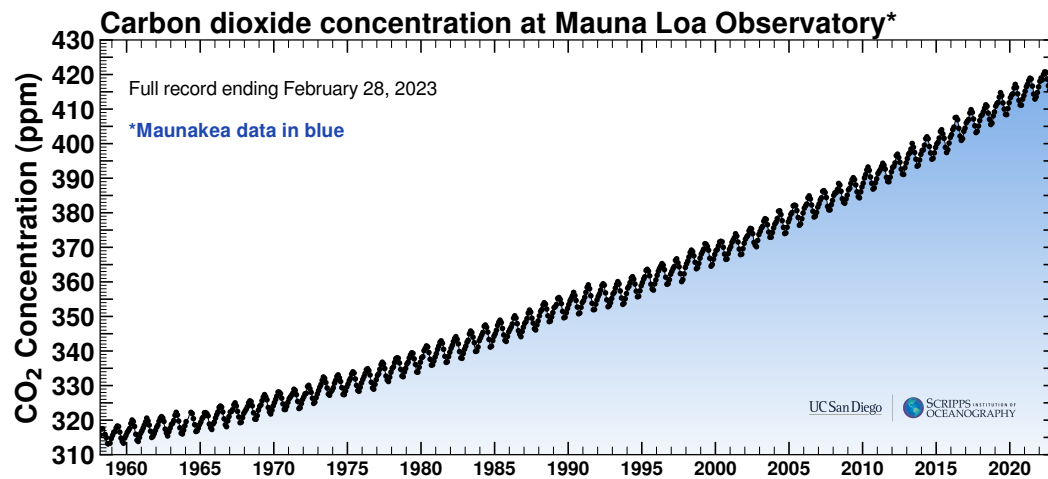


Abbildung 1.1: Die Keeling-Kurve. Dargestellt sind die Ergebnisse von CO₂-Messungen am Mauna Loa, Hawaii (monatliche Mittelwerte). Während der Zeit zwischen November 2022 und März 2023 wurden die Messungen wegen eines Vulkanausbruchs am Mauna Loa auf dem benachbarten Maunakea durchgeführt. (von [3])

CO₂-Ausstoß deutlich zu reduzieren, machen sich bisher kaum bemerkbar. Allerdings zeigen die Daten hier, dass in der weltweiten Summe die CO₂-Emissionen weiterhin zunehmen, im Wesentlichen durch die Zuwächse in China und Indien (siehe Abb. 1.2). In den Vereinigten Staaten haben die CO₂-Emissionen erst um 2007 abgenommen und die USA liegen immer noch nach China an der zweiten Stelle in Bezug auf die absoluten Emissionswerte. Andererseits hat Deutschland einen ähnlichen pro Kopf Verbrauch wie China. Nach einigen arabischen Staaten sowie Kanada und Australien sind die USA hier führend ([5]).

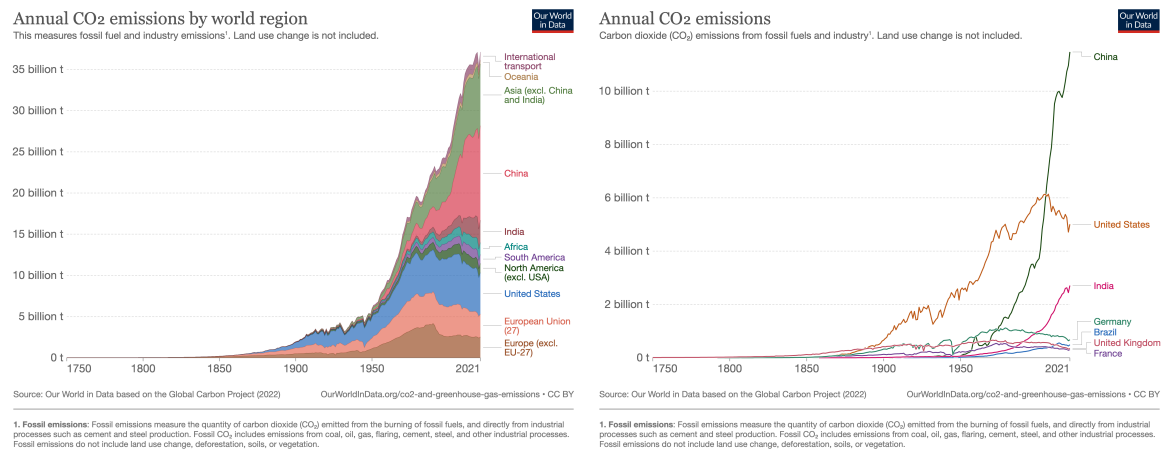


Abbildung 1.2: CO₂-Emissionen nach Gebieten, kumulativ (links), sowie nach Ländern (rechts). (Aus [4])

Man kann den CO₂-Gehalt der Atmosphäre auch historisch weiter zurückverfolgen. Dazu verwendet man die Daten von Eisborungen in der Antarktis und der Arktis. Im Eis sind winzige Luftbläschen gefangen, deren CO₂-Gehalt bestimmt werden kann. Diese Daten schließen sich nahtlos an die Keeling-Kurve an und stimmen in den neueren Jahren mit ihr überein. Betrachtet man hier die

letzten 10 000 Jahre, so erkennt man, dass der CO_2 -Gehalte der Atmosphäre bis rund 1750 nahezu konstant geblieben ist und ab Ende des 18. Jahrhunderts (dem Beginn der industriellen Revolution) deutlich ansteigt (siehe Abb. 1.3, links). Man bezeichnet diese Kurve wegen ihres nahezu geraden Verlaufs bis zum Ende des 18. Jahrhunderts und ihrem anschließenden steilen Anstieg auch oft als „Hockeyschläger-Kurve“.

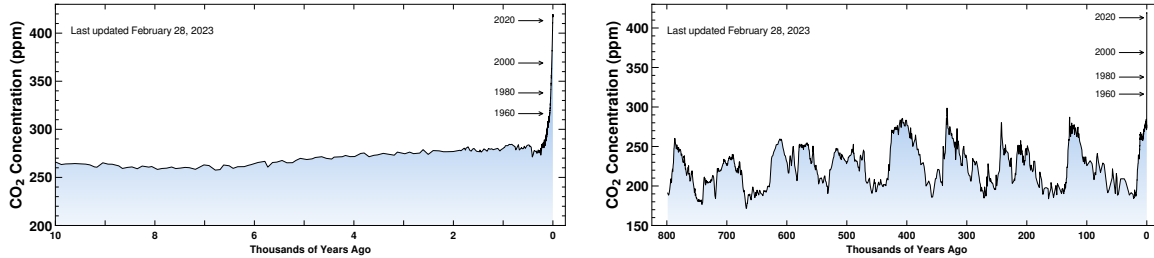


Abbildung 1.3: (links) CO_2 -Gehalt der Atmosphäre in den letzten 10 000 Jahren, (rechts) in den letzten 800 000 Jahren. (Aus [3])

Die Daten der letzten 800 000 Jahre (siehe Abb. 1.3, rechts) zeigen, dass es immer wieder Schwankungen zwischen rund 170 ppm und 300 ppm gab. Diese Schwankungen korrelieren deutlich mit den Eiszeiten (wenn der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre niedrig war) bzw. den Zwischeneiszeiten (mit hohem CO_2 -Gehalt). Diese Diagramme zeigen, dass wir derzeit in einer vergleichsweise warmen Periode der letzten 800 000 Jahre leben. Allerdings gab es in früheren Zeiten (z.B. der Kreidezeit) noch deutlich wärmere Perioden (siehe Kap. ??).

1.3 Treibhausgase und ihre Absorbtionsspektren

Das bei weitem wichtigste Treibhausgas ist Wasserdampf. Da die hauptsächlichen Bestandteile der Luft - Stickstoff, Sauerstoff und Argon - keine Treibhausgase sind, ist Wasserdampf trotz seiner geringen Konzentration von 0–4% (je nach Luftfeuchtigkeit) das häufigste Treibhausgas in unserer Atmosphäre. Es erfüllt eine doppelte Aufgabe im Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur der Erde: Zum einen sorgen Wolken, also kondensiertes Wasser, für den Hauptbeitrag zur Albedo der Erde, und zum anderen absorbiert Wasserdampf einen großen Anteil der von der Erdoberfläche emittierten Strahlung im Infrarotbereich (IR) und trägt so zum Treibhauseffekt der Erdoberfläche bei.

1.4 Anmerkungen

(1) Der Grund für den Faktor 2 zwischen der Schwankung im Abstand und der Schwankung in der Intensität der Sonneneinstrahlung liegt in dem $1/r^2$ -Gesetz der Intensität als Funktion des Abstands:

$$\frac{1}{(r \pm \Delta r)^2} \approx \frac{1}{r^2} \mp 2 \frac{\Delta r}{r}. \quad (1.1)$$

Literaturverzeichnis

- [1] IPCC Assessment Report 6 ???,
<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [2] Eunice Newton Foote; *Circumstances affecting the Heat of the Sun's Rays*; American Journal of Science and Arts, 1856; p. 382–383. abrufbar unter Wikipedia „Eunice Newton Foote“, https://en.wikipedia.org/wiki/Eunice_Newton_Foote (abgerufen am 13.4.2023).
- [3] Keeling-Kurve, Scripps CO2-program, Scripps Institution of Oceanography, San Diego;
<https://keelingcurve.ucsd.edu/>
- [4] Webseite: „Our World in Data“, <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [5] aus Wikipedia „List of countries by carbon dioxide emissions per capita“.
- [6] P. K. Weyl; *Oceanography*; John Wiley & Sons, New York, 1970.
aus <https://www.youtube.com/watch?v=MTLInONp-Z4&t=87s>; 1:18–2:33.