



Das chemische Gleichgewicht – Empfehlungen für eine konsistente Begriffsentwicklung und Symbolik

AG Terminologie und Symbolik im Chemieunterricht

Kenntnisse über die Lage und die Beeinflussung chemischer Gleichgewichte spielen bei praktisch allen chemischen Prozessen in Industrie und Labor eine große Rolle. Bereits diese Bedeutunghaftigkeit rechtfertigt die ausgiebige Behandlung chemischer Gleichgewichte im Chemieunterricht der Sek. II. Bei der Behandlung dieses anspruchsvollen Themenfeldes lassen sich vielfältige Vermittlungs- und Verständnishürden erkennen, wie sie u.a. in Barke (2006) zusammengestellt sind. Auch hinsichtlich der verwendeten Terminologie und der Symbolik zeigen sich Problemlagen auf, die ein zusätzliches Verwirrungspotential mit sich bringen (vergl. Kremer & Tittel 2017). Nachfolgend werden gebräuchliche Begrifflichkeiten rund um das chemische Gleichgewicht diskutiert und Empfehlungen für eine fachlich konsistente Begriffsentwicklung und Symbolik gegeben, die Lernenden den Zugang zum Verständnis erleichtern sollen.

Differenzierung von Zustand und Prozess

In Schulbüchern, Lehrplänen, z.T. auch in Hochschullehrwerken, besonders aber in der unterrichtlichen Praxis finden sich verschiedene Begrifflichkeiten, fachspezifische Wendungen und Symboliken, die im Rahmen des Themas chemisches Gleichgewicht verwendet werden (Tab. 1). Schon die häufig im Unterricht verwendete Bezeichnung *Gleichgewichtsreaktion* offenbart ein fachliches Problem, denn das chemische Gleichgewicht kennzeichnet einen Systemzustand, „bei dem sich die Anteile der beteiligten Stoffe nicht mehr verändern“ (Binnewies et al., 2016, S. 225). Demzufolge findet im erreichten Gleichgewichtszustand keine makroskopisch messbare Reaktion statt, weshalb Formulierungen wie ‚Die Protolyse von Essigsäure ist eine Gleichgewichtsreaktion‘ vermieden und durch Wendungen wie ‚Die Protolyse von Essigsäure ist eine Reaktion, die zu einem Gleichgewichtszustand führt‘

Tab. 1: Beispiele für sprachliche Wendungen und Symboliken rund um das Thema chemisches Gleichgewicht

| Kategorie | sprachliche Wendung / Symbolik |
|-------------------------|--|
| Allgemeine Umschreibung | Protolyse als Gleichgewichtsreaktion, Gleichgewichtszustand, Reaktion im chemischen Gleichgewicht |
| Gleichgewichtslage | Das Gleichgewicht liegt rechts. Das Gleichgewicht liegt auf der Produktseite. |
| Le Chatelier | Verlagerung / Verschiebung des Gleichgewichts nach links / rechts, Störung des Gleichgewichts, Verschiebung / Verlagerung der Gleichgewichtslage |
| Symboliken | \rightleftharpoons , \rightleftharpoons , \rightleftharpoons |
| Massenwirkungsgesetz | Aufstellen des Massenwirkungsgesetzes, Aufstellen des Terms für K_C , K_P , K_X , Aufstellen des Massenwirkungsprodukts |

bzw. kürzer ‚... die zu einem Gleichgewicht führt‘ ersetzt werden sollten.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass man im Unterricht und natürlich auch in den jeweiligen Schul- und Fachbüchern sprachlich klar zwischen zwei Perspektiven auf das chemische Gleichgewicht unterscheiden muss: Die *Zustandsperspektive* beschreibt die *Lage des chemischen Gleichgewichts*, ausgedrückt durch den Term des Massenwirkungsgesetzes und den verschiedenen Arten von Gleichgewichtskonstanten (K_C , K_P , K_X). Diese Perspektive ist eng mit den Namen Guldberg und Waage verknüpft, die die genannte Gesetzmäßigkeit aus empirischen Daten abgeleitet haben. Die *Beeinflussungen der Gleichgewichtslage*, wie sie über das Prinzip von LeChatelier beschrieben werden, bilden die Prozessperspektive auf das chemische Gleichgewicht.

Die Kernschwierigkeit liegt in der sprachlichen und symbolischen Unterscheidung zwischen dem Prozess der Gleichgewichtseinstellung und dem erreichten bzw. vorliegenden Gleichgewichtszustand, sodass es häufig zur Mischung beider Perspektiven kommt. Zur eindeutigen Differenzierung dieser beiden Ebenen empfehlen wir die Verwendung folgender Symboliken und Termini:

Symbolik Gleichgewichtszustand und Gleichgewichtseinstellung

Für Systeme, die sich im *Zustand des chemischen Gleichgewichts* befinden, wird gemäß den Forderungen der IUPAC der Gleichgewichtspfeil mit den einseitigen Pfeilspitzen (Harpunen) (\rightleftharpoons) verwendet, wobei für die Schreibweise der Reaktion festgelegt ist, dass die exotherm verlaufende Reaktion von links nach rechts formuliert wird. Eine Ausnahme bildet die Autoprotolysereaktion zwischen Wassermolekülen. Obwohl die Bildung der Ionen endotherm ist, stehen die Ionen rechts vom Gleichgewichtspfeil.

Die extreme Lage eines Gleichgewichts kann durch Verlängerung der oberen oder unteren Harpune gekennzeichnet werden. Zusätzlich könnte dies durch die Angabe $K \gg 1$ oder $K \ll 1$ als Maß bzw. Kennzeichnung für die Gleichgewichtslage ergänzt werden, um vom weiter unten beschriebenen Vorschlag für die Kennzeichnung einer Reaktion, die sich nicht im Gleichgewichtszustand befindet, symbolisch stärker zu unterscheiden.

Die Nutzung eines Doppelpfeils (\rightleftharpoons) sollte ausschließlich zur Kennzeichnung von Hin- und Rückreaktion einer reversiblen Reaktion verwendet werden, wie Abb. 1 deutlich macht. Die Verwendung für Systeme im Zustand des chemischen Gleichgewichts ist die Schreibweise des Doppelpfeiles nicht angebracht und sollte strikt vermieden werden:

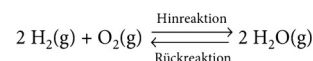


Abb. 1: Kennzeichnung von Hin- und Rückreaktion der Bildung und Zerlegung von Wasser (aus Binnewies et al., 2016, S. 225)

Für Systeme, die sich nicht im Zustand des chemischen Gleichgewichts befinden und in denen der Prozess der Gleichgewichtseinstellung noch erfolgt, schlagen wir vor, den normalen Reaktionspfeil zu nutzen. Dies unterstützt die Unterscheidung von Zustand und Prozess. Die bei der Gleichgewichtseinstellung ebenfalls noch ablaufende entgegengesetzte Reaktion kann zwecks Vereinfachung weggelassen werden oder durch einen kleineren Reaktionspfeil angedeutet werden (Abb. 2, Pfeil für die Rückreaktion in Klammern gesetzt) (Abb. 2).

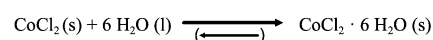


Abb. 2: Prozess der Gleichgewichtseinstellung für die Bildung von Hexaaquacobalt(II)-chlorid aus wasserfreiem Cobalt(II)-chlorid und Wasser

Beeinflussung der Gleichgewichtslage – Prinzip von Le Chatelier

Die sprachlichen Wendungen bzgl. der Beeinflussung der Gleichgewichtslage durch die äußeren Faktoren Temperatur, Druck und Konzentration sind vielfältig. Häufig spricht man von einer *Verschiebung* oder einer *Verlagerung des Gleichgewichts nach links oder rechts* bzw. *in Richtung der Edukte oder der Produkte*. Diese Formulierungen können zu folgenden Fehlinterpretationen bei den Lernenden führen:

- Aus der Formulierung *Verschiebung/Verlagerung des Gleichgewichts* wird

vielfach abgeleitet, dass die Konzentrationen der Teilchen auf der einen Seite des Gleichgewichtssymbols alle zunehmen und sich die Konzentrationen der Teilchen auf der anderen Seite allesamt verringern. Dieser Befund trifft jedoch nur für Temperaturänderungen zu.

- Anhand der Wendung Verschiebung oder Verlagerung lassen sich nicht die Fälle Einstellung eines neuen Gleichgewichtszustandes mit verändertem Wert für K (bei Temperaturänderungen) und Wiedereinstellung des Gleichgewichts mit gleich bleibendem Wert für K (bei Konzentrations- und Druckänderungen) differenzieren.
- Die vereinfachte Wendung *Verschieben/Verlagern des Gleichgewichts* verschleiern, dass sich in jedem Fall die Zusammensetzung des Gleichgewichtszustands verändert hat.

Wir empfehlen daher hinsichtlich der fachsprachlichen und fachlichen Klarheit folgende Formulierungen und Wendungen zu nutzen:

Anstelle der Worte Verlagerung oder Verschiebung sollte man allgemein von einer *Beeinflussung* oder *Störung des Gleichgewichtszustands* sprechen und bei der nachfolgenden *Einstellung des Gleichgewichts* folgende Fälle unterscheiden:

- Die Veränderung der Konzentration schon eines Edukts oder Produkts bewirkt eine Störung des Gleichgewichtszustands. Im Sinne des Prinzips von Le Chatelier erfolgt eine *Wiedereinstellung des Gleichgewichtszustands* mit unverändertem Wert für K . Gleiches gilt für eine Druckänderung bei Reaktionen mit mindestens einem gasförmigen Edukt bzw. Produkt.¹
- Verändert man die Temperatur bei einer Reaktion, die den Gleichgewichtszustand erreicht hat, kommt es zu einer *Neueinstellung des Gleichgewichtszustands* mit einem veränderten Wert für K .

Formulierungen zum Massenwirkungsgesetz

In Chemieschulbüchern der Sek. II und in Hochschullehrwerken findet man in Aufgabenstellungen zum chemischen Gleichgewicht häufig die in Tab. 1 in der untersten Zeile dargestellten Wendungen. Mathematisch korrekt ist die Formulierung: Aufstellen der Gleichung für K_C (bzw. K_p , K_x) mit dem von Guldberg und Waage formulierten mathematischen Ausdruck. Diese in der Mathematik übliche Formulierungsweise hat den Vorteil, dass hierbei

¹ Hier wird in der Schule üblicherweise von der mit Druckänderungen verbundenen Temperaturänderungen vereinfachend abgesehen.

direkt die Art der Gleichgewichtskonstante angegeben wird. Die Entscheidung, ob mit Konzentrationen (Aktivitäten), Partialdrücken oder Stoffmengenanteilen die Gleichung aufgestellt werden soll, ist damit vorgegeben und muss nicht von den Lernenden abgeleitet werden.²

Reaktionsgeschwindigkeit im dynamischen Gleichgewicht

Für ein tiefgreifendes Verständnis des chemischen Gleichgewichts ist die Betrachtung der Dynamik die wesentliche Voraussetzung. In diesem Zusammenhang findet man häufig Formulierungen wie *„Die Reaktionsgeschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktion ändern sich im Gleichgewichtszustand nicht mehr, sie sind gleich groß.“* Für die Beschreibung des Gleichgewichtszustandes ist die Reaktionsgeschwindigkeit eine nicht geeignete Größe, denn sie ist definiert als Betrag der Konzentrationsänderungen von Edukten und Produkten pro Zeiteinheit und adressiert damit die Stoffebene. Mit dem Erreichen des Gleichgewichtszustands ändern sich die Konzentrationen der beteiligten Stoffe makroskopisch nicht mehr. Damit werden die Reaktionsgeschwindigkeiten, definiert als Quotient aus Konzentrationsänderung pro Zeit, aller am Gleichgewicht beteiligten Stoffe gleich Null. Wichtig für das Verständnis der Dynamik des chemischen Gleichgewichts ist hingegen die Teilchenebene. Die Lernenden müssen zur Vorstellung gelangen, dass pro Zeiteinheit gleich viele Hin- und Rückreaktionen erfolgen. Ein geeigneter Terminus, der auf die Teil-

² Vom Wortlaut her ist die Bezeichnung Massenwirkungsgesetz übrigens nicht einfach für die Lernenden nachzuvollziehen, denn im Term stehen die Konzentrationen, Partialdrücke oder die Stoffmengenanteile der Stoffe. Hier kann es hilfreich sein, den Lernenden die veraltete Bezeichnung *aktive Masse* für Aktivitäten mitzuteilen. Guldberg und Waage hatten auf der Basis der Werte aktiver Massen das Massenwirkungsgesetz abgeleitet.

chenebene rekurriert, ist das Wort *Reaktionsrate*, denn dieser Terminus bezieht sich nicht auf Konzentrationsänderungen, sondern auf die Anzahl erfolgreicher Zusammenstöße der Reaktionspartner. Anstelle der Formulierung *„die Reaktionsgeschwindigkeiten sind gleich groß“* empfehlen wir daher die Wendung *„die Reaktionsraten von Hin- und Rückreaktion sind im Gleichgewichtszustand gleich groß“* oder *„Im Gleichgewichtszustand laufen Hin- und Rückreaktion mit der gleichen Rate bzw. im gleichen Ausmaß ab“*. Es empfiehlt sich daher, bereits beim Thema Reaktionskinetik die Fachworte Reaktionsrate (Teilchenebene) und Reaktionsgeschwindigkeit (Stoffebene) zu differenzieren.

Überdies lässt sich das Konzept der Reaktionsgeschwindigkeit bei der Einführung des chemischen Gleichgewichts gänzlich vermeiden, wenn man die Einstellung des Gleichgewichtszustands einer Reaktion

Tab. 2: Empfehlungen zur Terminologie und Symbolik zum chemischen Gleichgewicht

| Kategorie / Inhalt | bisher gebräuchlich | Empfehlung |
|--|--|--|
| Symbolik des Gleichgewichtszustands | Doppelpfeil (\rightleftharpoons) oder Harpune (\rightleftharpoons) | Harpune (evtl. ungleiche Länge der Harpunen; \rightleftharpoons , \rightleftharpoons) |
| Mathematische Formulierung des Massenwirkungsgesetzes | Aufstellen des Massenwirkungsgesetzes | Aufstellen der Gleichung für die Gleichgewichtskonstante (K_C , K_p , K_x) |
| Bedingungen für das Erreichen des Gleichgewichtszustands | Die Geschwindigkeiten der Hin- und Rückreaktion sind gleich. | Die Reaktionsraten sind gleich (d.h. pro Zeiteinheit bleibt die Anzahl der wirksamen Stöße der beteiligten Teilchen für die Hin- und für die Rückreaktion gleich). |
| LeChatelier | Verschiebung des chemischen Gleichgewichts in Richtung der Produkte / Edukte | Beeinflussung des chemischen Gleichgewichts mit Neueinstellung des Gleichgewichtszustands (anderer Wert für K) oder Wiedereinstellung des Gleichgewichtszustands (gleicher Wert für K) |

Die AG Terminologie und Symbolik der Fachgruppe Chemieunterricht der GDCh widmet sich der fachlichen und fachdidaktischen Klärung von Fachbezeichnungen und Symboliken im Fach Chemie mit dem Ziel, die konsistente Begriffsbildung im Chemieunterricht zu unterstützen (<https://www.gdch.de/netzwerk-strukturen/fachstrukturen/chemieunterricht/arbeitsgruppen.html>). Die AG kooperiert mit dem Didaktischen Prüfstand des Vereins MNU e.V. (<https://www.mnu.de/fachbereiche/didaktischer-pruefstand>). Die dort erschienenen Diskussionsbeiträge werden von der GDCh-AG ausgewertet und unter Einholen weiterer fachlicher Expertise zu Empfehlungen ausgearbeitet, die regelmäßig in der Zeitschrift CHEMKON erscheinen werden. Im nächsten Beitrag geht es um die Terminologie rund um die Wechselwirkungen zwischen Teilchen.

Am vorliegenden Beitrag haben mitgewirkt:

Joachim Hähndel, Matthias Kremer, Heike Nickel, Dr. Bernhard Sieve, Harald Thielen-Redlich, Carsten Tittel

Tab. 3: Symbolische Unterscheidung von Prozess und Zustand beim chemischen Gleichgewicht

| Prozess | Zustand |
|--|--|
| System ist aufgrund einer Beeinflussung nicht im Gleichgewicht, befindet sich aber auf dem Weg zum Gleichgewichtszustand | System ist im Gleichgewichtszustand |
| normaler Reaktionspfeil (→) | „Harpunen“ (⇌) |
| Rückreaktion kann angedeutet werden (⇌) | Lage des Gleichgewichtszustands kann angedeutet werden (⇌) |

einmal von der Hin- und einmal von der Rückreaktion betrachtet (z. B. Bildung und Hydrolyse eines Esters). Die Erkenntnis, dass der Zustand, in dem sich die Konzentrationen der beteiligten Stoffe nicht mehr makroskopisch ändern, sowohl von den Edukten (Hinreaktion) als auch von

den Produkten (Rückreaktion) erreicht werden kann, reicht für die Beschreibung des chemischen Gleichgewichts und dessen Dynamik vollends aus.

Abschließend möchten wir zur Verwendung der Termini Edukte und Produkte bei Reaktionen, die zu einem Gleichgewicht führen, anmerken, dass diese Termini für die Beschreibung sehr bedacht verwendet werden sollten. Eigentlich verlieren diese Fachworte ihre Bedeutung, denn sowohl bei der Gleichgewichtseinstellung (Prozess) als auch im Gleichgewichtszustand laufen beide Reaktionsrichtungen ab, wodurch die Worte Produkt und Edukt unscharf sind. Anstelle der Wendungen „Das Gleichgewicht verschiebt sich in Richtung der Produkte.“ Sollte stets die Teilchenart angegeben werden, die jeweils betrachtet wird. Beispiele sind: *„Durch das kontinuierliche Abdestillieren des Esters wird das Gleichgewicht permanent so beeinflusst,*

das sich mehr Ester bildet.’ oder ‚Wie lässt sich das Gleichgewicht in Richtung von Stoff XY beeinflussen?’ oder ‚Wie lässt sich durch die Beeinflussung des Gleichgewichts die Ausbeute an Stoff C erhöhen?’

Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Empfehlungen im Überblick.

Literatur

[1] Barke, H.-D. (2006): Chemiedidaktik – Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen. Heidelberg: Springer
 [2] Binnewies, M., Finze, M., Jäckel, M., Schmidt, P., Willner, H. und Rayner-Canham, G. (2016): Allgemeine und Anorganische Chemie. 3. Auflage. Heidelberg: Springer
 [3] Kremer, M. und Tittel, C.: Das chemische Gleichgewicht auf dem didaktischen Prüfstand. MNU Journal 3/2017, S. 178–181

CHEMKON-Schwerpunktthemen

Jede zweite CHEMKON-Ausgabe ist einem Schwerpunktthema gewidmet und Beiträge zu diesen Schwerpunkten sind immer willkommen. Bitte reichen Sie Ihren Beitrag zum angegebenen Termin online ein (www.editorialmanager.com/chemkon) und geben Sie den passenden Schwerpunkt im Anschreiben an.

| CHEMKON | Schwerpunkt | Abgabetermin für Beiträge |
|---------|--|---------------------------|
| 2/2021 | Reaktionsprozesse und Kinetik | 15.07.2020 |
| 4/2021 | Nachhaltige Chemie | 15.10.2020 |
| 6/2021 | Digitalisierung | 15.01.2021 |
| 8/2021 | Chemie in historischen Kontexten | 15.04.2021 |
| 2/2022 | Unterrichtseinstiege | 15.07.2021 |
| 4/2022 | Smarte Materialien | 15.10.2021 |
| 6/2022 | Digitalisierung II | 15.01.2022 |
| 8/2022 | Innovative Experimente rund um die Elektrochemie | 15.04.2022 |
| 2/2023 | Lebensnaher Chemieunterricht | 15.07.2022 |