

Inhalt

Hintergrundinformationen	1
Der Carbonat-Silikat-Zyklus	2
Fossile Brennstoffe und externe Einflüsse auf den Kohlenstoffzyklus	2
Biologische Prozesse als treibender Faktor	2
Der anthropogene Einfluss	3
Erklärungen zum interaktiven Material.....	4
In-situ-Daten, Eisbohrkerndaten, Satellitenmessungen und Proxy-Daten	7
Referenzen & weiterführende Literatur	8

Hintergrundinformationen

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 etwa 278 ppm im Jahr 1750 auf etwa 410 ppm im Jahr 2019 [1 (A1.1.1)]. Die Konzentration in den letzten Millionen Jahren war dagegen relativ konstant [2 (*Executive Summary*)].

Die atmosphärische CO₂-Konzentration ist untrennbar mit den Prozessen des Kohlenstoffzyklus verbunden. Im Erdsystem gibt es verschiedene „Kohlenstoff-Reservoirs“, wie die Atmosphäre, die Vegetation, die Böden und die Ozeane. Der größte Teil des Kohlenstoffs befindet sich in der Lithosphäre in Form von Gesteinen wie Kalk [3] und fossilen Brennstoffen [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, sodass die Quellen und Senken an der Erdoberfläche der Haupttreiber für die globale atmosphärische Konzentration sind. Im Rahmen des globalen Kohlenstoff-Zyklus findet ein Austausch zwischen den Reservoirs in der Atmosphäre und den anderen Sphären statt. Je nach Zeitskala, auf der dieser Austausch stattfindet, kann er in den schnellen oder langsamen Kohlenstoffzyklus unterteilt werden [3].

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

Der Carbonat-Silikat-Zyklus

Ein wichtiger Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus ist der Carbonat-Silikat-Zyklus [4]. Atmosphärisches CO₂ und Regenwasser bilden Kohlensäure, welche Silikatgesteine an der Erdoberfläche zersetzt. Dabei entstehen unter anderem gelöstes Siliziumdioxid, sowie Hydrogencarbonat- und Calcium-Ionen.

Korallen- und Tier-Skelette am Ozeanboden bilden Carbonatsedimente (Kalkstein), die durch Platten-tektonik in den Subduktionszonen [5] in das Erdinnere transportiert werden. Durch die im Erdmantel vorherrschenden hohen Drücke und Temperaturen reagieren die Carbonate mit Siliziumdioxid erneut zu Silikatmineralen. Dabei wird CO₂ abgespalten, das über Vulkanismus wieder in die Atmosphäre gelangt.

Obwohl die jährlichen Kohlenstoff-Austauschraten mit der Atmosphäre relativ klein sind, ist der Carbonat-Silikat-Zyklus der entscheidende Mechanismus für die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf Zeitskalen im Bereich vieler Millionen Jahre [6]. Er stellt außerdem einen wichtigen negativen Feedbackeffekt (Rückkopplungseffekt) dar, der das Klima der Erde langfristig stabilisiert [6, 11].

Fossile Brennstoffe und externe Einflüsse auf den Kohlenstoffzyklus

Auch die Entstehung fossiler Brennstoffe, wie Kohle (Biomasse von Bäumen/Landpflanzen), Erdöl und -gas (ehemalige Algen), ist Teil des langsamen Kohlenstoffzyklus [12, 13, 14]. Ihr Ursprung ist organisches (kohlenstoffhaltiges) Material, welches vor bis zu mehreren 100 Millionen Jahren abgestorben und geschützt vor Sauerstoff sedimentiert ist. Durch Absinken der Sedimente in tiefere Bereiche der oberen Erdkruste erhöhten sich Druck und Temperatur, was eine Umwandlung in Kohle bzw. Erdöl und -gas ermöglichte.

Auch externe Einflüsse können den Kohlenstoffzyklus beeinflussen. Dazu zählen z. B. Änderungen des Erdborbits um die Sonne. Sie werden durch die Milanković-Zyklen [15, 16] beschrieben und sind der Grund für die in Eisbohrkerndaten sichtbaren Glazial- und Interglazialphasen (Kalt- und Warmzeiten) [17]. Hier führt z. B. die sich ändernde Sonneneinstrahlung zu Änderungen der Ozeantemperaturen und damit zu Änderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration [18, 19].

Biologische Prozesse als treibender Faktor

Der schnelle Kohlenstoffzyklus [3, 20, 2 (Figure 5.12)] ist dominiert durch biologische Prozesse, in die alle Lebensformen der Erde involviert sind. Der größte Kohlenstoffaustausch mit der Atmosphäre findet durch Photosynthese [21] und Respiration (Atmung) [22] statt. Bei der Photosynthese verwenden Pflanzen den Kohlenstoff des CO₂ aus der Luft, um Biomasse aufzubauen. Parallel zu diesem Prozess atmen Pflanzen, genau wie Menschen, Sauerstoff ein und CO₂ aus und erzeugen dabei Energie. Stirbt die Pflanze ab, wird der gebundene Kohlenstoff in Form von CO₂ wieder frei. Die Prozesse laufen auf Zeitskalen von Stunden bis Jahrhunderten ab. Sie hängen von Umweltbedingungen wie der Sonneneinstrahlung und der Temperatur

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

ab und erzeugen dadurch einen Jahresgang der globalen atmosphärischen CO₂-Konzentration, der in In-situ- und Satellitendaten sichtbar ist. Der größte Teil der Landoberfläche, und auch die meisten Pflanzen, befindet sich auf der Nordhalbkugel.

Der anthropogene Einfluss

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 [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 wurde bisher 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.

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

Erklärungen zum interaktiven Material

Zur Erarbeitung der Lernziele steht den Nutzer:innen 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 *ppm*.

Ähnliche Zeitreihen existieren bereits in Form von statischen Grafiken z. B. im 6. Sachstandsbericht des IPCC [25 (*Figure 2.3-5*)]. Aufgrund der sehr ausgedehnten Zeitperiode wird die Zeitreihe meist auf mehrere Grafiken mit unterschiedlichen Zeitachsen aufgeteilt. Dies erschwert ungeübten Betrachtenden die zeitliche Einordnung der Ereignisse und den Vergleich zeitlicher Konzentrationsänderungen.

In der interaktiven Grafik ermöglicht ein Schieberegler (Abbildung 1) die Länge des angezeigten Zeitraums zu variieren, indem das Anfangsjahr der Zeitreihe verändert wird. Um sowohl im Bereich weniger Jahre als auch im Bereich vieler Millionen Jahre die Länge der Zeitserie gut einstellen zu können, weist der Schieberegler ein exponentielles Ansprechverhalten auf.

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 zeitlichen Einordnung 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?

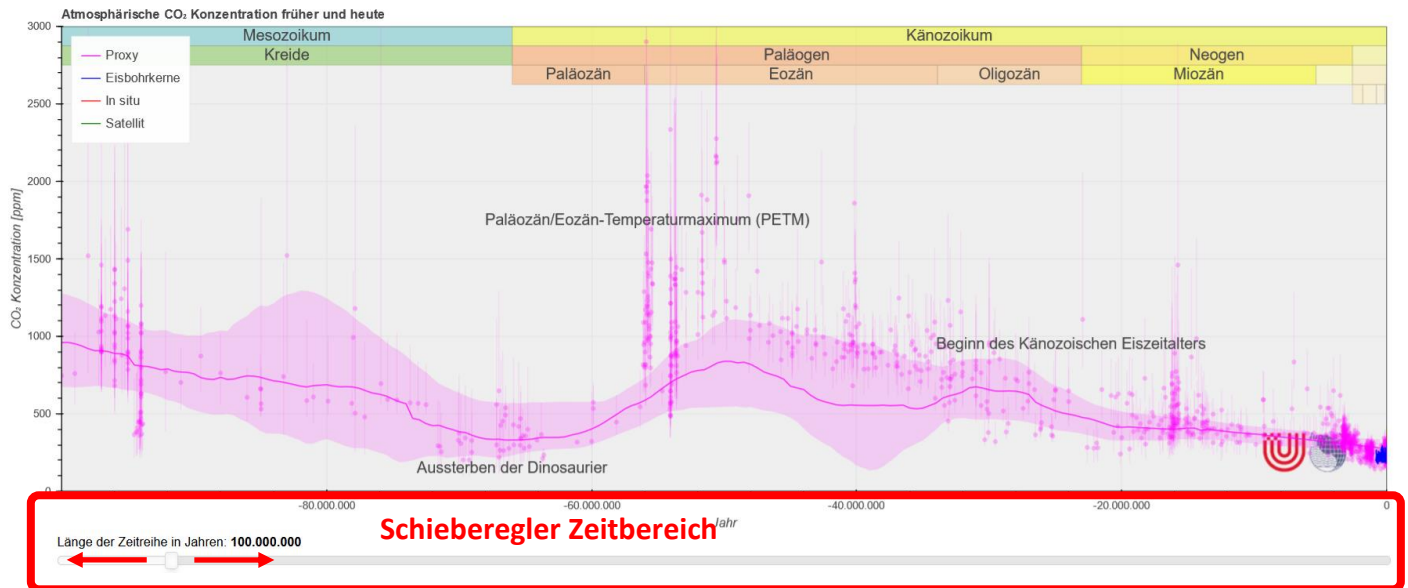


Abbildung 1: Beispielsicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂-Konzentration für die letzten 100 Millionen Jahre vor 2020.

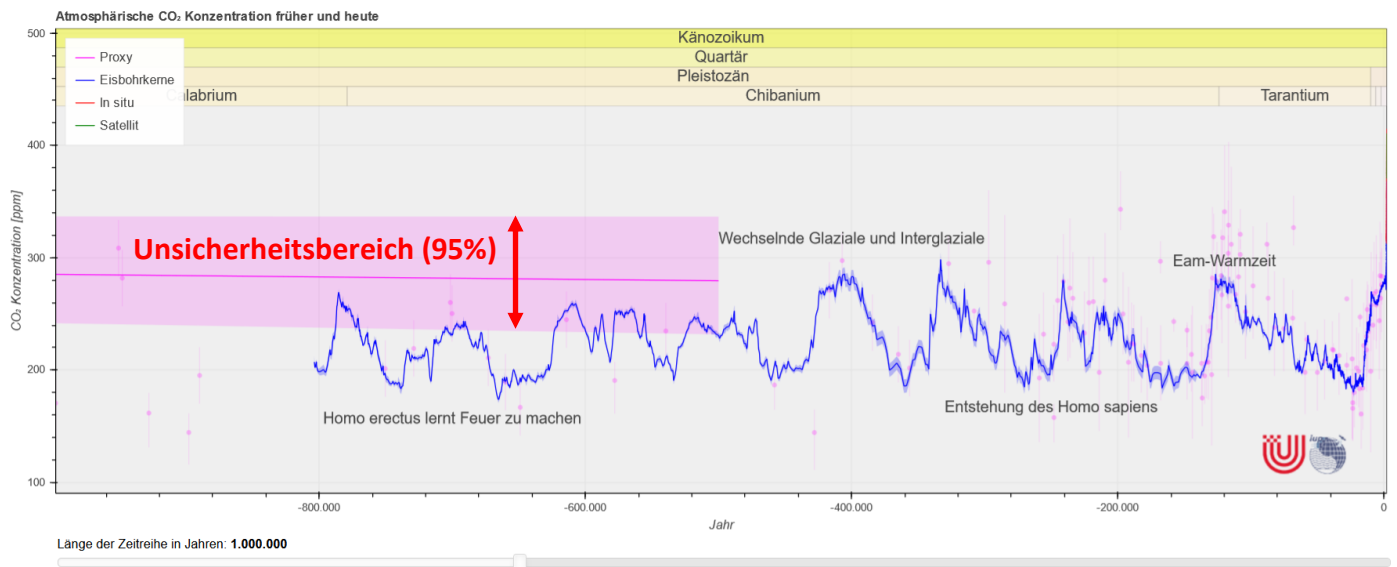


Abbildung 2: Beispielsicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂-Konzentration für die letzten Millionen Jahre vor 2020.

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.

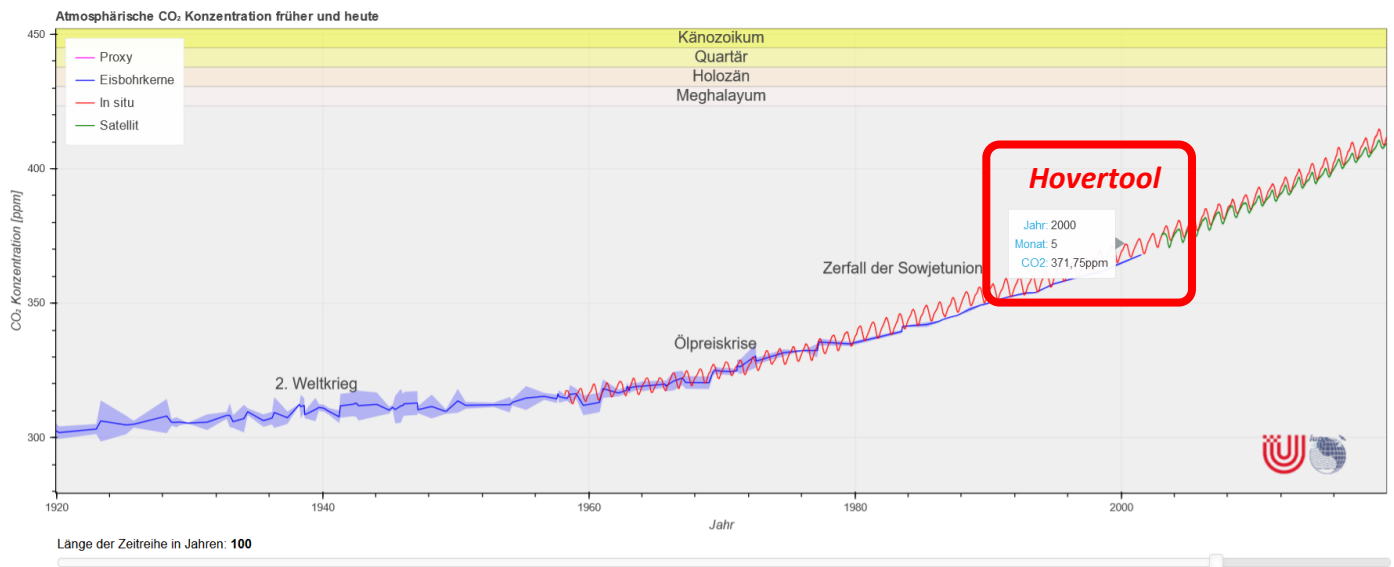


Abbildung 4: Beispielansicht der interaktiven Grafik der atmosphärischen CO₂-Konzentration für die letzten 100 Jahre vor 2020.

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

In-situ-Daten, Eisbohrkerndaten, Satellitenmessungen und Proxy-Daten

Die verwendeten In-situ-Daten 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. Hier wird der CO₂-Gehalt der im Eis eingeschlossenen Luftbläschen bestimmt. Die Messdaten werden über die Tiefe im antarktischen Eis datiert. Die interaktive Grafik verwendet eine Zusammenstellung aus Daten der atmosphärischen CO₂-Konzentration der letzten 800.000 Jahre [30].

Bei der Bestimmung der CO₂-Konzentration durch 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 sind aus Datensätzen verschiedener Satelliten und Auswerteverfahren zusammengestellt [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, sondern Stellvertreter-Größen, sogenannte Proxy-Größen, von denen man weiß, dass sie eine Aussage über die atmosphärischen CO₂-Konzentration zulassen [34].

Die verwendeten Datensätze (Proxy, Eisbohrkern, In situ, Satellit) sind teilweise eher lokale oder eher globale Messungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration und weichen daher teils leicht, teils sogar stark voneinander ab. Die dargestellten Proxy-Daten werden für Zeiten, die länger als eine halbe Millionen Jahre zurück liegen, als geglättete Kurve gezeigt [36], die eine kontinuierliche Darstellung ermöglicht. Die dargestellten Unsicherheitsbereiche (95%) berücksichtigen dabei nur die Genauigkeit der Messungen, 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.

Referenzen & weiterführende Literatur

- 1 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. et al.], Cambridge University Press. In Press.
- 2 Canadell, J.G. et al. (2021): Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 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. et al. (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 Godd  ris et al. (2014): The role of palaeogeography in the Phanerozoic history of atmospheric CO₂ and climate, *Earth-Science Reviews*, Vol. 128, 122–138, ISSN 0012-8252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.11.004>
- 9 Hilton, R.G., West, A.J. (2020): Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nat Rev Earth Environ* 1, 284–299. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>
- 10 Raymo, M., Ruddiman, W. (1992): Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature* 359, 117–122. DOI: <https://doi.org/10.1038/359117a0>
- 11 <http://www.columbia.edu/~vjd1/carbon.htm>
- 12 https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile_Energie
- 13 <https://socratic.org/questions/how-do-fossil-fuels-form>
- 14 Chen, D. et al. (2021): Framing, Context, and Methods. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 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 et al. (2013): Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature* **500**, 190–193. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature12374>
- 18 Bereiter, B. et al. (2018): Mean global ocean temperatures during the last glacial transition. *Nature* **553**, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature25152>
- 19 Khatiwala, S. et al. (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>

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

- 22 <https://de.wikipedia.org/wiki/Zellatmung>
- 23 Friedlingstein, P. et al. (2020): Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- 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. et al.], Cambridge University Press. In Press.
- 26 https://de.wikipedia.org/wiki/Geologische_Zeitskala
- 27 Gulev, S.K. et al. (2021): Changing State of the Climate System. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 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 and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Mauna Loa CO₂ monthly mean data, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>
- 30 Bereiter, B. (2015), 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. DOI: <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
- 32 Reuter, M. et al. (2020): Ensemble-based satellite-derived carbon dioxide and methane column-averaged dry-air mole fraction data sets (2003-2018) for carbon and climate applications, <https://www.atmos-meas-tech.net/13/789/2020>
- 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, 2022, <https://www.southampton.ac.uk/oes/about/staff/ghf1u08.page>
- 37 Foster, G. et al. (2017): Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. Nat Commun 8, 14845. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms14845>
- 38 Anagnostou, E. et al. (2020): Proxy evidence for state-dependence of climate sensitivity in the Eocene greenhouse. Nat Commun 11, 4436. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17887-x>