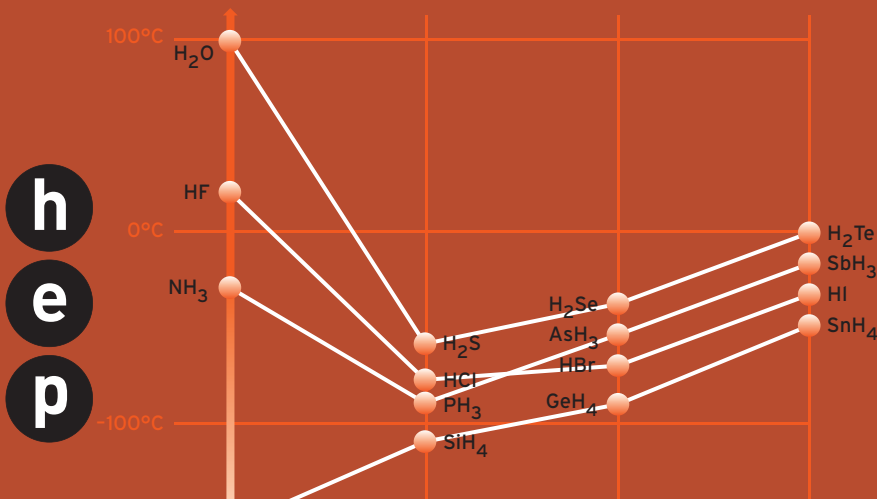
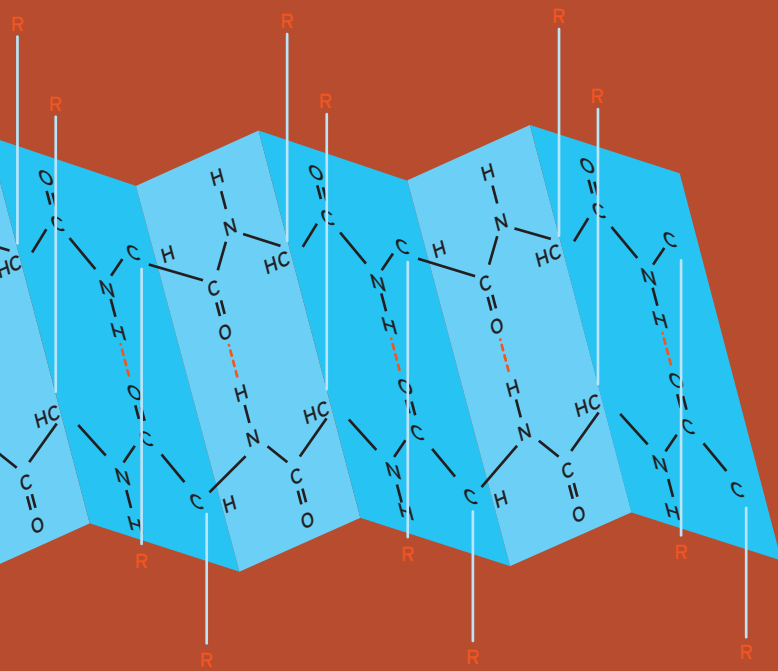


Günter Baars Hans Rudolf Christen

Allgemeine Chemie

Theorie und Praxis

2. Auflage



h
e
p

VORWORT

Die «Allgemeine Chemie, Theorie und Praxis» erschien 1995 zum ersten Mal. In den seither publizierten Auflagen kam es jeweils zu kleinen Änderungen und Ergänzungen.

Für das nun vorliegende Werk wurde der gesamte Text gründlich überarbeitet, das Layout modern gestaltet sowie zahlreiche neue Inhalte integriert. Dazu gehören u.a. die quantitative Beschreibung der Stärke von Redoxpaaren (Standardpotenziale), eine ausführliche Darstellung moderner Batterien und Akkumulatoren, ein umfassender Abschnitt über Enzyme und Proteide sowie ein Kapitel über den Katabolismus (Abbau) der Nahrungsmittel im menschlichen Organismus. Kleinere Abschnitte behandeln Themen wie die Radioaktivität, die Gasgesetze, die Benennung binärer Verbindungen, die Mischbarkeit molekularer Stoffe oder die Zweitsubstitution am Benzolring.

Das hier vorliegende Buch führt in die Grundlagen der Chemie ein. Der Text soll jedoch auch Interesse und Freude daran wecken, sich mit Chemie und ihren Anwendungen im Alltag vertieft auseinanderzusetzen. Die beiden Autoren haben versucht, dies mit einem Ansatz zu erreichen, der sich an zahlreichen Schulen im Verlauf der letzten Jahre bewährt hat.

Im Gegensatz zu vielen anderen Lehrbüchern erscheint die Chemie der Kohlenstoffverbindungen (Organische Chemie) sehr früh. Grundlegende Begriffe, wie z.B. die Erweiterung der Ausdrücke Oxidation und Reduktion, die Einführung der Säure/Base-Reaktionen, die Erarbeitung des Konzepts polarer Bindungen u.a., werden am Beispiel organischer Stoffe eingeführt. Damit ist eine frühe Zusammenarbeit zwischen den Fächern

Chemie und Biologie möglich. Der Bezug zu Alltag und Umwelt nimmt eine bevorzugte Stellung im gesamten Text ein. Zahlreiche «Kästen» enthalten zusätzliche Informationen, z.B. über die Wirkungsweise von Sulfonamiden, das «Molekül des Jahres 1992» (Stickstoffmonoxid), metallische Gläser usw. Auch moderne Entwicklungen der Wissenschaft Chemie sind berücksichtigt: Fullerene, das «Jahrhundert-Pharmakon» (Aspirin), die wellenmechanische Behandlung des Wasserstoff-Atoms im Grundzustand, die Anwendung des «Kastenmodells» auf farbige Stoffe und instrumentelle Analysenmethoden. Auf Experimentiervorschriften wurde bewusst verzichtet, um das Buch nicht zu überladen. Die als Grundlage theoretischer Vorstellungen behandelten Phänomene liefern jedoch stets Hinweise auf entsprechende Experimente. Zahlreiche Übungsaufgaben mit den dazu gehörenden Lösungen ermöglichen eine Kontrolle des Verständnisses. Viele Abbildungen und grafische Darstellungen verdeutlichen und ergänzen den Text.

Wie lässt sich dieses Buch verwenden? Die ersten 22 Kapitel stellen einen Lehrgang dar, in dem ein Kapitel auf dem anderen aufbaut, wobei auch in diesem Rahmen nicht alle Themen unbedingt behandelt werden müssen. Je nach Interesse lassen sich Stoffgebiete aus den restlichen Kapiteln frei wählen, ohne die in diesem Buch eingehaltene Reihenfolge zu beachten.

Bern und Winterthur, im Mai 2008

Günter Baars und Hans Rudolf Christen

VORWORT ZUR 2. AUFLAGE

Für die hier vorliegende 2. Auflage wurde die Gliederung der Inhalte nicht verändert. Damit lassen sich die beiden Auflagen nebeneinander verwenden.

Der Text und alle Zahlenwerte wie Schmelz- und Siedetemperaturen, Atommassen, Bildungs- und Gitterenthalpien etc. wurden hingegen gründlich überprüft und entsprechend angepasst. Der Ersatz einiger Grafiken und Abbildungen soll ausserdem eine bessere Verständlichkeit ermöglichen. Das neue, international eingeführte GHS-System (Global Harmonized System

of Classification, Labelling and Packing of Chemicals) steht anstelle der bisherigen Kennzeichnung von Chemikalien. Die ausführliche Liste der Gefahrstoffe mit den H- und P-Sätzen ist im Internet zugänglich: www.hep-verlag.ch/allgemeine-chemie.

Zur Repetition grundlegender Begriffe steht eine kostenlose App zur Verfügung.

Bern, im Juni 2015

Günter Baars

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	5
GRUNDLAGEN	13
1 Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen	14
1.1 Chemische Reaktionen	14
1.2 Teilchen und Aggregatzustände	17
1.3 Naturwissenschaftliches «Erklären»; das allgemeine Teilchenmodell	22
1.4 Chemische Reaktionen und allgemeines Teilchenmodell	22
<i>Übungen zum Kapitel 1</i>	25
2 Arten von Stoffen	26
2.1 Gemisch, reiner Stoff; Verbindung und Element	26
2.2 Die Trennung (Fraktionierung) von Gemischen	28
2.3 Einteilung reiner Stoffe nach ihren physikalischen Eigenschaften	33
2.4 Beispiele wichtiger Elemente	35
2.5 Möglichkeiten und Grenzen der Teilchenvorstellung	39
<i>Übungen zum Kapitel 2</i>	40
3 Atome, Formeln und Gleichungen	41
3.1 Die Atomhypothese von Dalton	41
3.2 Atommasse und Stoffmenge (Teilchenmenge)	42
3.3 Atome und Moleküle	44
3.4 Symbol und Formel	46
3.5 Die Reaktionsgleichung	47
3.6 Konzentrationsangaben	47
3.7 Gasgesetz; molares Volumen	48
<i>Übungen zum Kapitel 3</i>	51
4 Modelle der Atome	52
4.1 Materie und elektrische Ladung	52
4.2 Die wichtigsten Elementarteilchen	53
4.3 Das Kern-Hülle-Modell des Atoms	55
4.4 Die Elektronenhülle	57
4.5 Radioaktivität	60
<i>Übungen zum Kapitel 4</i>	63
5 Ordnung in der Vielfalt der Elemente: Das Periodensystem	64
5.1 Die Aufstellung des Periodensystems	64
5.2 Periodensystem und Atombau	64
5.3 Die Gruppen und Perioden des Periodensystems	67
5.4 Wie bilden sich Atomverbände? Ein erster Überblick	69
5.5 Benennung binärer Verbindungen	72
5.6 Die Halogene: ein Beispiel einer Elementgruppe	73
<i>Übungen zum Kapitel 5</i>	77
6 Moleküle, molekulare Stoffe	78
6.1 Der Energieumsatz bei der Bildung von Molekülen; Bindungsenthalpie und Bildungsenthalpie	78
6.2 Die räumliche Gestalt (Struktur) von Molekülen	81
6.3 Van der Waals-Kräfte	84
<i>Übungen zum Kapitel 6</i>	86

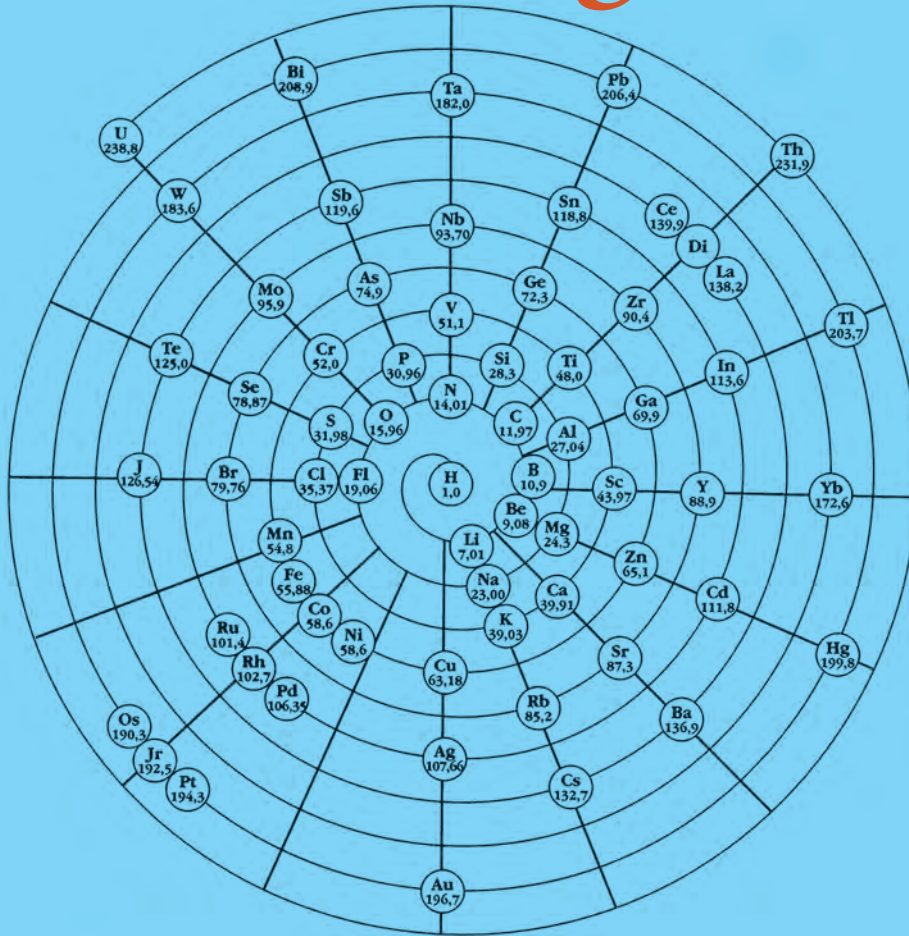
EINFACH UND ÜBERSICHTLICH: DIE KOHLENSTOFF- VERBINDUNGEN	87
7 Erdgas – Methan	88
7.1 Erdgas	88
7.2 Methan	89
7.3 Die Verbrennung von Methan; polare Bindungen; Redoxreaktionen	90
7.4 Redoxreaktionen und Oxidationszahlen	92
7.5 Aufstellen von Lewis-Formeln komplexer Moleküle	94
7.6 Der Treibhauseffekt	95
<i>Übungen zum Kapitel 7</i>	97
8 Alkane: wichtige Energieträger	98
8.1 Die Sonderstellung der Kohlenstoff-Verbindungen	98
8.2 Trennung, Reinigung und Identifizierung von Kohlenstoff-Verbindungen; Summen- und Konstitutionsformel (Lewis-Formel)	100
8.3 Alkane, eine homologe Reihe	101
8.4 Halogenalkane; das Ozonproblem	107
<i>Übungen zum Kapitel 8</i>	109
9 Ungesättigt – reaktionsfähig: Alkene und Alkine	110
9.1 Alkene	110
9.2 Alkine	114
<i>Übungen zum Kapitel 9</i>	115
10 Elektronenwolken dehnen sich aus: aromatische Kohlenwasserstoffe	116
10.1 Benzol und Benzolderivate	116
10.2 Zweitsubstitution am Benzolring	122
<i>Übungen zum Kapitel 10</i>	124
11 Erdöl und Treibstoffe	125
11.1 Erdöl und Erdölprodukte	125
11.2 Motorentreibstoffe	131
<i>Übungen zum Kapitel 11</i>	134
12 Luftverschmutzung und kein Ende	135
12.1 Schadstoffe in der Luft	135
12.2 Saurer Regen und neuartige Waldschäden	139
12.3 Luftreinhaltung	141
<i>Übungen zum Kapitel 12</i>	142
13 Einfache Sauerstoff-Verbindungen: «Der Alkohol» – die Alkohole	143
13.1 Gesättigte Alkohole (Alkanole)	143
13.2 Warum ist Ethanol flüssig und mischt sich mit Wasser?	145
13.3 Die Mischbarkeit molekularer Stoffe	148
13.4 Einige chemische Reaktionen von Alkoholen	149
13.5 Einige Beispiele von Alkoholen	152
13.6 Hydroxylgruppen und doch keine Alkohole: Phenole	155
<i>Übungen zum Kapitel 13</i>	156
14 Oxidation oder Dehydrierung? Aldehyde und Ketone	157
14.1 Die Bildung von Carbonylverbindungen aus Alkoholen	157
14.2 Beispiele von Carbonylverbindungen	159
14.3 Zucker – Carbonylverbindungen?	161
<i>Übungen zum Kapitel 14</i>	165

SÄUREN UND BASEN, SEIFEN UND WASCHMITTEL	167
15 Säuren und Basen – ein Gegensatz	168
15.1 Saure Lösungen und Säuren	168
15.2 Basen und alkalische Lösungen	174
15.3 Die Neutralisation	176
<i>Übungen zum Kapitel 15</i>	178
16 Ester – Reaktionsprodukte von Säuren und Alkoholen	179
16.1 Die Reaktion von Carbonsäuren mit Alkoholen	179
16.2 Fette, wichtige Nahrungsmittel	181
<i>Übungen zum Kapitel 16</i>	185
17 Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen; das chemische Gleichgewicht	186
17.1 Warum laufen chemische Reaktionen ab?	186
17.2 Die Reaktionsgeschwindigkeit	189
17.3 Das chemische Gleichgewicht	192
17.4 Die Beeinflussung chemischer Gleichgewichte	194
<i>Übungen zum Kapitel 17</i>	199
18 Säure/Base-Gleichgewichte	200
18.1 Säure/Base-Reaktionen (Protolysen) sind umkehrbare Reaktionen	200
18.2 Das Säure/Base-Gleichgewicht im Wasser; der pH-Wert und der pOH-Wert	201
18.3 Die Stärke von Säuren und Basen; die Säure/Base-Reihe	205
18.4 Zusammenhang zwischen Struktur und Säure- bzw. Basenstärke	208
18.5 Die Pufferungskurve; Indikatoren und Pufferlösungen	210
18.6 Beispiele von Säure/Base-Reaktionen	212
<i>Übungen zum Kapitel 18</i>	215
19 Waschmittel – Wasser: Zusammenhänge	216
19.1 Aus Fetten entstehen Seifen	216
19.2 Moderne Waschmittel	221
19.3 Belastung des Wassers	222
19.4 Abwasserreinigung	227
<i>Übungen zum Kapitel 19</i>	230
SALZE, METALLE, ELEKTRIZITÄT	231
20 Metall-Nichtmetall-Verbindungen: Salze	232
20.1 Der Energieumsatz bei der Bildung von Ionenverbindungen	232
20.2 Die räumliche Gestalt (Struktur) von Ionenverbindungen	236
20.3 Eigenschaften von Salzen: Schmelz- und Siedetemperaturen, Löslichkeit, elektrische Leitfähigkeit, Sprödigkeit	237
20.4 Salze mit Komplexionen	241
20.5 Düngung und Boden	245
20.6 Metallsalze als Umweltgefährdung	249
<i>Übungen zum Kapitel 20</i>	251
21 Die Verschiebung von Elektronen; Redoxreaktionen	252
21.1 Die Stärke von Oxidatoren und Reduktoren; die Redoxreihe	252
21.2 Beispiele von Redoxreaktionen	256
21.3 Redoxpotenziale und Redoxreihe	257
<i>Übungen zum Kapitel 21</i>	263

22 Metalle	264
22.1 Die räumliche Gestalt (Struktur) von Metallen	264
22.2 Eigenschaften von Metallen: Schmelz- und Siedetemperaturen, Verformbarkeit, Härte, elektrische Leitfähigkeit	265
22.3 Legierungen	267
22.4 Halbleiter	268
<i>Übungen zum Kapitel 22</i>	270
23 Chemie und Elektrizität I	271
23.1 Grundlagen	271
23.2 Primärbatterien	272
23.3 Sekundärbatterien: Akkumulatoren	275
23.4 Brennstoffzellen	282
23.5 Zink-Luft-Batterie zum Fahrzeug-Antrieb?	283
23.6 Metalle und Korrosion	284
<i>Übungen zum Kapitel 23</i>	286
24 Chemie und Elektrizität II: Die Elektrolyse	287
24.1 Was geschieht bei einer Elektrolyse?	287
24.2 Elektrolyse zur Gewinnung von Aluminium, Natronlauge, Kalilauge, Chlor, galvanischen Metallüberzügen und hochreinem Kupfer	290
24.3 Wasserelektrolyse und Wasserstofftechnologie	295
<i>Übungen zum Kapitel 24</i>	297
25 Chemie der festen Erdkruste	298
25.1 Silicate – gesteinsbildende Mineralien	298
25.2 Gesteine	300
25.3 Keramische Werkstoffe, Gläser	301
<i>Übungen zum Kapitel 25</i>	303
26 Chemie und Grosstechnik	304
26.1 Allgemeine Betrachtungen	304
26.2 Die Stickstoffindustrie: die Ammoniak- und Salpetersäure-Synthese	305
26.3 Schwefelsäure	308
26.4 Eisen und Stahl; Silicium	311
26.5 Organische Primärchemikalien und Zwischenprodukte	314
<i>Übungen zum Kapitel 26</i>	317
KUNST- UND NATURSTOFFE	319
27 Synthetische Moleküle mit ungewöhnlichen Dimensionen	320
27.1 Allgemeine Eigenschaften hochmolekularer Stoffe	320
27.2 Polymerisate	326
27.3 Polykondensate	328
27.4 Polyaddukte	332
27.5 Beseitigung und Recycling von Kunststoffen	333
<i>Übungen zum Kapitel 27</i>	335
28 Beispiele biologisch wichtiger Stoffe	336
28.1 Grundlagen der Kohlenhydratchemie	336
28.2 Zwei Disaccharide: Saccharose und Maltose	336
28.3 Stärke und Cellulose, zwei Polysaccharide	338
28.4 Grundlagen der Eiweiss-(Protein-)chemie	341
28.5 Aminosäuren – Bausteine der Proteine	342

28.6 Die Verknüpfung von Aminosäuren zu Makromolekülen	344
28.7 Enzyme und Proteide	345
28.8 Zum Abschluss: das Molekül Stickstoffmonooxid	354
<i>Übungen zum Kapitel 28</i>	355
29 Der Abbau von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen (Proteinen) im menschlichen Organismus	356
29.1 Grundlagen	356
29.2 Die wichtigsten am Katabolismus beteiligten Stoffe	357
29.3 Energiebilanz biochemischer Reaktionen	363
29.4 Übersicht über wichtige biochemische Reaktionen	364
29.5 Der Abbau von Kohlenhydraten zu Acetyl-CoA; die Glykolyse	371
29.6 Der Citratzyklus	377
29.7 Der Abbau von Fetten zu Pyruvat und Acetyl-CoA	383
29.8 Der Abbau von Proteinen	385
29.9 Die Atmungskette	388
<i>Übungen zum Kapitel 29</i>	390
VON DER VERGANGENHEIT IN DIE ZUKUNFT	391
30 Atome ohne Grenzen	392
<i>Übungen zum Kapitel 30</i>	396
31 Farbige Stoffe und Farbstoffe	397
31.1 Wie entsteht Licht?	397
31.2 Warum sind Stoffe farbig?	399
31.3 Farbige Stoffe und Farbstoffe	402
<i>Übungen zum Kapitel 31</i>	406
32 Instrumentelle Analytik	407
32.1 Grundlagen spektroskopischer Methoden	407
32.2 Infrarot-(IR-)Spektroskopie	407
32.3 Ultraviolett-(UV-)Spektroskopie	408
32.4 Kernresonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie)	411
32.5 Massenspektroskopie	412
<i>Übungen zum Kapitel 32</i>	413
LÖSUNGEN DER ÜBUNGSAUFGABEN	415
33 Lösungen der Übungsaufgaben	416
ANHANG UND SACHREGISTER	435
34 Anhang	436
GHS: Das neue Kennzeichnungssystem für Chemikalien; Gefahrenpiktogramme (Gefahrensymbole) mit Signalwort und Erklärungen	436
Atommassen	438
Säurekonstanten	440
35 Sachregister	441
Abbildungsnachweis	448

Grundlagen



- 1 STOFFE BESTEHEN AUS KLEINSTEN TEILCHEN
- 2 ARTEN VON STOFFEN
- 3 ATOME, FORMELN UND GLEICHUNGEN
- 4 MODELLE DER ATOME
- 5 ORDNUNG IN DER VIELFALT DER ELEMENTE: DAS PERIODENSYSTEM
- 6 MOLEKÜLE, MOLEKULARE STOFFE

1 STOFFE BESTEHEN AUS KLEINSTEN TEILCHEN

1.1 Chemische Reaktionen

Stoff – der Gegenstand der Chemie

Womit beschäftigt sich eigentlich «die Chemie»? Welches sind ihre Aufgaben und Ziele? Kurz und etwas vereinfacht kann man sagen:

- Die Chemie untersucht Zusammensetzung, Aufbau und Veränderungen von Stoffen.
- Die Chemie ist die Wissenschaft von den Stoffen und ihren Veränderungen.

Zu den wichtigsten Aufgaben der Chemie gehört auch die Herstellung neuer Stoffe mit bestimmten erwünschten Eigenschaften: Autoreifen, Computerchips, Kunststoffbecher, Schmerztabletten, Glasscheiben, Waschmittel, Eisenbahnschienen, Farben, Düngemittel, fotografische Filme, Klebstoffe, Kochtöpfe, Baustoffe, Tinten aller Art, Duftstoffe, Brausepulver und noch vieles mehr.

Die Wissenschaft «Chemie» ist eine der jüngsten Naturwissenschaften. Ihr Name stammt aus dem Altertum und hängt wahrscheinlich mit dem ägyptischen Wort *chame*, «schwarz», zusammen. Man verfügte damals schon über gewisse chemische Kenntnisse, Ergebnisse handwerklicher Tätigkeiten. So kannten z.B. die Ägypter die Gewinnung von Farbstoffen aus Pflanzen und Tieren, die Bereitung von Bier und Es-

sig, die Glasherstellung und auch die Verwendung von Heilmitteln und Schminken. Gold, Silber und Kupfer wurden gewonnen und Bronze hergestellt (Bronzezeit, 2500 bis 1500 v. Chr.). Die Griechen trugen nur wenig zur Erweiterung chemischer Kenntnisse bei. Die griechische Naturwissenschaft beschränkte sich vor allem auf das Spekulieren und Philosophieren, denn für die Griechen galt das Wort von Aristoteles: «Gewerbliches, auf den Verdienst ausgerichtetes Schaffen führt zu niederer Sinnesart.»

Erst im Früh- und Hochmittelalter, bei den Arabern, entwickelte sich eine eigentliche chemische Technik. Die Araber entdeckten wichtige Stoffe, wie z.B. den Alkohol (*al kuhl arab.* = das Feine). Mit der Verbreitung arabischer Erkenntnisse in Europa entstanden auch in Deutschland, Frankreich und Italien die ersten chemischen «Laboratorien».

Schon damals machte man sich konkrete (wie es sich später zeigte allerdings unzutreffende) Vorstellungen über die Zusammensetzung von Stoffen. Man strebte aufgrund dieser Ideen vor allem danach, Gold aus anderen Metallen herzustellen. Geglückt ist dieses Vorhaben jedoch niemals! Wegen ihres geheimnisvollen, nicht selten auch betrügerischen Gebarens gerieten die «Alchemisten» (*al chemi arab.* = die Chemie) immer mehr in Verruf. Erst in der Neuzeit – etwa seit 1650 – entwickelte sich die eigentliche wissenschaftliche Chemie.



Abb. 1.1 Gleicher Stoff – verschiedene Gegenstände



Abb. 1.2 Gleichartige Gegenstände – verschiedene Stoffe

Um die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Stoffen zu ergründen oder um gezielt neue Stoffe herzustellen, geht der Chemiker in gleicher Weise vor wie andere Naturwissenschaftler auch: Er führt Experimente durch. Er beobachtet oder misst dabei Eigenschaften, Erscheinungen oder Veränderungen und zwar unter ganz bestimmten, festgelegten Bedingungen. Dazu einige Beispiele! Hält man einen Platindraht in eine Gasflamme, so beginnt er zu glühen. Nimmt man ihn aus der Flamme, so kühlt er sich ab und zeigt in seinen Eigenschaften keine Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand. Hält man dagegen ein Stück Magnesiumband in die Flamme (Magnesium ist ein silberweisses, leichtes, gut biegbares Metall), so verbrennt es unter intensiver, blendend weisser Flamme. Aus dem Metall ist ein spröder, weisser Stoff entstanden. Während das Platin beim Erhitzen als Stoff unverändert blieb, hat sich aus dem Magnesium ein neuer Stoff gebildet. Eine solche Stoffumwandlung wird als chemischer Vorgang bezeichnet.

Auch beim Erhitzen verschiedener Stoffe aus unserem Alltag treten chemische Vorgänge ein. Beispiele sind Zucker, Olivenöl, Fett, Bakelit, Holz, eine Aspirin-tablette, Papier, Weissmehl, Baumwolle u.a. Alle diese Stoffe verändern sich beim Erhitzen, manche rasch, andere langsamer. Einige verflüssigen sich zuerst, andere zersetzen sich sofort, Gase oder Flüssigkeiten werden frei. Bei allen bleibt schliesslich eine braunschwarze Masse zurück: Kohlenstoff. Aus allen Proben sind andere Stoffe (Gase, Flüssigkeiten, schliesslich Kohlenstoff) entstanden, d.h. überall sind chemische Vorgänge eingetreten.

- Bei einem chemischen Vorgang, einer «chemischen Reaktion», erfolgt eine Stoffumwandlung.
- Aus den Ausgangsstoffen, den Edukten (Reaktanten), entstehen neue Stoffe mit anderen Eigenschaften, die Produkte.

Um Stoffumwandlungen erkennen zu können, müssen die Eigenschaften der Ausgangs- und Endstoffe bekannt sein. Häufig unterscheidet man dabei zwischen «physikalischen»¹ und «chemischen» Eigenschaften. Die letzteren beziehen sich auf das Verhalten eines Stoffes bei chemischen Reaktionen (z.B. Brennbarkeit). Physikalische Eigenschaften sind z.B. Schmelz- und Siedetemperatur, Dichte, Brechungsindex, Farbe, Härte, Kristallform, elektrische und thermische Leitfähigkeit usw. Stimmen zwei Körper in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften überein, so bestehen sie aus demselben Stoff (derselben Substanz).

¹ Da die meisten physikalischen Eigenschaften stark von den äusseren Bedingungen (Temperatur, Druck) abhängen, müssen stets auch die Bedingungen angegeben werden, unter denen eine bestimmte Eigenschaft gemessen worden ist.



Abb. 1.3 Blick in ein Labor des Mittelalters. Das Gemälde «Der Alchemist» stammt von Jan Steen (1626–1679)

Woran erkennt man Stoffumwandlungen?

Stoffumwandlungen, chemische Reaktionen, bilden das Arbeitsgebiet der Chemie. Oft ist es aber gar nicht leicht, mit einfachen Mitteln zu erkennen, ob im konkreten Fall tatsächlich eine chemische Reaktion abgelaufen ist, oder ob sich nur der Zustand eines Stoffes verändert hat. Erhitzt man beispielsweise Wasser, so siedet es, wenn die Siedetemperatur erreicht ist. Der entstehende Dampf hat eine andere Dichte als das flüssige Wasser und verteilt sich – wiederum im Gegensatz zur Flüssigkeit – gleichmässig in einem Raum. Trotzdem betrachtet man den Dampf nicht als einen neuen Stoff. Er entspricht vielmehr einem anderen «Zustand» (genauer: Aggregatzustand) des Stoffes «Wasser». Das Verdampfen ist also kein chemischer Vorgang. Gibt man aber etwas Kochsalz in Wasser, so löst es sich. Die Lösung sieht aus wie Wasser, besitzt den typischen Salzgeschmack, leitet aber den elektrischen Strom viel besser und siedet bei einer höheren Temperatur als Wasser. Ist Salzwasser ein anderer Stoff als Wasser oder Salz?

Um solche Fragen entscheiden zu können, benötigen wir weitere Merkmale. Dies sollen einige Versuche zeigen.

Erhitzt man blaues Kupfersulfat in einem Reagenzglas, so bildet sich allmählich ein weissgraues Pulver (weisses Kupfersulfat). Im oberen Teil des Glases schlägt sich Wasser nieder. Umgekehrt lässt sich durch Zutropfen von Wasser aus der weissgrauen Substanz unter starker Wärmeentwicklung wieder blaues Kupfersulfat herstellen. Die beiden Versuche zeigen, dass diese Vorgänge von einem Energieumsatz begleitet sind und sich umkehren lassen. Diese Feststellung lässt sich verallgemeinern:

Chemische Reaktionen erkennt man

- an einer Stoffumwandlung: aus den Ausgangsstoffen (Edukte) entstehen Endstoffe (Produkte) mit neuen Eigenschaften,
- am Energieumsatz,
- an der Umkehrbarkeit.

Entweder wird bei einem chemischen Vorgang Energie (Wärme, Licht, mechanische oder elektrische Energie) frei, oder es wird Energie verbraucht. Im ersten Fall spricht man von exothermen Vorgängen. Die Endstoffe (Produkte) sind energieärmer als die Ausgangsstoffe (Edukte). Die bei der Reaktion frei gewordene Energie war vorher als «chemische Energie» in den Edukten gespeichert. Umgekehrt sind die Produkte energiereicher als die Ausgangsstoffe, wenn man während der Reaktion dauernd Energie zuführen muss (endotherme Reaktion). Die zugeführte Energie wird diesmal von den Endstoffen aufgenommen.

Da es sich beim Energieumsatz um eine Differenz handelt, wird die Reaktionsenthalpie² (Reaktionswärme) mit ΔH symbolisiert. Dabei steht das Δ (Delta) für Differenz und H für engl. heat = Wärme. Die Reaktionsenthalpie, die man experimentell ermittelt, wird in Kilojoule (kJ) angegeben. Bei exothermen Reaktionen erhält der gemessene Zahlenwert ein negatives ($\Delta H < 0$, die Stoffe verlieren Energie), bei endothermen Vorgängen ein positives Vorzeichen ($\Delta H > 0$, die neu gebildeten Stoffe haben Energie aufgenommen).

²Energien, die sich auf Messungen unter konstantem Druck beziehen, werden Enthalpien genannt. Die Reaktionswärme bezeichnet man deshalb als Reaktionsenthalpie.

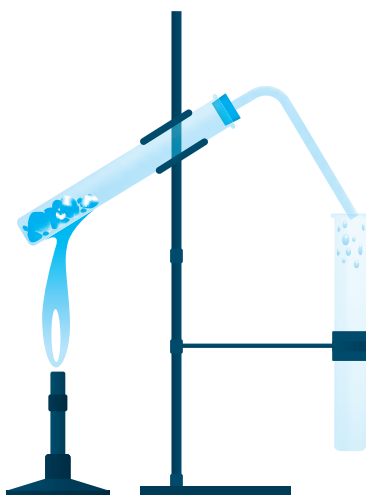


Abb. 1.4 Blaues Kupfersulfat wird beim Erhitzen weiss – im gekühlten unteren Reagenzglas sammeln sich im Ableitungsrohr Wassertropfen

- Das Symbol für den Energieumsatz einer chemischen Reaktion, die Reaktionsenthalpie, ist ΔH .
- Bei einer exothermen Reaktion wird Energie frei, die Produkte sind energieärmer als die Edukte (die innere Energie nimmt ab); $\Delta H < 0$.
- Bei einem endothermen Vorgang muss dauernd Energie zugeführt werden. Die Produkte sind energiereicher als die Edukte (die innere Energie nimmt zu); $\Delta H > 0$.

Obschon theoretisch alle chemischen Reaktionen umkehrbar sind, lässt sich ihre Umkehrung in der Praxis oft nicht leicht oder überhaupt nicht verwirklichen, da die dazu erforderlichen Bedingungen (hohe Temperatur oder Druck) nicht erreichbar sind. Die Natur zeigt uns jedoch, dass auch komplizierte Vorgänge in beiden Richtungen ablaufen können. Ein Beispiel ist die Photosynthese bzw. die Atmung. Kohlendioxid («Kohlendioxid») und Wasser werden von der grünen Pflanze mithilfe der Sonnenenergie in Traubenzucker («Glucose») und Sauerstoff überführt. Durch komplizierte Vorgänge bilden sich aus dem Traubenzucker schliesslich unsere Nahrungsmittel: Kohlenhydrate, Eiweisse und Fette. Bei der Atmung entstehen aus diesen Stoffen durch Reaktion mit dem Luftsauerstoff wiederum Kohlendioxid und Wasser, wobei Wärme frei wird.

Viele chemische Reaktionen laufen aber erst dann ab, wenn die Ausgangsstoffe (oder ein Ausgangsstoff) auf eine bestimmte Temperatur erwärmt werden (Beispiel: Verbrennen einer Kerze). Man sagt, dass die Edukte in diesem Fall zuerst «aktiviert» werden müssen; mit anderen Worten, es wird ihnen Aktivierungsenthalpie zugeführt. Die Aktivierungsenthalpie dient nur zum

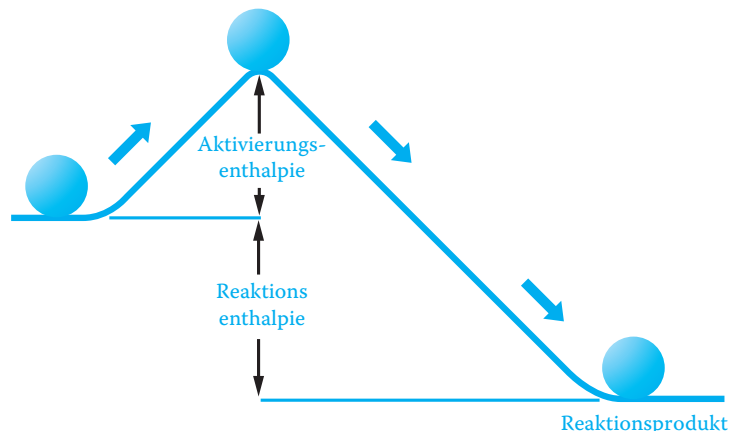


Abb. 1.5 Energieschema einer exothermen Reaktion. Die Aktivierungsenthalpie erscheint als «Berg»

Auslösen eines Vorgangs. Man kann sich vorstellen, dass die Aktivierungsenthalpie zur Beseitigung von «Hemmungen» notwendig ist, ähnlich etwa dem Lösen der Bremse eines Wagens, der auf einer abschüssigen Strasse steht.

Schliesslich ist es interessant, die Mengenverhältnisse zu studieren, in denen Stoffe an einer chemischen Reaktion teilnehmen. Lässt man z.B. verdünnte Salzsäure zu Natronlauge fliessen, die mit etwas Phenolphthalein versetzt worden ist, so tritt nach Zusatz einer ganz bestimmten Menge Salzsäure ein plötzlicher Farbumschlag ein. Verdoppelt man die Menge der eingesetzten Natronlauge, so ist auch die doppelte Menge Salzsäure nötig. Setzt man die Ausgangsstoffe nicht in den «richtigen» Mengenverhältnissen ein, so erfolgt kein vollständiger Umsatz, und es bleiben bestimmte Mengen der Ausgangsstoffe übrig. Da die Reaktion von Salzsäure mit Natronlauge eine chemische Reaktion ist, und da weiter die Ausgangsstoffe in ganz bestimmten Mengenverhältnissen miteinander reagieren, gilt die Aussage:

An chemischen Reaktionen nehmen die beteiligten Stoffe in ganz bestimmten Mengenverhältnissen teil.

Chemische Reaktionen lassen sich durch eine Wortgleichung beschreiben. Links eines Reaktionspfeils stehen die Ausgangsstoffe (Edukte) und rechts davon die Endstoffe (Produkte). Zwei oder mehr Edukte bzw. Produkte werden durch ein Pluszeichen verbunden:



1.2 Teilchen und Aggregatzustände

Stoffumwandlung, Energieumsatz und Umkehrbarkeit sind die wesentlichen Merkmale chemischer Reaktionen. Um dies zu verstehen, wollen wir zuerst zeigen, wie sich die Eigenschaften der verschiedenen Aggregatzustände eines Stoffes auf seinen Aufbau aus «kleinsten Teilchen» zurückführen lassen. In einem späteren Abschnitt (1.4) können wir uns dann der Frage zuwenden, worin das eigentliche Wesen einer chemischen Reaktion besteht.

Elemente und Atome, zwei uralte Ideen

Bereits im Altertum machte man sich Gedanken über den Aufbau der Materie. Aristoteles (384–322 v. Chr.), der Lehrer Alexanders des Grossen, lehrte, dass alle Stoffe aus vier «Grundstoffen» oder «Elementen» aufgebaut sind: Erde, Wasser, Feuer und Luft. Diese Elemente bedeuteten für ihn weniger etwas Stoffliches, sondern eher gewisse Eigenschaften. So galt Erde als Träger der Eigenschaften «kalt» und «trocken». Ein fester, trockener und kalter Körper musste demnach Erde enthalten. Ähnlich drückte das Wasser die Eigenschaften «kalt» und «feucht», das Feuer und die Luft die Eigenschaften «warm» und «trocken» bzw. «warm» und «feucht» aus. Nach Aristoteles entstehen die verschiedenartigen Stoffe durch Kombination der vier Elemente. Aristoteles war auch der Meinung, dass sich Elemente ineinander umwandeln lassen: Aus dem kalt-feuchten Wasser wird beim Verdunsten warm-feuchte Luft.

Die Elementenlehre von Aristoteles wurde während des ganzen Mittelalters akzeptiert und bildete die Grundlage für das Bestreben der Alchemisten, Metalle in Gold umzuwandeln. Erst zur Zeit von A. L. Lavoisier (1743–1794) wurde ein Element – wie wir es noch

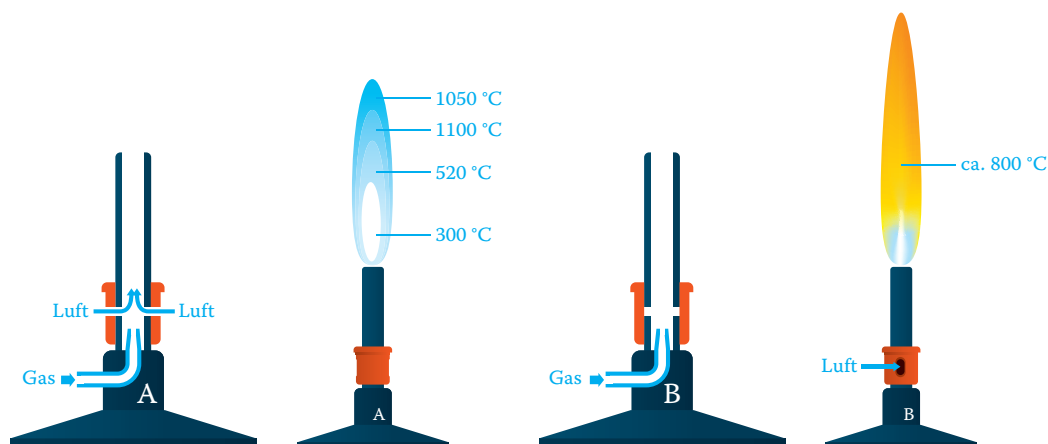


Abb. 1.6 Der Gasbrenner. Die Flamme wird bei geschlossener Luftzufuhr entzündet. Es entsteht eine leuchtende, flackernde Flamme. Das Gas verbrennt dabei unvollständig; kleinste Kohlenstoff-Teilchen glühen auf und verursachen das Leuchten (B). Durch Regulierung der Luftzufuhr kann die Flamme entleuchtet werden. Die Verbrennung verläuft dann vollständig und liefert eine heissere Flamme (A)

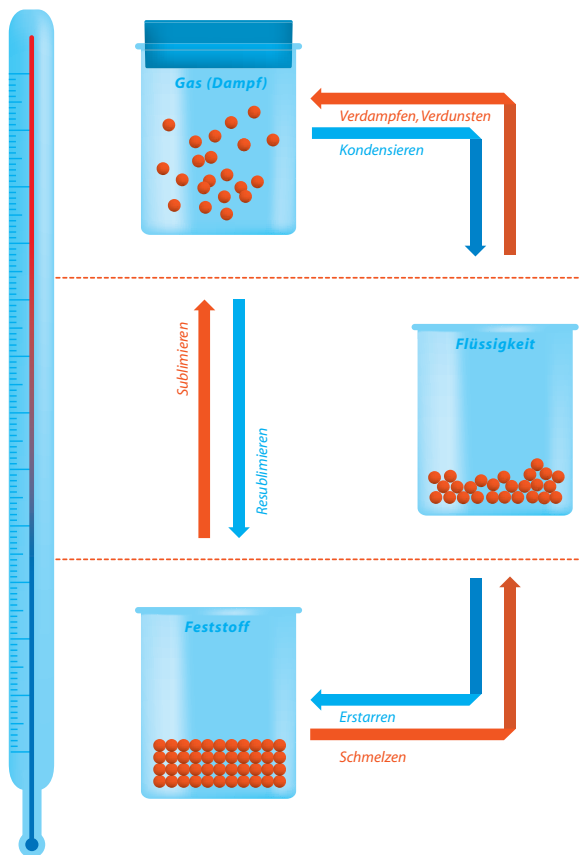


Abb. 1.7 Veranschaulichung der Aggregatzustände durch das Teilchenmodell

heute tun – als ein Stoff bezeichnet, den man durch chemische Vorgänge nicht mehr in andere Stoffe auf-trennen kann. Kohlenstoff ist ein solches Element, eine «Elementarsubstanz», wie man oft auch sagt.

Ein Element kann durch chemische Vorgänge nicht mehr in andere Stoffe aufgetrennt werden.

Im Gegensatz zur Elementenlehre von Aristoteles ver-traten Leukipp und vor allem sein Schüler Demokrit (460–371 v. Chr.) die Auffassung, dass alle Stoffe aus kleinsten, nicht mehr weiter teilbaren Teilchen, den «Atomen», aufgebaut sind, wobei sie aber alle aus derselben «Urmaterie» bestehen. Atome verschiedener Stoffe unterscheiden sich voneinander durch ihre Grösse und Gestalt. Nach Demokrit existieren nur Atome und leerer Raum. Die verschiedenen Körper bilden sich da-durch, dass Atome in verschiedener Zahl und Lage zu grossen Verbänden zusammentreten. Die Materie baut sich nach Demokrit letztlich aus einer «Urmaterie» auf, nach Aristoteles jedoch aus vier «Elementen».

Beide Vorstellungen enthalten einen wahren Kern. Wie sie sich miteinander vereinbaren lassen, werden wir im Kapitel 2 zeigen. Zunächst benützen wir die Vorstel-lung vom Aufbau der Stoffe aus «kleinsten Teilchen» (Teilchenmodell) zur Deutung des Verhaltens eines Stoffes in seinen drei Aggregatzuständen.

Ein Modell der Aggregatzustände

Ein fester Stoff hat eine ganz bestimmte Form und da-mit auch ein bestimmtes Volumen. Um ihn zu zerbren-chen oder zu zerschneiden, muss Energie aufgewendet werden, z.B. durch Muskelkraft oder eine Maschine, wie etwa eine elektrische Säge. Wir müssen deshalb annehmen, dass sich die kleinsten Teilchen im festen Zustand relativ stark anziehen und zwar umso mehr, je härter der betreffende Stoff ist.

Diese Anziehungskräfte bewirken, dass sich die Teil-chen regelmässig anordnen und einen festumgrenz-ten Raum (das Volumen) einnehmen. Im sichtbaren Bereich widerspiegelt sich die Teilchenanordnung z.B. in der geometrisch regelmässigen Form von Kristallen (Abb. 1.8) und in der Tatsache, dass sich viele Kristalle oft entlang bestimmter Flächen spalten lassen: Spaltflä-chen sind Ebenen mit besonders grossem Zusammen-halt, die dicht mit Teilchen besetzt sein müssen.



Abb. 1.8 Schöne, regelmässige Kristalle von Granat (links) und Pyrit (rechts)

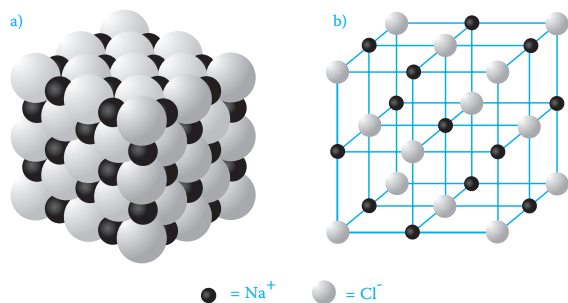


Abb. 1.9 Anordnung der Teilchen im Gitter von Kochsalz
a) zeigt die Packung der Teilchen, b) zeigt ihre geometrische Anordnung

Eine solche bestimmte, regelmässige räumliche Anordnung von Teilchen bezeichnet man als Kristallgitter oder kurz als Gitter (Abb. 1.9). Die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen nennt man Gitterkräfte.

In einem Idealkristall ist die geometrische Ordnung der Teilchen völlig regelmässig. Die regelmässige Ordnung ist das typische Merkmal eines kristallinen Stoffes. In einem «amorphem», d.h. nicht-kristallinen Stoff, sind zwar die Teilchen auch fest aneinander gebunden, doch ist ihre Ordnung nicht regelmässig (Beispiel: Glas, Abschnitt 25.3).

Im flüssigen Zustand nimmt eine bestimmte Stoffmenge zwar noch ein bestimmtes Volumen ein. Ihr Zusammenhalt ist jedoch geringer und eine feste Form fehlt. Die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen sind noch wirksam. Sie sind aber schwächer als die Gitterkräfte im festen Zustand. Eine regelmässige Ordnung der Teilchen besteht höchstens im «Nahbereich».

Im Gaszustand schliesslich besteht überhaupt kein Zusammenhalt. Zwischen den Gasteilchen wirken keine Kräfte. Eine bestimmte Gasmenge kann jedes beliebige Volumen einnehmen. Setzt man das Gas aber unter hohen Druck, so nähern sich die Teilchen einander immer mehr, bis die Anziehungskräfte zwischen ihnen wirksam werden: das Gas verflüssigt sich³.

Fester Zustand:

- Starke Anziehungskräfte zwischen den Teilchen (Gitterkräfte).
- Teilchen zu regelmässigen Gittern geordnet, ausser bei amorphen Stoffen.

Flüssiger Zustand:

- Anziehungskräfte zwischen den Teilchen schwächer.
- Im Nahbereich eine gewisse, wechselnde Ordnung.

Gaszustand:

- Keine Kräfte zwischen den Teilchen wirksam, keine Ordnung.

³ Was hier beschrieben wird, ist ein ideales Gas. Bei realen Gasen wirken zwischen den Teilchen schwache Anziehungskräfte, die für genauere Betrachtungen nicht vernachlässigt werden dürfen.

Wie untersucht man die Struktur von Kristallen?

Von den weitaus meisten festen Stoffen ist der Kristallaufbau – die geometrische Anordnung der Teilchen im Gitter – heute genau bekannt. Wie konnte man dies herausfinden, da sich die kleinsten Teilchen erst seit kurzer Zeit mit dem «Raster-Tunnel-Mikroskop» sichtbar machen lassen?

Zu diesem Zweck musste man einen Effekt benutzen, der durch die Anordnung der Teilchen im Gitter verursacht wird: die Beugung von Röntgenstrahlen. Schickt man Licht durch ein enges Gitter, so lassen sich hinter dem Gitter Beugungsfiguren beobachten: ganz bestimmte Muster von hellen und dunklen Zonen. Dieses Ergebnis beruht darauf, dass die am Gitter gebeugten Lichtwellen sich auslöschten, wenn «Wellenberge» auf «Wellentäler» treffen bzw. sich verstärken, wenn es zu einer Addition von «Wellenbergen» kommt. Voraussetzung für das Zustandekommen eines solchen Beugungsbildes ist, dass die Wellenlänge des Lichts von ähnlicher Grösse ist wie die «Maschen» des Gitters.

Röntgenstrahlen sind nun nichts anderes als Licht von sehr kurzer Wellenlänge. Da die Teilchenabstände im Gitter eines festen Stoffes von ähnlicher Grösse sind wie die Wellenlängen der Röntgenstrahlen, wirkt ein Kristallgitter wie ein (dreidimensionales) Beugungsgitter. Man erhält somit Beugungsfiguren, wenn man einen Kristall mit Röntgenlicht durchstrahlt. Durch Ausmessen dieser Beugungsfiguren, der Abstände zwischen den Flecken oder Linien sowie ihrer Intensität, lässt sich die räumliche Struktur des Gitters erschliessen.

Eine Erweiterung der Teilchenvorstellung

Gibt man in einen Standzylinder einige Tropfen Brom (eine schwarzbraune Flüssigkeit mit der Siedetemperatur $t_b = 59^\circ\text{C}$) und bedeckt den Zylinder mit einer Glasplatte, so sieht man, wie die Flüssigkeit verdunstet. Der braune Dampf⁴ erfüllt den Behälter nach einiger Zeit völlig gleichmässig, obschon er schwerer ist als Luft (Abb. 1.10). Ein Gas verteilt sich also gleichmässig im Raum, wenn keine äusseren Einwirkungen (Strömungen) wirksam sind.

Einen ganz ähnlichen Effekt kann man beobachten, wenn einige Tropfen einer intensiv riechenden Flüssigkeit (Ether, Parfum) auf einen Tisch gegossen werden: Nach kurzer Zeit ist der Geruch im ganzen Raum feststellbar.

⁴ Man spricht von «Dampf», wenn ein Stoff, der bei Raumtemperatur fest oder flüssig ist, in den Gaszustand übergeht: Wasserdampf, Schwefeldampf, Quecksilberdampf usw. Ein «echtes» Gas ist bei Raumtemperatur bereits gasförmig. Dämpfe und Gase unterscheiden sich jedoch in ihrem Verhalten nicht.



Abb. 1.10 Verdampfendes Brom füllt nach und nach den gesamten Zylinder, eine Folge der Diffusion

Zur Erklärung dieser Beobachtung müssen wir annehmen, dass sich die Teilchen eines Gases in ständiger, regelloser und ungeordneter Bewegung befinden. Ein einzelnes Teilchen bewegt sich dabei geradlinig und ändert seine Richtung nur beim Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen. Versuche zeigen weiter, dass die Ausbreitung eines Gases (seine «Diffusion») umso rascher erfolgt, je höher die Temperatur ist. Mit anderen Worten, die Teilchen bewegen sich bei höheren Temperaturen schneller. Zuführen von Wärme bewirkt also eine Erhöhung der Teilchengeschwindigkeit: die Teilchen erhalten mehr Bewegungsenergie. Was wir als Wärme empfinden, ist nichts anderes als Bewegungsenergie (kinetische Energie; E_k) kleinster Teilchen.

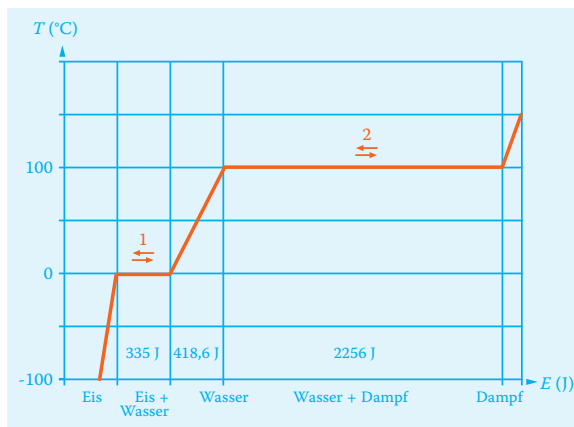


Abb. 1.11 Temperaturkurve und Energieverbrauch (pro Gramm) beim Erwärmen von Wasser (1 Schmelztemperatur, 2 Siedetemperatur). Das Verdampfen von Wasser braucht rund 7 mal mehr Energie als das Schmelzen von Eis

Viele Stoffe lösen sich in Flüssigkeiten und verteilen sich gleichmässig darin. Offenbar bewegen sich auch die Teilchen einer Flüssigkeit, allerdings langsamer als im Gaszustand, da sie stärker aneinander gebunden sind. Diese Eigenbewegung der Flüssigkeitsteilchen ist für die Verteilung des gelösten Stoffs verantwortlich. Sogar im festen Zustand treten Pendelbewegungen oder Schwingungen der Teilchen um eine Ruhelage auf.

Aggregatzustandsänderungen

Erwärmt man einen festen Stoff, so wächst die Bewegungsenergie der Teilchen. Sie bewegen sich stärker um ihre Ruhelage, ihr Platzbedarf wird grösser: der Stoff dehnt sich aus. Weiteres Erwärmen bewirkt eine immer raschere Teilchenbewegung, bis beim Erreichen der Schmelztemperatur (t_m) die Gitterordnung zusammenbricht. Die Teilchen selbst verändern sich dabei nicht. Auch eine Flüssigkeit dehnt sich bei weiterem Erwärmen aus, bis schliesslich die Teilchenbewegung so heftig wird, dass sich die Teilchen völlig voneinander lösen: der Stoff siedet. Je grösser die zwischen den Teilchen wirkenden Kräfte sind, desto mehr Energie ist nötig, um die Gitterordnung zu zerstören bzw. um die Teilchen voneinander zu trennen. Umgekehrt gesagt: Je höher Schmelz- und Siedetemperatur einer Substanz liegen, desto stärker sind die zwischen ihren kleinsten Teilchen wirkenden Kräfte.

Zur Zerstörung der festen Gitterordnung muss beim Schmelzen ein bestimmter Wärmebetrag aufgewendet werden, die sogenannte Schmelzwärme. Ebenso ist zur Überwindung der Anziehungskräfte beim Sieden eine bestimmte Wärmemenge nötig, die Verdampfungswärme. Trotz weiterem Erhitzen (weiterer Wärmezufuhr) steigt daher während des Schmelzens und Siedens die Temperatur so lange nicht weiter an, bis die gesamte Substanz geschmolzen bzw. verdampft ist (Abb. 1.11). Umgekehrt wird während der Kondensation eines Gases zur Flüssigkeit und beim Erstarren («Gefrieren») einer Flüssigkeit jeweils wieder die entsprechende Wärmemenge frei. Tatsächlich beobachtet man einen

Die Brownsche Bewegung

Ein Phänomen, das die Auswirkung der Teilchenbewegung indirekt sichtbar macht, ist die sogenannte Brownsche Bewegung von kleinen, in einem Gas oder einer Flüssigkeit suspendierten Teilchen wie z.B. Rauchteilchen oder Bakterien. Betrachtet man z.B. Tabakrauch unter dem Mikroskop bei Dunkelfeldbeleuchtung, so beobachtet man, wie sich die kleinen Rauchteilchen in andauernder, zitternder Bewegung befinden. Da die Stösse der Gasteilchen auf ein Rauchteilchen bald von der einen, bald von der anderen Seite zahlreicher sind, wird es dauernd «herumgestossen» und bewegt sich.

Temperaturanstieg, wenn eine unterkühlte Flüssigkeit in einem wärmeisolierten Gefäß erstarzt.

Nun verdunstet eine Flüssigkeit in einem offenen Gefäß bekanntlich schon vor dem Erreichen der Siedetemperatur. Dies rührt davon her, dass bei ein und derselben Temperatur niemals alle Teilchen die genau gleiche Bewegungsenergie besitzen. Es gibt immer energieärmere und energiereichere Teilchen. Ihre durchschnittliche Bewegungsenergie entspricht einer bestimmten Temperatur. Gelangt nun ein energiereicheres Teilchen an die Oberfläche der Flüssigkeit, so kann es sich aus seiner Umgebung losreißen und in den Gaszustand übergehen: die Flüssigkeit verdunstet.

In einem geschlossenen Gefäß können sich die Teilchen im Gasraum nicht beliebig weit voneinander entfernen. Ein Gasteilchen, das sich der Flüssigkeitsoberfläche nähert, kann von den Flüssigkeitsteilchen auch wieder «eingefangen» werden. Wir haben dann an der Flüssigkeitsoberfläche eine Art «Gleichgewicht»: Ständig verlassen Teilchen die Flüssigkeit, und ständig gehen andere Teilchen wieder in die Flüssigkeit über (Abb. 1.12).

Eine überraschende Folgerung aus der Teilchenvorstellung

Die Teilchen eines Gases bewegen sich regellos im Raum, wobei sie häufig zusammenstossen oder auf die Gefäßwand prallen. Diese erfährt dadurch eine Kraft, d.h. das Gas übt auf die Wand einen Druck aus. Die mittlere Bewegungsenergie der Gasteilchen ist dabei der (absoluten) Temperatur⁵ proportional. Bei gleicher Temperatur besitzen die Teilchen verschiedener Gase im Mittel also dieselbe kinetische Energie $m \cdot v^2/2$. Teilchen von geringerer Masse bewegen sich rascher als schwere Teilchen. Die Ausbreitung eines Gases bzw. die Diffusion eines Gases durch poröse Wände erfolgt deshalb umso schneller, je geringer die Masse der Gasteilchen ist.

Der Gasdruck ist umso grösser, je mehr Teilchen im Mittel gleichzeitig auf die Wände prallen und je grösser ihre kinetische Energie ist. Er steigt deshalb mit zunehmender Teilchenzahl im gegebenen Volumen (mit zunehmender «Teilchenkonzentration») und mit zunehmender Temperatur.

Betrachten wir nun zwei Behälter von gleichem Volumen, die mit verschiedenen Gasen gefüllt sind. Beide Gase stehen unter demselben Druck und besitzen dieselbe Temperatur. Da der Gasdruck nur von der durchschnittlichen Bewegungsenergie der Teilchen (die in beiden Fällen gleich ist) und von der Teilchenzahl pro Volumen abhängt, muss die Anzahl der Teilchen in den beiden (gleich grossen) Behältern gleich sein.

⁵Die absolute Temperatur wird in Kelvin (K) gemessen. 0 °C entspricht einer absoluten Temperatur von 273 K, 100 °C entsprechen 273 + 100 = 373 K (vgl. Abschnitt 3.7).

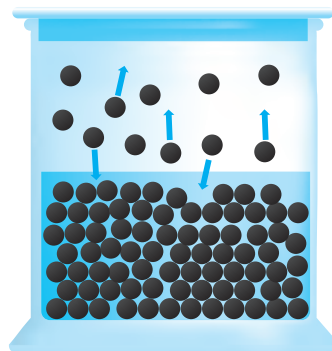


Abb. 1.12 Gleichgewichtszustand beim Verdunsten. In einem abgeschlossenen Gefäß stellt sich bei jeder Temperatur ein bestimmtes Mengenverhältnis zwischen dem Stoff in flüssiger und gasförmiger Form ein

Wir gelangen somit zu dem auf den ersten Blick überraschenden Ergebnis:

Gleiche Raumteile verschiedener Gase enthalten bei gleichen Bedingungen gleich viele Teilchen.

Diese Aussage wurde bereits 1811 von A. Avogadro (1776–1856) als Hypothese (Annahme) formuliert. Sie ist aber, wie wir gezeigt haben, nichts anderes als die logische Folge aus der Teilchenvorstellung, angewendet auf die Gase (vgl. Abschnitt 3.7).

Der Lösevorgang

Das Lösen eines Feststoffs in einer Flüssigkeit kann man sich ganz ähnlich vorstellen wie das Verdunsten einer Flüssigkeit. Allerdings müssen dabei die Gitterkräfte im festen Stoff überwunden werden. Dazu ist gewöhnlich eine bestimmte Energiezufuhr nötig. Wenn aber zwischen den Teilchen des Lösemittels und den zu lösenden Teilchen des Festkörpers Kräfte von ähnlicher Art und Stärke wirken wie die Gitterkräfte, so löst sich der Feststoff auch ohne Energiezufuhr. Ziehen sich die Lösemittelteilchen und die zu lösenden Teilchen wenig an, so erfolgt praktisch kein Lösen. Dies gilt z.B. für Zucker und Benzin: Zucker löst sich in Benzin kaum.

An den Ecken und Kanten eines Feststoffs ist die Zahl der um ein bestimmtes Teilchen angeordneten Nachbarpartikel kleiner als z.B. auf einer Fläche. Die an den Ecken und Kanten sitzenden Teilchen werden deshalb weniger stark gebunden: Das Lösen beginnt immer zuerst an den Ecken und Kanten. Der Lösevorgang wird beschleunigt durch:

Zerkleinern des zu lösenden Stoffs: Die Anzahl der Ecken und Kanten wird dadurch vergrößert.

Schütteln: Die Abwanderung der gelösten Teilchen wird erleichtert.

Erwärmen: Die Teilchen des Gitters bewegen sich rascher, sodass sich ein Teilchen leichter losreißen kann.

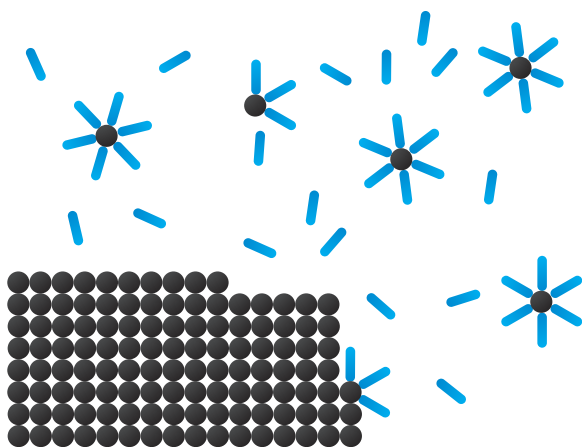


Abb. 1.13 Lösevorgang im Modell. Die zu lösenden Teilchen werden von Lösemittelteilchen umlagert und verteilen sich in der Lösung

Eine bestimmte Menge Lösemittel kann aber nicht beliebig viel festen Stoff lösen. Die Lösung ist gesättigt, wenn sie bei der betreffenden Temperatur die maximal mögliche Menge des gelösten Stoffs enthält. Bringt man in eine gesättigte Lösung noch mehr des gelösten Stoffs, so bleibt der Überschuss ungelöst. An der Oberfläche des festen Stoffs stellt sich dann ein ähnlicher Zustand ein, wie wir ihn für das Verdunsten einer Flüssigkeit in einem geschlossenen Gefäß kennengelernt haben. Durchschnittlich gehen gleich viele Teilchen vom festen Stoff in die Flüssigkeit über wie umgekehrt aus der Flüssigkeit in den festen Stoff.

1.3 Naturwissenschaftliches «Erklären»; das allgemeine Teilchenmodell

Die Naturwissenschaften haben die Aufgabe, die gesamte uns umgebende belebte und unbelebte Natur zu beschreiben (ihre Erscheinungen zu ordnen und zu klassifizieren) und die Naturvorgänge verständlich zu machen, d.h. sie zu «erklären». Zu diesem Zweck werden Naturerscheinungen beobachtet, untersucht und beschrieben. Sehr häufig werden auch Beobachtungen an ausgewählten Objekten unter bestimmten, willkürlich festgelegten und wiederholbaren Bedingungen angestellt, d.h. es werden Experimente ausgeführt.

Oft ist die Untersuchung der interessierenden Gegenstände selbst unmöglich, weil sie zu weit entfernt oder für eine direkte Untersuchung zu klein sind (Himmelskörper; kleinste Teilchen der Stoffe). In allen solchen Fällen muss die Wissenschaft Wege finden, die indirekt zum Ziel führen. Anders gesagt, es muss versucht werden, das uns Unzugängliche in eine logische Abhängigkeit von etwas Zugänglichem zu bringen, welches beobachtet oder gemessen wird, sodass das darin ver-

borgene, gesuchte Ergebnis gewissermassen rückwärts erschlossen werden kann. Dies ist in der Praxis ein oft mühseliges, die Geduld und die Denkfähigkeit hart beanspruchendes Unterfangen. Ein auf solchen Umwegen erhaltenes Resultat kann aber genauso zuverlässig sein wie ein unmittelbar auf direktem Weg gewonnenes Ergebnis.

Experimente führen zu einer Anhäufung von Beobachtungsmaterial, von Daten und Zahlen. Allgemeine Feststellungen, die darauf gegründet sind, nennt man ein Gesetz (z.B. Fallgesetz, Ohmsches Gesetz usw.). Ein Gesetz gibt nur eine Beschreibung von Erscheinungen, kann sie jedoch nicht deuten. Die Wissenschaft darf dabei aber nicht stehen bleiben. Ihr Ziel ist es, möglichst viele Erscheinungen miteinander logisch zu verknüpfen, d.h. sie zu erklären. Zu diesem Zweck muss man eine Hypothese (Annahme) einführen (ersinnen). Verwendet man dabei Begriffe oder Vorstellungen aus anderen Erfahrungsbereichen (z.B. aus dem Alltag), so entwickelt man ein Modell und benützt dieses, um bestimmte Phänomene oder Gesetze auf anschauliche Weise beschreiben zu können. In der Regel lassen sich aus solchen Modellen gedankliche Folgerungen ziehen und durch weitere, neue Experimente nachprüfen. Vielleicht wird damit die Folgerung bestätigt, vielleicht muss aber das Modell verbessert oder sogar völlig aufgegeben werden. Bei Modellvorstellungen kann es sich also niemals um «ewig gültige Wahrheiten» handeln. Sie unterliegen Wandlungen entsprechend dem Fortschreiten der Erkenntnis. «Wahrheit» liegt einzig in den Aussagen sorgfältig und exakt durchgeführter Experimente. «Nur das Experiment ist schlüssig, niemals die unbewiesene Behauptung» (R. Boyle, 1627–1691).

Im vorhergehenden Abschnitt wurde an einfachen Beispielen der Weg aufgezeigt, den der Chemiker beschreitet, wenn er zu allgemeinen Aussagen über die Materie kommen will. Charakteristisch ist dabei der dauernde Wechsel zwischen der stofflichen Ebene (Experiment; Sinneswahrnehmung) und der submikroskopischen Ebene (Gedankentätigkeit; Modelle). Die Annahme kleinster Teilchen lieferte eine modellhafte Vorstellung der Aggregatzustände und des Lösevorgangs. Damit ist ein besseres Verstehen der beobachteten Phänomene möglich geworden. In diesem Zusammenhang spricht man vom allgemeinen Teilchenmodell.

1.4 Chemische Reaktionen und allgemeines Teilchenmodell

Ein seit den Anfängen der Chemie schwer zu lösendes Problem bestand darin, dass in den aus mehreren Elementen bestehenden Stoffen («Verbindungen»; siehe Abschnitt 2.1) die Teilchen der Elemente noch irgendwie enthalten sein müssen, dass aber die Produkte ganz

andere Eigenschaften als die Elemente besitzen. Um diese Schwierigkeit verstehen zu können, wollen wir zuerst das Element Kohlenstoff betrachten.

Die Erscheinungsformen von Kohlenstoff

Kohlenstoff existiert in drei Formen (Modifikationen), die sich in ihren Eigenschaften sehr stark voneinander unterscheiden: Grafit, Diamant und die erst vor wenigen Jahren bekannt gewordenen Fullere.

Grafit (Abb. 1.15) ist schwarz, metallähnlich glänzend und weich; er leitet den elektrischen Strom. Grafitkristalle sind ausgesprochen blättrig spaltbar. Grafit wird in der Technik als sehr wärmebeständiges Schmiermittel, für gewisse elektrische Leiter und – mit Ton zusammen gebrannt – für Bleistiftminen benützt. Letztere Verwendung hat ihm den Namen gegeben (gr. *graphein* = schreiben). Diamant (Abb. 1.14) dagegen, der härteste natürliche Stoff, ist farblos und durchsichtig, glänzt wie Glas und leitet den elektrischen Strom nicht. Seine Kristalle lassen sich nur mässig leicht spalten. Durch das Schleifen von Diamanten erhalten diese einen sehr starken Glanz («Brillant») und zählen deshalb und aufgrund ihrer Seltenheit zu den kostbarsten Edelsteinen. Sowohl Grafit wie Diamant lassen sich nur bei extrem hohen Temperaturen schmelzen. Die Fullere schliesslich sind farblose, weiche, feste Stoffe, die den elektrischen Strom ebenfalls nicht leiten, aber schon unterhalb von 100 °C schmelzen.

Dass es sich bei diesen so ganz verschiedenen Stoffen um Kohlenstoff handelt, lässt sich durch die gegenseitige Umwandlung zeigen, bei der kein weiterer Stoff hinzutritt oder entweicht. Diamant geht langsam in schwarzes Grafitpulver über, wenn man ihn unter Luft-

abschluss⁶ auf etwa 1500 °C erhitzt. Die Umwandlung von Grafit in Diamant hingegen ist bedeutend schwieriger. Sie ist erstmals 1953 in den USA gelungen und wird heute zur Herstellung von Industriediamanten (für Bohrer, Schneidwerkzeuge, Nagelfeilen usw.) verwendet. Man setzt dabei Grafitpulver bei 1500 °C unter sehr hohem Druck (50 000-100 000 bar). Bei diesen Bedingungen wandelt sich Grafit langsam in Diamant um, wobei kleine Diamantkristalle wachsen. Fullere wurden beim Verdampfen von Grafit im Laserstrahl im dabei entstehenden Russ gefunden. Nach verschiedenen Meldungen lassen sich einzelne von ihnen bei Raumtemperatur und mässig hohem Druck in Diamant umwandeln.

Die auffallenden Unterschiede der Kohlenstoff-Modifikationen lassen sich durch ihre unterschiedliche Struktur erklären. So bilden die Kohlenstoff-Teilchen (Kohlenstoff-Atome) im Grafit ebene Schichten, wobei jeweils sechs Teilchen ein regelmässiges Sechseck formen oder, anders ausgedrückt, ein Kohlenstoff-Atom von drei anderen umgeben ist (Abb. 1.16). Viele solche Schichten sind in relativ grossen Abständen übereinander gelagert. Weil wegen der grossen Abstände die anziehenden Kräfte nur klein sind, sind diese Schichten leicht zueinander verschiebbar (Bleistift!).

Im Diamant dagegen ist jedes Kohlenstoff-Atom tetraedisch von vier anderen umgeben (Abb. 1.16). Ihre Abstände sind klein, die Anziehungskräfte entsprechend stark. Die hohe Schmelztemperatur von Diamant (etwa stark

⁶ An der Luft würde Diamant bei einer Temperatur von etwa 1500 °C langsam verglühen.



Abb. 1.14 Ein Rohdiamant ist noch recht unscheinbar und muss erst geschliffen werden, damit er als Brillant Verwendung findet

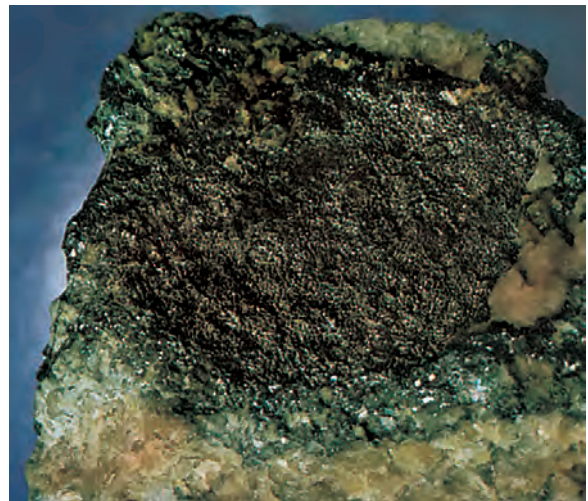


Abb. 1.15 Grafit wird als grauschwarzer Klumpen z.B. im Bayerischen Wald gefunden

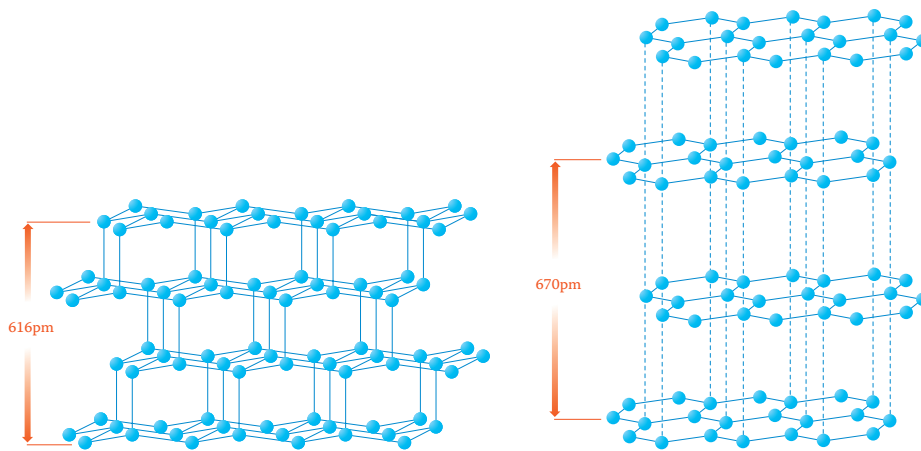


Abb. 1.16 Im Graphit (rechts) bilden die Kohlenstoff-Atome ebene Schichten. Zwischen den Schichten wirken nur schwache Kräfte. Im Diamant (links) ist jedes Kohlenstoff-Atom mit vier anderen Atomen verbunden. Die Atome bilden gewellte Schichten. Auch zwischen den Schichten wirken starke Kräfte

3500 °C) deutet auf die starken anziehenden Kräfte hin, ebenso die hohe Härte.

In den Fullerenen schliesslich bilden die Kohlenstoff-Atome in sich abgeschlossene Teilchen aus einer beschränkten, aber bestimmten Zahl von Atomen («Moleküle»), die auch im Gitter des festen Zustands vorhanden sind und dann die «Gitterteilchen» bilden. Das bestuntersuchte Fullerene besteht aus 60 Kohlenstoff-Atomen und gleicht in seinem Aufbau einem Fussball (Abb. 1.17). Es gibt aber noch eine Reihe weiterer, ähnlicher Moleküle, von denen dasjenige mit 70 Kohlenstoff-Atomen als «Rugbyball» bezeichnet wird.

Die Erscheinungsformen von Kohlenstoff geben uns einen wichtigen Hinweis, welche Veränderungen im Verlaufe einer chemischen Reaktion «auf der Teilchenebene» auftreten. Es ist müssig zu fragen, wie kleinste Kohlenstoff-Teilchen aussehen und welche spezifischen Eigenschaften sie besitzen. Erst ein Kollektiv dieser Teilchen führt zu messbaren Eigenschaften wie Schmelztemperatur, Siedetemperatur, Härte usw. Die Stoffeigenschaften sind damit weitgehend abhängig von der räumlichen Anordnung der Stoffbausteine. Die gegenseitige Umwandlung der Kohlenstoff-Modi-

fikationen zeigt uns ausserdem, dass im Verlauf dieses Vorgangs anziehende Kräfte verändert werden. Dies erklärt den Energieumsatz, der für jede chemische Reaktion charakteristisch ist.

Graphit, Diamant und die Fullerene sind aus den gleichen Teilchen (Kohlenstoff-Atomen) aufgebaut, die in den drei Stoffen unterschiedlich angeordnet sind. Solche Beispiele sind jedoch selten. Die Eigenschaften vieler Stoffe weisen nämlich darauf hin, dass sich bei chemischen Reaktionen die kleinsten Teilchen der Ausgangsstoffe irgendwie «verändert» haben müssen. Insbesondere gilt dies bei der Bildung von Verbindungen aus Elementen (s.u.). Diese Veränderungen, die wir später ausführlich erläutern, werden bei der Umkehrung der betreffenden Reaktion rückgängig gemacht.

Das allgemeine Teilchenmodell führt uns somit zu einem tieferen Verständnis chemischer Reaktionen:

Das eigentliche Wesen eines chemischen Vorgangs besteht darin, dass sich die kleinsten Teilchen verändern und umgruppieren. Anziehende Kräfte werden dabei überwunden und neue werden wirksam.



Abb. 1.17 Zwei Fullerene-Moleküle: C_{60} und C_{70} : Fussball aus Fünf- und Sechsecken

ÜBUNGEN ZUM KAPITEL 1

- 1.1 Woran lassen sich chemische Reaktionen erkennen?
- 1.2 Nennen Sie einige Ihnen aus dem Alltag bekannte chemische Reaktionen.
- 1.3 Welche Reaktionen von Übung 1.2 sind exotherm, welche endotherm?
- 1.4 Beschreiben Sie die Fotosynthese (Assimilation der grünen Pflanze) mit einer Wortgleichung.
- 1.5 Wie lässt sich die Struktur von Kristallen ermitteln?
- 1.6 Wie kann man die Teilchenbewegung indirekt sichtbar machen?
- 1.7 Begründen Sie, weshalb der Druck in einem Fahrradschlauch steigt, wenn dieser der Sonnenhitze ausgesetzt wird.
- 1.8 Gibt man einige Kristalle der violettschwarzen Substanz Kaliumpermanganat in einen mit Wasser gefüllten Standzylinder und lässt diesen einige Tage ruhig stehen, so hat sich die Flüssigkeit gleichmässig violett gefärbt. Geben Sie dafür eine Erklärung.
- 1.9 Betritt ein Brillenträger im Winter einen warmen Raum, so beschlagen sich die Brillengläser. Erklären Sie diese Erscheinung.
- 1.10 Wie ist es zu erklären, dass sich Gase durch hohe Drucke verflüssigen lassen?
- 1.11 Welche Phänomene weisen darauf hin, dass die kleinsten Teilchen einer Flüssigkeit bzw. eines Gases in dauernder Bewegung sind?
- 1.12 Erklären Sie die unterschiedliche Härte von Grafit und Diamant aufgrund der Anordnung der Kohlenstoff-Atome.
- 1.13 Grafit lässt sich zum Schreiben und als Schmiermittel verwenden. Erklären Sie diese Beobachtung mithilfe des Teilchenmodells.