

Name:

Datum:

Erderwärmung und Ozeanversauerung - Einfluss der Klimaerwärmung auf den pH-Wert der Ozeane

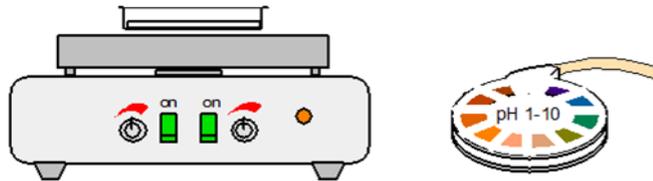
Variante A: Messung von pH-Werten mittels Universalindikator

Geräte

Becherglas (100 mL), 1 Glaspetrischale (\varnothing 9 cm), Heizplatte, Messzylinder (25 mL), Soda-Club-Maschine, Glasstab

Materialien

Leitungswasser (vor dem Abfüllen den Wasserhahn ein wenig laufen lassen), Universalindikator (Mc Crumb: 20 mg Methylrot, 40 mg Bromthymolblau, 40 mg Thymolblau, 20 mg Phenolphthalein in 100 mL Ethanol), pH-Farbskala (Mc Crumb)



Durchführung

1. Fülle mit Hilfe des Messzylinders 20 mL Leitungswasser in das kleine Becherglas.
2. Gib 5 Tropfen Indikatorlösung (Mc Crumb) hinzu und rühre mit dem Glasstab um.
3. Halte den Schlauch der Soda-Club-Maschine in das Wasser und sprudele es kurz auf.
4. Fülle 15 mL davon mittels eines Messzylinders in die Glaspetrischale. Die zurückbleibenden 5 mL dienen als Vergleich.
5. Stelle die Glaspetrischale auf die Heizplatte und schalte diese auf 100 °C ein.
6. Lass die Schale 5 – 10 min stehen und notiere deine Beobachtungen.

Was kannst du beobachten?

(Vergleiche dazu auch die Farbe des Wassers mit deiner pH-Farbskala)

Was bedeutet das für das Klima auf unserer Erde?

Name:

Datum:

Erderwärmung und Ozeanversauerung - Einfluss der Klimaerwärmung auf den pH-Wert der Ozeane

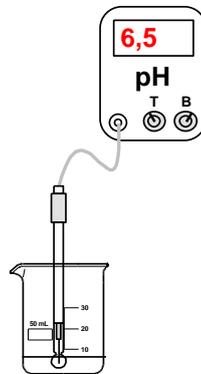
Variante B: Messung von pH-Werten mittels pH-Elektrode

Geräte

Minicomputer mit pH-Elektrode (mittels Kalibrierlösungen kalibriert), Becherglas weit (250 mL), Becherglas (50 mL), Schnappdeckelglas, Glaspetrischale (Ø 9 cm), Heizplatte, Messzylinder (25 mL), Soda-Club-Maschine, Kunststoffpipette, Glasstab, Stativ mit Klemme und Muffe

Materialien

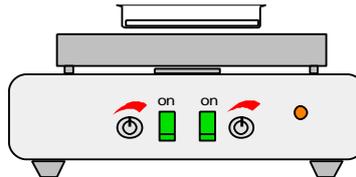
dest. Wasser, Leitungswasser (vor dem Abfüllen den Wasserhahn ein wenig laufen lassen), Universalindikator (Mc Crumb: 20 mg Methylrot, 40 mg Bromthymolblau, 40 mg Thymolblau, 20 mg Phenolphthalein in 100 mL Ethanol), pH-Farbskala (Mc Crumb)



Durchführung

1. Fülle mit Hilfe des Messzylinders 20 mL Leitungswasser in das kleine Becherglas.
2. Gib 5 Tropfen Indikatorlösung (Mc Crumb) zum Wasser hinzu. Rühre mit einem Glasstab um und notiere die Farbe des Wassers in der Tabelle auf der nächsten Seite).
3. Befestige die pH-Elektrode am oberen weißen Ende mit der Klemme des Stativs.
4. Schraube das kleine Vorratsgläschen, das sich unten an der pH-Elektrode befindet, ab und stelle es beiseite. **Achtung: Es darf nicht umkippen!**
5. Halte das große Becherglas unter die pH-Elektrode und spüle den unteren Teil der Elektrode mit dest. Wasser ab.
6. Miss nun den pH-Wert des Leitungswassers im kleinen Becherglas. Halte es dazu unter die pH-Elektrode, so **dass der untere Teil der pH-Elektrode bei der Messung immer in die Flüssigkeit taucht!**
7. Warte, bis sich der Zahlenwert nicht mehr ändert und lies den pH-Wert ab. Trage ihn in die Tabelle auf der nächsten Seite ein.
8. Spüle erneut die pH-Elektrode mit dest. Wasser.
9. Halte den Schlauch der Soda-Club-Maschine in das Wasser des kleinen Becherglases und sprudele es 3 Sekunden auf.

10. Miss erneut den pH-Wert und trage ihn zusammen mit der Farbe in die Tabelle ein.
11. Spüle die pH-Elektrode mit dest. Wasser.
12. Fülle 15 mL des gefärbten Wassers mittels eines Messzylinders in die Petrischale. Die restlichen 5 mL im Becherglas dienen als Vergleich.
13. Lege die Petrischale auf die Heizplatte und stelle diese auf 100 °C ein. **Vorsicht heiß!**



14. Lass die Schale ca. 5 min stehen und notiere deine Beobachtungen.
15. Sobald sich nichts mehr ändert, schalte die Heizplatte aus!
16. Warte, bis sich das Wasser etwas abgekühlt hat und sauge mittels einer Kunststoffpipette das gesamte Wasser auf und fülle es in ein Schnappdeckelglas.
17. Miss erneut den pH-Wert, indem du das Schnappdeckelglas unter die pH-Elektrode hältst. **Achte darauf, dass der untere Teil der pH-Elektrode bei der Messung immer in die Flüssigkeit taucht!**
18. Lies den pH-Wert ab und notiere ihn in der Tabelle.
19. Spüle die pH-Elektrode mit dest. Wasser und schraube das kleine Vorratsgläschen wieder an die pH-Elektrode.

Leitungswasser	pH-Wert	Farbe
vor Zugabe von CO ₂		
nach Zugabe von CO ₂ (vor dem Erhitzen)		
nach dem Erhitzen (Ende der Messung)		

Wie kannst du deine Beobachtungen erklären? (Vergleiche dazu auch die Farbe des Wassers mit deiner pH-Farbskala)

Was bedeutet das für das Klima auf unserer Erde?

Erderwärmung und Ozeanversauerung – Einfluss der Klimaerwärmung auf den pH-Wert der Ozeane

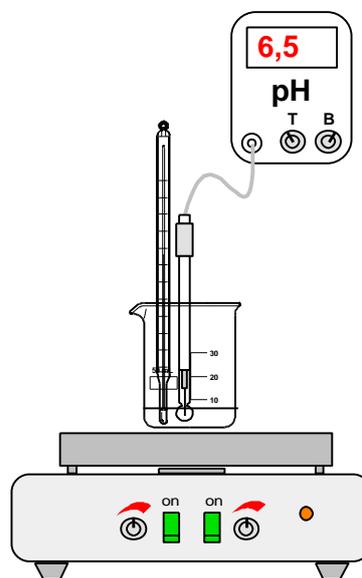
Variante C: Messung eines pH-Wert-Verlaufs mittels pH-Elektrode

Geräte

Minicomputer mit pH-Elektrode (mittels Kalibrierlösungen kalibriert) und Thermoelement, Becherglas weit (250 mL), Becherglas (50 mL), Becherglas weit (100 mL) beschriftet mit CO₂, Stativ mit Klemme und Muffe, Heizplatte, Messzylinder (10 mL), Soda-Club-Maschine, Glasstab, 10 mL Kunststoffspritze mit Schlauchverbindung (ca.10 cm lang), Klebepad, Mini-Rührkern

Materialien

dest. Wasser, Leitungswasser (vor dem Abfüllen den Wasserhahn ein wenig laufen lassen), Universalindikator (Mc Crumb: 20 mg Methylrot, 40 mg Bromthymolblau, 40 mg Thymolblau, 20 mg Phenolphthalein in 100 mL Ethanol), pH-Farbskala (Mc Crumb)



Durchführung

1. Fülle mit Hilfe des Messzylinders 10 mL Leitungswasser in das kleine Becherglas.
2. Gib 5 Tropfen Indikatorlösung (Mc Crumb) zum Wasser hinzu (kleines Becherglas). Rühre mit einem Glasstab um und notiere die Farbe der Flüssigkeit in der Tabelle auf der übernächsten Seite.
3. Befestige die pH-Elektrode am oberen weißen Ende mit der Klemme des Stativs.
4. Schraube das kleine Vorratsgläschen, das sich unten an der pH-Elektrode befindet, ab und stelle es beiseite. **Achtung: Es darf nicht umkippen!**
5. Halte das große Becherglas unter die pH-Elektrode und spüle den unteren Teil der Elektrode mit dest. Wasser ab.
6. Stelle das kleine Becherglas (50 mL) mit dem grünen Leitungswasser auf die kalte Heizplatte und lege einen kleinen weißen Rührkern in die Flüssigkeit.

7. Bringe nun die pH-Elektrode so in Position, dass **der untere Teil der Elektrode in die grüne Flüssigkeit des kleinen Becherglases taucht. Achte darauf, dass die Elektrode nicht den Glasboden berührt!**
8. Befestige zur Temperaturmessung das Thermoelement am oberen schwarzen Ende mittels Klebepad an der Innenseite des Becherglases. Der **untere metallene Teil soll ins Wasser tauchen. Achte auch hier darauf, dass das Thermoelement nicht den Becherglasrand oder -boden berührt!**
9. Drehe an der Heizplatte das **rechte** Einstellrad (beschriftet mit „Rührer“) auf ca. 375 Umdrehungen. Der Rührkern sollte sich frei und langsam in der Flüssigkeit drehen. Achte darauf, dass der Rührkern nirgends gegenstößt, korrigiere evtl. die Position des Becherglases. Bevor die Messung beginnen kann, müssen folgende Parameter am Display des Minicomputers eingegeben werden: Tippe in das Feld „Messdauer“ 1200 s und in das Feld „Messintervall“ 60 s ein. (Über einem Zeitraum von 20 min = 1200 s werden jede Minute der pH-Wert und die Temperatur aufgenommen und in Form eines Kurvendiagramms am Bildschirm angezeigt).
10. Nun kann die pH/Temperatur-Messung beginnen: Drücke auf das Feld „Messen“.
11. Lies den pH-Wert sowie die Temperatur am Bildschirm ab. Trage beide Werte in die Tabelle ein.
12. Befülle das Becherglas (beschriftet mit „CO₂“) mit Hilfe der Soda-Club-Maschine 10 s mit Kohlenstoffdioxid (da das CO₂-Gas schwerer als Luft ist, bleibt es am Boden des Becherglases).
13. Entnimm mit der Spritze 10 mL CO₂-Gas aus dem Becherglas. Halte dazu den Schlauch der Spritze unten in das Becherglas und ziehe den Stempel langsam und gleichmäßig bis zur 10 mL-Marke.
14. Halte nun das Schlauchende in die grüne Flüssigkeit und drücke das CO₂ langsam in das grüne Wasser (die Lösung sollte sich gelb färben). Warte bis sich der pH-Wert auf dem Bildschirm nur noch wenig ändert (erkennbar am Abflachen der Kurve) und notiere erneut die Farbe, den pH-Wert und die Temperatur des Wassers in der Tabelle (2. Zeile).
15. Schalte die Heizplatte auf 100 °C ein (linker Drehknopf, beschriftet mit „Heizung“).
16. Beobachte am Bildschirm, wie sich der pH-Wert und die Temperatur mit der Zeit ändern. Achte dabei parallel auch auf die Farbe des Indikators im Becherglas.
17. Notiere am Ende der Messung wieder die Farbe des Leitungswassers, den pH-Wert und die Temperatur in der Tabelle.
18. Schalte die Heizplatte aus.
19. Spüle die pH-Elektrode mit dest. Wasser und schraube das kleine Vorratsgläschen wieder an die pH-Elektrode.
20. Entferne das Thermoelement, spüle es mit dest. Wasser und lege es zur Seite.
21. Für die Auswertung können die Kurven und Messwerte auf einem USB-Stick gespeichert und anschließend ausgedruckt werden. Lass dir vom Laborpersonal dabei helfen.

Leitungswasser	pH-Wert	Farbe	Temperatur [°C]
vor Zugabe von CO ₂			
nach Zugabe von CO ₂ (vor dem Erhitzen)			
nach dem Erhitzen (Ende der Messung)			

Wie kannst du deine Beobachtungen erklären? (Vergleiche dazu auch die Farbe des Wassers mit deiner pH-Farbskala)

Was bedeutet das für das Klima auf unserer Erde?

Information zum Versuch: Erderwärmung und Ozeanversauerung – Einfluss der Klimaerwärmung auf den pH-Wert der Ozeane

Dieser Versuch soll den Schülerinnen und Schülern demonstrieren, welche Folgen die Erwärmung des Ozeanwassers für die Löslichkeit von CO_2 und damit für die Aufnahmekapazität der Ozeane für dieses Treibhausgas hat. Es ist gleichzeitig ein Beispiel für gegenläufige bzw. rückgekoppelte Effekte. Einerseits mildert die CO_2 -Aufnahme durch die Ozeane den Treibhauseffekt, führt jedoch zur pH-Absenkung mit ihren negativen Folgen für verschiedene Meeresorganismen. Andererseits nimmt diese wichtige Aufnahmekapazität für CO_2 aber wiederum mit steigender Temperatur ab, was zwar den pH-Wert im Experiment wieder steigen lässt, aber durch das vermehrte CO_2 in der Luft die Erwärmung vorantreibt.

Hintergrund

Im Klimasystem der Erde spielen die Ozeane eine wesentliche Rolle. Sie bedecken etwa $\frac{2}{3}$ der Erdoberfläche und nehmen einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung auf. Physikalisch betrachtet ist Wasser ein sehr effektiver Wärmespeicher. Bei gleicher Temperaturerhöhung kann eine bestimmte Masse an Wasser deutlich mehr Wärmeenergie aufnehmen als die gleiche Masse an Luft (spezifische Wärmekapazität $c_{\text{Wasser}} = 4,184 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $c_{\text{Luft}} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ¹. Diese viermal höhere Wärmekapazität des Wassers hat zur Folge, dass ca. 93 % der gegenwärtigen Erwärmung durch zusätzliche Treibhausgase vom Ozean aufgenommen werden (siehe Abb.1). Die Ozeane entziehen der Atmosphäre eine überraschend große Menge Wärmeenergie und puffern so die Erwärmung der Atmosphäre durch den menschengemachten Treibhauseffekt.

Wohin geht die Erderwärmung?

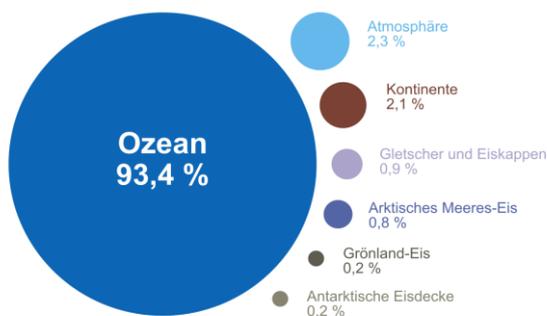
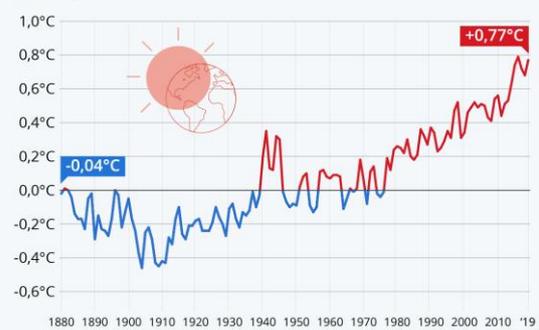


Abb. 1: Der größte Anteil der Wärmeenergie, die sich zusätzlich zum natürlichen Treibhauseffekt durch den menschlichen CO_2 -Ausstoß im Erdsystem anreichert, wird vom Ozean aufgenommen.²

Die Weltmeere werden wärmer

Abweichung der weltweiten Meerestemperatur vom Temperaturdurchschnitt 1900-1999*



* Meeresoberflächentemperatur

Quelle: NOAA National Centers for Environmental Information



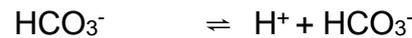
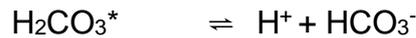
statista

Abb. 2: Änderung der Meeresoberflächentemperatur von 1880 – 2019. Laut NOAA lagen die globalen Oberflächentemperaturen der Ozeane 2019 um $0,77 \text{ °C}$ über dem Durchschnitt des vergangenen Jahrhunderts.³

Man bezeichnet ein Ökosystem als „Senke“, wenn es mehr CO_2 aufnimmt als abgibt. Ozeane können aufgrund ihres großen Volumens große Mengen an CO_2 aus der Atmosphäre aufnehmen (lösen) und speichern. Da dadurch der Anstieg des in der Atmo-

sphäre verbleibenden CO_2 geringer ausfällt, wirken Ozeane der Erderwärmung entgegen.

Die hohe Aufnahmekapazität des Meerwassers für CO_2 – bei 0 °C und Normaldruck beträgt die Löslichkeit von CO_2 in Wasser 3,346 g/L - wird durch dessen Reaktion mit dem Wasser begünstigt: CO_2 findet sich gelöst im Meerwasser in drei Formen, die miteinander im Gleichgewicht stehen: gelöstes CO_2 (1 %), Carbonat CO_3^{2-} (8 %) und Hydrogencarbonat HCO_3^- (91 %).⁴



* Anmerkung: Aus didaktischen Gründen wird hier die vereinfachte Schreibweise H_2CO_3 benutzt, obwohl sie nur in sehr geringer Konzentration vorkommt. Bisher war man davon ausgegangen, dass Kohlensäure (H_2CO_3) als stabiles Molekül überhaupt nicht existiert, da sie sofort in Wasser und Kohlendioxid zerfällt. Doch einem österreichischen Forscherteam ist es inzwischen gelungen, gasförmige Kohlensäure zu detektieren - allerdings nur als Spurenkomponente.⁵

Diese Reaktion von CO_2 im Ozean bleibt aber nicht folgenlos. Es werden Wasserstoffionen (H^+) gebildet, was zur pH-Absenkung, der sogenannten Versauerung des Ozeans führt. (Der pH-Wert liegt bei ca. 8,1, also noch im schwach basischen Bereich. Im Mittel ist er bisher um ca. 0,1 Einheiten gesunken). Der sinkende pH-Wert stellt eine Gefahr für Meeresorganismen dar, die ihre Schalen und Skelette aus Kalk aufbauen (siehe dazu den Versuchsteil: „Ozeanversauerung – Wirkung von CO_2 auf Muscheln“).

Neben chemischen Reaktionen steuern auch biologische Prozesse die CO_2 -Aufnahme im Ozean. Das im Oberflächenwasser gelöste CO_2 wird von pflanzlichen Mikroorganismen (Phytoplankton) zur Photosynthese genutzt, um organisches Material zu produzieren. Nach dem Absterben sinkt diese Biomasse teils in tiefere Wasserschichten und entzieht so dem atmosphärischen Kreislauf Kohlenstoff.

Im Zuge der globalen Erwärmung erwärmen sich auch die Wassermassen der Weltmeere. Wie aus Abb. 2 deutlich wird, ist in der Zukunft mit weiter steigenden Temperaturen des Meerwassers zu rechnen. Hier gibt es einen Rückkopplungseffekt, da die Löslichkeit von CO_2 in Wasser mit steigender Temperatur abnimmt (s. Abb. 3), z. B. zwischen 15 und 20 °C um ca. 17 % von ca. 2,1 g/L auf ca. 1,75 g/L. Die Pufferwirkung der Ozeane für das Klima wird also durch die Erwärmung geschwächt (s. auch den Versuchsteil: „Ozeanversauerung – Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in den Meeren“).

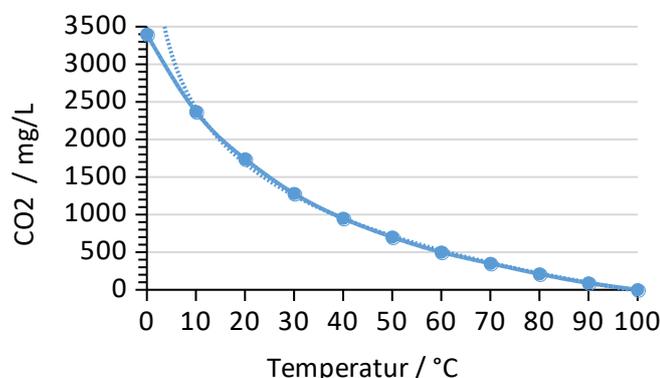


Abb. 3 Löslichkeit von CO_2 in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur bei Normaldruck (1,013 bar). Daten aus Ref. ⁶

Die Temperaturabhängigkeit der CO₂-Aufnahme durch die Ozeane zeigt sich z. B. darin, dass der Ozean an den Polen mehr CO₂ aufnimmt als die Meere in den tropischen und subtropischen Bereichen. Als Folge sind Arktis und Antarktis in der Tat stärker von der „Ozeanversauerung“ betroffen.⁷

Tab. 1: Änderungen des pH-Werts und der Parameter des Kohlenstoffsystems im ozeanischen Oberflächenwasser bei einer Verdopplung des CO₂-Gehalts gegenüber der vorindustriellen Atmosphäre ohne und mit einer Erwärmung von 2 °C.⁸
(CO₂(aq) = gelöstes Kohlendioxid, HCO₃⁻ = Hydrogencarbonat, CO₃²⁻ = Carbonat, CT = Gesamtkohlenstoff = CO₂(aq) + HCO₃⁻ + CO₃²⁻).

Parameter	Vorindustriell (280 ppmv) 20°C	2 × vorindustriell (560 ppmv) 20°C	(Prozentuale Änderung gegen- über vorindustriellen Werten)	2 × vorindustriell (560 ppmv) 22°C	(Prozentuale Änderung gegen- über vorindustriellen Werten)
pH	8,1714	7,9202	–	7,9207	–
H ⁺ (mol kg ⁻¹)	6,739e ⁻⁹	1,202e ⁻⁸	(78,4)	1,200e ⁻⁸	(78,1)
CO _{2(aq)} (μmol kg ⁻¹)	9,10	18,10	(98,9)	17,2	(89,0)
HCO ₃ ⁻ (μmol kg ⁻¹)	1 723,4	1 932,8	(12,15)	1 910,4	(10,9)
CO ₃ ²⁻ (μmol kg ⁻¹)	228,3	143,6	(-37,1)	152,9	(-33,0)
C _T (μmol kg ⁻¹)	1 960,8	2 094,5	(6,82)	2 080,5	(6,10)

Allerdings sind die Zusammenhänge komplex. So wird aus den Werten in Tab. 1 (Spalte 2 und 4) deutlich, dass eine Erhöhung der Temperatur von 2 °C zwar zu einer 10 %igen Senkung der Kohlenstoffdioxidaufnahme im Oberflächenwasser führt, der pH-Wert dagegen stabil bleibt und in diesem Bereich nicht wie das Experiment suggeriert ansteigt. Der Grund dafür ist, dass sich auch das Gleichgewicht von Hydrogencarbonat und Carbonat temperaturabhängig verschiebt, so dass die geringere CO₂-Menge durch eine stärkere Dissoziation zum Carbonat kompensiert und der pH-Wert so stabilisiert wird. Dabei ist von Bedeutung, dass im Meer „Carbonatreservoir“ (kalkhaltige Organismen) und weitere Salze vorliegen (Pufferwirkung). Ein wärmerer Ozean hat also weniger Kapazität, CO₂ aus der Atmosphäre aufzunehmen, würde jedoch im hier relevanten Bereich weiterhin versauern.⁸ Die Experimente behandeln einzelne Phänomene, hier die Abnahme der Löslichkeit von CO₂ mit der Temperatur.

Erklärung zum Versuch

Einfluss der Klimaerwärmung auf den pH-Wert der Ozeane

Variante A: Messung des pH-Wertes mittels Universalindikator

Variante B: Messung des pH-Wertes mittels pH-Elektrode

Variante C: Messung eines pH-Wert-Verlaufs mittels pH-Elektrode

In diesem Versuch soll untersucht werden, welchen Einfluss die Erwärmung einer CO₂-haltigen Lösung auf den pH-Wert hat. Dazu wird Leitungswasser mit einem Universalindikator versetzt, CO₂ aus einer Soda-Club-Maschine zugegeben und anschließend auf einer Heizplatte erhitzt. Der Universalindikator im Wasser zeigt durch Farbänderungen an, wie sich der pH-Wert als Folge des CO₂-Eintrags und der veränderten Löslichkeit von CO₂ in Abhängigkeit von der Temperatur des Wassers ändert.

Je nach Kenntnisstand und Altersstufe der Schülerinnen und Schüler kann zwischen drei Versuchsvarianten gewählt werden.

In Variante **A** wird die Änderung des pH-Wertes nur visuell über die Farbänderung des Universalindikators verfolgt. In den Varianten **B** und **C** kommt zusätzlich zur pH-Wert-Messung eine pH-Elektrode zum Einsatz. Es können dabei entweder einzelne pH-Werte gemessen werden (Variante B) oder der Verlauf des pH-Wertes zusammen mit dem Temperaturverlauf computergestützt aufgezeichnet werden (Variante C).

Beobachtung

Der pH-Wert des Wassers liegt bei ca. 7-8 (dunkelgrün) und ändert sich beim Einleiten des Kohlenstoffdioxids auf ca. 5-6 (orange). Erhitzt man die Lösung, steigt der pH-Wert und erreicht annähernd den Ausgangswert (7, grün).

In **Variante A** erfolgt die Auswertung über eine pH-Farbskala, während in **Variante B** die einzelnen pH-Werte mit einer pH-Elektrode gemessen und direkt am Bildschirm des Minicomputers abgelesen werden.

In **Variante C** werden der Verlauf des pH-Wertes sowie der Verlauf der Temperatur beim Erhitzen mittels eines Minicomputers aufgezeichnet. Abb. 4 zeigt einen typischen Kurvenverlauf des pH-Wertes.

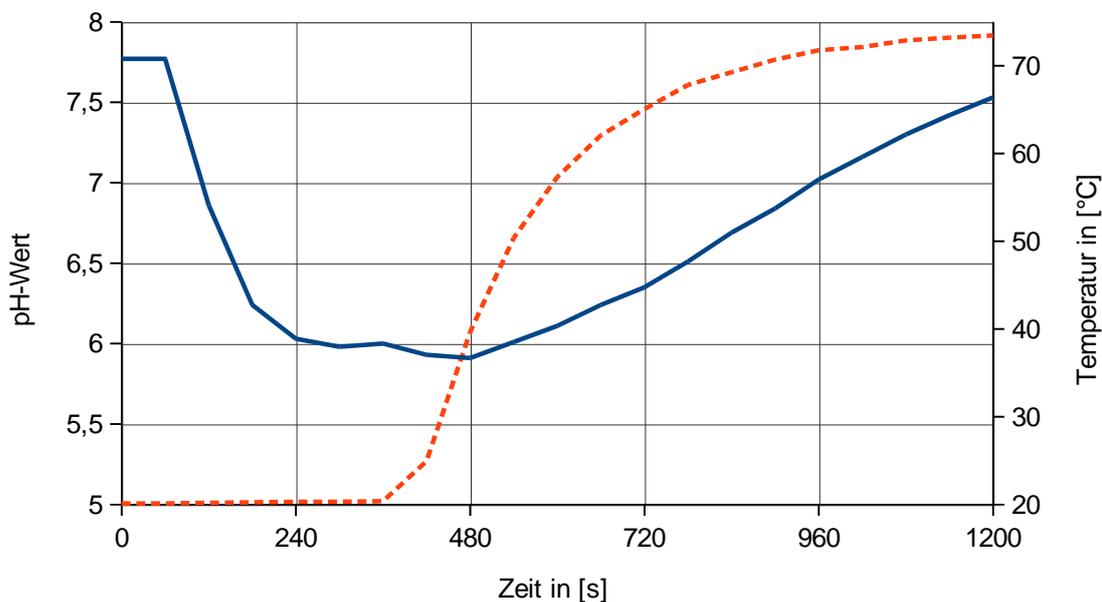
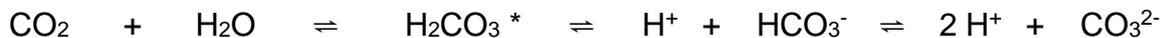


Abb. 4: Das Diagramm zeigt, die Änderung des pH-Wertes (blaue Linie) von Wasser nach dem Zusetzen von CO₂ und anschließendem Erhitzen auf der Heizplatte (rote, gestrichelte Linie).

Deutung

Das Leitungswasser hat allgemein einen neutralen bis schwach alkalischen pH-Wert. Dieser liegt ca. zwischen 7,0 und 8,5. Leitet man CO₂ unter Druck in das Wasser, löst sich ein Teil davon und bildet „Kohlensäure“*, die sofort weiter in Wasserstoff-Ionen (H⁺ bzw. H₃O⁺) und Hydrogencarbonat-Ionen (HCO₃⁻) dissoziiert und in einer 2. Stufe zu Carbonat-Ionen (CO₃²⁻) und einem weiteren Wasserstoff-Ion (H⁺) zerfällt.



Der Anstieg der Wasserstoff-Ionen-Konzentration führt dazu, dass der pH-Wert der Lösung sinkt (auf ca. 5-6) und das Wasser sauer wird. Erkennen können die Schülerinnen und Schüler die pH-Wert-Änderung am Farbwechsel von dunkelgrün nach orange. Das Beispiel-Experiment in Abb. 4 zeigt, dass der pH-Wert des Wassers nach Einleiten von CO₂ innerhalb von ca. 320 s von 7,8 auf 5,9 gesunken ist. Nach Einschalten der Heizplatte (erkennbar am Anstieg der roten Kurve) steigt der pH-Wert des Wassers im Zuge der Erwärmung (20 auf 74 °C) von 5,9 auf 7,5 und erreicht fast wieder den ursprünglichen Wert.

Beim Erwärmen der wässrigen CO₂-Lösung verringert sich die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser. Das Kohlenstoffdioxid entweicht, die Konzentration an gelöstem CO₂ nimmt damit ab und die o. g. Gleichgewichte verschieben sich nach links. Aufgrund des erneuten Farbwechsels von orange über gelb nach grün bzw. aufgrund des Anstiegs der pH-Kurve können die Schülerinnen und Schüler schlussfolgern, dass das CO₂ wieder aus dem Wasser entweicht und die Lösung wieder weniger sauer wird.

Übertragen auf den Ozean lernen die Schülerinnen und Schüler hier, dass ein wärmerer Ozean weniger CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen kann. Andersherum formuliert, führt eine Temperaturerhöhung der Ozeane zu einer höheren Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre.

Quantitative Aspekte und Komplexität

Der Klimawandel ist ein sehr langsamer Prozess mit scheinbar geringfügigen Veränderungen. So ist der pH-Wert bisher – mit lokalen Unterschieden – von vorindustriellen 8,2 auf ca. 8,1 gesunken.^{7,8} Um die grundlegenden Phänomene in einem Laborexperiment sichtbar zu machen, arbeiten die Versuche zwangsläufig mit viel größeren Konzentrationen und viel stärkeren Temperatureffekten als sie in der Realität relevant sind. Die Effekte wären sonst im Rahmen von SchülerInnen-Versuchen nicht messbar. – So führt der CO₂-Eintrag in unserem Experiment zu einem Abfall um ca. 1,8 Einheiten. Das Wasser wird um ca. 50 °C erwärmt, nicht um die aktuell diskutierten 1-3 °C. Der dabei zu beobachtende Wiederanstieg des pH-Wertes könnte zu dem Schluss verleiten, dass die Erwärmung der Ozeane ja zumindest deren „Versauerung“ stoppt. Real ist dies jedoch nicht so geradlinig zu schließen, da sich auch andere Gleichgewichte (HCO₃⁻/CO₃²⁻, s.o.) und physikalische Eigenschaften temperaturabhängig ändern. So spielen auch die in den Meeren gelösten Salze aufgrund ihrer Pufferkapazität für den pH eine Rolle. Die Zusammenhänge sind komplex, so dass man bei isolierter Betrachtung eines Phänomens Gefahr läuft, falsche Schlüsse für das Ganze zu ziehen. Dieses grundlegende Problem bei der wissenschaftlichen Untersuchung langsamer Prozesse, deren Darstellung der Forcierung und Beschleunigung bedarf, sollte in der Diskussion mit den Schülerinnen und Schülern adressiert werden.

Quellen

1. https://de.wikipedia.org/wiki/Spezifische_Wärmekapazität (Zugriff am 28.07.2020)
2. Furfur (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wohin_geht_die_Erderwärmung.svg), „Wohin geht die Erderwärmung“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode> (Zugriff am 28.07.2020)
3. <https://de.statista.com/infografik/19424/weltweite-meerestemperatur/statista:https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode> (Zugriff am 20.11.2020)
4. <https://bildungsserver.hamburg.de/treibhausgase/2055556/kohlenstoffkreislauf-ozean-artikel/> (Zugriff am 02.09.2020)
5. „Der Kohlensäure auf der Spur“. CHEMKON 2/2001, Nr. 18, S. 92
6. <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie> (Zugriff am 10.10.2020)
7. Das andere CO₂-Problem. Ozeanversauerung – Acht Experimente für Schüler und Lehrer. Hrsg.: BI-OACID / Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR), 2. Aufl. 2012
8. IPCC 2014: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017. FAQ3.3, Tab.1, S.17 (Zugriff am 28.09.2020)
9. https://www.wikiwand.com/de/Versauerung_der_Meere (Zugriff am 11.10.2020)