

Kapitel 5:

Reaktion und Energie

Ständig laufen in und um uns Stoffumwandlungen (=chemische Reaktionen) ab. Dank diesen ist es uns möglich Nahrungsmittel zu verwerten oder aus Rohstoffen gewünschte Güter herzustellen. Es ist daher eine zentrale Frage, wann, warum und wie überhaupt chemische Reaktionen eintreten.

Zur Beschreibung von Reaktionen verwenden die Chemiker Gleichungen. Sie beinhalten einerseits Stoffformeln oder Stoffteilchenformeln und andererseits die Mengenverhältnisse der Stoffe oder Stoffteilchen bei der Reaktion. Im folgenden Kapitel wird dieser Formalismus anhand von bekannten und auffälligen Reaktionen, den Verbrennungen, erläutert.

Im Zusammenhang mit Verbrennungsreaktionen drängt sich auch die Frage nach dem Energieumsatz bei Reaktionen auf. Fast alle Reaktionen sind von einer Energieabgabe oder -aufnahme begleitet, nur ist sie selten so offensichtlich wie bei den Verbrennungen. Auf welche Art und Weise diese chemische Energie in Stoffen gebunden ist, wird ebenfalls in diesem Kapitel behandelt.

Für das bessere Verständnis der nächsten Lernschritte sind die folgenden Angaben hilfreich:

Verbrennungen sind Reaktionen, bei denen Licht und Wärme frei wird. Die im Alltag erfolgenden Verbrennungen sind immer Reaktionen eines kohlenstoffreichen Brennstoffs (Holz, Brennspiritus, Benzin usw.) mit dem Sauerstoff der Luft. Die Luft besteht zwar größtenteils aus Stickstoff N_2 (78%), an Verbrennungsreaktionen nehmen aber nur die Sauerstoffmoleküle O_2 (21%) teil. Als neue Stoffe entstehen in der Regel Wasser (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO) oder Ruß (C). Bei vollständiger Verbrennung (z.B. im Labor mit reinem Sauerstoff) entsteht ausnahmslos CO_2 als kohlenstoffhaltiges Produkt. In der Praxis erfolgt eine Verbrennung wegen ungenügender Durchmischung der Brennstoffe mit Luft aber nur unvollständig, so dass auch Kohlenstoffverbindungen mit weniger als zwei Sauerstoffatomen pro C-Atom auftreten oder dass sogar Ruß (fast reiner Kohlenstoff) entsteht.



⇒ Energie in Nahrungsmitteln,
Bindungsenthalpien,
Bildungsenthalpien, Entropie,
Bunsenbrenner

Reaktionsgleichungen

Kapitel 5: Reaktion und Energie

Bei vollständigen Verbrennungen entstehen aus den C- und H-Atomen der Brennstoffe Kohlendioxidgas $\text{CO}_2(\text{g})$ und Wasserdampf $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$. Wir betrachten nun die vollständige Verbrennung des Erdgases Methan $\text{CH}_4(\text{g})$.

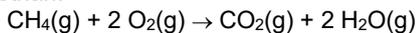
Reaktionspartner des Brennstoffs $\text{CH}_4(\text{g})$ ist der Luftsauerstoff $\text{O}_2(\text{g})$. Diese beiden Gase sind die Ausgangsstoffe (auch Edukte oder Reaktanden genannt) unserer Verbrennungsreaktion. Die entstehenden Stoffe $\text{CO}_2(\text{g})$ und $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ werden Reaktionsprodukte (Endstoffe) genannt.

Bei Reaktionsgleichungen stellt man Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte einander gegenüber, die Ausgangsstoffe links und die Reaktionsprodukte rechts vom Reaktionspfeil (\rightarrow), der die Bedeutung hat „wird überführt in“ oder „reagiert zu“. Die vollständige Verbrennung von Methan könnte also wie folgt beschrieben werden:

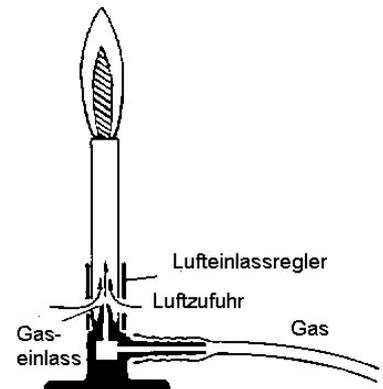


Dies wäre einfach eine Abkürzung für die Aussage, dass aus den Ausgangsstoffen Methangas und Sauerstoffgas die Reaktionsprodukte Kohlendioxidgas und Wasserdampf entstehen.

In der Chemie ist es aber üblich, solche Aussagen als Reaktionsgleichungen zu formulieren, entsprechend algebraischen Gleichungen. Bei Reaktionsgleichungen müssen links- und rechts vom Reaktionspfeil gleich viele Elementarteilchen stehen; bei Reaktionen von Molekülen (ungeladene Stoffteilchen) genügt es, die Art und Anzahl der Atome in Übereinstimmung zu bringen. Da aus einem Molekül CH_4 gerade 1 CO_2 -Molekül (haben je ein C-Atom) und zwei Wassermoleküle (haben insgesamt vier H-Atome) entstehen, werden dazu 4 O-Atome oder 2 Moleküle O_2 benötigt. Somit lautet die Reaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung von Methan:



Koeffizienten 1 (vor $\text{CH}_4(\text{g})$ und $\text{CO}_2(\text{g})$) werden nicht geschrieben.



Der Bunsenbrenner wird im Labor zum Heizen verwendet. Er wird meist mit Erdgas betrieben, einem Gasgemisch, das zum überwiegenden Teil aus Methan besteht.

L 31

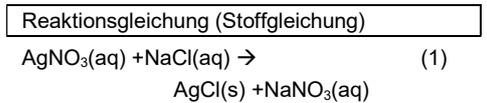
Fragen zu L 31

1. Geben Sie die Reaktionsgleichung an für $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ (vollständige Verbrennung).
2. Formulieren Sie die vollständige Verbrennung von Oktandampf $\text{C}_8\text{H}_{18}(\text{g})$.
3. Wie lautet die Reaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung von $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$?

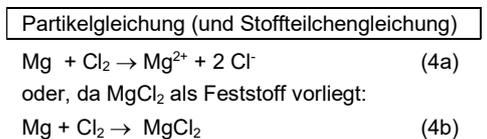
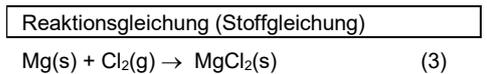
Reaktionsgleichungen und Partikelgleichungen

Kapitel 5: Reaktion und Energie

Die Gleichung $\text{CH}_4(\text{g}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ ist eigentlich eine Gleichung, welche Formeln von Stoffteilchen enthält, die die betreffenden Stoffe bilden. Wir entnehmen ihr aber zugleich die Information, dass Methangas mit Sauerstoffgas zu Kohlendioxidgas und Wasser reagiert. Wir erhalten also zugleich Informationen auf Stoffebene wie auch auf Stoffteilchenebene. Bereits in *Kapitel 2, L Stoffteilchen* wurde darauf hingewiesen, dass Unterschiede zwischen der Formulierung auf Teilchenebene und Stoffebene auftreten können wenn Ionenverbindungen beteiligt sind. Ionen sind geladene Stoffteilchen, Stoffe sind immer ungeladen. Man kann chemische Gleichungen mit Stoffteilchenformeln oder mit Stoffformeln formulieren. Die Aussagekraft ist nicht immer dieselbe, wie folgende zwei Beispiele zeigen:



1. Die Gleichung (1) beschreibt das Entstehen eines unlöslichen Feststoffes $\text{AgCl}(\text{s})$ beim Zusammengeben der beiden Lösungen $\text{AgNO}_3(\text{aq}) + \text{NaCl}(\text{aq})$. Formuliert man die Reaktionsgleichung als Stoffteilchengleichung, ergibt dies die Gleichung (2a): Die Ionen haben keine Veränderung erfahren, es hat nur ein Ionentausch in den Salzen stattgefunden, was in dieser Formulierung nicht ersichtlich ist. Verursacht wird dieser durch die offenbar stärkere ionische Anziehung in AgCl . Aufschlussreicher ist die alternative Formulierung (2b), in der für feste Salze die Formeleinheit für das Stoffteilchen steht.



2. Die Verbrennung von Magnesiummetall in Chlorgas zu Magnesiumchlorid wird wie in Gleichung (3) formuliert. Erst in der mit Ionenformeln geschriebenen Gleichung (4a) werden die Veränderungen an Mg und Cl_2 sichtbar, im Gegensatz zur Formulierung mit der Formeleinheit (MgCl_2) als Stoffteilchen des Feststoffes (4b).



Wir merken uns Folgendes:

- Man kann chemische Reaktionen entweder auf Stoffebene (Reaktionsgleichung) oder auf Teilchenebene (Partikelgleichung) formulieren, je nachdem welche Aussage erfolgen soll.
- Reaktionsgleichung und Partikelgleichung unterscheiden sich wenn Ionenverbindungen beteiligt sind und die Ionen in Ionenformeln geschrieben werden.
- Partikelgleichungen sind häufig Stoffteilchengleichungen, das Wort Partikel schließt aber auch andere Teilchen mit ein. Die Formulierung der Elektronenabgabe bei der Bildung des Magnesium-Ions z.B. ist nur als Partikelgleichung formulierbar. Mehr dazu in Kap. 8

L 32

Fragen zu L 32

1. Welche Formeln haben die Stoffteilchen in den folgenden Stoffen? Ionen mit Ionenformeln beschreiben.
 Na_3PO_4 , CO_2 , NH_4Cl , HCl , NaHSO_4 , BaSO_4
2. Wie lauten Partikelgleichung und Reaktionsgleichung für die Verbrennung von elementarem Wasserstoff mit elementarem Sauerstoff zu Wasser?
3. Gießt man gelöstes Bariumchlorid $\text{BaCl}_2(\text{aq})$ zu gelöstem Natriumsulfat $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ entsteht ein weißer, unlöslicher Feststoff (BaSO_4) und gelöstes Kochsalz. Wie lauten Partikelgleichung, Reaktionsgleichung für diesen Vorgang?

Die Stoffmengeneinheit Mol

Kapitel 5: Reaktion und Energie

Stoffteilchen sind viel zu klein um mit unseren Sinnen wahrgenommen zu werden. Stoffe, die wir handhaben können - auch wenn es sich um sehr kleine Mengen handelt - bestehen immer aus einer unvorstellbar großen Menge der jeweiligen Stoffteilchen. Daher war es notwendig, für abwägbare Stoffportionen eine sehr große Stückzahl für die Stoff(teilchen)menge einzuführen, das sog. Mol:

$$1 \text{ mol} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}$$

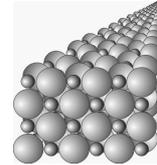
Diese sehr große Stückzahl (gewissermaßen das Chemikerdutzend) wurde deswegen eingeführt, weil folgende (sehr praktische!) Beziehung gilt: Der Zahlenwert der in [u] (Atommasseneinheit) gemessenen Masse eines einzelnen Teilchens ist gleichgroß wie der Zahlenwert der in [g] (Gramm) gemessenen Masse von 1 mol der betreffenden Teilchen. Folgende Beispiele sollen diesen Sachverhalt illustrieren:

1. Die Masse von Eisenatomen beträgt rund 56 u. Die Masse von 1 mol solcher Atome ($6,022 \cdot 10^{23}$ Stück Fe-Atome) beträgt 56 g (abwägbare Stoffportion elementaren Eisens). Hier steht der Zahlenwert 56 sowohl für die Masse des Teilchens Fe in [u] als auch für die Masse von 1 mol solcher Teilchen in [g]. Die „molare Masse“ von Eisen ist 56 g/mol.

2. Wassermoleküle haben die Masse von 18 u (zwei H-Atome zu 1 u und ein O-Atom zu 16 u). Die Masse von 1 mol Wassermolekülen beträgt 18 g. (Masse von $6,022 \cdot 10^{23}$ Molekülen H_2O). Die „molare Masse“ von Wasser beträgt somit 18 g/mol.

Es versteht sich von selbst, dass die Teilchenart immer genau angegeben werden muss. So kann man nicht einfach von 1 mol Sauerstoff sprechen, sondern muss angeben, ob man 1 mol O-Atome oder 1 mol O_2 -Moleküle meint. Bei Salzen bezieht sich der Molbegriff fast immer auf die Formeleinheit, welche die Ionen samt ihrem kleinsten ganzzahligen Verhältnis im Stoff angibt. 1 mol des Stoffes NaCl (Na^+ und Cl^- -Ionen im Verhältnis 1:1) enthält also $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchenpaare Na^+ und Cl^- , obwohl solche Teilchenpaare nicht eine Baueinheit des Kochsalzkristalles sind.

Analogien zum Molbegriff:



Ein mol (Formeleinheiten) NaCl bestehen aus:
- 1 mol Na^+ Ionen
- 1 mol Cl^- Ionen
- 2 mol Ionen insgesamt



Ein Dutzend Ehepaare bestehen aus:
- 1 Dutzend Männer (männliche Menschen)
- 1 Dutzend Frauen (weibliche Menschen)
- 2 Dutzend Menschen insgesamt

L 33

Fragen zu L 33

1. Die Atommasseneinheit [u] ist eine wesentlich kleinere Einheit als die Einheit [g]. In *L Bausteine der Atome* ist angegeben, welche Masse in [g] ein u besitzt. Berechnen Sie mit diesen Angaben, welcher Masse in [u] ein Gramm entspricht.
2. Welche Masse in Gramm hat ein mol Aluminiumoxid (Al_2O_3) und wie viele mol Ionen enthält diese Stoffportion?
3. Wie viele mol Ionen enthält die Stoffportion von 39 g Calciumfluorid CaF_2 ?

Massenverhältnisse bei Reaktionen

Im Lernschritt *Reaktionsgleichungen* wurde erläutert, wie man mit chemischen Gleichungen Stoffumwandlungen beschreibt. In den Reaktionsgleichungen geben die stöchiometrischen Faktoren (die Zahlen vor den Stoffformeln) an, in welchem Teilchenmengenverhältnis die einzelnen Stoffe miteinander reagieren. Über die Teilchenmassen in [u] sind auch die Massenverhältnisse festgelegt. Die Stoffmengeneinheit Mol bietet nun die Möglichkeit, aus den Teilchenmengenverhältnissen Massenverhältnisse in [g] (Gramm) zu berechnen, was insofern von Bedeutung ist, als dass im Labor Massen auf der Waage bestimmt werden können, nicht jedoch Teilchenmengen. Will man z.B. die Frage beantworten, wie viele Gramm Sauerstoff bei der vollständigen Verbrennung einer bestimmten Menge Methan notwendig ist und/oder wie viele Gramm Kohlendioxidgas und Wasserdampf dabei entstehen, so muss man zuerst die Reaktionsgleichung aufstellen und dann die Massen der Ausgangs- und Endstoffe in [u] einsetzen:



Ersetzt man die stöchiometrischen Faktoren durch die Molzahlen (2 mol O₂ anstelle von 2 O₂), so erhält man die Massen der Reaktionsteilnehmer in [g] und damit auch die Massenverhältnisse in [g] der bei der Reaktion umgesetzten Stoffmengen. Reaktionsgleichungen und Massengleichungen können wie algebraische Gleichungen behandelt werden.

Soll z. B. die Frage beantwortet werden, wie viel Sauerstoff für die vollständige Verbrennung von 5 kg Methangas notwendig ist und wie viel Kohlendioxidgas und Wasserdampf dabei entstehen, so muss die Massengleichung zuerst durch 16 dividiert werden. Man erhält die Massenverhältnisse beim Einsatz von 1g Methan. Anschließend wird die gesamte Gleichung mit 5000 (für 5000g = 5 kg) multipliziert.

Daraus ergeben sich die Massenverhältnisse bei dieser Reaktion:



Bei der vollständigen Verbrennung von 5 kg Methan werden also 20 kg Sauerstoff benötigt und es entstehen 13,75 kg Kohlendioxid und 11,25 kg Wasserdampf.

L 34

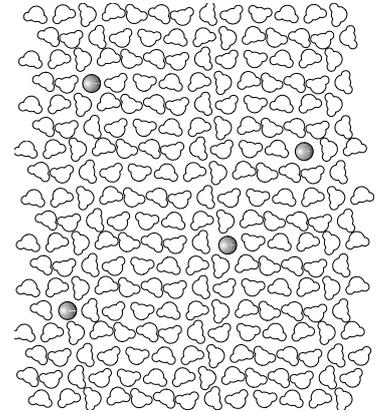
Fragen zu L 34

1. Wie viele Gramm Kohlendioxid entstehen bei der vollständigen Verbrennung von 8 g Brennsprit (gewöhnlicher Alkohol), der die Formel C₂H₅OH hat?
2. Wie viele Gramm Methan wurden vollständig verbrannt, wenn dabei 10 kg Wasser entstand?
3. Wie viel Chlor ist notwendig, um 1 kg Magnesium in Magnesiumchlorid überzuführen?

Chemiker lassen Reaktionen häufig in Lösung ablaufen, weil hier die Beweglichkeit der Teilchen groß ist und sog. reaktionswirksame Zusammenstöße zwischen den Stoffteilchen häufiger sind als bei Feststoffreaktionen. Die Eigenschaft einer Lösung wird in solchen Fällen nicht nur durch den gelösten Stoff, sondern auch durch die Menge des Lösungsmittels mitbestimmt. Mehr Lösungsmittel bedeutet z.B. größere Abstände zwischen den Stoffteilchen und damit verbunden weniger reaktionswirksame Zusammenstöße bei Reaktionen.

Neben der Stoffmengeneinheit mol muss deshalb auch die Menge (aus praktischen Gründen das Volumen) des Lösungsmittels angegeben werden. Der Quotient aus den beiden Größen wird als Stoffmengenkonzentration bezeichnet, die in mol/L (mol durch Liter) angegeben wird. Das Symbol für die Stoffmengenkonzentration (in der Folge nur noch als Konzentration bezeichnet) ist $c(X)$, wobei X das Symbol für die jeweilige Teilchenart oder bei Salzen der Formeleinheit ist. Schreibt man z. B. $c(\text{NaCl}, \text{aq}) = 1 \text{ mol/L}$, so bedeutet dies eine wässrige (aq von aqua, Wasser) Kochsalzlösung, die pro Liter 1 mol (58 g) Kochsalz gelöst enthält. Um einen Liter einer solchen Lösung herzustellen, müssen 58 g NaCl in einen 1-Liter-Meßkolben (geeichtes Gerät, das eine genaue Volumenabmessung ermöglicht) gegeben, Wasser zugefügt, aufgelöst und mit Wasser auf das Endvolumen von 1 L ergänzt werden. Nun beträgt die Konzentration des Kochsalzes, und zwar der Formeleinheiten NaCl, 1 mol/L.

Die Formeleinheiten von Salzen beschreiben nicht wirkliche kleinste Einheiten des Stoffes. Sie geben nur das kleinste ganzzahlige Verhältnis der Ionen an, welche den Stoff bilden. Da die Formeleinheit NaCl aus je einem Ion Na^+ und Cl^- gebildet wird, gilt für die Lösung mit $c(\text{NaCl}, \text{aq}) = 1 \text{ mol/L}$, dass sowohl die Konzentrationen der Na^+ -Ionen, wie auch die der Cl^- -Ionen 1 mol/L beträgt. Demgegenüber gilt für eine Lösung mit $c(\text{CaCl}_2, \text{aq}) = 1 \text{ mol/L}$ - da eine Formeleinheit CaCl_2 aus einem Ca^{2+} -Ion und zwei Cl^- -Ionen besteht - dass die Konzentration der Ca^{2+} -Ionen auch 1 mol/L beträgt, diejenige von den Cl^- -Ionen jedoch das Doppelte, nämlich 2 mol/L. Das Total der gelösten Ionen (nicht der Formeleinheiten) ist folglich $1 \text{ mol/L} + 2 \text{ mol/L} = 3 \text{ mol/L}$



In einer wässrigen Lösung der Konzentration 1 mol/L ist ungefähr jedes 57ste Teilchen ein Teilchen des gelösten Stoffes (Kugeln). Die restlichen Teilchen sind Wassermoleküle.

L 35

Fragen zu L 35

1. Wie viele Gramm Kochsalz müssten abgewogen werden, um damit 1 dL (Deziliter) einer Lösung mit $c(\text{NaCl}, \text{aq}) = 1 \text{ mol/L}$ herzustellen?
2. 11g $\text{CaCl}_2(\text{s})$ werden aufgelöst; Endvolumen 2 dL. Wie groß ist die Konzentration aller gelösten Ionen, d. h. $c(\text{gelöste Ionen})$?
3. 1 mL einer Calciumchlorid-Lösung enthält 1 mg Chlorid. Wie groß ist $c(\text{Ca}^{2+})$?

Stoffmengenangaben bei Gasen (Der Satz von AVOGADRO)

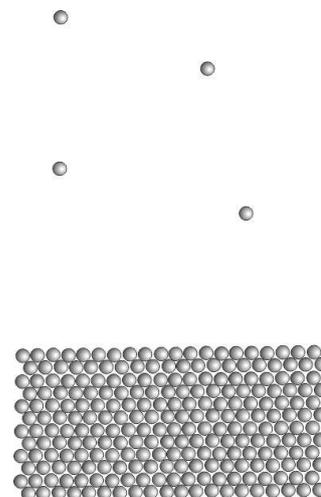
Kapitel 5: Reaktion und Energie

Im Jahre 1811 formulierte AVOGADRO (Professor in Turin, Mitbegründer der modernen Molekulartheorie) den nach ihm benannten Satz, der eine wichtige Eigenschaft der Gase erfasst: „Gleich große Volumina von Gasen (oder Gasgemischen) enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen“ (oder Edelgasatomen).

Bei den sog. Normalbedingungen (Druck: 1,013 bar, Temperatur: 0 °C) nimmt 1 mol Gas ($6,022 \cdot 10^{23}$ Moleküle bzw. Edelgasatome) das Volumen von 22,4 L (Liter) ein. Daher kann durch Messung des Gasvolumens bei Normalbedingungen auf die Stoffmenge (in mol) einer Gasportion geschlossen werden. Stellt man z. B. fest, dass bei einer Reaktion 1,12 L eines Gases von Normalbedingungen entstehen, so kann man errechnen, dass 0,05 mol (1/20 mol) Gasteilchen gebildet wurden.

Gase verhalten sich also (näherungsweise) unabhängig davon, welcher Art die Gasteilchen (Moleküle, Edelgasatome) sind. Das beruht darauf, dass Gasteilchen bei normalen Drücken und Temperaturen nur etwa 1/1000 des Gesamtvolumens ausmachen (99,9 % ist also leerer Raum), d. h. weit auseinander liegen. Die sog. mittlere freie Weglänge, d. h. die Strecke, die ein Gasteilchen von Zusammenstoß (Eigenbewegung!) zu Zusammenstoß mit einem anderen Gasteilchen zurücklegt, beträgt etwa 10 Teilchendurchmesser in jeder Raumdimension ($10 \cdot 10 \cdot 10$ in den drei Raumkoordinaten ergibt den Faktor 1000). Wegen diesen großen mittleren Abständen sind auch die zwischenpartikulären Kräfte (Kräfte zwischen den Stoffteilchen) sehr klein, so dass sie praktisch vernachlässigbar werden. - Anders ist es bei komprimierten Gasen, wo die Teilchen näher beisammen liegen.

Zum Schluss sei noch darauf hingewiesen, dass Gase von Normalbedingungen eine rund tausendmal kleinere Dichte (Masse durch Volumen) haben als kondensierte Phasen (Flüssigkeiten, Feststoffe): So hat trockene Sommerluft die Dichte von rund 1 g/L, Wasser aber 1000 g/L.



Der Abstand zwischen Edelgasatomen im kondensierten Zustand (unten) und im gasförmigen Zustand (oben) in der Ebene, bei einem durchschnittlichen Abstand von 10 Teilchendurchmessern.

L 36

Fragen zu L 36

1. Wie viele L Sauerstoffgas sind nötig, um 3 L Methangas vollständig zu verbrennen, wenn beide Gase denselben Druck und dieselbe Temperatur haben?
2. Wie viel Luft benötigt die vollständige Verbrennung von 1 m³ Propangas C₃H₈(g)? (Hinweis: Luft besteht nur zu rund 21% aus elementarem Sauerstoff.)
3. Welches Volumen haben 5 kg Sauerstoffgas bei Normalbedingungen?

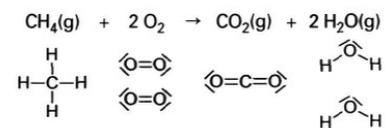
Spaltung und Bildung von Bindungen

Damit eine Bindung (Ionenbindung, Metallbindung, kovalente Bindung oder zwischenmolekulare Bindung) gespalten („auseinander gerissen“) werden kann, muss Arbeit (Kraft • Weg) zur Überwindung der Anziehungskräfte verrichtet werden. Vorgänge, bei denen Energie (gespeicherte Arbeit) aufgenommen wird, nennt man endotherme Vorgänge. Sie heißen so, weil sie die für die Spaltung benötigte Energie in Form von Wärme der Umgebung „stehlen“ können. Umgebungswärme fließt ins Stoffsystem hinein (endo: nach innen, thermos: Wärme), fehlt dann aber natürlich in der Umgebung (z.B. im Lösungsmittel), was sich anhand einer Abkühlung bemerkbar macht. Ein typischer Vorgang, bei dem Bindungen mit Hilfe der Umgebungswärme gespalten werden, ist das Verdunsten von Wasser. Die Kälte, die man in nassen Kleidern spürt, zeugt von der Energieaufnahme zum Spalten der Wasserstoffbrücken (Verdampfungswärme). Gleiches gilt für das Schmelzen von Eis, wo die zugeführte Wärme, z.B. mit einer Flamme, nicht für die Erwärmung des Eises, sondern für den Schmelzprozess verwendet wird (Schmelzwärme).

Bei der Bildung einer Bindung wird Energie freigesetzt. Vorgänge, bei denen Energie abgegeben wird, nennt man exotherme Vorgänge (exo: nach außen). Dabei wird in umgekehrter Analogie zu den endothermen Vorgängen Wärme abgegeben und die Umgebung erwärmt.

Bei jeder chemischen Reaktion werden bestehende Bindungen gespalten und neue Bindungen gebildet. So werden bei der vollständigen Verbrennung von Methan $\text{CH}_4(\text{g})$ die Bindungen C-H der Methanmoleküle und die Bindungen O=O der Sauerstoffmoleküle gespalten (Energieaufnahme) und die (andersartigen!) Bindungen C=O in den Molekülen $\text{CO}_2(\text{g})$ und O-H in den Wassermolekülen $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ neu gebildet (Energieabgabe).

Je nachdem wie viel Energie der endotherme Teilschritt der Bindungsspaltungen benötigt und der exotherme Teilschritt der Bindungsbildungen freisetzt, ist der Gesamtvorgang endo- oder exotherm.



L 37

Fragen zu L 37

1. Sind Verbrennungen exo- oder endotherme Vorgänge?
2. Wasser und auch Kohlendioxid sind wichtige Feuerlöschmittel. Was lässt sich daher über die Stärke der kovalenten Bindungen dieser Moleküle sagen?
3. Sind das Gefrieren von Wasser und das Kondensieren von Wasserdampf exotherme oder endotherme Prozesse?

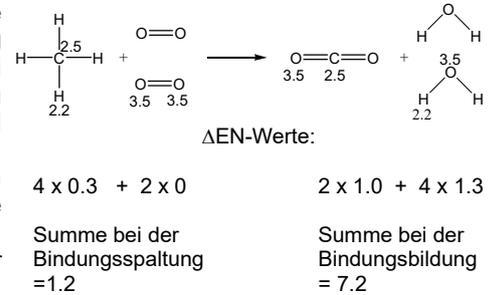
Die Reaktionsenthalpie ΔH

Kapitel 5: Reaktion und Energie

Ob eine Reaktion exotherm oder endotherm ist kann sehr leicht durch Messung der Temperaturveränderung in den reagierenden Stoffen bzw. in deren Umgebung bestimmt werden. Das Ergebnis lässt sich aber auch berechnen. Dazu benötigt man Zahlenwerte für die Bindungsenergien der gespaltenen und gebildeten Bindungen. Die Bindungsenergie oder Bindungsenthalpie H (von engl. heat) ist die Energie, die aufgewendet werden muss, um eine bestehende Bindung zu spalten. Dieser Betrag ist genau gleichgroß wie der Energiebetrag, der bei der Bildung dieser Bindung frei wird. Wenn bei der Bildung einer Bindung sehr viel Energie frei wird, ist die Bindung folglich stabil, sie wird nicht so leicht gespalten. Weil beim Bilden der Bindung viel Energie entwichen ist, wird sie auch als energiearm bezeichnet.

Bindungsenthalpien für viele Bindungen wurden gemessen und in Tabellenwerken aufgeführt. Mit ihnen wird eine Bilanz erstellt, in welcher die Bindungsenthalpien der zu spaltenden Bindungen als "Aufwand" aufgeführt werden, die Bindungsenthalpien aller zu bildenden Bindungen als "Ertrag". Die Differenz der Summen aller Aufwendungen und Erträge wird als Reaktionsenthalpie ΔH bezeichnet.

Eine einfachere Berechnungsgrundlage, welche aber nur die Entscheidung exo- oder endotherm zulässt, bietet die Polaritätsfaustregel. Gemäß dieser Regel ist eine kovalente Bindung umso stärker, je polarer sie ist. Erstellt man nun die oben beschriebene Bilanz mit den ΔEN -Werten der betreffenden Bindungen (ΔEN = Differenz der Elektronegativitätswerte der beiden an einer Bindung beteiligten Atome), so kann man feststellen, ob bei der Reaktion generell polarere (stärkere Bindungen, exotherme Gesamtreaktion) oder unpolarere Bindungen entstehen. Bei der rechts dargestellten Verbrennung von Methan (EN-Werte ausgewählter Atome neben den Atomsymbolen eingetragen) handelt es sich demnach um eine exotherme Gesamtreaktion, weil die Summe der ΔEN -Werte bei den Produkten erheblich größer ist (7.2) als bei den Edukten (1.2). ΔH erhält in solchen Fällen ein negatives Vorzeichen, da Energie aus der Reaktionsmischung entweicht und damit von den reagierenden Stoffen abgezogen wird.



L 38

Fragen zu L 38

1. Welchem Teil der nachstehend aufgeführten kontroversen Aussagen darf man dem Begriff schwache Bindung zuordnen?
 - energiereich / energiearm
 - bei der Bildung wird viel / wenig Energie frei
 - die Spaltung ist endo-/exotherm
2. Ist der Zerfall von Ammoniak $NH_3(g)$ in seine Elementarstoffe $H_2(g)$ und $N_2(g)$ endo- oder exotherm?
3. Falls die Edukte z.B. flüssig sind und die Produkte gasförmig (Verbrennung von Benzin) darf die Polaritätsfaustregel nicht angewendet werden. Was kann die Regel in einem solchen Fall nicht berücksichtigen?

Katalysatoren

Kapitel 5: Reaktion und Energie

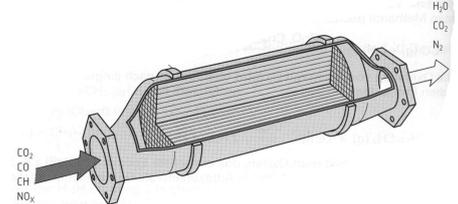
Eine Kerze kann an der Luft jahrelang aufbewahrt werden, ohne dass die mögliche Verbrennungsreaktion eintritt. Damit diese Reaktion in Gang gesetzt wird, muss „aktiviert“ werden. Man muss Aktivierungsenergie zuführen.

Die im Alltag gebräuchliche Art der Reaktionsauslösung ist die Zündung durch Wärmezufuhr. Diese Aktivierungsenergie spaltet die bestehenden Bindungen eines kleinen Teils der Ausgangsstoffe, womit die Neukombination zu den hitzebeständigeren (energieärmeren) Bindungen der Reaktionsprodukte erfolgen kann. Da dabei Energie frei wird (exotherme Reaktion), kann diese für die Aktivierung weiterer Ausgangsstoffe verwendet werden, womit die Reaktion (z. B. eine Verbrennung) abläuft.

Die Auslösung möglicher Reaktionen kann aber auch ohne Zündung (d. h. Energiezufuhr durch Wärme, Strahlungsenergie (z. B. Licht) oder elektrische Energie) erfolgen, indem sog. Katalysatoren eingesetzt werden. Katalysatoren sind Fremdstoffe, die mit einem (oder beiden) Ausgangsstoffen Zwischenverbindungen bilden, in denen die bestehenden Bindungen der Ausgangsstoffe gelockert oder gar gespalten werden, womit die Reaktionsauslösung ohne zusätzliche Wärmezufuhr erfolgt. Katalysatoren werden - obwohl sie an der Reaktion teilhaben - letzten Endes nicht verbraucht. Sie liegen am Ende der Reaktion praktisch unverändert vor und können immer wieder zur Reaktionsauslösung verwendet werden. Katalysatoren sind meist in kleinen Mengen wirksam.

Der Begriff Katalysator dürfte im Alltag von den Kraftfahrzeug-Katalysatoren her bekannt sein, die dafür sorgen, dass Schadstoffe der Abgase in unschädliche Stoffe überführt werden können. Es handelt sich um einen porösen Körper von großer, mit Edelmetall beschichteter Oberfläche. Fremdmetalle vergiften den Katalysator und beeinträchtigen seine Funktionsweise. Aber viel wichtiger sind die sog. Enzyme, die Katalysatoren, die in lebenden Organismen die staunenswerte Vielfalt der Stoffwechselforgänge bei normalen Temperaturen ermöglichen. Es handelt sich um riesige Moleküle mit großer Spezifität, welche nach dem Schlüssel-Lock-Prinzip arbeiten. Sie sind häufig empfindlich gegenüber Hitze, Säuren, Laugen und Lösungsmittel.

Der Katalysator in Kraftfahrzeugen wandelt Stickoxide NO in N_2 und O_2 um, CO in CO_2 , C-H-Verbindungen in CO_2 und H_2O .



L 39

Fragen zu L 39

1. Warum reagiert ein Gemisch von $H_2(g)$ und $O_2(g)$ (Knallgas) nicht von selbst? Was entsteht nach erfolgter Zündung? Stellen Sie die Reaktionsgleichung auf.
2. Oft wird unter einem Katalysator eine Art Filter verstanden. Was ist an dieser Vorstellung falsch?
3. Warum dürfen mit einem Katalysator ausgerüstete Fahrzeuge nur mit bleifreiem Benzin betankt werden?

Freiwillig verlaufende Reaktionen

Kapitel 5: Reaktion und Energie

Reaktionen, die „von selbst“, oft allerdings erst nach erfolgter Aktivierung durch Zündung oder Katalysatoren, ablaufen, nennt man freiwillig oder spontan verlaufende Reaktionen. Typische freiwillig verlaufende Reaktionen sind z.B. Verbrennungen.

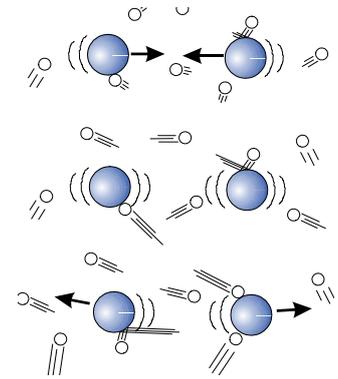
Nicht freiwillig verlaufende Reaktionen sind im Alltag schwieriger auszumachen. Dazu gehört z.B. das Schmelzen von Eis bei Außentemperaturen unter 0°C . Ohne ständige Energiezufuhr kommt der Prozess zum Erliegen.

Die letztgenannte Reaktion ist eine endotherme Reaktion, hingegen sind die Verbrennungsreaktionen exotherm. Man könnte nun meinen, nur exotherme Reaktionen laufen freiwillig ab. Dass dies nicht so ist, zeigt ein weiteres Beispiel, das zwar gerade keine richtige Reaktion (Stoffumwandlung) ist, das sich aber für die Betrachtung des Problems seiner Einfachheit wegen bestens eignet.

Man stelle sich eine Gasflasche mit einem komprimierten Gas darin vor. Zwischen den Gasteilchen wirken van der Waals'sche Kräfte und sorgen für einen geringen Zusammenhalt. Wird das Ventil geöffnet, strömen die Teilchen aus und entfernen sich voneinander. Bestehende Bindungen zwischen den Teilchen werden gespalten, ein endothermer Vorgang, der dafür verantwortlich ist, dass sich das Gas stark abkühlt. Je wärmer es ist, desto größer ist der Gasdruck und desto stärker strömt das Gas durch die Öffnung. Kühlt man immer weiter ab, wird die Teilchenbewegung schwächer. Bei sehr tiefen Temperaturen wird ein Punkt erreicht, wo das Gas nicht mehr ausströmt. Unterhalb dieser Temperatur vermögen die zusammenhaltenden Kräfte die Teilchen am Ausströmen zu hindern und sogar weitere anzuziehen. Wie bei allen "richtigen" Reaktionen auch, entscheidet hier letztendlich die Temperatur in welche Richtung der Vorgang abläuft.

Die Reaktionsrichtung wird folglich von zwei Tendenzen bestimmt: Teilchen, die sich anziehen, haben die Tendenz der Anziehungskraft zu folgen und stärkere Bindungen zu bilden. Die Wärmebewegung hat die Tendenz die Teilchen auseinander zu treiben. Diese Tendenz nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei Raumtemperatur ist der Einfluss der Umgebungswärme oft klein, so dass die Tendenz der Bindungsbildung überwiegt und exotherme Reaktionen freiwillig ablaufen. Bei hohen Temperaturen dagegen werden Teilchen gezwungen auseinander zu driften, so dass diese Tendenz in großem Maße die Reaktionsrichtung mitbestimmt.

Der Einfluss der Umgebungswärme auf eine Reaktion kann auch quantifiziert werden. Weiterführende Bücher geben dazu unter dem Begriff "Entropie" Auskunft.



Der Einfluss der Wärmebewegung der Umgebung auf ein sich anziehendes Teilchenpaar:

Oben: Tiefe Temperatur, einwirkende Kräfte kleiner als Anziehungskräfte.

Mitte: Mittlere Temperatur, Kräftegleichgewicht.

Unten: Hohe Temperatur: Einwirkende Kräfte größer als Anziehungskräfte, Teilchen driften auseinander.

L 40

Fragen zu L 40

1. Was passiert in einer Gasflasche, wenn das Gas auf annähernd 0 K abgekühlt wird?
2. Eis, welches bis genau 0°C (und nicht weiter) erwärmt wird, taut nicht auf. Wasser, das genau auf 0°C abgekühlt wird, gefriert nicht. Vergleichen Sie die beiden reaktionsrichtungsbestimmenden Tendenzen bei 0°C .
3. Ein Stück Kohle ($\text{C}(\text{s})$) wird verbrannt, es entsteht das Gas $\text{CO}_2(\text{g})$. Welchen Einfluss üben die beiden reaktionsrichtungsbestimmenden Tendenzen auf diese Reaktion aus?

Erfolgskontrolle zu Kapitel 5

1. Glykol hat die Gruppenformel $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$. Stellen Sie die Reaktionsgleichung auf für die vollständige Verbrennung von Glykoldampf.
2. Welches sind zwei wichtige Reaktionsprodukte, die bei der unvollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe anfallen?
3. Worauf beruht das gelbe Leuchten von Flammen, welches häufig bei unvollständiger Verbrennung auftritt?
4. Holz ist ein fester Brennstoff. Er kann erst bei größerer Hitze entzündet werden, wie jedermann weiß, der versucht hat ohne Zeitungen oder anderen Brennhilfen ein Feuer zu entfachen. Brennendes Holz bildet Flammen, d. h. Reaktionsräume von Gasen. Erklären Sie, wie es zu dieser Erscheinung kommt.
5. Lebewesen gewinnen ihre Betriebsenergie durch die Reaktion von Glucose (Traubenzucker) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ mit Luftsauerstoff, wobei Kohlendioxidgas und Wasser entstehen. Stellen Sie die Reaktionsgleichung dieses Vorgangs (sog. Atmung) auf.
6. Welche Bindungen sind bei einem exothermen Vorgang stärker (hitzebeständiger), die der Ausgangsstoffe oder die der Reaktionsprodukte?
7. Warum schmelzen Schnee und Eis bei warmem Wetter nicht schlagartig, sondern relativ langsam?
8. Warum erwärmt sich ein wasserhaltiges Gebiet bei Sonneneinstrahlung viel weniger stark als ein Wüstengebiet, in dem Wasser fehlt?
9. Erklären Sie, weswegen sich ein Gebiet mit Luftfeuchtigkeit ($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ in der Luft) in der Nacht weniger stark abkühlt als eines mit trockener Luft.
10. Welche Wirkung haben Katalysatoren? Nehmen diese Stoffe an der Reaktion teil oder nicht? Werden sie bei der Reaktion verbraucht oder nicht?
11. Welche beiden „Tendenzen“ bestimmen den freiwilligen Verlauf von Reaktionen?

Antworten Erfolgskontrolle Kapitel 5

1. Die Gruppenformel HOCH₂CH₂OH gibt an, in welcher Weise die Atome im Molekül miteinander verknüpft sind; sie kann ersetzt werden durch die Summenformel C₂H₆O₂. Reaktionsgleichung: $2 \text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2(\text{g}) + 5 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4 \text{CO}_2(\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
2. Das giftige, farb- und geruchlose CO(g) und Ruß, praktisch C(s).
3. Das gelbe Licht wird durch in der Hitze glühende, kleinste Kohlenstoffeinheiten (die nicht mit O₂ reagierten) ausgesendet. Aus ihnen bildet sich der Ruß.
4. Zuerst erfolgt eine Hitzezersetzung der Moleküle des Holzes; es entstehen brennbare Dämpfe, die mit Luft durchmischt die Flamme bilden.
5. Bei diesem Vorgang bedeutet „Atmung“ nicht das Ein- und Ausatmen von Luft, sondern die Reaktion, die die Betriebsenergie vieler Lebewesen liefert:
 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{aq}) + 6 \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6 \text{CO}_2(\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
Dieser Vorgang ist exotherm (energiefreisetzend). Der Umkehrvorgang, der mit Hilfe des Sonnenlichts in Pflanzen erfolgt, ist die energiespeichernde (endotherme) sog. Photosynthese, auf der letzten Endes alles Leben beruht.
6. Die der Reaktionsprodukte. Je stärker exotherm ein Vorgang ist, umso stärker (hitzebeständiger) sind die entstehenden Bindungen.
7. Weil die Energiemenge groß ist, die für die Aggregatzustandsänderung (s) → (l) notwendig ist (sog. Schmelzwärme).
8. Weil ein großer Teil der eingestrahnten Energie für die Verdampfung von Wasser verbraucht wird und demzufolge nicht für die Temperaturerhöhung zur Verfügung steht.
9. Kondensiert die Luftfeuchtigkeit, d. h. spielt sich der Vorgang H₂O(g) → H₂O(l), die Taubildung, ab, so wird die sehr große Kondensationsenergie frei.
10. Katalysatoren bilden Zwischenverbindungen und lockern so bestehende Bindungen. Sie nehmen also an der Reaktion teil, werden aber nicht verbraucht.
11. Bindungskräfte und die Eigenbewegung der Stoffteilchen.