

---

# Der Kohlenstoffkreislauf

Themenheft zu den Grundlagen des Klimawandels

---

© Marc Eyer, 2009

Abteilung Physik, Gymnasium Neufeld, Bern

## 1 Die Verteilung des Kohlenstoffs auf der Erde

 Auf der Erde lassen sich vier grosse Kohlenstoff-Reservoirs unterscheiden; Die **Atmosphäre, die Biosphäre, der Ozean und die Sedimente**.

Um zu beschreiben, wie viel Kohlenstoff sich in den jeweiligen Reservoirs befindet benutzt man die Anzahl Mol oder auch die Masse an Kohlenstoff. Quantifiziert man die Masse des Kohlenstoffs stellt man fest, dass es sich in den jeweiligen Reservoirs global um unglaublich viel Kohlenstoff handelt. Man verwendet daher die Einheit:

**1 GtC (Giga-Tonne Kohlenstoff)**

Unabhängig von der Form und der chemischen Zusammensetzung, in welcher der Kohlenstoff vorkommt, bezieht man sich mit dieser Einheit auf die Masse an C-Atomen.

Kommt der Kohlenstoff in einer molekularen Zusammensetzung vor, so verwendet man auch häufig die Einheit

**1 ppmv (Part per Million volume),**

was soviel bedeutet, wie *ein Volumen Anteil auf eine Million Volumen Anteile*. Wenn du beispielsweise nachliest, dass unsere Atmosphäre momentan 385 ppmv CO<sub>2</sub> enthält, so bedeutet das, dass es 385 Volumen-Anteile CO<sub>2</sub> auf 10<sup>6</sup> Volumen-Anteile Luft gibt. 1 ppmv CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre entspricht heute einem Kohlenstoffinventar von 2.123 GtC.



1. Rechne den Wert 1 GtC in Kilogramm Kohlenstoff um!
2. Berechne aus der Angabe, dass 1 ppmv CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre einem Kohleninventar von 2.123 GtC entspricht, das gesamte Kohlenstoffinventar der Atmosphäre, wenn die heutige CO<sub>2</sub> Konzentration 380 ppmv beträgt. Nehme dazu an, dass der gesamte Kohlenstoff in der Atmosphäre in der Form von CO<sub>2</sub> vorkommt (was eine vertretbare Näherung ist, siehe nächster Abschnitt!).

### Kohlenstoff in der Atmosphäre

Die Menge an Kohlenstoff in der Atmosphäre beträgt heute rund 810 GtC und nimmt jährlich um etwa **3.4 GtC zu**. In der Atmosphäre kommt der Kohlenstoff hauptsächlich in Form von CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) vor. Die aktuelle Konzentration beträgt zwischen 380 und 385 ppmv und nimmt pro Jahr zwischen **1.5 und 2 ppmv zu**.

In viel geringeren Anteilen kommt der Kohlenstoff aber auch in Form von CH<sub>4</sub> (Methan, 1.7 ppmv) und Kohlenmonoxid (CO, 0.1 ppmv) vor.

Sowohl das Kohlendioxid, wie auch das Methan wirken in der Atmosphäre als Treibhausgase (→Arbeitsheft *Der Treibhauseffekt*). Die Treibhausgaswirkung eines Methan-Moleküls ist gar um ein Vielfaches grösser, als die eines CO<sub>2</sub> Moleküls. Methan gibt es allerdings etwa 200 Mal weniger als CO<sub>2</sub>. Der Methangehalt hat sich aber in den vergangenen 200 Jahren mehr als verdoppelt!

## Kohlenstoff im Ozean

Der Ozean ist das grösste Kohlenstoffreservoir, das für das klimatische Geschehen in unseren Zeitdimensionen entscheidend ist. Er beinhaltet rund 40'000 GtC. Der Kohlenstoff kommt hier hauptsächlich in verschiedenen anorganischen Verbindungen (*DIC*, dissolved inorganic carbon) vor und ein wenig in gelöster organischer Form (*DOC*, dissolved organic carbon). Die wichtigsten anorganischen chemischen Verbindungen sind:

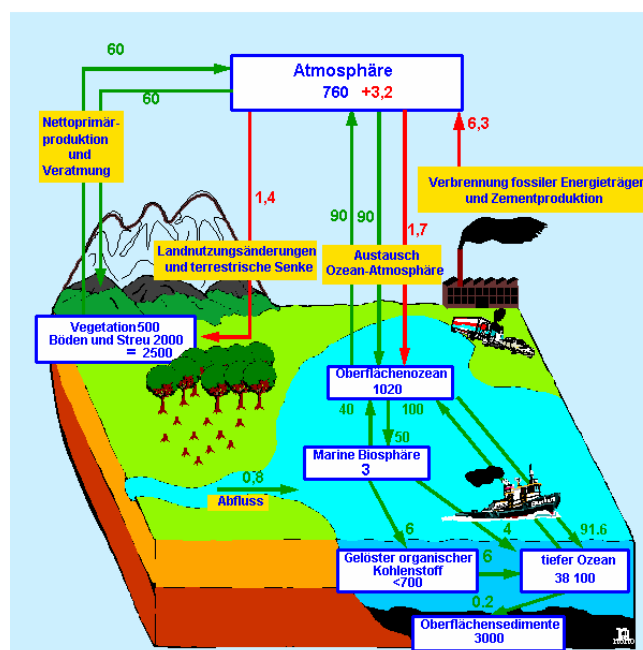
- Karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ); 10%
- Bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), 90%
- Gelöstes  $\text{CO}_2$ -Gas; 0.5%

## Kohlenstoff in der Biosphäre

Der Kohlenstoff der Biomasse kann ganz grob vereinfacht als Glukose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  angesehen werden. In der Biosphäre sind über das Jahr gemittelt rund 2500 GtC gespeichert. Dabei unterliegt dieser Wert jahreszeitlichen Schwankung, da während der Vegetationsperiode viel mehr Kohlenstoff in den Pflanzen gebunden ist als dazwischen (vgl. Abbildung 2.).

## Kohlenstoff im Sediment

Ein riesiges Kohlenstoffreservoir ist das Sediment. Es beinhaltet etwa 72 Millionen GtC. Der Kohlenstoff ist darin hauptsächlich als  $\text{MgCO}_3$  (Magnesiumkarbonat) oder  $\text{CaCO}_3$  (Kalziumkarbonat oder Kalk) gespeichert. Für die den Menschen betreffenden Klimaprozesse ist allerdings der Kohlenstoff im Sediment unbedeutend, da er nur extrem langsam mit den anderen Reservoiren austauscht.



**Abbildung 1:** Übersicht über die Kohlenstoffinventare und -Austauschflüsse der Erde. Die Zahlen haben die Einheit GtC für Inventare und GtC/Jahr für Flüsse. Die Abbildung ist bereits etwas veraltet und zeigt die Zahlen für 1990. (Quelle: Max Plank Institut für Meteorologie; nach Norbert Noreiks)

## 2 Aufenthaltszeiten

Wenn die Menge an Kohlenstoff in einem Reservoir  $M_C$  konstant bleibt, so ist die sogenannte *mittlere Aufenthaltszeit*  $\bar{\tau}$  definiert als

$$\tau = \frac{M_C}{F_C},$$

wobei  $F_C$  der Kohlenstoff-Fluss ins Reservoir, bzw. aus dem Reservoir hinaus bedeutet.

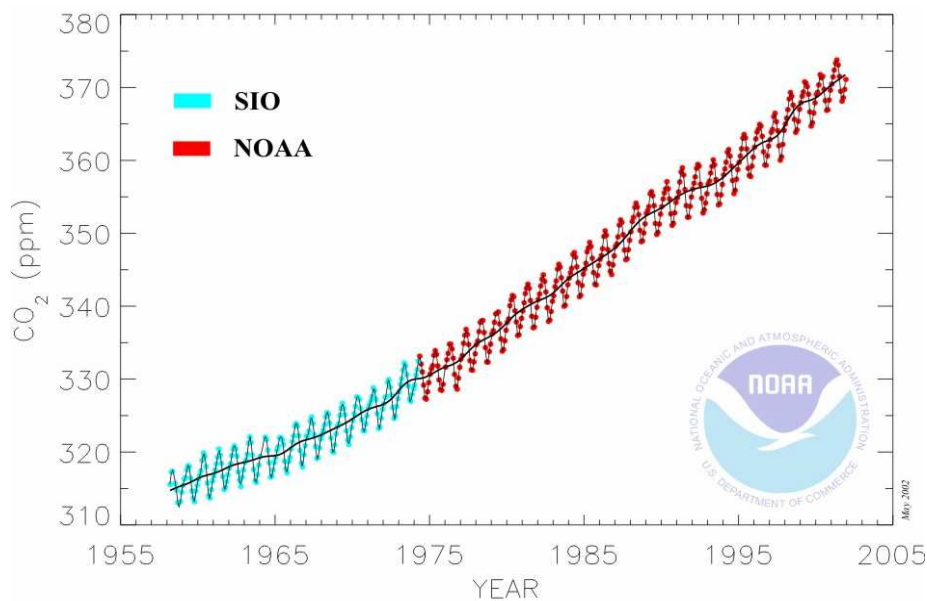


3. Berechne die mittlere Aufenthaltszeit eines  $\text{CO}_2$  Moleküls in der Atmosphäre aufgrund der Zahlen aus Abbildung 1 unter Vernachlässigung der vom Menschen verursachten Störungen (rote Pfeile).

Bei einigen Reservoirs, wie zum Beispiel dem Sediment, ist die mittlere Aufenthaltszeit des Kohlenstoffs so gross, dass sie für das Klimasystem, das uns Menschen betrifft, nicht von Bedeutung sind. Gelangt Kohlenstoff in diese Reservoirs, so ist er dem Kohlenstoffkreislauf auf sehr lange Zeit entzogen.

## 3 Der Eingriff des Menschen

Seit rund 200 Jahren macht das Verhalten des Menschen sich im Kohlenstoffkreislauf der Erde bemerkbar. Bewusst ist dies den Menschen aber erst seit die Wissenschaftler Mitte des vergangenen Jahrhunderts begonnen haben, systematische Aufzeichnungen der  $\text{CO}_2$  Konzentration der Atmosphäre zu machen. Erstaunlicherweise hat es aber ein weiteres halbes Jahrhundert gedauert, bis namhafte Politiker begonnen haben, auch die breite Bevölkerung darauf aufmerksam zu machen. Die atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Messungen von der Messstation auf dem Mauna Loa (Hawaii) sind heute überall bekannt.



**Abbildung 2:** Monatlich gemittelte atmosphärische  $\text{CO}_2$  Konzentration. Die Daten stammen vor 1974 vom Scripps Institution of Oceanography (SIO, blau) und später von der National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA, rot).



4. Erkläre die Struktur (das „Auf und Ab“) im Verlauf der CO<sub>2</sub> Konzentration in Abbildung 2.
5. Berechne aus den Angaben in Abbildung 2 die jährliche Zunahme der CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre.
6. Berechne wie viel GtC die Biosphäre während der Vegetationsperiode an sich bindet.

Der totale Kohlenstoff-Ausstoss in die Atmosphäre beträgt heute etwa 7 bis 9 GtC pro Jahr, das in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangt. Dieser Ausstoss setzt sich folgendermassen zusammen:

<i>Quelle</i>	<i>Menge [GtC pro Jahr]</i>
Verbrennung fossiler Brennstoffe	6
Waldrodungen	0.6 – 2.5

**Tabelle 1:** Jährlicher Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre

Wie kann nun aber bewiesen werden, dass es sich bei dem CO<sub>2</sub> Anstieg um einen vom Menschen verursachten Anstieg handelt?

#### 4 Der Suess-Effekt

CO<sub>2</sub> ist nicht gleich CO<sub>2</sub>! Das Molekül CO<sub>2</sub> besteht aus einem Kohlenstoff- und zwei Sauerstoffatomen. Unter den jeweiligen Elementen gibt es aber Variationen, sogenannte Isotope (→Arbeitsheft *Das Palaeothermometer*). Beim Kohlenstoff gibt es zwei stabile Isotope, alle anderen sind radioaktiv und zerfallen früher oder später. Die beiden stabilen Isotope sind das <sup>12</sup>C und das <sup>13</sup>C. Das <sup>12</sup>C ist das in der Natur am häufigsten vorkommende. 98.9 % des stabilen Kohlenstoffs auf der Erde sind <sup>12</sup>C Isotope und nur 1.1 % <sup>13</sup>C Isotope.

In verschiedenen Kohlenstoff-Reservoirs ist der Anteil an <sup>13</sup>C aber nicht überall gleich. Das hängt damit zusammen, dass das <sup>13</sup>C Isotop etwas schwerer ist, als das <sup>12</sup>C und sich daher in physikalischen und chemischen Prozessen nicht ganz gleich verhält, wie das <sup>12</sup>C Isotop. So bevorzugen Pflanzen zum Beispiel bei der Photosynthese das CO<sub>2</sub> mit einem <sup>12</sup>C Isotop und haben also verhältnismässig wenig <sup>13</sup>C gebunden.

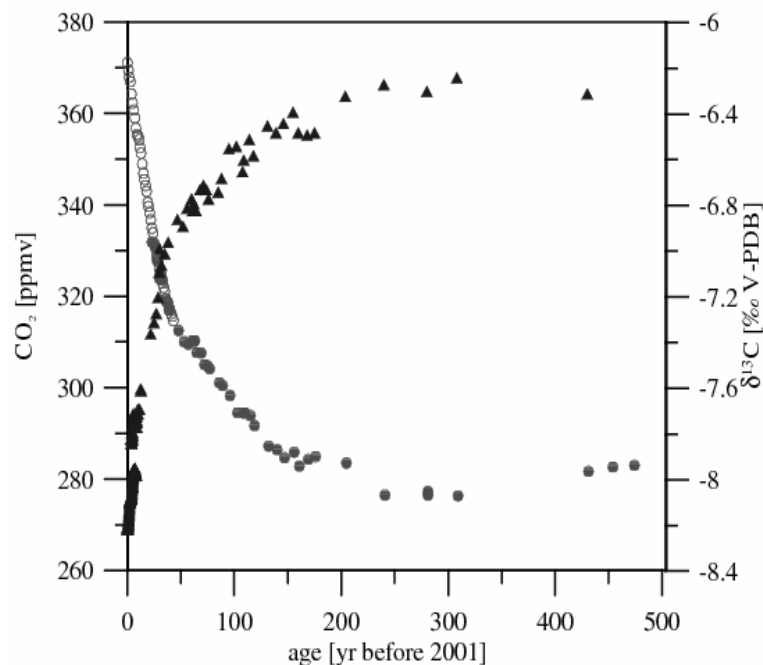
Um den Anteil an <sup>13</sup>C (häufig spricht man auch von der <sup>13</sup>C-Signatur) eines Kohlenstoffreservoirs mit anderen zu vergleichen, gibt man den <sup>13</sup>C Gehalt gegenüber einem internationalen Standard an. Bei diesem Standard handelt es sich um ein ganz bestimmtes Kalk-Sediment, den Pee-Dee-Belemnite, eine Sedimentschicht in South Carolina. In der Atmosphäre war das Verhältnis von <sup>13</sup>C zu <sup>12</sup>C in vorindustrieller Zeit beispielsweise etwa 6.4 ‰ kleiner als in diesem verwendeten Standard. Die Atmosphäre hatte also eine <sup>13</sup>C-Signatur von -6.4 ‰ V-PDB (versus **Pee-Dee-Belemnite**).

Die drei wichtigsten Kohlenstoff-Reservoirs die folgende  $^{13}\text{C}$  Signatur:

<i>Reservoir</i>	<i><math>^{13}\text{C}</math>-Signatur</i>
Atmosphäre (vorindustriell)	-6.4 ‰
Atmosphäre (heute)	-8.5 ‰
Biosphäre	-24 ‰
Ozean	0 ‰

**Tabelle 2:**  $^{13}\text{C}$ -Signatur der drei wichtigsten Kohlenstoffreservoirs.

Es ist nun sehr interessant, bei der Beobachtung der Veränderung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$  Konzentration gleichzeitig die Veränderung der  $^{13}\text{C}$ -Signatur zu beobachten. In der Abbildung 2 ist dies für die letzten 500 Jahre gemacht:



**Abbildung 3:** Die grauen Kreise symbolisieren die  $\text{CO}_2$  Konzentration der Atmosphäre und beziehen sich auf die linke y-Achse. Die schwarzen Dreiecke zeigen die  $^{13}\text{C}$ -Signatur der Atmosphäre über die letzten 500 Jahre und beziehen sich auf die rechte y-Achse.

Während der Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre von 280 ppmv auf (heute) etwa 380 ppmv den meisten bekannt sein dürfte, verblüfft auf den ersten Blick die Veränderung der  $^{13}\text{C}$  Signatur der Atmosphäre. Die Veränderung der  $^{13}\text{C}$  Signatur verläuft genau umgekehrt. Man nennt dies den *Suess-Effekt*. Was hat er zu bedeuten?



7. Versuche vorerst selber eine Erklärung für das „Zusammenstürzen“ der  $^{13}\text{C}$  Signatur der Atmosphäre zu finden. Tipp: Überlege dir, Kohlenstoff aus welcher Quelle die  $^{13}\text{C}$ -Signatur der Atmosphäre derart negativ machen könnte.

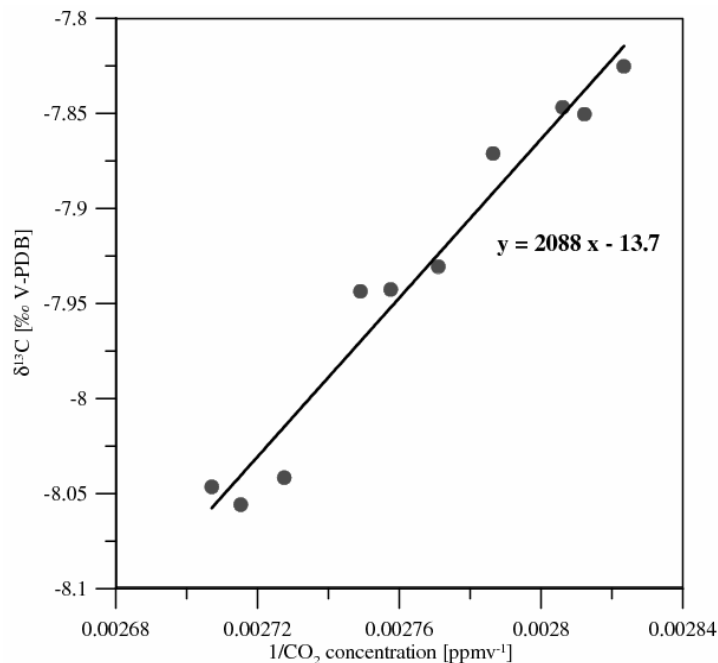
Dass der Einsturz der  $^{13}\text{C}$  Signatur der Atmosphäre etwas mit dem dazugekommenen  $\text{CO}_2$ , das in den vergangenen 500 Jahren zusätzlich in die Atmosphäre gelangt ist, zu tun hat, scheint rein aufgrund des gegenläufigen zeitlichen Verhaltens der Kurven in Abbildung 2 offensichtlich. Es gibt nun eine statistische Methode, die das noch präziser veranschaulicht:

Wenn man die  $\text{CO}_2$  Konzentration gegen die  $^{13}\text{C}$  Werte aufträgt, erhält man Punkte, die näherungsweise auf einer Geraden liegen. Das bedeutet, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den beiden Größen gibt.



8. Erkläre, warum ein Zusammenhang besteht, wenn in einer solchen Grafik die Punkte auf einer Geraden liegen!

Trägt man nun aber die  $^{13}\text{C}$  Signatur gegen den **Kehrwert** der  $\text{CO}_2$  Konzentration auf, kann man noch mehr daraus interpretieren. In Abbildung 4 ist das gemacht:



**Abbildung 4:** Die  $^{13}\text{C}$  Werte sind gegen den Kehrwert der  $\text{CO}_2$  Konzentration aufgetragen. Die Formel in der Grafik beschreibt die Gerade, die durch die Punkte gelegt wurde.

Auch in dieser Grafik liegen die Werte beinahe auf einer Geraden. Wenn man sich die Gerade nun aber nach unten fortgesetzt denkt, gelangt man zu immer kleineren Werten des Kehrwertes der  $\text{CO}_2$  Konzentration oder anders gesagt, zu immer höheren  $\text{CO}_2$  Konzentrationen. Beim dem fiktiven Wert von  $10^{-6}$  ppmv<sup>-1</sup> wäre die  $\text{CO}_2$  Konzentration  $10^6$  ppmv oder 100 %. Dies ist in der Grafik fast dort, wo die Gerade die y-Achse schneidet. Wenn du dort die  $^{13}\text{C}$  Signatur abliest, hast du den Täter ertappt und weisst, was für eine  $^{13}\text{C}$  Signatur das  $\text{CO}_2$  hat, das in die Atmosphäre gelangt! Dieser so genannte y-Achsenabschnitt ist in der Formel, welche die Gerade beschreibt, der Summand am Schluss. In unserer Auswertung beträgt er -13.7! Das bedeutet, dass das  $\text{CO}_2$ , welches in die Atmosphäre gelangt, eine Signatur von -13.7 ‰ hat.

Wenn du in der Tabelle 1 nachschaust, stellst du fest, dass dieser Wert zu keinem Reservoir eindeutig passt. Es handelt sich um ein Gemisch aus pflanzlichem CO<sub>2</sub>, das vom Verbrennen der fossilen Brennstoffe kommt, was ja im wesentlichen Erdöl – also fossiles pflanzliches Material – ist und die Signatur -24 ‰ trägt, mit CO<sub>2</sub>, das der Ozean ausgast und das eine Signatur von 0 ‰ trägt.

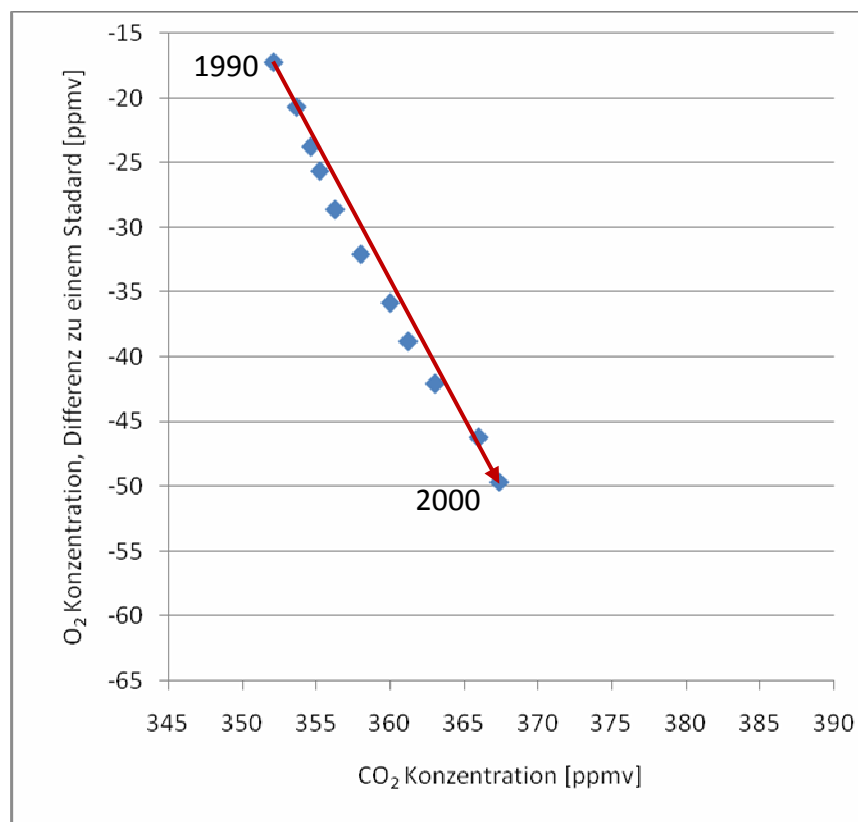
Diese Methode ist sehr hilfreich, um die Veränderung von CO<sub>2</sub> Konzentrationen in der Atmosphäre einer Ursache zuzuordnen. Auch kann so anhand der <sup>13</sup>C Analyse der Atmosphäre in der Vergangenheit etwas darüber ausgesagt werden, wie viel CO<sub>2</sub> auf der Erde in Pflanzen gespeichert war, also wie stark der Pflanzenwuchs auf der Erde war.



9. Was geschieht mit der CO<sub>2</sub> Konzentration und der <sup>13</sup>C Signatur der Atmosphäre, wenn 100 GtC aus der Atmosphäre für die Aufforstung von Regenwäldern verwendet werden? Gehe sehr vereinfachend davon aus, dass der Ozean als CO<sub>2</sub> Reservoir abgekoppelt wurde.

## 5 Atmosphärische Sauerstoffmessungen

Bei einer Verbrennung (auch Oxydation) wird bekanntlich Sauerstoff gebraucht. Werden fossile Brennstoffe verbrannt, so wird der Kohlenstoff mit Sauerstoff zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Es gibt also neues CO<sub>2</sub> auf Kosten von Sauerstoff.



**Abbildung 5:** Dargestellt ist die Abnahme der O<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre zu Gunsten einer Zunahme der CO<sub>2</sub> Konzentration (nach einer Abbildung aus der Dissertation von G.K. Plattner 2001, abgeleitet von Pretince et al. 2001.)



Wie das vorangehende Kapitel gezeigt hat, ist die CO<sub>2</sub> Zunahme in der Atmosphäre hauptsächlich auf die Zunahme der Verbrennung pflanzlichen Materials (v.a. Erdöl) zurückzuführen. Demnach sollte die Sauerstoffkonzentration gleichzeitig abnehmen. Dies kann tatsächlich beobachtet werden (siehe Abbildung 5).

Der Zusammenhang zwischen dem Verbrauch von O<sub>2</sub> bei chemischen Prozessen mit CO<sub>2</sub> geben die folgenden stöchiometrischen Gleichungen:

<i>Prozess</i>	<i>grobe Summenformel</i>	<i>Verhältnis von ΔO<sub>2</sub> zu ΔCO<sub>2</sub></i>
Photosynthese	$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$	-1.1
Respiration	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-1.1
Verbrennen fossiler Brennstoffe	$\text{CH}_x + (1+x/4)\text{O}_2 \rightarrow x/2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	-1.4
Ozeanische Aufnahme von CO <sub>2</sub>	$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons 2 \text{HCO}_3^-$	0

**Tabelle 3:** Stöchiometrische Beziehungen bei den wichtigsten chemischen Reaktionen, in welche O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> involviert sind.

Zur Entstehung von einem Teil CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe werden also 1.4 Teile O<sub>2</sub> gebraucht.



10. Gemäss Tabelle 1 gelangen durch die **Verbrennung fossiler Brennstoffe** etwa 6 GtC pro Jahr in die Atmosphäre. Um wie viel ppmv hätte dadurch die CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre zwischen 1990 und 2000 zugenommen? (Verwende dazu den Zusammenhang zwischen ppmv CO<sub>2</sub> und GtC von Seite 1.)
11. Berechne, um wie viel die O<sub>2</sub> Konzentration zwischen 1990 und 2000 auf Grund der CO<sub>2</sub> Konzentrationszunahme hätte abnehmen müssen. Verwende dazu die Werte in der dritten Spalte von Tabelle 3.
12. Nimm die beiden in Aufgaben 10 und 11 erhaltenen Resultate und zeichne in Abbildung 4 ein, wo in der Grafik wir uns im Jahr 2000 aufgrund deiner Berechnungen eigentlich hätten befinden sollen. Verbinde den Ausgangspunkt bei 1990 mit einem Pfeil mit deiner Lösung.

Warum stimmen unsere Berechnungen nicht mit den Beobachtungen überein? Warum messen wir eine viel geringere CO<sub>2</sub> Zunahme in der Atmosphäre, als wir auf Grund der Menge der verbrannten fossilen Brennstoffe erwarten würden? Wohin geht all das CO<sub>2</sub>?

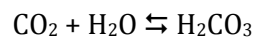
## 6 Der Kohlenstoff im Ozean

Wir haben bisher das wichtigste und grösste Kohlenstoffreservoir nicht in unsere Betrachtungen miteinbezogen; den Ozean!

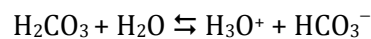
Der Ozean schluckt **fast 50 %** von all dem  $\text{CO}_2$ , das wir der Atmosphäre zuführen!

Nicht nur der Austausch von Kohlenstoff zwischen Biosphäre und Atmosphäre, sondern auch der Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre erfolgt hauptsächlich in Form von  $\text{CO}_2$ .  $\text{CO}_2$  ist ein wasserlösliches Gas. Stellt du ein Glas ionenfreies Wasser an die Luft, so löst sich im Wasser sofort  $\text{CO}_2$ . Dies geschieht in einer langsamen Reaktion über folgende Stufen:

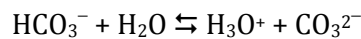
1. Zuerst reagiert das im Wasser gelöste Gas  $\text{CO}_2$  mit Wasser zu einer nicht sehr stabilen Säure, der Kohlensäure  $\text{H}_2\text{CO}_3$ :



2. Dann dissoziiert die Kohlensäure in 2 Stufen zuerst zu Bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$ :

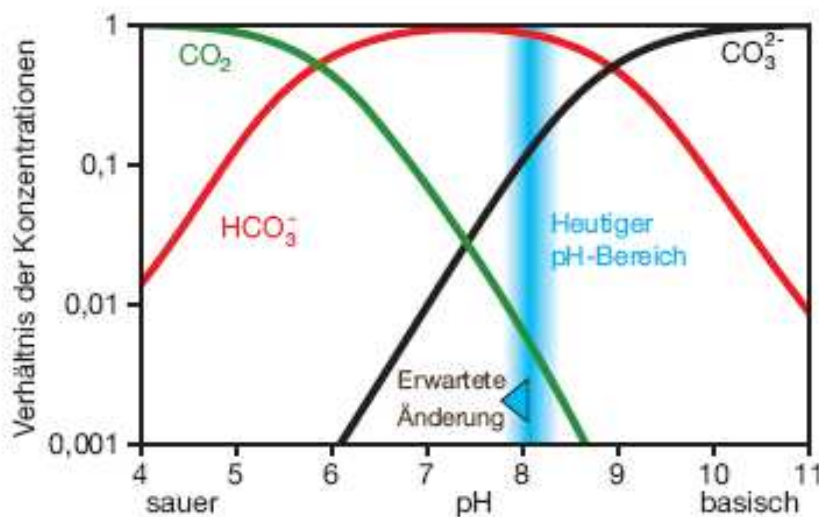


3. und dann zu Karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$ :



Die frei werdenden Wasserstoffionen  $\text{H}^+$  versauern dabei das chemisch reine Wasser und senken seinen pH-Wert von ursprünglich 7 auf etwa 5.

Dies geschieht allerdings nicht mit allen sich im Wasser lösenden  $\text{CO}_2$  Molekülen. Je nach pH-Wert des Wassers gibt es nun eine Gleichgewichtsverteilung von Bikarbonat, Karbonat und gelöstem  $\text{CO}_2$ , dieses ist in der Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 6:** Mischungsverhältnis von Bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$ , Karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$  und gelöstem  $\text{CO}_2$  in Abhängigkeit des pH-Wertes des Wassers. (Quelle: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer, Sondergutachten, S. 68, Berlin 2006; [http://www.wbgu.de/wbgu\\_gutachten\\_sonder.html](http://www.wbgu.de/wbgu_gutachten_sonder.html))

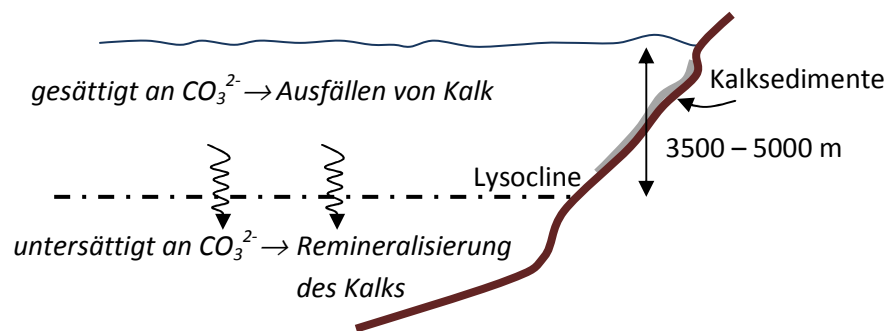
Meerwasser ist natürlich nicht chemisch reines Wasser. Das Meerwasser hat einen mittleren pH-Wert von etwa 8 (ist also leicht basisch). Die Gleichgewichtsmischung von durchschnittlichem Ozeanwasser ist die folgende:

- Karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ): 10%
- Bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ): 90%
- Gelöstes  $\text{CO}_2$ -Gas: 0.5%

In der Abbildung 6 kannst du diese Zusammensetzung ablesen, wenn du bei einem pH-Wert von 8 die relativen Anteile der entsprechenden Komponenten nachschaust. Beachte, dass die y-Achse der Abbildung 6 logarithmisch skaliert ist.

In dieser Gleichgewichtssituation gelangt von aussen immer etwa die gleiche Menge an  $\text{CO}_2$  in den Ozean, wie dieser auch wieder abgibt. In der vorindustriellen Zeit waren dies etwa 90 GtC pro Jahr.

Die freien Karbonat-Ionen sind für die Biologie im Ozean sehr wichtig. Das Karbonat bildet jetzt mit den reichlich im Meer vorhandenen Calcium-Ionen  $\text{Ca}^{2+}$  Kalk  $\text{CaCO}_3$ .



**Abbildung 7:** Kalkbildung und -Remineralisierung im Ozean. Die Sättigungsgleichgewichtslinie heisst *Lysocline* oder *Calcit-Kompensationstiefe CCD*.

Viele Krustentiere bauen mit diesem Kalk ihr Gehäuse auf. Sterben sie, sinken sie in den Tiefenozean ab und transportieren so den Kalk in den Tiefenozean. Dort wird der Kalk remineralisiert, da dort eine Untersättigung an  $\text{CO}_3^{2-}$  herrscht. Unterhalb der sogenannten *Lysocline*, der Sättigungsgleichgewichtslinie, gibt es auch keine Kalkablagerungen mehr. Kalksedimente kommen daher nur oberhalb dieser Linie vor, die zwischen 3000 und 5000 Metern Tiefe liegt. Auch das Phytoplankton, das in der obersten Schicht des Ozeans Photosynthese betreibt, sinkt mit der Zeit in den Tiefenozean ab. Dabei wird sehr viel Kohlenstoff in den Tiefenozean transportiert. Man spricht von der *Biologischen Pumpe*. Im Unterschied zum Kalk wird all das, was nicht als Futter von Tieren oder von Bakterien wieder veratmet wird, am Grund des Ozeans sedimentiert. Dieser Kohlenstoff ist dem Kohlenstoffkreislauf für lange Zeit entzogen. Aber auch der remineralisierte anorganische Kohlenstoff vom Kalk bleibt wegen der sehr langsamen Tiefenströmung des Ozeans über Zeiträume der Grössenordnung von 1000 Jahren dort unten.

## 7 Wie reagiert der Ozean auf die veränderten Bedingungen?

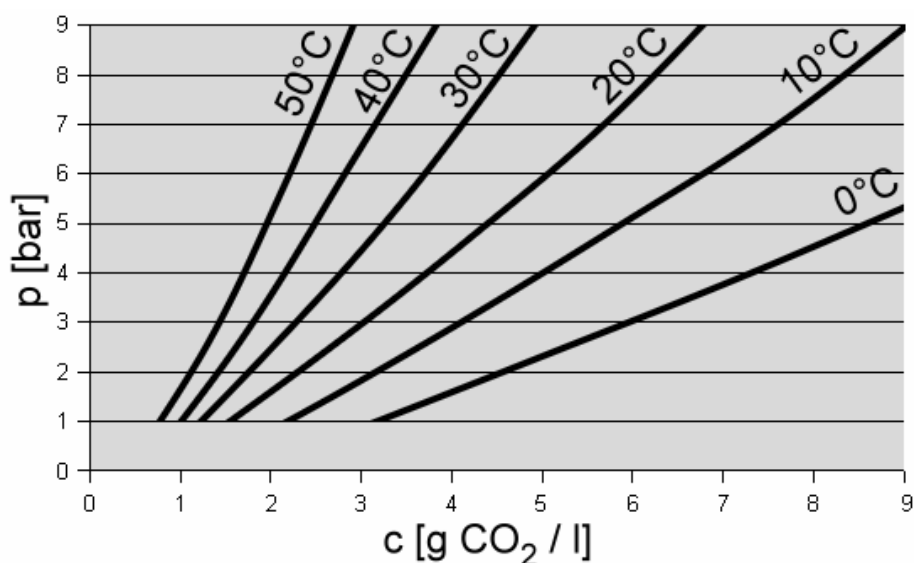
Nimmt nun die  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre zu, ist der „ $\text{CO}_2$ -Druck“ von aussen auf den Ozean grösser und es gibt einen Netto-Fluss an Kohlenstoff in den Ozean hinein. Dies führt zu einer grösseren Menge an gelöstem  $\text{CO}_2$  im Oberflächenozean, das in einem ersten Schritt auch die Menge an Bikarbonat vergrössert. Man könnte nun glauben, dass dadurch einfach auch die Menge an Karbonat grösser und sich damit mehr Kalk bilden würde, das letztlich sedimentiert und dem Kohlenstoffkreislauf für lange Zeit entzogen würde. Dies wäre schon fast eine Selbstregulierung des Problems und leider zu schön...

In der Tat **versauert** bei der Dissoziation der grossen Mengen an Kohlensäure der Ozean wegen der frei werdenden Wasserstoffionen. Dies ergibt **eine Verschiebung des Bikarbonat-Karbonat- $\text{CO}_2$ -Gleichgewichts**, hin zu **weniger Karbonat** ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) und zu mehr gelöstem  $\text{CO}_2$  (Vergleiche Abbildung 4). Dies führt also im Gegenteil zu einer Verknappung an Karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).



13. Überlege dir selber die Konsequenzen aus diesem Prozess. Was geschieht mit der Lysocline, was mit der Kalk-Sedimentschicht oberhalb der Lysocline?
14. Überlege dir, wie du die netto  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch den Ozean in der bereits durch Aufgabe 12 ergänzten Abbildung 5 einzeichnen kannst. (Benütze dazu wieder die Informationen in der dritten Spalte der Tabelle 3!) Kannst du unter Einbezug der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch den Ozean die Messwerte in Abbildung 5 erklären?

Schliesslich ist die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  im Wasser temperaturabhängig. Kaltes Wasser kann viel mehr  $\text{CO}_2$  aufnehmen, als warmes. Eine globale Temperaturerhöhung von wenigen Grad Celsius kann die Aufnahme und Speicherkapazität der Ozeane reduzieren.



**Abbildung 8:** Temperatur- und Druckabhängigkeit der Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  in Wasser. (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Co2pctrp.png>)

### 8 Die Rolle der Land-Biosphäre

Der Biosphäre sollte eine höhere  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre eigentlich gefallen, da dies die Photosynthese begünstigt. Man spricht von einer  *$\text{CO}_2$  Düngung*.



15. Lese dazu den Ausschnitt aus dem Artikel „Wie der Klimawandel unser Essen verändert“ der Webseite *Welt-online* ([www.welt.de](http://www.welt.de))

... In dem mehrjährigen Freilandexperiment wurden wichtige Feldfrüchte, darunter Getreide, Zuckerrüben und Gemüse mit  $\text{CO}_2$  begast. Die Pflanzen wuchsen so bei einer Konzentration von 550 Teilchen  $\text{CO}_2$  pro einer Million Luftteilchen (ppm) auf. Ein Kohlendioxidwert, der für das Jahr 2050 erwartet wird und der etwa um die Hälfte über dem heutigen  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre von 380 ppm liegt. Die Forscher simulierten so unter realistischen Bedingungen, bei Wind und Wetter, welche Auswirkungen die Zunahme des Treibhausgases auf landwirtschaftlich bedeutsame Pflanzen hat. Übereinstimmend berichten sie von einem Anstieg des Kohlenhydratgehalts in Form von Zucker und Stärke vor allem in den Blättern. Doch nicht alle Feldfrüchte profitieren gleichermaßen von einer Änderung des Luftgemisches. Bei Getreide, Mais und Zuckerrohr gab es nur bescheidene Zuwächse. Insgesamt stiegen die Erträge leicht, um sechs bis 15 Prozent.

Am wenigsten legten die so genannten C4-Pflanzen zu. Denn die gut an strahlungsintensive Standorte angepassten Arten haben eine hochtourigere Form der Photosynthese entwickelt. Ihr Stoffwechsel verarbeitet das aufgenommene Kohlendioxid effektiver in einem Baustein aus vier Kohlenstoffatomen. Doch schlägt sich bei diesen Pflanzen die „ $\text{CO}_2$ -Düngung“ kaum in einem Mehrertrag nieder. Die C4-Pflanzen holen, nach heutigem Stand der Forschung, bereits das Optimum aus der Luft heraus.

Die an dem Face-Projekt beteiligten Wissenschaftler der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig warnen davor, beim Anbau von Feldfrüchten auf einen Wachstumseffekt durch  $\text{CO}_2$  zu setzen. Erkaufte werde das mit Qualitätseinbußen bei den Nährstoffen: „Der Eiweißgehalt vieler Pflanzenarten war in den Experimenten deutlich reduziert“, schreiben sie. Zwischen zehn und 15 Prozent weniger Proteine wurden gebildet. Mit Konsequenzen für die Qualität der daraus hergestellten Lebensmittel, wie das Beispiel Weizen zeigt.

#### **$\text{CO}_2$ gedüngter Weizen vermindert Backqualität**

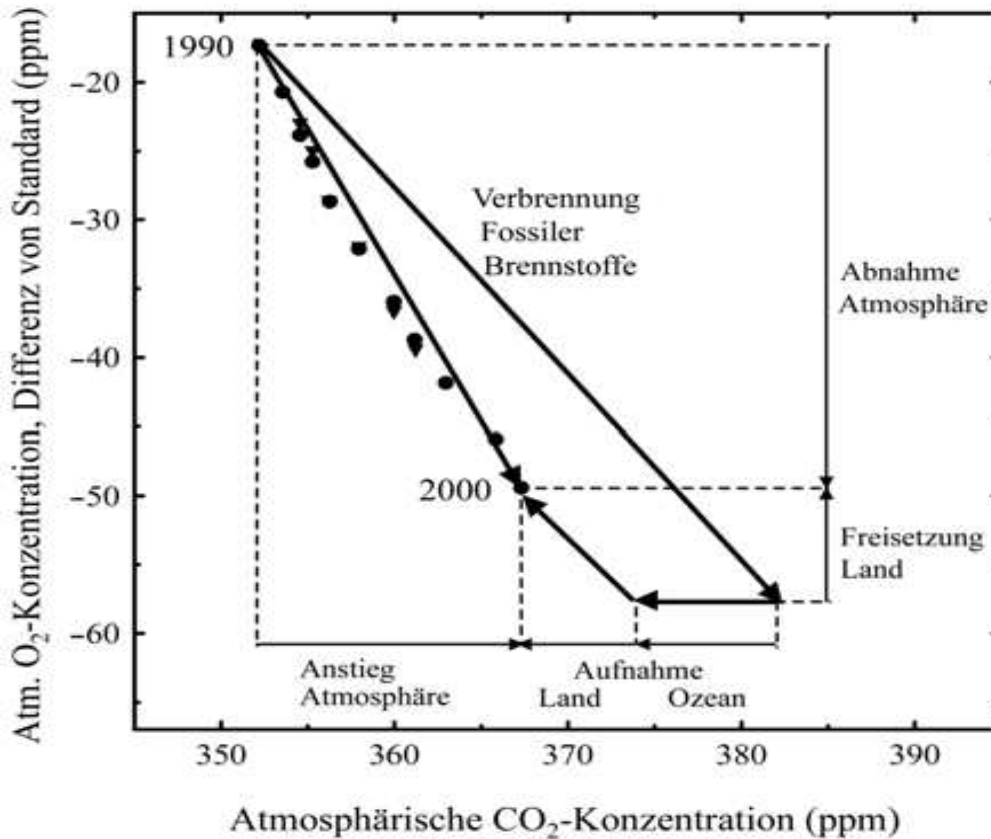
Herbert Wieser von der Deutschen Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie in Garching/München hat den von den FAL-Forschern angebauten und mit  $\text{CO}_2$  gedüngten Weizen zu Brotmehl verarbeitet und den Proteingehalt gemessen. Er fand, dass die für die Backqualität entscheidenden Gluten-Eiweiße um rund 20 Prozent vermindert waren. Die auch als Klebereiweiß bekannte Verbindung hält den Brotteig zusammen.

Warum davon weniger gebildet wird, wissen die Forscher bisher noch nicht genau. Pflanzen produzieren Eiweiße auch um  $\text{CO}_2$  in Zucker umzuwandeln. Bei einem höheren  $\text{CO}_2$ -Angebot geht das leichter. Vielleicht reduzieren sie deshalb die Eiweißproduktion, vermuten die Wissenschaftler.

...

Tatsache ist, dass bereits heute ein beträchtlicher Teil des zusätzlichen  $\text{CO}_2$ , das der Mensch in die Atmosphäre lässt in der Biosphäre verschwindet und damit die Abbildung 5 vervollständigt. Dabei nimmt die  $\text{CO}_2$  Konzentration nicht nur ab, sondern die  $\text{O}_2$  Konzentration gleichzeitig zu, weil die Pflanzen bei der Photosynthese  $\text{O}_2$  erzeugen.

Der beobachtete  $\text{CO}_2$  Anstieg und die gleichzeitige  $\text{O}_2$  Abnahme in der Atmosphäre lassen sich also verstehen, wenn wir den Ozean und die Biosphäre als  *$\text{CO}_2$  Senke* in die Bilanz einbeziehen.

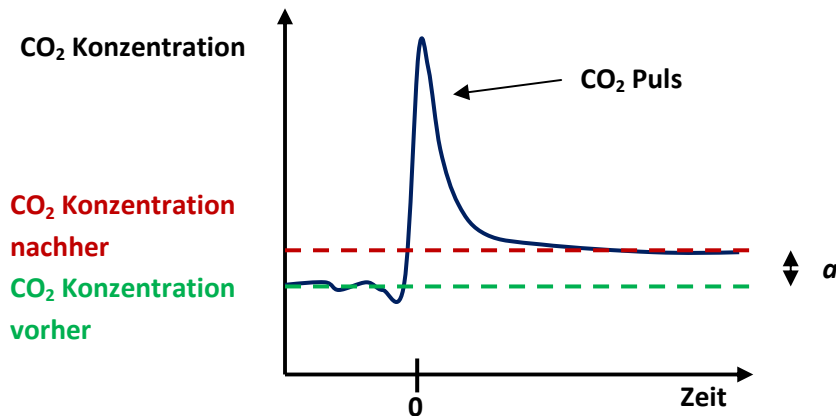


**Abbildung 9:** Übersicht über die Kohlenstoff Flüsse, die zu der beobachteten  $\text{CO}_2$  Zunahme in der Atmosphäre führen. (Quelle: Vorlesungsunterlagen von Prof. F. Joos, KUP, Uni Bern)

## 9 Wie lange bleibt die $\text{CO}_2$ Konzentration erhöht?

In Kapitel 2 hast du gelernt die mittlere Aufenthaltszeit von Kohlenstoff in der Atmosphäre zu berechnen. Diese mittlere Aufenthaltszeit eines Moleküls wird fatalerweise oft damit verwechselt, wie lange es braucht, bis ein bestimmter zusätzlicher Kohlenstoffeintrag (also eine  $\text{CO}_2$  Konzentrations-Erhöhung) in die Atmosphäre wieder verschwunden ist!

In den vorangehenden Kapiteln hast du gesehen, dass der Ozean einen beträchtlichen Teil der vom Menschen in die Atmosphäre gelassenen  $\text{CO}_2$  Menge schluckt. Allerdings verändert sich dabei der Ozean chemisch, er wird saurer. Dies führt zu einem neuen Gleichgewicht der Kohlenstoffverteilung zwischen dem Ozean und der Atmosphäre. Dieses Gleichgewicht besteht darin, dass die Konzentration des Kohlenstoffs sowohl im Ozean, wie in der Atmosphäre höher ist als zuvor. Das bedeutet dass die ursprüngliche Konzentration **nie mehr** (oder erst nach sehr, sehr langer Zeit, nämlich dann, wenn der in den Kreislauf gelangte Kohlenstoff irgendwo dem Kreislauf wieder entzogen wird) erreicht wird. Die Aufenthaltszeit eines  $\text{CO}_2$  Eintrags ist in diesem Sinne für unsere Zeithorizonte also fast „unendlich“ lange!



**Abbildung 10:** Schematische Darstellung des Verlaufs der  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre, wenn zum Zeitpunkt 0 ein  $\text{CO}_2$  Puls in die Atmosphäre gebracht wird. Die Differenz der Konzentration von nachher zu vorher heisst *Airborn Fraction*  $a$  („das, was in der Atmosphäre zurückbleibt“).

Die neue  $\text{CO}_2$  Konzentration ist also gegenüber der vorherigen erhöht. Der Betrag, um welcher die Konzentration nachher erhöht ist heisst *Airborn Fraction*  $a$ .

Der Angleich an die neue Konzentration verläuft exponentiell und lässt sich mathematisch wie folgt schreiben:

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + a$$

Dabei bezeichnet  $c_0$  die Konzentration zum Zeitpunkt 0, also bevor die Abnahme einsetzt, (in Abbildung 10 die höchste Konzentration).  $\tau$  ist die so genannte **e-Werts-Zeit**, die Zeit, nach welcher noch  $1/e$  der Konzentration  $c_0$  vorhanden ist.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 6 erwähnt, verschwindet heute etwa die Hälfte des vom Menschen ausgestossenen  $\text{CO}_2$  im Ozean und in der Biosphäre, der Rest bleibt in der Atmosphäre. Die *Airborn Fraction* beträgt also 50%. (In der schematischen Darstellung der Abbildung 10 ist es beträchtlich weniger!)

**Prof. Dr. Fortunat Joos** und sein Team an der **Abteilung für Klima und Umweltphysik (KUP)** der Universität Bern sind Spezialisten in der Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs. Sie versuchen mit Hilfe von riesigen Computerprogrammen alle Einzelheiten des Kohlenstoffkreislaufs miteinander zu Verknüpfen und zu simulieren, wie das System bei weiterem  $\text{CO}_2$  Ausstoss durch den Menschen reagieren wird.

<http://www.climate.unibe.ch>



# Lösungen

1. Giga bedeutet Milliarde, also  $10^9$ .

$1\text{Gt} = 10^9 \text{ Tonnen} = 10^{12} \text{ Kilogramm}$ , also **1GtC sind  $10^{12} \text{ kg Kohlenstoff}$** .

2. Eine einfache Dreisatz-Rechnung bringt die Lösung:

$$1 \text{ ppmv} \quad \rightarrow \quad 2.123 \text{ GtC}$$

$$380 \text{ ppmv} \quad \rightarrow \quad \mathbf{806.7 \text{ GtC}}$$

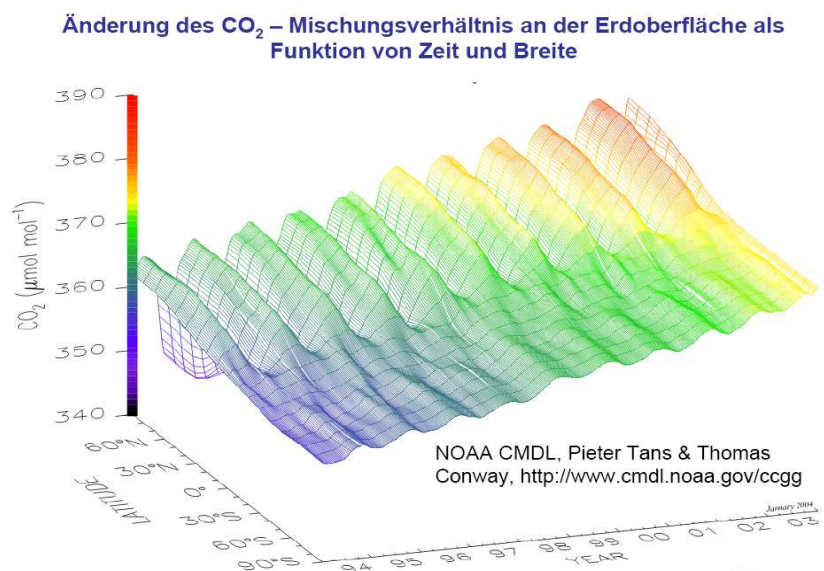
3. Die mittlere Aufenthaltszeit eines  $\text{CO}_2$  Moleküls in der Atmosphäre errechnet sich aus der Reservoir Grösse  $M_c$  geteilt durch den Durchfluss  $F_c$ . Der Durchfluss ist die Summe aus dem Austausch Biosphäre – Atmosphäre ( $60 \text{ GtC}$ ) und dem Austausch Ozean Atmosphäre ( $90 \text{ GtC}$ ), also  $150 \text{ GtC}$ .

$$\tau = \frac{M_c}{F_c} = \frac{760 \text{ GtC}}{150 \frac{\text{GtC}}{\text{Jahr}}} = 5.06 \text{ Jahre}$$

**Vorsicht**, diese Zeit ist nicht zu interpretieren, als die Zeit, die es braucht, bis ein bestimmter zusätzlicher Kohlenstoffeintrag (also eine  $\text{CO}_2$  Konzentrations-Erhöhung) in die Atmosphäre wieder verschwunden ist! Die 5 Jahre sind die **durchschnittliche Verweildauer** eines  $\text{CO}_2$  Moleküls in der Atmosphäre. Allerdings ist dies ein Mittelwert, der je nach Atmosphären Schicht einen ganz anderen Wert haben kann. In der Troposphäre ist die Verweildauer wesentlich kürzer (Tage bis Wochen) als in der Stratosphäre (mehrere Jahre).

4. Je nach Jahreszeit ist mehr oder weniger Kohlenstoff in der Biosphäre gebunden und damit mehr oder weniger  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre. Hat es in der Atmosphäre viel  $\text{CO}_2$ , ist wenig in den Pflanzen gebunden, es handelt sich um das Winterhalbjahr und umgekehrt. Auf der Südhalbkugel sieht der Verlauf der  $\text{CO}_2$  Kurve gerade andersrum aus und in den Tropen gibt es dieses „Auf und Ab“ gar nicht!

**Abbildung 11:**  
Atmosphärisches  $\text{CO}_2$  als  
Funktion der Zeit und der  
geographischen Breite.





5. Zwischen 1975 und 1995 hat die CO<sub>2</sub> Konzentration von 330 ppmv auf 355 ppmv um 25 ppmv zugenommen. Das ergibt eine jährliche Zunahme  $a$  von

$$a = \frac{\Delta\text{CO}_2}{\Delta T} = \frac{25\text{ppmv}}{20\text{Jahre}} = 1.25\text{ppmv/Jahr}$$

Die Zunahme heute liegt allerdings bereits zwischen 1.5 und 2 ppmv pro Jahr!

6. Maximaler und minimaler Ausschlag der Schwingung des CO<sub>2</sub> Verlaufs haben eine Differenz von etwa 7 ppmv. Multipliziert du das mit den 2.123 GtC pro ppmv für die Atmosphäre, so entspricht das einer Menge von **14.8 GtC**, die der Atmosphäre durch die Biosphäre jährlich zu und wieder abgeführt wird. Allerdings stimmt diese Rechnung nicht sehr genau, da wir dabei davon ausgehen, dass diese CO<sub>2</sub>-Variation sich in der ganzen Atmosphäre rund um den Erdball abspielt. Wie aber die Abbildung 9 zeigt ist das nicht der Fall! Unser Resultat ist wohl eine Überschätzung der Tatsachen.
7. Die atmosphärische <sup>13</sup>C Signatur ist selber schon negativ (-8.5 ‰) und kann vor allem durch einen Eintrag von pflanzlichem Kohlenstoff (-24 ‰) noch negativer gemacht werden.
8. Werden zwei Grössen gegeneinander aufgetragen und die Wertepaare liegen auf einer Geraden, so bedeutet das, dass bei einer Zunahme der einen Grösse, die andere Grösse auch zu- (oder ab-)nimmt. Wenn das für viele Wertepaare gilt, so kann ein Zufall ausgeschlossen werden und eine Abhängigkeit (diese kann direkt oder indirekt sein) postuliert werden. Je genauer die Punkte auf einer Geraden liegen, desto stärker ist die Abhängigkeit zwischen den beiden Grössen, man sagt, die beiden Grössen *korrelieren*.
9. 1 ppmv CO<sub>2</sub> Konzentration ist gleichbedeutend mit 2.123 GtC (Seite 1). 1GtC entspricht folglich einer Konzentration von 0.47 ppmv. Wenn 100 GtC aus der Atmosphäre abfließen, so sinkt die CO<sub>2</sub> Konzentration um 100 mal 0.47 ppmv, also um **47 ppmv**.

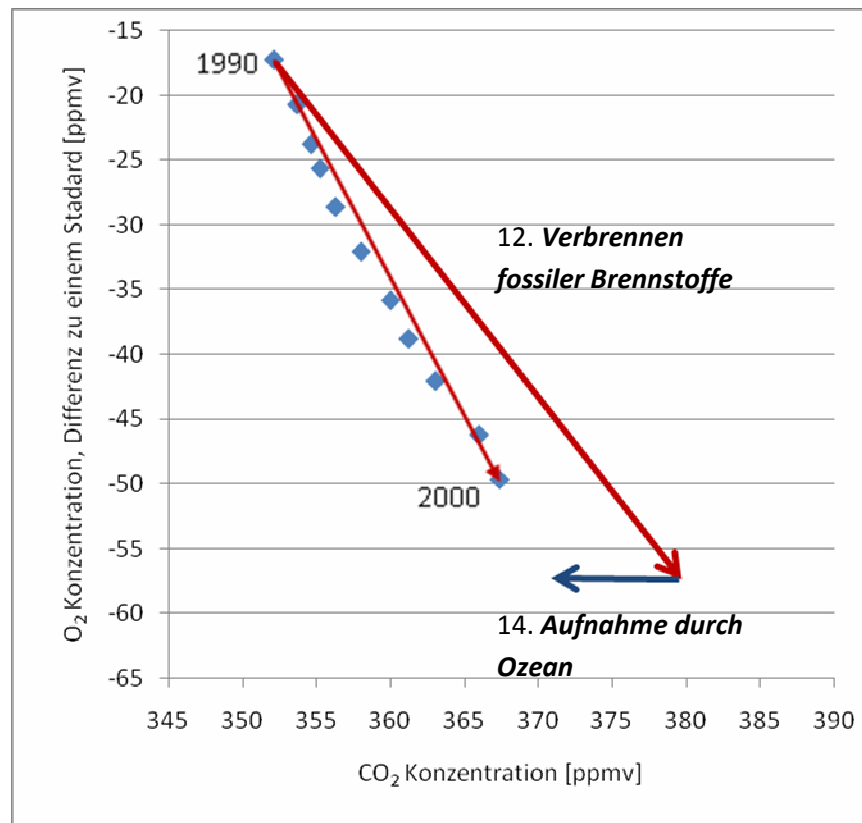
Nimmt man von 800 GtC atmosphärischem Kohlenstoff der Signatur -8.5 ‰ 100 GtC der Signatur -24 ‰ weg und verteilt das dann wieder auf die verbleibenden 700 GtC, so bleibt eine Signatur von

$$\frac{800\text{GtC} \cdot (-0.0085) - 100\text{GtC} \cdot (-0.024)}{700\text{GtC}} = -0.0051 = -6.8\text{‰}$$

10. Die Zunahme beträgt 60 GtC. 1 GtC entspricht einer Zunahme von 0.47 ppmv, bei einer Zunahme von 60 GtC also **28.2 ppmv**.
11. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist das O<sub>2</sub> zu CO<sub>2</sub> Verhältnis -1.4. Es verbraucht also 1.4 O<sub>2</sub> Moleküle pro entstehendes CO<sub>2</sub> Moleküle.

Das ergibt bei einer Zunahme von 28.2 ppmv CO<sub>2</sub> eine **Abnahme von 39.5 ppmv O<sub>2</sub>**.

12. Die  $\text{CO}_2$  Konzentration liegt dann bei etwa  $352 \text{ ppmv} + 28 \text{ ppmv} = \mathbf{380 \text{ ppmv}}$ , die  $\text{O}_2$  Konzentration bei  $-17 \text{ ppmv} - 40 \text{ ppmv} = \mathbf{-57 \text{ ppmv}}$  (Differenz von einem Standard).



13. Die Kalzit-Sättigungslinie verschiebt sich bei einem Mangel an Karbonat nach oben. Dies führt dazu, dass sich der Kalk früher wieder auflöst und damit die Kalksedimentation nur bis in geringere Tiefen stattfindet. Es bleibt folglich mehr Kohlenstoff im Kreislauf.
14. Die Lösung ist in der Grafik oben eingetragen. Die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verändert die  $\text{O}_2$  Konzentration nicht. Es ist also nicht möglich mit dem „Ozean-Pfeil“ die Lücke zu schliessen.