

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

Didaktisch-methodische Hinweise

Die Betrachtung der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser knüpft idealerweise an die Löslichkeit von Sauerstoff (s. Active O₂) an. So sind zum einen experimentelle Grundlagen gelegt, zum anderen die Parameter, die auf ihre Wirkung hinsichtlich der Lage des Gleichgewichts getestet werden, benannt.

Erstmalig werden nun die Temperatur und der Druck als Ursachen für die Verschiebung gekoppelter chemischer Gleichgewichte explizit untersucht, ohne dass man toxische Verbindungen wie Stickoxide benötigt. Mit dem gut wasserlöslichen Gas Kohlenstoffdioxid erhält man signifikante Beobachtungen, selbst wenn man die Versuche im kleinen Maßstab durchführt. Neu im Vergleich zu Active O₂ ist dabei die Verwendung eines Indikators, der indirekt die Menge an gelöstem Kohlenstoffdioxid anzeigt. Wir empfehlen Mischindikator Nr. 5 oder Tashiro-Indikator. Ihr Farbumschlag bei pH 5 zeigt deutlich den Übergang zwischen einer gesättigten und ungesättigten Kohlenstoffdioxid-Lösung (s. Abb. 1 und Abb. 2).

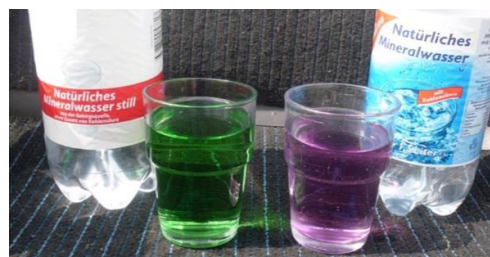


Abb. 1: Mineralwasser mit Indikator - Auszug aus AB S.2.

Die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit kann man mit verschieden warmem Lösemittel belegen. Aufgrund der Verbrühungsgefahr nutzen wir maximal 50°C warmes Wasser. Der Versuch ist damit hinreichend aussagekräftig. Isolierungen über den Spritzen sind zudem sinnvoll (s. V1 und Abb. 2). Parallel zum Schülerversuch kann man eine gesättigte Lösung mit Indikator versetzen und langsam auf einer Heizplatte erwärmen.

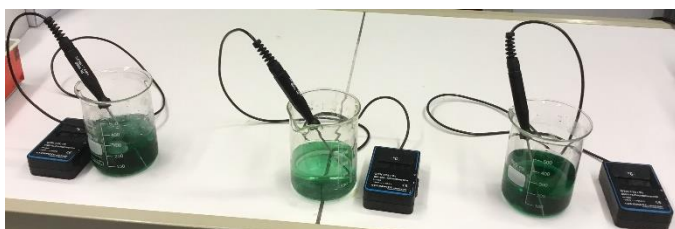


Abb. 2: Experimentiersetting zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von CO₂



Zur Verdeutlichung der Druckabhängigkeit (V2) ist es praktikabel, in einer möglichst kleinen Spritze den Druck über einer gesättigten Lösung zu verringern. Dazu darf sich nur wenig Lösung in der Spritze befinden. Abschließend kann auch der Einfluss der Konzentration untersucht werden (V3).

Die Tatsache, dass es sich um gekoppelte Gleichgewichte handelt, hat sich im Unterricht nicht als störend erwiesen. Es bedarf aber einer genauen Betrachtung von Kontinuum, Diskontinuum und Reaktionsgleichungen (M1, V1, V2, M2, M3). Bevor man von dem „Prinzip von Le Chatelier“ spricht, sollte man noch weitere Gleichgewichtsveränderungen betrachten.



Abb. 3: Druckabhängigkeit mit Indikator.

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

Möglicher Ablauf

a) Der Einfluss der Temperatur auf die Lage eines Gleichgewichtes

1. Problemstellung entdecken und Vorstellungen entwickeln:

- Ausgehend von verschiedenen stark carbonatisierten Wässern (still, medium, classic) gilt es zu klären, wie diese hergestellt werden. Zusätzlich oder alternativ kann auch ein Sodastreamer vorgeführt werden. Hier wird schon immanent bzw. nonverbal der Einfluss des Drucks demonstriert.
- Sinnvollerweise wird die Wirkungsweise des Indikators Wässern gezeigt und in Form von Reaktionsgleichungen geklärt, was bei Zugabe von Kohlenstoffdioxid passiert (gekoppelte Gleichgewichte, s. Abb. 1, Abb. 4 und AB).

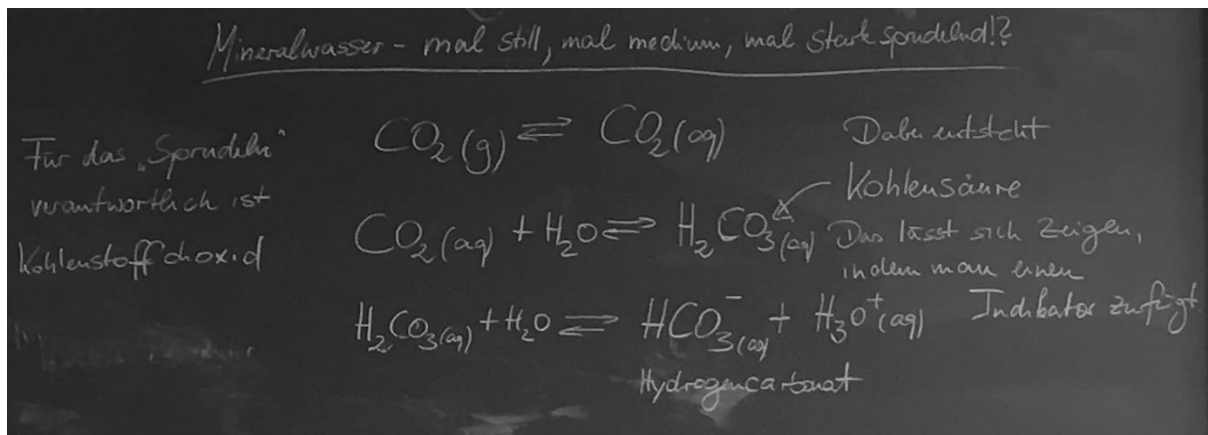


Abb. 4: Tafelbild zur Entwicklung der Vorstellungen.

- Fakultativ bietet sich der Nachweis des Überdrucks und des hohen CO₂-Gehalts in der Gasphase einer Sprudelflasche an (siehe Abb. 5).
- Ideen und gegebenenfalls begründete Hypothesen (s. Active O₂, Vorwissen, Vorkenntnisse) bezüglich der einflussnehmenden Faktoren werden gesammelt und fixiert.
- Die Lehrperson legt die Reihenfolge der Untersuchungen fest. Als besonders praktikabel hat sich herausgestellt, **zunächst den Einfluss der Temperatur** zu untersuchen und zu besprechen! Hier lässt sich parallel schon der Indikator einführen. Vor der Untersuchung des **Drucks** wird thematisiert, warum man dazu auf jeden Fall einen Indikator benötigt. Basierend auf der Auswertung zum Druck sind die Schüler*innen **häufig** der Lage, **Experimente zu Konzentrationsveränderungen** selbst zu planen.

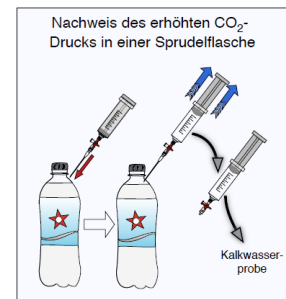


Abb. 5: CO₂ Nachweis Sprudel.

2. Lernmaterial bearbeiten / Lernprodukt erstellen:

Die Materialien (AB, S. 1) mit detaillierten Arbeitsaufträgen leiten eng durch die Versuche zu Temperatur. Es kann aber auch Raum gegeben werden für andere Ansätze. So können beispielsweise auch

- der Faktor Schütteln bzw. Rühren (schnellere Einstellung des Gleichgewichtes)
- oder der Faktor Temperatur durch Auskochen einer gesättigten Lösung mit Indikator getestet werden.

Abb. 6: AB S. 1.

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

Zentraler Arbeitsauftrag: Ermittle die maximal lösliche Menge an Kohlenstoffdioxid in 25 mL Wasser und teste durch Veränderung immer nur eines Faktors (hier Temperatur), ob dieser zu einer Veränderung der Löslichkeit beiträgt.

3. Das Lernprodukt präsentieren, diskutieren/verhandeln ...

Die Ergebnisse aus A1 (AB S. 1) werden vorgestellt, die Beobachtungen hinsichtlich der Deutung diskutiert (A2, AB S. 1) und mit den Hypothesen abgeglichen.

Hierbei sollte erneut auf die gekoppelten Gleichgewichte, die noch vom Anfang präsent sind, eingegangen werden.

4. ... sichern und den Lernzuwachs definieren

Im Tafelbild kann die exotherme Teilreaktion (1) als solche vom Lehrenden gekennzeichnet werden. Die Verschiebung der gekoppelten Gleichgewichte wird daran anschließend diskutiert.

Ggf. erläutert man die Temperaturabhängigkeit mit Hilfe eines Enthalpiediagramms und/oder der Boltzmannverteilung für Hin- und Rückreaktion.

In einer Je ..., desto ... Aussage kann die Tendenz für diesen Versuch abschließend festgehalten und auch noch einmal verallgemeinernd mit Material zu Active O₂ verknüpft werden (AB, A3).

b) Der Einfluss von Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

1. Problemstellung entdecken und Vorstellungen entwickeln:

Ausgehend vom bereits eingeführten Gleichgewicht und dem Realobjekt (Sprudelflasche/Sodastreamer) rückt die Lehrkraft nun den Druck in den Fokus.

Basierend auf den Vorerfahrungen sind die SuS in der Regel in der Lage, begründete Hypothesen zum Einfluss des Drucks zu nennen.

Für die Durchführung des Experimentes sollte man klären, dass eine Druckerhöhung oder Druckerniedrigung durch Drücken oder Ziehen des Spritzenstempels das gleichzeitige Ablesen des restlichen Gasvolumens verhindert. Der Einsatz des Indikators ist nun unerlässlich. Er zeigt aber nur prinzipiell an, ob viel oder wenig Kohlenstoffdioxid gelöst ist. Da bereits bei Raumtemperatur und Normaldruck eine gesättigte Lösung entsteht, muss man mit einer Druckerniedrigung prüfen, ob diese zum Ausgasen führt.

2. Lernmaterial bearbeiten / Lernprodukt erstellen:

Erneut leiten die Materialien (AB, A1 - A3 und V2) mit detaillierten Arbeitsaufträgen durch die Versuche zur Druckveränderung.

Zentraler Arbeitsauftrag: Prüfe, ob eine Druckerniedrigung zu einer Veränderung der Löslichkeit führt. Deute die Beobachtungen dahingehend (Farbwechsel, Bildung von Gasblasen).

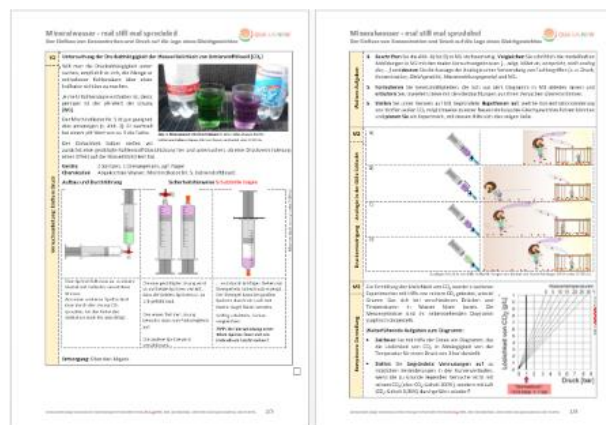


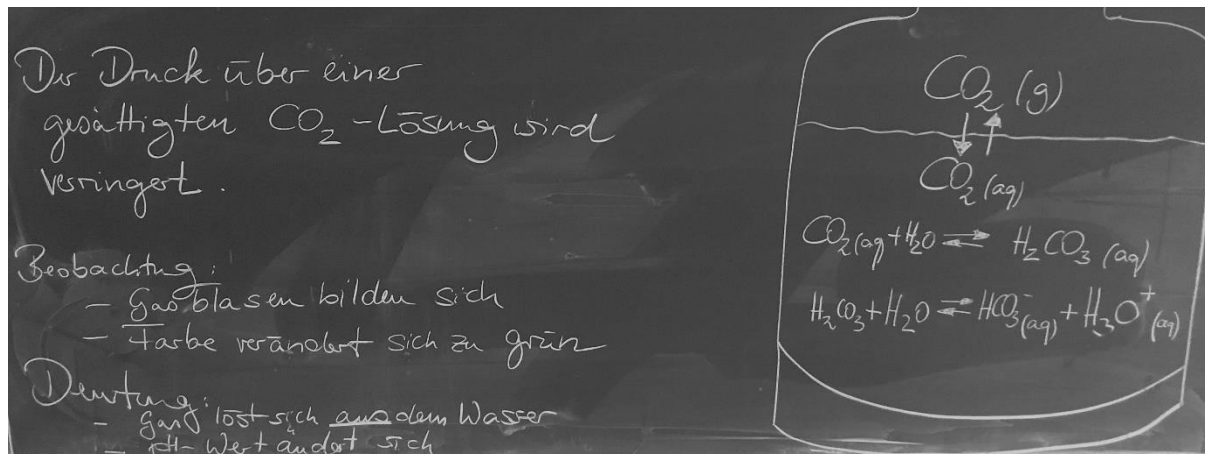
Abb. 7 AB S. 2 und S.3.

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

3. Das Lernprodukt präsentieren, diskutieren/verhandeln

Die Ergebnisse aus A1 werden vorgestellt, die Beobachtungen hinsichtlich der Deutung diskutiert und mit den Hypothesen abgeglichen. Hierbei sollte erneut auf die gekoppelten Gleichgewichte und die Rolle des Indikators eingegangen werden.



Gregor von Borstel unter CC-BY-SA

Abb. 8: Tafelbild zur Entwicklung der Vorstellungen.

4. Das Lernprodukt sichern und den Lernzuwachs definieren

Wieder kann in einer „Je ..., desto ... Aussage“ die Tendenz für diesen Versuch festgehalten werden und erneut verallgemeinernd auf das Material zu Active O₂ hingewiesen werden.

5. Vernetzen

Bei der Betrachtung der Vorgänge auf formal abstrakter Ebene ist es „die hohe Kunst“ in einer Rückführung die Begriffe „Lage des Gleichgewichtes“ bzw. „Verschiebung des Gleichgewichtes“ mit den Einflussfaktoren zu verknüpfen. Hierbei sollte immer wieder herausgearbeitet werden, dass Verschiebung in einem Gleichgewicht auch zu Verschiebungen im „Folgegleichgewicht“ führen.

Hilfreich ist dazu beim Druck die Verknüpfung mit der bereits gut bekannten Analogie der Bälleschlacht [AB, M2/A4 S. 3]. Nach einer Einzelarbeitsphase (A4) kann die Diskussion anhand einer Folienserie auch mit konkreten Zahlen für das Modell erfolgen:

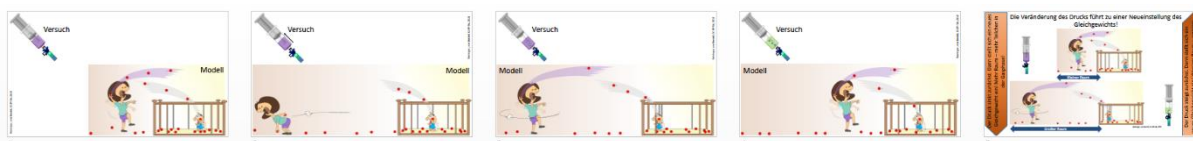


Abb. 9: Analogie als Folienserie.

Für einen Rückbezug zum Sodastreamer können Angaben aus der Bedienungsanleitung hinsichtlich ihrer Funktionalität betrachtet werden (online verfügbar z.B. <https://www.sodastream.de/warum-sodastream/wie-funktioniert/>). Hier wird darauf hingewiesen, dass die Flasche fest in das Gerät eingeschraubt werden muss (*dadurch geschlossenes System, Aufbau eines Drucks möglich*) und das kalte Wasser (*größere Löslichkeit von CO_2*) verwendet werden soll.

Fakultativ können die prinzipiell erfassten Gesetzmäßigkeiten auf qualitativer Ebene von den Schüler*innen in zunehmend komplexen Diagrammen erfasst werden, z. B.

- unter der Fragestellung: „Welche Messgröße sollte über die x-Achse, welche über die y-Achse erfasst werden und wie sähe der prinzipielle Kurvenverlauf aus?“

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

- oder auch durch strukturierte Auswertung komplexerer Diagramme (AB S. 3, M3 und A5, Abb. 11):

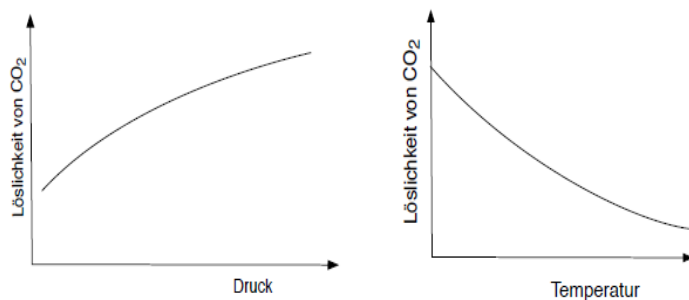


Abb. 10: einfache Diagramme CO₂ Löslichkeit.

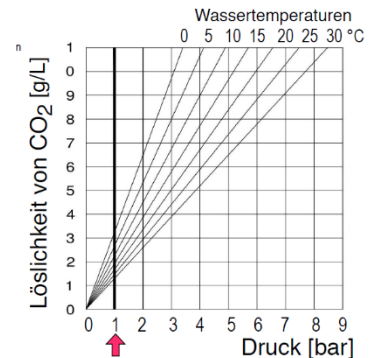


Abb. 11: komplexe Diagramme zur CO₂ Löslichkeit

6. Weitere Problemstellungen entdecken, transferieren und festigen

Mit der Analogie der Bälleschlacht oder der Frage nach Kurvenverläufen für Experimente, bei denen statt reinem Kohlenstoffdioxid Luft verwendet wurde, kann von der Druckabhängigkeit zur Konzentrationsabhängigkeit des Lösungsgleichgewichtes übergeleitet werden.

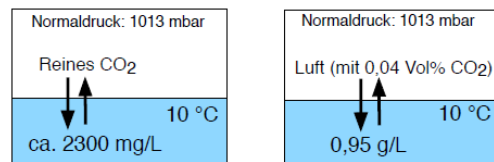


Abb. 11: Einfluss Partialdruck auf CO₂ Löslichkeit

Optional wäre hier die Betrachtung der Partialdrücke auf Teilchenebene denkbar. Unter der Leitfrage: „Was würde sich an der Löslichkeit von CO₂ ändern, wenn vor Beginn des Versuchs zum CO₂ die gleiche Menge an N₂-Gas noch in die Gasphase gepresst würde, ohne das Volumen zu verändern?“ ließe sich dies in einem Schaubild (Abb. 12) konstruieren.

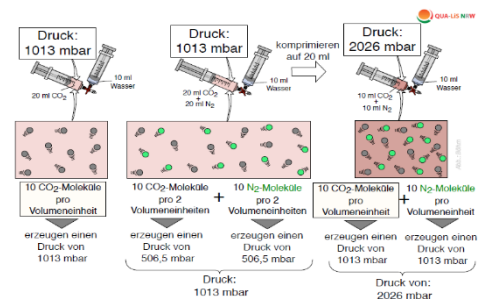


Abb. 12: Folie Partialdruck Teilchenebene.

Mit dem Aufgreifen der Konzentrationsabhängigkeit der Gleichgewichte kann die Fragestellung entwickelt werden, über welche Konzentrationsänderungen sich die Gleichgewichte noch beeinflussen lassen. Ideen und begründete Hypothesen (Veränderung der HCO₃⁻-Ionen-Konz. durch Lösen eines Hydrogencarbonats, Zugabe von Säure oder Lauge zur Veränderung der H₃O⁺-Ionen-Konz.) führen dann zu einem experimentellen Ansatz, mit dessen Hilfe man die Hypothesen prüft. Da den Schüler*innen die experimentelle Herangehensweise nun schon bekannt ist, kann hier offener gearbeitet werden. Eine konkrete Versuchsanleitung sollte von den Schüler*innen selbst entwickelt werden können. Prinzipiell kann z. B. in einem zu den bekannten Versuchen analogen Versuchsansatz überprüft werden, wieviel ml CO₂ sich in 20 ml verdünnter Salzsäure bzw. verdünnter Natronlauge lösen lassen.

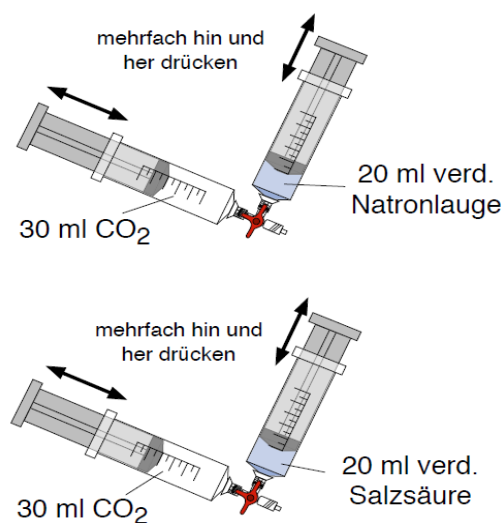


Abb. 13: Experiment zur Konz. Abhängigkeit.

Bei der Ergebnisvorstellung werden die Beobachtungen hinsichtlich der Deutung diskutiert und mit den

Mineralwasser - mal still, mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur, Druck und Konzentration auf die Lage eines Gleichgewichtes

Hypothesen abgeglichen. Idealerweise wird wieder auf die Kopplung der verschiedenen Gleichgewichte eingegangen.

Es bietet sich an, die Argumentation zu Auswirkungen von Druck- bzw. Konzentrationsänderungen auf die Massenwirkungsquotienten zu führen. Die Leitfragen in der Diskussion wären dann:

- Wird der Massenwirkungsquotient durch die veränderten Bedingungen größer oder kleiner als K?
- Ist dann der Zähler oder der Nenner „zu groß“ bzw. „zu klein“?
- Würde dann eine verstärkte Hin- oder eine verstärkte Rückreaktion dazu führen, dass der Massenwirkungsquotient wieder mit K übereinstimmt?
- Welche Folgen hätte das für den Massenwirkungsquotienten des nächsten Gleichgewichts?

$$K_1 = \frac{c(\text{CO}_2)_{\text{aq}}}{c(\text{CO}_2)_{\text{g}}} \quad K_2 = \frac{c(\text{H}_2\text{CO}_3)_{\text{aq}}}{c(\text{CO}_2)_{\text{aq}} \cdot c(\text{H}_2\text{O})} \quad K_3 = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{aq}} c(\text{HCO}_3^-)_{\text{aq}}}{c(\text{H}_2\text{CO}_3)_{\text{aq}} \cdot c(\text{H}_2\text{O})}$$

In diesem Zusammenhang kann herausgearbeitet werden, dass durch eine Temperaturveränderung der Massenwirkungsquotient gar nicht beeinflusst wird und trotzdem eine Verschiebung des Gleichgewichts stattfindet. Bei einer Änderung der Temperatur ändert sich also die Gleichgewichtskonstante.

Diese Versuche stehen in einer Reihe weiterer Betrachtungen (zuvor Active O₂, anschließend z. B., Reaktionen mit Eisenthiocyanat), die für eine Verallgemeinerung hin zum Prinzip von Le Chatelier in den Blick genommen werden. Das Kohlenstoffdioxid/Carbonat/Hydrogencarbonat-Gleichgewicht mit Blick auf das Prinzip von Le Chatelier ist in vielen anderen Kontexten von Interesse, z. B.

- Erklärung der Katastrophe am Lake Nyos (kein weiteres Vorwissen erforderlich)
- Kalkkreislauf, Tropfsteinhöhlen etc.
- Versauerung der Meere (Klimawandel, Partialdruck Kohlenstoffdioxid, kalkbildende Meereslebewesen, Korallensterben)
- Materialgebundene Aufgaben/Klausuraufgaben zur Wirkung von Carboanhydrase bei der beschleunigten Einstellung der Gleichgewichte im Blut, zu Hämoglobin und seiner Veränderung mit dem pH-Wert
- oder zur Entfernung von Oxalsäure aus Zuckerrüben

Literatur zum Weiterlesen

- Gregor von Borstel und Andreas Böhm, 2006. Le Chatelier einmal anders. NiU Chemie 96, 34-37.
- Manfred Eusterholz, Gregor von Borstel und Andreas Böhm, 2017. Mehr „spritziige“ Experimente mit Gasen. NiU Chemie 157, 17-22.