Die Idee dahinter: Mineralwasser mal still mal sprudelnd

Der Einfluss von Temperatur und Druck auf die Lage eines Gleichgewichts

Didaktisch-methodische Hinweise

Die Betrachtung der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser knüpft idealerweise an die Löslichkeit von Sauerstoff (s. Active O_2) an. So sind zum einen experimentelle Grundlagen gelegt, zum anderen die Parameter, die auf ihre Wirkung hinsichtlich der Lage des Gleichgewichts getestet werden, benannt.

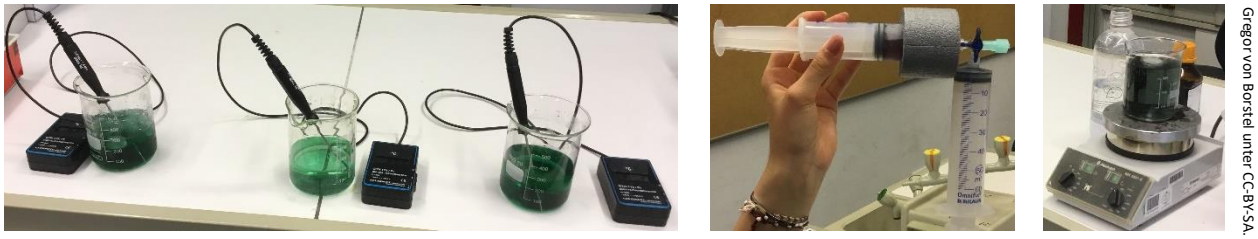


Gregor von Borstel unter CC-BY-SA.

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

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 O_2 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).

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.



Gregor von Borstel unter CC-BY-SA.

Abb. 2: Experimentiersetting zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von CO_2

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.

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. Bevor man von dem „Prinzip von Le Chatelier“ spricht, sollte man noch weitere Gleichgewichtsveränderungen betrachten.



Gregor von Borstel unter CC-BY-SA.

Abb. 3: Druckabhängigkeit mit Indikator.

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.

Die Idee dahinter: Mineralwasser mal still mal sprudelnd

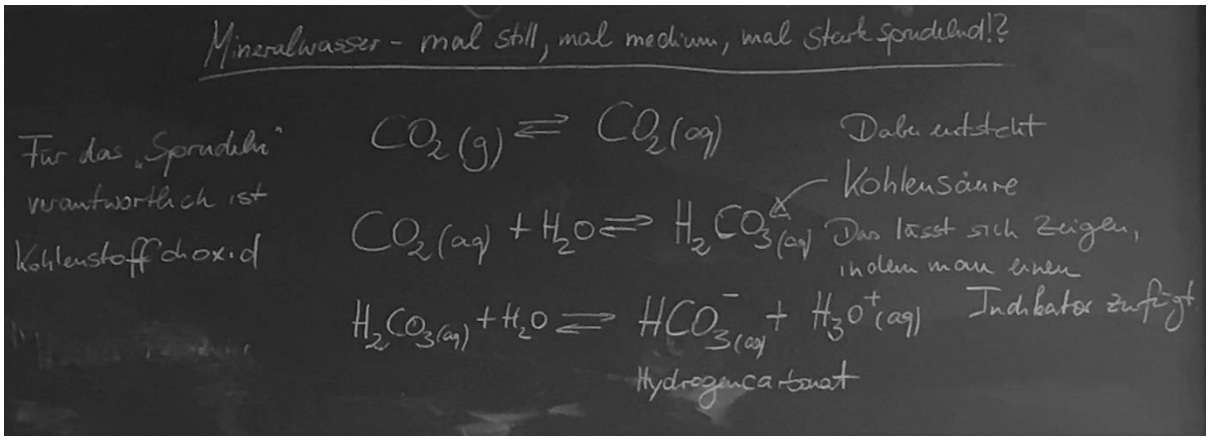
Der Einfluss von Temperatur und Druck auf die Lage eines Gleichgewichts

Möglicher Ablauf

a). Der Einfluss der Temperatur auf die Lage des Gleichgewichts

1. Problemstellung entdecken und Vorstellungen entwickeln

- Ausgehend von verschieden 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).



Gregor von Borstel unter CC-BY-SA.

Abb. 4: Tafelbild zur Entwicklung der Vorstellungen.

- Ideen und gegebenenfalls begründete Hypothesen (s. Active O_2, 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.

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.

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.

Zentraler Arbeitsauftrag: Ermittle die maximal lösbare 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. 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.

Als hilfreich für den Lernprozess vieler Schülerinnen und Schüler erwies es sich, erneut auf die Analogie der Bälleschlacht (M2, S. 3 mit eigenen Aufgaben versehen) zurückzugreifen.

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 O_2 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

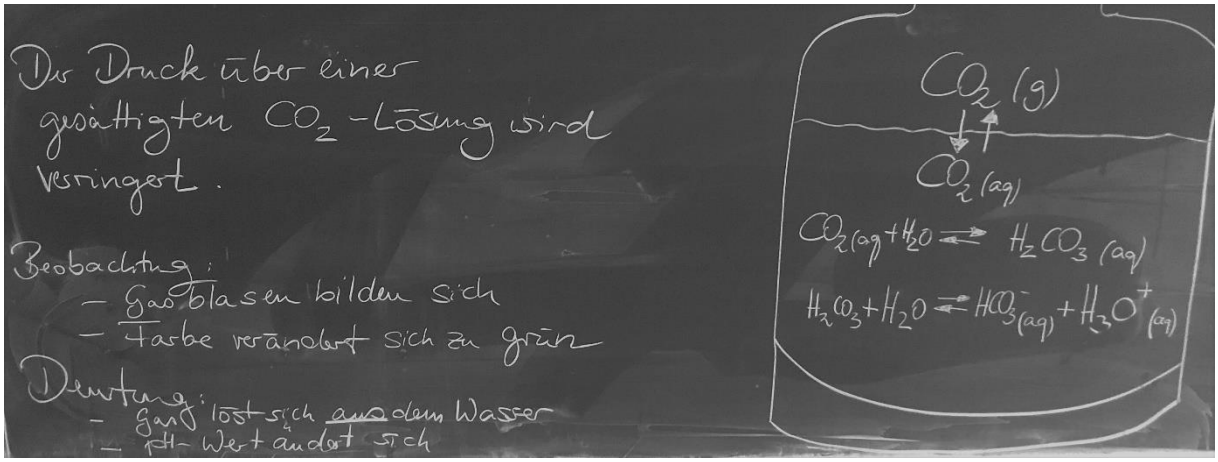
Erneut leiten die Materialien (AB, A1 - A3 und V2) mit detaillierten Arbeitsaufträgen durch die Versuche zur Druckveränderung.

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

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.

3. 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. 5: Tafelbild zur Entwicklung der Vorstellungen.

4. 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 O_2 hingewiesen werden.

5. Vernetzen

Bei der Betrachtung er 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. 6: 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-funktionierts/). Hier wird darauf hingewiesen, dass die Flasche fest in das Gerät eingeschraubt werden muss (*dadurch geschlossenes System, Aufbau eines Drucks möglich*) und das kaltes 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?“

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.

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

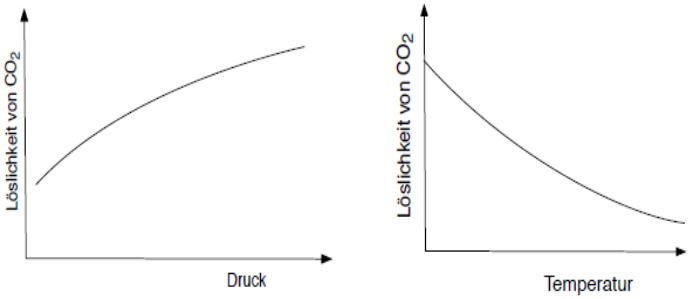
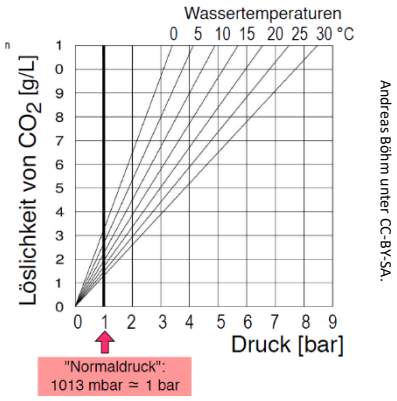


Abb. 10: einfache Diagramme CO_2 Löslichkeit.

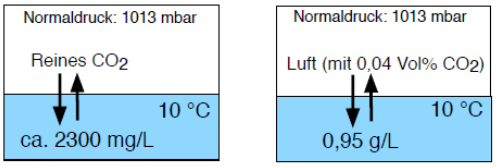


Andreas Böhm unter CC-BY-SA.

Abb. 7: komplexe Diagramme zur CO_2 Löslichkeit

6. Weitere Problemstellungen entdecken, transferieren und festigen

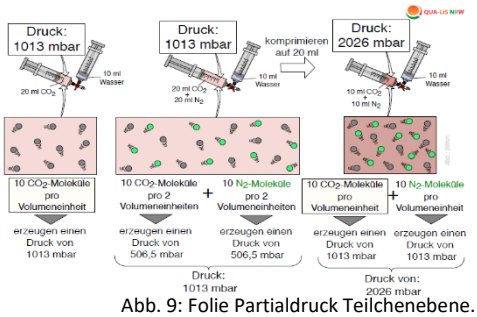
Mit der Analogie der Bälleschlacht oder der Frage nach Kurvenverläufen für Experimente, bei denen statt reinem Kohlenstoffdioxid Luft verwendet wurde, kann von der Druckabhängigkeit zur Konzentrationsabhängigkeit des Lösungsgleichgewichtes übergeleitet werden.



Andreas Böhm unter CC-BY-SA.

Abb. 8: Einfluss Partialdruck auf CO_2 Löslichkeit

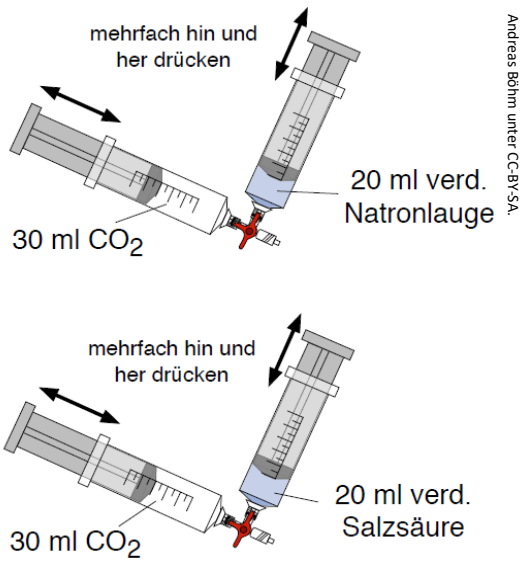
Optional wäre hier die Betrachtung der Partialdrücke auf Teilchenebene denkbar. Unter der Leitfrage: *„Was würde sich an der Löslichkeit von CO_2 ändern, wenn vor Beginn des Versuchs zum CO_2 die gleiche Menge an N_2-Gas noch in die Gasphase gepresst würde, ohne das Volumen zu verändern?“* ließe sich dies in einem Schaubild (Abb. 12) konstruieren.



Andreas Böhm unter CC-BY-SA.

Abb. 9: 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 HCO_3^--Ionen-Konz. durch Lösen eines Hydrogencarbonats, Zugabe von Säure oder Lauge zur Veränderung der H_3O^+-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 CO_2 sich in 20 ml verdünnter Salzsäure bzw. verdünnter Natronlauge lösen lassen.



Andreas Böhm unter CC-BY-SA.

Abb. 10: Experiment zur Konz. Abhängigkeit.

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.

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

$$K_1 = \frac{c(CO_2)_{aq}}{c(CO_2)_g} \quad K_2 = \frac{c(H_2CO_3)_{aq}}{c(CO_2)_{aq} \bullet c(H_2O)} \quad K_3 = \frac{c(H_3O^+)_{aq}\, c(HCO_3^-)_{aq}}{c(H_2CO_3)_{aq} \bullet c(H_2O)}$$

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 O_2, 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. Active O2 – Powerstoff mit Sauerstoff. MnU 59, 413-415.
- Andreas Böhm, Manfred Eusterholz und Gregor von Borstel, 2017. Mehr „spritzige“ Experimente mit Gasen. NiU Chemie 157, 17-22.

Andreas Böhm, Gregor von Borstel und David Weninger im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA 4.0.