



Universität
Bremen



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB



Geographisches
Institut



Projektförderung:



Institut für
Umweltphysik

Fachbereich 01
Physik/Elektrotechnik

Fortbildungsveranstaltung für Lehrerinnen und Lehrer

15. Februar 2023

Was sagt uns der Zeitverlauf der atmosphärischen CO₂-Konzentration der letzten 450 Millionen Jahre?

M.Reuter, M.Buchwitz

University of Bremen

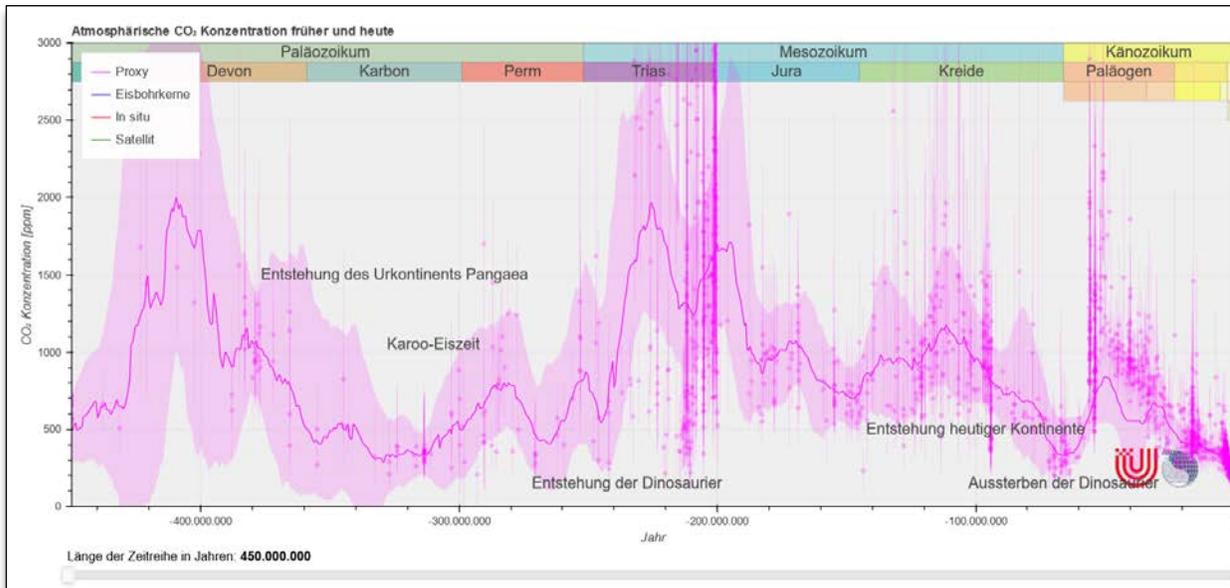
Institute of Environmental Physics, Germany



Einleitung

- In diesem Vortrag stellen wir eine im Rahmen vom Clim4Edu entwickelte interaktive Grafik vor, die die atmosphärische CO₂ Konzentration der letzten 450 Mio Jahre anzeigt und als Lehr- und Unterrichtsmaterial eingesetzt werden kann.
- Die Grafik kann in jedem JS-fähigen Browser dargestellt werden und wird ergänzt durch Hintergrundinformationen, Bedienungsanleitung und Beispielaufgaben mit Musterlösungen.

2



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

Hintergrundinformation

CO₂ ist das wichtigste atmosphärische Treibhausgas und hauptverantwortlich für den momentanen stattfindenden Klimawandel [1] (Figure 3PM.2). Hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger steigt die atmosphärische CO₂ Konzentration seit der industriellen Revolution von etwa 27ppm im Jahr 1750 auf etwa 41ppm im Jahr 2019 [1] (A.1.2.1). Möchte man diese Steigerung beurteilen, ist es naheliegender, 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 Konzentration 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 8750 Gt Kohlenstoff, der in Form von CO₂ vorliegt. Die Vegetation auf den Landmassen enthält 450Gt, Böden inklusive Permafrost etwa 2500Gt und in den Ozeanen sind etwa 40.000Gt Kohlenstoff gebunden [2] (Figure 3.1.2). Die zwei größten Reservoirs für Kohlenstoff befinden sich jedoch in der Lithosphäre (Steinkohle und anderer Teil des Erdmantels), hier befinden sich etwa 60.000.000Gt in Form von Kohlenstein, 15.000.000Gt in Form von Kohengestein (z.B. Obduzierer) und 10.000Gt Kohlenstoff in Form von Gashydraten [3]. Außerdem befindet sich in der Lithosphäre das Reservoir an fossilen Brennstoffen (Böden, Öl und Gas), welches etwa 3.250Gt Kohlenstoff enthält [2] (Figure 3.2.2). Der Kohlenstoff kann zwischen den Reservoirs durch biologische, abiotische, physikalische, oder geologische Prozesse ausgetauscht werden.

CO₂ ist heute atmosphärisch chemisch sehr stabil und gut durchmischbar, so dass die Quellen und Senken an der Erdoberfläche der Haupttreiber für die globale atmosphärische Konzentration sind. Dabei wird Kohlenstoff zwischen den 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 dem langsamem Kohlenstoffzyklus unterteilt [4].

Ein wichtiger Teil des langsamem Kohlenstoffzyklus ist der Carbonat-Silikat-Zyklus [4]. Atmosphärisches CO₂ und Regenwasser bilden Kohlensäure. Diese zersetzt über lange Zeiträume Silikate an der Erdoberfläche, die der Hauptbestandteil der Erdkruste sind. Dabei entstehen unter anderem gelöstes Silica (SiO₂), sowie Hydrogencarbonat- und Calcium Ionen, die über Flüsse in die Ozeane gelangen. Dort werden sie z.B. von tierischen Plankton zum Skelettaufbau von Calciumcarbonat verwendet. Nach dem Absterben bildet ein Teil der Skelette an Ozeanböden Carbonatsedimente, die infolge der Plattentektonik in den Subduktionszonen [5] in die Erdkruste transportiert werden. Durch die

Version: 17.03.2023
 Kontakt: Maximilian Ruster (mrueter@iup.uni-bremen.de)
 Projekt-Förderung: DLR Raumfahrtgüter (50E21030)

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

Aufgaben und Musterlösungen

Grundlagen

Nenne die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO₂ Konzentration üblicherweise angegeben wird und erkläre deren Bedeutung.
 Einheit: ppm (parts per million), Bedeutung: Anzahl von CO₂ Molekülen pro eine Millionen Luftmoleküle.

Aufbaufragebereich I

Lebzeit: Die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO₂ Konzentration üblicherweise gemessen wird und deren Bedeutung.
 Nenne und beschreibe mit eigenen Worten vier Methoden mit denen die atmosphärische CO₂ Konzentration bestimmt werden kann.
 In situ: Labor-analyse der Umgebungsluft, Eisbohrkerne: Labor-analyse von im Eis eingeschlossenen Luftbläschen, Satellit: Analyse von absorptionsstrukturen in reflektierten Sonnenlicht, Proxy: Messung von Substratengittern (z.B. Stomata, Isotopenverhältnisse) in Sedimenten oder Fossilien, die einen Indikatorium-Zusammenhang mit der atmosphärischen CO₂ Konzentration haben.

Aufbaufragebereich II

Lebzeit: Es gibt unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der atmosphärischen CO₂ Konzentration. Nenne die Hauptmerkmale der Methoden.
 Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik bis zu welchem Jahr die dargestellten Proxy, Eisbohrkerne, In-situ und Satelliten in die Vergangenheit zurückreichen.
 Proxy: ca. 450 Millionen Jahre BC, Eisbohrkerne: ca. 800.000 Jahre BC, in situ: 1958, Satellit: 2003.

Aufbaufragebereich III

Lebzeit: Verfolge die Entwicklung der Hauptmerkmale der Methoden zur Bestimmung der atmosphärischen CO₂ Konzentration, welche deren zeitliche Abdeckung.
 Diskutiere mögliche Gründe, warum eine Diskrepanz zwischen den Messwerten unterschiedlicher Verfahren keinen Widerspruch darstellen müssen.
 Die geringsten Konzentrationen entsprechen eher der globalen CO₂ Konzentration, die geringsten in situ- und Eisbohrkerne Daten eher einem lokalen Aussehen über den Zusammenhang von Substratengittern und atmosphärischen CO₂ können zu Überschüssen in den Proxy Daten führen. Die zeitliche Zuordnung kann bei Eisbohrkernen und von älteren Proxy-Daten Unsicherheiten erzeugen. Die von unseren Satellitmessungen sind qualitativ höherwertig, sodass sie z.B. zur Kalibrierung und in weichen Bereichen zur Verfügung stehen.

Version: 14.03.2022
 Kontakt: Maximilian Ruster (mrueter@iup.uni-bremen.de)
 Projekt-Förderung: DLR Raumfahrtgüter (50E21030)

<https://fis.rub.de/klima/das-treibhausgas-co2-im-laufe-der-zeit>



Einleitung

- CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den Klimawandel.
- Durch die Verbrennung fossiler Energieträger, stieg die atmosphärische CO₂ Konzentration seit der industriellen Revolution von 278ppm im Jahr 1750 auf 410ppm im Jahr 2019.

3

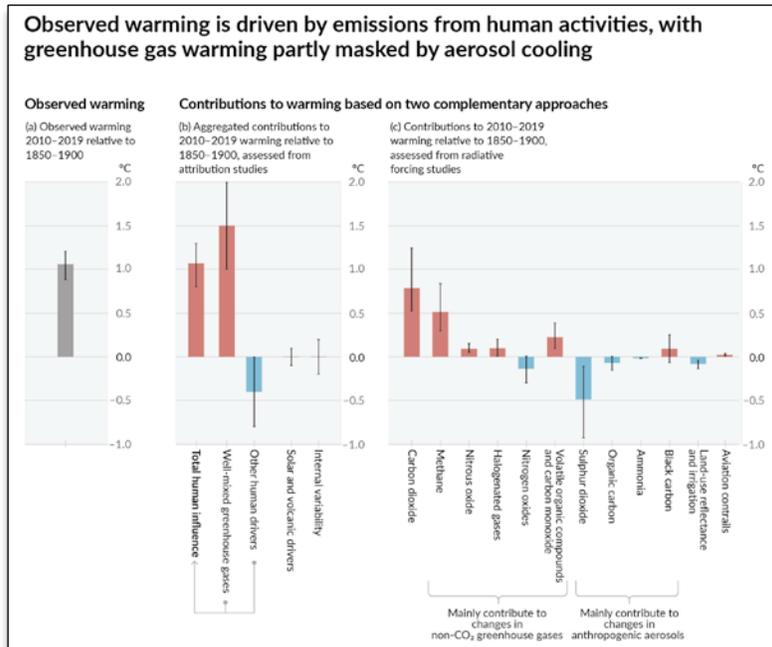


Figure SPM.2 in IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, 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, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi: 10.1017/9781009157896.001.]

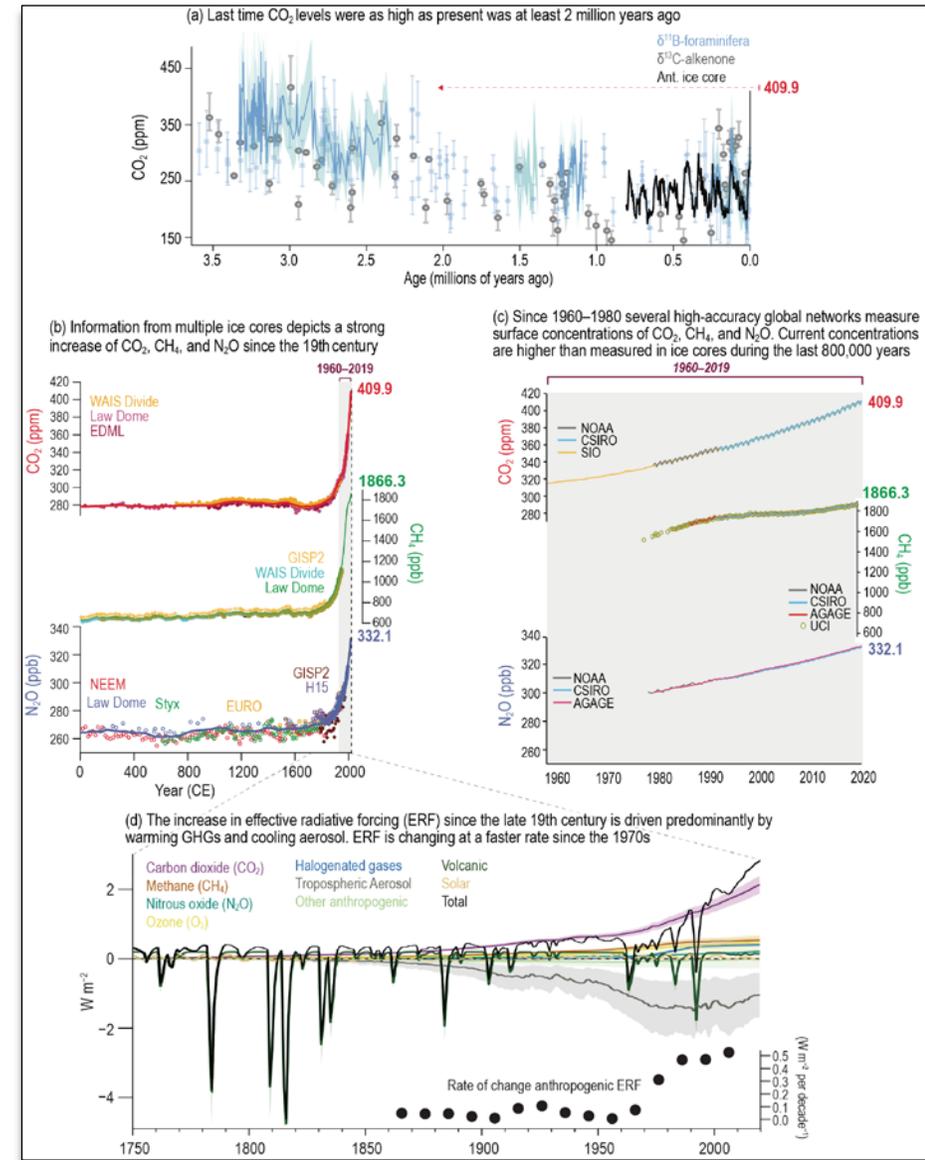


Figure TS.9 in IPCC, 2021: Technical Summary. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.]



Einleitung

- Aufgrund den folgenden Fragestellungen ist es naheliegend diese Änderungen im Kontext zu erdgeschichtlichen CO₂ Änderungen zu betrachten.
 - Sind die menschengemachten Änderungen groß, klein, schnell oder langsam im Vergleich zu natürlichen?
 - Wie reagierte das Klima auf vergangene Änderungen?
 - Welche Prozesse bestimmen die CO₂ Konzentration?
 - Wie reagieren diese Prozesse auf Störungen (wie die des Menschen)?
- Der Verlauf der erdgeschichtlichen CO₂ Konzentration wird häufig von Klimaskeptikern bewusst oder unbewusst falsch interpretiert. Die Arbeit mit der Grafik ermöglicht den SuS eigene Schlussfolgerungen ziehen.



Einleitung

- Es gibt mehr oder weniger verlässliche Daten zur atmosphärischen CO₂ Konzentration für die vergangenen 450 Mio Jahre.
- Auf verschiedenen Zeitskalen dominieren sehr unterschiedliche Prozesse.
- Deshalb ist es nicht einfach diese Daten in einem statischen Plot zu zeigen.
- Üblicherweise wählt man verschiedene Zeitachsen.
- Dies hat jedoch Nachteile: es erschwert dem ungeübten Betrachter die zeitliche Einordnung von Ereignissen und den Vergleich zeitlicher Konzentrationsänderungen.

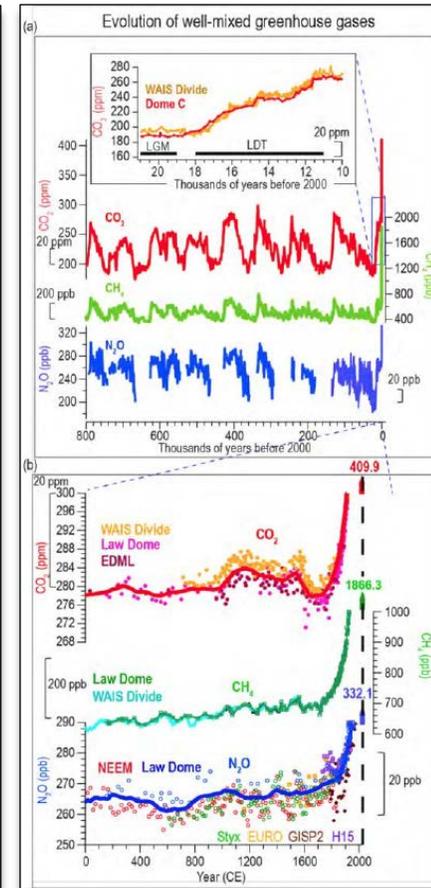
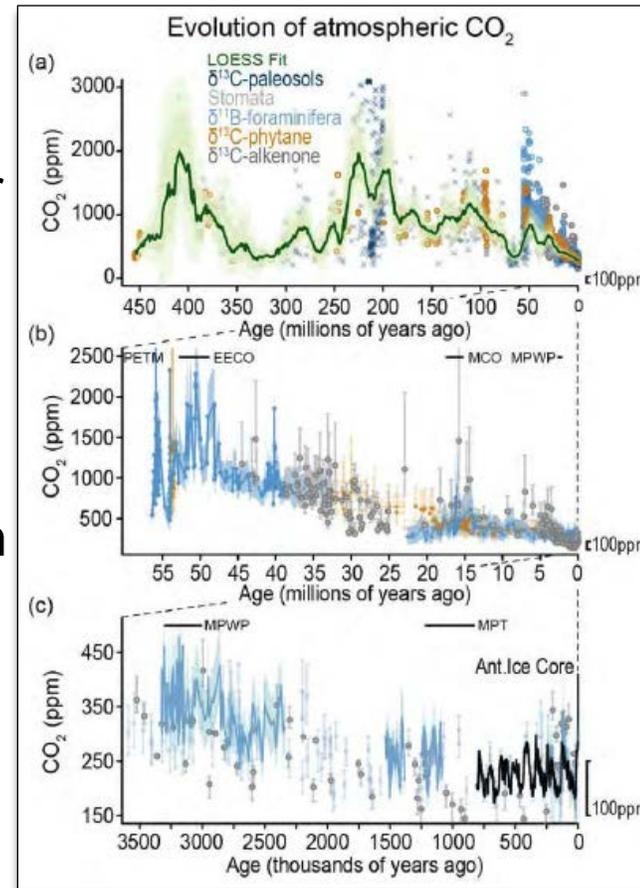
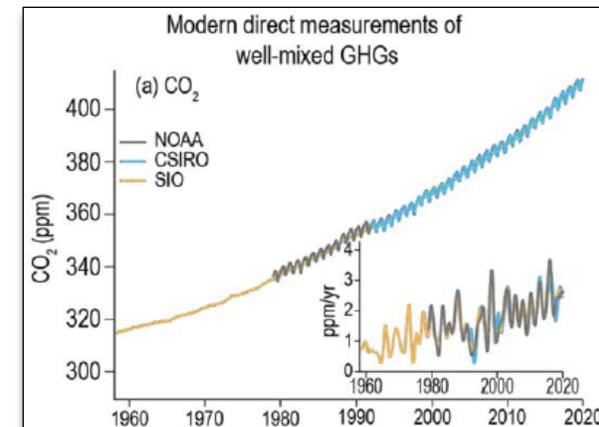


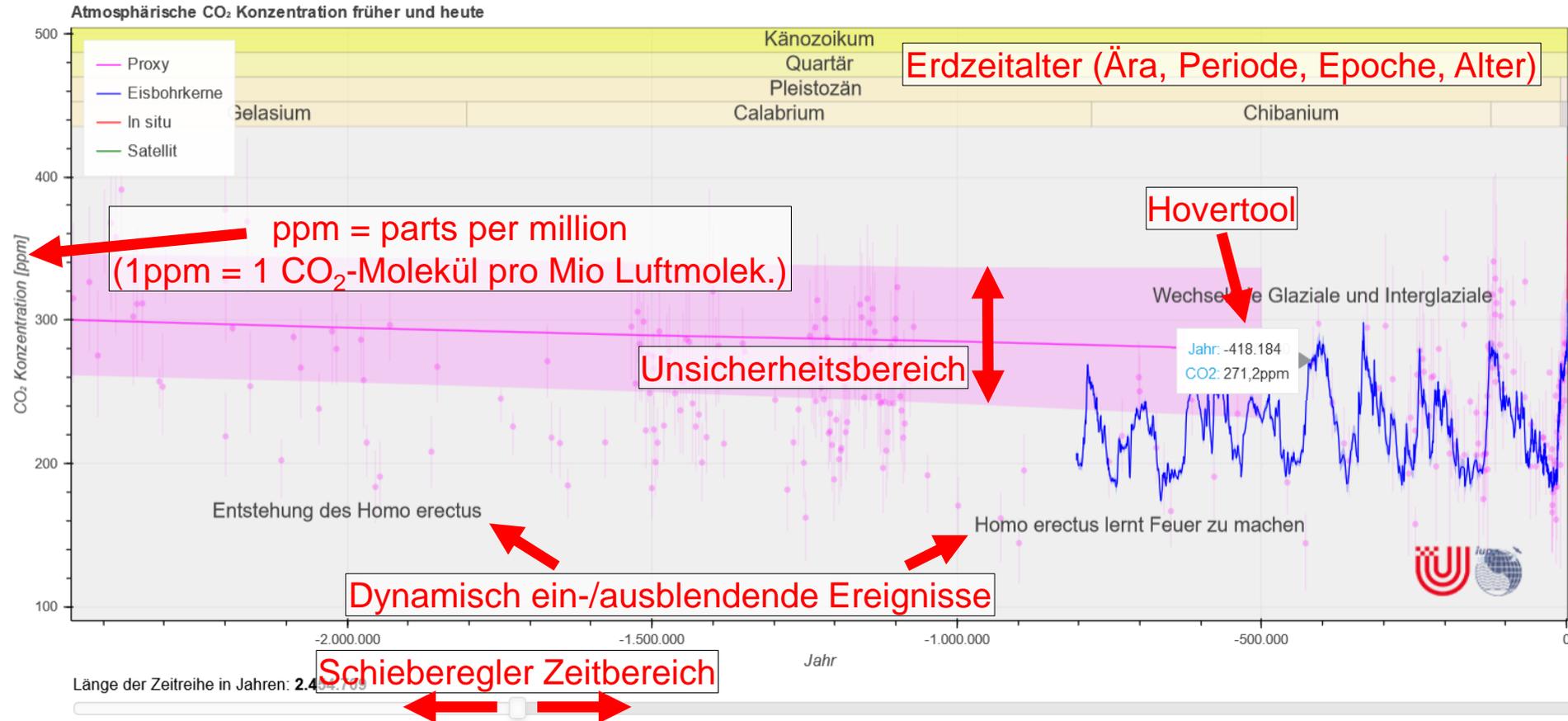
Figure 2.3-5 in IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. 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.





6

Interaktive Grafik

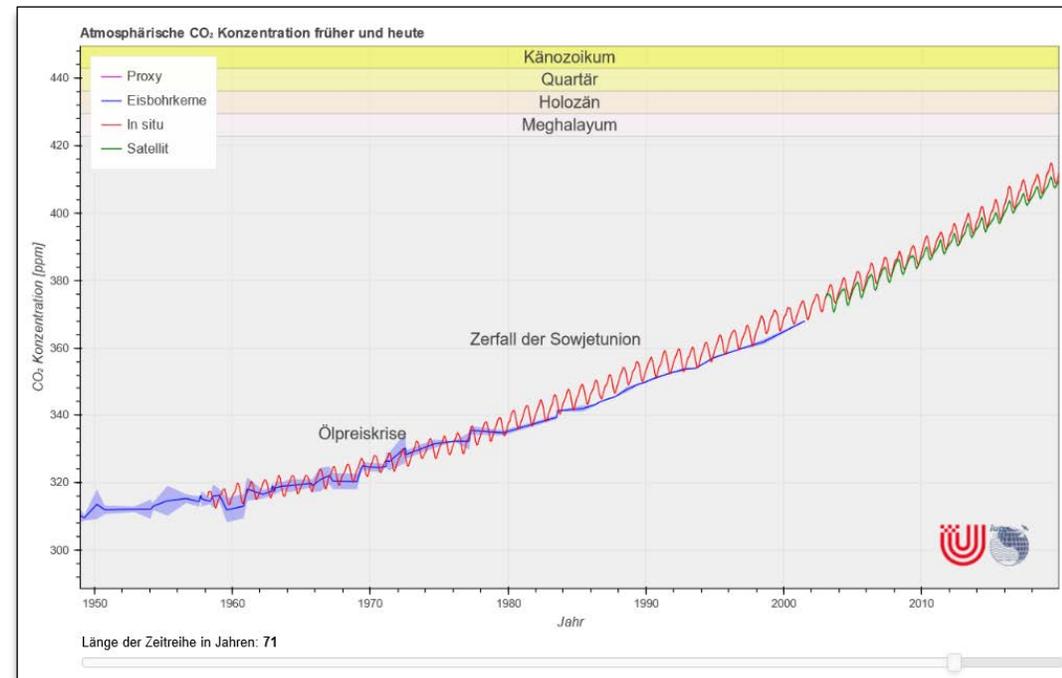


- Die Grafik zeigt die atmosphärischen CO₂ Konzentration der vergangenen 450 Mio Jahre bestimmt mit vier unterschiedlichen Messmethoden.
- Sie verwendet Datensätze die auch für den 6. Sachstandsbericht des IPCC verwendet werden und Satellitenmessungen des europäischen Copernicus Climate Change Service C3S.
- Für die Interpretation sind Grundlagen zu den Messmethoden und dem Kohlenstoffzyklus nötig.

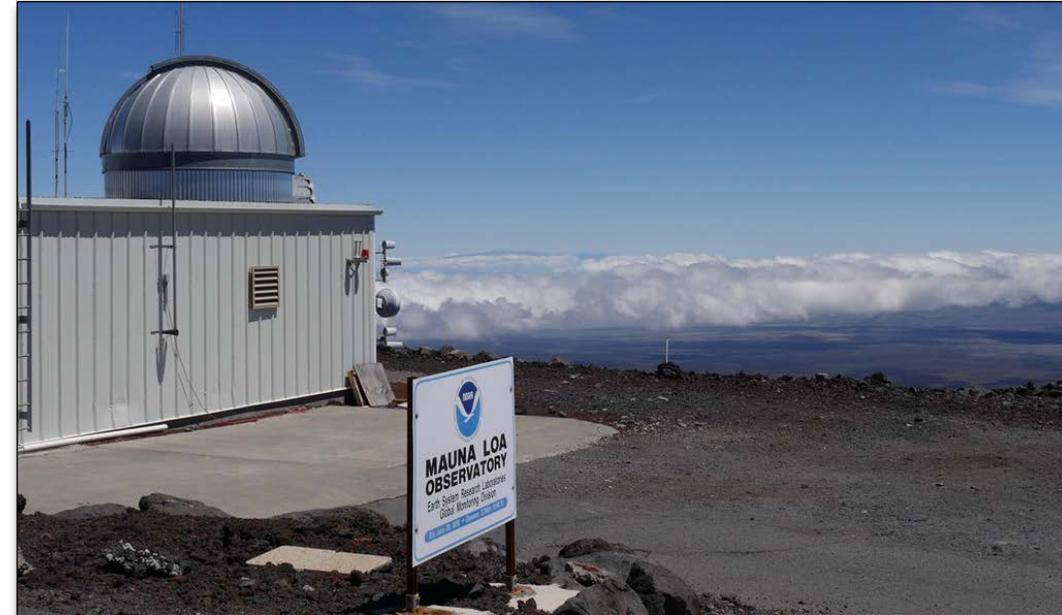


Messmethode: In situ

- In situ = am Ort (lateinisch)
- Laboranalyse der Umgebungsluft
- Älteste kontinuierlich betriebene Messstation für CO₂ (seit Ende der 50er)
- Ort: Mauna Loa, Hawaii



research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/1380/Greenhouse-gases-continue-climbing-2012-a-record-year

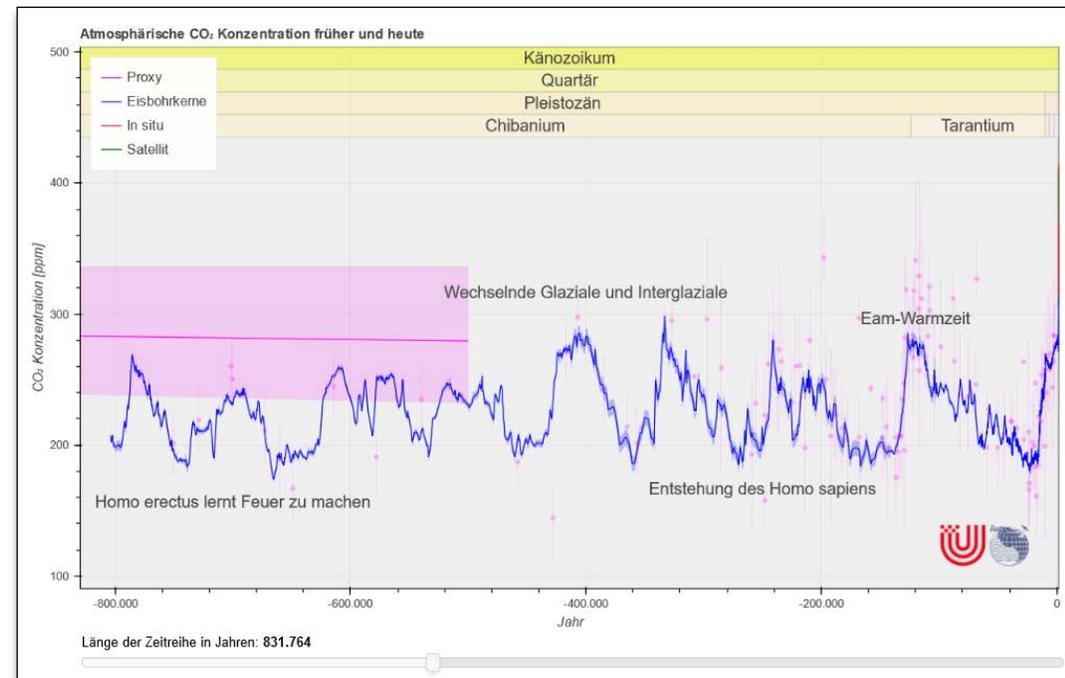


research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/Coronavirus-response-barely-slows-rising-carbon-dioxide



Messmethode: Eisbohrkerne

- Laboranalyse von Lufteinschlüssen in antarktischen Eisbohrkernen.
- Die Tiefe im Eis (bis zu mehr als 3km) erlaubt die Datierung der Messdaten.
- Die Daten reichen etwa 800.000 Jahre in die Vergangenheit.



icecores.org/about-ice-cores

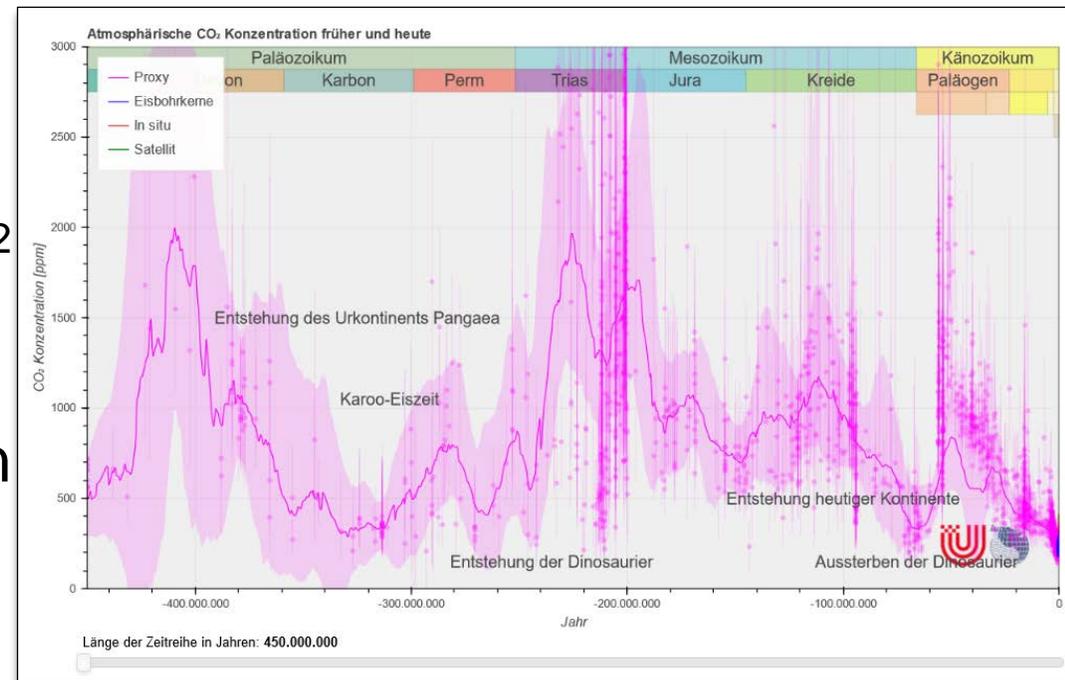


www.nasa.gov/content/goddard/concordia-station-at-dome-c/



Messmethode: Proxy

- Keine direkten Messungen der atmos. CO₂ Konz. in sehr ferner Vergangenheit.
- Es gibt Stellvertretergrößen, die einen bekannten Zusammenhang mit CO₂ haben und die aus Fossilien bestimmbar sind.
- Beispiel: Dichte von Spaltöffnungen (Stomata) von Blättern.
- Datierung: geochronologisch.



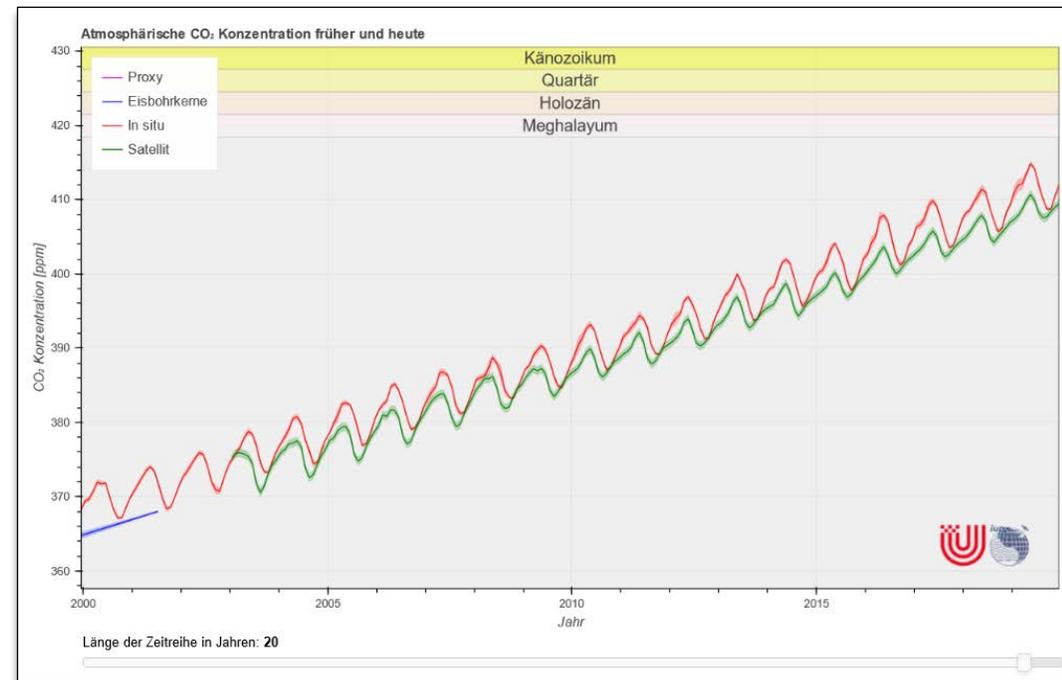
de.wikipedia.org/wiki/Lange_Anna



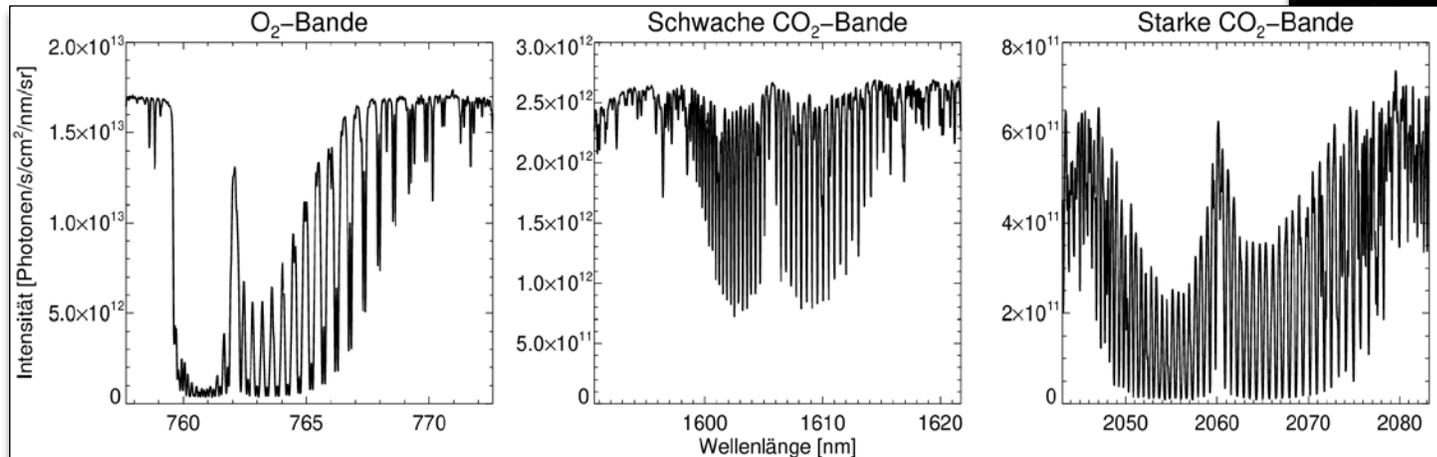
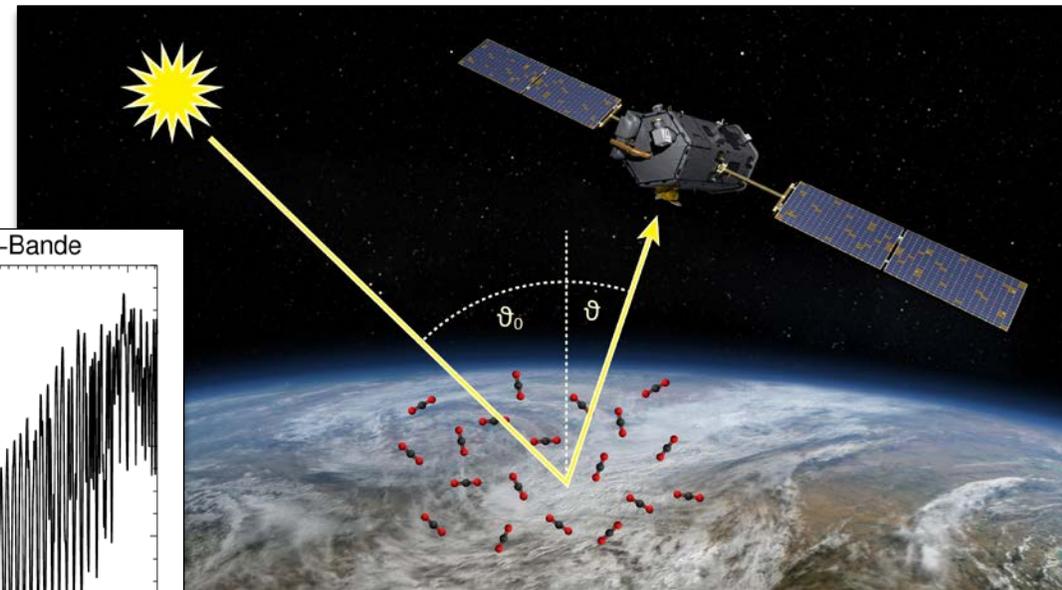


Messmethode: Satellit

- Analyse von reflektiertem Sonnenlicht.
- CO₂ absorbiert Teile des Lichts in spezifischen Spektralbanden.
- Die CO₂ Konzentration kann aus der Stärke der Absorption bestimmt werden.
- Prinzipiell globale Abdeckung.
- Die Messungen entsprechen einem Mittelwert der CO₂ Konzentration über alle Höhen in der Atmosphäre.



10



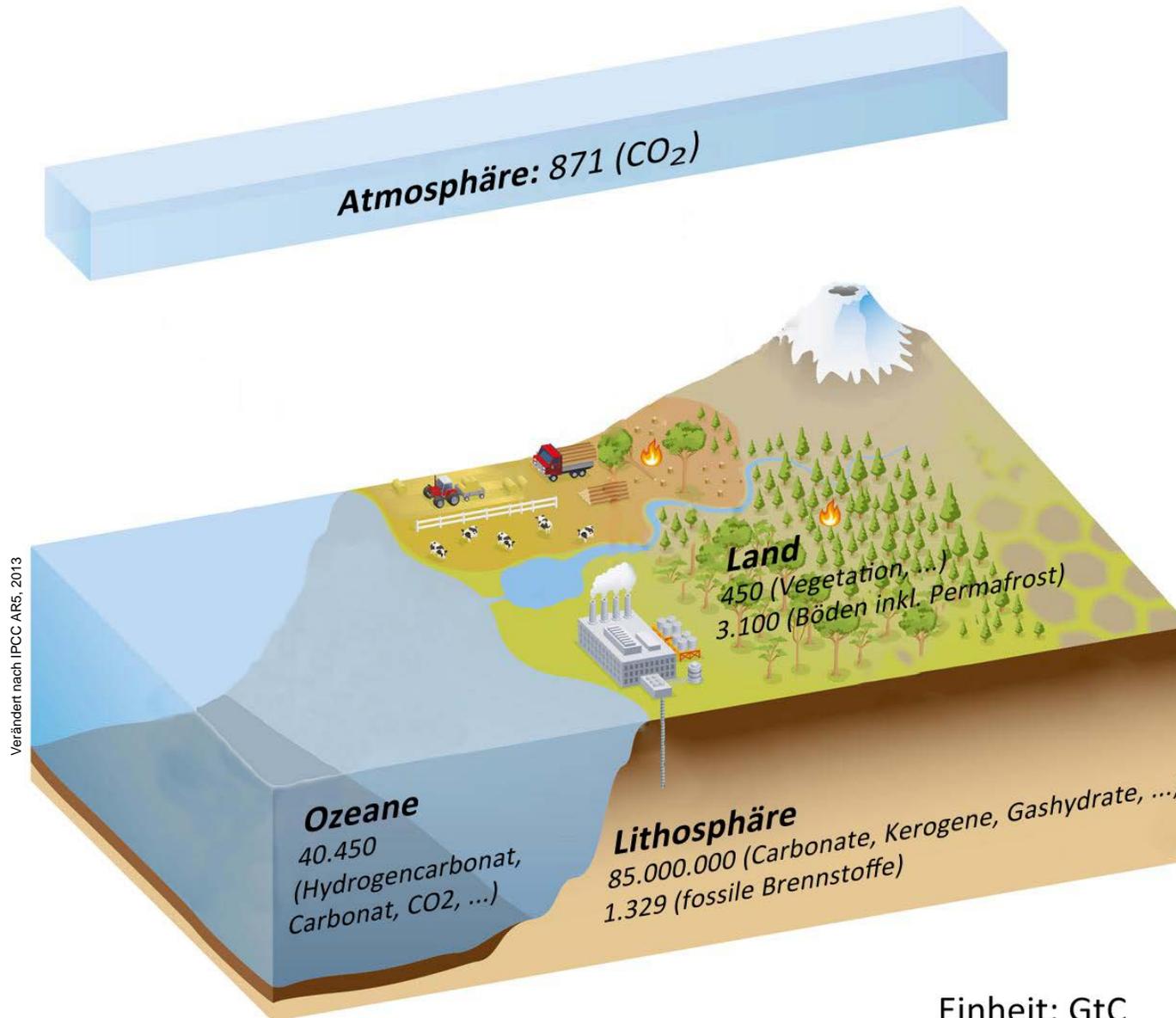


Grundlagen des Kohlenstoffkreislauf

- Die atmosphärische CO₂ Konzentration ist untrennbar mit den Prozessen des Kohlenstoffzyklus verbunden.
- Deshalb benötigt man für das Verständnis der CO₂ Zeitreihe ein paar Grundlagen des Kohlenstoffzyklus.



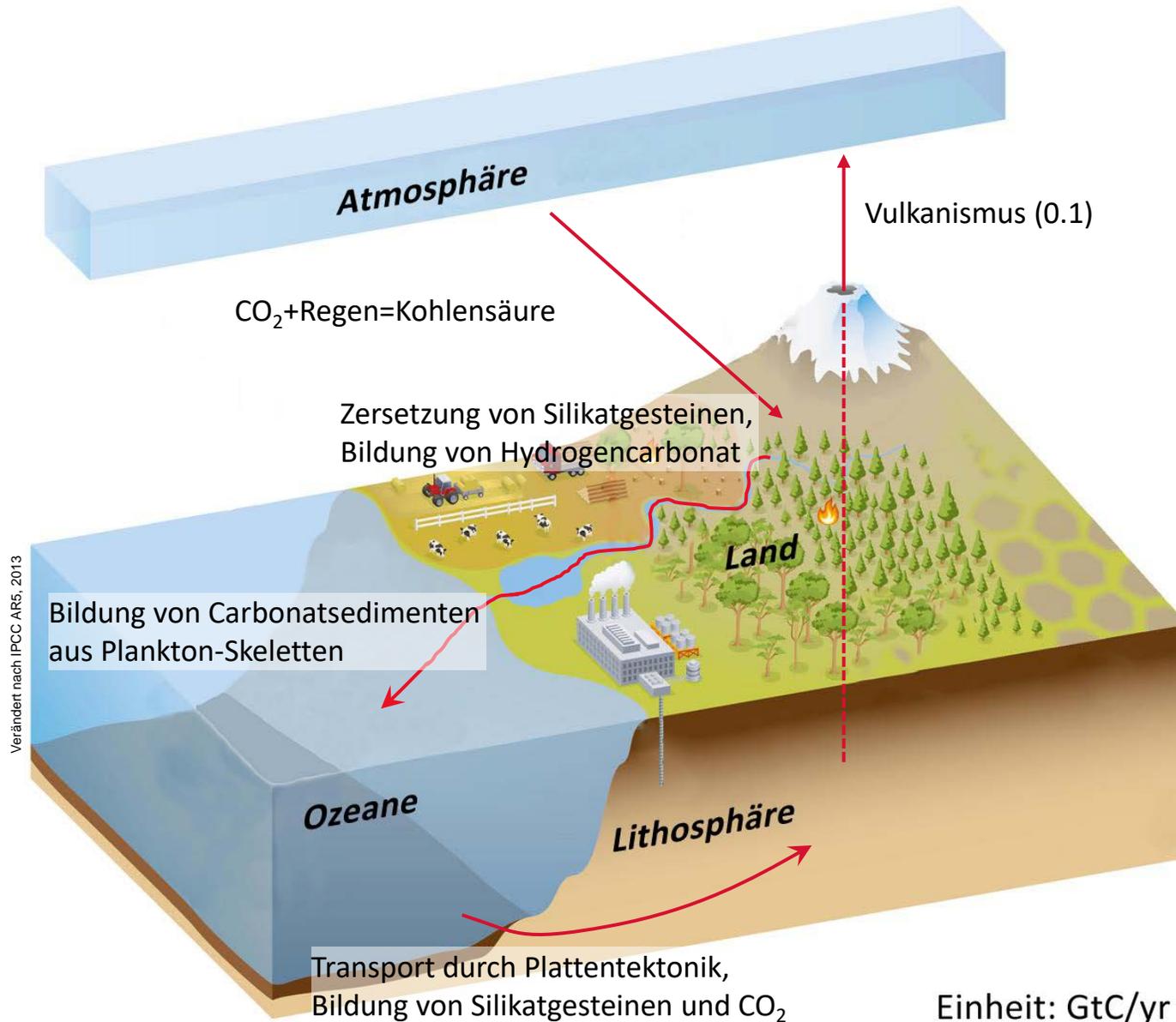
Kohlenstoff Reservoirs (vereinfacht)



- Im Erdsystem gibt es verschiedene Reservoirs für Kohlenstoff: Atmosphäre, Land, Ozean, Lithosphäre.
- Austausch findet durch physikalische, chemische, biologische und geologische Prozesse statt.
- In der Atmosphäre liegt Kohlenstoff fast ausschließlich als CO₂ vor.
- CO₂ ist hier chemisch sehr stabil und die Konzentration wird fast nur durch Austauschprozesse an der Erdoberfläche verändert.



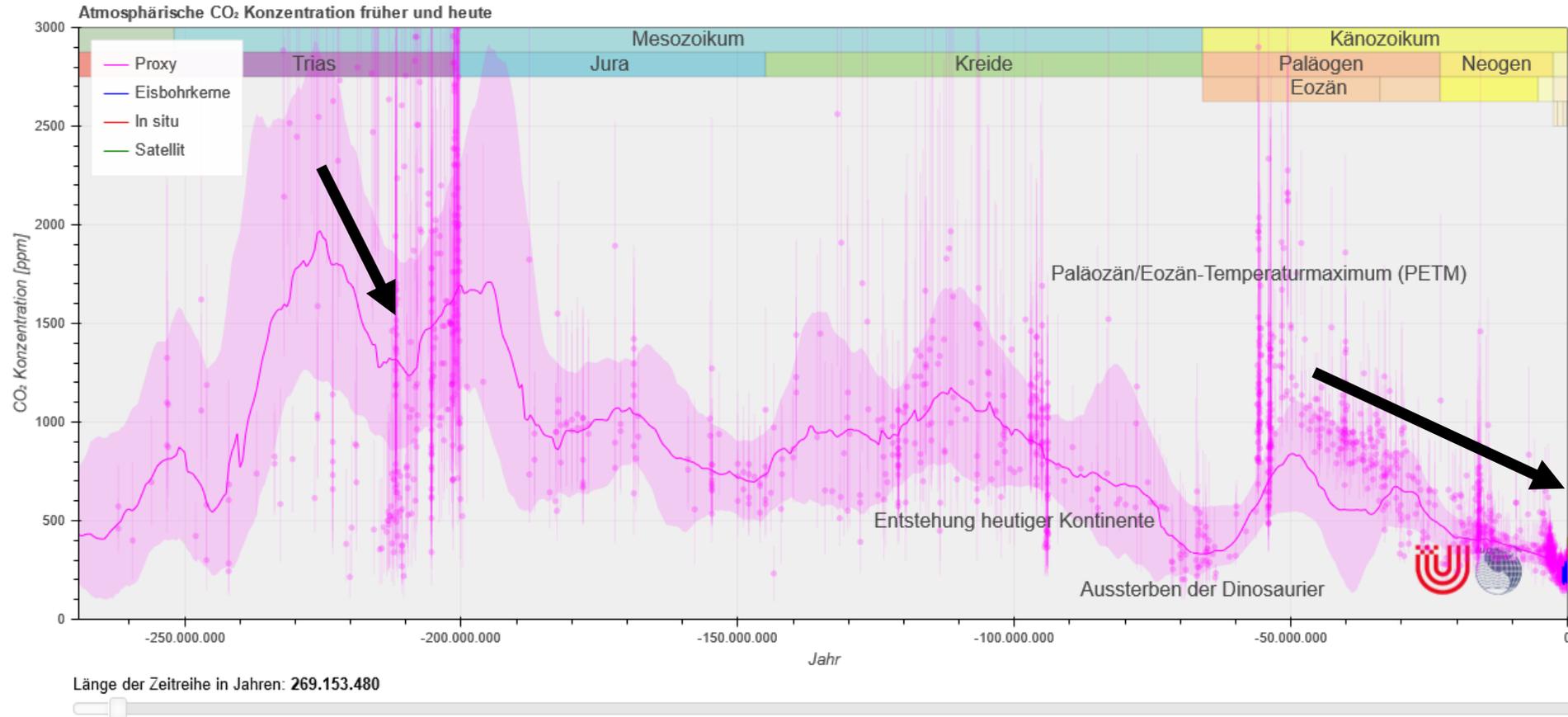
Langsamer Kohlenstoffzyklus (anorg., vereinfacht)



- Je nach Zeitskala der Austauschprozesse unterscheidet man zwischen langsamem und schnellem K.
- Ein wichtiger Teil des langsamen K. ist der Carbonat-Silicat-Zyklus (anorganische K.)
- Die Austauschraten sind sehr gering (0.1 GtC/yr).
- Auf Zeitskalen von vielen Mio. Jahren ist der anorg. K. entscheidend für die CO_2 Konzentration.

Verändert nach IPCC AR5, 2013

Langsamer Kohlenstoffzyklus (anorg., vereinfacht)



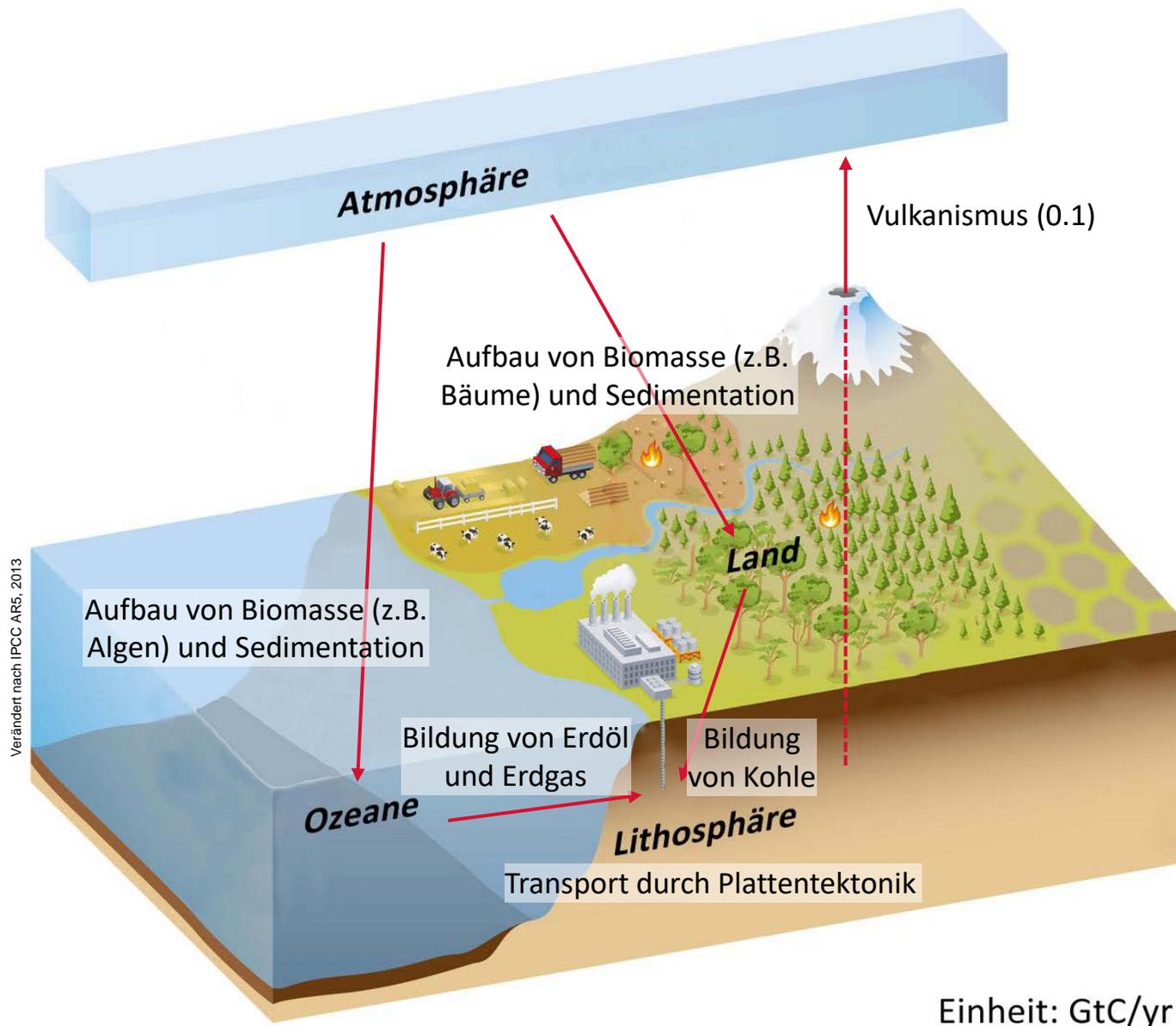
Abwärtstrend im späten Trias

- Drift des Superkontinents Pangaea
- Mehr Landmassen wurden einer stärkeren Silikat-Verwitterung unter tropischen Verhältnissen ausgesetzt.

Abwärtstrend seit 50 Mio Jahren

- Auffaltung des Himalaya und anderer Gebirgsketten
- Verstärkte Silikat-Verwitterung

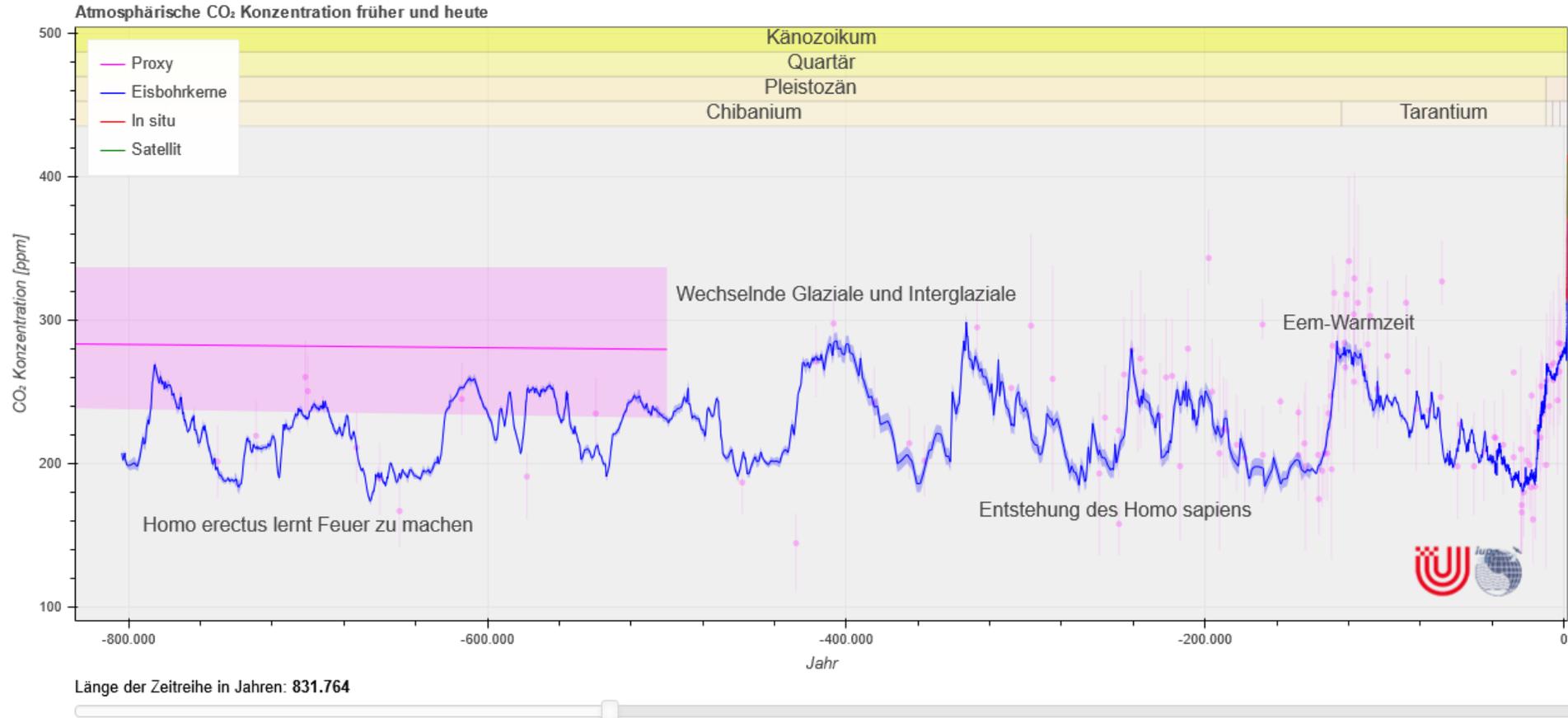
Langsamer Kohlenstoffzyklus (org., vereinfacht)



- Auch die Entstehung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und -gas sind Teil des langsamen K.
- Ihr Ursprung ist organisches Material, welches vor bis zu mehreren 100 Mio Jahren abgestorben und unter anaeroben Bedingungen sedimentiert ist.
- Man spricht auch vom organischen langsamen K.
- Die Austauschraten sind auch hier sehr gering (0.1 GtC/yr).



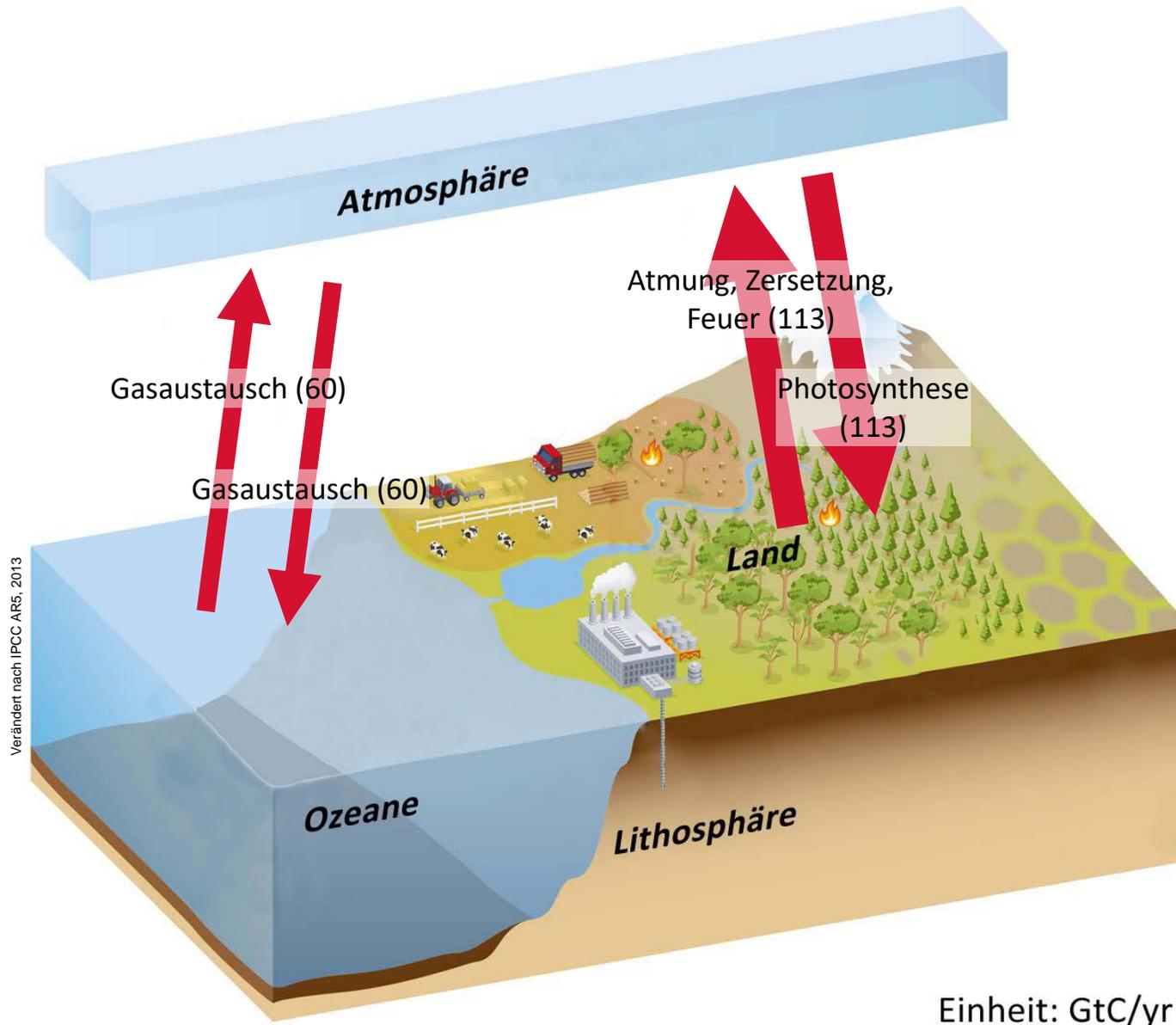
Externe Einflüsse



- Die Milankovic-Zyklen beschreiben periodische Änderungen des Erdborbits um die Sonne.
- Sie bewirken eine periodische Änderung der Sonneneinstrahlung und sind der Grund für Kalt- und Warmzeiten, die in den Eisbohrkerndaten sichtbar sind.
- In den Warmzeiten heizten sich die Ozeane auf, was CO₂ freisetzte.



Schneller Kohlenstoffz. (vorindustriell, vereinfacht)

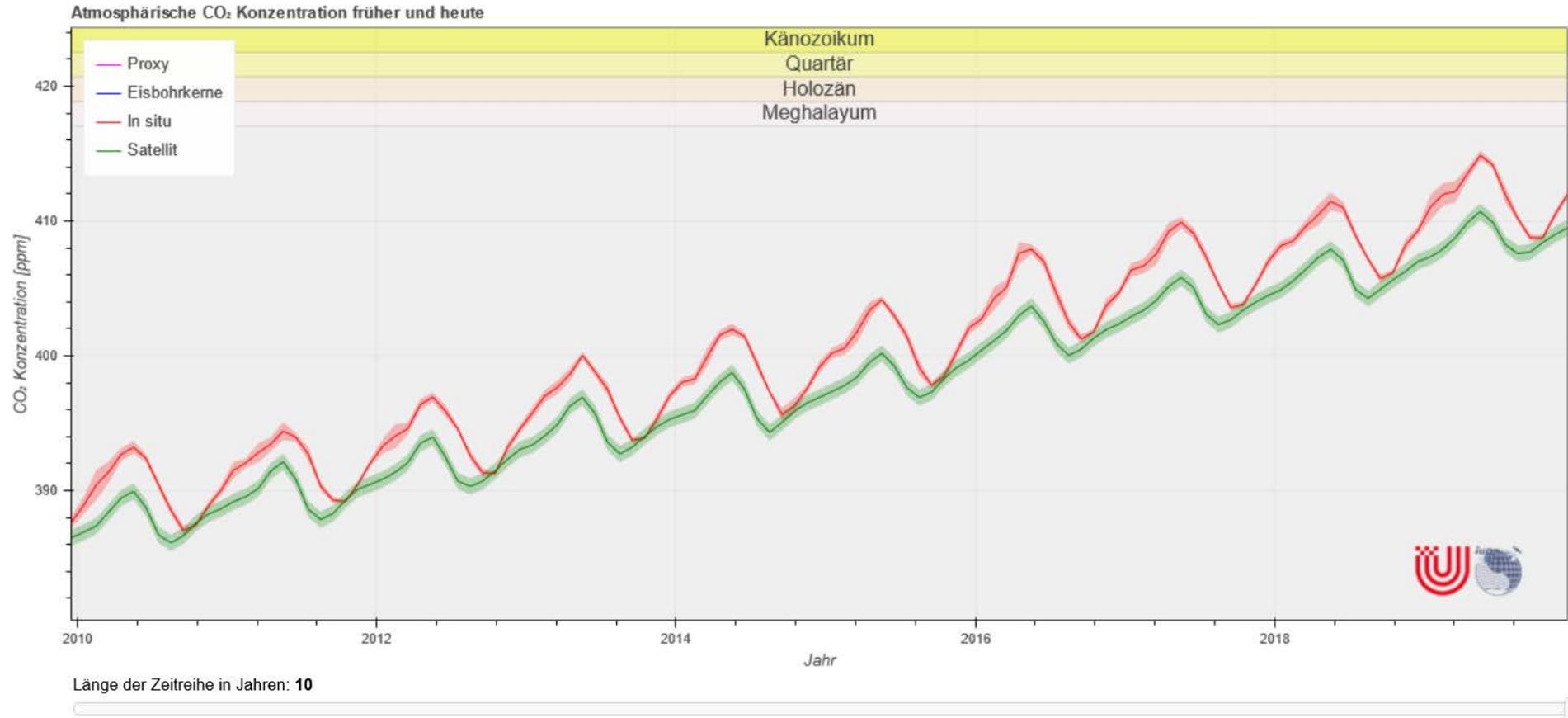


- Die größten Austauschraten im schnellen K. entstehen durch Photosynthese und Respiration.
- Bei der Photosynthese stellen Pflanzen aus CO_2 und Wasser Sauerstoff und Glucose her um Biomasse aufzubauen.
- Bei der Respiration gewinnen Pflanzen aus Glucose Energie und atmen dabei Sauerstoff ein und CO_2 aus.
- Die Prozesse des schnellen K. laufen auf Zeitskalen von Stunden bis Jahrhunderten ab.
- Da sie z.B. von der Sonneneinstrahlung und der Temperatur abhängen erzeugen sie einen Jahreszyklus.



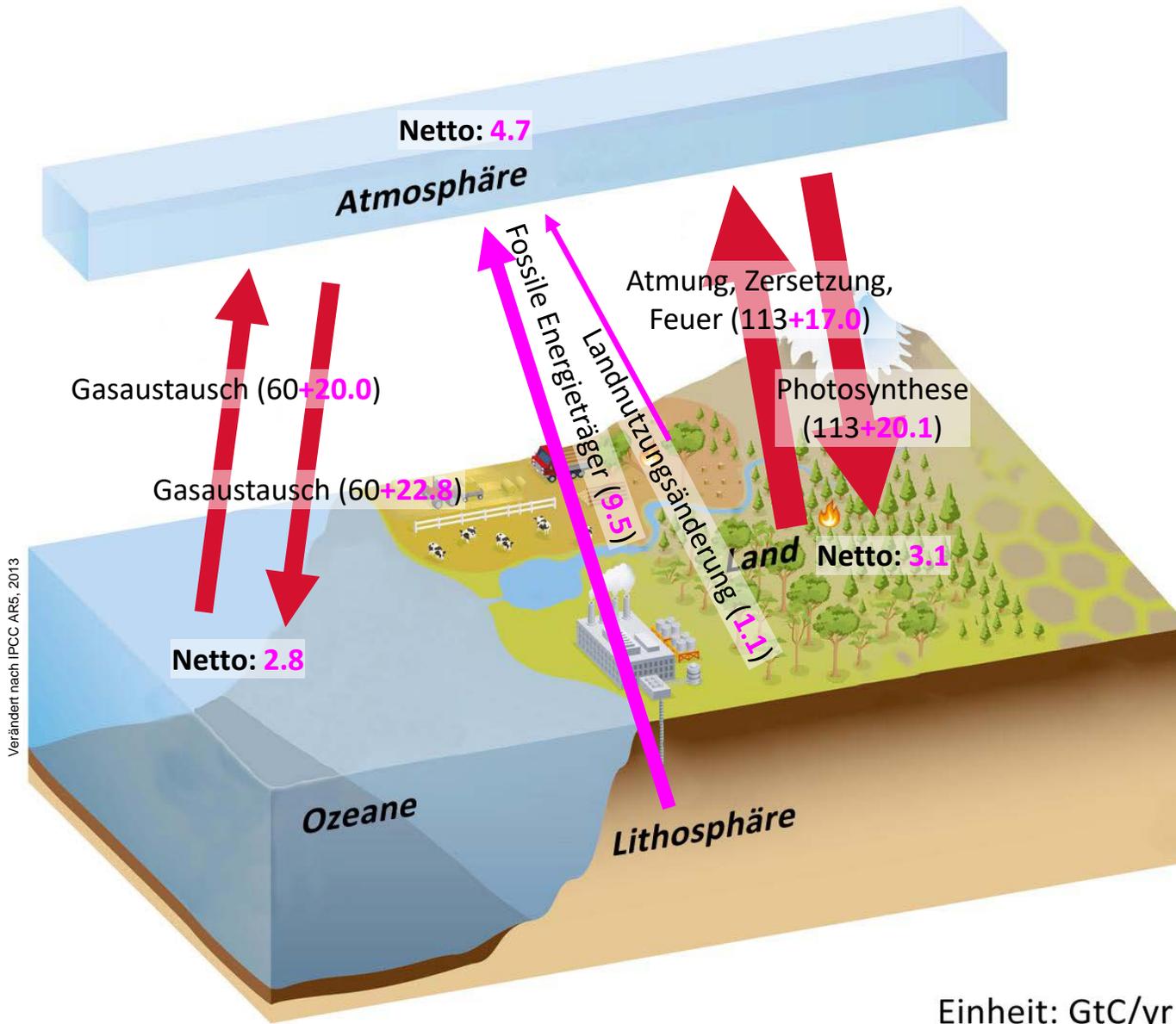
18

Externe Einflüsse



- Das Jahresmaximum/-minimum wird am Anfang/Ende der nordhemisphärischen Wachstumsperiode erreicht.
- Die In-situ-Daten zeigen eine größere Amplitude als die Satellitendaten, da sie von einer Messstation in der unteren Atmosphäre auf der Nordhalbkugel stammen. Die Satellitendaten sind außerdem global und repräsentieren alle Höhenschichten der Atmosphäre.

Schneller Kohlenstoffz. (heute, vereinfacht)

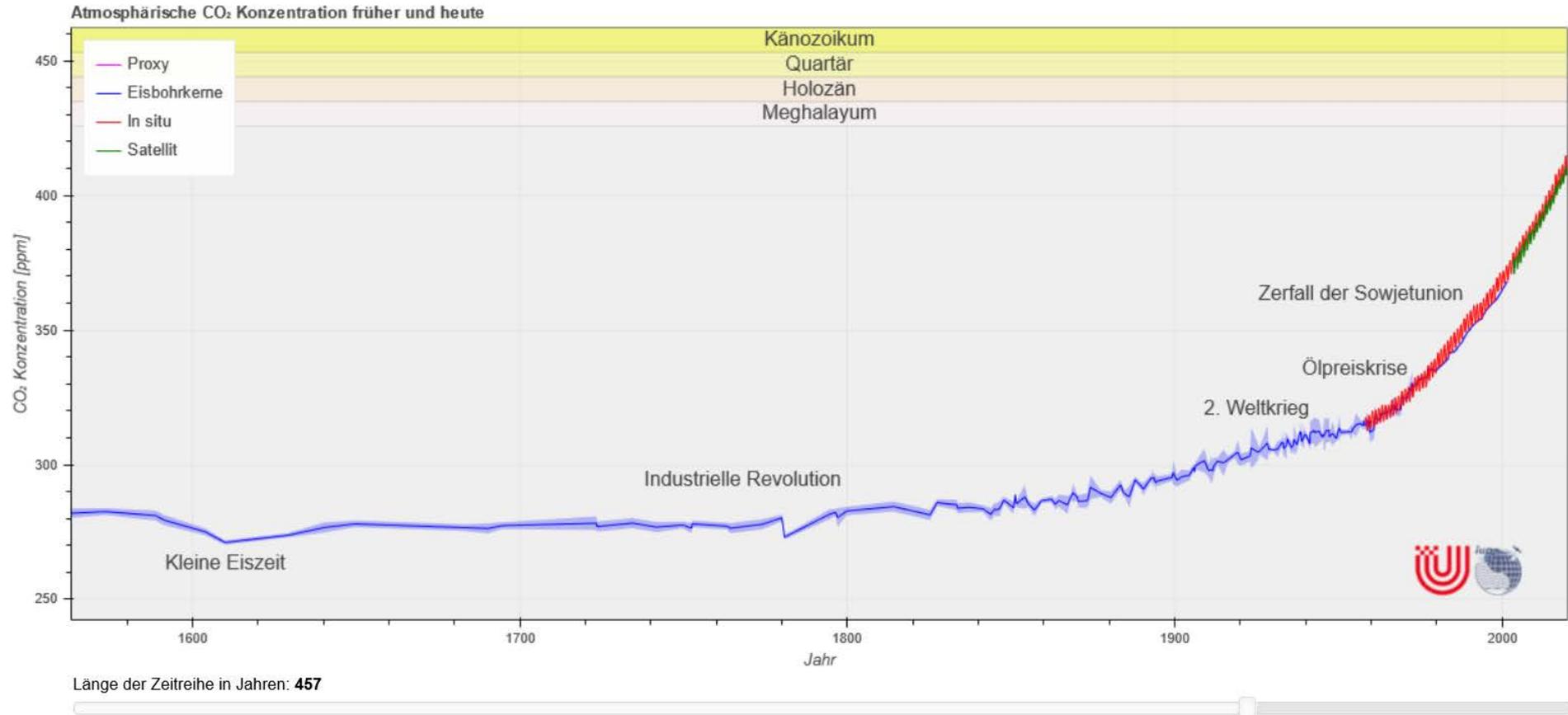


- Seit der industriellen Revolution wurden mehr und mehr fossile Brennstoffe zur Energieerzeugung eingesetzt.
- Dabei wird Kohlenstoff dem langsamen K entnommen und dem schnellen K zugeführt.
- Dies führte zu einem Anstieg der atmos. CO₂ Konzentration.
- Derzeit werden etwa 11GtC/yr vom Menschen emittiert.
- Die erhöhte Konzentration führte dazu, dass die natürliche Austauschraten gestiegen sind und etwa 6GtC/yr von der terrestrischen und marinen Biosphäre aufgenommen werden.





Schneller Kohlenstoffz. (heute, vereinfacht)



- Der Konzentrationsanstieg seit der industriellen Revolution ist unmittelbar sichtbar.
- Die Vergrößerung der Amplitude durch die Erhöhung der Austauschraten (z.B. durch CO₂ Düngung) ist nur bei genauerer Betrachtung der In-Situ-Daten möglich.



Aufgabe 1 (Anforderungsbereich: I+II)

- a) Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik die atmosphärische CO₂ Konzentration unmittelbar vor dem Beginn der industriellen Revolution im Jahr 1750 und am Ende des Jahres 2019 und nenne die Datensätze, die Du dafür verwendet hast.
- b) Berechne um wie viel Prozent die Konzentration angestiegen ist.
- c) Nenne den Hauptgrund für den beobachteten Anstieg.



Aufgabe 1 (Anforderungsbereich: I+II)

- Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik die atmosphärische CO₂ Konzentration unmittelbar vor dem Beginn der industriellen Revolution im Jahr 1750 und am Ende des Jahres 2019 und nenne die Datensätze, die Du dafür verwendet hast.
- Berechne um wie viel Prozent die Konzentration angestiegen ist.
- Nenne den Hauptgrund für den beobachteten Anstieg.

a) 1749: 278ppm (Eisbohrkerne). 12/2019: 412ppm (in situ).

b) Anstieg: $(412 - 278) / 278 * 100 = 48\%$.

c) Hauptgrund für den Anstieg: Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas).

Lernziel: Einfache Analyse einer Zeitreihe. Einfache Prozentrechnung. Der Anstieg der atmosphärischen CO₂ Konzentration ist menschengemacht. Quantifizierung des Anstiegs seit der Industrialisierung.



Aufgabe 2 (Anforderungsbereich: I+II+III)

- Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik wie stark die atmosphärische CO₂ Konzentration in den 10.000 Jahren vor Beginn der industriellen Revolution 1750 schwankte (Maximum - Minimum).
- Vergleiche dies mit dem Anstieg seit 1750.
- Diskutiere das Ergebnis.



Aufgabe 2 (Anforderungsbereich: I+II+III)

- Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik wie stark die atmosphärische CO₂ Konzentration in den 10.000 Jahren vor Beginn der industriellen Revolution 1750 schwankte (Maximum - Minimum).
- Vergleiche dies mit dem Anstieg seit 1750.
- Diskutiere das Ergebnis.

- Maximum: 284ppm (1530). Minimum: 258ppm (5088 BC). Differenz: 26ppm.
- Anstieg seit 1750: 134ppm.
- Der menschengemachte Anstieg ist viel größer und schneller als die natürlichen Schwankungen. Vor der industriellen Revolution war die CO₂ Konzentration 10.000 Jahre lang relativ konstant.

Lernziel: Einfache Analyse einer Zeitreihe. Finden von Minimum und Maximum. Der menschengemachte Anstieg ist viel größer und schneller als die natürlichen Schwankungen.



Aufgabe 3 (Anforderungsbereich: II)



Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik wann die atmosphärische CO₂ Konzentration schon einmal so hoch war wie im Mai 2019.

25

<https://fis.rub.de/klima/das-treibhausgas-co2-im-laufe-der-zeit>



Aufgabe 3 (Anforderungsbereich: II)



Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik wann die atmosphärische CO₂ Konzentration schon einmal so hoch war wie im Mai 2019.

26

Ca. 3.000.000 Jahre BC (Proxy Einzeldaten).

Lernziel: Es gab Erdzeitalter in denen die atmosphärische CO₂ Konzentration höher war als heute, diese sind aber sehr lange her.



Aufgabe 4 (Anforderungsbereich: II+III)

- Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik die mittlere Steigerungsrate in ppm/yr zu Beginn der Eem-Warmzeit (131.825BC bis 126.516BC).
- Vergleiche den Wert mit der Steigerungsrate zwischen 12/2009 und 12/2019.
- Diskutiere, warum die aktuelle Situation nicht mit früheren vergleichbar ist.



Aufgabe 4 (Anforderungsbereich: II+III)

- Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik die mittlere Steigerungsrate in ppm/yr zu Beginn der Eem-Warmzeit (131.825BC bis 126.516BC).
- Vergleiche den Wert mit der Steigerungsrate zwischen 12/2009 und 12/2019.
- Diskutiere, warum die aktuelle Situation nicht mit früheren vergleichbar ist.

- Steigerungsrate Eem-Warmzeit: 0,012ppm/yr.
Steigerungsrate 2009-2019: 2,435ppm/yr.
- Die heutige Änderung der CO₂-Konzentration geschieht ~200x schneller.
- Die Gründe für die Änderungen unterscheiden sich (Milankovic-Zyklen, Verbrennung fossiler Energieträger).

Lernziel: Numerische Bestimmung der Ableitung. Die heutige Klimaänderung geschieht viel schneller als frühere.



Wesentliche Erkenntnisse

- Ähnlich hohe Konzentrationen wie heute hat es in den letzten Millionen Jahren nicht gegeben.
- Vor der Industrialisierung war die CO₂ Konzentration etwa 10.000 Jahre lang relativ konstant.
- Die aktuelle Steigerungsrate ist wahrscheinlich größer als sie mindestens während der letzten 56 Millionen Jahre jemals war.