

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

Hintergrundinformation

CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den momentan stattfindenden Klimawandel [1 (*Figure SPM.2*)]. Hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger, stieg die atmosphärische CO₂ Konzentration seit der industriellen Revolution von 278ppm im Jahr 1750 auf 412ppm im Jahr 2019 [1 (*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 mindestens während der letzten 56 Millionen Jahre jemals war [2 (*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 871Gt Kohlenstoff, der in Form von CO₂ vorliegt. Die Vegetation auf den Landmassen enthält 450Gt, Böden inklusive Permafrost etwa 3100Gt und in den Ozeanen sind etwa 40.450Gt Kohlenstoff gebunden [2 (*Figure 5.12*)]. Die bei weitem größten Reservoirs für Kohlenstoff befinden sich jedoch in der Lithosphäre (Erdkruste und äußerer Teil des Erdmantels). Hier befinden sich etwa 60.000.000Gt in Form von Carbonaten, 15.000.000Gt in Form von Kerogenen (z.B. Ölschiefer) und 10.000Gt Kohlenstoff in Form von Gashydraten [3]. Außerdem befindet sich in der Lithosphäre das Reservoir an fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl und Gas), welches etwa 1.329Gt Kohlenstoff enthält [2 (*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 den schnellen und den langsamen Kohlenstoffzyklus unterteilt. [3]

Ein wichtiger Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus ist der Carbonat-Silicat-Zyklus [4]. Atmosphärisches CO₂ und Regenwasser bilden Kohlensäure. Diese zersetzt über lange Zeiträume Silicatgesteine 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 [5] in das Erdinnere transportiert werden. Durch die

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

im Erdmantel vorherrschenden hohen Drücke und Temperaturen reagieren die Carbonate mit Siliziumdioxid erneut zu Silicatmineralen wobei CO₂ abgespalten wird, welches über Vulkanismus wieder in die Atmosphäre gelangt.

Obwohl die jährlichen Kohlenstoff-Austauschraten mit der Atmosphäre relativ klein sind, ist der Carbonat-Silicat-Zyklus der entscheidender Mechanismus für die atmosphärischen CO₂ Konzentrationen auf Zeitskalen im Bereich vieler Millionen Jahre [6]. 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 [7] 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 [8]. Auch der vor etwa 50 Millionen Jahren einsetzende Abwärtstrend ging mit Änderungen am Carbonat-Silicat-Zyklus einher. So wird diskutiert, dass die Auffaltung des Himalaya und anderer Gebirgsketten Verwitterungsprozesse begünstigte und so CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wurde [9, 10].

Der Carbonat-Silicat-Zyklus stellt außerdem einen wichtigen negativen Feedbackeffekt (Rückkopplungseffekt) dar, der das Klima der Erde langfristig stabilisiert [6, 11]. 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 -gas ist Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus [12, 13, 14]. Ihr Ursprung ist organisches Material, welches vor bis zu mehreren 100 Millionen Jahren abgestorben und unter anaeroben Bedingungen (ohne Sauerstoff) sedimentiert ist, was eine vollständige Zersetzung verhinderte. Bei Kohle stammt die Biomasse von Bäume 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 -gas ermöglichte.

Auch externe Einflüsse können den Kohlenstoffzyklus beeinflussen. Dazu zählen z.B. Änderungen des Erdborbits um die Sonne, die die atmosphärischen CO₂ Konzentrationen beeinflussen. Sie werden durch die Milanković-Zyklen [15, 16] 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 [17]. Hier führt z.B. die sich aufgrund des Erdborbits ändernde Sonneneinstrahlung zu Änderungen der Ozeantemperaturen und damit zu Änderungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration [18, 19]. In geglätteten Proxy-Daten sind diese Zyklen nicht sichtbar, da die zeitliche Auflösung der Proxy-Daten dafür nicht hoch genug ist.

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

Der schnelle Kohlenstoffzyklus [3, 20, 2 (*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 [21] und Respiration (Atmung) [22]. 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 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 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 Wachstumsperiode auf der Nordhalbkugel erreicht. Das Jahresmaximum wird kurz vor ihrem Beginn 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. Infolge dessen 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 [2].

Vergleicht man den jährlichen Anstieg der globalen atmosphärischen CO₂ Konzentration mit der vom Menschen emittierten Menge an CO₂, stellt man fest, dass derzeit nur etwa die Hälfte des emittierten CO₂ in der Atmosphäre verbleibt [23, 2 (*Section 5.1*)]. Die andere Hälfte wird zu ungefähr gleichen Anteilen von der terrestrischen und der marinen Biosphäre 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 In-situ-Messdaten beobachten kann. In Satellitendaten ist dies aufgrund der kürzeren Zeitreihe und aufgrund wechselnder Satelliteninstrumente mit unterschiedlicher räumlicher Abdeckung nicht ohne weiteres sichtbar. Im Fall der marinen Biosphäre folgt aus einer höheren CO₂ Konzentration z.B., dass mehr CO₂ im



Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

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 einen stabilisierenden Feedbackmechanismus dar. In wie weit dieser jedoch auch unter Klimaänderungs-Bedingungen erhalten bleibt ist Gegenstand aktueller Forschung.

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

Material

Zur Erarbeitung der Lernziele steht den SuS eine interaktive browserbasierte Grafik zur Verfügung, die die atmosphärische CO₂ Konzentration von vor etwa 450 Millionen Jahre bis 2019 zeigt (Beispiele siehe Abbildung 1 - Abbildung 4). Die in der Abbildung 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.

Ähnliche Zeitreihen existieren bereits in Form von statischen Grafiken z.B. im 6. Sachstandsbericht des IPCC [25 (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.

In der interaktiven Grafik ermöglicht ein Schieberegler (Abbildung 1) die Länge des angezeigten Zeitraums dynamisch von 10 Jahren bis etwa 450 Millionen Jahren zu variieren, indem das Anfangsjahr der Zeitreihe verändert wird. Die 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 zurückgelegten Strecke des Schiebereglers. Die X-Achse der Grafik ist jedoch linear um die dargestellte Zeitreihe besser interpretieren zu können.

Je nach eingestellter Länge der Zeitreihe, werden verschiedene erd- bzw. menschheitsgeschichtliche und politische Ereignisse eingeblendet, die sich entweder unmittelbar auf die atmosphärische CO₂ Konzentration ausgewirkt haben, oder die bei der Einordnung der zeitlichen Skala helfen können (Abbildung 3). Zu diesem Zweck zeigt die Abbildung außerdem im oberen Teil eine geologische Zeitskala [26] mit Ära, Periode, Epoche und Alter des Erdzeitalters.

Ein sog. *Hovertool* blendet das Jahr und die CO₂ Konzentration ein, wenn man den Mauszeiger über die dargestellten Kurven bewegt (Abbildung 4). Dies ermöglicht das exakte Ablesen von Werten um z.B. quantitativ reproduzierbare Ergebnisse bei der Bearbeitung der Aufgaben zu erhalten.

Als Datengrundlage für die Grafik dienen wissenschaftlich etablierte Datensätze, die auch im 6. Sachstandsbericht des IPCC [27] verwendet wurden, oder im Climate Data Store des europäischen Copernicus Climate Change Service [28] verfügbar sind.

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

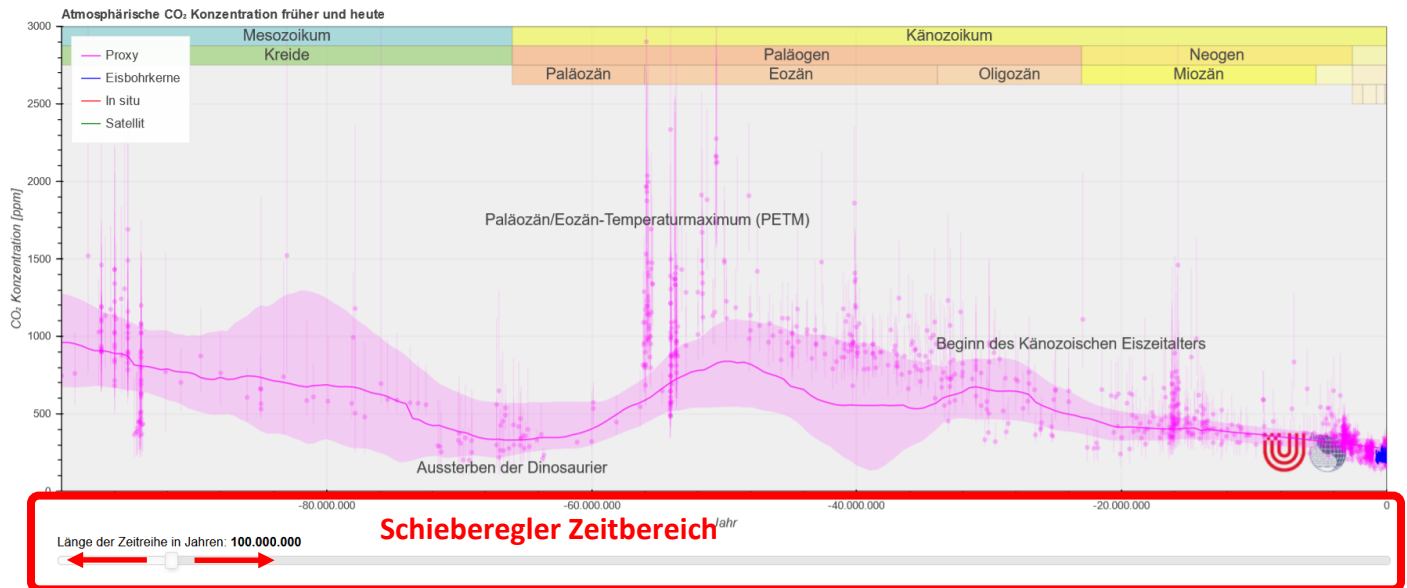


Abbildung 1: Beispielsicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂ Konzentration für die letzten 100 Millionen Jahre vor 2020.

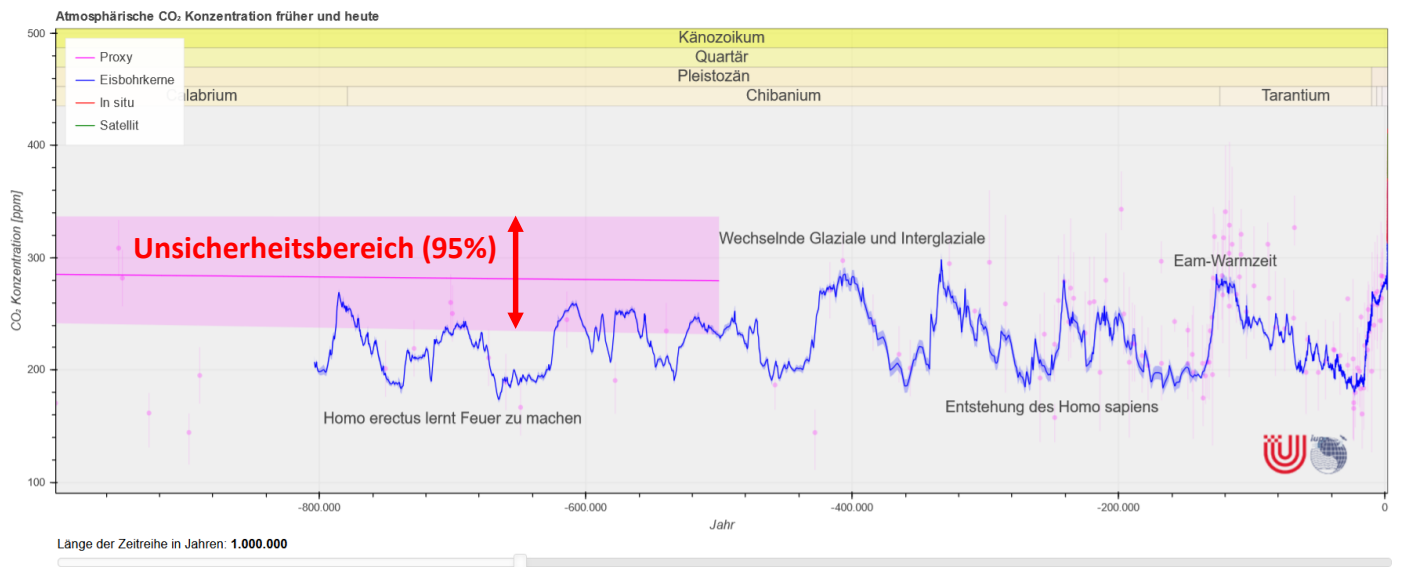


Abbildung 2: Beispielsicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂ Konzentration für die letzte Millionen Jahre vor 2020.

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

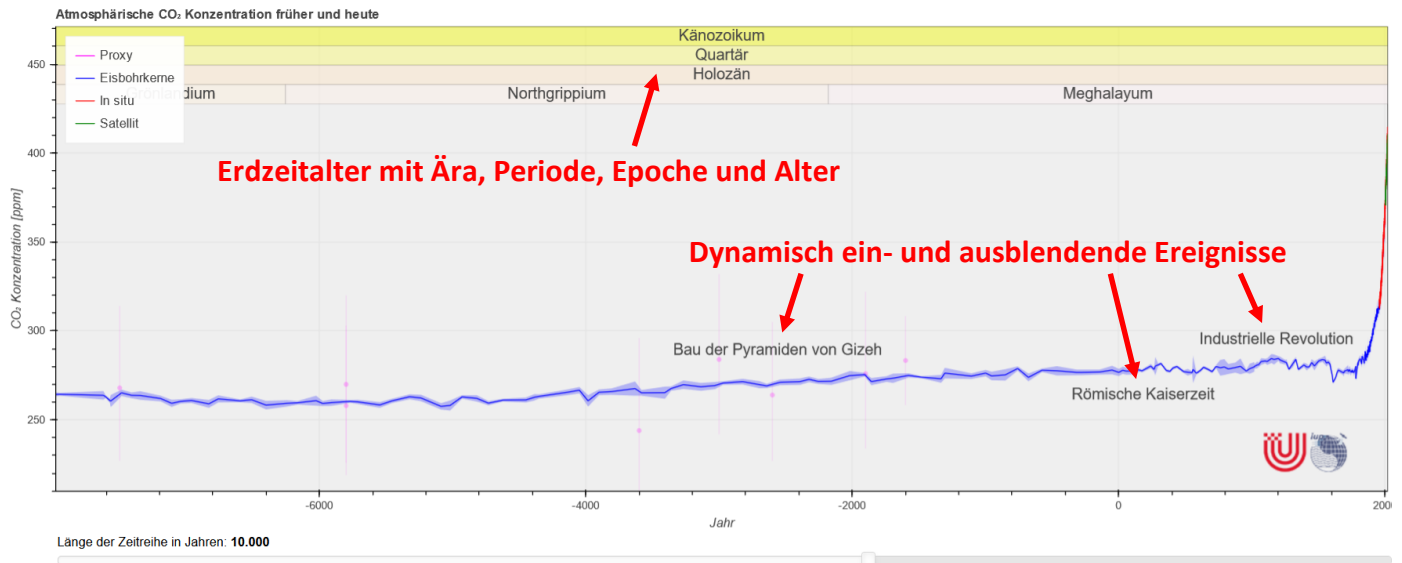


Abbildung 3: Beispielansicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂ Konzentration für die letzten zehntausend Jahre vor 2020.

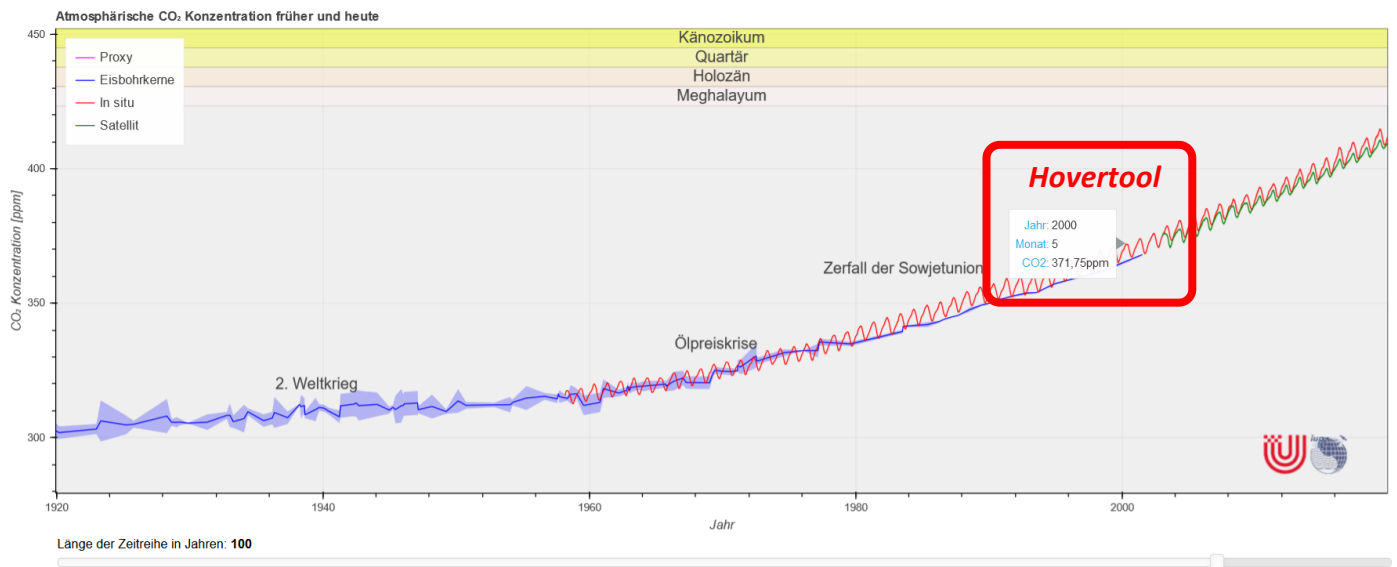


Abbildung 4: Beispielansicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂ Konzentration für die letzten 100 Jahre vor 2020.

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

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 [29]. Hier wird seit dem Ende der 50er Jahre der CO₂ Gehalt von lokal gewonnenen Luftproben im Labor bestimmt.

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 [30].

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 [31, 32] und können über den Climate Data Store [33] des Copernicus Climate Change Service bezogen werden.

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 [34]. Ein Beispiel ist die aus Fossilien bestimmbare Dichte der Spaltöffnungen (Stomata) von Blättern die umso geringer ist, je mehr CO₂ in der Luft ist [35]. Die hier gezeigten Daten basieren auf einer Zusammenstellung von verschiedenen Proxy-Datensätzen, die auch für den 6. Sachstandsbericht des IPCC [36, 25 (*Figure 2.3*)] verwendet wurden.

Die verwendeten Datensätze (Proxy, Eisbohrkern, 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 über-repräsentieren 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. Außerdem entsprechen die Satellitenmessungen der mittleren CO₂ Konzentration in allen Höhen der Atmosphäre und nicht nur in der Nähe des Erdbodens. Proxy-Daten haben zusätzliche Unsicherheiten aufgrund der Annahmen über den Zusammenhang zwischen dem atmosphärischem 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 [36], die eine

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

kontinuierliche Darstellung ermöglicht. Aufgrund der starken Glättung, kann diese jedoch Messwerten, die 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 2000ppm [38]. 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 notwendiger Weise einen Widerspruch dar.

Referenzen

- 1 IPCC, 2021: Summary for Policymakers. 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.
- 2 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
- 3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>
- 4 https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonate%E2%80%93silicate_cycle
- 5 <https://de.wikipedia.org/wiki/Subduktion>
- 6 Walker, J. C. G., Hays, P. B., and Kasting, J. F. (1981), 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](https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09776)
- 7 <https://en.wikipedia.org/wiki/Pangaea>
- 8 Yves Goddérès, 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>
- 9 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>
- 10 Raymo, M., Ruddiman, W. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature* 359, 117–122 (1992). <https://doi.org/10.1038/359117a0>
- 11 <http://www.columbia.edu/~vjd1/carbon.htm>
- 12 https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile_Energie

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

- 13 <https://socratic.org/questions/how-do-fossil-fuels-form>
- 14 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, 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
- 15 <https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovi%C4%87-Zyklen>
- 16 <https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>
- 17 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>
- 18 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>
- 19 Khatiwala, S., A. Schmittner, and J. Muglia, 2019: Air-sea disequilibrium enhances ocean carbon storage during glacial periods. *Science Advances*, 5(6), eaaw4981, doi:10.1126/sciadv.aaw4981
- 20 https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Terrestrischer_Kohlenstoffkreislauf
- 21 <https://de.wikipedia.org/wiki/Photosynthese>
- 22 <https://de.wikipedia.org/wiki/Zellatmung>
- 23 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

- 24 Interaktive browserbasierte Clim4Edu Grafik der atmosphärische CO₂ Konzentration von vor etwa 450 Millionen Jahre bis zum Jahr 2020, http://www.iup.uni-bremen.de/~mreuter/clim4edu_co2ts.html
- 25 IPCC, 2021: 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.
- 26 https://de.wikipedia.org/wiki/Geologische_Zeitskala
- 27 Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. 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.
- 28 Copernicus is the European Union's Earth Observation Programme, looking at our planet and its environment for the ultimate benefit of all European citizens. The Copernicus Climate Change Service (C3S) supports society by providing authoritative information about the past, present and future climate in Europe and the rest of the World. <https://climate.copernicus.eu>
- 29 Dr. Pieter Tans, NOAA/GML (gml.noaa.gov/ccgg/trends/) and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/), Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Mauna Loa CO₂ monthly mean data, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>
- 30 Bereiter, B., S. Eggleston, J. Schmitt, C. Nehrbass-Ahles, T. F. Stocker, H. Fischer, S. Kipfstuhl, and J. Chappellaz (2015), Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present, Geophys. Res. Lett., 42, 542–549, 2015, doi:10.1002/2014GL061957, <https://doi.org/10.1002/2014GL061957>
- 31 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

Wie hat sich die atmosphärische CO₂ Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

- 32 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
- 33 Climate Data Store (CDS) of the Copernicus Climate Change Service (C3S), <https://cds.climate.copernicus.eu>
- 34 <http://www.p-co2.org>
- 35 <https://www.paleo-co2.org/proxiesStomatal>
- 36 Professor Gavin Foster, Ocean and Earth Science, National Oceanography Centre Southampton, <https://www.southampton.ac.uk/oes/about/staff/glf1u08.page>, personal communication, 2022
- 37 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>
- 38 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>