

Auf dem didaktischen Prüfstand:

Die Reaktionsenthalpie – Einheit kJ oder kJ · mol⁻¹?

Teil 1: Problemanalyse und Vorgaben aus Wissenschaft und Didaktik

MATTHIAS KREMER – CARSTEN TITTEL – FELIX ZEIDLER

Nachdem in den Inhaltsbereich „Chemische Reaktion“ der KMK-Bildungsstandards (KMK, 2020) die Stichworte „1. Hauptsatz der Thermodynamik“, „Enthalpie“ und „Satz von HESS“ aufgenommen wurden, spielen Aspekte der Energetik und Berechnungen mit den zugehörigen Größen auch in den zentral gestellten Abituraufgaben deutscher Gymnasien eine größere Rolle. Deshalb ist eine in didaktischen Kreisen seit langem kontrovers diskutierte Frage aktueller denn je:

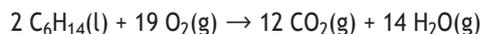
Hat die Reaktionsenthalpie $\Delta_r H$ die Einheit kJ oder die Einheit kJ · mol⁻¹?

Heutige Schulbücher weisen in den entsprechenden Kapiteln eine erstaunliche Vielfalt auf. Eine Zusammenstellung dazu wird in diesem ersten Teil ergänzt durch Vorgaben aus Didaktik und Wissenschaft, die bei einem für die Schule geeigneten Vorschlag zum Umgang mit den energetischen Größen zu berücksichtigen sind.

Diese Überlegungen münden in einem späteren zweiten Teil in eine Empfehlung, die die fachliche Korrektheit ebenso im Blick hat wie die didaktische Logik, ergänzt durch einige typische Aufgaben mit Lösungsvorschlägen in der Online-Beilage.

1 Sprech- und Darstellungsweisen auf dem Prüfstand

Am Beispiel der vollständigen Verbrennung von Hexan sollen die beiden Möglichkeiten vorgestellt werden, wie die Einheit der Reaktionsenthalpie angegeben werden kann:



Berechnet man nach dem Satz von Hess die Reaktionsenthalpie einer Reaktion aus den molaren Standardbildungsenthalpien, sind außer diesen Tabellenwerten mit der Einheit kJ · mol⁻¹ (IQB, 2024) auch die stöchiometrischen Koeffizienten in der betrachteten Reaktionsgleichung zu beachten.

1. Werden die stöchiometrischen Koeffizienten als Zahlen ohne Einheit gesehen, kommt man für die berechnete Reaktionsenthalpie zur Einheit kJ · mol⁻¹.

$$\begin{aligned} \Delta_r H &= 14 \cdot \Delta_f H_m(\text{H}_2\text{O}(\text{g})) + 12 \cdot \Delta_f H_m(\text{CO}_2(\text{g})) - \\ &\quad 2 \cdot \Delta_f H_m(\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{l})) \\ \Delta_r H &= 14 \cdot (-242 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 12 \cdot (-394 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) - \\ &\quad 2 \cdot (-199 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) \\ \Delta_r H &= -7718 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

Dabei bezieht sich die Einheit Mol nicht auf die umgesetzte Stoffmenge eines Reaktionspartners, sondern auf den so genannten Formelumsatz, also die Anzahl der gemäß der Reaktionsgleichung abgelaufenen Reaktionen auf der Teilchenebene, auch „Menge der Elementarumsätze“ genannt. Häufig findet man in diesem Fall als Größenbezeichnung „molare Reaktionsenthalpie“ und das Symbol $\Delta_r H_m$.

2. Versteht man die stöchiometrischen Koeffizienten der Reaktionsgleichung als Angabe der Stoffmenge der

Reaktionsteilnehmer („Reaktionsgleichung in Mol“), multipliziert man die Tabellenwerte mit Größenwerten mit der Einheit Mol und kommt so für die berechnete Reaktionsenthalpie zur Einheit kJ.

$$\begin{aligned} \Delta_r H &= 14 \text{ mol} \cdot \Delta_f H_m(\text{H}_2\text{O}(\text{g})) + 12 \text{ mol} \cdot \Delta_f H_m(\text{CO}_2(\text{g})) - \\ &\quad 2 \text{ mol} \cdot \Delta_f H_m(\text{C}_6\text{H}_{14}(\text{l})) \\ \Delta_r H &= 14 \text{ mol} \cdot (-242 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + \\ &\quad 12 \text{ mol} \cdot (-394 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) - 2 \text{ mol} \cdot \\ &\quad (-199 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) \\ \Delta_r H &= -7718 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Der Zahlenwert der Reaktionsenthalpie ist jeweils derselbe, sofern man sich auf dieselbe Reaktionsgleichung bezieht.

Der Unterschied erscheint auf den ersten Blick nicht besonders groß, bei darauf aufbauenden Aufgaben mit komplexeren Reaktionsgleichungen gibt es aber immer wieder Verwirrung bei den Lernenden. Dies fordert zu didaktischen Überlegungen auf. Dabei muss die fachliche Korrektheit mit Blick auf die Fachwissenschaft, trotz sinnvoller Elementarisierungsmaßnahmen, immer gewährleistet sein.

Blick in die Schulbücher, eine alte Diskussion

In älterer Literatur findet man zu diesem Thema immer wieder Beispiele für einen sorglosen Umgang mit den Einheiten. In einem Repetitorium Allgemeine und anorganische Chemie etwa wird die Reaktionswärme mit dem Symbol ΔH eingeführt. In den angeführten Beispielen hat ΔH die Einheit kJ. Darunter steht kommentarlos der Satz „Die Reaktionswärme ΔH gibt man in kJ (Kilo-Joule) pro Mol Stoffumsatz an.“ (FRIEDLI, 1977, 34). Auch in einem damaligen Schulbuch wird ohne Erklärung zwischen den Einheiten gewechselt (KEMPER, A., FLADT, R., 1976). Ein sauberes Kalkül mit Größen- und Größenwertgleichungen war so nicht möglich. Dagegen hat sich in den

heutigen Schulbüchern vieles verbessert. Trotzdem ist das Fazit, das E. WENZL vor 30 Jahren gezogen hat, auch heute noch fast unverändert gültig:

„Zieht man Bilanz, muß festgestellt werden: Die Schulbücher spiegeln die gleiche Uneinheitlichkeit wider, wie sie in der Fachliteratur herrscht. Sie beweisen, daß man sowohl mit extensiven Reaktionsgrößen und stoffmengenbezogenen Stoffgrößen einerseits als auch mit molaren Reaktionsgrößen andererseits rechnen kann. Bei letzteren drängt sich allerdings die Frage auf, ob die Lernenden klare Vorstellungen von diesen Größen haben und immer wissen, was sie tun und warum sie es tun, denn die benutzten Größen werden nirgends klar und verständlich definiert. Für Schüler bleiben sicher viele Fragen offen.“ (WENZL 1993, 49)

Die heutige Vielfalt der Terminologie wird im Folgenden anhand der Größen Reaktionswärme und Reaktionsenthalpie mit Zitaten aus fünf Schulbüchern beispielhaft gezeigt:

1. Bestimmte vom System mit der Umgebung ausgetauschte Wärmemenge: Q
Teil der inneren Energie wird an die Umgebung als Reaktionswärme Q übertragen, $Q < 0$ bei exothermen Reaktionen, Einheit kJ
Reaktionsenthalpie $\Delta_r H = Q$ (bei konstantem Druck), hängt von der umgesetzten Stoffmenge ab, Einheit kJ
 $\Delta_r H$: Reaktionsenthalpie pro Mol Formelumsatz, Einheit $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (FLEISCHER, 2023, 28, 29, 34)
2. Reaktionswärme bei isobarer Prozessführung Q_p ,
Reaktionsenthalpie $\Delta_r H = Q_p$,
Einheit von $\Delta_r H$: kJ (ARNOLD, 2010, 77, 78)
3. mit der Umgebung ausgetauschte Wärme nennt man Reaktionswärme Q_r ; $Q_r > 0$ bei exothermen Reaktionen
Reaktionsenthalpie $\Delta_r H = -Q_r$, ihr Wert ist abhängig von der eingesetzten Stoffmenge, Einheit kJ (VAN NEK et al., 2018, 30, 32)
4. exotherme Reaktion: an die Umgebung wird Wärme Q abgegeben; Reaktionswärme: $Q_r < 0$
Reaktionsenthalpie $\Delta_r H = -Q_{r,p}$ (bei konstantem Druck), Einheit kJ
Reaktionsenthalpie $\Delta_r H^0$, Einheit kJ (BEE et al., 2022, 49-51, 59)
5. Reaktionswärme: Q_r , von der Kalorimeterflüssigkeit aufgenommene Wärme: Q
Reaktionsenthalpie: $\Delta_r H = Q_{r,p}$ (Reaktionswärme bei konstantem Druck), Betrag hängt vom Stoffumsatz ab, Einheit kJ (BOHRMANN-LINDE, SIEHR, 2021, 258, 259, 268)

Völlige Übereinstimmung bei den betrachteten Lehrbüchern gibt es in zwei Punkten: Die Reaktionsenthalpie wird mit dem Symbol $\Delta_r H$ eingeführt, aber zunächst nicht mit Bezug auf den Umsatz nach einer Reaktionsgleichung, sondern anhand eines konkreten Stoffumsatzes, etwa 0,01 mol eines Ausgangsstoffes. Sie wird mit der Reaktionswärme bei konstantem Druck gleichgesetzt und hat somit als extensive Größe die Einheit kJ.

Beim grundlegenden Begriff Reaktionswärme gibt es Unterschiede in der Symbolik und in den Definitionen bis hin zum

scheinbaren Widerspruch $Q_r > 0$ (bei 3.) und $Q_r < 0$ (bei 4.) bei exothermen Reaktionen.

Beim Bemühen, den Wert der Reaktionsenthalpie unabhängig von den eingesetzten Stoffmengen zu machen und mit der Reaktionsgleichung zu verknüpfen, treten die Unterschiede aber deutlich hervor, wie man an der jeweils verwendeten Einheit für die zusätzlich eingeführten Größen erkennt:

Einheit $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

1. Es wird die Größe „Reaktionsenthalpie pro Mol Formelumsatz“ eingeführt, die Bezeichnung Reaktionsenthalpie und das Symbol $\Delta_r H$ bleiben, Einheit: $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.
Danach wird eine zusätzliche Größe mit neuem Symbol eingeführt: Standardreaktionsenthalpie $\Delta_r H^0$, Einheit: $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Zur Berechnung werden die molaren Standardbildungsenthalpien mit den Stöchiometriezahlen ν aus der Reaktionsgleichung multipliziert. (FLEISCHER, 2023, 34, 37)
2. Als Größe mit neuem Symbol wird eingeführt: Molare Reaktionsenthalpie $\Delta_r H_m$, Einheit $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Bezugsgröße ist die Stoffmenge der Formelumsätze n_F . 1 mol Formelumsatz bedeutet den Umsatz einer „Reaktionsgleichung in Mol“. Zur molaren Größe muss die Reaktionsgleichung mit angegeben werden.
Außerdem wird genannt: molare Standardreaktionsenthalpie $\Delta_r H_m^0$. Zur Berechnung werden die molaren Standardbildungsenthalpien mit den Stöchiometriezahlen $\nu(\text{Rp})$ und $\nu(\text{As})$ aus der Reaktionsgleichung multipliziert (Rp: Reaktionsprodukte, As: Ausgangsstoffe). (ARNOLD, 2010, 79, 82, 92)
- 3a. Als Größe mit neuem Symbol wird eingeführt: Molare Reaktionsenthalpie $\Delta_r H_m$, Einheit $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Als Bezugsgröße wird die bei der Reaktion umgesetzte Stoffmenge n angegeben. Es bleibt offen, welcher Reaktionspartner dafür betrachtet werden soll.
Dann wird eingeführt: molare Standardreaktionsenthalpie $\Delta_r H_m^0$.
Die Aussage, dass sich der Wert von $\Delta_r H_m^0$ bei obiger Definition mit der Formulierung der Reaktionsgleichung ändert, wird nur verständlich, wenn mit „umgesetzter Stoffmenge“ der Stoffumsatz (im Sinne von „Menge der abgelaufenen Reaktionen auf Teilchenebene“) gemeint ist, die Einheit Mol sich also nicht auf einen Reaktionspartner bezieht. Dieser Sachverhalt wird jedoch nicht thematisiert.
Bei der Berechnung von $\Delta_r H_m^0$ wird anhand von Beispielen gezeigt, dass die molaren Standardbildungsenthalpien mit den Zahlen aus der Reaktionsgleichung multipliziert werden. (VAN NEK et al., 2018, 33)

Einheit kJ

- 3b. Als weniger gebräuchliche Darstellung wird zusätzlich angegeben, dass die Reaktionsenthalpien auf $n = 1$ mol eines Reaktionspartners normiert werden. Man erhält dann die Reaktionsenthalpie, unverändertes Symbol $\Delta_r H$ mit der Einheit kJ. (VAN NEK et al., 2018, 32, 33)
4. Als Größe mit neuem Symbol wird eingeführt: Standard-

reaktionsenthalpie $\Delta_r H^\circ$, Einheit: kJ. Zur Berechnung werden die molaren Standardbildungsenthalpien mit den Stoffmengen $n(X)$ aus der Reaktionsgleichung („in Mol“) multipliziert. (BEE et al., 2022, 59)

5. Als Größe mit neuem Symbol wird eingeführt: Molare Reaktionsenthalpie $\Delta_r H^\circ$, Einheit: kJ · mol⁻¹. Bezugsgröße ist nur in einem Beispiel (Verbrennung) angeführt: Stoffmenge n des eingesetzten Ausgangsstoffes. Beim Satz von HESS wird die Größe Standardreaktionsenthalpie mit dem Symbol $\Delta_r H^\circ$, Einheit kJ verwendet. Zur Berechnung werden die molaren Standardbildungsenthalpien mit den Stoffmengen $n(\text{Produkte})$ und $n(\text{Edukte})$ aus der „Reaktionsgleichung in Mol“ multipliziert. (BOHRMANN-LINDE, SIEHR, 2021, 268, 270)

2 Verwirrungspotenzial obiger Sprech- und Darstellungsweisen

Dass es Unsicherheiten von Lernenden bei der Anwendung molarer Größen und bei Berechnungen des Energieumsatzes gibt, kann man im eigenen Unterricht feststellen, aber auch der Fachliteratur entnehmen. Erfahrungen aus dem Unterricht in der DDR berichtet W. MEESE. Er nennt als Hauptfehlerquellen „Unsicherheiten bei der Unterscheidung von nichtmolaren und molaren Größen wie Reaktionswärme und molare Reaktionswärme (...) einschließlich ihrer exakten Symbolisierung“, „wenig gefestigtes Wissen zum Begriff ‚Stoffmenge Formelumsätze‘“ sowie „unzureichende und unvollkommene Arbeit mit Größengleichungen“ (MEESE, 1986, 227). Im Einzelnen geht es auch heute noch um folgende Probleme:

Definition und Symbol der Größe Reaktionsenthalpie

Wird die Reaktionsenthalpie sowohl extensiv wie intensiv gesehen, also in Bezug auf einen konkreten Stoffeinsatz wie auch anhand der Reaktionsgleichung normiert, und dabei dasselbe Größensymbol ΔH aber einmal mit der Einheit kJ und einmal mit der Einheit kJ · mol⁻¹ verwendet, widerspricht dies der didaktischen Forderung nach Eindeutigkeit und kann zur Verwirrung der Lernenden beitragen.

„Reaktionsgleichung in Mol“

Haben die Lernenden im bisherigen Unterricht ausschließlich mit Reaktionsgleichungen gearbeitet, in denen als stöchiometrische Koeffizienten die kleinstmöglichen ganzen Zahlen einzusetzen waren, kann es sie irritieren, wenn diese Zahlen nun als Zahlenwerte von Stoffmengen mit der Einheit Mol zu interpretieren sind. Ebenso sind Reaktionsgleichungen mit gebrochenen Zahlen in diesem Fall etwas gewöhnungsbedürftig.

„Formelumsatz“

Ist die (molare) Reaktionsenthalpie „pro Formelumsatz“, also mit der Einheit kJ · mol⁻¹ angegeben, stellt sich Lernenden häufig die Frage, auf welchen Stoff sich dieses „mol“ denn beziehe, wie man in einschlägigen Foren, etwa „gute Frage“ (Gute Frage, 2024) sehen kann. Die Einheit Mol haben Lernende im bisherigen Unterricht nur in Bezug auf eine bestimmte anzugebende Teilchenart kennengelernt. Dass bei der Größe „Formel-

umsatz“ nun stattdessen Mengen von Vorgängen betrachtet werden und dabei dieselbe Einheit Mol verwendet wird, ist gewöhnungsbedürftig. Bei Berechnungen sind Lernende immer wieder unsicher, wie genau Koeffizienten aus der Reaktionsgleichung zu berücksichtigen sind, falls sie ungleich 1 sind. Die Problematik soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden, das einen möglichen Gedankengang im Unterricht nachvollzieht:

Bei der Reaktion von Natrium mit Chlor soll aus der Reaktionswärme Q die Reaktionsenthalpie $\Delta_r H$ (bezogen auf den Formelumsatz) berechnet werden, um den Vergleich mit dem aus Tabellenwerten der molaren Bildungsenthalpien berechneten Zahlenwert zu ermöglichen. Mithilfe der eingeführten Gleichung $\Delta_r H = \frac{Q}{n(\text{Na})}$ kommt man zu der Reaktionsenthalpie, die einem Umsatz von genau 1 mol Natrium entspricht.

Für die nun gesuchte „Reaktionsenthalpie pro Mol Formelumsatz“ ist die Kenntnis der Reaktionsgleichung erforderlich: $2 \text{Na(s)} + \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NaCl(s)}$, da „man den Koeffizienten für Natrium aus der Reaktionsgleichung berücksichtigen“ (VAN NEK et al., 2023, 34) muss.

Um den Lernenden eine neue Größe wie n_F zu ersparen, wird in diesem Gedankengang keine Größengleichung für die gesuchte Reaktionsenthalpie $\Delta_r H$ angegeben, in die man den Faktor 2 einsetzen könnte, sondern die Gleichung $\frac{\Delta_r H}{2} = \frac{Q}{n(\text{Na})}$. Da man aber wegen des „Faktors“ 2 bei Na in der Reaktionsgleichung die oben berechnete Reaktionsenthalpie eigentlich mit 2 multiplizieren müsste, hier aber dividiert wird, entsteht erhebliches Verwirrungspotenzial. Mit $\Delta_r H$ ist nämlich nun etwas anderes als oben gemeint, die Reaktionsenthalpie pro Mol Formelumsatz. Auch wenn ein anderer Gedankengang und unterschiedliche Symbolik im Unterricht eingesetzt werden, bleibt der Umgang mit dem Faktor 2 Lernenden oftmals unklar.

Dieses Beispiel zeigt, dass es sich lohnt, über den Abbau von Verständnishürden nachzudenken. Lösungsansätze bieten Vorschläge zu einer eindeutigen Symbolik, zum konsequenten Arbeiten mit Größengleichungen und auch zum Verzicht auf den Umgang mit der Größe „Formelumsatz“.

Rechnen mit intensiven Größen

Wird die Reaktionsenthalpie auf n_F , also die Stoffmenge an Formelumsätzen bezogen, hat sie die Einheit kJ · mol⁻¹ und ist damit eine intensive Größe. Für spezielle Reaktionen sind diese Größen tabelliert, in der Regel für Standardzustand und 25 °C, etwa die molare Standardbildungsenthalpie oder die molare Verbrennungsenthalpie. Während Werte extensiver Größen uneingeschränkt addiert werden können, ist dies bei intensiven Größen nicht der Fall, wie man am Beispiel der Addition der Dichten oder der Temperaturen zweier Körper leicht erkennt. Die Summe ergäbe jeweils kein sinnvolles Ergebnis. Es gibt aber den Sonderfall, dass die Addition intensiver Größenwerte sinnvolle Ergebnisse liefert, wenn nämlich die Bezugsgröße für alle Summanden dieselbe ist. Dies ist bei molaren Enthalpien mit dem Formelumsatz der Fall. Deshalb kann man formal molare Enthalpien addieren (JUNGERMANN, 1989). Für Lernende ist es

Name	Symbol	Definition	SI unit	Notes
standard reaction enthalpy	$\Delta_r H^\ominus$	$\Delta_r H^\ominus = \sum_B \nu_B H_B^\ominus$	J mol^{-1}	12, 14 15, 16

(12) (continued) μ^\ominus or a standard equilibrium constant K^\ominus or other standard quantity is used, the standard state must be specified.

(14) The symbol r indicates reaction in general. In particular cases r can be replaced by another appropriate subscript, e.g. $\Delta_f H^\ominus$ denotes the standard molar enthalpy of formation; see Section 2.11.1 (i), p. 59 below for a list of subscripts. Δ_r can be interpreted as operator symbol $\Delta_r \stackrel{\text{def}}{=} \partial/\partial\xi$.

(15) The reaction must be specified for which this quantity applies.

(16) Reaction enthalpies (and reaction energies in general) are usually quoted in kJ mol^{-1} . In the older literature kcal mol^{-1} is also common, however, various calories exist. For the thermochemical calorie, $1 \text{ kcal} = 4.184 \text{ kJ}$ (see Section 7.2, p. 137).

Abb. 1. Angaben zur Reaktionsenthalpie in IUPAC (2007, 58)

jedoch nicht ganz einfach zu verstehen, welche intensiven Größen addiert werden können und welche nicht. Sind molare Enthalpien mit stöchiometrischen Koeffizienten zu multiplizieren, ist zudem eine reale Vorstellung der gebildeten Größe nicht leicht zu vermitteln, wie folgende Überlegung zeigt:

Bei der Synthese von Wasser $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}(\text{l})$ berechnet man die Reaktionsenthalpie mit $2 \cdot (-286 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ und erhält $-572 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Dabei bezieht sich bei der molaren Bildungsenthalpie von Wasser die Einheit Mol bei der Angabe $-286 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ eindeutig auf die Stoffmenge an Wasser-Molekülen, beim Ergebnis $-572 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ aber nicht. Innerhalb der Berechnung ändert sich hier die Bezugsgröße der Einheit Mol von Stoffmenge zu Formelumsatz – ein Stolperstein für viele Lernende.

Bei der alternativen Vorgehensweise interpretiert man die stöchiometrischen Koeffizienten als Zahlenwerte von Stoffmengen in der Einheit Mol.

Hier hat das Produkt $2 \text{ mol} \cdot (-286 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ das Ergebnis -572 kJ . Dies ist für Lernende stimmig die Enthalpieänderung bei der Bildung von 2 mol Wasser-Molekülen.

3 Vorgaben aus Didaktik und Fachwissenschaft

Rechnen im Chemieunterricht sollte das Verständnis der chemischen Zusammenhänge ergänzen und gelegentlich erleichtern. Daher sollen sich die Vorschläge zu Begriffen und Symbolen in der Energetik einerseits möglichst nahtlos an den bisherigen Unterricht anschließen, aber andererseits die Vorgaben der IUPAC berücksichtigen, damit keine schuleigene Begriffswelt entsteht.

3.1 Didaktische Leitlinien

Sinnvollerweise orientieren sich unseres Erachtens Vorschläge zu Größen und Symbolen, mit denen im Schulunterricht beim Thema Reaktionsenthalpie gearbeitet werden soll, an folgenden Zielen:

Grundsatz: Der mathematische Umgang mit den eingeführten Größen und Symbolen soll nicht zusätzlich große Schwierigkeiten mit sich bringen, die die chemischen Sachverhalte überdecken.

- A: Unterschiedliche Größen sollen verschieden bezeichnet und symbolisiert werden.
- B: Die Zahl der Größen soll so klein und ihre Symbolik so einfach wie möglich gehalten werden, wobei eine klare Zuordnung zwischen Symbol und Sachverhalt deutlich werden muss.
- C: Mit den Größen und ihren Symbolen soll ein schlüssiges, mathematisch sinnvolles Kalkül mit Größen und Einheiten möglich sein, insbesondere das Umformen von Gleichungen nach der gesuchten Größe.
- D: Die in der Schule einzuführenden Größen sollen möglichst auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauch verwendet werden oder aber anschlussfähig sein.

3.2 Vorgaben der IUPAC

Um die letztgenannte didaktische Leitlinie umsetzen zu können, sind die Vorgaben der *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) zu beachten. Bei genauerem Hinsehen ergeben sich dort aber auch Ungereimtheiten.

In Abbildung 1 wird als Einheit der Standardreaktionsenthalpie $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ genannt. Die Anmerkungen enthalten Informationen zum Standardzustand, zum Index r, der für „chemische Reaktion“ steht, die genau anzugeben ist, sowie den Hinweis, dass anstelle der Einheit J üblicherweise kJ verwendet werden. In Fußnote (14) weist die IUPAC auf die Umsatzvariable ξ hin.

Abbildung 2 zeigt, was die IUPAC an anderer Stelle zu der Einheit Mol aussagt.

Nach dieser Definition bezieht sich die Einheit Mol auf die Größe Stoffmenge mit dem Symbol n , die auf die genannten Teilchen oder Teilchenaggregate anzuwenden ist. Der Vorschlag von JUNGERMANN (1989), die Größe Stoffmenge auf Vorgangsmengen, z.B. „Elementarumsetzungen“ (Reaktionsgleichungen entsprechend) auszuweiten, findet sich in den IUPAC-Vorgaben nicht.

Wie in Abbildung 1 angedeutet steht die Einheit Mol bei IUPAC auch noch an anderer Stelle, bei der „Umsatzvariablen“ ξ (Abb. 3a).

mole Online use... < >

<https://doi.org/10.1351/goldbook.M03980> Copy

The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol n , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

Note:
The formulation of this definition was agreed upon by the 26th CGPM in November 2018 with effect from 20 May 2019.

Citation: 'mole' in *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*, 3rd ed. International Union of Pure and Applied Chemistry; 2006. Online version 3.0.1, 2019. <https://doi.org/10.1351/goldbook.M03980> RIS BibTex EndNote

BIPM Div. 1 PDF Text JSON History Unit Last revised: March 30, 2020

Abb. 2. Definition der Einheit Mol nach IUPAC (2019, Suchbegriff mole)

Name	Symbol	Definition	SI unit	Notes
stoichiometric number	ν		1	19
extent of reaction, advancement	ξ	$\xi = (n_B - n_{B,0})/\nu_B$	mol	19

(19) The stoichiometric number is defined through the stoichiometric equation. It is negative for reactants and positive for products. The values of the stoichiometric numbers depend on how the reaction equation is written (see Section 2.10.1 (iv), p. 52). $n_{B,0}$ denotes the value of n_B at "zero time", when $\xi = 0$ mol.

Abb. 3a. Umsatzvariable (extent of reaction) aus IUPAC (2007, 48, 49)

The symbol Δ denotes a change in an extensive thermodynamic quantity for a process. The addition of a subscript to the Δ denotes a change in the property.

Examples $\Delta_{\text{vap}}H = \Delta_{\text{l}}^{\text{g}}H = H(\text{g}) - H(\text{l})$ for the molar enthalpy of vaporization.
 $\Delta_{\text{vap}}H = 40.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ for water at $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ under its own vapor pressure.
 This can also be written ΔH_{vap} , but this usage is not recommended.

The subscript r is used to denote changes associated with a *chemical reaction*. Symbols such as $\Delta_r H$ are defined by the equation

$$\Delta_r H = \sum_B \nu_B H_B = (\partial H / \partial \xi)_{T,p}$$

It is thus essential to specify the stoichiometric reaction equation when giving numerical values for such quantities in order to define the extent of reaction ξ and the value of the stoichiometric numbers ν_B .

Example $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) = 2 \text{NH}_3(\text{g})$, $\Delta_r H^{\circ}(298.15 \text{ K}) = -92.4 \text{ kJ mol}^{-1}$
 $\Delta_r S^{\circ}(298.15 \text{ K}) = -199 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

The mol^{-1} in the units identifies the quantities in this example as the change per extent of reaction. They may be called the molar enthalpy and entropy of reaction, and a subscript m may be added to the symbol to emphasize the difference from the integral quantities if desired.

Abb. 3b. Reaktionsenthalpie bezogen auf Reaktionsgleichungen aus IUPAC (2007, 60)

Die Umsatzvariable ist eine differentielle Größe (Abb. 3a und b), die angibt, in welchem Umfang die betrachtete Reaktion abgelaufen ist. Die Größe „Formelumsatz“, die in einigen Schulbüchern verwendet wird, ist eine damit verwandte Größe, die aber nur den vollständigen Umsatz nach der Reaktionsgleichung beschreibt. Sie entspricht der „Menge an Elementarumsetzungen“, ebenfalls in der Einheit Mol.

Einen für den Schulunterricht interessanten Hinweis zur eindeutigen Symbolik findet man ebenfalls bei der IUPAC (Abb. 3b). Das Symbol Δ ohne Index beschreibt danach eine extensive Größe eines Vorgangs, die also in kJ anzugeben wäre. Durch den Index r wird der Vorgang jedoch auf die Reaktionsgleichung bezogen, die somit zusammen mit $\Delta_r H$ anzugeben ist. Die Bezugsgröße, durch die dividiert wird, ist die Umsatzvariable ξ . Weiterhin gibt IUPAC an, man könne die Größe $\Delta_r H$ auch „molare Reaktionsenthalpie“ nennen und ihr Symbol mit dem Index m versehen, um den Unterschied zu verdeutlichen. Allerdings stimmt diese Angabe nicht genau damit überein, was bei IUPAC unter „molar“ zu finden ist (Abb. 4).

Im Gegensatz zur Angabe in Abb. 3b wird hier „molar“ nur verwendet, wenn eine extensive Größe durch Division mit einer Stoffmenge intensiv wird, nicht bei Division durch eine Umsatzvariable. Der Hinweis, der Index m und die Bezeichnung „molar“ könnten entfallen, falls keine Zweideutigkeit besteht, ist für den wissenschaftlichen Gebrauch sicher angebracht, für die Schule aber eher nicht.

Sucht man nach den in den Schulbüchern zitierten Vorgehensweisen bei der Definition der Reaktionsenthalpie, tritt ein Unterschied zu Tage. Während die IUPAC nur die „Umsatzvariable“ nicht aber den „Formelumsatz“ betrachtet, ist die Sichtweise, die Reaktionsgleichung als Umsatz „in Mol“ zu interpretieren, IUPAC-konform, wie Abbildung 5 zeigt.

Mit diesen didaktischen und fachlichen Vorgaben wird im später erscheinenden Teil 2 dieses Artikels ein Vorschlag für den Schulunterricht zum Umgang mit den energetischen Größen und Einheiten entwickelt und zur Diskussion gestellt.

The adjective *molar* before the name of an extensive quantity generally means *divided by amount of substance*. The subscript *m* on the symbol for the extensive quantity denotes the corresponding molar quantity.

Examples volume, V molar volume, $V_m = V/n$ (Section 2.10, p. 47)
 enthalpy, H molar enthalpy, $H_m = H/n$

If the name *enplethy* (see Section 1.2, p. 4) is accepted for “amount of substance” one can use *enplethic volume* instead of molar volume, for instance. The word “molar” violates the principle that the name of the quantity should not be mixed with the name of the unit (mole in this case). The use of *enplethic* resolves this problem. It is sometimes convenient to divide all extensive quantities by amount of substance, so that all quantities become intensive; the subscript *m* may then be omitted if this convention is stated and there is no risk of ambiguity.

Abb. 4. Bedeutung von „molar“ als Bestandteil einer Größenbezeichnung laut IUPAC (2007, 6)

The screenshot shows the IUPAC Gold Book entry for 'stoichiometry'. The title is 'stoichiometry' in a bold font. Below the title is the URL 'https://doi.org/10.1351/goldbook.S06026' and a 'Copy' button. The main text defines stoichiometry as the relationship between the amounts of substances that react together in a particular chemical reaction, and the amounts of products that are formed. It then states the general stoichiometric equation: $aA + bB + \dots \rightarrow \dots + yY + zZ$. Below the equation, it explains that this provides information that a moles of A reacts with b moles of B to produce y moles of Y and z moles of Z. At the bottom, there is a citation: 'Citation: 'stoichiometry' in IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 3rd ed. International Union of Pure and Applied Chemistry; 2006. Online version 3.0.1, 2019. https://doi.org/10.1351/goldbook.S06026'. There are also buttons for 'RIS', 'BibTex', and 'EndNote'. At the very bottom, there are buttons for 'Div. I', 'PDF', 'Text', 'JSON', and 'History', and the text 'Last revised: February 24, 2014'.

Abb. 5. Reaktionsgleichung „in mol“, IUPAC (2019, Suchwort *stoichiometry*)

Literatur

ARNOLD, K. et al. (2010). *Chemie Oberstufe Gesamtband Allg. Chemie, PC, OC*. 1. Auflage, 3. Druck, Cornelsen.

BEE, U., BLAUTH, O., GIETZ, P., MAIER, H., WIESE, K. (2022). *Elemente Chemie Baden-Württemberg, Kursstufe*, Klett.

BOHRMANN-LINDE, C. u. SIEHR, I. (Hg.) (2021). *Chemie Baden-Württemberg – Sek II, Gesamtband 11-12*, Buchner.

FLEISCHER, H. (Hg.) (2023). *Fokus Chemie Kursstufe, Baden-Württemberg*. 1. Auflage, Cornelsen.

FRIEDLI, W. (1977). *Chemie Repetitorium Allgemeine und anorganische Chemie Teil 2: Stöchiometrie - Reaktionstypen*, Studienbuch Chemie. Diesterweg-Salle.

GuteFrage (2024). Internetforum. *Was genau ist die Stoffmenge der Formelumsätze?* <https://www.gutefrage.net/frage/was-genau-ist-die-stoffmenge-der-formelumsaetze>. (letzter Aufruf: 30.09.2024)

Institut für die Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (IQB). (2024). *Gemeinsame Abituraufgabenpools der Länder, Beispielaufgaben*, Aufgabe für das Fach Chemie, Beispielaufgaben Chemie, Taschenofen (erhöhtes Anforderungsniveau). <https://www.iqb.hu-berlin.de/abitur/sammlung/naturwissenschaften/chemie>. (letzter Aufruf: 27. 09. 2024)

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). (2007). *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, third edition. RSC publishing, Royal Society of Chemistry, London. <https://iupac.org/what-we-do/books/greenbook/> (letzter Aufruf: 06.05.2024)

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). (2019). *the new interactive version of IUPAC Compendium of Chemical Terminology*, informally known as the "Gold Book". Version 3.0.1. <https://goldbook.iupac.org/> (letzter Aufruf: 06.05.2024)

JUNGERMANN, A. (1989). Die Addition intensiver Größen, insbesondere im Fall intensiver Enthalpiegrößen. *MNU* 42/3, 152-157.

KEMPER, A., FLADT, R. (1976). *Chemie*. 1. Aufl., Klett.

Kultusministerkonferenz (KMK) (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18. 6. 2020. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf. (letzter Aufruf: 06.05.2024)

MEESE, W. (1986). Sichere Aneignung von Begriffen in Klasse 12 durch Arbeit mit Größengleichungen. *Chemie in der Schule* 33, 227-236.

VAN NEK, R., SCHULTE-COERNE, R., SIEVE, B. (Hg.) (2018). *Chemie heute SII – Gesamtband*. Bildungshaus Schulbuchverlage, Schroedel.

WENZL, E. (1993). Zur Definition und Handhabung intensiver Stoff- und Reaktionsgrößen. *MNU-Journal*, 46/1, 44-49.

MATTHIAS KREMER, kremer@pse3.de (Fürstensteinweg 24, 78532 Tuttlingen) war bis 2017 Mathematik- und Chemielehrer am Otto-Hahn-Gymnasium Tuttlingen sowie Ausbilder von Chemielehrkräften am Seminar (Gymnasien) Rottweil und an den Universitäten Konstanz und Tübingen.

StD CARSTEN TITTEL, carsten.tittel@seminar-tuebingen.de ist Fachleiter Chemie am Seminar für Ausbildung und Fortbildung der Lehrkräfte (Gym.) Tübingen (Mathildenstraße 32 72072 Tübingen), unterrichtet Chemie am HAP-Grieshaber-Gymnasium Reutlingen und nimmt regelmäßig Lehraufträge in Chemiedidaktik an der Eberhard Karls Universität Tübingen wahr.

FELIX ZEIDLER, felix.zeidler@sachsen-anhalt.de ist Referent im Fachbereich Schul- und Unterrichtsentwicklung am Landesinstitut für Schulqualität und Lehrerbildung Sachsen-Anhalt (LISA), Riebeckplatz 9, 06110 Halle. ■

Mitglieder des Bundesvorstandsrats

Nach dem Start im letzten Heft des MNU-Journals stellt sich auch in diesem Heft ein Mitglied des Bundesvorstandsrates vor und informiert über sein Amt. RAINER KUNZE ist im MNU-Vorstandsrat einer der Vertreter der MNU-Landesverbände, außerdem ist er Sprecher der MNU-Landesverbandsvorsitzenden.

„Mit Beginn des Mathematik- und Physiklehramtsstudiums für das Gymnasium an der Universität Hamburg zog es mich 2005 in die wunderschöne Freie und Hansestadt Hamburg. Dort lebe und wirke ich seitdem als Lehrer am Charlotte-Paulsen-Gymnasium und bilde seit 2022 als Fach(seminar)leiter Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst in Physik aus.



Mein Weg zu MNU begann während des Referendariats 2011 an zwei benachbarten Stadtteilschulen in Hamburg, wo mich mein damaliger Fachmentor NORBERT FINCK auf den MNU aufmerksam machte. Durch ihn brachte ich mich in die Vorbereitung und Durchführung des Physikprogramms des MNU-Bundeskon-

gresses in Hamburg 2013 ein und war erstaunt, wie aktiv und leidenschaftlich sich der Ortsausschuss damals einsetzte. Mein Vorgänger als Landesvorsitzender, MICHAEL EDLER, suchte nach dem Kongress einen Nachfolger. Der Bundeskongress und der jährliche Austausch der Landesvorsitzenden, zu dem ich 2013 eingeladen wurde, inspirierten mich so sehr, dass ich diese Aufgabe übernahm, wohl wissend, dass MICHAEL EDLER mir in den Folgejahren als Geschäftsführer aktiv zur Seite stehen würde.

Bis heute bin ich Landesvorsitzender in Hamburg, organisiere mit meinem großartigen Vorstandsteam jährlich Tagungen und Workshops und stehe im Austausch mit Akteuren in der Schulbehörde, in der Fort- und Ausbildung sowie mit vielen Initiativen. Das Tolle an der Arbeit bei MNU vor Ort ist es, sinnstiftend die