



# Wie hat sich die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

## Aufgaben und Musterlösungen

### Grundlagen

Nenne die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration üblicherweise angegeben wird und erläutere deren Bedeutung.

Einheit: ppm (*parts per million*). Bedeutung: Anzahl von CO<sub>2</sub> Molekülen pro eine Millionen Luftmoleküle.

**Anforderungsbereich: I**

**Lernziel:** Die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration üblicherweise gemessen wird und deren Bedeutung.

Nenne und beschreibe mit wenigen Worten vier Methoden mit denen die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration bestimmt werden kann.

In situ: Labor-analyse der Umgebungsluft. Eisbohrkerne: Labor-analyse von im Eis eingeschlossenen Luftblasen. Satellit: Analyse von Absorptionsstrukturen in reflektiertem Sonnenlicht. Proxy: Messung von Stellvertretergrößen (z.B. Stomata, Isotopenverhältnisse) in Sedimenten oder Fossilien, die einen bekannten Zusammenhang mit der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration haben.

**Anforderungsbereich: I+II**

**Lernziel:** Es gibt unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration. Kenntnis der Hauptmerkmale der Methoden.

Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik bis zu welchem Jahr die dargestellten Proxy-, Eisbohrkern-, In-situ- und Satellitendaten in die Vergangenheit zurückreichen.

Proxy: ca. 450 Millionen Jahre BC. Eisbohrkerne: ca. 800.000 Jahre BC. In situ: 1958. Satellit: 2003.

**Anforderungsbereich: II**

**Lernziel:** Vertiefung der Kenntnis der Hauptmerkmale der Methoden zur Bestimmung der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration, speziell deren zeitliche Abdeckung.

Diskutiere mögliche Gründe, warum kleine Unterschiede zwischen den Messwerten unterschiedlicher Verfahren keinen Widerspruch darstellen müssen.

Die gezeigten Satellitendaten entsprechen eher der globalen CO<sub>2</sub> Konzentration, die gezeigten In-situ- und Eisbohrkern-Daten eher einer lokalen. Annahmen über den Zusammenhang von Stellvertretergröße und atmosphärischem CO<sub>2</sub> können zu Unsicherheiten in den Proxy-Daten führen. Die zeitliche Zuordnung kann bei Eisbohrkern- und vor allem Proxy-Daten Unsicherheiten erzeugen. Die verwendeten Satellitenmessungen sind qualitätsgefiltert, so dass sie z.B. nur tagsüber und in wolkenfreien Gebieten zur Verfügung stehen.

**Anforderungsbereich: III**



# Wie hat sich die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

**Lernziel:** Umgang mit Messunsicherheiten und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messungen. Vertiefung der Kenntnis der Hauptmerkmale der Methoden zur Bestimmung der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration

## Kohlenstoffzyklus

Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik in welchen Monaten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration meistens ihr Jahresmaximum und –Minimum erreicht. Analysiere dazu die Jahre 2009 – 2019 der gezeigten In-situ-Daten, die von einer Messstation auf Hawaii stammen. Erkläre wie es zu dem Jahresgang kommt und diskutiere warum es Unterschiede zum Jahresgang der Satellitenmessungen gibt.

Maximum: Mai. Minimum: September. Der Jahresgang wird durch Photosynthese und Respiration dominiert. Während der Vegetationsperiode der Pflanzen überwiegt die Photosynthese, so dass das Jahresminimum am Ende und das Jahresmaximum unmittelbar vor Beginn der Vegetationsperiode erreicht wird. Die In-situ-Messstation befindet sich auf der Nordhalbkugel, wo die Vegetationsperiode vom Frühling bis in den Herbst reicht. Die Satellitenmessungen werden nahezu global erhoben (Nordhalbkugel und Südhalbkugel). Auf der Südhalbkugel befinden sich viel weniger Landflächen und somit auch viel weniger Pflanzen, wodurch die Amplitude des globalen Jahresganges reduziert wird.

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Grundlagen des schnellen Kohlenstoffzyklus (Photosynthese und Respiration). Vertiefung der Kenntnis der Eigenschaften von Satelliten- und In-situ-Messungen der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration.

Nenne Faktoren, die die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration auf Zeitskalen im Bereich vieler Millionen Jahre beeinflussen. Beschreibe in diesem Zusammenhang ein Ereignis anhand der interaktiven Grafik.

Die Prozesse des Carbonat-Silicat-Zyklus sind entscheidend für die atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentrationen auf Zeitskalen im Bereich vieler Millionen Jahre. Zu ihnen gehört z.B. die vulkanische Aktivität, oder die Größe der Verwitterung ausgesetzten Landfläche. Beispiel: Der Nordwärtsdrift des Superkontinents Pangea führte vor etwa 220 Millionen Jahren dazu, dass mehr Landmassen einer stärkeren Verwitterung unter tropischen Bedingungen ausgesetzt waren, was eine Reduktion der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration zur Folge hatte.

**Anforderungsbereich:** I+II

**Lernziel:** Grundlagen des langsamen Kohlenstoffzyklus.

Beschreibe den Grund für die in den Eisbohrkerndaten sichtbaren (siehe interaktive Grafik) zyklisch auftretenden Schwankungen der CO<sub>2</sub> Konzentration mit einer Periodendauer von ungefähr 100.000 Jahren.

Wechselnde Glazial- und Interglazialphasen (Kalt- und Warmzeiten) aufgrund von periodischen Änderungen des Erdborbits (Milanković-Zyklen). Änderungen des Erdborbits führen zu Änderungen der Sonneneinstrahlung und damit zu Änderungen der Ozeantemperatur, welche wiederum die



# Wie hat sich die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration beeinflusst.

**Anforderungsbereich:** II

**Lernziel:** Auch externe Bedingungen, wie die periodischen Änderungen des Erdbits haben einen Einfluss auf den Kohlenstoffzyklus und damit auf das Klima.

Der Anthropogene Einfluss auf die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration

Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration zu Beginn der industriellen Revolution im Jahr 1750 und am Ende des Jahres 2019. Nenne die Datensätze, die Du dafür betrachtet hast und berechne um wie viel Prozent die Konzentration angestiegen ist. Nenne den Hauptgrund für den beobachteten Anstieg.

1750: 278ppm (Eisbohrkerne). 12/2019: 412ppm (in situ). Anstieg: 48%. Hauptgrund für den Anstieg: Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas).

**Anforderungsbereich:** I+II

**Lernziel:** Einfache Analyse einer Zeitreihe. Einfache Prozentrechnung. Der Anstieg der atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration ist menschengemacht. Quantifizierung des Anstiegs seit der Industrialisierung.

Bestimme mit Hilfe der interaktiven Grafik wann die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration schon einmal so hoch war wie im Mai 2019.

Ca. 2.856.320 Jahre BC (Proxy Einzeldaten).

**Anforderungsbereich:** II

**Lernziel:** Es gab Erdzeitalter in denen die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration höher war als heute.

Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik wie stark die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den 10.000 Jahren vor Beginn der industriellen Revolution 1750 schwankte (Maximum - Minimum) und vergleiche dies mit dem Anstieg seit 1750 und diskutiere das Ergebnis.

Maximum: 284 (1530). Minimum: 258 (5088 BC). Schwankung: 26ppm. Anstieg seit 1750: 134ppm. Der menschengemachte Anstieg ist viel größer und schneller als die natürlichen Schwankungen.

**Anforderungsbereich:** I+II+III

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

Die Atmosphäre enthielt im Zeitraum 2010 – 2019 871GtC (Gigatonnen Kohlenstoff) in Form von CO<sub>2</sub>. Schätze mit Hilfe der interaktiven Grafik die mittlere CO<sub>2</sub> Konzentration für diesen Zeitraum ab, indem Du den Mittelwert der In-situ-CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von Juli 2010 und Juli 2019 berechnest.

Mittlere Konzentration: 401ppm. 1GtC  $\triangleq$  0,46ppm.

**Anforderungsbereich:** II



# Wie hat sich die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

**Lernziel:** Mittelwertberechnung. Verknüpfung des atmosphärischen Kohlenstoffgehaltes mit der CO<sub>2</sub> Konzentration als Vorbereitung für die folgende Aufgabe.

Die Menschen haben in den Jahren 2010 – 2019 etwa 11GtC (Gigatonnen Kohlenstoff) pro Jahr in Form von CO<sub>2</sub> hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Berechne mit Hilfe des Ergebnisses der letzten Aufgabe, um wie viel die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration pro Jahr gestiegen wäre, wenn die gesamte emittierte Menge in der Atmosphäre verblieben wäre. Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik die tatsächliche mittlere Konzentrationsänderung pro Jahr für diesen Zeitraum und benenne den Datensatz, den Du dafür verwendet hast. Berechne wie viel Prozent des emittierten CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre verblieb und diskutiere welche Senken das übrige CO<sub>2</sub> aufgenommen haben. Diskutiere das Ergebnis im Hinblick auf die Stabilität der CO<sub>2</sub> Konzentration.

Hypothetische Steigerung: 5.06ppm/a. Tatsächliche Steigerung: 2.46ppm/a (in situ). Tatsächliche Steigerung = 48,6% der hypothetischen Steigerung. Das übrige CO<sub>2</sub> wurde zu etwa gleichen Teilen von der terrestrischen und marinen Biosphäre aufgenommen. D.h. die derzeit höheren Konzentrationen bewirken eine Verstärkte Aufnahme von CO<sub>2</sub> durch die Biosphäre, was stabilisierend auf die CO<sub>2</sub> Konzentration wirkt.

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziele:** Einfache Prozentrechnung. Die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration steigt weniger stark an, als man es von den Emissionen vermuten könnte. Die terrestrische und marine Biosphäre nimmt einen Teil der Emissionen auf und wirkt deshalb stabilisierend.

Berechne mit Hilfe der interaktiven Grafik die mittlere Steigerungsrate in ppm/a zu Beginn der Eem-Warmzeit in der Periode 131.825BC bis 126.516BC sowie in der Periode 239 Millionen Jahre BC bis 235 Millionen Jahre BC im Erdmittelalter. Vergleiche die Werte mit der mittleren Steigerungsrate vom Beginn der industriellen Revolution 1750 bis Dezember 2019. Diskutiere, warum die heute Situation nicht mit früheren Klimaänderungen vergleichbar ist.

Steigerungsrate Eem-Warmzeit: 0,012ppm/a. Steigerungsrate Erdmittelalter: 0,00012ppm/a.

Steigerungsrate seit 1750: 0,5ppm/a. Diese ist etwa 41,67- bzw. 4167-mal größer als die zuvor bestimmten Steigerungsraten. Diskussion: Die heutigen Änderungen der CO<sub>2</sub> Konzentration geschehen viel schneller als frühere. Damit ändern sich auch die bodennahen Temperaturen viel schneller.

**Anforderungsbereich:** II+III

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



# Wie hat sich die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration in den letzten 450 Millionen Jahren entwickelt?

---

Bestimme mit Hilfe der in der interaktiven Grafik dargestellten In-Situ-Daten die mittleren jährlichen Steigerungsraten der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration für jede Dekade seit den 1960er Jahren. Zeichne ein Diagramm Deiner Ergebnisse und diskutiere diese.

Steigerungsraten: 1960er – 2010er Jahre: 0,854ppm/a; 1,269ppm/a; 1,610ppm/a; 1,535ppm/a; 1,937ppm/a; 2,435ppm/a. Die Steigerungsrate hat, mit Ausnahme der 1990er Jahre, in denen der Zerfall der Sowjetunion stattfand, kontinuierlich zugenommen.

**Anforderungsbereich:** II+III

**Lernziel:** Analyse einer Zeitreihe. Numerische Bestimmung der Ableitung. Anfertigung eines Diagramms. Die Steigerungsrate nimmt zu.