

II.F.21

Energetik – chemisches Gleichgewicht – Kinetik

Das Einstellen und Beeinflussen von Gleichgewichtsreaktionen nach Le Chatelier

Ein Beitrag von David Keller



© RAABE 2020

© Brauns/iStock/Getty Images Plus

Chemische Reaktionen laufen meistens unvollständig ab, da sich ein Gleichgewicht zwischen Edukten und Produkten einstellt. Durch die Änderung von Reaktionsbedingungen können sie verschoben werden, was in großtechnischen Synthesen wie dem Deacon-Verfahren (Herstellung von Chlor) oder dem Kontaktverfahren (Herstellung von Schwefelsäure) ausgenutzt wird. Chemische Gleichgewichte sind auch in der Natur allgegenwärtig. Beispielsweise kann die Verwitterung und Bildung von Kalkstein beobachtet werden.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	11–13
Dauer:	6 Unterrichtsstunden (3 Doppelstunden)
Kompetenzen:	1. Merkmale eines chemischen Gleichgewichtes; 2. Experimentelles Erkunden der Abhängigkeiten von chemischen Gleichgewichten und deren Anwendung; 3. Anwenden des Massenwirkungsgesetzes und Berechnen der Gleichgewichtskonstanten
Thematische Bereiche:	Chemisches Gleichgewicht, Gleichgewichtsreaktionen, Massenwirkungsgesetz, Gleichgewichtskonstanten
Medien:	Texte, Experimente, Arbeitsblätter, Spiel

Hintergrundinformationen

Da chemische Reaktionen meistens unvollständig ablaufen, ist eine Betrachtung dieser als **chemische Gleichgewichte** angebracht. Durch die Änderung von Reaktionsbedingungen wie Druck, Temperatur, Konzentration oder pH-Wert können sie verschoben werden, sodass höhere Ausbeuten erreicht werden. Jedoch kann auch der umgekehrte Fall eintreten. Es ist daher wichtig, sich mit den theoretischen Grundlagen auszukennen, um eine effiziente Herstellung und eine möglichst unkomplizierte Aufarbeitung der Reaktionsprodukte zu ermöglichen. Die Kenntnis des **Prinzips des kleinsten Zwanges nach Le Chatelier** und die Anwendung des **Massenwirkungsgesetzes** sind dafür unerlässlich. Chemische Gleichgewichte sind nicht nur in der Industrie von Bedeutung, sondern lassen sich auch in der Natur finden. Das **Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht** stellt ein bekanntes Beispiel dar. Kalkstein kann durch den Einfluss von Kohlenstoffdioxid und Wasser verwittern. Dies stellt ein Problem dar, da durch die Übersäuerung der Ozeane Kalkschalen von Muscheln oder Korallen aufgelöst werden. Viele marine Ökosysteme sind gefährdet. Die Bildung von Kalkstein kann in Tropfsteinhöhlen bewundert werden. Kesselstein ist ein Beispiel für ungewollte Kalkablagerungen im Haushalt. Durch die Betrachtung von **chemischen Reaktionen als Gleichgewichte** gelangen die Schülerinnen und Schüler (im Folgenden abgekürzt durch *SuS*) auch zu der Einsicht, dass chemische Reaktionen unter der Veränderung von Reaktionsbedingungen **umkehrbar** sind. Gerade in der organischen Chemie ist das bedeutsam. Man denke an die Estersynthese. Durch Wasser kann der gebildete Ester wieder zerfallen.

Hinweise zur Didaktik und Methodik

Die Unterrichtseinheit besteht aus insgesamt 6 Unterrichtsstunden (3 Doppelstunden). In den ersten beiden Unterrichtsstunden wird das **Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht** behandelt. Weiterhin werden anhand des **Stechheber-Modellexperimentes** die Merkmale eines chemischen Gleichgewichtes abgeleitet sowie Diagramme zum Volumen und der Nummer der Messungen erstellt. In der dritten und in der vierten Unterrichtsstunde werden Schülerversuche zum chemischen Gleichgewicht durchgeführt. Die SuS sollen ableiten, dass ein chemisches Gleichgewicht vom **Druck**, von der **Temperatur**, von der **Konzentration** oder dem **pH-Wert** abhängig sein kann. In der fünften und sechsten Unterrichtsstunde wird das **Massenwirkungsgesetz** eingeführt. An Beispielreaktionen wird dessen Aufstellen geübt und die **Gleichgewichtskonstanten** berechnet. Anschließend wird das Wissen spielerisch getestet und vertieft.

Gruppenpuzzle

Bei einem Gruppenpuzzle handelt es sich um eine Form der Gruppenarbeit. Sie teilt sich in drei Phasen. In der ersten Phase wird eine Stammgruppe gebildet. In dieser wird aufgeteilt, welche SuS welches Thema näher bearbeiten. In Phase zwei finden sich alle SuS mit dem gleichen Thema zusammen und bearbeiten dieses gemeinsam. Es wird eine sog. Expertengruppe gebildet. In Phase drei finden sich alle Mitglieder der ursprünglich gebildeten Stammgruppe wieder zusammen und tauschen sich über ihre in den Expertengruppen bearbeiteten Themen aus.

Fotoprotokoll

Ist wie ein normales Protokoll aufgebaut (Chemikalien und Geräte, Durchführung, Ergebnisse sowie Auswertung). Die Teile Chemikalien und Geräte sowie Durchführung und Ergebnisse werden mithilfe von Fotos dokumentiert. Nur der Teil Auswertung wird schriftlich dargestellt.

Durchführung

1./2. Stunde (Erste Doppelstunde)

Es soll ein Lückentext **M 1** zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bearbeitet werden. Es geht um die Verwitterung sowie Bildung von Kalkstein in der Natur und im Haushalt. Hierdurch soll ein Lebensweltbezug hergestellt werden. Anhand des Stechheber-Modellexperimentes **M 2** leiten die SuS die Merkmale eines chemischen Gleichgewichtes ab. Diese werden im Arbeitsblatt **M 3** notiert. Die Klasse kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden, da zwei Ansätze mit verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten simuliert werden. Die grafische Auswertung kann mithilfe eines Grafik-Programmes, wie z. B. Excel, erfolgen. Die Diagramme werden ausgedruckt und an die entsprechenden Stellen im **M 3** eingeklebt.

3./4. Stunde (Zweite Doppelstunde)

In der dritten und vierten Unterrichtsstunde werden Schülerversuche zum chemischen Gleichgewicht durchgeführt (**M 4**). Es wird die Abhängigkeit von der Temperatur, dem Druck, der Konzentration sowie dem pH-Wert untersucht. Das Experimentieren kann als Gruppenpuzzle oder als Stationsarbeit gestaltet werden. Wird das Experimentieren als Gruppenpuzzle gestaltet, so ist von den Expertengruppen ein Fotoprotokoll zu gestalten, um den anderen SuS die Ergebnisse anschaulich präsentieren zu können. Für eine Stationsarbeit wurde das Arbeitsblatt **M 5** entwickelt.

5./6. Stunde (Dritte Doppelstunde)

Es werden die Materialien **M 6**, **M 7** und **M 8** bearbeitet. Der Infotext **M 6** gibt den SuS die notwendigen Informationen zum Massenwirkungsgesetz, wie es aufgestellt wird und wie die Gleichgewichtskonstanten berechnet werden können. **M 7** ist als Arbeitsblatt gestaltet. Es enthält Aufgaben zum Aufstellen und Anwenden eines Massenwirkungsgesetzes sowie zur Berechnung der Gleichgewichtskonstanten. Die SuS können die Aufgaben anhand von gestuften Hilfen bearbeiten. In **M 8** können die SuS ihr Wissen zum chemischen Gleichgewicht und zum Prinzip des kleinsten Zwanges spielerisch testen. Das Material **M 8** dient als Zusammenfassung des Themas.

Literatur

- ▶ **Arnold, K., et al.** (2013). *Chemie Oberstufe – Gesamtband: Allgemeine Chemie, Physikalische Chemie, Organische Chemie*. 1. Auflage, 3. Druck. Volk und Wissen: Berlin.
- ▶ **Binnewies, M., Jäckel, M., Willner, H., Rayner-Canham, G.** (2010). *Allgemeine und Anorganische Chemie*. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg.
- ▶ **Gulyas, A.** (2013) *Schulversuchspraktikum*. Erhältlich unter: <http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/11-12/V11-106.pdf> (letzter Zugriff: 09.09.2020).
- ▶ **Tittel, C., Kremer, M.** (2017). *Das chemische Gleichgewicht auf dem didaktischen Prüfstand*. Erhältlich unter: <https://www.mnu.de/fachbereiche/didaktischer-pruefstand/412-das-chemische-gleichgewicht-auf-dem-didaktischen-pruefstand> (letzter Zugriff: 09.09.2020).
- ▶ **Uni Göttingen** (2016). *V1-Stechheber-Modellversuch*. Erhältlich unter: <http://unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/11-12/V11-535.pdf> (letzter Zugriff: 09.09.2020).
- ▶ **Weninger, D.** (2019). *Das Thiocyanat-Gleichgewicht – Einfluss der Konzentration auf das chemische Gleichgewicht*. Erhältlich unter: <https://www.lncu.de/index.php?cmd=courseManager&mod=contentText&action=attempt&courseId=104&unitId=337&contentId=1136#contentheadline> (letzter Zugriff: 09.09.2020).

Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt, Sp = Spiel, Sv = Schülerversuch, Tx = Text

1./2. Stunde

Thema: Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, die Merkmale eines chemischen Gleichgewichts und das Stechheber-Modellexperiment

M 1 (Ab) Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht – seine Auswirkungen in der Natur und im Haushalt (Lückentext und Aufgaben)

M 2 (Sv) Das Stechheber-Modellexperiment



Sv 1: Das Stechheber-Modellexperiment

Dauer: Vorbereitung: 10 min Durchführung: 25 min

Chemikalien: Wasser
 Lebensmittelfarbe

Geräte: 2 Messzylinder 50 mL (niedrige Form)
 Glasröhrchen (ø 5 mm, ca. 20 cm lang)
 Glasröhrchen (ø 4 mm, ca. 20 cm lang)
 Pasteurpipette
 Becherglas 10 mL
 Schutzbrille
 Kittel

M 3 (Ab) Auswertung des Stechheber-Modellexperimentes

3./4. Stunde

Thema: Chemische Gleichgewichte können durch eine Änderung der Temperatur, des Drucks, der Konzentration oder des pH-Wertes beeinflusst werden

M 4 (Sv) Die Verschiebung des chemischen Gleichgewichts – das Prinzip des kleinsten Zwanges nach Le Chatelier (Material als Gruppenpuzzle oder Stationsarbeit)

Die Verschiebung des chemischen Gleichgewichts – das Prinzip des kleinsten Zwanges nach Le Chatelier

M 4

Die Voraussetzungen für das Einstellen eines chemischen Gleichgewichts stellen die Umkehrbarkeit einer chemischen Reaktion sowie ein abgeschlossenes System dar. Anhand des Stechheber-Modell-experiments hat sich gezeigt, dass ein chemisches Gleichgewicht nur bei konstanten äußeren Bedingungen beliebig lange bestehen bleibt und dass nach dem Einstellen des Gleichgewichts noch Edukte vorhanden sind. Dies kann zu Problemen bei der Reinigung von Produkten führen und setzt auch die Rentabilität von chemischen Synthesen herab. Le Chatelier und Braun haben herausgefunden, dass ein chemisches Gleichgewicht durch die Änderung der Reaktionsbedingungen verschoben werden kann, und folgenden Merksatz formuliert: **Wird auf ein stoffliches System, das sich im chemischen Gleichgewicht befindet, ein Zwang ausgeübt, so weicht das System dem Zwang aus, sodass die Wirkungen des Zwanges minimal werden.** Anhand der nachfolgenden Experimente sollen Sie herausfinden, wie ein chemisches Gleichgewicht verschoben werden kann.

Führen Sie die folgenden Experimente nacheinander **durch** und Sie werden erfahren, durch welche Änderungen der Reaktionsbedingungen ein chemisches Gleichgewicht verschoben werden kann.

Schülerversuch 2: Künstliches Blut

Dauer: Vorbereitung: 5 min Durchführung: 15 min

Chemikalien	Geräte
<input type="checkbox"/> Eisen(III)-chlorid-Lsg. 	<input type="checkbox"/> 3 Reagenzgläser
<input type="checkbox"/> Ammoniumthiocyanat-Lsg.	<input type="checkbox"/> 2 skalierte Pasteurpipetten 2 mL
<input type="checkbox"/> Wasser	<input type="checkbox"/> Reagenzglasständer
<input type="checkbox"/> Eiswürfel	<input type="checkbox"/> Reagenzglashalter
<input type="checkbox"/> Natriumchlorid	<input type="checkbox"/> 2 Bechergläser 400 mL
	<input type="checkbox"/> Gasbrenner
	<input type="checkbox"/> Streichhölzer / Gasanzünder
Entsorgung: Die Lösung kann im Abfall für Schwermetalle entsorgt werden.	



Versuchsdurchführung

- In drei Reagenzgläsern werden mithilfe einer skalierten Pasteurpipette jeweils 4 mL einer Ammoniumthiocyanat-Lösung (3 mM) vorgelegt.
- Zu den bereits befüllten Reagenzgläsern werden mithilfe einer zweiten skalierten Pasteurpipette jeweils 4 mL einer Eisen(III)-chlorid-Lösung (5,5 mM) gegeben.
- In eines der Bechergläser werden eine Hand breit Eis sowie etwas kaltes Wasser gefüllt und anschließend eine Spatelspitze Natriumchlorid dazugegeben.
- In das andere Becherglas werden etwa 350 mL Wasser gefüllt. Anschließend wird es auf einen Dreifuß mit Drahtnetz gestellt, unter dem sich ein Gasbrenner befindet.
- Eines der Reagenzgläser wird in das mit Eis gefüllte Becherglas, ein weiteres in das Wasserbad, gestellt. Das Wasserbad wird mit dem Gasbrenner erwärmt. Das letzte Reagenzglas verbleibt im Reagenzglasständer.
- Nach 5 Minuten werden die Farben der Lösungen in den Reagenzgläsern verglichen.

Arbeitsblatt zu den Schülerversuchen zum chemischen Gleichgewicht

M 5

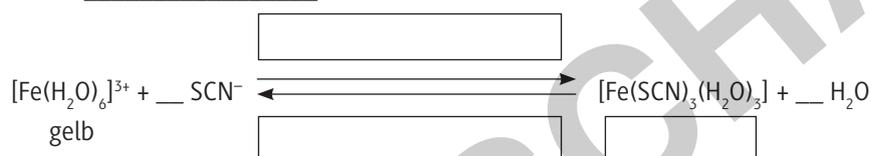
Bei den Schülerversuchen 2, 3 a und b sowie 5 werden spezielle Verbindungen gebildet. Sie werden als Komplexe bezeichnet. Ein Komplex besteht aus einem Metall-Ion, z. B. Fe^{3+} oder Al^{3+} , an dem eine bestimmte Anzahl von Bindungspartnern gebunden ist, wie bspw. H_2O , SCN^- , F^- oder OH^- . In Wasser sind an den Metall-Ionen Wassermoleküle gebunden, die ausgetauscht werden können. Bei Komplexen ist die Stabilität ein entscheidendes Kriterium, ob ein Austausch stattfindet.

Schülerversuch 2: Künstliches Blut

Beobachtungen:

Auswertung:

Bei der Zugabe von _____-Lösung zu einer Ammoniumthiocyanat-Lösung entstand ein _____ Komplex. Dieser zerfiel durch das _____ des Reagenzglases. Die Lösung wurde _____. Beim Abkühlen _____ sich die Farbe. Die Bildung des roten Eisen(III)-thiocyanat-Komplexes ist endotherm, der Zerfall _____.



Die Lage des chemischen Gleichgewichts ist von der _____ abhängig.

Schülerversuch 3 a: Intensivierung der Farbe von künstlichem Blut

Beobachtungen:

Auswertung:

Bei der Zugabe von Eisen(III)-chlorid-Lösung zu einer _____-Lösung entstand ein roter Komplex. Durch die Zugabe von festem _____ bzw. Ammoniumthiocyanat zu der roten Lösung wurde die Farbe _____.

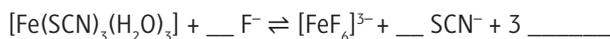
Die Lage des chemischen Gleichgewichts ist von der _____ der Reaktionspartner abhängig.

Schülerversuch 3 b: Entfärbung von künstlichem Blut

Beobachtung:

Auswertung:

Der rote Eisen(III)-thiocyanat-Komplex wurde durch die Zugabe einer _____-Lösung entfärbt. Dies wird als Maskierung bezeichnet. Es entstand ein stabilerer Eisen(III)-_____Komplex. Die Eisen(III)-Ionen wurden dem Gleichgewicht entzogen.



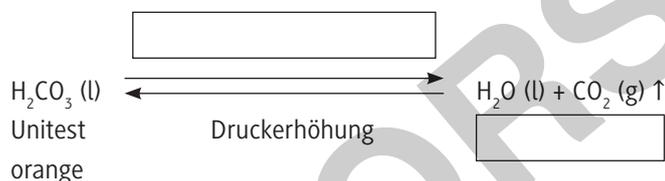
farblos

Das chemische Gleichgewicht kann durch das Entziehen eines _____ verschoben werden.

Schülerversuch 4: Sprudelwasser**Beobachtungen:**

Auswertung:

Das verwendete Mineralwasser enthielt _____. Diese färbte aufgrund der Oxonium-Ionen den Universalindikator _____. Durch das Umfüllen des Mineralwassers _____ sich der Druck (für die Herstellung von spritzigem Mineralwasser wird CO_2 unter hohem Druck in Wasser gepresst), der auf die Flüssigkeit wirkte, und das Gleichgewicht wurde in Richtung der Volumenzunahme verschoben. Die instabile Kohlensäure zerfiel zu Wasser und _____. Durch das Rühren wurde das Kohlenstoffdioxid aus der Lösung entfernt und somit aus dem Gleichgewicht gedrängt. Der Universalindikator zeigte durch seine _____ Farbe eine neutrale _____ an.

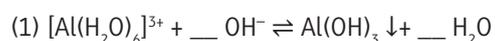


Die Lage des chemischen Gleichgewichts ist vom _____ abhängig.

Schülerversuch 5: „Zauberei“ mit Aluminium-Ionen**Beobachtungen:**

Auswertung:

Eine Aluminiumnitrat-Lösung hat einen _____ pH-Wert. Bei der Zugabe von Natronlauge wurde der _____ basischer. Es bildete sich ein geleeartiger _____. Bei diesem handelte es sich um Aluminiumhydroxid (1). Durch eine weitere Zugabe von Natronlauge _____ sich der Niederschlag wieder auf, da ein löslicher Aluminiumkomplex entstand (2). Durch die Zugabe von Salzsäure wurde die Reaktion _____.



Die Lage des chemischen Gleichgewichts ist vom _____ abhängig.



Text-Memory zum chemischen Gleichgewicht und dem Prinzip des kleinsten Zwanges

M 8

Im Text-Memory können Sie spielerisch Ihr Wissen zu chemischen Gleichgewichten und dem Prinzip des kleinsten Zwanges testen.

Aufgabe

Spielen Sie das Memory zu viert. Mischen Sie die Karten gründlich. Legen Sie diese verdeckt oder offen hin. Eine Aussage und eine Kurzantwort bilden zusammen immer ein Pärchen. Es geht reihum. Wer die meisten richtigen Kartenpärchen zusammen bekommen hat, ist Gewinner.



Ein chemisches Gleichgewicht, das in der Natur vorkommt	Weicht der Störung aus und nimmt Zustand mit geringster Wirkung der Störung ein	Eine Regel, die die Instabilität von Kohlensäure erklärt	Stoffumsatz
Die Säure-Anionen der Kohlensäure	Kesselstein	Entsteht durch das Verdunsten von hartem Wasser im Haushalt	HCO_3^- - und CO_3^{2-} -Ionen
Pfeile, mit denen ein chemisches Gleichgewicht gekennzeichnet wird	Druckerhöhung oder Druckerniedrigung	Einheit der Wasserhärte	Gleich ($v_H = v_R$)
Entstehen beim Waschen mit Seife in hartem Wasser	$K_c = \frac{c^{v(C)}(C) \cdot c^{v(D)}(D)}{c^{v(A)}(A) \cdot c^{v(B)}(B)}$	Kann Ca^{2+} - sowie Mg^{2+} -Ionen aufnehmen und tauscht diese gegen Na^+ - oder K^+ -Ionen	Konzentration der Produkte und Edukte
Liegen im chemischen Gleichgewicht neben den Produkten vor	Temperaturerniedrigung	Beträgt bei chemischen Gleichgewichten nie 100 %	Erlenmeyer-Regel
Wie das System sein muss, damit sich ein Gleichgewicht einstellt	Umkehrbarkeit der Reaktion	Wie die Geschwindigkeiten der Hin- u. Rückreaktion im Gleichgewicht sind	ΔH
Ist in einem chemischen Gleichgewicht konstant	Ionenaustauscher	So reagiert ein im Gleichgewicht befindliches System auf eine Störung	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht