

Gregor von Borstel
Alexander-von-Humboldt-Gymnasium
Adenauer-Allee 50
53332 Bornheim

Thema der Reihe: Bringen wir das Klima aus dem Takt? Der menschliche Eingriff in den natürlichen Kohlenstoffdioxidkreislauf und die Veränderung des Weltklimas

Thema der Stunde: Untersuchung des Einflusses der CO_2 -Konzentration auf das $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ Gleichgewicht im Kontext der Kalklösung in Kalkgesteinen und der Kalkbildung im Trinkwasser.

1 Lernziele

Hauptintention der Stunde: Ich möchte in dieser Stunde den Schülerinnen und Schüler (S´uS) die Möglichkeit geben, in Partnerarbeit (offenes Schülerexperiment) ausgehend von einem experimentell überprüfbar, motivierenden Problem ein Experiment eigenständig zu entwickeln und durchzuführen und damit einen Lerngegenstand weitestgehend eigenständig zu erarbeiten.

Fachliche und methodische Lernziele

Die S´uS sollen den Einfluss der CO₂-Konzentration auf den Calciumcarbonat/Calciumhydrogencarbonat-Kreislauf erklären, indem sie

- ausgehend von einem Problem experimentell zeigen, dass Kalk sich unter Einwirkung von Kohlenstoffdioxid und Wasser löst,
- den Vorgang mit Hilfe von Reaktionsgleichungen im Diskontinuum erklären und
- die Verlagerung des Gleichgewichts bei Verringerung CO₂-Konzentration voraussagen, prüfen und mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier erläutern.

Die S´uS erhalten dabei die Möglichkeit, ihre Kompetenzen (KMK 2004¹) in folgenden Bereichen zu erweitern bzw. üben anzuwenden:

1. Kompetenzbereich Fachwissen - Bereich chemische Reaktion: S´uS

- erstellen Reaktionsschemata/Reaktionsgleichungen
- beschreiben die Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen
- beschreiben Beispiele für Stoffkreisläufe in Natur und Technik als Systeme chemischer Reaktionen
- beschreiben Möglichkeiten der Steuerung chemischer Reaktionen durch Variation von Reaktionsbedingungen

2. Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung: S´uS

- erkennen und entwickeln Fragestellungen, die mit Hilfe chemischer Kenntnisse und Untersuchungen, insbesondere durch chemische Experimente, zu beantworten sind.
- planen geeignete Untersuchungen zur Überprüfung von Vermutungen und Hypothesen.
- führen qualitative und einfache quantitative experimentelle und andere Untersuchungen durch und protokollieren diese.
- beachten beim Experimentieren Sicherheits- und Umweltaspekte.

3. Kompetenzbereich Kommunikation: S´uS

- beschreiben, veranschaulichen oder erklären chemische Sachverhalte unter Verwendung der Fachsprache und/oder mit Hilfe von Modellen und Darstellungen.
- stellen Zusammenhänge zwischen chemischen Sachverhalten und Alltagserscheinungen her und übersetzen dabei bewusst Fachsprache in Alltagssprache und umgekehrt.
- protokollieren den Verlauf und die Ergebnisse von Untersuchungen in angemessener Form.
- argumentieren fachlich korrekt und folgerichtig.

¹ Beschlüsse der Kultusministerkonferenz, Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss vom 16.12.2004. Die Beschlüsse gelten für die SI – sind aber auch sinnvollerweise in die Stufe 11 zu übertragen.

2 Stellung der Stunde in der Reihe

Thema der letzten Stunde: Das Löslichkeitsprodukt als Sonderform des MWG am Beispiel des Gleichgewichts Natriumhydrogencarbonat/-carbonat

Thema der heutigen Stunde: Untersuchung des Einflusses der CO₂-Konzentration auf das CaCO₃/Ca(HCO₃)₂ Gleichgewicht im Kontext der Kalklösung in Kalkgesteinen und der Kalkbildung im Trinkwasser

Thema der folgenden Stunde: Chemische Abläufe in einer Tropfsteinhöhle als übende Anwendung der Erkenntnisse auf den gesamten natürlichen Kalkkreislauf.

Die **heutige Stunde** ist Teil des **Themenfeldes C (Stoffkreislauf in Natur und Umwelt)**. Es hat sich aus meiner Sicht bewährt, im **Themenfeld B (Ein technischer Prozess)** zunächst grundlegende obligatorische Unterrichtsgegenstände und fachliche Qualifikationen² zu erarbeiten, welche die S´uS dann im **Themenfeld C** in neuen Zusammenhängen anwenden.

So haben wir zu Anfang des **Themenfeldes B** nach der Behandlung der *Reaktionsgeschwindigkeit* das *Massenwirkungsgesetz* eingeführt und dann im Kontext Sprudelwasser das *Prinzip von Le Chatelier*³ erarbeitet, welches seinerseits Grundlage der Steuerung technischer Prozesse ist.

Basierend darauf waren die S´uS in der Lage, die bis heute gesellschaftlich relevante Stickstofffixierung nach dem *Haber-Bosch-Verfahren* als Beispiel für einen **technischen Prozess** zu erarbeiten. Hier ergab sich zudem die Möglichkeit des fachübergreifenden Arbeitens⁴ (Fritz Haber, Clara Immerwahr und der Gaskrieg). Des weiteren wurde von S´uS die Frage nach dem natürlichen Stickstoffkreislauf gestellt. Somit war ein nahtloser **Übergang zum Themenfeld C** möglich. Ausgehend vom Beispiel *Stickstoffkreislauf*, an dem sich zudem die *Oxidationszahlen* immanent wiederholen ließen, wurde das Ökosystem Erde als ein Zusammenspiel der verschiedensten **Kreisläufe** vorgestellt und ein weiterer, der *Kohlenstoffkreislauf*, schematisch erfasst. Dabei richtete sich der Fokus zunächst auf die Sedimentgesteine als mengenmäßig größten Teil dieses Kreislaufs. Mit *Solvayverfahren* wurde in diesem Zusammenhang rückgreifend zunächst ein weiterer technischer Prozess kurz behandelt und die inhaltlichen Grundlagen für die heutige Stunde gelegt. Dabei boten sich Berechnungen einfacher Löslichkeitsprodukte an, die in der Stufe 12 (z. B. Potentiometrie) aufgegriffen und vertieft werden.

In der **heutigen Stunde** sollen die S´uS den Einfluss der CO₂-Konzentration auf das CaCO₃/Ca(HCO₃)₂ Gleichgewicht schrittweise erarbeiten und damit in die Lage versetzt werden, die chemische Abläufe in einer Tropfsteinhöhle als Beispiel für den gesamten natürlichen Kalkkreislauf zu erklären.

Im **weiteren Verlauf der Reihe** werden wir diesen Kreislauf in den Kohlenstoffkreislauf einbinden. Hierbei richtet sich der Blick dann auf den mengenmäßig kleinsten, aber aus unserer Sicht dennoch wichtigsten Bereich: die Erhöhung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxidanteils und die daraus möglicherweise resultierenden Folgen für das Leben auf der Erde.

Die S´uS sollen erkennen, dass die Zusammenhänge in *Stoffkreisläufen nicht linearer Natur* sind und dass der Eingriff des Menschen weitreichende, negative Folgen haben kann, deren Abwendung ein politisches Handeln erfordern. Die Naturwissenschaften legen für derartige Entscheidungen die Faktenbasis. Die S´uS sollen neben der Relevanz des Themas für ihr heutiges und zukünftiges Leben auch erfassen, wie unterschiedlich naturwissenschaftliche Prognosen auf Basis der selben Daten sein können und wie verschiedentlich sie je nach Intention ausgelegt und bewertet werden.

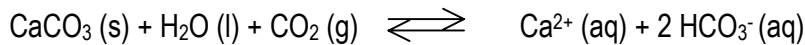
² vgl. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG NRW (Hrsg.), Lehrplan Chemie, S. 19

³ vgl. GREGOR VON BORSTEL UND ANDREAS BÖHM, *Le Chatelier einmal anders*, Gleichgewichtsverschiebungen am Kontext Sprudelwasser, NiU 96, Sicher Experimentieren, 2006, S. 34-37

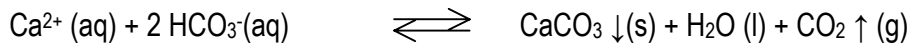
⁴ vgl. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG NRW (HRSG.), Lehrplan Chemie, S. 8, 15 und 19.

3 Sachanalyse

Das in der Luft und vor allem in der Porenluft des Bodens durch Atmung der Mikroorganismen vorhandene Kohlenstoffdioxid bildet mit dem Wasser intermediär Kohlensäure. Diese löst dann Calciumcarbonat unter Bildung von wasserlöslichem Calciumhydrogencarbonat, was folgende vereinfachte Gleichung zeigt:

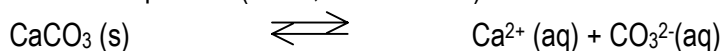


Wird dem Gleichgewicht Kohlenstoffdioxid entzogen, scheidet sich aus hydrogencarbonathaltigem Wasser wieder Calciumcarbonat z.B. als Kesselstein oder Tropfstein ab:

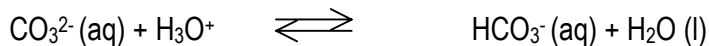


Bei genauerer Betrachtung stellt sich das Lösen von Kalk, z. B. bei der Verwitterung von Kalkgestein, etwas komplexer dar. Das tatsächliche Geschehen wird von folgenden Gleichgewichten geprägt:

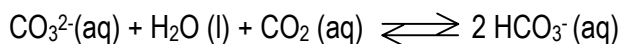
1. Aus dem Gitterverband werden solange Ca^{2+} -Ionen und CO_3^{2-} -Ionen herausgelöst, bis das Löslichkeitsprodukt ($K_L = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{L}^2$) erreicht ist:



2. Die gebildeten Carbonat-Ionen sind starke Brönsted-Basen und reagieren sofort mit den vorwiegend von der „Kohlensäure“ stammenden Hydronium-Ionen:



3. Folgendes Hydrolyse-Gleichgewicht ist damit auch beteiligt:



4. Da durch diese Reaktionen die Carbonat-Ionen in der Nähe der angelösten Kalkphase aus dem Gleichgewicht entfernt werden, kann Calciumcarbonat weiter in Lösung gehen, bis das Löslichkeitsprodukt wieder erreicht ist.

Die in Wasser gelösten verschiedenen Erdalkali-Ionen samt den zugehörigen Carbonat- und Sulfat-Fällungsprodukten bezeichnet man als Wasserhärte. Die Gesamthärte wird in °dH (s.u.) angegeben

Der Deutsche Bundestag hat am 01.02.2007 die Neufassung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln beschlossen.⁵ Danach sind die Wasserversorgungsunternehmen verpflichtet, dem Verbraucher die Härtebereiche des Trinkwassers wie folgt anzugeben:

- Härtebereich weich: weniger als 1,5 Millimol Calciumcarbonat je Liter (entspricht 8,4°dH)
- Härtebereich mittel: 1,5 bis 2,5 Millimol Calciumcarbonat je Liter (entspricht 8,4 bis 14°dH)
- Härtebereich hart: mehr als 2,5 Millimol Calciumcarbonat je Liter (entspricht mehr als 14°dH)

Diese neuen drei Härtebereiche lösen die bisherigen alten vier Bereiche ab⁶.

Zu hartes Wasser kann zur Verkalkung von Heizstäben und somit zu einem höheren Energieverbrauch bei der Heißwasserbereitung bzw. zur Totalverkrustung von Rohrleitungen führen. Umgekehrt führt zu weiches Wasser zu Korrosionserscheinungen in den Rohren.

Das Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Gleichgewicht ist Teil des weltweiten Kohlenstoffkreislaufs. Neben der Lithosphäre sind der Ozean und die Landbiosphäre die wichtigsten Kohlenstoffspeicher, die mit der Atmosphäre in einem aktiven Austausch stehen. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration dort ist von enormer Relevanz für das Leben auf der Erde, nicht zuletzt aufgrund des viel diskutierten Treibhauseffekts.⁷ Im

⁵ vgl. www.dvgw.de/wasser/informationen-fuer-verbraucher/wasserhaerte

⁶ Die Angaben für Bornheim, die in dieser Stunde von den S' uS erfragt werden könnten, sind im Anhang zusammengestellt.

⁷ Eine weitergehende Betrachtung des anthropogenen Eingriffs in die Kohlenstoffkreisläufe zwischen Atmosphäre, Ozean und Land zeigen die Abbildungen im Anhang.

Ozean beeinflusst die Kohlenstoffdioxidkonzentration zudem über die genannten Gleichgewichte den pH-Wert und eine Veränderung kann auch hier Einfluss auf das Leben nehmen.⁸

4 Didaktische und methodische Gegenstandsanalyse

Das Thema der Stunde ist Teil der Obligatorik der Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II Gymnasium, die im Bereich des Leitthemas **Ablauf und Steuerung chemischer Reaktionen in Natur und Technik** im Themenfeld C **Stoffkreislauf in Natur und Umwelt** eine Behandlung des Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislaufs vorschlagen.⁹

Zwar könnten im Themenfeld C prinzipiell auch andere Stoffkreisläufe behandelt werden, ich habe mich aber für den Kohlenstoffkreislauf entschieden, da er

- von hoher Relevanz für das Leben der S´uS ist,
- in Form des anthropogenen Treibhauseffektes nahezu täglich in den Medien präsent ist, wobei die S´uS in die Lage versetzt werden sollen, die Diskussion auf Basis ihrer Kenntnisse zu verfolgen und selbst zu bewerten,
- und darüber hinaus zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere zukünftige Lerninhalte (z. B. Analytik, Puffer, Blut und Atmung, Wasserhärte und Waschmittel, Korrosion und Aufhärten des Wassers) bietet.

In der heutigen Stunde sollen die S´uS in die Lage versetzt werden, den natürlichen Kalkkreislauf eigenständig zu erfassen. Dazu müssen sie folgende gedankliche Schritte durchlaufen:

- Kalk ist schwer wasserlöslich, dennoch lösen sich kalkhaltige Gesteine mit der Zeit auf.
- Dafür verantwortlich ist die Bildung von gut wasserlöslichem Calciumhydrogencarbonat durch Einwirkung von Kohlenstoffdioxid und Wasser auf Kalk.
- Das Gleichgewicht zwischen Calciumcarbonat und Calciumhydrogencarbonat lässt sich auf die Seite des Calciumcarbonats verschieben, wenn Kohlenstoffdioxid aus der Lösung entweicht.
- Die Lage des Gleichgewichts ist damit insgesamt abhängig von der Kohlenstoffdioxidkonzentration im Wasser.

Da eine Vermittlung der Unterrichtsinhalte im Kontext¹⁰ geboten ist, läge es nahe, die S´uS die Zusammenhänge an den chemischen Abläufen in einer Tropfsteinhöhle erarbeiten zu lassen. Die dort ablaufenden Sachzusammenhänge sind für S´uS der Stufe 11 aber in ihrer Gesamtheit komplex und ein selbstständiges Arbeiten würde die schwächeren S´uS (s. Pkt. 2) überfordern.

Daher habe ich mich entschlossen, die Erarbeitung in der heutigen Stunde in zwei Schritte zu unterteilen:

- Lösen von Kalk im Boden und Entstehung von calciumcarbonathaltigem Wasser
- Bildung von Kalk aus calciumhydrogencarbonathaltigem Trinkwasser

Da beide Schritte in einer Tropfsteinhöhle in eben dieser Reihenfolge ablaufen, sollten die S´uS in der sich anschließenden zweiten Stunde der Doppelstunde in der Lage sein, beide Sachverhalte am Beispiel der Tropfsteinhöhle zusammen zu fassen.

Der **Einstieg** der Stunde basiert auf einer tatsächliche Begebenheit, einer sogenannten Dolinenbildung als Folge der Auswaschung von Kalk aus dem Untergrund. Den S´uS wird neben dem Bild eines Kraters das dazu passende Bodenprofil präsentiert, aus dem sie schließen können, dass der Untergrund kalkhaltig

⁸ vgl. BERICHT DES IPCC (2007): Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, Box 3, S.529

⁹ vgl. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG NRW (Hrsg.), Lehrplan Chemie, S.18

¹⁰ vgl. ebd., S.11.

war. Ich beabsichtige sie mit dem Foto auch affektiv anzusprechen, so dass sie über den Inhalt hinaus motiviert sind, sich mit dem Gegenstand forschend auseinander zusetzen.

Damit die Schüler ihr Vorwissen anwenden können, muss es zunächst reorganisiert werden. Dabei wird in der **Hypothesenphase** entsprechend kleinschrittig vorgegangen (vgl. Pkt. 2). Die S´uS sollen erkennen, dass das Loch erst nach der Bebauung überraschend entstand und mit dem Auflösen des Kalks in Zusammenhang stand. Sollten sie dies nicht aus den beiden Bildern schließen, kann fakultativ eine erläuternde Bildfolge zur Karstbildung gezeigt werden. Die S´uS müssen erkennen, dass für die Kalklösung nicht allein Wasser verantwortlich sein kann. Da sich dies für sie möglicherweise nicht von alleine erschließt, kann als unterstützender Impuls auf das Löslichkeitsprodukt von Kalk hingewiesen werden, sowie vertiefend auf die Tatsache, dass Regenwasser bekanntermaßen nicht neutral ist. Basierend auf ihren Vorkenntnissen zur Umwandlung von Natriumcarbonat in Natriumhydrogencarbonat könnten die S´uS ähnliches für die Bildung von Calciumhydrogencarbonat vorschlagen.

Diese Hypothese könnte vom Lehrer durch den Vergleich der Löslichkeit beider Stoffe verifiziert werden. Im Sinne eines entdeckenden Lernens halte ich es aber für sinnvoller, dass die S´uS in der **folgenden Erarbeitungsphase** ein Experiment planen und durchführen, welches zeigt, dass sich Kalk unter Einfluss von Wasser und Kohlenstoffdioxid auflöst.

In der eigenständigen **Planung und Durchführung des Experiments**, was nicht nur für die S II sondern im Kernlehrplan Chemie zukünftig auch schon für die S I verbindlich gefordert wird, liegt der methodische Schwerpunkt der Stunde. Um dies gefahrenarm umzusetzen, benutzen wir Geräte aus der Medizintechnik¹¹, die neben der Stoffminimierung auch eine hohe Anschaulichkeit garantieren und durch ihre Flexibilität Raum für mehrere Lösungswege und damit für eigenes Planen und Handeln lassen.

Da den S´uS die Experimentiertechnik aus dem bisherigen Unterricht vertraut ist, u.a. von der Einführung des Prinzips von Le Chatelier¹² oder der Kalkwasserprobe, sollten auch die leistungsschwächeren S´uS in der Lage sein, selbstständig zu arbeiten (s. Pkt. 2).

Damit das Experiment im zeitlichen Rahmen einer Unterrichtsstunde erfolgreich verläuft, muss der Lehrer den Hinweis geben, dass der Kalk feinst verteilt vorliegen soll. Ansonsten kann die Planung und Durchführung in die Hand der Gruppen gegeben werden. Daher erhalten die S´uS keine schriftliche Versuchsanleitung, sondern nur Anweisungen zur Sicherheit und Entsorgung.¹³

Für den Versuch müssen die S´uS den Kalk eigens herstellen. Den frisch gefällten Kalk lösen sie durch Zugabe von weiterem Kohlenstoffdioxid wieder auf – die entstandene Trübung verschwindet also wieder. Die Lösung wird für den weiteren Versuch aufbewahrt.

Die Vorgehensweise und die Beobachtungen werden in der anschließenden **Sicherungsphase** von allen Gruppen kurz vorgestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit beschränke ich mich darauf, exemplarisch nur eine Versuchsskizze samt Beobachtungen zu fixieren.

Die Ergebnisse können die S´uS in Anlehnung an bekannte Tatsachen dann dahingehend interpretieren, dass Kalk sich unter Bildung von Calciumhydrogencarbonat löst. Streng genommen zeigt der Versuch dies nicht, da keine Ionen nachgewiesen werden. Im Sinne einer didaktischen Vereinfachung wird dies aber vernachlässigt und nur erläutert (z. B. über Leitfähigkeitsmessung), wenn die S´uS dieses Problem

¹¹ Diese Technik basiert auf verschiedenen Ansätzen aus der Halbmikrotechnik und wurde von mir zusammen mit Herrn Böhm für derartige Anwendungen entwickelt, erprobt und erweitert. Sie ist Basis der von mir durchgeführten Lehrerfortbildungen. S. dazu auch GREGOR VON BORSTEL UND ANDREAS BÖHM, ChemZ - Chemieunterricht mit medizintechnischem Gerät, Naturwissenschaft im Unterricht Chemie, Heft 81, 2004.

¹² GREGOR VON BORSTEL UND ANDREAS BÖHM, Le Chatelier einmal anders, Gleichgewichtsverschiebungen am Kontext Sprudelwasser, NiU Sicher Experimentieren, 2006, S. 34-37

¹³ Erwartete Lösungsansätze und eine Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung hängen an.

erkennen. Der Wechsel ins Diskontinuum soll in Partner- oder Einzelarbeit erfolgen, in diesem Teil der Stunde sind vor allem die stärkeren S´uS gefordert. Möglicherweise brauchen jedoch alle S´uS Hilfestellungen (Hinweis auf die Ausgangslage und das bisher bekannte Kohlenstoffdioxid/Carbonat Gleichgewicht), da für sie die Bildung von Hydrogencarbonat durch Protonierung von Carbonationen nicht zwangsläufig folgt. Weil der pKs-Wert erst Stoff der Jahrgangsstufe 12 ist, könnten sie ebenso gut argumentieren, dass die Erhöhung der H⁺-Ionenkonzentration gleichermaßen den Zerfall von Carbonat wie von Hydrogencarbonat bewirkt. Die Gesamtgleichung werden wir bei Bedarf gemeinsam aufstellen, da dieses Vorgehen relativ komplex ist.

Eine **Zusammenfassung** der bisherigen Ergebnisse unter Rückgriff auf die Eingangsfolie stellt einen Ringschluss zur Eingangsproblematik und Hypothese dar, in dem nun einzelne S´uS die im Versuch gewonnenen Erkenntnisse fachsprachlich richtig auf das natürliche Phänomen der Dolinenbildung übertragen sollen. Ich kann dann Informationen zur Menge des gelösten Kalks (z. B. 150000t in der schwäbischen Alb/Jahr) einfließen lassen. Damit könnte die Stunde zu Ende sein.

Je nach verbliebener Zeit plane ich ab hier eine flexible **Vertiefungsphase**. Aus Folie und Versuch ist ersichtlich, dass bei der Lösung calciumcarbonathaltiges Grundwasser entsteht, welches in manchen Gegenden Deutschland als „hartes“ Trinkwasser genutzt wird. Zu diesem Problem lässt sich anschaulich mit einem verkalkten Wasserkocher überleiten. Der Hinweis, dass derartige Geräte in Gegenden mit kalkhaltigen Böden¹⁴ beim Gebrauch verkalken, sollte die S´uS zu der zweiten Hypothese der Stunde bringen: durch Austreiben von Kohlenstoffdioxid wird Calciumhydrogencarbonat wieder zu festem Kalk. Hier wird immanent der Einfluss der Temperatur auf das Gleichgewicht wiederholt (s. Pkt. 2). Der Hypothese kann je nach Restzeit flexibel entweder in einem zweiten Schülerversuch oder aber in einem Demoversuch verifiziert werden.

Damit allen S´uS der Zusammenhang des Lösens und Ausfällens von Kalk bewusst wird, wird bei der **Auswertung** die passende Reaktionsgleichung noch einmal, nun aber umgekehrt, an der Tafel festgehalten. Sollte hinterfragt werden, warum der Kalk sich beim Entweichen des Kohlenstoffdioxids nicht vollständig zersetzt, wird darauf verwiesen, dass dies erst bei höheren Temperaturen geschieht (Kalkbrennen).

In der abschließenden **Zusammenfassung** können einzelne S´uS unter Verwendung der Fachsprache die Ergebnisse der Stunde verbalisieren und beide bearbeiteten Sachverhalte als Teil eines Kreislaufs erkennen.

Dies werden alle S´uS am Beispiel der Abläufe in einer Tropfsteinhöhle in der anschließenden Stunde üben, um es bei der Bearbeitung der analogen Gleichgewichte im Meerwasser und in der Klausur¹⁵ in weiteren Zusammenhängen einsetzen zu können.

¹⁴ zur Wasserhärte von Bornheim s. Anlage

¹⁵ z.B. Bildung und Zersetzung von Korallenriffen oder Erklärung der Bildung von Kalk auf der Oberseite von Wasserpestpflanzen in Gartenteichen mit Grundwasserzufluss aus kalkhaltiger Gegend in den Sommermonaten.

Literatur

Beschlüsse der Kultusministerkonferenz, Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss vom 16.12.2004

MINISTERIUM FÜR SCHULE NRW (HRSG.), Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in NRW Chemie, Frechen 1999

P. W. ATKINS, Chemie einfach alles, 2. korr. Aufl., Weinheim 1998

GREGOR VON BORSTEL UND ANDREAS BÖHM, ChemZ - Chemieunterricht mit medizintechnischem Gerät, Naturwissenschaft im Unterricht Chemie, Heft 81, 2004

GREGOR VON BORSTEL UND ANDREAS BÖHM, Le Chatelier einmal anders, Gleichgewichtsverschiebungen am Kontext Sprudelwasser, Naturwissenschaft im Unterricht Chemie, Heft 96, Sicher Experimentieren, 2006, S. 34-37

MOJIB LATIF UND KLAUS WIEGANDT, Bringen wir das Klima aus dem Takt? Hintergründe und Prognosen. Forum für Verantwortung Frankfurt; Januar 2007

STEFAN RAHMSTORF UND KATHERINE RICHARDSON, Wie bedroht sind die Ozeane? Biologische und physikalische Aspekte, Frankfurt, Juli 2007

Verwendete Internetadressen

- Zur Relevanz des Kohlenstoffdioxidkreislaufs: 4. Bericht des IPCC (2007): Climate Change 2007, Working Group I, The Science of Climate Change, www.ipcc.ch (letzter Zugriff 08.03.2008)
- Zum Kohlenstoffdioxidkreislauf: www.hamburger-bildungsserver.de (letzter Zugriff 08.03.2008)
- Zur Wasserhärte: www.dvgw.de/wasser/informationen-fuer-verbraucher/wasserhaerte (letzter Zugriff 08.03.2008)

Bilder der Folien entnommen aus:

- www.g-o.de/dossier-detail-205-10.html
- www.mm.seminar-sindelfingen.de/Kurs%20B2/2.Tertial/Tropfsteinhoehlen/chemie.htm
- www.uni-hohenheim.de/ak-boden/

Anlagen

Stundenskizze

Kopie der Einstiegsfolie(n)

Mögliche Versuchsaufbauten und Gefährdungsbeurteilung für die Experimente

Mögliches Tafelbild (Reaktionsgleichungen)

Übersicht globaler Kohlenstoffkreislauf

Angaben zur Wasserhärte Bornheim

Arbeitsblatt der anschließenden Stunde

Phase	Inhalt, Handlung und Unterrichtsschritte	Medien / Sozialform	Kommentar
Problemorientierter Einstieg und Spontanphase	Einsturzkrater und dazugehöriges Bodenprofil (Kalkgestein von Wasser durchflossen) werden gezeigt – weitere Lernhilfen: Bildfolge der Kraterbildung.	Folie I/(Folie II) SV im Plenum	Anknüpfung an bekannte Sachverhalte und Einbindung in einen weiteren Kontext. Fakultative Lernhilfe Folie II [in der Stunde habe ich es als „Rollenspiel gemacht“: Wir sind Labor, erhalten Anfrage: Kleines Malheur, Bodengutachten zeigt massiven Kalkstein – Zeit dräng: Was ist passiert?]
Hypothesenbildung (als Gedankensammlung an der Tafel)	Reaktionsgleichung für das Lösen von Kalk wird notiert und diskutiert: „kohlenstoffdioxidhaltiges Wasser hat den Kalk gelöst und ein unterirdisches Loch entstand.“	Tafel UG	Sollten die S´uS annehmen, Kalk habe sich alleine im Wasser gelöst, wird auf die Schwerlöslichkeit verwiesen ($K_L(\text{CaCO}_3)=4,8 \cdot 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{L}^2$).
Erarbeitung	Die S´uS sollen einen Versuch eigenständig planen und durchführen, der zeigt, dass sich Kalk in kohlenstoffdioxidhaltigem Wasser löst. Kalk frisch herstellen und mehr Kohlenstoffdioxid durchleiten	S-Exp. In Partnerarbeit, verwendete Geräte: „ChemZ“	Die Technik und Vorgehensweise ist den S´uS vertraut (Kalkwasserprobe, Herleitung des Prinzips von Le Chatelier). Daher können sie Versuch weitgehend eigenständig zu planen und durchzuführen (mehrere Varianten sind denkbar). Lehrerinfo: Kalk muss fein verteilt sein, damit das Experiment in der Kürze der Zeit erfolgreich verläuft, Sicherheits- und Entsorgungsanweisungen
Sicherung	Schüler stellen ihre Vorgehensweise und Beobachtungen gruppenweise vor. Durchführung und Beobachtung (erwartet: Trübung, die wieder verschwindet) werden fixiert.	Obere Tafel SV	Versuchsdurchführung und Beobachtung werden notiert (Kontinuum) – auf ein Fixieren des gesamten Versuchsprotokolls wird verzichtet (Zeitökonomie, Übersichtlichkeit).
Auswertung	Zunächst in Stillarbeit, dann gemeinsam Reaktionsgleichung aufstellen. Erkenntnis: es bildet sich Calciumhydrogencarbonat.	Heft/ Stillarbeit mit Partner Obere Tafel UG	Wechsel zum Diskontinuum unter Anwendung bekannter Sachverhalte ($\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$) in einem anderen Zusammenhang: Bildung des diesmal leichtlöslichen $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Ggf. Hilfestellung nötig.
Zusammenfassung	An der Anfangsfolie wird das Geschehen nun zusammenfassend erklärt	Folie II SV	Rückkehr zum Kontext, Ringschluss zum Einstieg
Mgl. Vertiefung: Hypothesenbildung Erarbeitung Sicherung	„Hartes Wasser“ fließt aus dem Berg – in solchen Gegenden bildet sich „Kesselstein“ Durch Austreiben von CO_2 läuft die Reaktion umgekehrt ab Im Versuch CO_2 austreiben – Kalk fällt erneut aus Ergebnisse werden fixiert und im Diskontinuum erklärt, Fachwort Wasserhärte und deren Anwendung	Topf o. ä. Demo oder PA untere Tafel LV	Die Umkehrung der Reaktion soll anschaulich problematisiert werden. Lehrerinfo: Das Austreiben von CO_2 müssen wir beschleunigen (Reaktivieren von Vorwissen). Wenn noch viel Zeit ist, dann in Gruppen – ansonsten wird mit den Lösungen aus V1 ein Demoversuch gemacht. Die Reaktionsgleichung wird bewusst noch einmal aufgeschrieben – Visualisierung des Kreislaufes für die schwächeren S´uS.
Gesamtzusammenfassung	Beide Gleichgewichte erklären und zusammenführen: es handelt sich um einen Kreislauf!	beide Tafeln SV	Einfluss von $c(\text{CO}_2)$ wird festgehalten. Denkbarer Abschlussimpuls: Warum haben wir kein CaHCO_3 in der Sammlung?
Nächste Stunde: natürlichen Kalkkreislauf eigenständig erfassen und beschreiben (AB, http://www.chemie-interaktiv.net/flashfilme.htm), ggfls. auch technischen Kalkkreislauf (Buch), mgl. Anwendung: warum schimmelt es in Neubauten ...?			