

«Ozeane als Kohlenstoffdioxid-Senken»

Schüler-Experimente Sek II

1. Lernziele	1
2. Organisatorisches und Material	1
3. Filmausschnitt zum Thema «Meeresversauerung»	2
4. Wasserlöslichkeitsvergleich Luft/CO ₂	3
5. CO ₂ -Löslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur	3
6. CO ₂ -Löslichkeit in Abhängigkeit des pH-Werts	4
7. CO ₂ -Löslichkeit in Abhängigkeit des Drucks	5
8. Inputs	5
9. Lösungsvorschläge	7

Franziska Schönborn
dipl. natw. ETH, Umweltnaturwissenschaftlerin
Fachlehrerin Chemie
Kantonsschule Musegg Luzern
Museggstrasse 22
6004 Luzern
franziska.schoenborn[at]edulu.ch

Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler verstehen,

- warum der CO₂-Anteil der Erdatmosphäre, verglichen mit jenem unserer Nachbarplaneten, sehr gering ist,
- warum in den Polarmeeren und im Tiefenwasser besonders viel Kohlenstoffdioxid gespeichert wird,
- was die Versauerung des Meerwassers bzw. des Regens für Korallenriffe und Kalkgestein zur Folge hat,
- ➔ welche negative Auswirkung die doppelte positive Rückkopplung von stetiger CO₂-Zunahme und -Aufnahmefähigkeit der Ozeane hat!

Organisation der Experimente und Material

Es wird Material für 5 Gruppen à 2-3 SuS bereitgestellt.

Der Grundversuch (V1) wird von allen 5 Gruppen durchgeführt. Danach gibt's Postenarbeit (Gruppe 1 füllt Eiswasser, Gruppe 2 warmes Wasser, Gruppe 3 basisches Wasser und Gruppe 4 saures Wasser ins Rohr; Gruppe 5 macht zuerst V4 und dann V5 – beides ohne Rohr; anschliessend wird rotiert, sodass die Rohre immer mit demselben Wasser befüllt werden).

Versuch 1: VERGLEICH DER LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID UND LUFT IN WASSER

Chemikalien: Kohlenstoffdioxid-Gasflasche
Universalindikator flüssig 5 Schümergebinde

Geräte: 5 lange Glasrohre (Länge ca. 1.50 m, Ø ca. 1.9 cm)
10 Stopfen, passend zu den Rohren
5 Stative mit je 2 Klemmen und Halterungen
5 Liter-Plastik-BG
5 Trichter
5 grosse Kristallisierschalen
5 Kolbenprober mit Hahn
5 Schlauchstücke, passend zu Kolbenprobern, ca. 20 cm lang
5 Folienstifte, wasserfest

Versuch 2: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR

Wie V1 für 2 Gruppen +
crunched Eis aus Leitungswasser und Behälter für Eiswasser (Rohr 1)
Wasserkocher (Rohr 2)

Versuch 3: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES pH-WERTS

Wie V1 für 2 Gruppen +

Chemikalien: 1 Liter Natronlauge $c(\text{NaOH}, \text{aq}) \approx 0.01 \text{ mol/L}$ (Rohr 3)
1 Liter Salzsäure $c(\text{HCl}, \text{aq}) \approx 0.01 \text{ mol/L}$ (Rohr 4)

Geräte: Handschuhe für 2 Gruppen

Versuch 4: KOHLENSTOFFDIOXID UND KALKWASSER

Chemikalien: Ziersteinchen aus Marmor
500 mL Kalkwasser: Ca(OH)₂(aq) gesättigt, filtriert
Universalindikator flüssig, 1 Schülergebände

Geräte: 10 RG mittel, passend zu den Gasableitungsrohr-Stopfen
2 Gasableitungsrohre, passend zu RG mittel
weisses Papier als Hintergrund

Versuch 5: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES DRUCKS

5 5-dl-PET-Flaschen mit möglichst stark kohlenensäurehaltigem Mineralwasser, gekühlt – evtl. zusätzlich Rohr 5 mit Mineralwasser befüllen.

Filmausschnitt zum Thema «Meeresversauerung»

Die Unterrichtseinheit kann durch die Präsentation eines Filmausschnitts abgerundet werden. Das empfohlene YouTube Video

<https://www.youtube.com/watch?v=AsbUkGvtzHk&sns=em>

(zuletzt eingesehen am 13.2.2017) wird jeweils in einer von Franziska Schönborn gekürzten, dreiminütigen Fassung gezeigt, die auf Wunsch bei [franziska.schoenborn\[at\]jedulu.ch](mailto:franziska.schoenborn@jedulu.ch) bezogen werden kann.

Der Film aus dem Jahr 2011 berichtet von der Forschungsarbeit von Dr. Katharina Fabricius, Wissenschaftlerin am Australian Institute of Marine Science (AIMS) über die Auswirkungen der Meeresversauerung. Fabricius hat zwei Expeditionen mit Forschern aus sechs Ländern, darunter Papua Neuguinea, USA und Deutschland, geleitet. Mit dabei war eine Gruppe vom Bremer Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie. Die Bremer sind Experten für Mikrosensoren, einem wichtigen Forschungsinstrument, um Korallen zu untersuchen.

Die Forschungsarbeiten in einem Gebiet vor Papua Neuguinea, in welchem vulkanisches CO₂ aus dem Meeresboden austritt, zeigen, dass bei einem pH-Wert des Meerwassers von 7.8 – ein Wert, der bis Ende 21. Jahrhundert vermutlich normal sein dürfte – anstelle von Korallen v.a. Seegras sowie vereinzelte robuste Steinkorallen den Meeresboden prägen.

Experimente

V1: VERGLEICH DER LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID UND LUFT IN WASSER¹

Im *Kunststoff-Litermass* wird Leitungswasser mit etwas flüssigem *Universalindikator* angefärbt. Das *lange Glasrohr* wird am einen Ende mittels *Stopfen* verschlossen, mit dem farbigen Wasser beschickt, der andere *Stopfen* aufgesetzt, in eine zur Hälfte mit Leitungswasser gefüllte *Kristallisierschale* gestellt und mit Hilfe von *Klemmen* und *Stativ* befestigt. Der untere, sich knapp unter der Wasseroberfläche befindende, *Stopfen* wird entfernt. Mit Hilfe eines *Kolbenprobers* und eines *Schlauchstücks* werden 100 ml *Kohlenstoffdioxid* aus der Gasflasche langsam durch die untere Öffnung des Glasrohrs gegeben. Die aufsteigenden Gasblasen werden beobachtet und der Stand des oben im Rohr angesammelten CO₂-Restvolumens mit einem *Folienschreiber* bezeichnet.

Zum Vergleich wird der Versuch mit 100 ml Luft wiederholt.

Beobachtung:

Interpretation:

V2: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR

Wiederholen Sie das Experiment mit unterschiedlich warmem Leitungswasser. Wählen Sie einmal Eiswasser und einmal heisses Wasser vom Hahn oder mit dem Wasserkocher erwärmtes und mit normalem Leitungswasser gemischtes Wasser.

Beobachtung:

Interpretation:

¹ PASCHMANN, A. et al.: Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffkreislauf, in MNU 53 / Heft 3, Dümmler Verlag Köln 2000

V3: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES pH-WERTS

Wiederholen Sie das Experiment mit *Natronlauge* $c(\text{NaOH}, \text{aq}) = 0.01 \text{ mol/L}$ und mit *Salzsäure* $c(\text{HCl}, \text{aq}) = 0.01 \text{ mol/L}$. Die Kristallisierschale enthält wiederum Leitungswasser.

→ Tragen Sie *Handschuhe*. Spülen Sie das Glasrohr nach jedem Experiment gut aus.

Beobachtung:

Interpretation: → Diskutieren Sie die Gleichgewichtsverschiebungen der folgenden Reaktionen:



V4: KOHLENSTOFFDIOXID UND KALKWASSER

Ein mittelgrosses *Reagenzglas* (RG1) wird maximal zur Hälfte mit mittels *Universalindikator* angefärbtem *Kalkwasser* $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$ befüllt. Ins andere, mittelgrosse *Reagenzglas* (RG2) kommen ein *Calcit*-Ziersteinchen sowie ein Überschuss an verdünnter *Salzsäure*. Das RG2 wird mit dem *Gasableitungsrohr* verschlossen und das entstehende Gas ins Kalkwasser im RG1 eingeleitet. Beobachten Sie, wie sich sowohl Trübung als auch Farbe des Gemischs in RG1 ändern. → Arbeiten Sie vor weissem Hintergrund.

Beobachtung:

Interpretation (inkl. Reaktionsgleichungen):

V5: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES DRUCKS

Eine gekühlte 5 dl-PET-Flasche mit kohlen säurehaltigem Mineralwasser wird zu ca. einem Drittel entleert und soweit wie möglich zusammengedrückt, bevor sie wieder verschlossen wird. Nun schüttelt man ein wenig und lässt die Flasche stehen.

Beobachtung:

Interpretation:

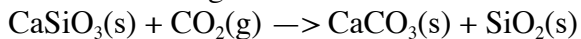
Inputs

Zu V1:

In der Erdatmosphäre beträgt der Kohlenstoffdioxid-Anteil 0.0387 %, während jener der beiden Nachbarplaneten Mars und Venus 95 % beträgt!²

Im Gegensatz zur Erde, deren Oberfläche zu 70 % mit Wasser bedeckt ist, gibt es dort kaum Wasser.

In der Uratmosphäre der Erde gab es ebenfalls beachtliche Mengen an Kohlenstoffdioxid, die heute im Meerwasser gelöst vorliegen bzw. sich vermutlich mit dem ursprünglich als Calciumsilicat vorliegenden Calcium zu Kalk verbunden haben.³



Die auf der Erde vorhandene Wassermenge beträgt ungefähr 1.386 Milliarden km³. Etwa 97.14% entfallen auf die Weltmeere, 2% davon in Form von Eis.⁴ Man schätzt, dass im Meerwasser etwa 132'000 Giga Tonnen gelöstes Kohlenstoffdioxid vorliegen, 60mal mehr als in der Atmosphäre.^{3,1}

99.8 % des Kohlenstoffdioxids bleiben physikalisch gelöst; bloss 0.2% reagieren mit Wasser zur unbeständigen Kohlensäure.³

Zu V2:

Temperatur [°C]	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Löslichkeit [ml CO ₂ /100 ml Wasser]	171	119	88	66	53	43.6	35.4
Löslichkeit [g CO ₂ /Liter Wasser]	3.38	2.36	1.73	1.31	1.05	0.86	0.71

Tabelle 1: Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid bei Normaldruck in Wasser⁵

² BUCHAL, Ch., SCHÖNWIESE, Ch.-D.: Klima, Helmholtz Gemeinschaft, Heraeus-Stiftung 2010

³ SCHMIDKUNZ Heinz: Kohlenstoffdioxid und Meerwasser, in Naturwissenschaften im Unterricht Chemie Heft 129 „Klima“, Mai 2012, Friedrich in Velber-Verlag

⁴ Wieviel Wasser gibt es auf der Erde? <http://www.lenntech.de/faq-wasser-menge.htm#ixzz2F9hsacKD> (abgerufen am 21.2.17)

⁵ KALTOFEN, R. et al.: Tabellenbuch Chemie, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1986

Weltweite Messungen haben ergeben, dass die polaren Ozeane beider Hemisphären die Hauptsenke für atmosphärisches Kohlenstoffdioxid darstellen, während in den Äquatorregionen Kohlenstoffdioxid an die Atmosphäre abgegeben wird.¹

Zu V3:

Der pH-Wert der Ozeane liegt mit 7.5 bis 8.5 im schwach alkalischen Bereich.¹

Zu V4:³

Durch vermehrtes Lösen von CO₂ im Meerwasser wird dessen pH-Wert in den sauren Bereich verschoben. In der Folge könnte es zur Schädigung und sogar zur Auflösung von Kalkschalen und Kalkgerüsten von Meerestieren und Korallen kommen.

In jüngster Zeit (z.B. Weihnachten 2011) gab es auf der Insel Rügen einige Abbrüche an der Steilküste. Beachtliche Mengen an Kalkstein stürzten dabei in die Tiefe. Deutliche Risse in den Hängern lassen weitere Abbrüche befürchten. In einer offiziellen Stellungnahme werden das Wasser der Ostsee und das Regenwasser dafür verantwortlich gemacht.

Zu V5:

Durch Entfernen des unteren Stopfens wird durch die Gewichtskraft der Wassersäule ein Unterdruck im Gasraum erzeugt.¹

Kohlenstoffdioxid ist in der Tiefsee besser löslich als im Oberflächenwasser, da dort ein höherer Druck herrscht.

Aufgrund der unterschiedlichen Temperatur- und Salzgehaltverhältnisse und den damit verbundenen Dichteunterschieden im Ozean kommt es zur Ausbildung von sogenannten thermohalinen Schichten. Diese Schichtung unterbindet den Stofftransport ins Tiefenwasser. Dennoch sind über 95% des Kohlenstoffdioxids im Mittel- und Tiefenwasser des Ozeans zu finden. Dafür sind die „biologische“ und die „physikalische Kohlenstoffpumpe“ verantwortlich:

Biologische Kohlenstoffpumpe: Das Kohlenstoffdioxid des Oberflächenwassers wird größtenteils durch die Photosynthese der Algen dem Oberflächenwasser entzogen. Weltweit macht dieser Vorgang derzeit mehr als die Hälfte der gesamten Primärproduktion aus! Wenn die Algen absterben, sinken sie ins Tiefenwasser ab und werden auf dem Weg dorthin zu Kohlenstoffdioxid abgebaut, wo es für hunderte Jahre bleibt.

Physikalische Kohlenstoffpumpe:

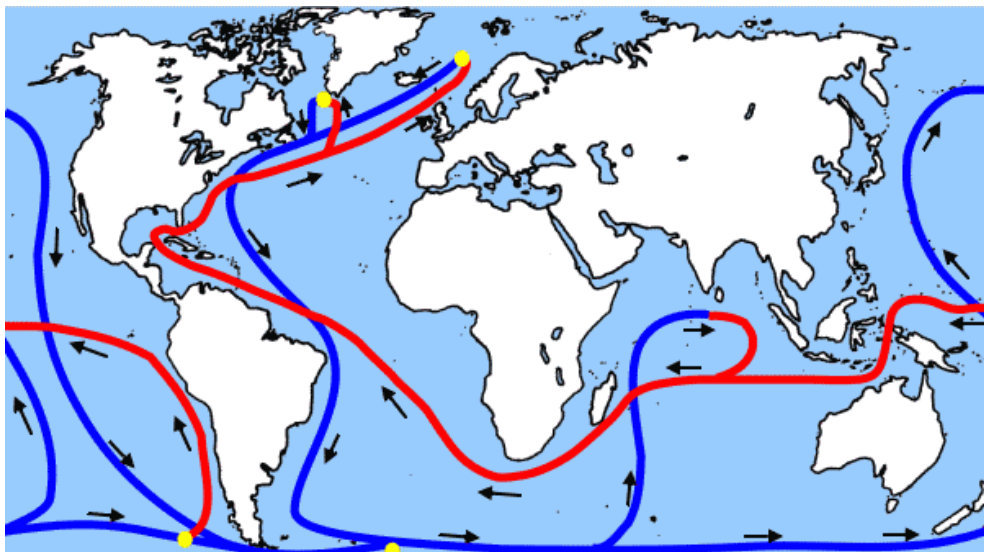


Abbildung 1⁶: Das „globale Förderband“, die wichtigste Tiefseeströmung für das Erdklima (blau: Tiefenströmungen, rot: Oberflächenströmungen). Die gelben Punkte markieren die Orte des Absinkens kalten Wassers.

⁶ Meeresströmungen: <http://www.oekosystem-erde.de/html/klima.html> (abgerufen am 13.2.2017)

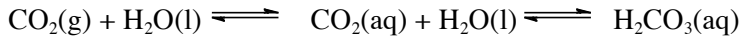
Lösungsvorschläge

V1: VERGLEICH DER LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID UND LUFT IN WASSER⁷

Beobachtung:

In Wasser löst sich wesentlich mehr Kohlenstoffdioxid als Luft.

Interpretation:



Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure, weshalb sich in Wasser mehr CO₂ als N₂ und O₂ löst.

Im Gegensatz zu den völlig unpolaren Elementarstoffen Stickstoff und Sauerstoff enthält Kohlenstoffdioxid stark polare Bindungen, selbst wenn das Molekül kein eigentlicher Dipol ist. Auf Grund seiner positiven Partiaalladung reagiert der Kohlenstoff mit dem Dipol Wasser als Elektrophil.

→ *In den Ozeanen wird viel mehr Kohlenstoffdioxid als Luft gespeichert. Die Ozeane stellen CO₂-Senken dar.*

V2: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR

Beobachtung:

Im Eiswasser bleibt nur ein kleines Restvolumen Kohlenstoffdioxid übrig.

Im warmen Wasser löst sich viel weniger CO₂ als bei Versuch 1.

Interpretation:

Die Aufnahmefähigkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser ist stark temperaturabhängig. Alle Gase lösen sich auf Grund der in grosser Zahl vorhandenen Cluster (= käfigartige Reststrukturen von Eis) in kaltem Wasser besser als in warmem.

→ *Kohlenstoffdioxid wird v.a. in den Polarmeeren gespeichert. Die – durch den Treibhauseffekt hervorgerufenen - steigenden Temperaturen vermindern die CO₂-Aufnahmefähigkeit der Ozeane.*

V3: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES pH-WERTS

Wiederholen Sie das Experiment mit *Natronlauge* $c(\text{NaOH}, \text{aq}) = 0.01 \text{ mol/L}$ und mit *Salzsäure* $c(\text{HCl}, \text{aq}) = 0.01 \text{ mol/L}$. Die Kristallisierschale enthält wiederum Leitungswasser.

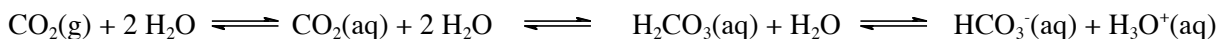
→ Tragen Sie *Handschuhe*. Spülen Sie das Glasrohr nach jedem Experiment gut aus.

Beobachtung:

In der basischen Lösung bleibt nur ein ganz kleines Restvolumen Kohlenstoffdioxid übrig.

In der sauren Lösung löst sich wesentlich weniger CO₂ als bei Versuch 1.

Interpretation: **→** Diskutieren Sie die Gleichgewichtsverschiebungen der folgenden Reaktionen:



*In der basischen Lösung sind viele OH⁻-Ionen vorhanden, welche die entstehenden H₃O⁺-Ionen aus der Lösung entfernen (sie reagieren mit diesen zu Wasser) **→** das Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts (= in Richtung der Produkte).*

⁷ PASCHMANN, A. et al.: Die Bedeutung der Ozeane im Kohlenstoffkreislauf, in MNU 53 / Heft 3, Dümmler Verlag Köln 2000

In der sauren Lösung sind bereits viele H₃O⁺-Ionen (= Produkte) vorhanden → das Gleichgewicht verschiebt sich nach links (= in Richtung der Edukte).

→ Im alkalischen Ozean-Wasser wird viel mehr Kohlenstoffdioxid gespeichert als beispielsweise im sauren Regenwasser. Der steigende CO₂-Gehalt der Atmosphäre lässt den pH-Wert des Wassers in den Ozeanen sinken, was dessen Kohlenstoffdioxid-Aufnahmefähigkeit wiederum vermindert.

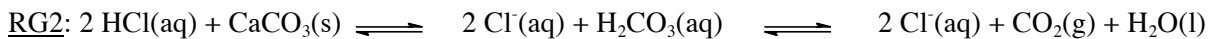
V4: KOHLENSTOFFDIOXID UND KALKWASSER

Beobachtung:

Zunächst bildet sich eine weiße Fällung, die sich schon bald wieder auflöst. Die Farbe des Indikators wechselt dabei von violett über blau nach gelb-grün; d.h. von stark alkalisch bis nach schwach sauer.

Interpretation (inkl. Reaktionsgleichungen):

In RG2 reagiert der Calcit CaCO₃(s) mit der Salzsäure zu Kohlensäure, die zu CO₂(g) und H₂O(l) zerfällt. Das frei werdende Kohlenstoffdioxid reagiert mit dem Kalkwasser in RG1 zu Kalk, der sich durch die – bei der unverminderten CO₂-Zugabe bildenden – Kohlensäure wieder auflöst. Wir lösen folglich den Kalk auf, um diesen erneut zu erzeugen und wiederum aufzulösen ;-)



→ Der steigende CO₂-Gehalt der Atmosphäre lässt den pH-Wert des Wassers in den Ozeanen sinken, was das Auflösen von Kalkgehäusen und Korallen begünstigt. Dadurch wird in mineralischer Form (als Kalk) dauerhaft gespeichertes CO₂ wieder freigesetzt!

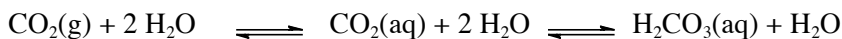
V5: LÖSLICHKEIT VON KOHLENSTOFFDIOXID IN WASSER IN ABHÄNGIGKEIT DES DRUCKS

Beobachtung:

Die Flasche bläht sich auf und ist schon bald wieder prall.

Interpretation:

Das Wasser in der Flasche enthält eine beachtliche Menge an, unter hohem Druck gelöstem, CO₂(aq). Wird der Druck durch das teilweise Entleeren der Flasche vermindert, verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung Gasphase CO₂(g), wodurch sich die Flasche aufbläht.



→ Durch die biologische und die physikalische Kohlenstoffpumpe gelangt sehr viel gelöstes CO₂ ins Tiefenwasser der Ozeane. Durch den hohen hydrostatischen Druck kann das Wasser in der Tiefe sehr viel mehr Kohlenstoffdioxid speichern als an der Oberfläche. Sobald das Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt, wird der grösste Teil, des unter Druck gespeicherten Kohlenstoffdioxids, wieder freigesetzt.