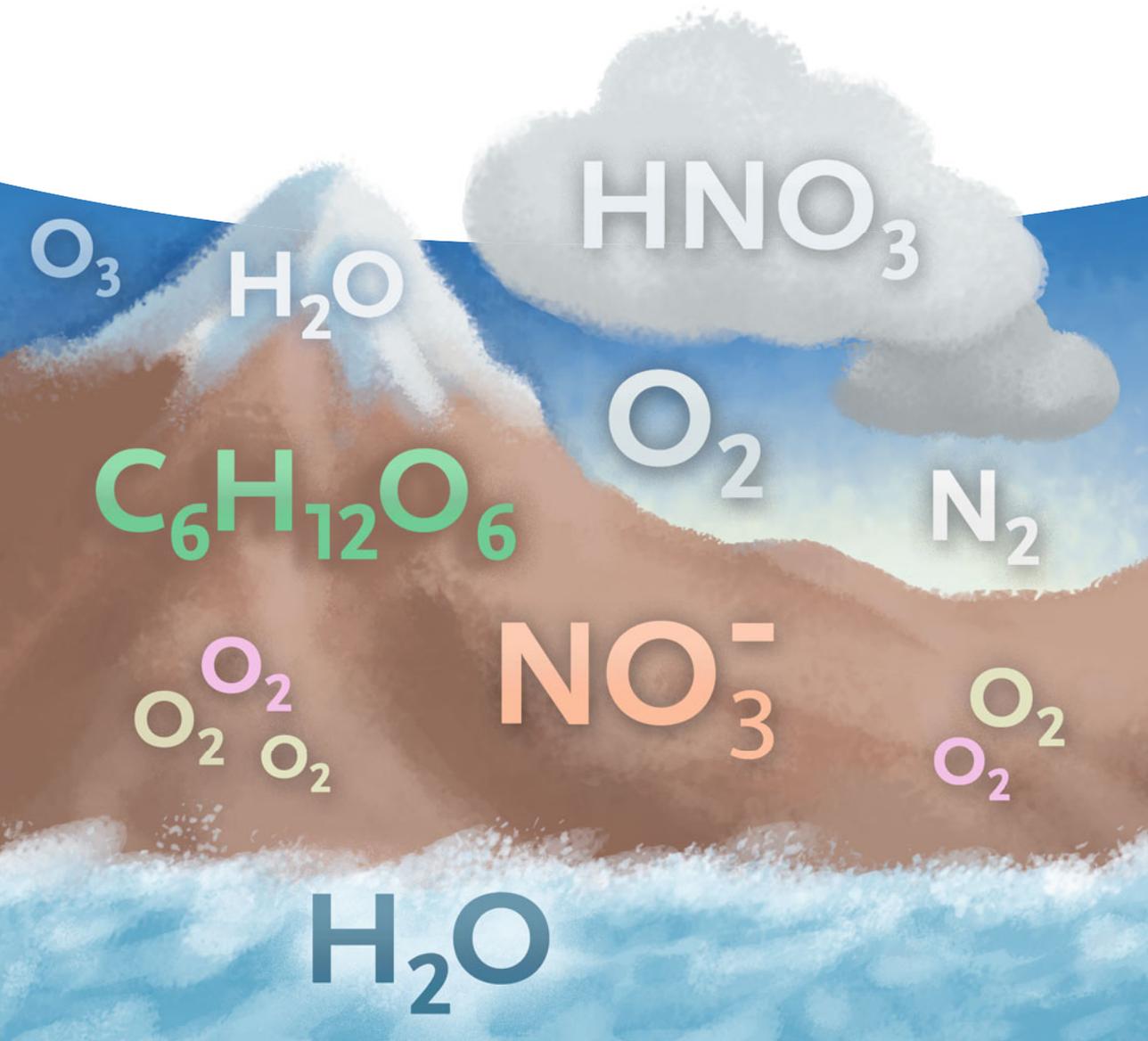


Ronald A. Hites, Jonathan D. Raff und Peter Wiesen

Umweltchemie

Eine Einführung mit Aufgaben und Lösungen



*Ronald A. Hites,
Jonathan D. Raff und
Peter Wiesen*

Umweltchemie

Ronald A. Hites, Jonathan D. Raff und Peter Wiesen

Umweltchemie

Eine Einführung mit Aufgaben und Lösungen

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Dr. Ronald A. Hites

Indiana University
School of Public and Environmental Affairs
702 N. Walnut Grove Ave.
Bloomington, IN, 47405
USA

Prof. Dr. Jonathan D. Raff

Indiana University
School of Public and Environmental Affairs
702 N. Walnut Grove Ave.
Bloomington, IN, 47405
USA

Übersetzung und Bearbeitung der deutschen Ausgabe

Prof. Dr. Peter Wiesen

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Mathematik &
Naturwissenschaften/Physikalische und
Theoretische Chemie
Gaufßstr. 20
42097 Wuppertal

Titel der Originalausgabe

Elements of Environmental Chemistry –
Second edition. Copyright © 2012 by John Wiley
& Sons Inc.

All Rights Reserved. Authorised translation
from the English language edition published by
John Wiley & Sons Limited. Responsibility for
the accuracy of the translation rests solely with
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA and is
not responsibility of John Wiley & Sons Limited.
No part of this book may be reproduced in any
form without the written permission of the
original copyright holder, John Wiley & Sons
Limited.

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig
erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren,
Herausgeber und Verlag in keinem Fall,
einschließlich des vorliegenden Werkes, für die
Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und
Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler
irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet
diese Publikation in der Deutschen Nationalbi-
bliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Überset-
zung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein
Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Ge-
nehmigung des Verlages in irgendeiner Form
– durch Photokopie, Mikroverfilmung oder
irgendein anderes Verfahren – reproduziert
oder in eine von Maschinen, insbesondere von
Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare
Sprache übertragen oder übersetzt werden.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen,
Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in
diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme,
dass diese von jedermann frei benutzt werden
dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um
eingetragene Warenzeichen oder sonstige ge-
setzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn
sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-33523-7

ePDF ISBN 978-3-527-67297-4

ePub ISBN 978-3-527-67296-7

Mobi ISBN 978-3-527-67295-0

Umschlaggestaltung Formgeber, Mannheim,
Deutschland

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig,
Deutschland

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur englischen Originalausgabe IX

Vorwort zur deutschen Ausgabe XI

1	Einfache Werkzeuge oder: Was man weiß – was man wissen sollte	1
1.1	Umrechnung von Einheiten	1
1.2	Schätzung	3
1.3	Das ideale Gasgesetz	5
1.4	Stöchiometrie	9
1.5	Übungsaufgaben	10
2	Massebilanz und chemische Kinetik	13
2.1	Quasistationäre Massebilanz	13
2.1.1	Durchsatz, Beladung und Verweilzeiten	13
2.1.2	Die Berücksichtigung mehrerer Flüsse	19
2.1.3	Fluss und Flussdichte	21
2.2	Massebilanz im nicht stationären Zustand	24
2.2.1	Die Produktbildung	25
2.2.2	Verbrauch der Edukte	28
2.2.3	Arbeiten mit realen Messdaten	30
2.3	Chemische Kinetik	35
2.3.1	Reaktionen erster Ordnung	35
2.3.2	Reaktionen zweiter Ordnung	36
2.3.3	<i>Michaelis-Menten-Kinetik</i>	38
2.4	Übungsaufgaben	41
	Literatur	45
3	Chemie der Atmosphäre	47
3.1	Struktur und Aufbau der Atmosphäre	47
3.2	Licht und Photochemie	49
3.3	Oxidantien in der Atmosphäre	53
3.4	Kinetik der Reaktionen in der Atmosphäre	54
3.4.1	Das Quasistationaritätsprinzip	54

3.4.2	Die Arrhenius-Gleichung	56
3.5	Ozon in der Stratosphäre	56
3.5.1	Bildung und Abbau von Ozon in der Atmosphäre	56
3.5.2	Der NO/NO ₂ -Zyklus	57
3.5.3	Der OH/OOH-Zyklus	58
3.5.4	Der Cl/OCl-Zyklus	58
3.5.5	Die Kinetik der <i>Chapman</i> -Reaktionen	61
3.6	Smog	64
3.7	Übungsaufgaben	69
	Literatur	74
4	Der Klimawandel	75
4.1	Historischer Zusammenhang	75
4.2	Strahlung eines schwarzen Körpers und die Oberflächentemperatur der Erde	77
4.3	Absorption von Infrarotstrahlung	80
4.4	Treibhauseffekt	81
4.5	Strahlungsbilanz der Erde	82
4.5.1	Treibhausgase	82
4.5.2	Albedo	84
4.5.3	Solarkonstante	84
4.5.4	Kombinierte Wirkung	85
4.6	Aerosole und Wolken	85
4.7	Strahlungsantrieb	87
4.8	Treibhauspotenzial	88
4.9	Schlussbemerkung	90
4.10	Übungsaufgaben	91
	Literatur	95
5	CO₂-Gleichgewichte	97
5.1	Reiner Regen	98
5.2	Verschmutzter Regen	101
5.3	Oberflächengewässer	106
5.4	Die Versauerung der Meere	109
5.5	Übungsaufgaben	113
	Literatur	117
6	Pestizide, Quecksilber und Blei	119
6.1	Pestizide	120
6.1.1	Diphenylmethananaloga	121
6.1.2	Hexachlorcyclohexan	122
6.1.3	Hexachlorcyclopentadien (HCCPD)	123
6.1.4	Phosphorbasierte Insektizide	126
6.1.5	Carbamate	128
6.1.6	Analoga natürlicher Substanzen	129

- 6.1.7 Phenoxyessigsäuren 130
- 6.1.8 Nitroaniline 131
- 6.1.9 Triazine 132
- 6.1.10 Chloracetamide 133
- 6.1.11 Fungizide 134
- 6.2 Quecksilber 135
- 6.3 Blei 138
- 6.4 Übungsaufgaben 140
- Literatur 144

- 7 Organische Verbindungen und ihr Abbau in der Umwelt 145**
- 7.1 Dampfdruck 146
- 7.2 Wasserlöslichkeit 147
- 7.3 Henry-Konstante 148
- 7.4 Verteilungskoeffizienten 148
- 7.5 Lipophilie 149
- 7.6 Bioakkumulation 150
- 7.7 Adsorption 151
- 7.8 Phasenübergang Wasser-Luft 152
- 7.9 Reaktiver Abbau organischer Substanzen 156
- 7.10 Verteilung und Persistenz 157
- 7.11 Übungsaufgaben 160
- Literatur 166

- 8 PCB, Dioxine und Flammschutzmittel 167**
- 8.1 Polychlorierte Biphenyle (PCB) 167
- 8.1.1 Nomenklatur der PCBs 168
- 8.1.2 Herstellung und Verwendung 169
- 8.1.3 PCBs im Hudson River 170
- 8.1.4 PCBs in Bloomington, Indiana 173
- 8.1.5 Die Yushō- und Yu-Cheng-Krankheit 175
- 8.1.6 Der Envio-PCB-Skandal 177
- 8.1.7 Schlussfolgerungen 178
- 8.2 Polychlorierte Dibenzo-*p*-Dioxine und Dibenzofurane 179
- 8.2.1 Nomenklatur der Dioxine 179
- 8.2.2 Die Ödemkrankheit bei Hühnerküken 180
- 8.2.3 Agent Orange 181
- 8.2.4 Der Times Beach-Skandal in Missouri 183
- 8.2.5 Der Störfall von Seveso, Italien 185
- 8.2.6 Kieselrot 188
- 8.2.7 Verbrennungsprozesse als Quelle von Dioxinen 189
- 8.2.8 Dioxin – Neubeurteilung 191
- 8.2.9 Dioxin – Schlussfolgerungen 191
- 8.3 Bromierte Flammschutzmittel 192
- 8.3.1 Polybromierte Biphenyle 192

- 8.3.2 Polybromierte Diphenylether 194
- 8.4 Lehren 196
- Literatur 197

**Anhang A Eine kurze Einführung in die Struktur und Nomenklatur
organischer Verbindungen 199**

Anhang B Lösungen zu den Übungsaufgaben 213

Anhang C Periodensystem der Elemente 217

Stichwortverzeichnis 221

Vorwort zur englischen Originalausgabe

Praktisch alle Chemiestudiengänge und Studiengänge der Umweltwissenschaften verfügen heute bereits über eine oder mehrere Lehrveranstaltungen mit dem Fokus Umweltchemie und es gibt eine Vielzahl von Lehrbüchern, die sich dieser Thematik widmen. Allerdings behandeln diese Bücher häufig sehr unterschiedliche Themen und sind leider auch qualitativ sehr unterschiedlich. Nach unserer Meinung muss ein gutes Lehrbuch – unabhängig vom didaktischen Potenzial des Lehrenden – quantitativ ausgerichtet sein. Das heißt, dass die Studierenden die Themen des Lehrbuches mit zahlreichen realen Problemen erarbeiten sollen.

Folglich zielt dieses Lehrbuch auf eine quantitative Herangehensweise an die Umweltchemie ab. Das vorliegende Buch soll die Studierenden mit den Grundlagen der Umweltchemie vertraut machen und sie gleichzeitig mit den notwendigen Werkzeugen zur Lösung konkreter Probleme versorgen. Diese Fähigkeiten sind dann auch auf andere Bereiche über die Umweltchemie hinaus übertragbar, können aber auch zum Verständnis weitaus komplexerer Umweltprobleme beitragen.

Das vorliegende Buch ist relativ kurz und beinhaltet eine große Zahl konkreter Probleme, deren Lösungen Schritt für Schritt erarbeitet werden. Es ist ein interaktives Lehrbuch, das am besten mit einem Bleistift in der Hand gelesen werden sollte, damit der Leser der Lösung der Probleme und den Berechnungen folgen kann. Das reine Lesen dieses Buches, ohne sich intensiv mit den Problemen zu beschäftigen, wird nicht genügen. Nur durch die intensive Beschäftigung der Studierenden mit den Problemen und deren Lösung wird sich der entsprechende Lernerfolg einstellen.

Zusätzlich zu den Aufgaben in den einzelnen Abschnitten endet jedes Kapitel mit einer Sammlung weiterer Aufgaben. Neben der Vertiefung von Lösungskonzepten, die in dem jeweiligen Kapitel vorgestellt wurden, haben wir versucht, Themen aus der wissenschaftlichen Literatur und aus der „realen Welt“ in diese problembezogenen Aufgaben aufzunehmen. Die Lösungen zu den Aufgaben sind in einem Anhang des Buches aufgeführt. Die genauen Lösungsansätze und die Lösungswege sind in einem separaten Lösungsbuch verfügbar. Die meisten der Aufgabensätze beinhalten mindestens ein Problem, dessen Lösung mehr Zeit erfordert und/oder die Anwendung einfacher Computerprogramme. Diese soge-

nannten *Gemeinschaftsaufgaben* sollen die Studierenden ermutigen, bei der Lösung dieser Aufgaben zusammenzuarbeiten.

Als eigenständiger Text eignet sich dieses Buch für eine einsemestrige Lehrveranstaltung für Studierende in einem Bachelorstudiengang der Chemie oder für Chemieingenieurwissenschaften bzw. Studierende am Anfang eines entsprechenden Masterstudiengangs, wenn diese über nur wenige Physikkenntnisse verfügen. Grundkenntnisse in Differenzial- und Integralrechnung beim Leser wären hilfreich, sind aber nicht zwingend erforderlich.

Die zweite Auflage der englischen Originalausgabe wurde komplett überarbeitet. Aus dem ehemaligen Kapitel über die Chemie der Atmosphäre wurde der Klimawandel herausgenommen. Diesem wichtigen Thema ist jetzt ein eigenes Kapitel gewidmet. Die Reihenfolge der Kapitel über Chemodynamik und Pestizide, Blei und Quecksilber wurde umgekehrt. Ein neues Kapitel über polychlorierte Biphenyle und Dioxine sowie polybromierte Flammschutzmittel wurde am Ende des Buches eingefügt. Ebenso enthält die zweite Auflage des Buches nun im Anhang eine kurze Einführung in die Nomenklatur organischer Verbindungen und ihrer Strukturen.

Wir danken Todd Royer und Jeffery White für ihre hilfreichen Kommentare zu Teilen des Buches. Wir danken auch der großen Zahl von Studierenden, die Teile des Buches bereits während ihres Studiums über mehrere Jahre verwendet haben und die nicht schüchtern waren, uns auf Fehler und Mängel hinzuweisen.

Wir danken auch Robert Esposito, Chefredakteur bei John Wiley & Sons, mit dessen Hilfe es gelungen ist, dieses Buchprojekt fertigzustellen.

Wir würden uns über jedwede Rückmeldung freuen. Vielleicht haben wir ja Ihr Lieblingsthema vergessen oder es war trotz aller Mühen etwas noch immer unklar oder es verstecken sich trotz aller Sorgfalt noch Fehler in den Lösungen der Übungsaufgaben.

Bloomington, Indiana im November 2011

*Ronald A. Hites und
Jonathan D. Raff*

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Fünf Jahre nach Erscheinen der zweiten Auflage des erfolgreichen Buches „Elements of Environmental Chemistry“ liegt dieses nun erstmals in einer deutschen Übersetzung vor. Ich habe mich bei der Übersetzung bemüht, den besonderen Charakter der Originalausgabe als „Tutorial“ so weit wie möglich zu erhalten. Andererseits wurde die deutsche Ausgabe an verschiedenen Stellen erweitert, aktualisiert und an die Bedürfnisse des deutschsprachigen Raums angepasst.

So wurde neben einer Aktualisierung des Kapitels 4, das sich mit dem Klimawandel beschäftigt, im Kapitel 8 der PCB-Skandal um die Fa. ENVIO und die Dioxinbelastung des Marsberger Kieselrot eingefügt.

Darüber hinaus wurde das Abschn. 6.1/Pestizide auf deren Verwendung in der Europäischen Union erweitert. Soweit möglich, wurden auch die den einzelnen Kapiteln folgenden Übungsaufgaben für den deutschsprachigen Raum geändert.

Mein besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Alexandra für die erste Korrekturlesung des Manuskriptes. Bedanken möchte ich mich aber auch bei Herrn Dr. Andreas Sendtko stellvertretend für alle Mitarbeiter des Verlages, ohne dessen Kompetenz, Einsatz, Ermutigung und Geduld das Vorhaben nicht so reibungslos vonstattengegangen wäre.

Wuppertal, im Juni 2017

Peter Wiesen

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-Einheitensystem¹⁾ 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.

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

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

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

- 1 Liter (L) = 10^3 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 Einheitenrechnung 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 Ångström²⁾. 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 $1,1 \times 10^{-10} \text{ m}$. 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 g/cm^3 beträgt. Die Dichte des Schwefels können wir daher mit 2 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 Größenordnung³⁾ 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 ($\text{K} = \text{Grad Celsius} + 273,15$).

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

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

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:

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

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

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

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 $pV = nRT$:

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

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 $13,5 \text{ g/cm}^3$ 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 $5,3 \times 10^{15} \text{ t}$.

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 $1,23 \text{ kg/m}^3$ 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 $22,4 \text{ L/mol}$, das wir noch für die Temperatur korrigieren müssen:

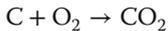
$$\begin{aligned} c &= \left(\frac{0,9 \text{ mol CO}}{100 \text{ mol Luft}} \right) \left(\frac{28 \text{ g CO}}{\text{mol CO}} \right) \left(\frac{\text{mol Luft}}{22,4 \text{ L Luft}} \right) \left(\frac{273}{293} \right) \times \left(\frac{10^3 \text{ L}}{\text{m}^3} \right) \\ &= 10,5 \text{ g/m}^3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

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.



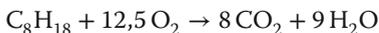
Dies bedeutet, dass 1 mol Kohlenstoff mit einer Masse von 12 g mit 1 mol Sauerstoff mit einer Masse von 32 g zu 1 mol Kohlendioxid mit einer Masse von 44 g reagiert.

In der folgenden 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:



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 $\text{C}_9\text{H}_{18} + 9 \text{O}_2 \rightarrow 9 \text{CO} + 9 \text{H}_2\text{O}$ 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:

$$\frac{M_{\text{CO}}}{M_{\text{Brennstoff}}} = \left(\frac{9 \text{ mol CO}}{1 \text{ mol C}_9\text{H}_{18}} \right) \left(\frac{28 \text{ g}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{\text{mol}}{126 \text{ g}} \right) = 2,0$$

1.5

Übungsaufgaben

1.1 Wie groß ist der durchschnittliche Abstand zwischen den Kohlenstoffatomen im Diamant, wenn dessen Dichte $3,51 \text{ g/cm}^3$ 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 $50 \mu\text{g/m}^3$. 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 $\mu\text{g/m}^3$?

1.5 Wie groß wäre der Gewichtsunterschied (in Gramm) zweier Basketballbälle, wenn einer mit Luft und einer mit Helium gefüllt wäre? Die Basketballbälle 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 $20\,000 \text{ km}^2$ bedeckt?

1.7 Ein Kraftwerk verbraucht zur Stromerzeugung 3,5 Mio. L Öl pro Tag. Nehmen Sie an, das Öl besteht aus $\text{C}_{18}\text{H}_{32}$ mit einer Dichte von $0,85 \text{ g/cm}^3$. 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 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ hat.