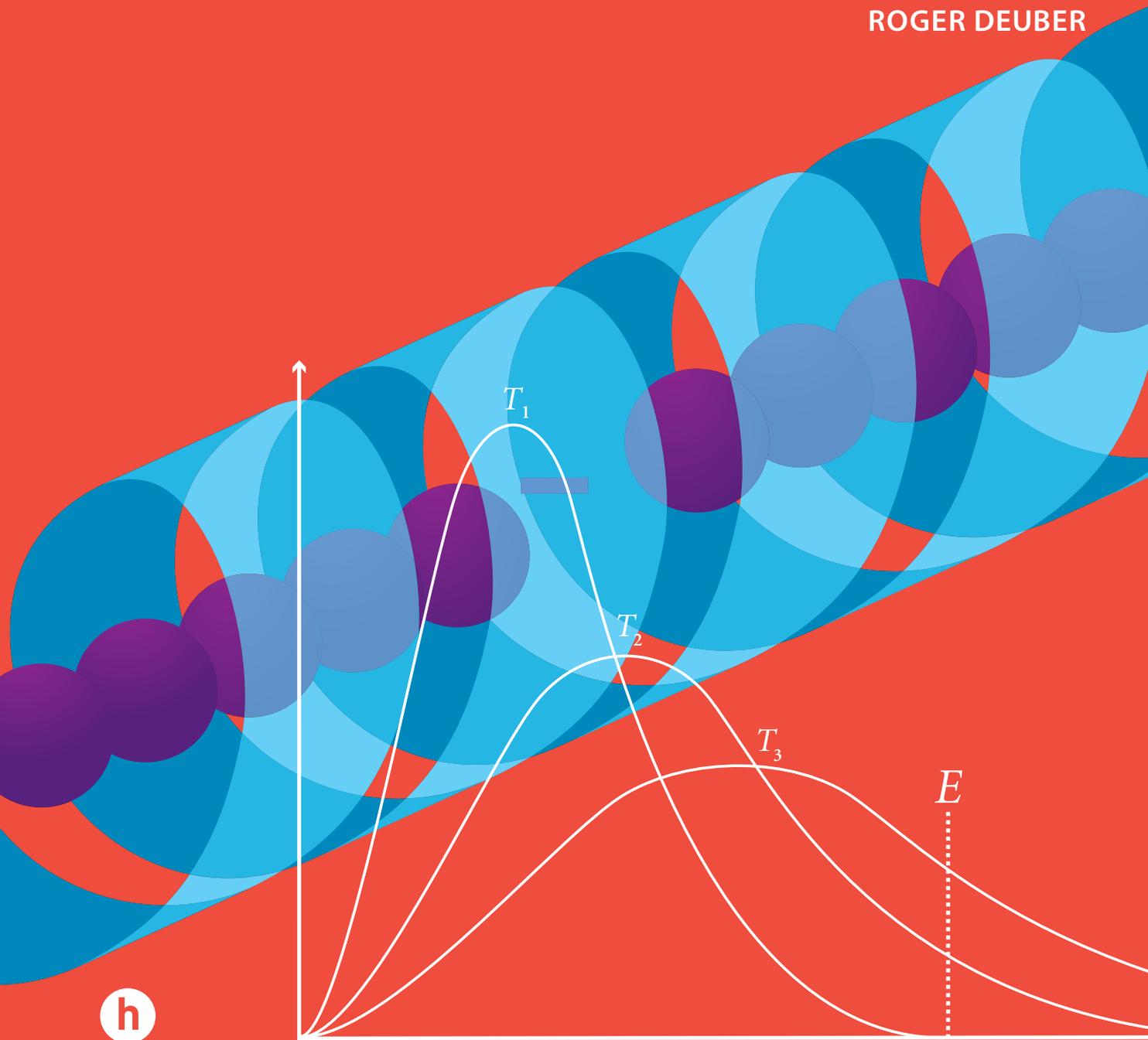


# CHEMIE FÜR DAS GRUNDLAGENFACH AM GYMNASIUM

GÜNTER BAARS  
ROGER DEUBER



h  
e  
p

Liebe Kolleginnen, liebe Kollegen

Liebe Schülerinnen, liebe Schüler

Nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen entstanden beim Urknall, der «Geburt» des Universums vor 13.7 Milliarden Jahren, nach 0.2 Sekunden die Protonen mit einer positiven und die Elektronen mit einer gleich grossen, negativen elektrischen Ladung. 380 000 Jahre später bildeten diese Elementarteilchen die Atome der beiden einfachsten Elemente Wasserstoff und Helium. In den Sternen, Anhäufungen von Wasserstoff und Helium, und bei der Explosion von Sternen entstanden – und entstehen – die heute bekannten natürlich vorkommenden 92 Elemente. Die Bausteine des gesamten Universums, wie auch aller Stoffe der belebten und unbelebten Natur auf der Erde, sind also die Protonen und die Elektronen. Diese erstaunliche Tatsache ist der Schlüssel zum Verständnis der Wissenschaft Chemie.

Aufgrund ihrer Ladung üben Protonen und Elektronen Kräfte aufeinander aus: elektrostatische Kräfte. Im Gegensatz zur Gravitationskraft sind diese aber nicht nur anziehend. Sie können auch abstossend sein, wenn die Teilchen gleich geladen sind. Eng damit verknüpft ist der Energiebegriff, der an sich nichts Geheimnisvolles darstellt. Eine zusätzliche Betrachtung der zufälligen Teilchenbewegung und der damit verknüpften Frage nach der Wahrscheinlichkeit chemischer Zustände ermöglicht ein tiefes Verständnis für den Ablauf chemischer Reaktionen und die Ursachen der Eigenschaften von Stoffen. So bilden Kräfte und Energie (und damit zusammenhängend der Begriff der Arbeit) einerseits sowie die Frage nach den Folgen der Wahrscheinlichkeit der zufälligen Teilchenbewegung andererseits den roten Faden in diesem Chemielehrgang.

Nun wünschen wir Ihnen viel Freude beim Eintauchen in die faszinierende Welt der Chemie. Wenn Sie Anregungen und Wünsche bezüglich dieses Lehrmittels haben oder Fehler bzw. unverständliche Textabschnitte entdecken, so schreiben Sie uns.

Bern, im Juni 2017

Günter Baars, [guenter.baars@bluewin.ch](mailto:guenter.baars@bluewin.ch)

Roger Deuber, [rdeuber@gmail.com](mailto:rdeuber@gmail.com)

# Inhaltsverzeichnis

## I Stoffe und ihre Bausteine

<b>1</b>	<b>Stoffe und Stoffumwandlungen</b>	<b>17</b>
1.1	Stoffe im Alltag .....	18
1.2	Chemische Reaktionen auf Stoffebene – Stoffeigenschaften, Energieumsatz, Reaktionsgleichungen I .....	21
1.3	Kraft und Energie, zwei Schlüsselbegriffe in der Chemie .....	29
1.4	Stoffeigenschaften lassen sich mit dem allgemeinen Teilchenmodell erklären – Energie und Aggregatzustände .....	36
1.5	Wahrscheinliche Zustände .....	42
1.6	Die Teilchenzahl bestimmt das Volumen eines Gases .....	45
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 1 .....	47
	Aufgaben zum Kapitel 1 .....	48
<b>2</b>	<b>Vom Gemisch zum Element – Trennmethoden – Periodensystem</b>	<b>51</b>
2.1	Gemische sind aus mindestens zwei Reinstoffen aufgebaut .....	52
2.2	Gemische lassen sich in ihre Reinstoffe zerlegen – Trennmethoden .....	55
2.3	Reinstoffe sind entweder Verbindungen oder Elemente .....	61
2.4	Elemente werden im Periodensystem dargestellt .....	64
2.5	Möglichkeiten und Grenzen des allgemeinen Teilchenmodells .....	67
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 2 .....	69
	Aufgaben zum Kapitel 2 .....	70
<b>3</b>	<b>Die chemischen Elemente und ihre Atome</b>	<b>71</b>
3.1	Das Universum besteht aus Protonen, Elektronen und Neutronen, den Bausteinen der Atome .....	72
3.2	Die Atome der Elemente sind durch ihre Protonenzahl charakterisiert – das Periodensystem II .....	74

<b>3.3</b>	Atome desselben Elements unterscheiden sich – Isotope.....	75
<b>3.4</b>	Wie schwer sind eigentlich Atome? Atommasse und Stoffmenge – molare Masse .....	77
<b>3.5</b>	Elektrisch geladene Teilchen üben aufeinander Kräfte aus – das Coulomb-Gesetz.....	82
<b>3.6</b>	Exkurs: Vergleich von Gravitations- und Coulomb-Kraft .....	
<b>3.7</b>	Exkurs: Die Entdeckung der Atombausteine und der Isotope – Massenbestimmung .....	
<b>3.8</b>	Exkurs: Eine kurze Geschichte der Materie .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 3 .....	85
	Aufgaben zum Kapitel 3 .....	86

## 4 Modellvorstellungen über die Struktur von Atomen 89

<b>4.1</b>	Atome sind fast leer – das Kern-Hülle-Modell.....	90
<b>4.2</b>	Kräfte und Energien in einem Atom .....	92
<b>4.3</b>	Das Schalenmodell der Elektronenhülle .....	95
<b>4.4</b>	Wie werden die Schalen der Atome mit Elektronen besetzt? Die Elektronenkonfiguration .....	100
<b>4.5</b>	Modellhafte Darstellung der Valenzelektronen – Lewis-Schreibweise ..	102
<b>4.6</b>	Metall- bzw. Nichtmetallatome binden ihre Valenzelektronen unterschiedlich stark.....	106
<b>4.7</b>	Exkurs: Kraft und Energie bei der Bildung eines Wasserstoff-Atoms.....	
<b>4.8</b>	Exkurs: Elektronenschalen enthalten Unterschalen auf verschiedenen Energiestufen.....	
<b>4.9</b>	Exkurs: Atomkerne können sich spontan verändern – die Radioaktivität.....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 4 .....	108
	Aufgaben zum Kapitel 4 .....	109

## 5 Atome verbinden sich – ein Überblick 111

<b>5.1</b>	Elemente – ihre kleinsten Teilchen und wie sie mit chemischen Symbolen und Formeln beschrieben werden.....	112
<b>5.2</b>	Nichtmetallatome bilden Moleküle – Molekülverbindungen – Reaktionsgleichungen II.....	115
<b>5.3</b>	Bei der Reaktion von Metall- mit Nichtmetallatomen entstehen Ionenverbindungen .....	119
<b>5.4</b>	Metallatome bilden ebenfalls Gitter – die Bindung zwischen Metallatomen.....	122
<b>5.5</b>	Die Benennung binärer Verbindungen .....	123

**5.6** Exkurs: Wasserstoff und Sauerstoff existieren als zweiatomige Moleküle – der experimentelle Nachweis..... 

Zentrale Begriffe zum Kapitel 5 ..... 125  
 Aufgaben zum Kapitel 5 ..... 126

**6** **Stoffmenge und Stoffmasse können berechnet werden** **127**

**6.1** Die Masse von Atomen, Molekülen und Formeleinheiten – molares Volumen ..... 128  
**6.2** Reaktionsgleichungen erlauben Aussagen über Massen-, Volumen- und Teilchenverhältnisse ..... 129  
**6.3** Stoffmengen und Massen charakterisieren Lösungen..... 131  
 Zentrale Begriffe zum Kapitel 6 ..... 133  
 Aufgaben zum Kapitel 6 ..... 134

**7** **Kräfte innerhalb von Molekülen – Bindungsenthalpie, Bildungsenthalpie und Molekülgestalt** **135**

**7.1** Kraft und Energie bei der Bildung einer Elektronenpaarbindung – die Bindungsenthalpie ..... 136  
**7.2** Unsymmetrische (polare) Elektronenpaarbindungen erhöhen die Bindungsenthalpie – die Elektronegativität ..... 139  
**7.3** Die Abhängigkeit der Bindungsenthalpie – eine Zusammenfassung... 143  
**7.4** Bildungsenthalpien als Energiebilanz für Reaktionen zwischen Elementen ..... 145  
**7.5** Aus Reaktionen zwischen Molekülen lässt sich Energie gewinnen – die Berechnung der Reaktionsenthalpie ..... 148  
**7.6** Abstossende Kräfte zwischen Elektronen sind für die räumliche Gestalt von Molekülen verantwortlich ..... 150  
**7.7** Lewis-Formeln komplexer Moleküle ..... 156  
**7.8** Exkurs: Auch Edelgase bilden Verbindungen.....   
 Zentrale Begriffe zum Kapitel 7 ..... 158  
 Aufgaben zum Kapitel 7 ..... 159

**8** **Kräfte zwischen Molekülen – Aggregatzustand und Mischbarkeit** **161**

**8.1** Einführung..... 162  
**8.2** Kräfte zwischen kurzzeitigen Dipolen – Van-der-Waals-Kräfte ..... 162  
**8.3** Kräfte zwischen permanenten Dipolen – Dipol–Dipol-Kräfte..... 165  
**8.4** Besonders starke Kräfte zwischen Molekülen – Wasserstoffbrücken .... 170

<b>8.5</b>	Die Energiebilanz der zwischenmolekularen Kräfte bestimmt die Mischbarkeit molekularer Stoffe .....	173
<b>8.6</b>	Kohlenstoff, ein besonderes Element .....	176
<b>8.7</b>	Exkurs: Wasser, Alkohole, Nukleinsäuren und Proteine – vier Beispiele zur Bedeutung der Wasserstoffbrücken .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 8 .....	182
	Aufgaben zum Kapitel 8 .....	183

## **9 Salze sind Ionenverbindungen 185**

<b>9.1</b>	Der Energieumsatz bei der Bildung von Ionenverbindungen .....	186
<b>9.2</b>	Welche Struktur haben Ionenverbindungen? .....	193
<b>9.3</b>	Ionenverbindungen sind fest und spröde .....	196
<b>9.4</b>	Salzlösungen und Hydrationsenthalpie .....	197
<b>9.5</b>	Elektrischer Strom zersetzt Salzschnmelzen und Salzlösungen .....	202
<b>9.6</b>	Exkurs: Salze mit Komplexionen .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 9 .....	203
	Aufgaben zum Kapitel 9 .....	204

## **10 Metalle, ihr Aufbau und ihre Eigenschaften 205**

<b>10.1</b>	Metalle bilden einfache Strukturen .....	206
<b>10.2</b>	Eigenschaften von Metallen – Schmelz- und Siedetemperaturen, Verformbarkeit, Härte, elektrische Leitfähigkeit .....	210
<b>10.3</b>	Metalle lassen sich mischen – Legierungen .....	214
<b>10.4</b>	Exkurs: Halbleiter als Voraussetzung für die moderne Elektronik .....	
<b>10.5</b>	Exkurs: Metalle der Seltenen Erden – das Öl der Zukunft .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 10 .....	215
	Aufgaben zum Kapitel 10 .....	216

# **II Chemische Reaktionen**

## **11 Chemische Reaktionen haben eine Geschwindigkeit 219**

<b>11.1</b>	Worin unterscheiden sich schnelle und langsame Reaktionen? .....	220
<b>11.2</b>	Die Reaktionsgeschwindigkeit wird von äusseren Faktoren beeinflusst .....	226
<b>11.3</b>	Exkurs: Der Abgaskatalysator .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 11 .....	233
	Aufgaben zum Kapitel 11 .....	234

<b>12</b>	<b>Chemische Reaktionen laufen freiwillig oder unfreiwillig ab – Enthalpie und Entropie</b>	<b>235</b>
<b>12.1</b>	Welche chemischen Reaktionen laufen freiwillig ab? .....	236
<b>12.2</b>	Das Prinzip der Wahrscheinlichkeit ergänzt das Prinzip des Energieminimums .....	240
<b>12.3</b>	Die Entropie, ein Mass für die Wahrscheinlichkeit eines Stoffsystems ...	242
<b>12.4</b>	Die Freiwilligkeit einer Reaktion lässt sich quantitativ erfassen – die Gibbs-Helmholtz-Gleichung .....	245
<b>12.5</b>	Exkurs: Die Berechnung der freien Enthalpie .....	
<b>12.6</b>	Exkurs: Die Enthalpie kann auch als Entropie interpretiert werden – der zweite Hauptsatz der Thermodynamik .....	
<b>12.7</b>	Exkurs: Die Natur macht es uns vor – wie Zellen unfreiwillige Reaktionen zum Laufen bringen .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 12 .....	249
	Aufgaben zum Kapitel 12 .....	250
<b>13</b>	<b>Chemische Reaktionen laufen oft unvollständig ab – das chemische Gleichgewicht</b>	<b>251</b>
<b>13.1</b>	Chemische Reaktionen kommen nicht zum Stillstand – das dynamische Gleichgewicht .....	252
<b>13.2</b>	Das Massenwirkungsgesetz beschreibt chemische Gleichgewichte quantitativ .....	257
<b>13.3</b>	Chemische Gleichgewichte lassen sich beeinflussen .....	258
<b>13.4</b>	Exkurs: Berechnungen zum chemischen Gleichgewicht .....	
<b>13.5</b>	Exkurs: Chemische Gleichgewichte in der Technik – die Ammoniak- und Salpetersäure-Synthese .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 13 .....	261
	Aufgaben zum Kapitel 13 .....	262
<b>14</b>	<b>Bei Säure-Base-Reaktionen werden Protonen verschoben</b>	<b>265</b>
<b>14.1</b>	Saure und basische Lösungen, Säuren und Basen – ein Gegensatz. ....	266
<b>14.2</b>	Säure-Base-Reaktionen sind umkehrbar .....	273
<b>14.3</b>	Säure-Base-Reaktionen: Salzgewinnung – Enthalpie und Entropie ....	276
<b>14.4</b>	Der pH-Wert charakterisiert wässrige Lösungen .....	278
<b>14.5</b>	Die Stärke von Säuren und Basen – die Säure-Base-Reihe .....	283
<b>14.6</b>	Die Wirkungsweise von Indikatoren und Pufferlösungen .....	289
<b>14.7</b>	Die Reaktion zwischen sauren und basischen Lösungen – Neutralisation und Titration .....	292

<b>14.8</b> Exkurs: Säuren und Basen im Alltag.....	↕
<b>14.9</b> Exkurs: Säure- sowie Basenstärke und ihre Abhängigkeit.....	↕
<b>14.10</b> Exkurs: Indikatoren, Titration und Pufferlösungen – eine quantitative Betrachtung.....	↕
Zentrale Begriffe zum Kapitel 14.....	298
Aufgaben zum Kapitel 14.....	299

## **15 Auch Elektronen lassen sich verschieben 301**

<b>15.1</b> Die Bildung von Elektronenpaar- und Ionenbindung weist Gemeinsamkeiten auf.....	302
<b>15.2</b> Oxidationszahlen als Erkennungsmerkmal von Redoxreaktionen .....	307
<b>15.3</b> Oxidatoren und Reduktoren unterscheiden sich in ihrer Stärke – die Redoxreihe.....	311
<b>15.4</b> Die Stärke der Reduktoren und Oxidatoren lässt sich quantitativ bestimmen – Redoxreihe und Standard-Redoxpotenziale .....	317
<b>15.5</b> Elektrischer Strom kann Redoxreaktionen erzwingen – die Elektrolyse ..	324
<b>15.6</b> Exkurs: Die Vielfalt der Redoxreaktionen .....	↕
<b>15.7</b> Exkurs: Elektrolysen in der Technik.....	↕
<b>15.8</b> Exkurs: Die Gewinnung von Eisen, Stahl und Silicium .....	↕
<b>15.9</b> Exkurs: Die Natur macht es uns vor – Redoxreaktionen beim Stoffwechsel im menschlichen Organismus .....	↕
Zentrale Begriffe zum Kapitel 15.....	325
Aufgaben zum Kapitel 15.....	326

## **16 Elektrischer Strom bewegt und verbindet die Welt 329**

<b>16.1</b> Ortsunabhängige Stromquellen – Grundlagen .....	330
<b>16.2</b> Zum einmaligen Gebrauch – Batterien (Primärelemente) .....	332
<b>16.3</b> Wieder aufladbar – Akkumulatoren (Sekundärelemente) .....	336
<b>16.4</b> Brennstoffzellen – der Antrieb der Zukunft? .....	343
<b>16.5</b> Korrosion vernichtet Werte .....	347
Zentrale Begriffe zum Kapitel 16 .....	351
Aufgaben zum Kapitel 16.....	352

### III Kohlenstoff und seine Verbindungen

#### 17 Zwei Elemente und Einfachbindungen – Alkane 355

17.1	Alkane – Grundgerüst aller Kohlenstoffverbindungen .....	356
17.2	Die homologe Reihe der Alkane.....	357
17.3	Wie benennt man die Alkane?.....	361
17.4	Alkane existieren bei Raumtemperatur in allen drei Aggregatzuständen und zeigen unterschiedliches Mischungsverhalten.....	363
17.5	Alkane reagieren mit Sauerstoff und Halogenen und lassen sich zerbrechen .....	366
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 17 .....	371
	Aufgaben zum Kapitel 17.....	372

#### 18 Kohlenstoff, Wasserstoff und Mehrfachbindungen – Alkene und Alkine 373

18.1	Die C=C-Doppel- und die C≡C-Dreifachbindung.....	374
18.2	Die homologe Reihe der Alkene und Alkine .....	375
18.3	Doppelbindungen und Stereoisomerie.....	377
18.4	Mehrfachbindungen begünstigen Additionsreaktionen .....	379
18.5	Aus Alkenen werden Kunststoffe .....	382
18.6	Exkurs: Elektronenwolken dehnen sich aus – aromatische Kohlenwasserstoffe .....	384
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 18 .....	386
	Aufgaben zum Kapitel 18.....	387

#### 19 Sauerstoff-Atome bestimmen die Reaktionsfähigkeit – Alkohole und ihre Oxidationsprodukte 389

19.1	Die Hydroxylgruppe als Kennzeichen der Alkohole .....	390
19.2	Einige Alkohole und ihre Bedeutung .....	393
19.3	Alkohole sind reaktionsfreudig .....	397
19.4	Alkohole lassen sich zu Aldehyden und Ketonen oxidieren .....	398
19.5	Exkurs: Die Natur macht es uns vor – bei der Zellatmung werden auch tertiäre Alkohole oxidiert .....	400
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 19 .....	402
	Aufgaben zum Kapitel 19.....	403

<b>20</b>	<b>Zwei funktionelle Gruppen in einem Molekül – Carbonsäuren</b>	<b>405</b>
<b>20.1</b>	Die Carboxylgruppe als Kennzeichen der Carbonsäuren .....	406
<b>20.2</b>	Die homologe Reihe der Carbonsäuren .....	408
<b>20.3</b>	Carbonsäuren und Alkohole bilden Ester und Polyester .....	414
<b>20.4</b>	Exkurs: Aus Carbonsäuren und Aminen entstehen ebenfalls Kunststoffe – Polyamide .....	
<b>20.5</b>	Exkurs: Acetylsalicylsäure – ein Ester mit bemerkenswerten Eigenschaften .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 20 .....	417
	Aufgaben zum Kapitel 20 .....	418

<b>21</b>	<b>Fette, Kohlenhydrate, Proteine und Nukleinsäuren</b>	<b>419</b>
<b>21.1</b>	Triglyceride als Bausteine der Fette – Phospholipide .....	420
<b>21.2</b>	Die Fotosynthese als Ursprung der Kohlenhydrate .....	424
<b>21.3</b>	Aus Aminosäuren entstehen Proteine .....	433
<b>21.4</b>	Exkurs: Aus Fetten und fetten Ölen werden Seifen – Tenside .....	
<b>21.5</b>	Exkurs: Die biologischen Funktionen der Nährstoffe .....	
<b>21.6</b>	Exkurs: Nukleinsäuren bestimmen die Aminosäuresequenz eines Proteins .....	
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 21 .....	437
	Aufgaben zum Kapitel 21 .....	438
	Lösungen zu den Aufgaben .....	

<b>Anhang</b>	<b>439</b>
Kennzeichnungssystem für Chemikalien – Gefahrenpiktogramme mit Signalwort und Erklärungen .....	440
Drei Bindungsarten, ihre Stoffe und Eigenschaften; eine Gegenüberstellung ...	442
Glossar .....	445
Bildnachweis .....	473
Sachregister .....	474



# I Stoffe und ihre Bausteine

			Hauptgruppen				
			III A	IV A	V A	VIA	VII A
			<b>5</b> 1081 <b>B</b> Bor 2075 2.3 400 2.0	<b>6</b> 12.01 <b>C</b> Kohlenstoff (3550) 2.2 4830 2.5	<b>7</b> 14.01 <b>N</b> Stickstoff -210 1.25 -196 3.0 0	<b>8</b> 16.00 <b>O</b> Sauerstoff -219 1.43 -183 3.5 0	<b>9</b> 19 <b>F</b> Fluor -220 -188
			<b>13</b> 26.98 <b>Al</b> Aluminium 660 2.70 2519 1.5 0	<b>14</b> 28.0 <b>Si</b> Silicium 1410 2.33 3535 1.8	<b>15</b> 30.97 <b>P</b> Phosphor 44 1.82 281 2.1 0	<b>16</b> 32.07 <b>S</b> Schwefel 115 2.07 445 2.5 0	<b>17</b> 35 <b>Cl</b> Chlor -102 -34
<b>18</b> 58.69 <b>Ni</b> Nickel 1011 8.9 1913 1.9	<b>29</b> 63.55 <b>Cu</b> Kupfer 1085 8.96 2562 1.9 0	<b>30</b> 65.41 <b>Zn</b> Zink 420 7.13 907 1.6 0	<b>31</b> 69.72 <b>Ga</b> Gallium 30 5.90 2204 1.6 0	<b>32</b> 72.64 <b>Ge</b> Germanium 938 5.3 2835 1.7	<b>33</b> 74.92 <b>As</b> Arsen 817 5.7 2875 1.9	<b>34</b> 78.96 <b>Se</b> Selen 221 4.79 685 2.4 0	<b>35</b> 79 <b>Br</b> Brom -7 59
<b>46</b> 106.42 <b>Pd</b> Palladium 1555 12.02 1963 2.2	<b>47</b> 107.87 <b>Ag</b> Silber 962 10.50 2162 1.9	<b>48</b> 112.41 <b>Cd</b> Cadmium 321 8.69 767 1.7 0	<b>49</b> 114.82 <b>In</b> Indium 157 7.31 2072 1.7 0	<b>50</b> 118.71 <b>Sn</b> Zinn 232 7.29 2602 1.8 0	<b>51</b> 121.7 <b>Sb</b> Antimon 634 6.8 2875 1.9	<b>52</b> 127.6 <b>Te</b> Tellur 456 6.23 973 2.1	<b>53</b> 126 <b>I</b> Iod 114 4.9 184 2.3
<b>78</b> 195.08 <b>Pt</b> Platin 1768 21.45 1825 2.2	<b>79</b> 196.97 <b>Au</b> Gold 1064 19.3 2856 2.4	<b>80</b> 200.59 <b>Hg</b> Quecksilber -39 13.54 357 1.9	<b>81</b> 204.38 <b>Tl</b> Thallium 304 11.85 1473 1.8 0	<b>82</b> 207.02 <b>Pb</b> Blei 328 11.35 1749 1.9	<b>83</b> 208.98 <b>Bi</b> Bismut 271 9.79 1564 1.9	<b>84</b> [208.98] <b>Po*</b> Polonium 214 9.2 965 2.0	<b>85</b> [208.98] <b>At*</b> Astatin 210 9.4 337 2.4
<b>110</b> [271] <b>Ds*</b> Darmstadtium	<b>111</b> [272.15] <b>Rg*</b> Roentgenium	<b>112</b> [285] <b>Cn*</b> Copernicium	<b>113</b> [284] <b>Uut*</b> Ununtrium	<b>114</b> [289] <b>Fl*</b> Flerovium	<b>115</b> [288] <b>Uup*</b> Ununpentium	<b>116</b> [289] <b>Lv*</b> Livermorium	<b>117</b> [289] <b>Uus*</b> Ununseptium



# Stoffe und Stoffumwandlungen



## › Worum geht es?

Chemische Reaktionen beherrschen unseren Alltag. In der Natur sind sie für alle Prozesse verantwortlich, die Leben erst ermöglichen. Der Mensch hat gelernt, sich chemische Reaktionen nutzbar zu machen. Er kann mit ihnen Farben erzeugen, Medikamente entwickeln, Kunststoffe herstellen, Sonnenkollektoren produzieren, neue Werkstoffe erfinden usw. All dies setzt aber voraus, dass man genaue Kenntnisse über den Verlauf, den Reaktionsmechanismus chemischer Vorgänge hat.

Dieses Kapitel liefert erste Hinweise dazu und macht deutlich, dass ohne die Begriffe Kraft und Energie, die ausführlich erläutert werden, solche Prozesse nicht zu verstehen sind. Dass dabei Modellvorstellungen eine wichtige Rolle spielen, ist ein weiteres Kriterium der Wissenschaft Chemie.

<b>1.1</b>	Stoffe im Alltag .....	18
<b>1.2</b>	Chemische Reaktionen auf Stoffebene – Stoffeigenschaften, Energieumsatz, Reaktionsgleichungen I. ....	21
<b>1.3</b>	Kraft und Energie, zwei Schlüsselbegriffe in der Chemie .....	29
<b>1.4</b>	Stoffeigenschaften lassen sich mit dem allgemeinen Teilchenmodell erklären – Energie und Aggregatzustände .....	36
<b>1.5</b>	Wahrscheinliche Zustände .....	42
<b>1.6</b>	Die Teilchenzahl bestimmt das Volumen eines Gases .....	45
	Zentrale Begriffe zum Kapitel 1 .....	47
	Aufgaben zum Kapitel 1 .....	48

## 1.1 Stoffe im Alltag

Wenn wir mit offenen Augen durch die Welt gehen, sehen wir faszinierende und rätselhafte Alltagserscheinungen. So liegt an einem Herbstmorgen überraschenderweise Nebel, obwohl sich der vorhergehende Abend noch mit einem prächtigen Sonnenuntergang bei klarer Luft gezeigt hat. Noch schlaftrunken, übersieht der Frühaufsteher meistens die feinen Gasblasen, die beim Kochen des Wassers vom Boden der Pfanne aufsteigen, bevor die Siedetemperatur erreicht ist. Aus dem mit einer feinen Kalkschicht bedeckten Gefäss ergiesst sich das klare, durchsichtige, sprudelnde Wasser über die Teeblätter in die Kanne, wobei sich die Flüssigkeit allmählich hellgelb bis dunkelbraun färbt. Die zugegebenen Würfelzuckerstücke sind nach wenigen Röhrbewegungen mit dem Löffel in der Tasse aufgelöst, und auch die Milch hat sich gleichmässig verteilt.

Zahlreiche Mobiltelefone mit ihren unterschiedlichen Klingeltönen, mehr oder weniger leise geführte Telefonate wie auch der dumpfe Rhythmus der Musik aus einem Smartphone in der überfüllten S-Bahn zeugen von den raschen Fortschritten der modernen Elektronik. Diese benötigt eine grosse Anzahl von Rohstoffen wie Edelmetalle (Gold, Silber, Platin) und Halbedelmetalle (Kupfer, Bismut), seltene Erden (z. B. Lanthan, Neodym) und weitere Metalle wie Silicium, Palladium, Tantal usw. Einige davon sind nur in sehr geringen Mengen auf der Erde vorhanden. Ein Artikel in der Wochenzeitung DIE ZEIT über den «verlorenen Schatz»<sup>1</sup> listet die Stoffe detailliert auf, die in den rund 60 Millionen nicht mehr verwendeten und in deutschen Schubladen liegenden Handys verbaut sind: 3 Tonnen Gold, 30 Tonnen Silber, 1900 Tonnen Kupfer, 1151 Tonnen Aluminium und 105 Tonnen Zinn.

**Abb. 1.1**  
Smartphone



<sup>1</sup> Kunze, A.: Der verlorene Schatz. Deutschland gehen die Rohstoffe aus. DIE ZEIT. Nr. 20, 10. Mai 2012.

Der Wochenendausflug in die Berge lässt uns die Vielfalt der Gesteine erleben. Trifft man zufällig auf einen Geologen, so erstaunt seine «chemische Ausrüstung». Aus einer kleinen Plastikflasche tropft er Salzsäure, eine saure Lösung, auf die Steine. Kommt es zu einer Gasentwicklung, zu einem «Aufbrausen», so handelt es sich um kalkiges Gestein, das bei diesem Vorgang aufgelöst wird, wie er uns erklärt. Die an verschiedenen Orten anzutreffenden Karsterscheinungen wie Höhlen, Dolinen, Schratzen usw. sind durch natürliche Löseprozesse im Verlauf von Jahrtausenden entstanden. Andere Gesteinsarten wie Dolomit und alle Magmatite (Steine, die sich aus dem flüssigen Magma bilden) zeigen mit Salzsäure keine Reaktion. Anhand dieses einfachen Nachweises lässt sich auch erkennen, dass Marmor oder Sandstein ebenfalls kalkhaltiges Material enthalten.



**Abb. 1.2**

Höhle im Kalkgestein;  
Dröhnlandschlot F1,  
Hohgant

Beim Überqueren des Münsterplatzes in Bern fällt der Blick auf ein mächtiges Gerüst am hoch aufragenden Kirchturm. Seit Jahrzehnten müssen immer wieder Steine des Münsters ausgewechselt oder mit Mörtel neu aufgebaut werden. Sandstein, das hauptsächlich für den Bau verwendete Material, besteht aus Quarzkörnern, die von einer Grundmasse von Kalk zusammengehalten werden. Abgase aus Verkehr, Haushalten und Industrie sowie der damit im Zusammenhang stehende «saure Regen» lösen den Kalk des Sandsteins auf, der dadurch allmählich zerfällt. Gebäude aus diesem Material müssen deshalb immer wieder saniert werden. Der Saft einer Zitrone, ebenfalls eine saure Lösung, kann die Oberfläche von Kalk- oder Marmorplatten schädigen (Marmor = während einer Gebirgsbildung unter hohem Druck umkristallisierter Kalk).

**Abb. 1.3**

Berner Münster mit Gerüst



Zu Hause gelingt das Entfachen eines Feuers im offenen Kamin erst, nachdem einige Stücke Holz zu feinen Spänen gespalten worden sind. Eine kleine Unaufmerksamkeit beim Grillen auf dem offenen Feuer führt zur Verkohlung der Fleischstücke. Beim Nachtessen schliesslich faszinieren die Farbe eines einfachen purpurroten Landweins und das sprudelnde Mineralwasser. Der silberne Kerzenständer zeigt nach erfolgter Reinigung schon bald wieder Spuren eines grauschwarzen Belags.

Was aber passiert genau beim Auflösen von Kalk durch saure Lösungen, bei der Zersetzung von Sandstein aufgrund der zunehmenden Luftverschmutzung? Woher stammt die Wärme, die die Verbrennung von Holz, Heizöl oder Benzin liefert, und welche Abgase entstehen dabei? Wie gewinnt man das für die Elektronik benötigte Silicium, und wie funktioniert z. B. ein Lithium-Ionen-Akkumulator, die Stromquelle der meisten Elektronikgeräte und elektrisch betriebenen Autos? Wie verlaufen die Prozesse bei der Produktion alkoholischer Getränke?

Die Chemie versucht, derartige Veränderungen von Stoffen verständlich zu machen. Sie beschäftigt sich aber auch mit der Frage nach den Eigenschaften von Stoffen. Warum sind viele von ihnen farbig? Wieso löst das heisse Wasser nur ganz bestimmte Anteile aus den Teeblättern, und weshalb verteilen sich Zucker und Milch ohne Probleme im Tee, während Öl und Essig sich bei der Zubereitung von Salatsauce nicht mischen? Weshalb leitet Kupfer den elektrischen Strom, viele andere Stoffe jedoch nicht? Woher stammt der Kohlenstoff, wenn Nahrungsmittel bei zu starkem Erhitzen verkohlen?

Um all diese Fragen und unzählige weitere beantworten zu können, ist es nötig, sich mit den Denk- und Arbeitsweisen der Wissenschaft Chemie vertraut zu machen. Dies erfordert eine solide Basis an Grundkenntnissen.

---

Die Chemie beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Stoffen der belebten und der unbelebten Natur, ihren Veränderungen und den dabei herrschenden Gesetzmässigkeiten.

---

## 1.2 Chemische Reaktionen auf Stoffebene – Stoffeigenschaften, Energieumsatz, Reaktionsgleichungen I

### Änderung der Stoffeigenschaften

Chemische Reaktionen steuern Prozesse in der Tier- und Pflanzenwelt und liefern Stoffe wie Metalllegierungen, Medikamente, Farben, Kunststoffe, Fasern usw. Was aber sind chemische Reaktionen, wodurch zeichnen sie sich aus, und woran erkennt man sie?

An frisch gereinigten Silbergegenständen ist nach einiger Zeit ein schwarzgrauer Belag zu beobachten. Bei zu grosser Hitze «verkohlt» ein Stück Fleisch. Salzsäure greift die Oberfläche von Kalkstein an, wobei ein farb- und geruchloses Gas gebildet wird, Kohlenstoffdioxid, das sich durch «Aufschäumen» bemerkbar macht. Wenn Holz verbrannt wird, bleibt «Asche» zurück, die ganz anders aussieht und ein viel geringeres Volumen besitzt. Schliesslich kann der aufgeladene Akku wieder zum Betrieb eines Smartphones, eines Tablets usw. benützt werden. All diesen Vorgängen ist gemeinsam, dass aus Stoffen andere Stoffe gebildet werden. Die typischen (spezifischen) Eigenschaften der Edukte (Ausgangsstoffe) und der Produkte (Endstoffe) unterscheiden sich.

---

Bei einer chemischen Reaktion entstehen Stoffe mit neuen Eigenschaften.

---

**Tabelle 1.1** Faktoren zur Kennzeichnung von Stoffeigenschaften

▪ Druck	Zeichen: $p$	Einheit: Pa (Pascal) = $\text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	
▪ Dichte	Zeichen: $\rho$ (rho)	Einheit: $\text{g}/\text{cm}^3$	Verknüpfungen: $\rho = \frac{m}{V}$
▪ Volumen	Zeichen: $V$	Einheit: $\text{cm}^3$ , l (Liter)	
▪ Masse	Zeichen: $m$	Einheit: g, kg, t	
▪ Celsius-Temperatur	Zeichen: $t$	Einheit: $^{\circ}\text{C}$ (Grad Celsius)	
▪ Schmelztemperatur	Zeichen: $t_m$ (engl. <i>to melt</i> = schmelzen)		Einheit: $^{\circ}\text{C}$
▪ Siedetemperatur	Zeichen: $t_b$ (engl. <i>to boil</i> = sieden)		Einheit: $^{\circ}\text{C}$

**Abb. 1.4**

Metalle zeigen den charakteristischen Metallglanz.

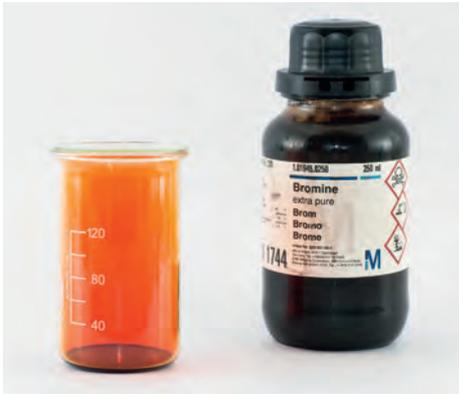
**Abb. 1.5**

Elementares Gold auf Quarz

**Tabelle 1.2** Stoffeigenschaften

Eigenschaft	Beispiele
Aggregatzustand bei Raumtemperatur	Sauerstoff: gasförmig; Wasser: flüssig; PVC (Polyvinylchlorid): fest
Schmelztemperatur $t_m$	Schwefel: $t_m = 119^{\circ}\text{C}$
Siedetemperatur $t_b$	Wasser: $t_b = 100^{\circ}\text{C}$ bei Normaldruck ( $p = 101\,325\text{ Pa}$ )
Dichte $\rho$	Gold: = $19.3\text{ g}/\text{cm}^3$ (Masse pro Volumeneinheit)
Löslichkeit	Kochsalz: 36 g lösen sich in $100\text{ cm}^3$ Wasser bei Raumtemperatur
elektrische Leitfähigkeit	Kupfer: sehr gut leitend PVC: nicht leitend
Wärmeleitfähigkeit	Metalle: sehr gut leitend
Brennbarkeit	Alkohol
Farbe	Gold: gelb; Brom: braun; Schwefel: gelb
Härte	Diamant: härtester Naturstoff
Aussehen	Metallglanz
Kristallform*	Kochsalz: Würfel
Verformbarkeit	Gold: gut verformbar (Blattgold)
Geruch	Hydrosulfid (Schwefelwasserstoff): nach faulen Eiern

\* In einem Kristall sind die Atome (Atomgitter; vgl. Abschnitt 5.1) oder Ionen (Ionengitter; vgl. Abschnitt 5.3) nach bestimmten, für den jeweiligen Stoff charakteristischen Gesetzmäßigkeiten angeordnet.

**Abb. 1.6**

Brom ist braun im flüssigen und gasförmigen Zustand.

**Abb. 1.8**

Diamant

**Abb. 1.7**

Pyritkristalle

## Energieumsatz

Neben Stoffumwandlungen kennzeichnen weitere Kriterien eine chemische Reaktion. Dazu das folgende Beispiel:

Entsprechend der Versuchsanordnung in Abb. 1.9 reagiert Silber mit Schwefel zu Silbersulfid, nachdem das Metall erwärmt und der Schwefel gasförmig gemacht worden ist, wobei das Metall für kurze Zeit hell aufglüht. Dies weist darauf hin, dass insgesamt Wärme frei wird. Das erhaltene Produkt (Abb. 1.10) ist grauschwarz und lässt sich nicht mehr verbiegen, es ist spröde und bricht bei der geringsten Krafteinwirkung auseinander, ganz im Gegensatz zum verwendeten Silberblech.

**Abb. 1.9**

Reaktion von Silber mit Schwefel; links: Versuchsanordnung; rechts: Aufglühen des Silbers während der Reaktion

**Abb. 1.10**

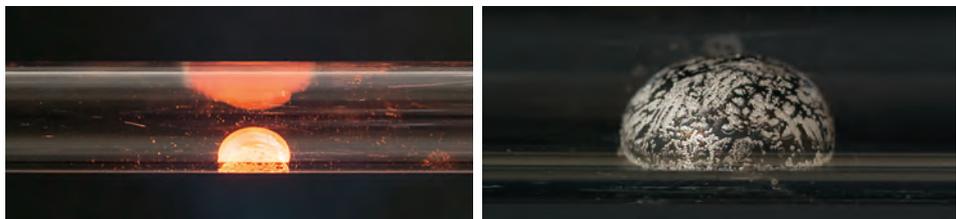
Silberblech und Silbersulfid



Das Silbersulfid wird nun in einem mit zwei Siliconstopfen verschlossenen Quarzrohr (Abb. 1.11) kräftig mit einem Brenner erhitzt. Nach einiger Zeit beobachtet man fein verteilten gelben Schwefel in der Glasröhre und ein Stück glänzendes Metall, Silber: Das Silbersulfid wurde unter Energieaufwand (Wärmezufuhr) wieder in die Ausgangsstoffe zerlegt.<sup>2</sup>

**Abb. 1.11**

Zersetzung von Silbersulfid in Schwefel und Silber. Das Silber zeigt noch Spuren von Silbersulfid, das bei weiterem Erhitzen unter Luftzufuhr leicht entfernt werden kann.



Charakteristisch für chemische Reaktionen ist, neben der Bildung von Stoffen mit neuen Eigenschaften, auch ein Energieumsatz: Energieabgabe, wenn Silber mit Schwefel reagiert bzw. Energieaufnahme bei der Zersetzung von Silbersulfid.

- 
- Bei chemischen Reaktionen wird Energie umgesetzt.
- 

## Reaktionsgleichungen

Um chemische Reaktionen einfach darstellen zu können, verwendet man Reaktionsgleichungen. Die links stehenden Stoffe heissen Edukte oder Ausgangsstoffe, die rechts stehenden Produkte oder Endstoffe. Der Pfeil bedeutet «reagieren zu». Für die Bildung bzw. Zersetzung von Silbersulfid lauten die Gleichungen:



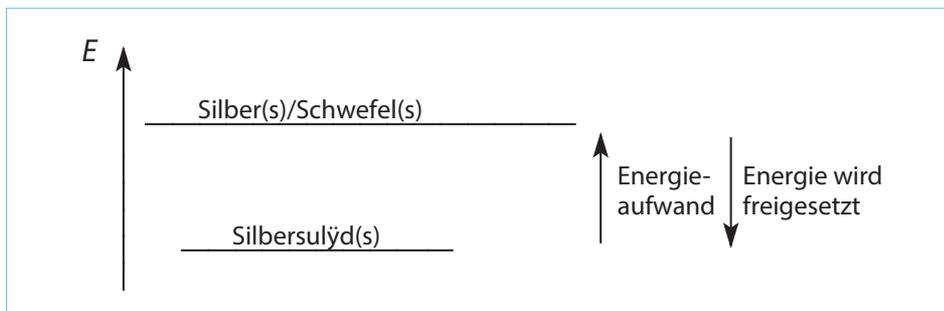
- 
- Chemische Reaktionen lassen sich mit Reaktionsgleichungen beschreiben. Die Edukte (Ausgangsstoffe) reagieren zu ( $\rightarrow$ ) den Produkten (Endstoffe).
  - Symbolische Darstellung der Aggregatzustände
    - s: fest (engl. *solid* = fest)
    - l: flüssig (engl. *liquid* = flüssig)
    - g: gasförmig (engl. *gaseous* = gasförmig)
- 

<sup>2</sup> Die Versuchsanleitung findet man im Internet unter [www.hep-verlag.ch/chemie-grundlagenfach](http://www.hep-verlag.ch/chemie-grundlagenfach)

## Prinzip vom Energieminimum

Wird bei einem chemischen Vorgang Energie frei, so sind die Produkte energieärmer als die Ausgangsstoffe, so z. B. bei der Bildung von Silbersulfid aus Silber und Schwefel. Um die energiereicheren Stoffe Silber und Schwefel wiederherzustellen, den Vorgang also umzukehren, muss Energie aufgewendet werden. Im ersten Fall verläuft die Reaktion, nachdem sie in Gang gesetzt worden ist, freiwillig, d. h. ohne dauernde Energiezufuhr. Im zweiten Fall muss die Reaktion bis zu ihrem Ende erzwungen werden. Dass viele Reaktionen freiwillig ablaufen, wenn dabei Energie frei wird, lässt sich an zahlreichen anderen Beispielen beobachten.

- Ein Vorgang, der keine dauernde Energiezufuhr für seinen Ablauf benötigt, wird als freiwillig bezeichnet.
- In der Natur herrscht das Prinzip vom Energieminimum (Erreichen einer minimalen potentiellen Energie; vgl. auch Abschnitt 1.3).



**Abb. 1.12**

Energieumsatz bei der Bildung bzw. Zersetzung von Silbersulfid ( $E$ : Energie)

## Umkehrbarkeit

Schliesslich gibt es noch ein drittes Kriterium: Die Produkte einer chemischen Reaktion können prinzipiell wieder in die Edukte umgewandelt werden. Als einfaches Beispiel mag die Bildung bzw. Zersetzung von Silbersulfid dienen. Aber auch bei vielen komplexen chemischen Vorgängen lassen sich die Produkte wieder in die Edukte verwandeln, obwohl dies oft keinen Sinn ergibt, viele chemische Reaktionen erfordert und ohne einen enormen Aufwand nicht durchführbar ist (z. B. die Umkehrung der Verbrennung von Holz, Kohle oder Heizöl).

Bildung und Zersetzung von Silbersulfid lassen sich unter Verwendung eines Doppelpfeils in einer einzigen Reaktionsgleichung beschreiben:



Der Energiegewinn bezieht sich auf den von links nach rechts ablaufenden Vorgang; betrachtet man die Reaktion von rechts nach links, so kehrt sich die Energiebilanz um: Bei der Zersetzung von Silbersulfid muss Energie (Wärme) zugeführt werden.

## Drei Charakteristika kennzeichnen eine chemische Reaktion:

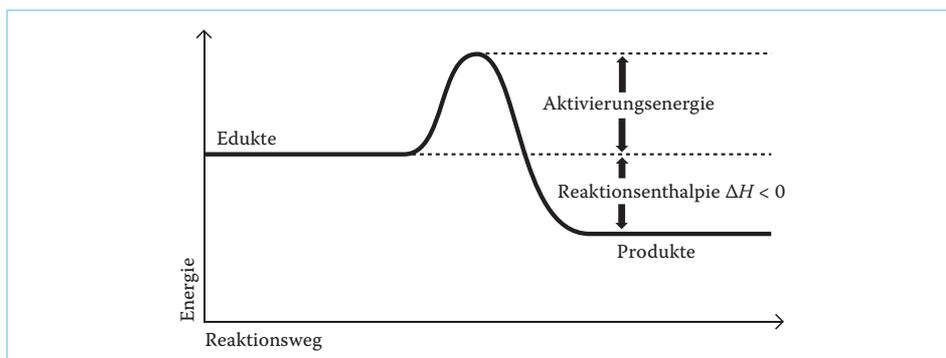
- Chemische Reaktionen erkennt man
  - daran, dass aus den Edukten (Ausgangsstoffe) Produkte (Endstoffe) mit anderen Eigenschaften gebildet werden (= Stoffveränderung),
  - am Energieumsatz,
  - an der Umkehrbarkeit.<sup>3</sup>

### Reaktionsenthalpie (Reaktionswärme)

Die Energiebilanz einer chemischen Reaktion entspricht der Differenz der Energie von Edukten und Produkten und wird mit dem Symbol  $\Delta H$  für die Reaktionswärme (Reaktionsenthalpie<sup>4</sup>) gekennzeichnet.  $\Delta$  (Delta) steht für die Differenz zwischen den Energieinhalten und  $H$  für *heat* (engl. = Hitze). Reaktionen, bei denen Energie z. B. als Wärme, Licht oder Luftdruckwelle bei Explosionen frei wird, heissen exotherme Reaktionen (gr. *exo* = aussen; gr. *thermos* = warm, heiss) und werden mit  $\Delta H < 0$  gekennzeichnet. Das Vorzeichen der an die Umwelt abgegebenen Energie ist in diesem Fall ein Minus, da die Produkte gegenüber den Edukten energieärmer sind (Abb. 1.13). Wenn für den Ablauf chemischer Reaktionen kontinuierlich Energie benötigt wird, spricht man von endothermen Reaktionen (endo gr. = *innen*);  $\Delta H$  ist grösser als null ( $\Delta H > 0$ ). Das Vorzeichen der gemessenen aufzuwendenden Energie ist ein Plus, da die Produkte gegenüber den Edukten energiereicher sind (Abb. 1.14).

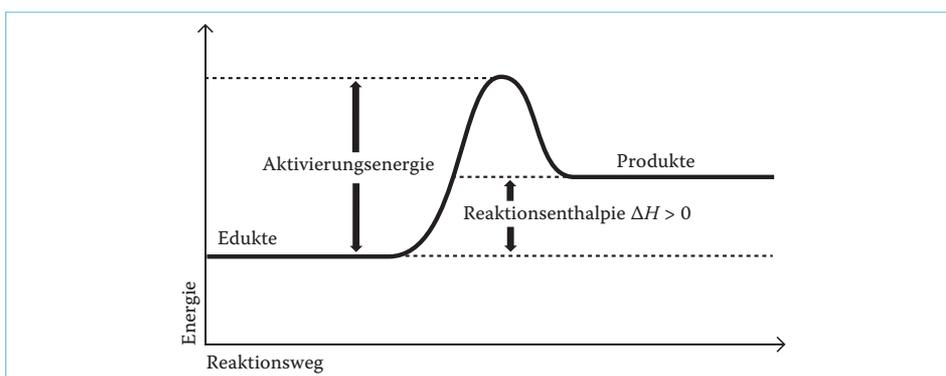
**Abb. 1.13**

Energieschema einer exothermen Reaktion



**Abb. 1.14**

Energieschema einer endothermen Reaktion

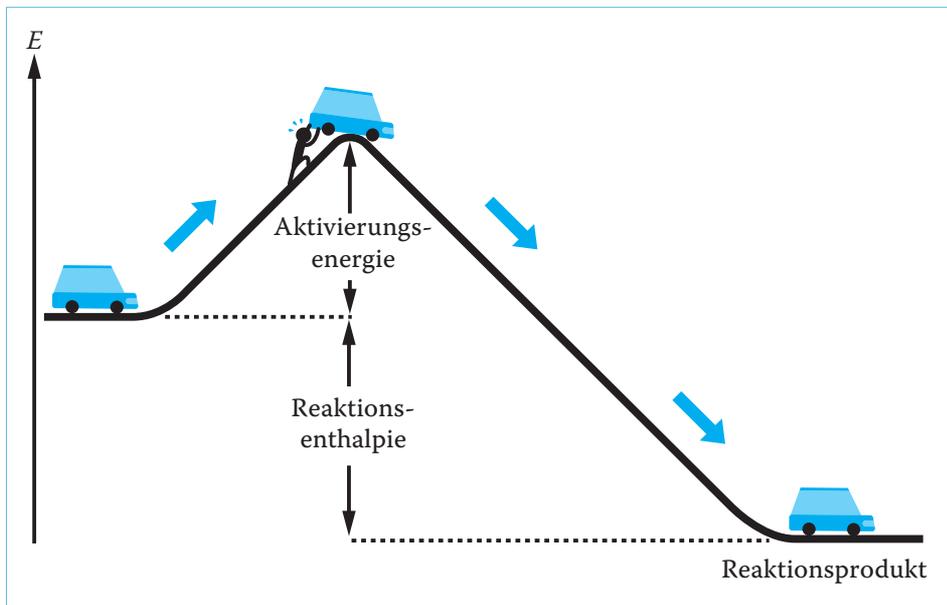


3 Eine Änderung des Aggregatzustands wird nicht als chemische Reaktion bezeichnet, weil dabei keine Stoffveränderung erfolgt.

4 Energieangaben, die sich auf Messungen unter konstantem Druck beziehen, werden Enthalpien genannt (gr. *thalpos* = Wärme, Hitze; gr. *en* = innen, drin). Die Reaktionswärme bezeichnet man deshalb als Reaktionsenthalpie. Chemische Reaktionen finden oft bei konstantem Luftdruck statt.

## Aktivierungsenergie

Bei vielen chemischen Vorgängen muss den Edukten zuerst eine minimale Energie zugeführt werden, die Aktivierungsenergie (Anzünden von Holz, einer Kerze, von Benzin usw.), damit die Reaktion überhaupt in Gang kommt. Die Edukte müssen in diesen Fällen zuerst aktiviert werden. Man kann sich dabei vorstellen, dass die Aktivierungsenergie dem Energieaufwand entspricht, der nötig ist, um z. B. ein Auto auf eine Bergkuppe zu schieben, damit es von alleine den Berg hinunterrollen kann (Abb. 1.15).



**Abb. 1.15**

Die Aktivierungsenergie versetzt die Ausgangsstoffe in einen reaktionsfähigen Zustand.

- Reaktionsenthalpie (Reaktionswärme): Energieumsatz bei einer chemischen Reaktion  
Zeichen:  $\Delta H$  Einheit: J (Joule) oder kJ (Kilojoule);  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
- Bei einer exothermen Reaktion wird Energie frei, die Produkte sind energieärmer als die Edukte;  $\Delta H < 0$ .
- Bei einem endothermen Vorgang muss kontinuierlich Energie zugeführt werden. Sie wird von den reagierenden Stoffen aufgenommen. Die Produkte sind energiereicher als die Edukte;  $\Delta H > 0$ .
- Die Aktivierungsenergie ist die minimal benötigte Energie, damit eine Reaktion überhaupt in Gang kommen kann.

Die Gleichungen für die Reaktionen mit Silbersulfid lassen sich jetzt mit der Energiebilanz ergänzen:



Als Reaktionsgleichung geschrieben:



**Beispiel**

Die für das Leben auf der Erde wichtigsten chemischen Reaktionen sind die Photosynthese und ihre Umkehrung, die Zellatmung.

Aus Wasser, Kohlenstoffdioxid und Sonnenenergie können Pflanzen (= Produzenten) in einem endothermen Vorgang Sauerstoff und Glucose (Traubenzucker) bilden, die in Pflanzen- und Tierzellen zu Kohlenhydraten (Cellulose, Stärke, Glykogen usw.), Fetten (Lipide) und Eiweißen (Proteine) weiterreagieren. Mit dem Luftsauerstoff, den die Organismen durch die Atmung aufnehmen, entstehen aus diesen Naturstoffen (symbolisch mit Glucose wiedergegeben) in den Zellen exotherm erneut die Ausgangsstoffe der Photosynthese:

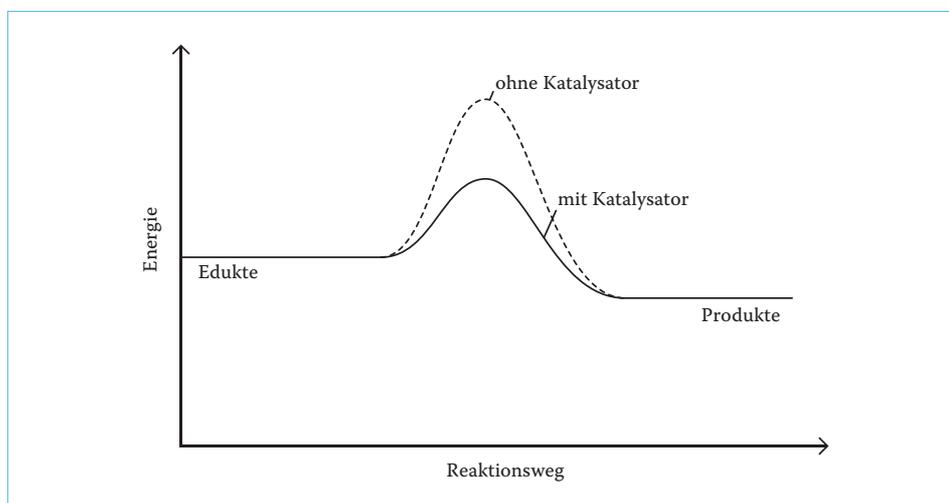
**Katalysatoren**

Die Aktivierungsenergie hat oft zur Folge, dass auch bei erhöhter Temperatur Reaktionen nur sehr langsam oder überhaupt nicht ablaufen. Nun gibt es Stoffe, die zwar an einem chemischen Vorgang teilnehmen, aber am Schluss wieder unverändert vorhanden sind. Solche Stoffe wirken als Katalysatoren: Sie erniedrigen die Aktivierungsenergie, indem sie reaktionsfähigere Zwischenprodukte bilden, die sofort weiterreagieren und dabei das Produkt und den wieder einsatzfähigen Katalysator liefern. Dadurch wird die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht.

Die in Lebewesen wirksamen Katalysatoren, die Enzyme, sorgen dafür, dass zum Beispiel im menschlichen Organismus Reaktionen bereits bei der relativ niedrigen Temperatur von 37°C ablaufen können. Bekannt ist das Enzym Amylase. Es wird von den Speicheldrüsen abgesondert und entfaltet im Mund seine Wirkung. Beim langen Kauen wird die im Brot enthaltene Stärke in ihre Zuckerbausteine zerlegt, die einen süßlichen Geschmack hervorrufen. Auch bei der Herstellung vieler Stoffe in der Industrie kann auf geeignete Katalysatoren nicht verzichtet werden.

**Abb. 1.16**

Energieschema einer exothermen Reaktion unter Verwendung eines Katalysators



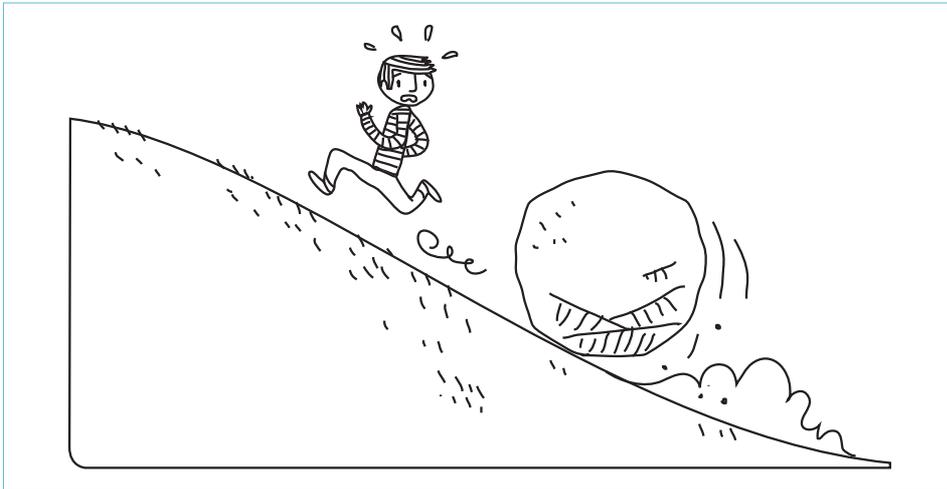
Katalysatoren führen zu reaktionsfähigen Zwischenprodukten, zu deren Bildung eine geringere Aktivierungsenergie erforderlich ist als für die nicht katalysierte Reaktion.

## 1.3 Kraft und Energie, zwei Schlüsselbegriffe in der Chemie

Chemische Vorgänge sind mit einem Energieumsatz verknüpft (Abschnitt 1.2). Damit stellt sich die Frage, was Energie eigentlich ist und wie sie sich äussert.

### Kräfte im Alltag

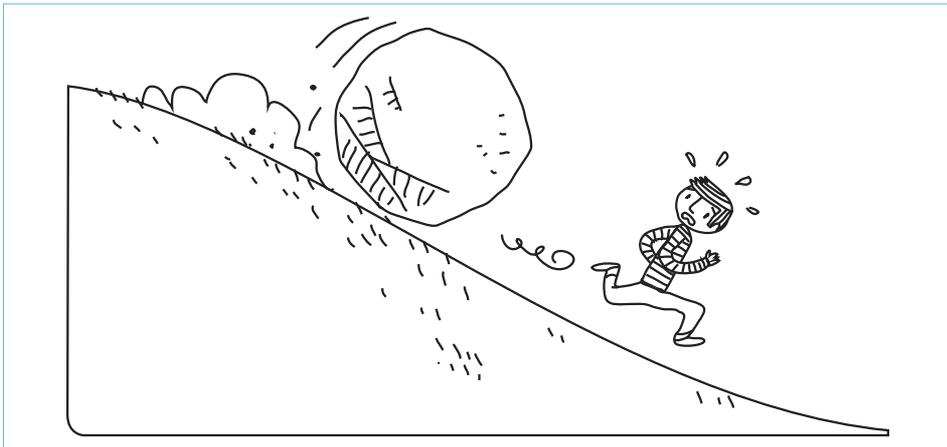
Was ist an der Abb. 1.17 falsch?



**Abb. 1.17**

Albtraum eines Naturwissenschaftlers

Ein Gegenstand auf einer schiefen Ebene rollt nicht nach oben, sondern spontan nach unten (Abb. 1.18).



**Abb. 1.18**

Natürliche Bewegung eines Steins auf einer schiefen Ebene

---

Ein Vorgang (Fallen eines Gegenstands, eine chemische Reaktion usw.) wird dann als spontan bezeichnet, wenn er ohne Aktivierung bei Raumtemperatur abläuft.

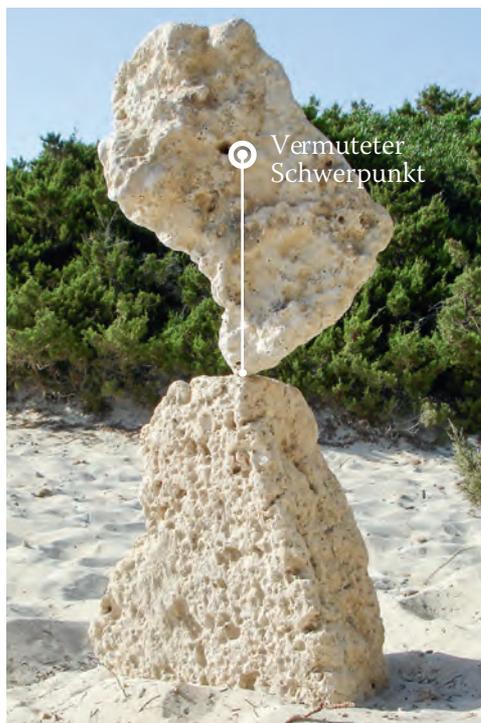
---

Die Ursache für das Fallen eines Gegenstands bzw. die Bewegung eines Körpers auf einer schiefen Ebene nach unten (beide Bewegungen sind prinzipiell gleicher Art) ist die Gravitationskraft. Sie beruht darauf, dass sich zwei Körper (z. B. Erde und Stein) gegenseitig anziehen. Das Wesen der Gravitationskraft ist bis heu-

te noch nicht vollständig geklärt. Hingegen weiss man, dass diese anziehenden Kräfte vom Abstand der Massenschwerpunkte<sup>5</sup> und von der Grösse der Massen abhängen. Je grösser der Abstand zwischen ihnen ist, desto geringer sind die anziehenden Kräfte. Bei gleichem Abstand ist die Kraft umso grösser, je grösser die Massen der Körper sind. Mathematisch wird dieser Sachverhalt mit einem Gesetz<sup>6</sup> ausgedrückt, wobei man die Kraft mit  $F$  (*force* engl. = Kraft), die Massen mit  $m$  und den Abstand mit  $r$  abkürzt. Das Gesetz heisst Gravitationsgesetz.

**Abb. 1.19**

Bedeutung des Schwerpunkts: Der Schwerpunkt des oberen Steins, der ohne mechanische Verbindung auf den unteren gestellt ist, liegt genau senkrecht über dem Berührungspunkt; eine geringfügige Verschiebung des Schwerpunkts aus der Senkrechten würde den Absturz nach sich ziehen.



- Kraft  
Zeichen:  $F$                       Einheit: N (Newton;  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$ )
- Gravitationsgesetz: Beschreibt die Kraft (Gravitationskraft), die zwischen zwei Körpern wirkt.

$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$F$ : Gravitationskraft;  $m_1$  und  $m_2$ : Masse der Körper;  
 $r$ : Abstand der Massenschwerpunkte;  $k$  ist eine Konstante

Was sagt dieses Gesetz aus? Zum einen, dass man, um die Grösse der Kraft zu berechnen, die beiden Körpermassen miteinander multiplizieren muss ( $m_1 \cdot m_2$ ). Werden diese beispielsweise verdoppelt bei gleichbleibendem Abstand  $r$ , so vervierfacht sich die Kraft.

5 Ein im Schwerpunkt unterstützter Körper ist in jeder Lage im Gleichgewicht. Der Schwerpunkt einer Kugel ist das Kugelzentrum bzw. der Erdmittelpunkt für die Erde.

6 Ein naturwissenschaftliches Gesetz beschreibt einen Sachverhalt (z. B. das Fallen eines Steins auf die Erdoberfläche), der bei gleichen Bedingungen (z. B. Masse und Abstand) immer wieder zum selben Ergebnis führt.

Hilfsüberlegung: Ausgangsmassen  $m_1 = 1$  und  $m_2 = 1$ ,  $F_1 = \frac{1 \cdot 1}{r^2} = \frac{1}{r^2}$ ,

neue Massen  $m_1 = 2$  und  $m_2 = 2$ ,  $F_2 = \frac{2 \cdot 2}{r^2} = \frac{4}{r^2}$

Zum ändern muss der Abstand  $r$ , der im Nenner des Bruchs steht, quadriert werden

$\left(\frac{1}{r^2}\right)$ . Bei einer Verdreifachung des Abstands wird die Kraft neunmal kleiner.

Hilfsüberlegung: Ausgangsabstand  $r_1 = 1$ ,  $F_1 = \frac{m_1 \cdot m_2}{1^2} = \frac{m_1 \cdot m_2}{1}$ ;

neuer Abstand  $r_2 = 3$ ,  $F_2 = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m_1 \cdot m_2}{3^2} = \frac{m_1 \cdot m_2}{9}$

Wie könnte man nun eine Kraft definieren? Ein Gegenstand, der nach unten fällt, wird immer schneller (man spricht von einer beschleunigten Bewegung), bis er schliesslich auf dem Boden angelangt ist. Entsprechendes gilt für eine Kugel, die nach unten rollt. Kräfte bewirken also beschleunigte Bewegungen.

---

Kräfte<sup>7</sup> (z. B. die Gravitationskraft) sind die Ursache für eine beschleunigte Bewegung.

---

## Potenzielle und kinetische Energie

Das Beispiel des nach unten fallenden oder rollenden Steins, verknüpft mit dem Gravitationsgesetz, zeigt Folgendes:

1. Fällt ein Stein zu Boden, so verringert sich der Abstand zwischen ihm und der Erde (dem Erdmittelpunkt). Im ursprünglichen Zustand war die anziehende Kraft schwächer, nach dem Auftreffen auf dem Boden ist sie stärker geworden (Verringerung des Abstands  $r$ ). Die Naturwissenschaftler sagen in so einem Fall, dass die potenzielle Energie (Lageenergie = die Lage der beiden Körper zueinander) abgenommen hat, sie ist kleiner geworden. Allgemein ausgedrückt, heisst das (für zwei Körper):

- 
- Schwache anziehende Gravitationskräfte (grosser Abstand) bedeuten eine grosse potenzielle Energie.
  - Starke anziehende Gravitationskräfte (kleiner Abstand) bedeuten eine kleine potenzielle Energie.
- 

2. Im Zeitraum des Fallens gerät der Stein in immer schnellere Bewegung, d. h. in eine beschleunigte Bewegung, wie bereits erwähnt wurde. Die Naturwissenschaftler drücken diesen Sachverhalt folgendermassen aus: Die kinetische Energie (Bewegungsenergie) ist vor dem Fallen null, nimmt dann zu und erreicht ein Maximum kurz vor dem Aufprall auf den Boden. Allgemein ausgedrückt, heisst das für zwei sich anziehende Körper:

---

<sup>7</sup> Neben der Gravitationskraft gibt es weitere Kräfte, z. B. die Coulomb-Kraft zwischen elektrisch geladenen Körpern (Abschnitte 3.5 und 3.6) und die magnetische Kraft.

Beim Übergang vom Zustand hoher potenzieller Energie (schwache anziehende Kräfte) zu einem Zustand niedriger potenzieller Energie (starke anziehende Kräfte) erfolgt durch die anziehenden Kräfte eine beschleunigte Bewegung. Die kinetische Energie nimmt dadurch bis zum Ende der Bewegung zu.

Die Aussagen 1 und 2 bedürfen noch einer genaueren Erklärung. Was bedeutet es, dass eine grosse potenzielle Energie mit schwachen anziehenden Kräften und eine kleine potenzielle Energie mit starken anziehenden Kräften über eine beschleunigte Bewegung miteinander verknüpft sind? Warum spricht man in diesem Zusammenhang ausserdem von Energie? Diesen Fragen soll im Folgenden nachgegangen werden.

### Energie und Arbeit

Man könnte einen fallenden (grossen) Stein dazu benützen, Arbeit zu verrichten, um z. B. einen Gegenstand in die Höhe zu heben. Wie muss man sich das vorstellen? Nehmen wir an, ein Gepäckstück soll von der Strasse in den obersten Teil eines Hauses, in den Estrich (Speicher), transportiert werden. Dazu ist ein Balken mit einer Rolle, über die ein Seil läuft, an der Hauswand über dem Estrichfenster angebracht. Das Seil ist nun so gelegt, dass sich das eine Ende oben an der Rolle befindet, das andere unten. Am oberen Ende befestigt man den Stein, am unteren das Gepäckstück.

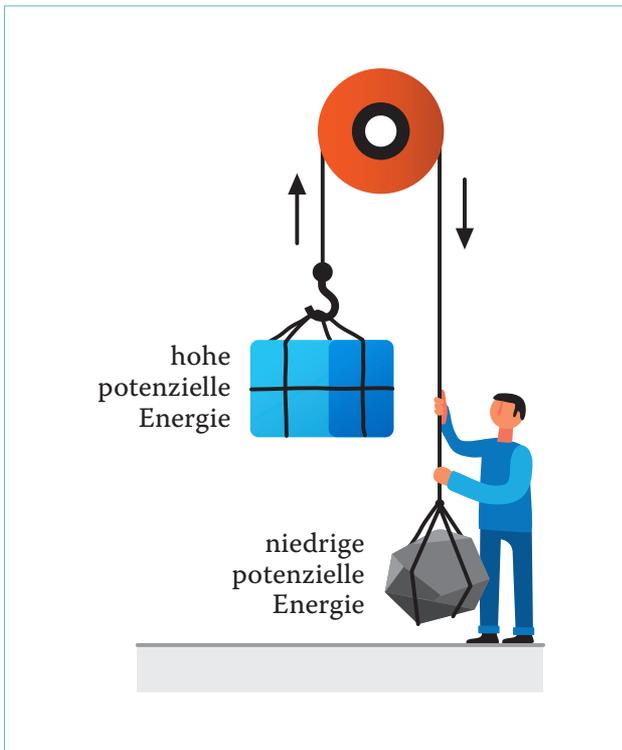
Der Stein kann jetzt aufgrund seiner Bewegung in Richtung Strasse das Gepäckstück nach oben ziehen (Bedingung: Der Stein muss mindestens so schwer sein wie das Gepäckstück). An dem Gepäckstück wird Arbeit verrichtet, wie es in der Fachsprache heisst. Die Fähigkeit, diese Arbeit auszuführen, ist, wie man unschwer erkennen kann, im Stein in dieser Position vor dem Fallen schon enthalten. Daraus resultiert folgende Definition: Energie ist nichts anderes als gespeichertes Arbeitsvermögen.<sup>8</sup> Wie lässt sich im Zusammenhang damit der Begriff Arbeit genauer erklären?

**Abb. 1.20**

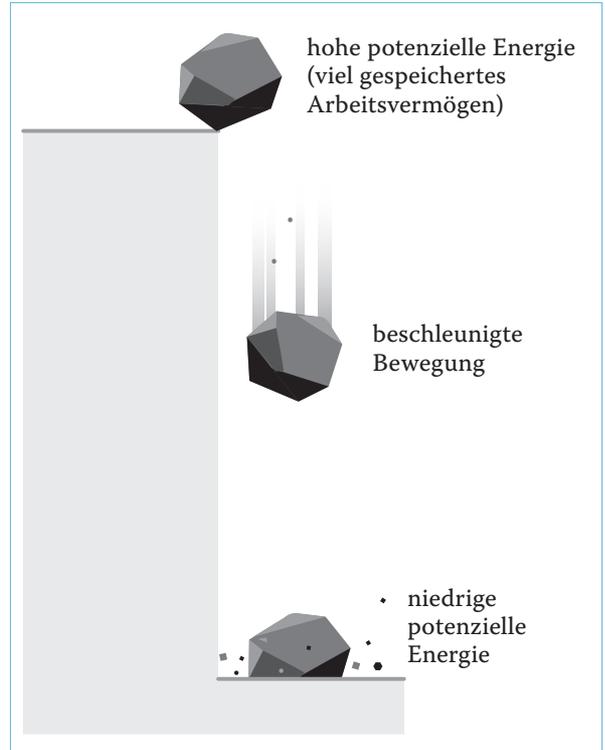
Lastenaufzug an Häusern in Amsterdamm



8 «Energie»: altgriechisch *enérgeia* ἐνέργεια = «Aktivität», «Wirksamkeit», zusammengesetzt aus der Vorsilbe ἐν für «darin» und ἔργον für «Arbeit». Wörtlich übersetzt, bedeutet das Wort «Energie» also «darin steckt Arbeit». Markus Pfister, Bern, persönliche Kommunikation.

**Abb. 1.21**

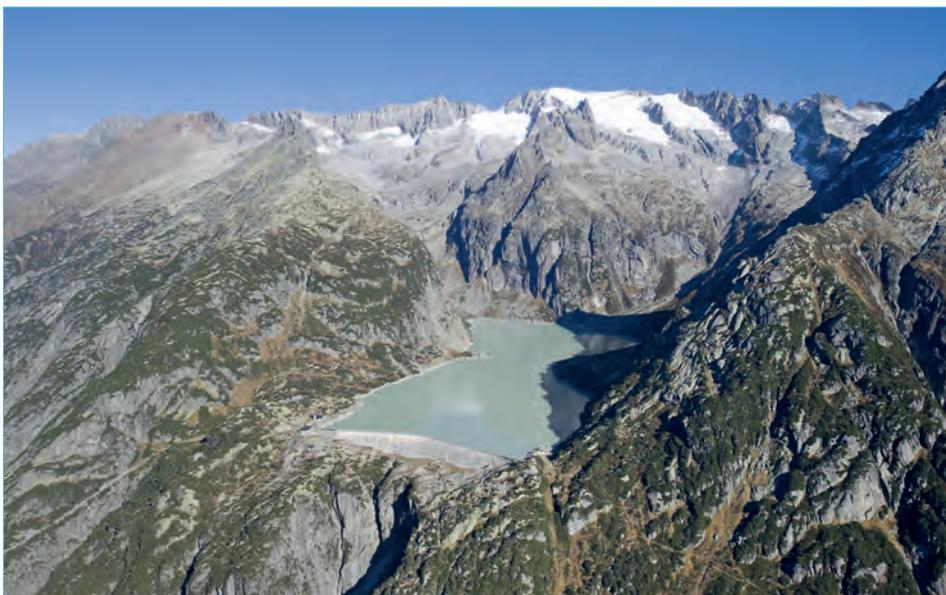
Verrichtung von Arbeit an einem Gepäckstück durch einen fallenden Stein

**Abb. 1.22**

Energieverhältnisse eines fallenden Steins

Die Gravitationskraft wirkt über den fallenden Stein auf das Seil und das Gepäckstück. Arbeit ist offenbar mit Bewegung und Kraft verknüpft. Allgemein ausgedrückt: Wirkt eine Kraft  $F$  über eine bestimmte Wegstrecke  $s$ , so wird Arbeit verrichtet.

Eindruckliche Beispiele von gespeichertem Arbeitsvermögen sind die Stauseen, deren «fallendes» Wasser Turbinen antreibt und dadurch Strom erzeugt.

**Abb. 1.23**

Gespeicherte Arbeit (potenzielle Energie) im Gelmersee, Kraftwerke Oberhasli



## Energieerhaltung

### Fallender Stein

Der fallende Stein überträgt sein ursprünglich gespeichertes Arbeitsvermögen auf das Gepäckstück, dessen potenzielle Energie durch Vergrößerung des Abstands zum Erdmittelpunkt zunimmt. Auch wenn der Stein keine Arbeit, wie z. B. das Hochheben eines Gegenstands, verrichten würde, wäre die Energie nicht verloren (Abb. 1.22). Kurz vor dem Aufprall ist nämlich die ursprünglich vorhandene potenzielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewandelt. Der Aufschlag auf den Boden hinterlässt eine kleine Vertiefung und umherfliegendes Bodenmaterial. Die vor dem Fall im Stein gespeicherte Energie wird durch den Aufprall in Bewegungsenergie (kinetische Energie) sowie in eine leichte Erwärmung (Wärmeenergie) des Aufschlagsorts umgewandelt. Dieses Beispiel zeigt, dass Energie nicht verloren geht, sondern in andere Energieformen umgewandelt wird.

- 
- Energieerhaltung: In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie erhalten.
  - Bei der Verwendung von Energie (Verrichtung von Arbeit) wird diese in andere Energieformen umgewandelt (Tabelle 1.3).
  - Potenzielle und kinetische Energie sind die wichtigsten Energieformen. Jede andere Energieform lässt sich auf sie zurückführen.<sup>9</sup>
- 

## Weitere Beispiele zur Energieerhaltung

### Silbersulfid/Silber und Schwefel

In Abschnitt 1.2 konnte man dieses Phänomen schon beobachten. Die dem Silbersulfid zugeführte Energie (Wärme) des Bunsenbrenners wurde als «chemische Energie» im Silber und Schwefel gespeichert. Die Umkehrung, Silber + Schwefel, führte dann zu einer exothermen Reaktion mit dem energieärmeren Produkt Silbersulfid.

### Nährstoffe

Die Umwandlung von chemischer Energie in Wärmeenergie ist ein grundlegender Vorgang für uns Menschen. Die Nährstoffe (Kohlenhydrate, Fette, Proteine), Folgeprodukte der Photosynthese, erzeugen in unserem Körper an einem einzigen Tag etwa 10 Millionen Joule Körperwärme. Davon strahlen wir rund 100 Joule pro Sekunde an die Umgebung ab. Dies entspricht der Wärmeabstrahlung einer Glühbirne von 100 Watt (ein Watt gleich ein Joule pro Sekunde).<sup>10</sup>

### Fossile Brennstoffe

Etwa 80 Prozent der auf der Erde verbrauchten Energie steckt als chemische Energie im Erdöl und damit in allen Erdölprodukten, im Erdgas, in der Kohle sowie im Holz der Pflanzen. Auch diese Stoffe haben ihren Ursprung in der Photosynthese, die die dazu benötigte Energie von der Sonne erhält.

---

<sup>9</sup> Kammer, H.; Mgeladze, I.: Physik für Mittelschulen. hep verlag. Bern. 2. Auflage 2014, S. 132.

<sup>10</sup> Lewin, W.; Goldstein, W.: Es funktioniert! Vom Vergnügen, endlich Physik zu verstehen. btb-Verlag. München. 2013. S. 236 ff.

## Akkumulator

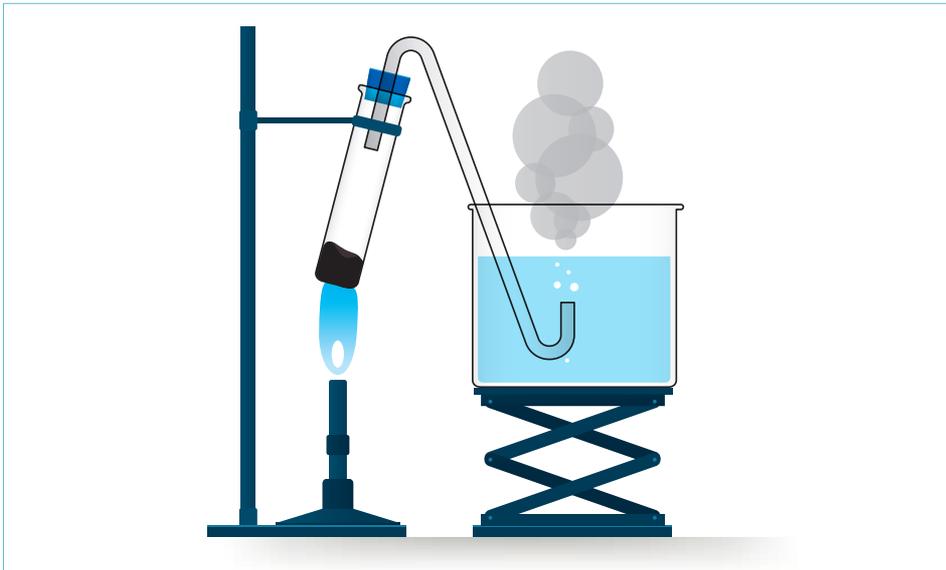
In Blei-Akkumulatoren («Autobatterie») oder in den immer wichtiger werdenden Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist ebenfalls chemische Energie gespeichert. Bei Gebrauch steht sie als elektrische Energie zur Verfügung: um ein Auto zu starten, um Telefone jeglicher Art zu verwenden, Computer, Laptops, Tablets usw. zu betreiben. Diese wenigen Beispiele weisen auf die grosse Bedeutung der chemischen Energie in unserem Alltag hin.

**Tabelle 1.3** Wechselseitige Umwandlung von Energieformen

Energieform		Energieform
<u>mechanische Energie</u> Bewegung Bewegung	Reibung → ← Dampfmaschine	<u>Wärmeenergie</u> Reibungswärme Wärme von Wasserdampf
<u>mechanische Energie</u> Wasser in einer Druckleitung Schall	Generator → ← Lautsprecher	<u>elektrische Energie</u> elektrischer Strom elektrischer Strom
<u>Wärmeenergie</u> Wärme von Wasserdampf Wärme	Dampfturbine → ← Kochherd	<u>elektrische Energie</u> elektrischer Strom elektrischer Strom
<u>Wärmeenergie</u> zugeführte Wärme aufgenommene Wärme	glühendes Metall (Glühbirne) → ← bestrahlte Gegenstände	<u>Lichtenergie</u> Licht Sonnenlicht
<u>chemische Energie</u> Glucose und Sauerstoff	← Photosynthese	<u>Lichtenergie</u> Sonnenlicht
<u>Wärmeenergie</u> zugeführte Wärme ausgestrahlte Wärme Körpertemperatur	Kochherd → ← Ofen ← Atmung	<u>chemische Energie</u> gekochte Lebensmittel Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) Nahrungsmittel
<u>elektrische Energie</u> elektrischer Strom elektrischer Strom	Ladevorgang → ← Entladen einer Batterie, eines Akkumulators	<u>chemische Energie</u> Batterie, Akkumulator Batterie, Akkumulator

## 1.4 Stoffeigenschaften lassen sich mit dem allgemeinen Teilchenmodell erklären – Energie und Aggregatzustände

Erhitzt man ein kleines Stück Menthol ( $t_m = 43^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 212^\circ\text{C}$ ) in einem Reagenzglas, so schmilzt der Stoff, und nach einiger Zeit siedet er. Ist das Reagenzglas mit einem Stopfen verschlossen und mit einem gebogenen Glasrohr verbunden, das in Wasser eintaucht, sieht man Blasen aufsteigen. Nach kurzer Zeit ist im ganzen Raum ein Pfefferminzgeruch festzustellen. Offenbar hat das Volumen von Menthol beim Sieden stark zugenommen. Das gasförmige Menthol gelangt in Form von Blasen durch das Wasser ins Zimmer und breitet sich dort aus.

**Abb. 1.24**

Erhitzen von Menthol

### Das allgemeine Teilchenmodell

Die starke Volumenzunahme beim Sieden lässt sich erklären, wenn man davon ausgeht, dass Menthol, wie alle Stoffe, aus kleinsten Teilchen besteht (allgemeines Teilchenmodell): Im festen Zustand sind die Abstände zwischen den Teilchen sehr klein, im flüssigen etwas grösser, im gasförmigen Zustand sind sie sehr gross. Dass ein Stoff erhitzt werden muss, um den gasförmigen Zustand zu erreichen, deutet darauf hin, dass zwischen den kleinsten Teilchen im festen und flüssigen Aggregatzustand Anziehungskräfte herrschen, die sich nur durch Zufuhr von Wärmeenergie überwinden lassen. Durch die Wärmezufuhr erhalten die Teilchen Energie, kinetische Energie  $E_k$ . Sie bewegen sich schliesslich bei der Siedetemperatur so schnell, dass die Kräfte nicht mehr ausreichen, um ihren Zusammenhalt zu gewährleisten. Im gasförmigen Zustand können sich die Teilchen frei bewegen; die anziehenden Kräfte sind wegen der grossen Abstände praktisch nicht mehr wirksam.

Wenn ein Stoff erwärmt wird, nimmt die kinetische Energie seiner Teilchen zu. Sie ist ein Mass für die Temperatur. Interessanterweise können wir also mit unserem Temperatursinn wahrnehmen, wie schnell sich Teilchen bewegen: Je wärmer beispielsweise das Wasser in der Badewanne ist, desto schneller bewegen sich die Wasser-Teilchen.

---

Die Temperatur ist proportional zur kinetischen Energie der Teilchen.

---

Ob sich Stoffteilchen auch bei Raumtemperatur bewegen, kann mit folgendem Experiment untersucht werden: Feines Aluminiumpulver wird in Wasser aufgeschlämmt, dann abfiltriert, sodass nur noch wenig Aluminium im Gemisch vorhanden ist. Das Reagenzglas mit dieser Mischung wird in einen Laserstrahl gestellt. Die Aluminiumflitter<sup>11</sup> reflektieren das Licht (Abb. 1.25), und man kann

<sup>11</sup> Flitter: glitzernde Metallplättchen.

Abb. 1.25

Aluminiumfitter im Laserlicht



beobachten, dass sie sich regellos bewegen. Die Ursache dafür liegt in der Bewegung der unsichtbaren kleinsten Wasser-Teilchen, die dauernd mit den Aluminiumfittern zusammenstossen. Diese indirekt sichtbar gemachte Teilchenbewegung nennt man Brownsche Bewegung. Ähnliches lässt sich bei Tusche (Suspension: Wasser/Russ) oder Milch (Emulsion: Wasser/Fetttröpfchen) unter dem Mikroskop beobachten (Abb. 1.26).

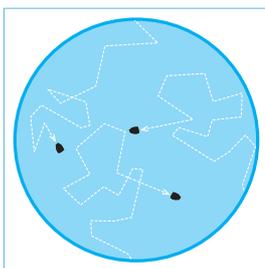


Abb. 1.26

Brownsche Bewegung: Tusche unter dem Mikroskop

Brownsche Bewegung: Dauernde spontane Bewegung feinsten, in einer Flüssigkeit suspendierter Teilchen (z. B. Aluminiumfitter oder Russ in Wasser) oder in der Luft verteilter Teilchen oder Wassertropfen (Rauch, Nebel). Ursache ist die Bewegung der kleinsten, unsichtbaren Flüssigkeits- bzw. Luftteilchen.

Da sich Stoffteilchen also offenbar auch bei Normaltemperatur bewegen und die Bewegung bei Erwärmung zunimmt, kann man sich umgekehrt auch fragen, was geschieht, wenn ein Stoff immer weiter abgekühlt wird.

Tatsächlich gibt es eine minimale Temperatur, die sich nicht unterschreiten lässt: wenn die Stoffteilchen keine Bewegung mehr aufweisen. Diese tiefste mögliche Temperatur, die bei  $-273.15^\circ\text{C}$  liegt, wird in der absoluten Temperaturskala (Zeichen:  $T$ ) mit der Einheit Kelvin (K) als Nullpunkt definiert. Da die Temperaturschritte in beiden Skalen gleich gross sind, kann die absolute Temperatur berechnet werden, indem man zur Celsius-Temperatur  $273.15$  addiert. Die Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  entspricht damit in der absoluten Temperaturskala  $293.15\text{ K}$  und liegt weit höher als der absolute Nullpunkt. Deshalb besitzen Teilchen bei für uns üblichen Temperaturen eine recht hohe kinetische Energie: Auch bei  $0^\circ\text{C}$  beträgt die absolute Temperatur noch  $273.15$  Kelvin!

- Celsius-Temperatur  
Zeichen:  $t$  Einheit:  $^\circ\text{C}$  (Grad Celsius)
- Absolute Temperatur  
Zeichen:  $T$  Einheit: K (Kelvin)
- Absoluter Nullpunkt  
 $T = 0\text{ K}; t = -273.15^\circ\text{C}$
- Berechnung der Celsius- aus der absoluten Temperatur:  $t = T - 273.15$
- Berechnung der absoluten aus der Celsius-Temperatur:  $T = t + 273.15$

- Allgemeines Teilchenmodell und Aggregatzustände
  - Alle Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen, die sich ständig und zufällig bewegen.
  - Wird ein Stoff erwärmt, bewegen sich die Stoffteilchen schneller, d. h., die kinetische Energie nimmt zu.
  - Zwischen den kleinsten Teilchen herrschen anziehende Kräfte, die in Richtung fest–flüssig–gasförmig aufgrund der zunehmenden Teilchenabstände immer schwächer werden.<sup>12</sup>
  - Um einen Stoff vom festen über den flüssigen in den gasförmigen Zustand überzuführen, ist ein Energieaufwand nötig, da jeweils anziehende Kräfte überwunden werden müssen. Dabei nimmt die potenzielle Energie zu (größerer Abstand zwischen Teilchen, die sich anziehen). Die Temperatur aber – und damit auch die kinetische Energie der Teilchen – bleibt beim Wechsel des Aggregatzustands konstant.

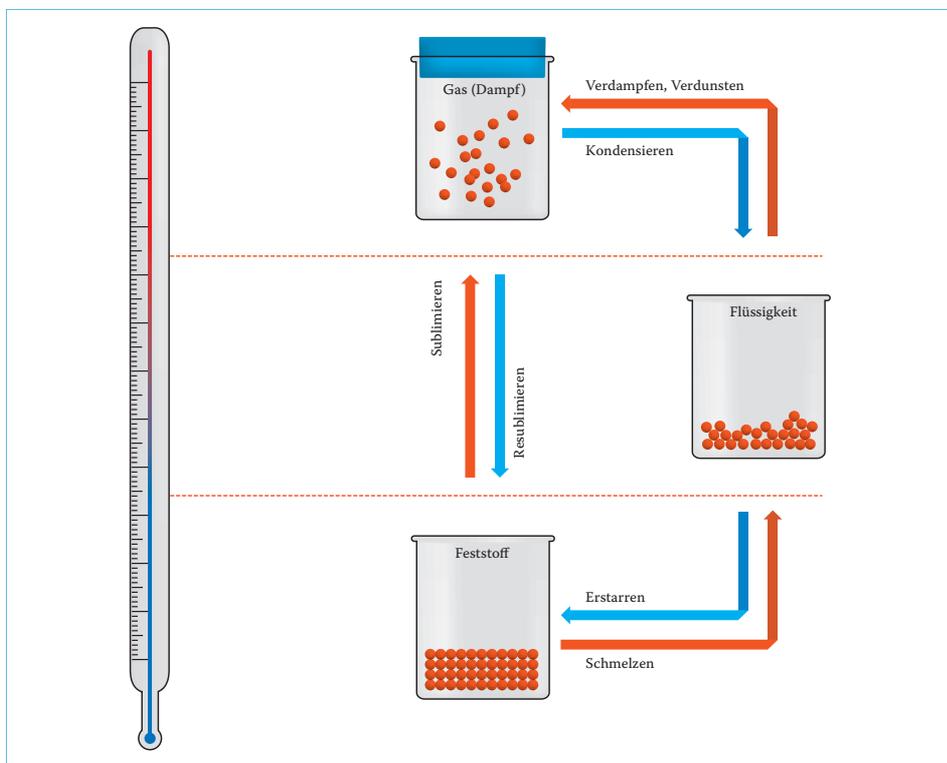


Abb. 1.27

Modellvorstellung zu den Aggregatzuständen

Tabelle 1.4 Aggregatzustände und ihre Merkmale

Aggregatzustand	Teilchenabstand	Teilchenbewegung	anziehende Kräfte	Form und Volumen	Aggregatzustandsänderung
fest (s)	sehr klein	sehr gering	stark	beide konstant	fest $\rightarrow$ flüssig: $t_m$ konstant, bis der Körper vollständig geschmolzen ist
flüssig (l)	klein	gering	schwach	Volumen konstant Form variabel	flüssig $\rightarrow$ gasförmig: $t_b$ konstant, bis die gesamte Flüssigkeit gasförmig geworden ist
gasförmig (g)	gross	gross	sehr schwach	beide variabel	

12 Ausnahme Wasser: Die Teilchenabstände und damit auch die Dichte nehmen vom festen zum flüssigen Aggregatzustand bis 4 °C ab, dann erst wieder zu.

## Kraft, Energie und Aggregatzustände

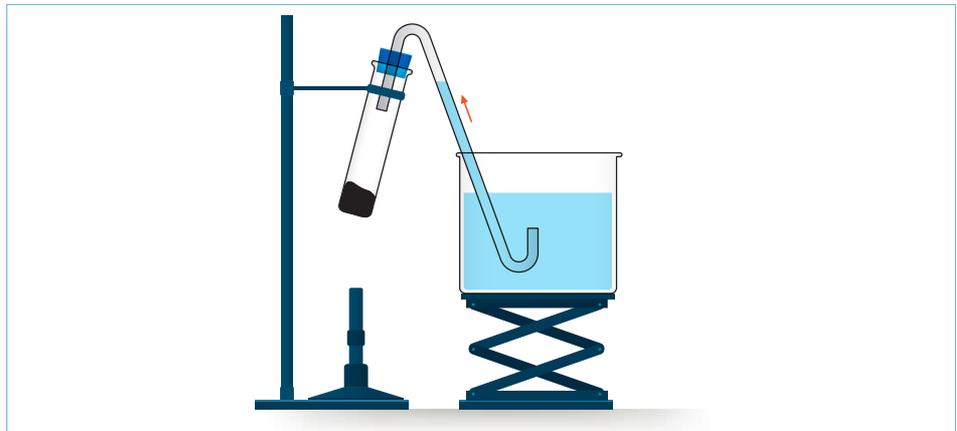
Offenbar spielt der Zusammenhang zwischen Kraft und Energie (Abschnitt 1.3) auch für die Erklärung der Aggregatzustände eine entscheidende Rolle. Der Gedanke, dass die Kräfte zwischen den kleinsten Stoffteilchen wie im Beispiel des fallenden Steins Gravitationskräfte sind, ist zwar naheliegend, trifft aber nicht zu. Die Masse der Teilchen ist viel zu klein, um damit die Aggregatzustände erklären zu können. Es muss sich um andersartige Kräfte handeln, die in den folgenden Kapiteln ausführlich dargestellt werden. Abgesehen von diesem Unterschied sind die in Abschnitt 1.3 hergeleiteten Zusammenhänge zwischen Kraft und Energie auch im Teilchenmodell gültig.

## Kräfte sind die Ursache für eine beschleunigte Bewegung

Lässt man beim Menthol-Experiment (Abb. 1.24) nach dem Sieden von Menthol das Reagenzglas mit im Wasser eingetauchtem Glasrohr abkühlen, kann man beobachten, dass der Wasserspiegel im Rohr ansteigt (Abb. 1.28). Wie lässt sich das erklären?

**Abb. 1.28**

Angestiegener Wasserspiegel im Rohr nach dem Abkühlen des Reagenzglases



Gemäss dem allgemeinen Teilchenmodell sind die Abstände zwischen den Menthol-Teilchen im gasförmigen Zustand oberhalb von  $212^\circ\text{C}$  sehr gross, und es wirken praktisch keine Anziehungskräfte. Wird das Menthol nicht mehr erwärmt, kühlt sich das Reagenzglas ab, und die Geschwindigkeit der Menthol-Teilchen sinkt. Bei der Siedetemperatur schliesslich sind die Teilchen so langsam, dass die kinetische Energie nicht mehr ausreicht, um die Anziehungskräfte zu überwinden. Nun geschieht dasselbe wie beim fallenden Stein: Die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen bewirken eine beschleunigte Bewegung, sodass sie sich einander stark nähern. Das gasförmige Menthol kondensiert zur Flüssigkeit. Dabei wandelt sich potenzielle Energie in kinetische Energie (Wärme) um, die beim Abkühlen an die Umgebung abgegeben wird (Energieerhaltung). Die Menthol-Teilchen, die nun näher beieinander sind, haben eine niedrigere potenzielle Energie als zuvor im gasförmigen Zustand.

Das Erstarren erfolgt analog zum Kondensieren. Wenn die Teilchen der Flüssigkeit eine bestimmte kinetische Energie unterschreiten (bei der Schmelztemperatur), können sie sich nicht mehr gegenseitig verschieben. Sie nehmen feste Gitterplätze ein, an denen sie sich nur noch um einen Ruhepunkt bewegen. Ihre potenzielle Energie hat dadurch abgenommen (kleiner Abstand, starke anziehen-

de Kräfte). Durch die starke Zunahme der Anziehungskräfte kommt es wiederum zu einer Umwandlung von potenzieller in kinetische Energie und damit zu einer Wärmeabgabe an die Umgebung (Energieerhaltung).

### Energie ist gespeichertes Arbeitsvermögen

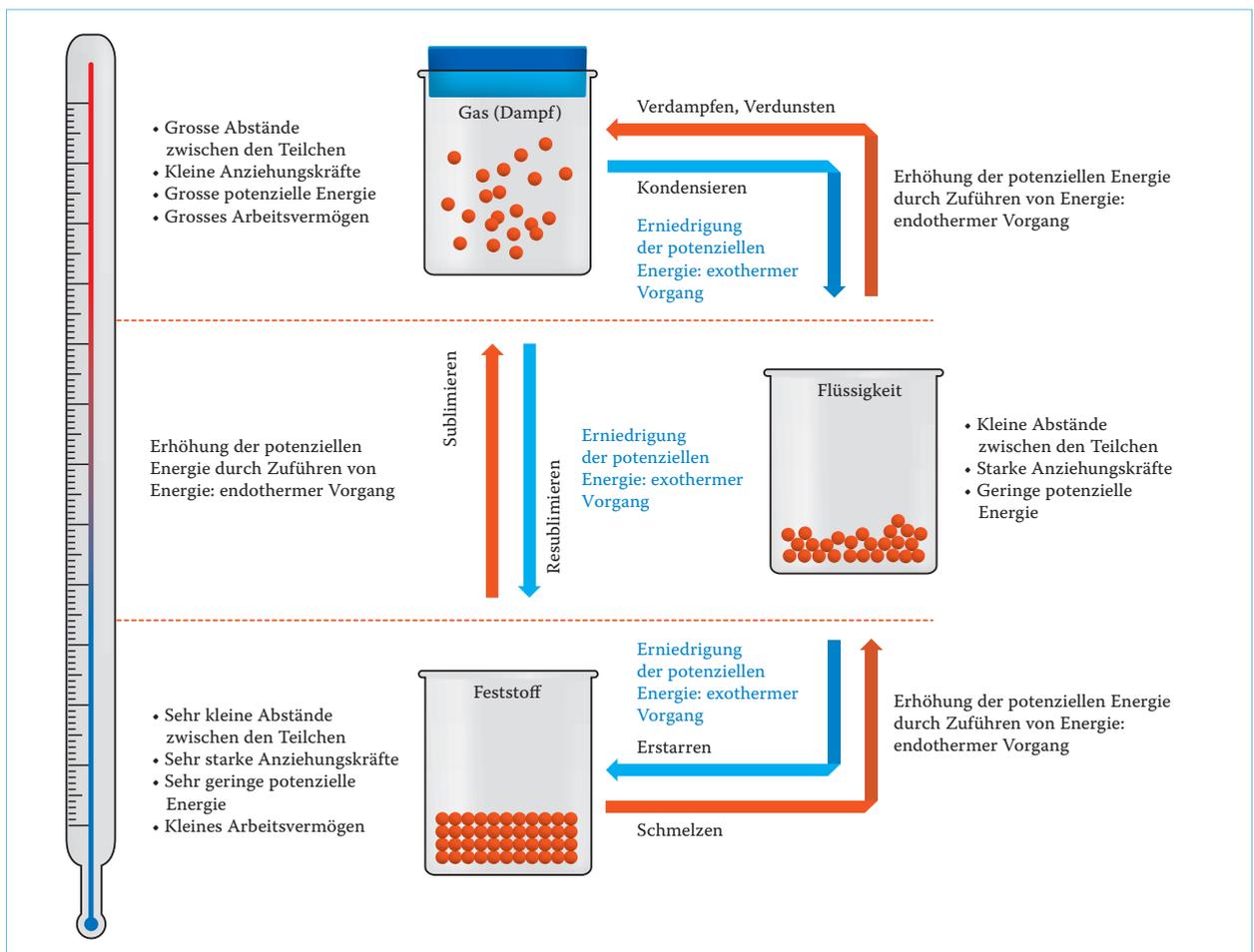
Beim Übergang gasförmig–flüssig kommt es also zu einer Beschleunigung der Teilchen, die sich einander nähern, wodurch Wärme frei wird: Kondensieren ist ein exothermer Vorgang. Die dabei auftretende Volumenverminderung bewirkt eine Anhebung des Wasserspiegels (entsprechend Abb. 1.28). Analog zu einem Stein, der mithilfe eines Trägerbalkens ein Gepäckstück nach oben zieht (Abschnitt 1.3), dient somit die potenzielle Energie des energiereichen gasförmigen Zustands von Menthol dazu, Arbeit zu verrichten, um das Wasser im Glasrohr anzuheben. Dabei steht gleich viel Energie zur Verfügung, wie man beim Sieden aufwenden musste, um die Anziehungskräfte im flüssigen Zustand zu überwinden. Menthol im gasförmigen Zustand besitzt ein grosses Arbeitsvermögen, d. h. viel Energie.

### Abstand, Kraft und Energie

In Abschnitt 1.3 wurde gezeigt, wie die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern von ihrem Abstand und ihrer potenziellen Energie abhängt. Angewendet auf das Teilchenmodell zu den Aggregatzuständen, lassen sich folgende Zusammenhänge herleiten (Abb. 1.29):

**Abb. 1.29**

Aggregatzustandsänderungen im Zusammenhang mit Kräften und Energie



## 1.5 Wahrscheinliche Zustände

Wie bereits ausgeführt, wirken zwischen Wasser-Teilchen, wie in allen Flüssigkeiten, starke Anziehungskräfte, die beim Siedevorgang durch Zuführen von Wärmeenergie überwunden werden müssen. Dadurch erreichen sie den energiereicheren gasförmigen Zustand (Zunahme der potenziellen Energie), bei dem die anziehenden Kräfte praktisch nicht mehr wirken.

Wie ist es dann aber möglich, dass unser nasses Haar auch ohne Fön sowie feuchte Wäsche an der Luft von selber trocknet? Anscheinend verdunstet<sup>13</sup> Wasser bei Temperaturen, die wesentlich tiefer sind als die Siedetemperatur.

**Abb. 1.30**

Wäsche beim Trocknen



Um diesen scheinbar widersprüchlichen Sachverhalt zu verstehen, ist es wichtig, dass wir uns nochmals dem Begriff der zufälligen, regellosen Bewegung der kleinsten Teilchen zuwenden. Wenn diese zusammenstossen, und dies geschieht ständig, wird die kinetische Energie nicht gleichmässig verteilt. Je nach Art des Zusammenstosses kann ein Teilchen beispielsweise sehr viel Energie an ein Nachbarpartikel abgeben. Deshalb existieren immer auch Teilchen, deren kinetische Energie wesentlich höher ist als die durchschnittliche Energie. Befinden sich energiereiche Wasser-Teilchen an der Oberfläche, können sie den Flüssigkeitsverband verlassen, auch wenn die durchschnittliche Energie zu klein dafür ist, d. h. die Temperatur noch unterhalb der Siedetemperatur liegt. Bei diesem Verdunstungsvorgang werden die Abstände zwischen den gasförmigen Wasser-Teilchen grösser. Dabei müssen anziehende Kräfte überwunden werden, die potenzielle Energie der Wasser-Teilchen nimmt zu. Da die durchschnittliche kinetische Energie der Wasser-Teilchen im flüssigen Wasser durch den Verlust der schnellen Teilchen sinkt, wird die Energie für die Zunahme der potenziellen Energie des Wasserdampfs dem flüssigen Wasser entzogen: Die Flüssigkeit kühlt sich ab. Das Verdunsten von Wasser ist deshalb ein endothermer Vorgang. Diese Form der Abkühlung nutzen wir beim Schwitzen: Wenn der Schweiß auf der Haut verdunstet, wird der ganze Körper von aussen nach innen abgekühlt.

<sup>13</sup> Verdunsten bezieht sich auf den Übergang flüssig-gasförmig unterhalb der Siedetemperatur.

Fragen wir nach der Ursache, warum in unserem Beispiel das Prinzip des Energieminimums beim Verdunsten verletzt wird, betrachten wir am besten ein Wasser-Teilchen, das gerade in die Gasphase übergegangen ist. Wenn ein zufälliger Zusammenstoß dazu führt, dass es den flüssigen Verband verlässt, weshalb findet nicht auch das Gegenteil statt, ein Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand?

Der Schlüssel zur Lösung liegt in der Wahrscheinlichkeit: Da die Abstände zwischen den gasförmigen Wasser-Teilchen grösser sind, nimmt die Anzahl Möglichkeiten, wie sich Wasser-Teilchen zueinander anordnen können, vom flüssigen zum gasförmigen Zustand stark zu. Darum ist die Wahrscheinlichkeit wesentlich grösser, dass Wasser-Teilchen in die Luft gelangen, als dass die Flüssigkeit sie wieder einfängt – auch wenn die Flüssigkeit dabei abkühlt und es sich deshalb um einen endothermen Vorgang handelt.

---

Ein Zustand ist umso wahrscheinlicher, je grösser die Anzahl Anordnungsmöglichkeiten für die Teilchen eines Systems ist (vgl. auch Abschnitt 12.2).

---

Zusammengefasst: Neben dem Prinzip des Energieminimums gibt es noch das Prinzip des Wahrscheinlichkeitsmaximums. Einerseits führen die Kräfte zu energiearmen Zuständen, andererseits verteilen sich die Teilchen aufgrund ihrer zufälligen Bewegung zu möglichst wahrscheinlichen Anordnungen.

---

Für jedes System gilt das Prinzip des Energieminimums aufgrund der wirkenden Kräfte sowie das Prinzip des Wahrscheinlichkeitsmaximums aufgrund der zufälligen Teilchenbewegung.

---

## Diffusion

Nun ist es auch möglich, folgenden Vorgang zu verstehen: Gibt man einige Tropfen des Elements Brom in einen Glaszylinder, so füllt sich dieser nach kurzer Zeit vollständig mit Bromgas. Da sowohl das flüssige als auch das gasförmige Brom braun ist, lässt sich dieser Vorgang sehr gut beobachten.



**Abb. 1.31**

Flüssiges Brom geht spontan in den energiereicheren gasförmigen und damit wahrscheinlicheren Zustand über, es verdunstet.

Interessant an diesem Versuch ist, dass der ganze Zylinderinhalt nach kurzer Zeit eine gleichmässige Farbe annimmt. Dies bedeutet, dass sich die Brom-Teilchen mit den Teilchen in der Luft vermischt haben, obwohl sie wesentlich schwerer sind als die Stickstoff- und Sauerstoff-Teilchen der Luft. Offenbar geschieht dies aufgrund der zufälligen Teilchenbewegung auch entgegen der Gravitationskraft.

Die Verteilung von Teilchen, die auch bei in Flüssigkeiten gelösten Stoffen beobachtet werden kann (z. B. das Salz in der Suppe), nennt man Diffusion. Die Ursache dafür liegt ebenfalls in der zufälligen Teilchenbewegung. Es ist wahrscheinlicher, dass sich die Teilchen vermischen, als dass sie getrennt bleiben. Wie beim Verdunsten entsteht also auch bei der Diffusion ein Zustand grösserer Wahrscheinlichkeit, der eine grössere Anzahl Anordnungsmöglichkeiten aufweist.

---

Aufgrund der zufälligen Bewegung der kleinsten Teilchen haben Gase, Flüssigkeiten und gelöste Stoffe die Tendenz, sich gleichmässig zu vermischen. Diesen Vorgang nennt man Diffusion.

---

### Der Nachweis von Stärke

Gibt man in eine Uhrschale etwas Iod und wölbt darüber eine zweite Schale mit einer dünnen Kartoffelscheibe, so färbt sich diese schon nach kurzer Zeit blauviolett (Abb. 1.33). Was ist passiert? Das (feste) Element Iod geht bei Raumtemperatur in einem endothermen Vorgang spontan in den gasförmigen Zustand über, ohne dazwischen flüssig zu werden. Das Iod sublimiert, wie der Fachausdruck dazu heisst. Die gasförmigen Iodteilchen diffundieren anschliessend zur Kartoffelscheibe und bilden mit der Stärke die erwähnte blauviolette Farbe (Nachweis von Iod bzw. von Stärke).

Dieser Versuch zeigt eindrücklich, dass das allgemeine Teilchenmodell sowohl die Aggregatzustände und ihre Übergänge als auch energetische Aspekte sowie den Vorgang der Diffusion vollständig erklären kann.

Eine ähnliche Erscheinung ist im Winter zu beobachten: Eisreste auf den Strassen verschwinden allmählich, ohne dass das Eis flüssig wird. Auch hier findet eine Sublimation, ein direkter Übergang fest–gasförmig, spontan statt.



**Abb. 1.32**  
Nachweis von Stärke mit Iod



**Abb. 1.33**  
Festes Iod sublimiert und färbt eine Kartoffelscheibe (Stärke) blauviolett.



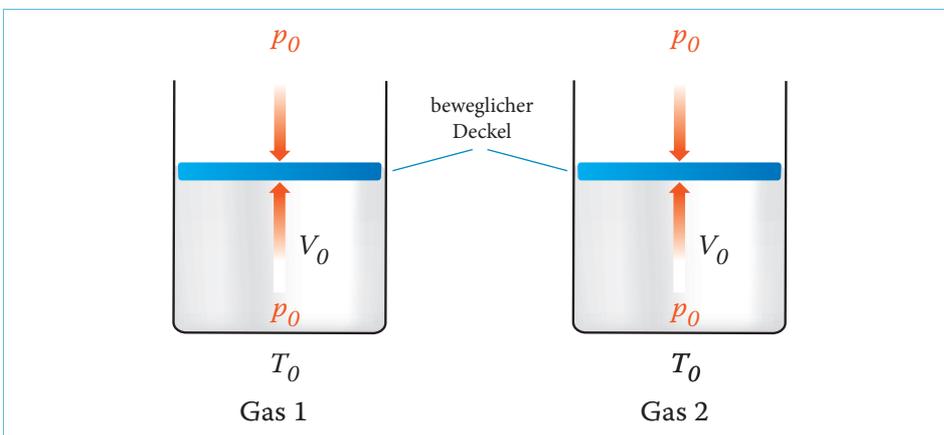
## 1.6 Die Teilchenzahl bestimmt das Volumen eines Gases

Bei chemischen Reaktionen spielen sehr oft gasförmige Stoffe eine wichtige Rolle. Wie viele Teilchen dabei in einem bestimmten Volumen vorhanden sind, ist in vielen Fällen von entscheidender Bedeutung. Man könnte nun annehmen, dass die Masse und damit auch die Grösse der Teilchen für ein Gasvolumen verantwortlich sind. Diese Annahme erweist sich jedoch als nicht richtig, wie im Folgenden gezeigt wird.

### Der Satz von Avogadro

Die Teilchen eines Gases bewegen sich regellos im Raum, wobei sie häufig zusammenstossen oder auf eine Gefässwand prallen (allgemeines Teilchenmodell). Das Gas übt auf die Wand einen Druck aus. Die mittlere kinetische Energie (Bewegungsenergie) der Gasteilchen ist dabei der absoluten Temperatur (Wärme) proportional (Abschnitt 1.4). Bei gleicher Temperatur besitzen die Teilchen aller Gase, unabhängig von ihrer Masse und Grösse, dieselbe mittlere kinetische Energie  $m \cdot v^2/2$ . Teilchen von geringer Masse  $m$  bewegen sich dabei rascher als schwere. Je mehr Teilchen im Mittel gleichzeitig auf die Wand prallen und je grösser ihre kinetische Energie, desto grösser ist der Gasdruck. Dieser steigt deshalb mit zunehmender Teilchenzahl im gegebenen Volumen und mit zunehmender Temperatur.

Betrachtet man nun zwei Behälter von gleichem Volumen, die mit unterschiedlichem Gas gefüllt sind. Beide Gase stehen unter demselben Druck (z. B. Luftdruck) und haben dieselbe Temperatur. Da die Temperatur der mittleren Bewegungsenergie der Teilchen entspricht und der Gasdruck nur von dieser Grösse und von der Teilchenzahl pro Volumen abhängt, muss die Anzahl der Teilchen in den beiden gleich grossen Gefässen gleich sein.



**Abb. 1.34**

Zwei unterschiedliche Gase bei gleicher Temperatur, gleichem Druck und gleichem Volumen bestehen aus gleich vielen Teilchen.

Das Ergebnis aus diesen Betrachtungen überrascht auf den ersten Blick:

---

Gleiche Volumina unterschiedlicher Gase enthalten bei gleichen Bedingungen (Druck und Temperatur) gleich viele Teilchen (Satz von Avogadro).

---

Diese Aussage wurde bereits 1811 von Amadeo Avogadro (1776–1856) als Hypothese (Annahme) formuliert. Sie ist aber nichts anderes als die logische Folge aus der Teilchenvorstellung, angewandt auf die Gase. Teilchengrösse und Masse spielen, entsprechend dem Satz von Avogadro, für ein Gasvolumen keine Rolle. Dies wird verständlich, wenn man sich vor Augen führt, dass die Abstände zwischen den Teilchen, verglichen mit ihrer Grösse, bei Weitem überwiegen. Ausserdem ist die mittlere kinetische Energie unabhängig von der Teilchenmasse. Zwar sind die Teilchengeschwindigkeiten unterschiedlich, die mittlere kinetische Energie ist bei einer bestimmten Temperatur hingegen für alle Teilchen gleich.

### Allgemeine Gasgleichung

Mithilfe des allgemeinen Teilchenmodells kann der mathematische Zusammenhang zwischen Druck  $p$ , Volumen  $V$  und der absoluten Temperatur  $T$  hergeleitet werden. Als Ergebnis erhält man folgende Gleichung, die für eine bestimmte Gasmenge (Teilchenzahl) gültig ist:

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}$$

oder vereinfacht:

---


$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant} \quad \text{allgemeine Gasgleichung}$$


---

Die allgemeine Gasgleichung sagt aus, dass das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die Temperatur, für eine bestimmte Gasmenge (Teilchenzahl) immer den gleichen Wert ergibt. Damit lässt sich z. B. das Volumen einer Gasmenge bei einer gegebenen Temperatur für jede beliebige andere Temperatur berechnen.

### Beispiel

Gegeben sind 22.4 Liter ( $V_1$ ) eines gasförmigen Stoffs bei  $T_1 = 273.15 \text{ K}$  ( $= 0^\circ\text{C}$ ) und Normdruck ( $p_1 = 101\,325 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$ ). Wie gross ist das Volumen dieses Stoffs, wenn die Temperatur auf  $T_2 = 298.15 \text{ K}$  ( $= 25^\circ\text{C}$ ) bei gleichbleibendem Druck erhöht wird?

Da der Druck konstant bleibt, vereinfacht sich die allgemeine Gasgleichung zu

$\frac{V}{T} = \text{konstant}$ . Mit  $V_1 = 22.4 \text{ l}$ ,  $T_1 = 273.15 \text{ K}$  und  $T_2 = 297.15 \text{ K}$  erhält man:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{22.4 \text{ l} \cdot 298.15 \text{ K}}{273.15 \text{ K}} = 24.46 \text{ l}$$

## Zentrale Begriffe zum Kapitel 1

- › chemische Reaktion
- › Celsius-Temperatur
- › Schmelztemperatur
- › Siedetemperatur
- › Aggregatzustände
- › Reaktionsgleichung
- › Edukte, Ausgangsstoffe
- › Produkte, Endstoffe
- › Prinzip vom Energieminimum
- › Reaktionsenthalpie, Reaktionswärme
- › exotherme Reaktion
- › endotherme Reaktion
- › Aktivierungsenergie
- › Katalysator
- › Kraft
- › Gravitationsgesetz
- › potenzielle Energie
- › kinetische Energie
- › Energie
- › Arbeit
- › Energieerhaltung
- › Brownsche Bewegung
- › absolute Temperatur
- › allgemeines Teilchenmodell
- › Prinzip vom Wahrscheinlichkeitsmaximum
- › Diffusion
- › Satz von Avogadro
- › allgemeine Gasgleichung

# Aufgaben zum Kapitel 1

- 1.1** Kreuzen Sie in Tabelle 1 die zutreffenden Aussagen an.
- 1.2** In Abbildung 1.17 rollt ein Stein nach oben, in Abbildung 1.18 nach unten. Begründen Sie mit dem Prinzip vom Energieminimum (Erreichen einer minimalen potenziellen Energie), weshalb der Stein nur nach unten rollen kann, hingegen nicht nach oben.
- 1.3** Wie verändert sich die potenzielle Energie einer Rakete, wenn sie in den Weltraum geschossen wird?
- 1.4** Nennen Sie zwei Beispiele für Stoffe, die direkt vom festen in den gasförmigen Zustand übergehen.
- 1.5** Gegeben sind die Schmelz- und Siedetemperaturen verschiedener Stoffe (siehe Tabelle 2).  
In welchem Aggregatzustand liegen diese Stoffe bei Raumtemperatur (22 °C) vor?  
Bei welchem Stoff sind die Kräfte zwischen den kleinsten Teilchen am grössten?
- 1.6** Erst nach dem Erwärmen kann man einen Glasstab mit relativ wenig Kraftaufwand verbiegen. Wie lässt sich diese Erscheinung mithilfe der Teilchenvorstellung verstehen?
- 1.7** Betritt ein Brillenträger im Winter einen warmen Raum, so beschlägt sich die Brille mit Wasser. Erklären Sie diese Erscheinung.
- 1.8** Zur Änderung des Aggregatzustands eines Stoffs muss man in Richtung fest-flüssig-gasförmig Energie aufwenden. Was bedeutet dies für die kleinsten Teilchen des betrachteten Stoffs?
- 1.9** Bei der Atmung wird Glucose (Traubenzucker) mithilfe von Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umgewandelt. Vergleichen Sie die Ausgangsstoffe hinsichtlich ihrer Energie mit den Produkten. Welche Stoffe sind energiereicher, welche energieärmer (kurze Begründung)?
- 1.10** Über die kleinsten Teilchen von Stoffen lassen sich folgende Aussagen machen:  
a) Die kleinsten Teilchen üben untereinander anziehende Kräfte aus.

**Tabelle 1 zu Aufgabe 1.1**

Vorgang	Chemische Reaktion			
	ja	nein	endo-therm	exo-therm
Rosten von Eisen ( $\Delta H < 0$ )				
Kondensation von Wasserdampf				
Verbrennen von Benzin				
Erstarren von Wasser zu Eis				
Sublimation von Iod				
Reaktion von Wasserstoff- und Sauerstoffgas zu Wasser				
Verdampfen von Wasser				

**Tabelle 2 zu Aufgabe 1.5**

Stoff	$t_m$ in °C	$t_b$ in °C
Butan	-138.3	-0.5
Octadecan	28	317
Hexan	-95.4	69

- b) Die kleinsten Teilchen besitzen in allen Aggregatzuständen eines Stoffs eine Eigenbewegung.
- c) Die Abstände zwischen den Teilchen nehmen normalerweise in Richtung fest–flüssig–gasförmig zu.

Mit welchen Experimenten lassen sich die Aussagen a), b) und c) überprüfen?

- 1.11** Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen und besitzen bestimmte Eigenschaften. Erklären Sie folgende Aussagen, indem Sie von dieser Teilchenvorstellung ausgehen:
- a) Eine Flüssigkeit passt sich jeder Gefäßform an, ein fester Stoff hingegen nicht.
  - b) Wasser verdunstet, wenn man es in einem offenen Gefäß stehen lässt.
- 1.12** Ein gasförmiger Stoff kann ohne viel Kraftaufwand zusammengedrückt werden, ein fester Stoff hingegen nicht. Wie lässt sich diese Erscheinung erklären?
- 1.13** Fällt ein Lichtstrahl in ein Zimmer, so sieht man ihn aufgrund der Staubpartikel in der Luft, die in dauernder Bewegung sind. Erklären Sie diese Beobachtung.
- 1.14** Die Siedetemperatur von Wasser sinkt mit steigender Höhe über Meer. Begründen Sie diese Erscheinung auf Teilchenebene.
- 1.15** Stoffe bestehen aus kleinsten Teilchen. Was passiert beim Erwärmen einer Thermometerflüssigkeit auf Teilchenebene?
- 1.16** Bildet sich nachts im Herbst Nebel, so fällt die Lufttemperatur meistens nicht unter 0°C. Worauf ist dieses Phänomen zurückzuführen?
- 1.17** Der Übergang von flüssigem Wasser in den gasförmigen Zustand wird manchmal als chemische Reaktion bezeichnet. Wie lässt sich diese Behauptung begründen?