1
Einfache Werkzeuge oder: Was man weiß – was man wissen sollte

In diesem Kapitel werden wir uns mit Grundeinheiten, dem Umrechnen von Einheiten, der Abschätzung von Größen, dem idealen Gasgesetz und der Stöchiometrie chemischer Reaktionen beschäftigen. All dieses wird uns in den folgenden Kapiteln immer wieder begegnen und es ist wichtig, diese grundlegenden Dinge richtig zu beherrschen.

1.1
Umrechnung von Einheiten

Es gibt mehrere wichtige Vorsilben für Maßeinheiten, die Sie kennen sollten:

Präfix	Symbol	Wert	Präfix	Symbol	Multiplier
Yokto	y	10^{-24}	Zenti	c	10^{-2}
Zepto	z	10^{-21}	Dezi	d	10^{-1}
Atto	a	10^{-18}	Kilo	k	10^{3}
Femto	f	10^{-15}	Mega	M	10^{6}
Piko	p	10^{-12}	Giga	G	10^{9}
Nano	n	10^{-9}	Tera	T	10^{12}
Mikro	μ	10^{-6}	Peta	P	10^{15}
Milli	m	10^{-3}	Exa	E	10^{18}

So ist z. B. ein Nanogramm 10^{-9} g und ein Kilometer ist 10^3 m lang. Aber das ist ziemlich trivial.

Obwohl in vielen Ländern inzwischen das SI-Einheitensystem[1)] per Gesetz vorgeschrieben ist, gibt es eine Vielzahl von Einheiten, die aus historischen Gründen noch immer verwendet werden. Zur Umrechnung von Einheiten, die in Großbri-

1) Das Internationale Einheitensystem oder SI (französisch: *Système international d'unités*) ist das am weitesten verbreitete Einheitensystem für physikalische Größen. In der Europäischen Union (EU), der Schweiz und den meisten anderen Staaten ist die Benutzung des SI im amtlichen oder geschäftlichen Verkehr gesetzlich vorgeschrieben.

Umweltchemie, 1. Auflage. Ronald A. Hites, Jonathan D. Raff und Peter Wiesen.

tannien und den USA verwendet werden, sind die folgenden Umrechnungsfaktoren hilfreich:

$$1 \text{ Pfund (lb)} = 454 \text{ Gramm (g)}$$
$$1 \text{ Zoll (in)} = 2{,}54 \text{ Zentimeter (cm)} = 1 \text{ Zoll } ('')$$
$$12 \text{ Zoll} = 1 \text{ Fuß (ft)}$$
$$1 \text{ Meter (m)} = 3{,}28 \text{ ft}$$
$$1 \text{ Meile} = 5280 \text{ ft} = 1610 \text{ m}$$
$$3{,}8 \text{ Liter (L)} = 1 \text{ US-Gallone (gal)}$$

Es gibt einige andere gemeinsame Umrechnungsfaktoren, die Länge, Volumina und Flächen verbinden:

$$1 \text{ Liter (L)} = 10^3 \text{ cm}^3$$
$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$$
$$1 \text{ km}^2 = (10^3 \text{ m})^2 = 10^6 \text{ m}^2 = 10^{10} \text{ cm}^2$$

Eine weitere nützliche Einheitenumrechnung ist

$$1 \text{ Tonne} = 1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg} = 10^6 \text{ g}$$

Eine Einheit, die Chemiker häufig verwenden, um Abstände zwischen den Atomen in einem Molekül anzugeben, ist das Ångström[2)]. Diese Einheit hat das Symbol Å. Ein Ångström sind 10^{-10} m. Zum Beispiel ist die Länge einer C–H-Bindung in einem organischen Molekül typischerweise 1,1 Å oder $1{,}1 \times 10^{-10}$ m. Die OH-Bindung in Wasser ist 0,96 Å lang.

Lassen Sie uns nun die Umrechnung von Einheiten an einigen einfachen Beispielen üben. Schreiben Sie sich die Umrechnung der Einheiten immer auf, auch wenn Sie glauben, alles im Kopf ausrechnen zu können.

Nehmen wir an, dass das menschliche Kopfhaar im Monat 0,5 Zoll wächst. Wie viel wächst das Haar in einer Sekunde? Bitte verwenden Sie SI-Einheiten.

Ansatz: Lassen Sie uns Zoll in Meter und Monate in Sekunden konvertieren. Je nachdem wie klein das Ergebnis ist, können wir dann die richtigen Längeneinheiten wählen:

$$\begin{aligned} v &= \left(\frac{0{,}5 \text{ in}}{\text{Monat}}\right)\left(\frac{2{,}54 \text{ cm}}{\text{in}}\right)\left(\frac{\text{m}}{10^2 \text{ cm}}\right)\left(\frac{\text{Monat}}{31 \text{ Tage}}\right)\left(\frac{\text{Tag}}{24 \text{ h}}\right)\left(\frac{\text{h}}{60 \text{ min}}\right)\left(\frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right) \\ &= 4{,}7 \times 10^{-9} \text{ m/s} \end{aligned}$$

Wir werden in diesem Buch fast immer die wissenschaftliche Schreibweise verwenden. Diese ist viel einfacher, wenn man mit sehr kleinen oder sehr großen Zahlen operiert.

2) Anders Ångström (1814–1874), schwedischer Physiker.

Wir können das Ergebnis dann wie folgt schreiben:

$$\text{Wachstumsgeschwindigkeit} = \left(\frac{4{,}7 \times 10^{-9}\,\text{m}}{\text{s}}\right)\left(\frac{10^9\,\text{nm}}{\text{m}}\right) = 4{,}7\,\text{nm/s}$$

Ein Wort zu signifikanten Nachkommastellen. In der Aufgabe wurde die Wachstumsgeschwindigkeit mit einer Nachkommastelle angegeben. Dann sollte das Ergebnis der Berechnung auch nicht mit mehr als einer Nachkommastelle angegeben werden. Bei der Berechnung selber kann man natürlich mit mehr signifikanten Stellen rechnen, aber zum Schluss muss eine entsprechend sinnvolle Rundung vorgenommen werden.

Die Gesamtmenge an Schwefel, die pro Jahr durch die Verbrennung von Kohle in die Atmosphäre eingetragen wird, beträgt etwa 75 Mio. t. Welches Volumen hätte ein Würfel, wenn man annimmt, dass der Schwefel in fester Form vorliegt. Berechnen Sie dazu die Kantenlänge des Würfels in SI-Einheiten und nehmen Sie an, dass Schwefel die doppelte Dichte von Wasser hat.

Ansatz: Nun ja, das ist jetzt ein bisschen mehr als nur das Umwandeln von Einheiten. Zunächst müssen wir das Gewicht in ein Volumen umrechnen. Dazu benötigen wir die Dichte von Schwefel. Die Dichte hat die Einheit Masse pro Volumeneinheit. In unserem Beispiel soll die Dichte des Schwefels doppelt so groß sein wie die des Wassers, die ja $1\,\text{g/cm}^3$ beträgt. Die Dichte des Schwefels können wir daher mit $2\,\text{g/cm}^3$ ansetzen. Wenn wir das Volumen des Schwefels kennen, können wir die Kubikwurzel des Volumens ziehen und erhalten die Seitenlänge des Würfels:

$$V = (7{,}5 \times 10^7\,\text{t})\left(\frac{\text{cm}^3}{2\,\text{g}}\right)\left(\frac{10^6\,\text{g}}{\text{t}}\right) = 3{,}75 \times 10^{13}\,\text{cm}^3$$

$$\text{Seitenlänge} = \sqrt[3]{3{,}75 \times 10^{13}\,\text{cm}^3} = 3{,}35 \times 10^4\,\text{cm}\left(\frac{\text{m}}{10^2\,\text{cm}}\right) = 335\,\text{m}$$

Dieser Würfel ist riesig. Es ist so hoch wie das Empire State Building in New York, aber auch 335 m lang und tief. So veranschaulicht ist die Umweltverschmutzung sehr beängstigend. Natürlich müssen wir aber auch berücksichtigen, dass sich diese Menge nicht an einem Ort befindet, sondern in der gesamten Erdatmosphäre verteilt und somit verdünnt wird.

1.2 Schätzung

Sehr oft ist es sehr hilfreich, vor einer genauen Berechnung eine Größe abzuschätzen. Oftmals reicht es schon, die Größenordnung[3] abzuschätzen. Lassen Sie uns mit ein paar einfachen Beispielen starten.

3) Als *Größenordnung einer physikalischen Größe* bezeichnet man die Zehnerpotenzen bezüglich ihrer Basiseinheit.

Wie viele Autos gibt es in den USA und auf der gesamten Welt?

Ansatz: Ein möglicher Ansatz ist, lokal zu denken. Unter unseren Freunden und Familien scheint es, als ob etwa jeder Zweite ein Auto besitzt. Wenn wir die Bevölkerung der Vereinigten Staaten von Amerika (USA) kennen, dann können wir diese 0,5 Autos pro Person als Umrechnungsfaktor verwenden, um die Zahl der Autos in den USA zu ermitteln. Es wäre aber eindeutig falsch, wenn wir diese 0,5 Autos pro Person für den Rest der Welt verwenden würden. Beispielsweise gibt es in China noch keine 600 Mio. Autos. Wir könnten aber einen Multiplikator verwenden, der sich auf die Größe der Wirtschaft der USA gegenüber dem Rest der Welt ergibt. Wir wissen, dass die US-Wirtschaft etwa ein Drittel der Weltwirtschaft ausmacht. Wir können dann die Anzahl der Fahrzeuge in den USA mit drei multiplizieren, um die Zahl der Autos auf der Welt abzuschätzen.
In den USA leben mittlerweile mehr als 300 Mio. Menschen, und jede zweite Person hat ein Auto. Somit erhält man:

$$3 \times 10^8 \times 0{,}5 = 1{,}5 \times 10^8 \text{ Autos in den USA}$$

Die US-Wirtschaft macht etwa ein Drittel der Weltwirtschaft aus. Daher ist dann die Anzahl der Fahrzeuge auf der Welt

$$3 \times 1{,}5 \times 10^8 \approx 500 \times 10^6 \text{ Autos}$$

Die tatsächliche Zahl ist nicht genau bekannt, aber eine Internetrecherche sagt uns, dass die Zahl der Autos weltweit $1{,}2 \times 10^9$ beträgt. Unsere Schätzung ist zwar etwas niedrig, aber auch nicht völlig falsch.
Es ist hier auch überhaupt nicht wichtig, eine genaue Antwort zu erhalten. Wichtig ist es, eine Abschätzung zu erhalten, die es uns schnell erlaubt, eine Entscheidung zu treffen, ob es sich lohnt, eine genauere Berechnung durchzuführen. Wenn wir z. B. ein Gerät entwickelt wollen, das jedes Auto auf der Welt benötigt, aber unser geschätzter Gewinn nur 1 € je Auto betragen würde, dann könnte man schnell mit der Gesamtzahl der Autos den gesamten Gewinn errechnen, bevor man die Idee aufgibt. Bei einer geschätzten weltweiten Zahl von 500 Mio. Autos würde der Gewinn die stolze Summe von 500 Mio. € ausmachen.

Wie viele Leute arbeiten in Deutschland bei McDonald's?

Ansatz: In Köln, der viertgrößten Stadt Deutschlands, gibt es bei einer Einwohnerzahl von etwa einer Mio. 27 McDonald's Restaurants. Wenn man annimmt, dass diese Zahl der Restaurants auf die deutsche Bevölkerung übertragen werden, dann erhält man:

$$\left(\frac{27 \text{ McD}}{1 \times 10^6 \text{ Personen}}\right) 8 \times 10^7 \approx 2{,}2 \times 10^3 \text{ Restaurants in Deutschland}$$

Aufgrund der örtlichen Beobachtungen und der Befragung der Beschäftigten hinter der Theke scheint die Annahme sinnvoll, dass etwa 25 Menschen in jedem dieser Restaurants arbeiten. Man erhält daher:

$$\left(\frac{25\ \text{Angestellte}}{\text{Restaurant}}\right) \times 2200\ \text{Restaurants} \approx 55\,000\ \text{Angestellte}$$

Diese Schätzung könnte viel zu hoch sein, wenn man berücksichtigt, dass die Zahl der Restaurants in Ballungsräumen viel größer ist als auf dem Land. Tatsächlich wohnen in Deutschland etwa 75 % der Bevölkerung in Städten mit mehr als 2000 Einwohnern. Im Jahr 2015 arbeiteten nach Angaben des deutschen Statistischen Bundesamtes bei McDonald's in Deutschland etwa 58 000 Personen. Unsere Schätzung ist also nicht so schlecht. Es zeigt sich aber, dass die Schätzung von vielen Faktoren abhängig sein kann und das Ergebnis damit auch rein zufällig ganz gut stimmen kann.

Wie viele Fußbälle passen in ein Volumen von einem Kubikmeter?

Ansatz: Zunächst benötigen wir den Durchmesser eines normalen Fußballs. Dieser beträgt 22 cm. Die einfachste Überlegung ist nun, dass wir annehmen, dass die Bälle aufgepumpt sind und sich nicht zusammendrücken lassen. Dann berechnen wir das Volumen des Fußballs, in dem wir annehmen, dass er würfelförmig ist und packen diese Würfel dann gleichmäßig in das vorhandene Volumen, das wir uns als Würfel mit 1 m Kantenlänge vorstellen.
Somit passen in das Volumen $4 \times 4 \times 4 = 64$ Bälle. Wir verschenken so aber eine Menge Raum, da vier Bälle nebeneinander gerade einmal 88 cm Platz benötigen und somit 12 cm ungenutzt bleiben.
Wir könnten aber auch einfach das Gesamtvolumen durch das Volumen eines Balles dividieren.

$$\text{Volumen des Fußballs (als Würfel)} = (22 \times 22 \times 22)\ \text{cm}^3 = 10\,648\ \text{cm}^3$$

$$\text{Anzahl} = \left(\frac{1\,000\,000\ \text{cm}^3}{10\,648\ \text{cm}^3}\right) \approx 93\ \text{Fußbälle}$$

Diese Zahl ist vermutlich zu groß. Sie sehen, dass Schätzungen nicht immer einfach sind und fast immer von vielen Randbedingungen abhängen.

1.3 Das ideale Gasgesetz

Wenn wir uns später mit Luftverschmutzung beschäftigen, sollten wir uns vorher noch einmal an das ideale Gasgesetz erinnern. Das ideale Gasgesetz lautet:

$$pV = nRT$$

mit p = Druck in Atmosphären (atm), Torr (760 Torr = 1 atm) oder Pascal (Pa) als SI-Einheit des Druckes, V = Volumen in Litern (L), n = Anzahl der Mole, R = Gaskonstante ($0{,}082\ \text{L atm K}^{-1}\ \text{mol}^{-1}$), T = Temperatur in Kelvin (K = Grad Celsius + 273,15).

Die Größe Mol mit der Einheit mol bezieht sich auf $6{,}023 \times 10^{23}$ Moleküle oder Atome. In einem Mol gibt es also $6{,}023 \times 10^{23}$ Moleküle oder Atome. Diese Zahl ist im Übrigen bemerkenswert nahe an 2^{79}, die Sie stattdessen verwenden können. Der Begriff Mol tritt häufig auf in Molekulargewichten, die in der Einheit von Gramm pro Mol (oder g/mol) angegeben werden. Zum Beispiel beträgt das Molekulargewicht des molekularen Stickstoffs (N_2) 28 g/mol. Die Zahl $6{,}023 \times 10^{23}$ ist auch als *Avogadro-Konstante*[4] N_A bekannt. Häufig wurde im deutschsprachigen Raum als Synonym für die Avogadro-Konstante der Begriff *Loschmidt-Konstante*[5] benutzt. Tatsächlich gibt die Loschmidt-Konstante N_L aber die Zahl der Teilchen eines idealen Gases pro Volumen (V_0) unter Normalbedingungen ($T_0 = 273{,}15$ K und $p_0 = 101{,}325$ kPa) an. Der Zusammenhang zwischen den beiden Größen ist:

$$N_L = \frac{N_A}{V_0} = N_A \frac{p_0}{RT_0}$$

Wir werden in den folgenden Kapiteln sehr häufig die Zusammensetzung der trockenen Erdatmosphäre benötigen. Die folgende Tabelle gibt deren Zusammensetzung gemeinsam mit dem Molekulargewicht der Gase an. Die Einheiten *ppm* und *ppb* beziehen sich auf Teile pro Million oder Teile pro Milliarde. Dies sind Anteilsbruchteile wie Prozent (%) nur entsprechend kleiner. Um ausgehend von einem dimensionslosen Bruchteil diese relativen Einheiten zu erhalten, müssen wir diese für % mit 100, für ppm mit 10^6 bzw. 10^9 für ppb multiplizieren. Zum Beispiel ist ein Bruchteil von 0,0001 gerade 0,01 % oder 100 ppm bzw. 100 000 ppb. Für die Gasphase werden %, ppm und ppb immer auf Volumen pro Volumen oder Mol pro Mol bezogen. Streng genommen sind diese Einheiten somit keine Konzentrationen, sondern dimensionslose Volumenmischungsverhältnisse. Manchmal benutzt man deshalb auch die Schreibweise ppmV oder ppbV. Beispielsweise enthält die Atmosphäre 78 L Stickstoff pro 100 L Luft oder 78 mol Stickstoff pro 100 mol Luft. Es sind eben nicht 78 g Stickstoff je 100 g Luft. In Wasser, Feststoffen oder Biota bezieht man dagegen die Mischungsverhältnisse auf Gewicht pro Gewicht.

Gas	**Symbol**	**Mischungsverhältnis**	**Molekulargewicht (g/mol)**
Stickstoff	N_2	78 %	28
Sauerstoff	O_2	21 %	32
Argon	Ar	1 %	40
Kohlendioxid	CO_2	390 ppm	44
Neon	Ne	18 ppm	20
Helium	He	5,2 ppm	4
Methan	CH_4	1,5 ppm	16

4) Amadeo Avogadro (1776–1856), italienischer Chemiker.
5) Josef Loschmidt (1821–1895), österreichischer Physiker und Chemiker.

Wie groß ist das Molekulargewicht trockener Luft?

Ansatz: Der Wert, den wir suchen, erhält man als gewichteten Mittelwert der Hauptkomponenten in der Luft, also Stickstoff mit 28 g/mol, Sauerstoff 32 g/mol und vielleicht ein bisschen Argon mit 40 g/mol. Somit ist

$$\mathrm{MW}_{\text{trockene Luft}} = 0{,}78 \times 28 + 0{,}21 \times 32 + 0{,}01 \times 40 = 29\,\mathrm{g/mol}$$

Welches Volumen besitzt 1 mol eines Gases bei 1 atm und 0 °C bzw. bei 1 atm und 15 °C? Diese letztere Temperatur ist wichtig, weil sie gegenwärtig die durchschnittliche Lufttemperatur auf der Erdoberfläche ist.

Ansatz: Wir suchen das Volumen pro Mol und erhalten das Ergebnis, indem wir das ideale Gasgesetz $pV = nRT$ neu anordnen:

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{p} = \left(\frac{0{,}082\,\mathrm{L\,atm}}{\mathrm{K\,mol}}\right)\left(\frac{273\,\mathrm{K}}{1\,\mathrm{atm}}\right) = 22{,}4\,\mathrm{L/mol}$$

Für 15 °C erhält man mit dem Verhältnis der *absoluten* Temperaturen (Boyle-Gesetz):

$$\left(\frac{V}{n}\right)_{\text{bei 25 °C}} = 22{,}4\,\mathrm{L/mol}\left(\frac{288}{273}\right) = 23{,}6\,\mathrm{L/mol}$$

Bitte beachten Sie, dass wir hier immer mit der absoluten Temperatur und nicht mit der Celsius-Temperatur rechnen müssen.

Wie groß ist die Dichte der Erdatmosphäre bei 15 °C und 1 atm Druck?

Ansatz: Denken Sie daran, dass die Dichte der Quotient aus der Masse eines Körpers und seinem Volumen ist. Aus dem mittleren Molekulargewicht der trockenen Luft und dem Molvolumen erhalten wir dann nach Umstellen des idealen Gasgesetzes $pV = nRT$:

$$\frac{n(\mathrm{MW})}{V} = \left(\frac{\mathrm{mol}}{23{,}6\,\mathrm{L}}\right)\left(\frac{29\,\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}\right) = 1{,}23\,\mathrm{g/L} = 1{,}23\,\mathrm{kg/m^3}$$

Wie groß ist die Masse der Erdatmosphäre?

Ansatz: Diese Frage ist ein bisschen schwieriger zu beantworten, da wir zunächst eine andere Größe bestimmen müssen. Wir benötigen nämlich den durchschnittlichen Luftdruck, also die Masse der Luft pro Flächeneinheit. Sobald wir den Druck bestimmt haben, können wir ihn mit der Oberfläche der Erde multiplizieren und das Gesamtgewicht der Atmosphäre erhalten.
Wir erinnern uns an die TV-Wetterberichte, in denen manchmal der Luftdruck noch in Torr – das sind mm Quecksilbersäule – angegeben wird. Das ist zwar keine SI-Einheit, aber im Gegensatz zur SI-Einheit Pascal (Pa) anschaulich. Der Normaldruck sind 760 Torr, also 76 cm Quecksilber. Diese Länge der Quecksilbersäule kann in einen „wahren" Druck umgewandelt werden, indem man sie mit

der Dichte von Quecksilber, die 13,5 g/cm^3 beträgt, multipliziert:

$$p_{\text{Erde}} = (76\,\text{cm})\left(\frac{13{,}5\,\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 1030\,\text{g/cm}^2$$

Als Nächstes benötigen wir die Oberfläche der Erde. Diese können wir leicht herausfinden. Sie beträgt $5{,}11 \times 10^8\,\text{km}^2$. Daher beträgt das Gesamtgewicht der Atmosphäre:

$$\begin{aligned}\text{Masse} &= p_{\text{Erde}}A \\ &= \left(\frac{1030\,\text{g}}{\text{cm}^2}\right)\left(\frac{5{,}11\times 10^8\,\text{km}^2}{1}\right)\times\left(\frac{10^{10}\,\text{cm}^2}{\text{km}^2}\right)\left(\frac{\text{kg}}{10^3\,\text{g}}\right) \\ &= 5{,}3\times 10^{18}\,\text{kg}\end{aligned}$$

Dies entspricht $5{,}3 \times 10^{15}$ t.

Wie groß wäre das Volumen der Erdatmosphäre (in Litern) bei 1 atm Druck und 15 °C.

Ansatz: Da wir in der vorherigen Frage das Gewicht der Atmosphäre berechnet haben, können wir das Volumen durch Division des Gewichtes durch die Dichte von 1,23 kg/m^3 bei 15 °C erhalten:

$$\begin{aligned}V &= \frac{\text{Masse}}{\rho} = 5{,}3\times 10^{18}\,\text{kg}\left(\frac{\text{m}^3}{1{,}23\,\text{kg}}\right)\left(\frac{10^3\,\text{L}}{\text{m}^3}\right) \\ V_{T=288\,\text{K},\,p=1\,\text{atm}} &= 4{,}3\times 10^{21}\,\text{L}\end{aligned}$$

Versuchen Sie bitte, diese Zahl zu behalten.

Eine Luftprobe aus einer geschlossenen Garage enthält mit 0,9 % eine vermutlich tödliche Menge Kohlenmonoxid (CO). Wie groß ist die CO-Konzentration in dieser Probe in Einheiten von g/m^3 bei 20 °C und 1 atm Druck? CO hat ein Molekulargewicht von 28 g/mol.

Ansatz: Da die Konzentration pro 100 mol Luft 0,9 mol CO ist, müssen wir die Mole von CO in ein Gewicht konvertieren. Dazu benutzen wir das Molekulargewicht von CO, das 28 g/mol beträgt. Wir müssen aber auch die 100 mol Luft in ein Volumen umrechnen. Dazu benutzen wir das Molvolumen von 22,4 L/mol, das wir noch für die Temperatur korrigieren müssen:

$$\begin{aligned}c &= \left(\frac{0{,}9\,\text{mol CO}}{100\,\text{mol Luft}}\right)\left(\frac{28\,\text{g CO}}{\text{mol CO}}\right)\left(\frac{\text{mol Luft}}{22{,}4\,\text{L Luft}}\right)\left(\frac{273}{293}\right)\times\left(\frac{10^3\,\text{L}}{\text{m}^3}\right) \\ &= 10{,}5\,\text{g/m}^3\end{aligned}$$

Beachten Sie den Faktor 273/293, den wir benötigen, um die Änderung des Volumens bei der Temperaturänderung von 0 auf 20 °C zu berücksichtigen.

1.4 Stöchiometrie

Bei chemischen Reaktionen reagieren Substanzen immer in molaren Masseverhältnissen, wie z. B.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Dies bedeutet, dass 1 mol Kohlenstoff mit einer Masse von 12 g mit 1 mol Sauerstoff mit einer Masse von 32 g zu 1 mol Kohlendioxid mit einer Masse von 44 g reagiert.

In der folgender Tabelle sind einige Atomgewichte aufgelistet, die Sie kennen sollten. Das komplette Periodensystem der Elemente finden Sie im Anhang C.

Element	**Symbol**	**Atomgewicht (g/mol)**
Wasserstoff	H	1
Kohlenstoff	C	12
Stickstoff	N	14
Sauerstoff	O	16
Schwefel	S	32
Chlor	Cl	35,5

Angenommen, dass Benzin nur aus Oktan (C_8H_{18}) besteht. Wie viel Gramm Sauerstoff werden benötigt, um 1 g des Kraftstoffs zu verbrennen?

Ansatz: Zunächst stellen wir die Reaktionsgleichung auf:

$$C_8H_{18} + 12{,}5\, O_2 \rightarrow 8\, CO_2 + 9\, H_2O$$

Die Stöchiometrie zeigt, dass 1 mol ($8 \times 12 + 18 \times 1 = 114$ g) des Kraftstoffs mit 12,5 mol [$12{,}5 \times (2 \times 16) = 400$ g] Sauerstoff reagieren und 8 mol [$8 \times (12 + 2 \times 16) = 352$ g] Kohlendioxid und 9 mol [$9 \times (2 + 16) = 162$ g] Wasser gebildet werden. Daraus ergibt sich als Antwort auf die Frage:

$$\frac{M_{\text{Sauerstoff}}}{M_{\text{Brennstoff}}} = \left(\frac{400\,\text{g}}{114\,\text{g}}\right) = 3{,}51$$

Nehmen wir an, dass ein sehr schlecht eingestellter Rasenmäher so betrieben wird, dass die Verbrennungsreaktion jetzt $C_9H_{18} + 9\, O_2 \rightarrow 9\, CO + 9\, H_2O$ ist. Wie viel Gramm CO entstehen aus jedem Gramm verbranntem Kraftstoff?

Ansatz: Wir benutzen wieder die Molekulargewichte der verschiedenen Verbindungen. Der Kraftstoff hat ein Molekulargewicht von 126 g/mol. Für jedes Mol verbranntem Kraftstoff werden 9 mol CO erzeugt. Daher ergibt sich:

$$\frac{M_{\mathrm{CO}}}{M_{\mathrm{Brennstoff}}} = \left(\frac{9\,\mathrm{mol\,CO}}{1\,\mathrm{mol}\,\mathrm{C_9H_{18}}}\right)\left(\frac{28\,\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}\right)\left(\frac{\mathrm{mol}}{126\,\mathrm{g}}\right) = 2{,}0$$

1.5 Übungsaufgaben

1.1 Wie groß ist der durchschnittliche Abstand zwischen den Kohlenstoffatomen im Diamant, wenn dessen Dichte 3,51 g/cm^3 beträgt?

1.2 In Nikel in Nordwestrussland in der Nähe von Murmansk beträgt die durchschnittliche jährliche Konzentration von Schwefeldioxid bei 1 atm und 15 °C 50 µg/m^3. Welchem SO_2-Mischungsverhältnis [ppbV] entspricht dies?

1.3 Moderne Autos werden neuerdings zum Teil ohne aufgeblasenen Ersatzreifen ausgeliefert. Der Reifen ist zusammengefaltet und muss aufgeblasen werden, wenn er am Fahrzeug montiert ist. Um den Reifen aufzublasen, befindet sich im Fahrzeug eine Druckdose mit Kohlendioxid, deren Inhalt ausreicht, um drei Reifen damit aufzublasen. Bitte schätzen Sie ab, wie viel Kohlendioxid in der Druckdose ist.

1.4 Der Luftqualitätsstandard für NO_2 in der Europäischen Union liegt im Jahresdurchschnitt bei 40 ppbV. Wie groß ist die Konzentration in µg/m^3?

1.5 Wie groß wäre der Gewichtsunterschied (in Gramm) zweier Basketbälle, wenn einer mit Luft und einer mit Helium gefüllt wäre? Die Basketbälle haben einen Umfang von 749 mm und werden auf 0,55 bar aufgepumpt.

1.6 Saurer Regen war vor einiger Zeit ein wichtiger Streitpunkt zwischen den USA und Kanada. Der saure Regen wurde zu einem großen Teil durch die Emission von Schwefeldioxid aus Kohlekraftwerken im südlichen Indiana und Ohio verursacht. Das Schwefeldioxid löste sich im Regenwasser, bildete Schwefelsäure und damit „sauren Regen". Wie viele Tonnen Kohle mit einem durchschnittlichen Schwefelgehalt von 3,5 Gew.% (Gewichtsprozent) müssen verbrannt werden, um so viel H_2SO_4 zu emittieren, dass eine Niederschlagshöhe von 3 cm und einem pH-Wert von 3,90 eine Fläche von 20 000 km^2 bedeckt?

1.7 Ein Kraftwerk verbraucht zur Stromerzeugung 3,5 Mio. L Öl pro Tag. Nehmen Sie an, das Öl besteht aus $C_{18}H_{32}$ mit einer Dichte von 0,85 g/cm^3. Im Abgaskamin des Kraftwerks misst man 45 ppmV NO. Wie viel NO wird pro Tag ausgestoßen?

1.8 Stellen Sie sich vor, dass 300 kg trockener Klärschlamm in einen kleinen See mit einem Volumen von 300 Mio. L Wasser eingebracht werden. Wie viel Kilogramm Sauerstoff werden benötigt, um den Klärschlamm abzubauen? Nehmen Sie der Einfachheit halber an, dass der Klärschlamm die elementare Zusammensetzung $C_6H_{12}O_6$ hat.

1.9 Angenommen ein falsch eingestellter Rasenmäher wird in einer geschlossenen Garage betrieben, die für zwei Autos vorgesehen ist. Die Verbrennungsreaktion im Motor ist $C_8H_{14} + 15/2\,O_2 \rightarrow 8\,CO + 7\,H_2O$ ist. Schätzen Sie ab, wie viel Gramm Benzin verbrannt werden müssen, um das CO-Volumenmischungsverhältnis in der Garage auf 1000 ppmV zu erhöhen?

1.10 Die durchschnittliche atmosphärische Konzentration an polychlorierten Biphenylen (PCB) rund um die Großen Seen in Nordamerika beträgt etwa 2 ng/m^3. Rechnen Sie diese Konzentration in Moleküle/cm^3 um. Das mittlere Molekulargewicht von PCB beträgt 320 g/mol.

1.11 In einer Zeitschrift erschien folgendes Zitat: „Ein Baum kann etwa 6 kg CO_2 pro Jahr assimilieren, was in etwa der CO_2-Menge entspricht, die von einem Auto bei einer Fahrstrecke von 42 000 km emittiert wird." Ist diese Aussage korrekt? Begründen Sie Ihre Antwort quantitativ. Nehmen Sie an, dass Benzin die Zusammensetzung C_9H_{16} hat, dass seine Verbrennung vollständig ist und dass der Wagen 10 L Benzin auf 100 km verbraucht.

1.12 Wenn morgen jeder Mensch auf der Welt einen Baum pflanzen würde, wie lange würde es dauern, bis diese Bäume die atmosphärische CO_2-Konzentration um 1 ppm gesenkt hätten? Nehmen Sie für die Berechnung an, dass die Weltbevölkerung sieben Mrd. Menschen beträgt und dass ein Baum, unabhängig von seinem Alter, pro Jahr 9 kg O_2 produziert. Durch den Prozess der Fotosynthese entstehen aus CO_2 und Wasser $C_6H_{12}O_6$ und O_2.

1.13 Auf der Welt gibt es momentan etwa $1{,}5 \times 10^9$ Altreifen, was zu einem großen Entsorgungsproblem führt.

a) Wenn diese Reifen komplett verbrannt würden, wie viel Kohlendioxid (in Tonnen) würde dann emittiert?
b) Vergleichen Sie dies mit der aktuellen jährlichen CO_2-Menge, die durch Menschen in die Atmosphäre eingetragen wird. Nehmen Sie für die Berechnung an, dass Kautschuk die Zusammensetzung $C_{200}H_{400}$ hat, jeder Altreifen 8 kg wiegt, einen einen Durchmesser von 48 cm hat und zu 85 % aus Gummi besteht.

1.14 Schätzen Sie ab, wie viele Zahnärzte in Deutschland arbeiten.

1.15 Sie sind Umweltchemiker und wurden zu einer Dinnerparty in Berlin mit einflussreichen Bundestagsabgeordneten eingeladen, die gerade ein neues Emissionsschutzgesetz auf den Weg bringen wollen. Während Sie mit einer Abgeordneten bei einem Prosecco über Ihre Forschung diskutieren, bemerken Sie, dass diese überhaupt nicht versteht, wenn Sie die Schadstoffkonzentrationen im Hinblick auf die Mischungsverhältnisse beschreiben. Bitte erklären Sie der Abgeordneten die Mischungsverhältnisse ein Teil pro Million (ppm) und ein Teil pro Milliarde (ppb) am Beispiel von Tropfen Holundersaft in einer Badewanne voll Prosecco.

1.16 Wasser ist in der Atmosphäre allgegenwärtig und haftet praktisch an allen Oberflächen, die man in der Umwelt findet (Boden, Vegetation, Fenster, Gebäude etc.). Wie groß wäre der Bedeckungsgrad (Moleküle/cm^2), wenn man eine Fensterscheibe gleichmäßig mit einer Monoschicht Wasser belegen würde?

1.17 Während der Deepwater-Horizon-Ölpest im Jahr 2010 wurden etwa 800 Mio. L Öl in den Golf von Mexiko eingetragen. Wie groß müsste ein würfelförmiger Container sein, um diese Ölmenge aufzunehmen? Schätzen Sie ab, welche Fläche man bedecken würde, wenn diese Ölmenge in einer Monoschicht gleichmäßig auf der Wasseroberfläche verteilt würde?