



# Der Karlsruher Physikkurs

für die Sekundarstufe II

Neuaufgabe 2019

**Atomphysik**  
**Kernphysik**  
**Teilchenphysik**

---

## Der Karlsruher Physikkurs

*Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II*

- Elektrodynamik
- Thermodynamik
- Schwingungen, Wellen, Daten
- Mechanik
- Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik**

Herrmann

### **Der Karlsruher Physikkurs**

Auflage 2019

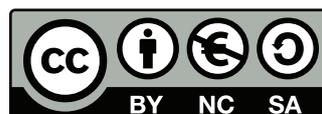
Bearbeitet von Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*

Abbildungen: *F. Herrmann*

Layout: *Heiner Schwarze*

Gerechnete Bilder mit Dichteverteilungen: *Patrick Bronner* und *Sebastian Kretz*

---



*Lizenziert unter Creative Commons*

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

# INHALT

## 1 Modelle in der Physik

---

1.1 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einem Modell	5	1.3 Die Grenzen von Modellen	6
1.2 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einer Theorie	6		

## 2 Photonen und Elektronen

---

2.1 Transporte mit Wellen und Transporte mit Materie	8	2.5 Interferenz und Statistik	10
2.2 Photochemische Reaktionen	8	2.6 Die Größe von Photonen	11
2.3 Lichtportionen in der Zeit	9	2.7 Energie und Impuls von Photonen	12
2.4 Lichtportionen im Raum	10	2.8 Elektronen	14

## 3 Die Quantentheorie

---

3.1 Daten gehen hinein und Daten kommen heraus	15	3.3 Die Psi-Funktion	16
3.2 Eine Theorie mit zwei Schritten	15		

## 4 Das Atom – stationäre Zustände

---

4.1 Die Dichte des Elektroniums	17	4.4 Die Energie des Elektrons in stationären Zuständen – das Energiediagramm	24
4.2 Größe und Dichte der Atomhüllen	19	4.5 Die Stromdichte des Elektroniums	24
4.3 Die Anregung von Atomen	20	4.6 Drehimpuls und Magnetismus von Atomen	25

## 5 Übergänge im Atom – nichtstationäre Zustände

---

5.1 Übergänge zwischen stationären Zuständen	26	5.3 Schnelle und langsame Übergänge	29
5.2 Der Emissionsvorgang	27		

## 6 Atome mit mehreren Elektronen

---

6.1 Elektronenorbitale in größeren Atomen	31	6.3 Noch einmal die Psi-Funktion	33
6.2 Der Spin	32		

## 7 Spektren

---

7.1 Die Anregung von Atomen mit Licht	34	7.4 Die Spektren von Gasen	37
7.2 Die Anregung von Atomen mit Elektronen	36	7.5 Warum Flammen leuchten	38
7.3 Gase als Lichtquellen	36		

## 8 Feste Stoffe

---

8.1 Die Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen	40	8.5 Wenn Licht auf Nichtmetalle trifft	44
8.2 Die Verteilung des Elektroniums in festen Stoffen	41	8.6 Feststoffe als Lichtquellen	46
8.3 Die Energieleiter von Feststoffen	42	8.7 Wie Feststoffe die Elektrizität leiten	46
8.4 Wenn Licht auf Metalle trifft	42	8.8 Wie man Nichtmetalle leitfähig machen kann	47

## 9 Diode und Transistor

---

9.1 Die Halbleiterdiode	49	9.3 Der Transistor	52
9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter, Lichtquelle und Solarzelle	50		

## 10 Kernphysik

---

10.1 Der Aufbau der Atomkerne	54	10.9 Kernstrahlung	66
10.2 Elemente, Nuklide, Isotope	56	10.10 Die Umsatzrate von Kernreaktionen	68
10.3 Die Anregung von Kernen	59	10.11 Die Halbwertszeit	69
10.4 Die Trennenergie	60	10.12 Kernreaktionen in der Sonne	70
10.5 Erhaltungsgrößen	61	10.13 Warum es im Innern der Sonne so heiß ist	72
10.6 Teilchen und Antiteilchen	62	10.14 Das ungewöhnliche Verhalten der Sonne bei Entropiezufuhr	72
10.7 Ladungsbilanzen	63	10.15 Warum die Sonne nicht explodiert	74
10.8 Die Reaktionsrichtung	64	10.16 Der Kernreaktor	75

## 11 Teilchenphysik

---

11.1 Strahlen – elastische und inelastische Streuung	79	11.4 Inelastische Streuung – Teilchenreaktionen	81
11.2 Elastische Streuung – „sehen“ mit verschiedenen Strahlungen	79	11.5 Die alten und die neuen Teilchen	82
11.3 Die Größe der Teilchen	81		

## – 12 Ordnungsprinzipien in der Physik

---

12.1 Das „Lego-Prinzip“	85	12.3 Das ganz Kleine und das ganz Große	87
12.2 Theorien	86	12.4 Die elementaren Teilchen und die Weltformel	87

## – Anhang

---

Tabelle der Trennenergien	88
---------------------------	----

# 1 MODELLE IN DER PHYSIK

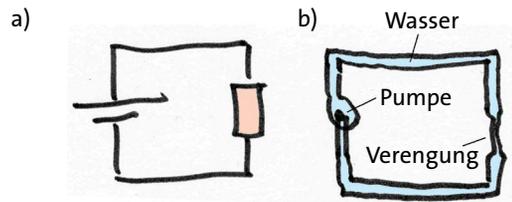
Um eine physikalische Erscheinung zu beschreiben, kann man zwei Methoden anwenden. Entweder man benutzt ein Modell oder man beschreibt die Erscheinung mit einer Theorie. Wir erklären die beiden Methoden an einem einfachen Beispiel: einem elektrischen Stromkreis, Abb. 1.1a.

## 1.1 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einem Modell

Der Gegenstand unserer Betrachtung ist ein physikalischer Vorgang X, den man nicht direkt sieht und den man zunächst als unanschaulich oder abstrakt empfindet. X hat aber eine Ähnlichkeit mit einem anderen Vorgang Y, der jedem vertraut ist. Um sich den Vorgang X klarzumachen oder um ihn jemand anderem zu erklären, können wir diese Übereinstimmung ausnutzen.

Zu unserem Beispiel von Abb. 1.1a. Wir wollen jemandem, der absolut keine Ahnung von elektrischen Vorgängen hat, erklären, was hier passiert. Wir könnten also sagen: Stell dir vor, dass in den Drähten etwas fließt. Wir nennen es Elektrizität. Es ist, wie wenn Wasser in einem Rohr fließt. Das Ding links, das wir Batterie nennen, kannst du dir als Pumpe vorstellen, die den Elektrizitätsstrom antreibt, ähnlich wie eine Wasserpumpe einen Wasserstrom antreibt. Das Ding rechts nennen wir „Widerstand“. Du kannst dir vorstellen, dass es den Elektrizitätsstrom behindert, genau so, wie eine enge Stelle in einem Wasserrohr den Wasserstrom behindert, Abb. 1.1b. Die Übereinstimmung geht noch weiter, aber wir wollen den Vergleich hier abbrechen.

Wenn man einen Vorgang so beschreibt, wie wir es hier getan haben, so sagt man, man benutze ein *Modell*. Der zu beschreibende Vorgang X ist der elektrische Stromkreis von Abb. 1.1a, das Modell Y ist der Wasserstromkreis von Abb. 1.1b. Das Modell Y verhält sich in vielerlei Hinsicht so wie das System X. Viele



**Abb. 1.1** (a) Durch Experimentieren mit den Geräten Batterie, Widerstand, Kabel usw. schließt man, dass hier etwas Ähnliches passiert wie in dem Wasserstromkreis (b).

Erfahrungen, die man mit Y macht, kann man auf X übertragen.

Man kann einen physikalischen Vorgang, für den man keine direkte Anschauung hat, durch ein Modell beschreiben. Das Modell ist ein System, das uns vertraut ist.

Das Originalsystem X und das Modell Y stimmen natürlich nicht in jeder Beziehung überein. Das ist offensichtlich, wenn man die Abbildungen 1.1a und 1.1b miteinander vergleicht. Das bedeutet auch, dass man von einem Modell nicht sagen kann, es sei falsch oder es sei richtig. Ein Modell soll zweckmäßig sein. Es reicht, dass Y mit X in den Eigenschaften übereinstimmt, auf die es einem gerade ankommt. So stört es uns nicht, dass die Drähte massiv sind, während doch die Rohre des Modellsystems hohl sind. Es stört uns auch nicht, dass es negative Elektrizität gibt, während die Wassermenge des Modellsystems immer positiv ist.

Modelle sind nicht falsch oder richtig, sondern nur mehr oder weniger zweckmäßig.

### Aufgaben

1. Nenne weitere Beispiele aus der Physik dafür, dass man ein Modell verwendet. Nenne Beispiele aus anderen Wissenschaften.

## 1.2 Die Beschreibung eines Vorgangs mit einer Theorie

Die Physik sagt uns, dass sich die Stärke des elektrischen Stroms durch den Widerstand von Abb. 1.1a verdoppelt, wenn sich die Spannung der Batterie verdoppelt. Solche quantitativen Beziehungen werden in Formeln gefasst. Sie werden also mit den Werkzeugen der Mathematik beschrieben. Ob eine Formel richtig ist, d. h., ob sie die Natur korrekt beschreibt, überprüft man mithilfe von Experimenten. Du kannst dein Geschick im Umgang mit Formeln ausnutzen, um richtige Voraussagen zu machen. In der Physik ist eine Formel der einfachste Fall einer Theorie. Normalerweise bezeichnet man als Theorie allerdings ein größeres System aus Formeln und sogenannten Differenzialgleichungen. In anderen Wissenschaften wird die Bezeichnung „Theorie“ etwas anders gebraucht.

In der Umgangssprache benutzt man das Wort „Theorie“ oft im Sinn von „Vermutung“ oder man sagt, etwas sei nur „theoretisch“, und meint, die Praxis sehe anders aus. Wie wir gesehen haben, ist die physikalische Bedeutung des Wortes „Theorie“ anders. Es gibt physikalische Theorien, die gut auf die Natur passen. Und es gibt andere Theorien, die schlecht oder gar nicht passen. Eine unpassende Theorie benutzt man natürlich nicht mehr, sobald man festgestellt hat, dass sie unpassend ist. Schließlich gibt es Theorien, von denen man noch nicht weiß, ob sie brauchbar sind. Es ist ein wichtiges Ziel der Naturwissenschaft, neue Theorien aufzustellen und zu prüfen, wie gut sie die Natur beschreiben.

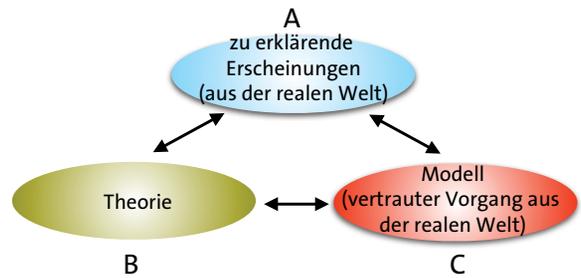
Eine Theorie beschreibt einen physikalischen Vorgang mathematisch, d. h. mithilfe von Gleichungen.

### Aufgaben

1. Nenne Theorien, die du kennst oder von denen du gehört hast, und zwar sowohl aus der Physik als auch aus anderen Wissenschaften.

## 1.3 Die Grenzen von Modellen

Wir haben also zwei Methoden, ein physikalisches System zu beschreiben: mit einem Modell oder mit einer Theorie. Im Grunde sind die beiden Methoden recht ähnlich. Beide Male nutzen wir aus, dass sich die Natur so verhält wie etwas anderes, das wir schon ken-



**Abb. 1.2** Drei Bereiche haben gemeinsame Strukturen: 1. Die zu erklärende physikalische Erscheinung, 2. die Theorie, mit der man die Erscheinung beschreibt, und 3. das Modell, mit dem man sich die Erscheinung plausibel macht.

nen: entweder wie ein anderes, vertrautes System aus der realen Welt oder wie etwas aus der abstrakten Welt der Mathematik, Abb. 1.2.

Genauere Aussagen kann die Physik nur mithilfe der zweiten Methode machen: der mathematischen Beschreibung und der experimentellen Überprüfung der mathematischen Gesetze. So wie du die Physik bisher kennengelernt hast, stand aber eher Methode 1 im Vordergrund. Wahrscheinlich entstand das Gefühl „ich habe es verstanden“ immer dann, wenn du gesehen hast, dass irgendetwas so ist wie etwas anderes, das du schon kennst.

Leider funktioniert die erste Methode, also die Modellmethode, nicht immer. Man kann nicht von allem sagen: „Es ist so wie das und das, was du schon kennst.“ Denn manchmal ist eine physikalische Erscheinung eben anders als alles, was wir aus unserem täglichen Leben kennen. Und das ist besonders bei den Themen der Fall, um die es im Folgenden geht.

Du wirst sehen, dass Atome manchmal ein Verhalten zeigen, das wir von den Dingen, die uns umgeben, einfach nicht kennen. Das kann so weit gehen, dass wir das Gefühl haben, die Atome verhielten sich widersprüchlich. Das Interessante ist nun, dass sich die Atome sehr wohl durch die Mathematik beschreiben lassen. Ihr Verhalten kann daher auch nicht widersprüchlich sein. Es ist nur unanschaulich, denn wir kennen kein Modell, d. h. kein uns vertrautes System, das sich so verhält wie das Atom.

Glücklicherweise bedeutet das aber nicht, dass wir ganz ohne Modelle auskommen müssen, d. h. ohne „es ist so wie ...“. Wir werden nach wie vor Modelle benutzen – allerdings mit Einschränkungen. Ein Beispiel: Wir werden sagen, du kannst dir die Elektronenhülle eines Atoms vorstellen wie einen Stoff, von dem man nur Portionen ganz bestimmter Menge entnehmen kann. Ein solches Material hast du zwar noch nie

gesehen, aber trotzdem wird es dir nicht schwerfallen, es dir vorzustellen.

Manchmal wird es noch schwieriger. Wir betrachten ein Atom, das mehr als ein Elektron hat, also z. B. zwei oder drei oder dreißig. Du müsstest dir nun die Elektronenhülle vorstellen als einen Stoff, der sich in einem mehr als dreidimensionalen Raum befindet. Die Elektronenhülle des Heliumatoms zum Beispiel wäre ein Stoff in einem sechsdimensionalen Raum. Unsere Alltagserfahrungen beziehen sich aber alle auf einen dreidimensionalen Raum. Einen sechs-, zwölf- oder dreißig-dimensionalen Raum können wir uns kaum vorstellen.

Wir fassen zusammen: Wir werden auch im Folgenden Bilder und Modelle verwenden, d. h., wir werden sagen, „es ist so wie ...“, aber wir müssen immer im Kopf behalten: Nimm die Modelle nicht zu ernst. Das Einzige, was wirklich funktioniert, und was echte Naturwissenschaft ausmacht, ist die mathematische Beschreibung. Der Text zwischen den Formeln gilt nur mit Vorbehalt. Wir werden im Folgenden manchmal darauf hinweisen, um dich daran zu erinnern, aber wir werden es nicht bei jedem Satz tun. Du musst also die Texte von vornherein mit der richtigen Einstellung lesen. Wenn gesagt wird: „Das Atom ist ein kleiner Gegenstand, der folgendermaßen aufgebaut ist ...“, so bedeutet das nur Folgendes: Du kannst dir in dem Zusammenhang, um den es im Augenblick geht, vorstellen, das Atom sei ein kleiner Körper. Aber du musst damit rechnen, dass später einmal gesagt wird: „Jetzt verhalten sich die Atome ganz anders als kleine Körper. Stell sie dir lieber vor als Welle in einem gedachten Wellenträger.“

Für manche physikalischen Vorgänge lässt sich kein passendes Modell finden, wohl aber eine funktionierende Theorie. Solche Vorgänge erscheinen uns als unanschaulich.

Dass es zu manchen physikalischen Erscheinungen kein Modell gibt, hat auch zur Folge, dass man bestimmte Fragen, die eigentlich naheliegen, nicht stellen darf.

Eine Frage kann sinnlos sein, auch wenn sie naheliegend ist. ■

## 2 PHOTONEN UND ELEKTRONEN

### 2.1 Transporte mit Wellen und Transporte mit Materie

Unter einem „Transport“ wollen wir einen Vorgang verstehen, bei dem irgendetwas von einer Stelle zu einer anderen gelangt: wenn Wasser im Rhein von Karlsruhe nach Mannheim fließt, wenn elektrische Ladung in einem Draht von einem Schalter zu einer Lampe fließt, wenn eine Rakete von der Erde in eine Umlaufbahn gelangt, wenn sich Licht von der Sonne zur Erde bewegt, wenn Radiowellen von einem Handy zur nächsten Antenne laufen, wenn der Schall aus einem Lautsprecher zu deinen Ohren geht usw.

Diese Transporte, und auch alle anderen, die einem noch einfallen mögen, kann man in zwei Kategorien einteilen. Bei den Transporten der einen Kategorie bewegt sich etwas Materielles durch den Raum: Wasser, Elektronen, eine Rakete ... Bei der anderen Sorte läuft eine Welle durch irgendeinen Wellenträger: Licht, Schall ...

Wir werden es im Folgenden immer wieder mit den beiden Transportarten zu tun haben. Um sie genauer zu untersuchen, nehmen wir uns einen Repräsentanten aus jeder Kategorie vor. Als Vertreter der Materie nehmen wir die Elektronen und als Vertreter der Wellen das Licht.

Wir vergleichen also einen Strom von Elektronen (z. B. in der Bildröhre eines alten Fernsehers) mit einem Strom von Licht (aus einer Taschenlampe oder einem Laser).

Zunächst Gemeinsamkeiten: Beide transportieren Energie. Außerdem transportieren beide, auch wenn es nicht so auffällt, Impuls und Entropie.

Es scheint aber auch wesentliche Unterschiede zu geben:

- Der Elektronenstrahl besteht aus kleinen Portionen oder Körperchen, die man Elektronen nennt. Man sagt auch, die Materie sei quantisiert. Der Lichtstrahl dagegen ist eine Welle, d. h. anscheinend ein stetiger oder „kontinuierlicher“ Vorgang.
- Mit dem Lichtstrahl kann man Interferenzmuster erzeugen: Bei Überlagerung von zwei Teilen des Lichtstrahls ergibt sich an manchen Stellen Verstärkung und an anderen Abschwächung oder sogar Auslöschung. Das ist der Beweis dafür, dass Licht ein Wellenvorgang ist. Von der Materie kannten wir das bisher nicht.

Also:

■ Materie ist quantisiert, Licht zeigt Interferenz.

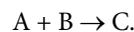
Es sieht aus, als seien ein Licht- und ein Elektronenstrahl zwei grundsätzlich verschiedene Transporte. Diese Schlussfolgerung könnte man verallgemeinern auf die anderen Vertreter von Wellen und Materie. Das Interessante an dieser Schlussfolgerung ist nun, dass sie falsch ist. Wir werden sehen, dass beide Eigenschaften, nämlich das portionsweise Auftreten und die Interferenzfähigkeit, nicht nur auf die eine Stoffklasse zutrifft, sondern auch auf die andere, also: Auch Licht besteht aus kleinen Portionen, und auch mit Elektronen kann man Interferenzmuster erzeugen.

■ Nicht nur Materie, sondern auch Licht ist quantisiert. Nicht nur Licht, sondern auch Materie zeigt Interferenz.

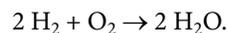
### 2.2 Fotochemische Reaktionen

Es gibt chemische Reaktionen, an denen Licht als einer der Reaktionspartner beteiligt ist. Man nennt sie *fotochemische Reaktionen* (vom griechischen Wort phos für Licht).

Reaktionen beschreibt man durch Reaktionsgleichungen. Wenn ein Stoff A mit einem Stoff B zu einem Stoff C reagiert, schreibt man



Ein konkretes Beispiel ist die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, also



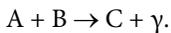
Bei diesem Vorgang verschwinden die Stoffe Wasserstoff und Sauerstoff und es entsteht der Stoff Wasser. Es gibt nun auch Reaktionen, bei denen neben anderen Stoffen Licht entsteht oder verschwindet. Dazu einige Beispiele.

#### Leuchtstäbe

Im Autozubehörhandel bekommt man sogenannte Leuchtstäbe. Ein Leuchtstab besteht aus einem

durchsichtigen Kunststoffrohr, in dem sich zwei Flüssigkeiten A und B befinden, die zunächst voneinander getrennt sind. Wenn man das Kunststoffrohr etwas verbiegt, zerbricht die Trennwand zwischen den beiden Flüssigkeiten. Sie durchmischen sich und beginnen, miteinander zu reagieren. Bei der Reaktion entsteht neben einer Flüssigkeit C auch Licht. Ein Leuchtstab ist also eine Lichtquelle, die ohne Batterie oder Steckdose funktioniert.

In Reaktionsgleichungen verwendet man als Symbol für das Licht den griechischen Buchstaben  $\gamma$  (Gamma). Die Gleichung für die Reaktion in einem Leuchtstab lautet deshalb

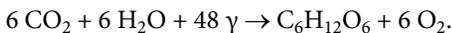


Wir haben hier auf die Angabe der chemischen Schreibweise für die drei Stoffe A, B und C verzichtet. Worauf es uns ankommt, ist nur die Tatsache, dass hier das Licht wie ein gewöhnlicher Stoff auftritt.

### Fotosynthese

Die Fotosynthese in Pflanzen ist eine fotochemische Reaktion, die von großer Bedeutung für das Leben auf der Erde ist. Bei dieser Reaktion bilden die Pflanzen Glucose (Traubenzucker,  $C_6H_{12}O_6$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) aus Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), Wasser ( $H_2O$ ) und Licht. Glucose verwenden die Pflanzen als Baustoffe für ihre Zellen und als Energiespeicher.

Die Fotosynthese ist eine komplizierte Reaktion mit vielen Zwischenschritten. Wenn man die Zwischenschritte überspringt, also nur die Ausgangs- und Endstoffe betrachtet, lautet die Reaktionsgleichung



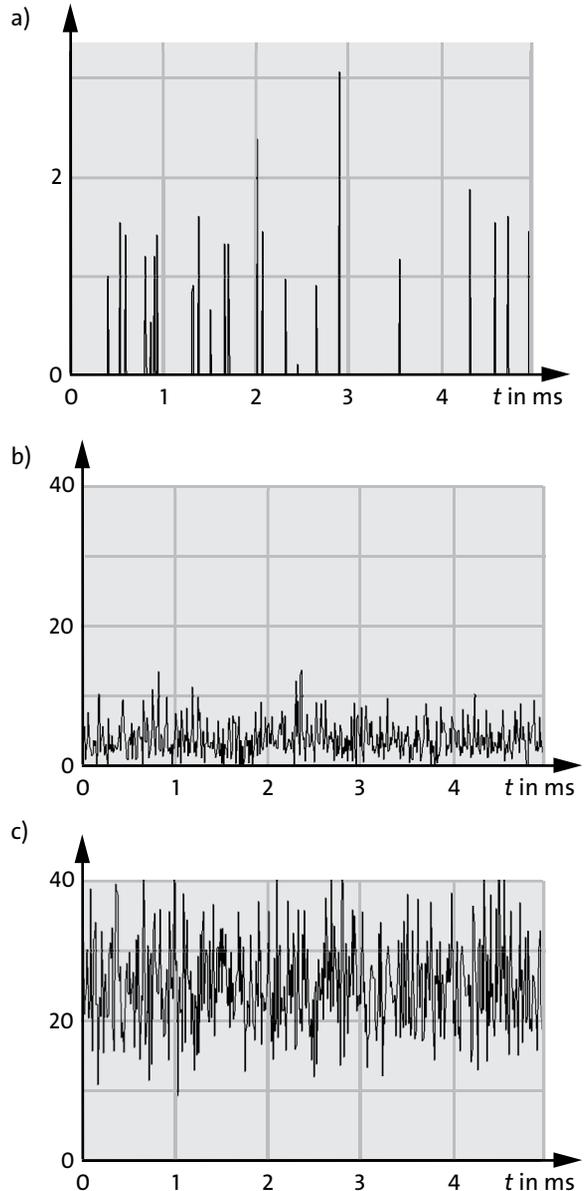
Aus den diskutierten Beispielen folgt:

Bei der Beschreibung fotochemischer Reaktionen kann man mit Licht umgehen wie mit einem Stoff.

## 2.3 Lichtportionen in der Zeit

Jeder Stoff besteht aus kleinsten Portionen, den Atomen oder Molekülen. Wenn sich Licht wie ein gewöhnlicher Stoff verhält, ist zu erwarten, dass es auch kleinste Lichtportionen, eine Art „Lichtatome“ gibt. Im Folgenden wird ein Experiment beschrieben, das diese Vermutung bestätigt.

Die „Atome“ des Lichts sind mit bloßem Auge genauso wenig zu erkennen wie die Atome anderer Stoffe. Was wir brauchen, ist ein sehr empfindliches Lichtmessgerät, ein so genannter Fotomultiplier. Wenn man den Sensor des Fotomultipliers ins Licht hält, reagiert er mit dem auftreffenden Licht, das Licht wird absorbiert. Auf einem Anzeigergerät kann man ablesen, wie groß die pro Zeiteinheit vom Fotomultiplier absorbierte Lichtmenge ist.



**Abb. 2.1** Das Licht kommt in unregelmäßig aufeinander folgenden Pulsen an. Im oberen Bild (a) ist die Lichtintensität sehr gering; im mittleren Bild (b) ist sie etwas größer und im unteren (c) noch größer.

## 2.4 Lichtportionen im Raum

Wir wollen das Licht einer gewöhnlichen Glühlampe untersuchen. Wenn man dieses Licht direkt auf den Fotomultiplier fallen ließe, würde dieser allerdings sofort zerstört. Es wäre ähnlich, als versuchte man, einen Elefanten mit einer Briefwaage zu wiegen. Wir müssen das Licht der Glühlampe, bevor es auf den Fotomultiplier trifft, abschwächen: mit einem Graufilter, das nur sehr wenig Licht durchlässt.

Die Lampe wird an ein regelbares Netzgerät angeschlossen. Wir vergrößern nun langsam die Stärke des elektrischen Stroms, sodass die Lampe schwach zu leuchten beginnt. Sie sendet so viel Licht aus, dass wir es mit den Augen gerade eben wahrnehmen können. Obwohl sich der Fotomultiplier hinter dem Graufilter befindet, reagiert er schon auf das Licht der schwach leuchtenden Glühlampe: Das Anzeigergerät des Fotomultipliers schlägt aus.

Abb. 2.1a zeigt, wie das Anzeigergerät reagiert, und zwar in einem Zeitraum von 5 ms.

Das Überraschende ist, dass der Ausschlag zeitlich nicht konstant ist, sondern dass Pulse in unregelmäßigen zeitlichen Abständen auftreten. Zwischen den Pulsen ist der Ausschlag null. Die Lampe leuchtet also nicht gleichmäßig, sondern sie sendet in unregelmäßigen, aber sehr kurzen Abständen, kleine Lichtportionen aus. Diese Lichtportionen nennt man Photonen. Erhöht man die Lichtintensität, so kommen die Photonenpulse in immer kleineren zeitlichen Abständen und das Messgerät kann sie schließlich nicht mehr einzeln auflösen. Mit den Augen können wir sie natürlich erst recht nicht auflösen.

Licht wird in Portionen, den Photonen, emittiert und absorbiert.

## 2.4 Lichtportionen im Raum

In einer Digitalkamera wird ein Bild auf dem CCD-Chip erzeugt. Der Chip besteht aus einem Feld von mehreren Millionen lichtempfindlicher Sensoren, den Pixeln. Wenn nun Licht sehr, sehr geringer Intensität auf den Chip fällt, sodass die Photonen, wie im vorangehenden Versuch, schön voneinander getrennt auf dem Chip eintreffen, so stellt man etwas Merkwürdiges fest: Ein Photon wird nur von einem einzigen Pixel registriert, und das heißt: Das Photon wird von einem einzigen Pixel absorbiert, es verteilt sich nicht auf mehrere Pixel.

Ein Photon wird von nur einem Pixel eines CCD-Chips absorbiert.

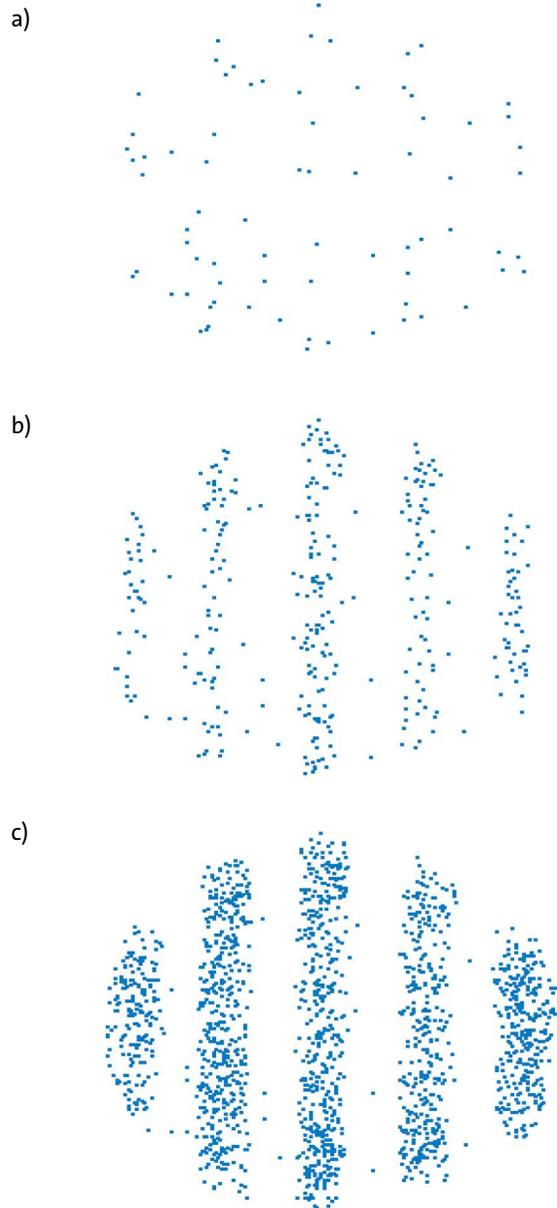


Abb. 2.2 Mit zunehmender Belichtungszeit entsteht ein Interferenzmuster.

## 2.5 Interferenz und Statistik

Du hattest früher ein Experiment kennengelernt, bei dem Laserlicht auf zwei nebeneinanderliegende Spalte in einem Hindernis fällt. An den Spalten wird das Licht gebeugt, sodass sich die Lichtwellen hinter den Öffnungen durchkreuzen. Wenn man dem Licht hinter den Spalten ein Blatt Papier in den Weg stellt, sieht man ein Interferenzmuster: eine Folge von hellen und

dunklen Streifen. Hält man den einen der beiden Spalte zu, so verschwindet das Interferenzmuster.

Wir wollen nun das Papier durch eine Digitalkamera ersetzen. Auch der CCD-Chip registriert das Interferenzmuster. Wir hatten diese Erscheinung früher so gedeutet: An den dunkeln Stellen löschen sich die Lichtwellen gegenseitig aus, an den hellen Stellen verstärken sie sich. Wir sehen nun aber, dass es ganz so einfach nicht sein kann.

Ein Photon wird von *einem* Pixel absorbiert. Ein einziges Photon kann also sicher kein Interferenzmuster erzeugen, auch wenn es Teil zweier sich durchkreuzender Laserstrahlen ist. Es liefert lediglich einen Beitrag zum gesamten Interferenzmuster. Das Interferenzmuster kommt erst dadurch zustande, dass viele Photonen auf den Chip fallen. Sie verteilen sich statistisch, und zwar so, dass insgesamt das Interferenzmuster entsteht. Abb. 2.2 zeigt, wie nach und nach ( $a \rightarrow b \rightarrow c$ ) das Interferenzmuster entsteht.

Ein einzelnes Photon kann auf einem CCD-Chip kein Interferenzmuster erzeugen. Die Photonen verteilen sich statistisch so auf die Pixel, dass ein Interferenzmuster entsteht.

## 2.6 Die Größe von Photonen

Die Frage nach der Größe der Photonen ist eine der Fragen, vor denen wir gewarnt hatten: eine Frage, auf die die Physik keine klare Antwort gibt, eine „verbotene“ Frage. Immerhin verhalten sich aber die Photonen unter bestimmten Umständen so, als hätten sie eine bestimmte Größe und Gestalt. Und diese können wir aus den zuvor beschriebenen Experimenten ablesen.

Wir beginnen mit der Digitalkamera. Da ein Photon von einem einzigen Pixel absorbiert wird, sollte es sehr klein sein, nämlich nicht größer als ein Pixel. Nun hat ein Pixel eines CCD-Chips eine Seitenlänge von etwa  $5 \mu\text{m}$ . Ein Photon hat also, so schließen wir, einen Durchmesser quer zu seiner Laufrichtung, der kleiner als  $5 \mu\text{m}$  ist:

$$d < 5 \mu\text{m}.$$

Wir betrachten nun das Interferenzexperiment. Das Interferenzbild baut sich auf, indem ein Photon nach dem anderen auf das CCD-Chip fällt. Das bedeutet, dass jedes einzelne Photon „wissen muss,“ mit wel-

chem Pixel es reagiert, wenigstens im statistischen Mittel. Das heißt aber, dass jedes Photon durch beide Löcher im Hindernis durchgelaufen ist, denn Interferenz kommt nur zustande, wenn eine Welle durch beide Spalte läuft. Oder in anderen Worten: Das Photon muss quer zu seiner Laufrichtung mindestens so groß sein wie der Abstand zwischen den beiden Löchern im Hindernis, und der ist etwa  $1 \text{ mm}$ , also

$$d > 1 \text{ mm}.$$

Wie bringen wir die beiden Aussagen unter einen Hut? Sie können natürlich nicht gleichzeitig gelten. Kein Gegenstand kann gleichzeitig kleiner als  $5 \mu\text{m}$  und größer als  $1 \text{ mm}$  sein. Wir schließen, dass das Photon seine Größe und auch seine Gestalt ändern kann. Im Absorptionsprozess, so können wir uns vorstellen, schrumpft es um mindestens einen Faktor 200 zusammen ( $1 \text{ mm} : 5 \mu\text{m} = 200$ ).

Wir haben damit auch schon ein Verfahren zur Bestimmung des Photonendurchmessers. Man macht die Spalte im Hindernis immer weiter auseinander. Irgendwann verschwindet das Interferenzmuster. Wir wissen, dass der Lochabstand dann den Photonen-durchmesser überschritten hat.

Auf ähnliche Art kann man auch die Länge der Photonen bestimmen. Wir fassen zusammen:

Photonen haben keine einheitliche Gestalt.

Form und Größe hängen von der Lichtquelle ab, ändern sich aber auch noch auf dem Weg nach Verlassen der Lichtquelle.

So sind die Photonen des Lasers aus der Schulsammlung etwa  $10 \text{ cm}$  lang und haben denselben Durchmesser wie der Laserstrahl selbst, d. h. etwa  $5 \text{ mm}$ . Sie ähneln in Form und Größe also einem Bleistift. Es gibt Laser, deren Photonen viel länger sind. Manche Laser emittieren Photonen, die mehrere Kilometer lang sind.

Die Photonen des Sonnenlichts sind viel kürzer. Ihre Länge hat ungefähr denselben Wert wie ihre Wellenlänge, also etwa  $600 \text{ nm}$ . Ihr Durchmesser beträgt etwa  $0,06 \text{ mm}$  (allerdings nur, wenn das Sonnenlicht nicht von Wolken oder Nebel gestreut wird – sonst ist er noch kleiner). Das ist ungefähr das 100-fache der Länge. Die Photonen des Sonnenlichts ähneln also in der Form einem Pfannkuchen.

Vielleicht hast du bemerkt, dass wir das, was wir hier als Länge und Durchmesser der Photonen bezeichnet haben, übereinstimmt mit der Kohärenzlänge und der Kohärenzbreite des Lichts.

### Aufgabe

1. Wie könnte man die Länge eines Photons experimentell bestimmen?

## 2.7 Energie und Impuls von Photonen

Da Licht Energie transportiert, transportiert auch jedes Photon Energie. Die transportierte Energiemenge ist aber nicht für alle Photonen gleich. Sie hängt auf einfache Art mit der Frequenz des entsprechenden Lichts zusammen:

$$E_{\text{Photon}} \sim f.$$

Den Proportionalitätsfaktor nennt man die Planck'sche Konstante  $h$  (nach Max Planck, dem Entdecker der Photonen). Sie hat den Wert

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Es ist also

$$E_{\text{Photon}} = h \cdot f. \quad (2.1)$$

Mit dieser Gleichung kann man die Energie von Photonen berechnen, wenn man die Frequenz kennt.

Oft ist aber nicht die Frequenz, sondern die Wellenlänge des Lichts bekannt. Man berechnet dann zunächst die Frequenz aus der Wellenlänge. Wir erinnern uns an die Beziehung zwischen Wellenlänge  $\lambda$ , Frequenz  $f$  und Geschwindigkeit  $c$ :

$$c = \lambda \cdot f.$$

Daraus folgt:

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Große Frequenz bedeutet kleine Wellenlänge und umgekehrt. Wir setzen den Ausdruck in Gleichung (2.1) ein und erhalten

$$E_{\text{Photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Also: Je größer die Wellenlänge des Lichts, desto geringer ist die Energie seiner Photonen.

Wir berechnen die Energie der Photonen von „rotem Licht“ ( $\lambda = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ):

$$E_{\text{rot}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{rot}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \\ \approx 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

und von „blauem Licht“ ( $\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ):

$$E_{\text{blau}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{blau}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \\ \approx 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Im Vergleich zu den Energiemengen, mit denen wir es im Alltag zu tun haben, sind diese Energien winzig. Bei gewöhnlichen Lichtverhältnissen sind aber immer sehr viele Photonen im Spiel. Eine Taschenlampe erzeugt etwa  $10^{15}$  Photonen pro Sekunde. Das Sonnenlicht, das in einer Sekunde auf einen Quadratmeter der Erdoberfläche trifft, besteht aus etwa  $10^{21}$  Photonen.

Auch der Impuls, den ein Photon transportiert, hängt auf einfache Art mit der Wellenlänge zusammen:

$$p_{\text{Photon}} = \frac{h}{\lambda}.$$

Der Impuls eines Photons von rotem Licht beträgt damit

$$p_{\text{rot}} = \frac{h}{\lambda_{\text{rot}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 8,25 \cdot 10^{-28} \text{ Hy}.$$

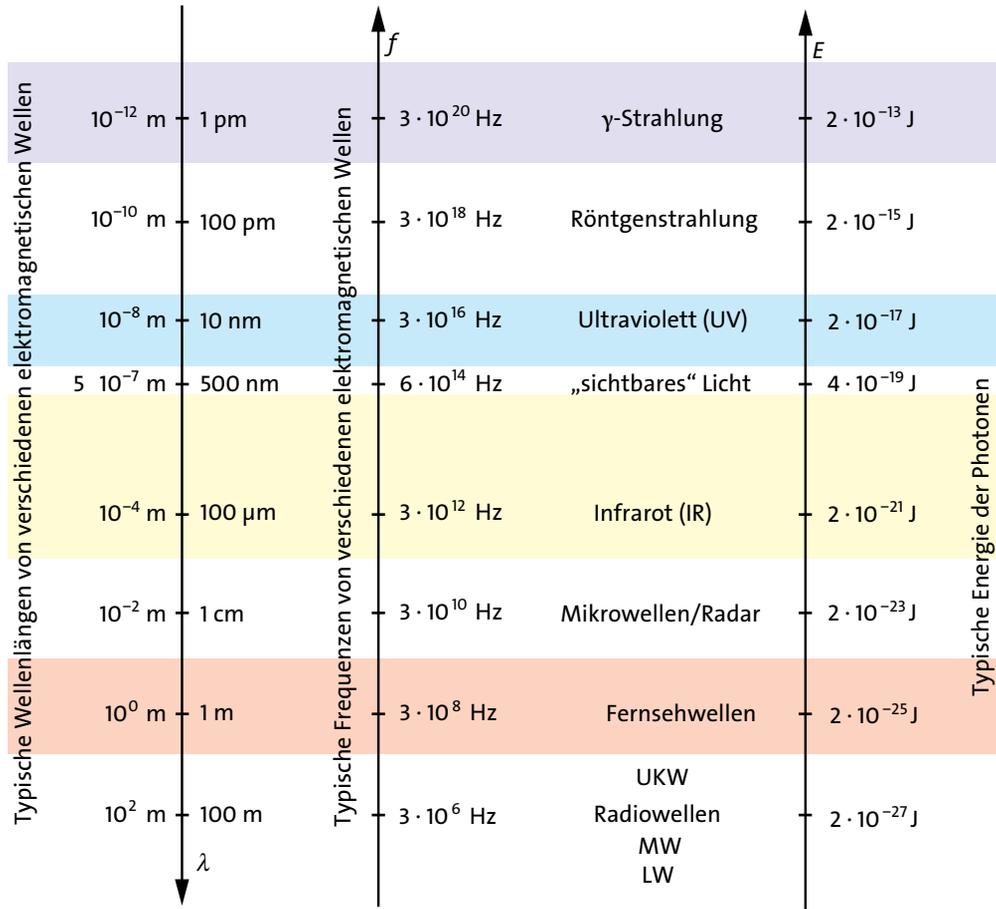
Der Impuls eines Photons des blauen Lichts ist doppelt so groß:

$$p_{\text{blau}} = 16,5 \cdot 10^{-28} \text{ Hy}.$$

So fließt z. B. mit dem auf die Erde treffenden Sonnenlicht ein Impulsstrom der Stärke  $3 \cdot 10^8 \text{ Hy/s}$  (= 300 Millionen Newton) in die Erde. Das Sonnenlicht drückt also gegen die Erde, so wie ein Wasserstrahl, der auf einen Ball trifft, gegen den Ball drückt.

Beobachten kann man den Druck des Sonnenlichts am Schweif von Kometen, der immer von der Sonne weg weist. Die Staubteilchen, aus denen der Schweif besteht, werden durch das Licht von der Sonne weggedrückt.

Bisher haben wir nur über sichtbares Licht und UV-Licht gesprochen. Was für diese beiden Lichtsorten gilt, gilt aber genauso für alle anderen Lichtarten, also für Radio- und Fernschwellen, Mikrowellen, Infrarotlicht, Röntgen- und Gammastrahlung: Alle diese Strahlungen verhalten sich nicht nur wie Wellen, sondern sie sind auch alle quantisiert, d. h., sie bestehen aus Photonen. Und auch die Beziehungen zwischen der Frequenz der Wellen und der Energie und dem Impuls der Photonen sind dieselben wie bei sichtbarem Licht. Abb. 2.3 zeigt



**Abb. 2.3** Die verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen mit ihren Wellenlängen und Frequenzen und der Energie der zugehörigen Photonen

eine Übersicht über die verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen mit deren Wellenlängen und Frequenzen sowie der Energie der zugehörigen Photonen.

$\gamma$ -Strahlung hat die kürzeste Wellenlänge und die höchste Frequenz. Folglich sind die Photonen der  $\gamma$ -Strahlung die energiereichsten. Radiowellen dagegen haben eine große Wellenlänge und eine niedrige Frequenz. Ein Radiophoton hat deshalb sehr wenig Energie.

Beachte, dass sich die Energiewerte vom einen zum anderen Photonentyp in der Abbildung meist um den Faktor 100 unterscheiden.

Für die Photonen von elektromagnetischen Wellen mit der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$  gilt

$$E_{\text{Photon}} = h \cdot f \text{ und } p_{\text{Photon}} = \frac{h}{\lambda}.$$

### Aufgaben

- Berechne Energie und Impuls eines „SWR-3-Photons“ (Frequenz von SWR 3: 98,4 MHz).
  - Berechne Energie und Impuls der Photonen von Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 150 pm.
  - Vergleiche die in a) und b) berechneten Werte mit den Energie- und Impulswerten eines Photons des sichtbaren Lichts.
- Ein Ball wird vom Wasserstrahl eines Springbrunnens in der Schwebe gehalten. Warum fällt der Ball nicht herunter, obwohl aus dem Schwerfeld der Erde ein Impulsstrom in den Ball fließt?
  - Ein Kügelchen wird von einem nach oben gerichteten Lichtstrahl in der Schwebe gehalten. Warum fällt das Kügelchen nicht herunter, obwohl aus dem Schwerfeld der Erde ein Impulsstrom in das Kügelchen fließt?
  - Wie viele Photonen müssen pro Sekunde auf das Kügelchen aus Aufgabenteil b) treffen, wenn der Impulsstrom aus dem Schwerfeld in das Kügelchen eine Stärke von  $7 \cdot 10^{-11}$  N hat? (Wellenlänge des Lichts: 800 nm).

## 2.8 Elektronen

Wir erinnern noch einmal an unsere Ausgangslage: Wir wussten, dass Licht eine Wellenerscheinung ist, dass es also Interferenzerscheinungen gibt. Und wir wussten, dass ein Elektron eine kleine Materieportion ist, etwa in einem Elektronenstrahl. Wir haben uns aber gerade davon überzeugt, dass diese Unterscheidung für das Licht gar nicht zutrifft: Auch Licht besteht aus kleinen Portionen, nämlich den Photonen. Es wird dich nun sicher nicht mehr überraschen, dass die Elektronen auch als Wellenvorgang beschrieben werden können, und dass man auch mit einem Elektronenstrahl ein Interferenzbild erzeugen kann.

Zunächst der experimentelle Befund: Man kann mit einem Elektronenstrahl ein Interferenz-Experiment ausführen, das dem Interferenz-Experiment mit Licht ganz ähnlich ist. Es ist nur technisch etwas schwieriger. Ein Elektronenstrahl wird in zwei Teilstrahlen zerlegt, die sich nur ganz wenig in der Richtung unterscheiden. Dann werden die Teilstrahlen unter spitzem Winkel zusammengeführt. Stellt man einen für Elektronen empfindlichen Bildschirm in den Bereich, wo sich die Strahlen durchkreuzen, so erhält man ein Interferenzbild, Abb. 2.4.

Man kann aus solchen Experimenten schließen, dass auch für Elektronen die Gleichungen gelten:

$$\begin{aligned} E &= h \cdot f \\ p &= \frac{h}{\lambda}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Hier ist  $E$  die Gesamtenergie der Elektronen (also nicht etwa nur die kinetische Energie),  $p$  der Betrag des Impulses,  $f$  die Frequenz und  $\lambda$  die Wellenlänge der Elektronenwelle.

Man nennt eine solche Welle allgemein *Materiewelle*, denn nicht nur mit Elektronen, sondern auch mit Strahlen aus Neutronen, Protonen, ganzen Atomen und sogar Molekülen kann man Interferenzmuster erzeugen.



**Abb. 2.4** Interferenzbild, das mit einem Elektronenstrahl erzeugt wurde

Wir wollen die Wellenlänge für einen Elektronenstrahl in einer Fernschröhre berechnen. Die Beschleunigungsspannung  $U$  in einer solchen Röhre beträgt etwa 20 kV.

Die kinetische Energie der Elektronen ist

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U.$$

Hier ist  $e$  die Elementarladung. Die kinetische Energie hängt mit dem Impuls zusammen über

$$E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m}.$$

Also können wir für den Impuls schreiben:

$$p = \sqrt{2mE_{\text{kin}}}.$$

Setzen wir für die kinetische Energie  $e \cdot U$  ein, so erhalten wir

$$p = \sqrt{2m \cdot e \cdot U}.$$

Mithilfe von Gleichung (2.2) erhalten wir für die Wellenlänge der Materiewelle:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot e \cdot U}}.$$

Die Elektronenmasse beträgt

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

Außerdem ist

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

und

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Für Elektronen, die mit 20 kV beschleunigt wurden, erhalten wir damit:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ V}}} \\ &= 0,86 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \end{aligned}$$

Für Elektronen mit der Energie  $E$  und dem Impuls  $p$  gilt

$$E_{\text{Elektron}} = h \cdot f \quad \text{und} \quad p_{\text{Elektron}} = \frac{h}{\lambda}.$$

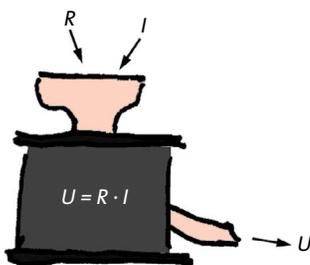
## 3 DIE QUANTENTHEORIE

### 3.1 Daten gehen hinein und Daten kommen heraus

Wir hatten schon gesehen, was man in der Physik unter einer Theorie versteht: die mathematischen Gleichungen und Sätze, mit denen man einen Naturvorgang beschreibt. Der Umgang mit einer Theorie ist im Prinzip einfach. Man steckt Daten, die man kennt, hinein und bekommt Daten, die man kennen möchte, heraus. Die Rechnerei, die dazwischen liegt, kann sehr verwickelt sein. In Abbildung 3.1 ist die Theorie als Kaffeemühle dargestellt.

Man kann mit einer Theorie verschiedenartige Probleme lösen:

- Man steckt die Werte bestimmter physikalischer Größen hinein und berechnet die Werte anderer Größen; z. B.: Man steckt Stromstärke und Widerstand hinein, und die Theorie liefert die elektrische Spannung. (Hier ist die Theorie das Ohm'sche Gesetz.)
- Man steckt die Werte von bestimmten Größen hinein und die Theorie liefert die Werte derselben Größen zu einem späteren Zeitpunkt. Beispiel: Man steckt die Orts- und Geschwindigkeits-Koordinaten einer Raumsonde zum jetzigen Zeitpunkt hinein und bekommt die Koordinaten der Raumsonde zu einem in der Zukunft liegenden Zeitpunkt heraus. Man berechnet also, wohin die Raumsonde fliegen wird. Oder kurz: Man berechnet ein Ereignis, das in der Zukunft liegt.
- Man steckt die Werte von bestimmten Größen hinein und die Theorie liefert die Werte derselben Größen zu einem früherem Zeitpunkt. Beispiel: Man steckt die Orts- und Geschwindigkeits-Koordina-



**Abb. 3.1** Die Theorie als mathematische Mühle: Man steckt Zahlenwerte hinein und bekommt andere Zahlenwerte heraus.

ten von Sternen zum jetzigen Zeitpunkt hinein und bekommt heraus, dass es vor 15 Milliarden Jahren einen Urknall gegeben hat. Man berechnet also ein Ereignis, das in der Vergangenheit liegt.

*Theorie:* System von Gleichungen und Sätzen.

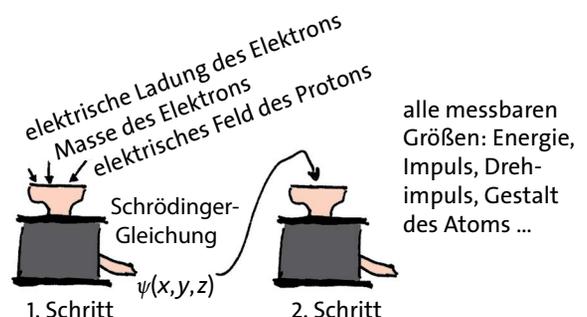
Man steckt bekannte Daten hinein und bekommt gewünschte Daten heraus.

### 3.2 Eine Theorie mit zwei Schritten

Die Theorie, mit der das Verhalten von Atomen, Elektronen, Photonen und anderen Systemen beschrieben werden kann, ist die Quantentheorie. Sie ist nicht übermäßig kompliziert, aber die Mathematik, die du kennengelernt hast, reicht noch nicht ganz aus, um sie zu verstehen. Wir wollen deshalb nur ein allgemeines Strukturmerkmal dieser Theorie ansprechen.

Um konkret zu sein, betrachten wir ein bestimmtes Problem: das Wasserstoffatom, oder genauer, die Elektronenhülle des Wasserstoffatoms. Die Daten, die wir in die Theorie hineinstecken, sind:

- Daten über die Eigenschaften des Kerns. Wir wissen, dass der Kern für unsere Zwecke als ein punktförmiges geladenes Teilchen betrachtet werden kann. Das elektrische Potenzial in der Umgebung eines solchen Teilchens ist uns bekannt.
- Die Daten, die das Elektron charakterisieren, nämlich seine Masse und seine elektrische Ladung.



**Abb. 3.2** Die mathematische Mühle der Quantenmechanik, in zwei Teilmühlen zerlegt. Die erste liefert aus der Problembeschreibung die Psi-Funktion, die zweite berechnet aus der Psi-Funktion nachprüfbare Zahlenwerte.

### 3.3 Die Psi-Funktion

Die Rechnung der Quantentheorie, die von den Ausgangsdaten zu den Enddaten führt, kann man nun in zwei Teile zerlegen, in Abb. 3.2 durch zwei Mühlen dargestellt.

Die Ausgangsdaten werden in Mühle 1 hineinsteckt. Mühle 1 liefert als Zwischenergebnis eine Funktion

$$\psi(x, y, z),$$

die sogenannte *Psi-Funktion* oder *Wellenfunktion*.  $\psi$  ist eine Funktion der Ortskoordinaten. Wir stecken dann die Psi-Funktion in Mühle 2, und erst diese liefert die Zahlenwerte, an denen wir eigentlich interessiert sind und die wir experimentell überprüfen können.

Der erste Schritt, also die Berechnung der Psi-Funktion, ist der aufwendigere. Dafür müssen komplizierte Rechenverfahren angewendet werden. Es muss eine *Differenzialgleichung* gelöst werden, die *Schrödinger-Gleichung*. Deshalb sagen die Physiker auch, sie hätten das Problem gelöst, sobald sie die entsprechende Psi-Funktion gefunden haben. Der zweite Schritt ist dann nur noch eine Kleinigkeit: Aus der Psi-Funktion bekommt man recht schnell und einfach alles, was man überhaupt bekommen kann: die Gestalt oder Form der Elektronenhülle des Atoms, die Energie des Elektrons, den Impuls, den Drehimpuls, den Magnetismus ...

Einiges von dem, was man vielleicht gern herausbekommen hätte, kommt allerdings nicht heraus. Und das bedeutet: Wer danach fragt, hat eine unerlaubte oder sinnlose Frage gestellt.

Die Quantentheorie löst ein Problem in zwei Schritten:

- Berechnung der Psi-Funktion aus den eingegebenen Daten;
- Berechnung der gewünschten Daten aus der Psi-Funktion.

### 3.3 Die Psi-Funktion

Die Psi-Funktion hat als unabhängige Variablen  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Ihr Wert hängt also vom Ort ab. Uns waren früher schon solche Funktionen begegnet. Elektrische und magnetische Felder haben wir beschrieben mit den Feldstärken, deren unabhängige Variablen auch die Ortskoordinaten waren. Die Psi-Funktion ist also vergleichbar mit einer Feldstärke.

Wir wollen den Vergleich zwischen der Psi-Funktion des Elektrons und den Feldstärken des elektromagnetischen Feldes etwas weiter führen.

Die elektrischen und magnetischen Feldstärken enthalten alles, was man über ein elektromagnetisches Feld wissen kann. Man kann daraus die Werte anderer physikalischer Größen berechnen: Energie, Energiestrom, Impuls und Impulsstrom. Du hattest früher gelernt, wie man die Energiedichte eines elektrischen Feldes berechnet:

$$\rho_E(x, y, z) = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}(x, y, z)|^2.$$

Der Ausdruck sagt uns, wie die Energie im Raum verteilt ist. Er sagt uns damit auch, wie der Feldstoff verteilt ist.

Ganz ähnlich steht es mit der Psi-Funktion. Auch sie enthält alles, was man über die Materie wissen kann, die sie beschreibt. Man kann daraus die Werte anderer physikalischer Größen berechnen. Das ist in Abb. 3.2 durch die zweite Mühle dargestellt.

Wir wollen zunächst ein sehr einfaches Beispiel einer Rechnung von Mühle 2 betrachten: die Bildung des Quadrats:

$$\rho(x, y, z) = \psi^2(x, y, z)$$

Das Ergebnis ist wiederum eine Funktion von  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Im Gegensatz zur Psi-Funktion selbst kann sie nur positive Werte annehmen (oder gleich null sein). Multiplizieren wir sie noch mit der Masse  $m$  des Elektrons

$$\rho_m = m \cdot \rho = m \cdot \psi^2,$$

so erhalten wir eine Massendichte. Wir können dieses Ergebnis folgendermaßen deuten: Das Elektron ist eine Portion eines Stoffes. Wir nennen diesen Stoff *Elektronium*. Die Größe  $\rho_m$  stellt die Massendichte des Elektroniums dar. Multiplizieren wir  $\rho$  mit  $-e$ , d. h. der negativen Elementarladung

$$\rho_Q = -e \cdot \rho = -e \cdot \psi^2,$$

so erhalten wir die Ladungsdichte des Elektroniums.

Das waren recht abstrakte Überlegungen. Wir werden im nächsten Abschnitt sehen, wie die Massen- bzw. Ladungsverteilung des Elektroniums in konkreten Fällen aussieht.

Das Quadrat der Psi-Funktion ist ein Maß für die Massendichte und die Ladungsdichte des Elektroniums. ■

## 4 DAS ATOM – STATIONÄRE ZUSTÄNDE

### 4.1 Die Dichte des Elektroniums

Ein Atom besteht aus einem kleinen, schweren Kern und einer leichten und relativ großen Hülle. Der Durchmesser des Kerns ist ungefähr ein 50 000stel des Atomdurchmessers, d. h. des Durchmessers der Hülle. Die Masse des Kerns beträgt etwa 99,9 % der Gesamtmasse des Atoms. Kern und Hülle sind elektrisch geladen: der Kern positiv, die Hülle negativ. Die Ladungen von Kern und Hülle sind dem Betrag nach gleich. Das bedeutet, dass das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist, seine Gesamtladung ist null.

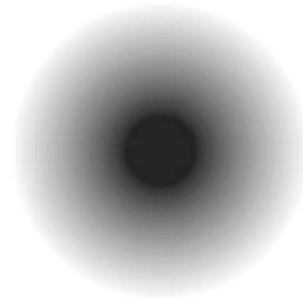
Atome bestehen aus einem kleinen, schweren, positiv geladenen Kern und einer großen, leichten, negativ geladenen Hülle.

Die Atomhülle besteht aus Elektronium. Wir hatten gesehen, dass dessen Dichte durch das Quadrat der Psi-Funktion beschrieben wird.

Lässt man ein Atom in Ruhe, d. h. stört man es nicht irgendwie von außen, so ist die Elektroniumverteilung nahezu kugelsymmetrisch (für manche Atomsorten sogar exakt kugelsymmetrisch). In unmittelbarer Nähe des Kerns ist sie am größten. Mit zunehmendem Abstand vom Kern nimmt sie zunächst schnell und dann immer langsamer ab. Das Atom hat also keinen scharfen Rand, Abb. 4.1.

Ein aufgeblasener Luftballon hat eine bestimmte Form. Diese Form kann man verändern, indem man gegen den Ballon drückt. Lässt man ihn wieder los, so geht er zurück in seinen ursprünglichen Zustand.

Beim Atom ist es ähnlich. Es darf sich nichts in der Nähe befinden, was das Atom verformen könnte: keine anderen Atome und keine elektrischen oder magnetischen Felder. Nur wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, hat ein Atom seine natürliche Kugelform.



**Abb. 4.1** Atom im Grundzustand. An der Grautönung erkennt man die Massen- und die Ladungsdichte des Elektroniums.

Die Bedingung, dass sich kein anderes Atom in der Nähe befindet, ist bei gasförmigen Stoffen erfüllt, denn die einzelnen Atome haben einen großen Abstand voneinander. Wir betrachten im Folgenden solche freien Atome. Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen liegen die Atome dicht an dicht. Mit der Form der Atome in diesen Stoffen werden wir uns in einem späteren Kapitel befassen.

Das Elektronium des Atoms hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Lufthülle der Erde: Auch die Dichte der Luft hängt vom Ort ab, und sie wird mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche immer geringer. Auch lässt sich keine scharfe Grenze angeben, an der die Atmosphäre endet.

Um einen Radius des Atoms anzugeben, nehmen wir willkürlich denjenigen Abstand vom Kern, bei dem die Elektroniumdichte nur noch 10 % des Maximalwerts beträgt. Die Radien der verschiedenen Atomsorten sind verschieden. Ein typischer Wert ist  $10^{-10}$  m.

Die Atomhülle besteht aus Elektronium. Das Elektronium ist kugelsymmetrisch um den Kern verteilt. Seine Dichte nimmt von innen nach außen ab.

Eine überraschende Eigenschaft des Atoms tritt zutage, wenn man versucht, Elektronium aus der Hülle herauszuholen. Es soll uns im Augenblick noch nicht interessieren, wie man das machen kann. Wir stellen uns zunächst einfach vor, das Atom wäre sehr groß, sodass wir mit den Händen hineinfassen können. Wir fassen also – in Gedanken – ins Atom hinein, um eine Portion Elektronium herauszulösen. Wir erhalten eine gewisse Menge Elektronium, legen sie irgendwo ab und wiederholen die Operation: Wir greifen wieder hinein und holen eine zweite Portion heraus. Dabei stellen wir überrascht fest, dass diese Portion exakt gleich groß ist wie die erste. Wir wiederholen den Vorgang noch einmal, und wieder ist die Elektroniumportion genauso groß wie die beiden vorherigen. Wir machen nun eine größere Anstrengung, um zu sehen, ob man nicht doch etwas mehr herausbekommt. Wir langen viel stärker zu – und sind erfolgreich: Wir haben mehr Elektronium in den Händen. Diesmal allerdings genau die doppelte Menge der Portionen, die wir vorher erhalten hatten. Bei noch stärkerem Zulangen erhält man die dreifache, vierfache ... Menge, aber nie Mengen, die dazwischen liegen. Wir versuchen nun noch, eine kleinere Menge Elektronium aus dem Atom herauszubekommen. Es gelingt aber nicht. Entweder wir bekommen eine der Portionen, wie wir sie schon hatten, oder gar nichts.

Man kann also aus dem Atom nur Elektroniumportionen ganz bestimmter Größe, *Elementarportionen* sozusagen, herausholen – oder Vielfache davon. Eine solche Elektroniumportion ist genau das, was wir bisher schon als *Elektron* bezeichnet hatten. Man nennt solche Elementarportionen allgemein auch *Teilchen*.

Hier der Steckbrief des Elektrons: Es hat eine Masse von etwa  $10^{-30}$  kg, eine elektrische Ladung von minus  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C und verhält sich wie ein kleiner Dauermagnet ganz bestimmter Stärke.

Ein Elektron ist eine Elementarportion des Elektroniums. Die Elementarportionen der Stoffe nennt man auch Teilchen.

Wie die Atomhülle besteht auch der Atomkern aus einem Stoff. Im Unterschied zur Dichte des Elektroniums in der Hülle ist die Dichte dieser Kernmaterie im Kerninnern überall ungefähr dieselbe, ähnlich wie die Dichte des Stahls in einer massiven Stahlkugel.

Aus dem Kern lassen sich ebenfalls nur bestimmte Portionen herausholen. Allerdings gibt es zweierlei etwas verschiedene Portionen, deren Namen dir wahrscheinlich bekannt sind: *Protonen* und *Neutronen*.

	Masse	elektrische Ladung	Magnetismus
Elektron	$0,9 \cdot 10^{-30}$ kg	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C	stark
Proton	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ C	schwach
Neutron	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	0 C	schwach

Tab. 4.1 Eigenschaften von Elektron, Proton und Neutron

Protonen und Neutronen haben eine viel größere Masse als Elektronen. Sie sind etwa 1800-mal so schwer. Die elektrische Ladung des Protons hat denselben Betrag wie die des Elektrons, aber ein entgegengesetztes Vorzeichen, sie beträgt also  $+1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Das Neutron ist ungeladen. Auch Protonen und Neutronen sind magnetisch, allerdings wesentlich schwächer als die Elektronen. Die Werte der Größen, durch die die Elektronen, Protonen und Neutronen charakterisiert sind, sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Der Kern jedes Atoms enthält positiv geladene Protonen; die Hülle besteht aus negativ geladenen Elektronen. Die Atome als Ganzes sind aber ungeladen. Da die Ladung von Elektronen und Protonen entgegengesetzt gleich ist, können wir folgern, dass die Anzahl der Elektronen in der Hülle eines Atoms gleich der Anzahl der Protonen im Kern des Atoms sein muss.

Die Anzahl der Protonen im Kern ist das Unterscheidungskriterium für die verschiedenen Atomsorten: Wasserstoffatome haben ein Proton im Kern, Heliumatome zwei, Lithiumatome drei usw. Im Periodensystem der Elemente sind die Atome nach der Zahl der Protonen im Kern, der *Ordnungszahl*, angeordnet.

Die Kerne der Atome enthalten eine für jede Atomsorte charakteristische Anzahl von Protonen.

Elektronen, Protonen und Neutronen sind auch magnetisch. Nun wissen wir, dass praktisch alle Stoffe, die in unserer Umgebung vorkommen, unmagnetisch sind. Und sogar das Eisen ist nur in Sonderfällen magnetisch (Eisennägel etwa sind es in der Regel nicht).

Der Grund dafür ist, dass sich die Wirkungen von Magneten gegenseitig kompensieren können. So heben sich bei etwa einem Viertel aller Atomsorten – darunter alle Edelgasatome – die magnetischen Wirkungen der Elektronen in den Atomen gegenseitig auf. (Die magnetischen Wirkungen von Protonen und Neutronen sind so gering, dass sie keinen merklichen Beitrag zum Magnetismus der Materie liefern.) Derartige Atome sind also unmagnetisch, und folglich auch diejenigen Stoffe, die aus solchen Atomen bestehen.

Bei den restlichen drei Vierteln der Atomsorten sind zwar die einzelnen Atome magnetisch. Dennoch sind auch Stoffe, die aus diesen Atomen bestehen, meist unmagnetisch: Die Atome schließen sich zu Molekülen zusammen und kompensieren dadurch ihre magnetischen Wirkungen. Wasserstoff etwa, dessen Atome nur je ein Elektron in der Hülle haben und damit magnetisch sind, kommt in der Natur nur molekular vor, d. h., er besteht aus  $H_2$ -Molekülen. Die magnetischen Wirkungen der beiden Elektronen jedes Moleküls kompensieren sich aber, sodass das Molekül als Ganzes unmagnetisch ist.

Moleküle, bei denen sich die magnetischen Wirkungen der beteiligten Atome nicht kompensieren, schließen sich häufig zu größeren, nicht magnetischen Molekülgruppen zusammen, sodass sich die magnetischen Wirkungen dieser Gruppen nach außen wieder aufheben. Nur in Ausnahmefällen, nämlich dann, wenn magnetische Atome oder Moleküle in Materialien so angeordnet sind, dass sich ihre magnetischen Wirkungen nicht kompensieren, ergibt sich eine Magnetisierung des Materials. In der Natur sind derartige Materialien sehr selten; sie lassen sich aber künstlich herstellen. Aus solchen Materialien bestehen Dauermagneten.

Die magnetischen Wirkungen der Elektronen können sich kompensieren

- innerhalb der Atomhülle,
- innerhalb eines Moleküls,
- innerhalb von Molekülgruppen.

### Aufgabe

1. Wenn man ein Atom so weit vergrößern würde, dass es die Größe der Erde hätte (Durchmesser der Erde ca. 12 000 km), welchen Durchmesser hätte dann der Kern?

## 4.2 Größe und Dichte der Atomhüllen

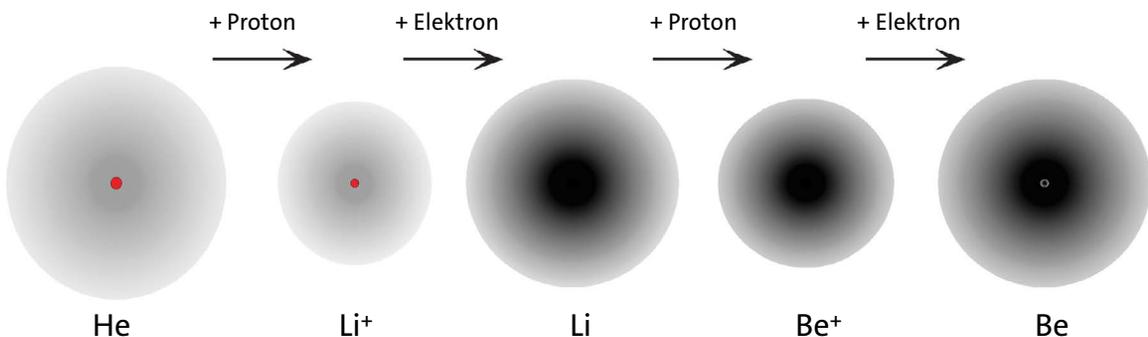
Die Menge an Elektronium in der Hülle eines Atoms nimmt mit steigender Protonenzahl zu. So enthält die Hülle eines Quecksilberatoms (Ordnungszahl 80) achtzig Mal so viel Elektronium wie die Hülle eines Wasserstoffatoms. Die Erwartung liegt nahe, dass Quecksilberatome viel größer sind als Wasserstoffatome. Tatsächlich sind aber Wasserstoff- und Quecksilberatom fast gleich groß.

Das bedeutet, dass die Dichte des Elektroniums im Quecksilberatom viel höher sein muss als im Wasserstoffatom.

Wir wollen in Gedanken die Atome der verschiedenen chemischen Elemente nach und nach aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufbauen und dabei danach fragen, wie sich die Größe und die Dichte der Atome ändert. (Da die Neutronen keinen Einfluss auf die Größe der Atome haben, erwähnen wir sie im Folgenden nicht mehr.) Wir beginnen mit dem Wasserstoffatom, das aus einem Proton als Kern und einer Elementarportion Elektronium als Hülle besteht.

Wir erhöhen die Zahl der Protonen um eins und erhalten ein positiv geladenes Helium-Ion. Da jetzt zwei positiv geladene Protonen an dem negativ geladenen Elektronium ziehen, rückt das Elektronium näher an den Kern heran. Das Helium-Ion ist also kleiner als das Wasserstoffatom. Das bedeutet, dass die Dichte des Elektroniums beim Helium-Ion größer ist.

Um zum Heliumatom zu kommen, fügen wir als Nächstes ein Elektron hinzu. Dadurch wird die Hülle wieder größer, wie ein Luftballon, in den man zusätzliche Luft hineinbläst. Die zwei Elektroniumportionen im Heliumatom beanspruchen mehr Platz als die eine Portion im Helium-Ion – das Heliumatom ist also größer als das Ion.



**Abb. 4.2** Wir bauen schwere Atome auf, indem wir abwechselnd ein Proton und ein Elektron hinzufügen. (Es werden auch Neutronen hinzugefügt. Diese haben aber keinen Einfluss auf die Größe der Atome bzw. Ionen.)

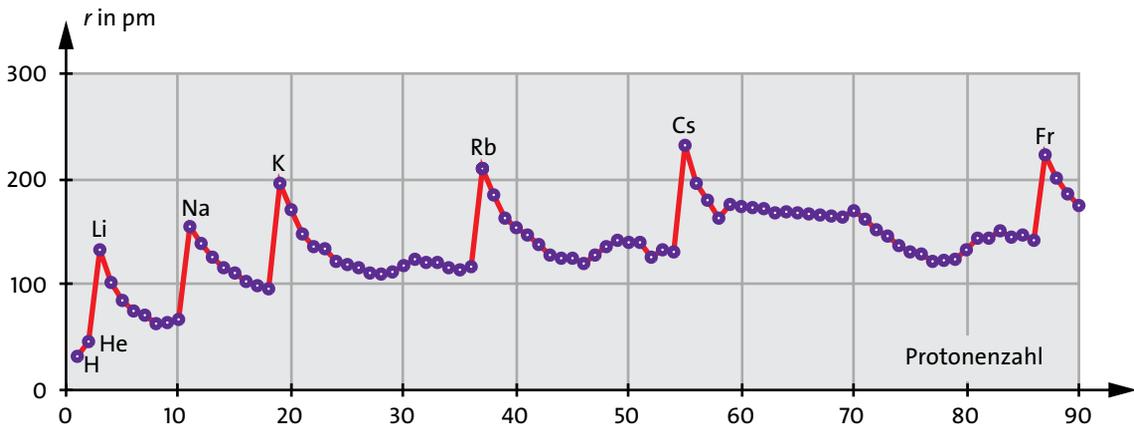


Abb. 4.3 Die Radien der verschiedenen Atome

Hinzufügen eines weiteren Protons ergibt ein positiv geladenes Lithium-Ion, Abb. 4.2, und wieder schrumpft dabei das Elektronium zusammen. Die Vervollständigung der Hülle zum Lithiumatom hat wieder denselben Effekt wie beim Helium: Die Hülle mit drei Elektronen braucht mehr Platz; das Lithiumatom ist größer als das Lithium-Ion.

Bei diesem schrittweisen Aufbau der Atome machen sich zwei gegenläufige Tendenzen bemerkbar: Das Hinzufügen eines Protons hat eine Verkleinerung der Hülle zur Folge, während das Hinzufügen eines Elektrons zu einer Vergrößerung führt.

In Abb. 4.3 sind die Radien der Atome über der Protonenzahl aufgetragen. Man sieht, dass manchmal die Tendenz zur Verkleinerung überwiegt und manchmal die Tendenz zur Vergrößerung. Der Radius der meisten Atome weicht aber nicht sehr stark von dem typischen Wert von etwas mehr als  $10^{-10}$  Meter ab. Die größten Atome sind etwa doppelt so groß, die kleinsten halb so groß.

Der Radius der meisten Atome weicht nur wenig von  $10^{-10}$  Meter ab. Sehr große Unterschiede gibt es dagegen bei der Dichte des Elektroniums in den Atomhüllen.

### Aufgabe

1. Berechne näherungsweise die mittlere Dichte des Elektroniums im Wasserstoffatom und im Bleiatom. Schätze die Dichte von Atomkernen ab. Vergleiche mit der Dichte normaler Materie. Verwende nur Daten aus diesem Text.

## 4.3 Die Anregung von Atomen

Ein Atom, das man ungestört lässt, hat seine „natürliche“, (nahezu) kugelförmige Gestalt. Man sagt, es befindet sich im *Grundzustand*.

Ein Atom kann aber auch verformt werden. Dazu muss man ihm Energie zuführen – etwa, indem man ein Elektron oder ein Photon dagegen schießt. Im Allgemeinen geht das Atom danach sofort wieder in seine alte, natürliche Form zurück – ähnlich wie ein Tennisball durch den Kontakt mit dem Schläger für eine kurze Zeit verformt wird, aber seine alte Form gleich wieder annimmt.

Es gibt allerdings Verformungen, die das Atom eine längere Zeit beibehält. Man sagt dann, das Atom sei *angeregt* oder es befinde sich in einem *Anregungszustand*.

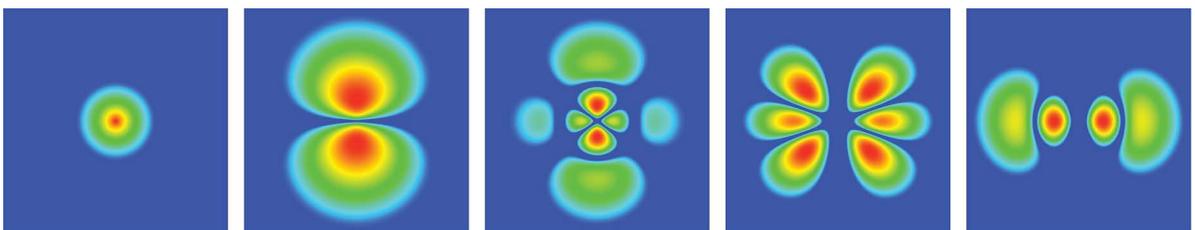


Abb. 4.4 Elektroniumdichte des Wasserstoffatoms in verschiedenen stationären Zuständen

Abb. 4.4 zeigt die Dichte  $\rho = \psi^2$  für einige Zustände des Wasserstoffatoms, links im Grundzustand, rechts daneben in verschiedenen Anregungszuständen. Dargestellt ist die Dichte in einer Schnittebene durch das Zentrum des Atoms. Rot bedeutet hohe, blau niedrige Dichte. Die Funktion ist für alle Zustände drehsymmetrisch. Die Drehachse läuft in der Abbildung von oben nach unten.

Abbildung 4.5 zeigt das Atom in einem dieser Zustände in einer Darstellung, in der die dreidimensionale Gestalt zu erkennen ist.

Den Grundzustand und die Anregungszustände nennt man die *stationären Zustände* des Atoms. Warum stationär? Wenn sich das Atom in einem solchen Zustand befindet, ändert sich die Dichte des Elektroniums nicht mit der Zeit.

Man kann einem Atom auch eine beliebige andere, unregelmäßige Form aufzwingen. In einem solchen Zustand macht das Elektronium aber schnelle Schwingungen. Schwingende Ladung führt zur Emission einer elektromagnetischen Welle. Das Atom verliert damit Energie. Wegen dieser Schwingungen nennt man solche Zustände nicht-stationär. Sie werden uns später noch beschäftigen. Im Augenblick haben wir es nur mit den stationären Zuständen zu tun.

#### Stationärer Zustand eines Atoms:

Elektroniumverteilung ist zeitlich konstant.

#### Nichtstationärer Zustand eines Atoms:

Elektroniumverteilung macht schnelle Schwingungen.

Noch einige Worte zur Sprechweise. Wenn sich ein Elektron in einem der stationären Zustände befindet, so sagt man auch, das Elektron besetze ein bestimmtes *Orbital*. Das Orbital ist also der durch die entsprechende Psi-Funktion definierte Platz, den das Elektronium einnehmen kann. Damit ist festgelegt, wie viel Elektronium sich an den verschiedenen Orten befindet (falls das Orbital besetzt ist).

Man kann das Orbital vergleichen mit einem Kino- oder Theatersaal. Wenn der Saal (voll) besetzt ist, sind die Menschen auf eine ganz bestimmte Art im Saal verteilt. Dabei müssen sie durchaus nicht überall gleich dicht sitzen. In der Königsloge eines Theaters sitzen sie weniger eng beieinander als in der Gegend der billigen Plätze.

Wenn sich ein Elektron in einem stationären Zustand befindet, sagt man, es besetze ein bestimmtes *Orbital*.

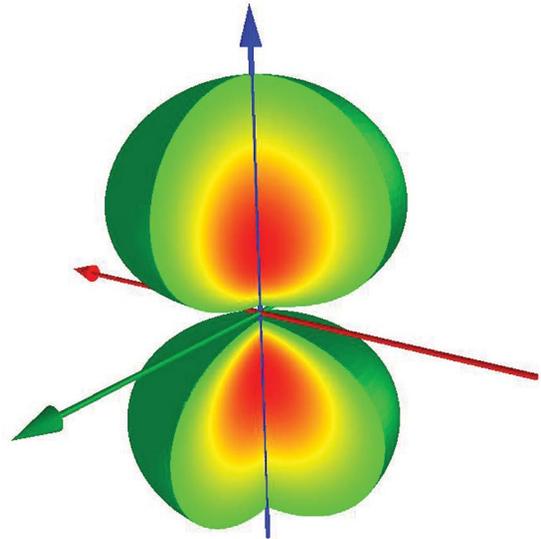


Abb. 4.5 Wasserstoffatom in einem Anregungszustand in 3D-Darstellung (entspricht dem zweiten Teilbild von Abbildung 4.4)

Wir können jetzt auch genauer erklären, was für Ergebnisse die linke Mühle in Abb. 3.2 liefert. Wir hatten früher gesagt, dass an ihrem Ausgang *die* Psi-Funktion herauskommt. Das stimmt noch nicht ganz, denn die Schrödingergleichung, d. h. die Rechnung von Mühle 1, liefert gleich eine ganze Reihe von Psi-Funktionen: die Psi-Funktionen aller stationären Zustände. Tatsächlich gibt es für ein Atom sogar unendlich viele Psi-Funktionen und damit stationäre Zustände.

Mithilfe der Psi-Funktion lassen sich viele Erscheinungen und viele Eigenschaften der Atome erklären. Dazu ist es zweckmäßig, zunächst etwas Ordnung in die große Menge der Psi-Funktionen oder der Orbitale zu bringen. Eine Möglichkeit wäre, sie einfach durchnummerieren. Die entsprechende Liste wäre aber noch sehr unübersichtlich. Es gibt ein besseres Verfahren. Eine Psi-Funktion oder ein Orbital kann nämlich durch drei Eigenschaften charakterisiert werden, und man kann durch je eine Nummer beschreiben, wie stark diese Eigenschaften ausgeprägt sind.

Ein einfaches Beispiel zeigt, wie das Verfahren funktioniert: In einer großen Kleiderfabrik sollen die hergestellten Hosen charakterisiert werden: Auf einem Etikett soll erkennbar sein, um was für eine Hose es sich handelt. Man produziert Hosen in 12 unterschiedliche Farben ( $f$ ), aus 4 Stoffsorten ( $s$ ) und in 5 verschiedenen Größen ( $g$ ). Es gibt also  $12 \cdot 4 \cdot 5 = 240$  verschiedene Hosentypen. Man könnte diese zwar irgendwie von 1 bis 240 durchnummerieren. Ein anderes Verfahren ist aber praktischer. Man nummeriert

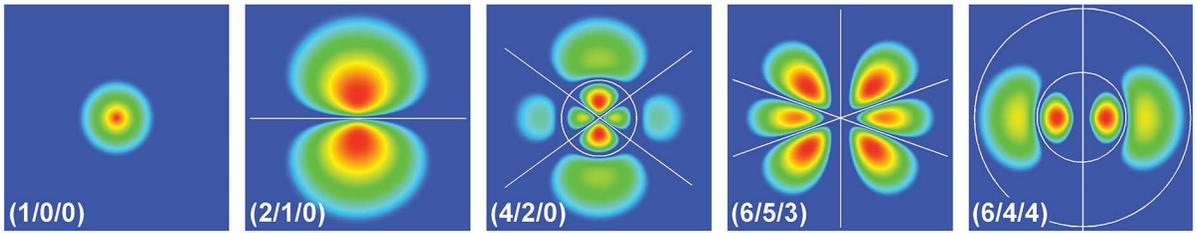


Abb. 4.6 Knotenflächen für die Zustände von Abb. 4.4. (Die Flächen erscheinen im Schnitt als Linien.)

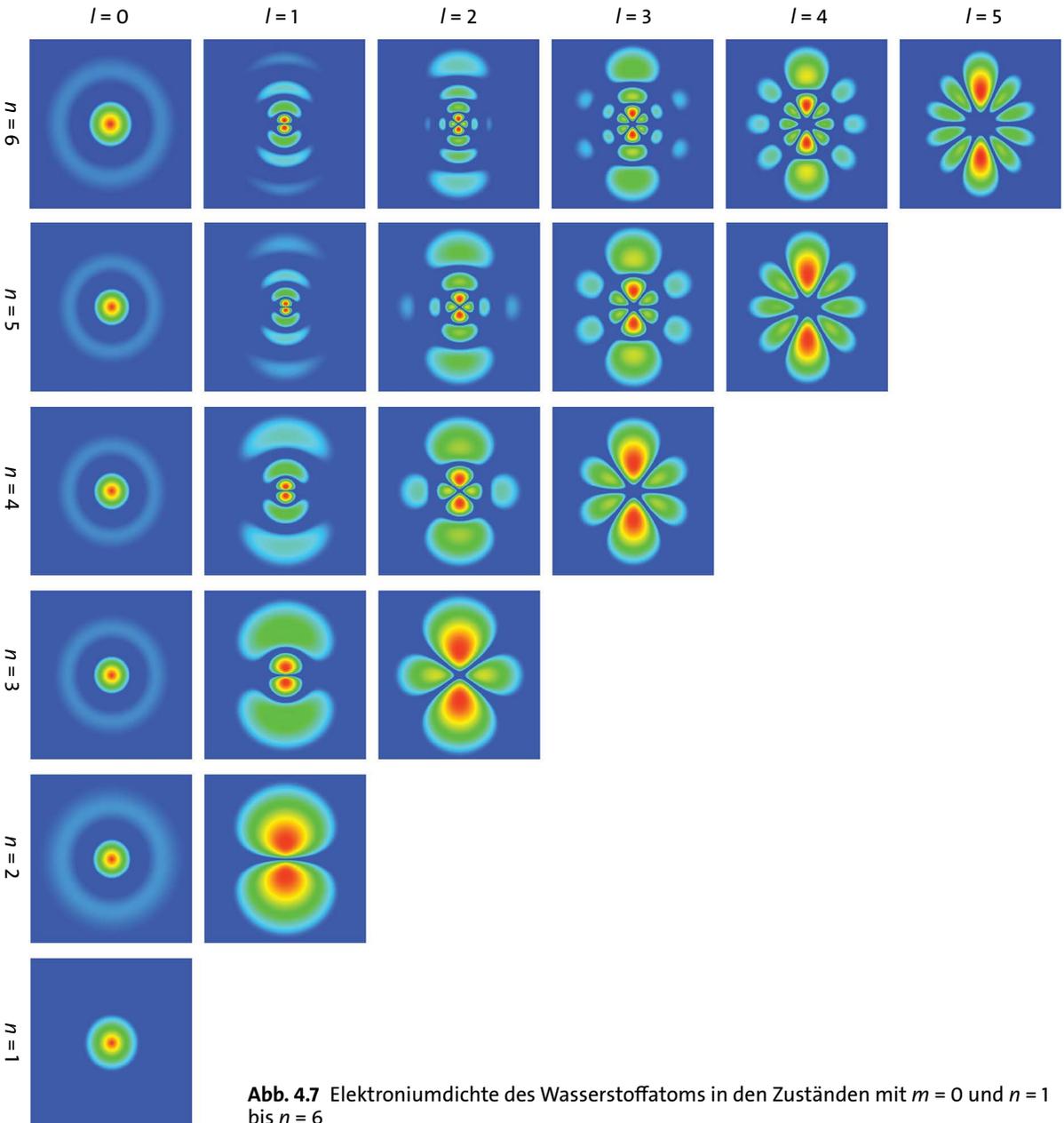


Abb. 4.7 Elektronumdichten des Wasserstoffatoms in den Zuständen mit  $m=0$  und  $n=1$  bis  $n=6$

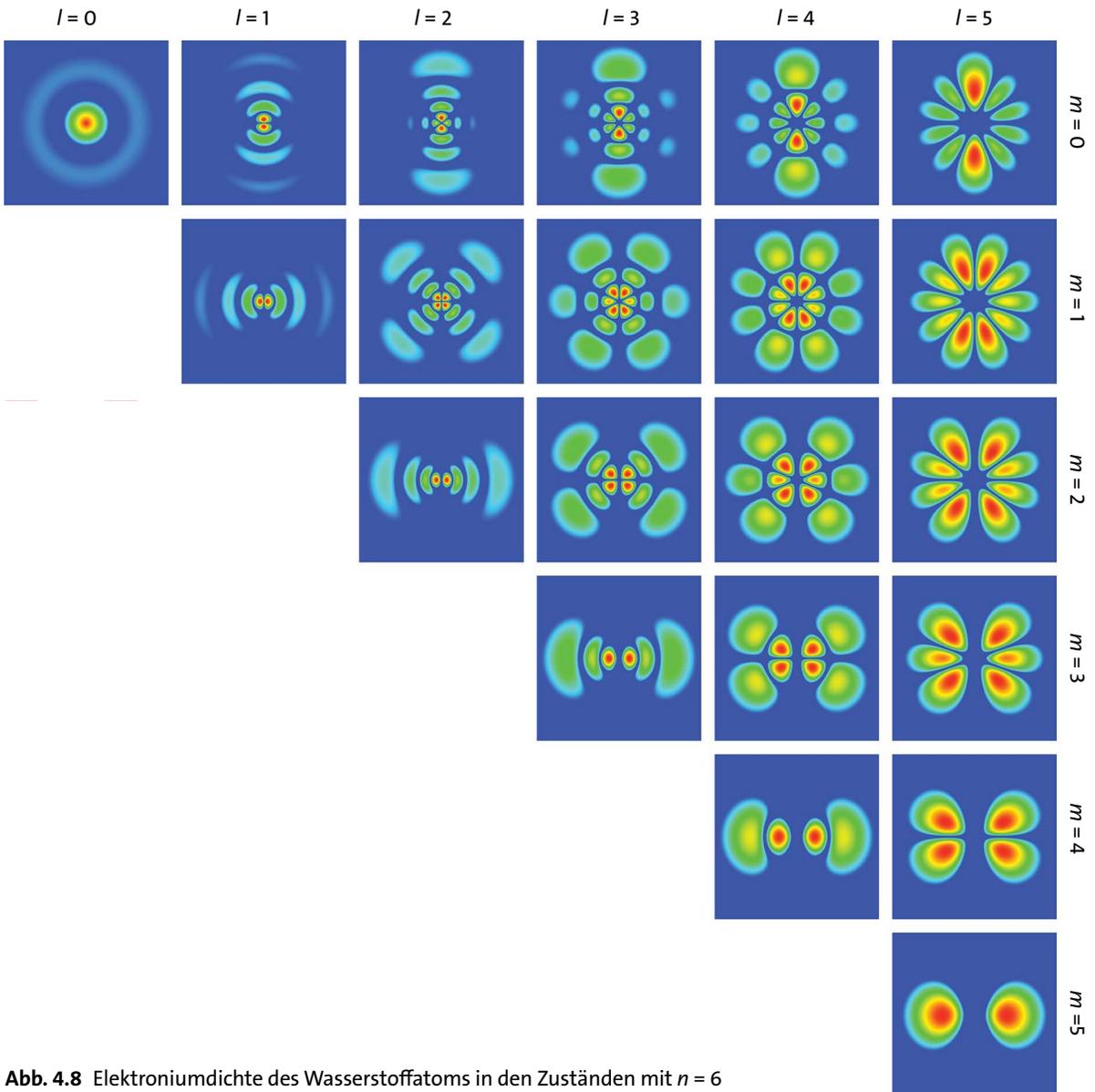


Abb. 4.8 Elektroniumdichte des Wasserstoffatoms in den Zuständen mit  $n = 6$

jede der drei Eigenschaften einzeln durch: Die Farben laufen von  $f = 1$  bis  $f = 12$ , die Stoffsorten von  $s = 1$  bis  $s = 4$  und die Größen von  $g = 1$  bis  $g = 5$ . Man kann jetzt jeden Hosentyp durch 3 kleinere Zahlen beschreiben, z. B.  $f = 9, s = 2, g = 3$ .

Auf dieselbe Art können die Psi-Funktionen der stationären Zustände charakterisiert werden. Wir können zwar im Augenblick die drei Eigenschaften, durch die man sie klassifiziert, noch nicht benennen. Wir wollen aber schon festhalten, dass auch die Psi-Funktionen mithilfe von drei Zahlen klassifiziert werden

können. Man nennt diese Zahlen Quantenzahlen, und man benutzt für sie die Symbole  $n, l$  und  $m$ .

Die Quantenzahlen können die folgenden Werte annehmen:

- $n = 1, 2, \dots, \infty$
- $l = 0, 1, \dots, n - 1$
- $m = -l, -(l - 1), -(l - 2), \dots, -1, 0, 1, \dots, l - 2, l - 1, l$

Der Wertebereich von  $l$  hängt vom Wert von  $n$  ab, und der Wertebereich von  $m$  hängt von  $l$  ab. Je größer  $n$  ist, desto mehr verschiedene Werte kann die Quantenzahl

$l$  annehmen, und je größer  $l$  ist, desto mehr verschiedene  $m$ -Werte gibt es. Für den Grundzustand ist  $n = 1$ ,  $l = 0$  und  $m = 0$ . In Abbildung 4.6 sind für jedes dargestellte Orbital auch die Quantenzahlen angegeben. So bedeutet  $(2/1/0)$ , dass  $n = 2$ ,  $l = 1$  und  $m = 0$  ist.

Du wirst nach und nach erfahren, welche Eigenschaften in den drei Quantenzahlen zum Ausdruck kommen. Zunächst sieht man schon, dass sie etwas mit der Gestalt der Orbitale zu tun haben müssen. Abbildung 4.7 zeigt alle Orbitale für  $n = 1$  bis  $n = 6$ , bei denen  $m = 0$  ist.

Das Bild des Grundzustands ist ganz links unten. Es gibt nun in allen Zuständen (außer im Grundzustand) Flächen, auf denen die Elektronendichte gleich null ist, und zwar Kugelflächen, Kegelmantelflächen und Ebenen. (Im zweidimensionalen Schnitt erscheinen die Kugelflächen als Kreise und die Kegelmantelflächen als Geraden.) Man nennt solche Flächen Knotenflächen. In Abb. 4.6 sind die Knotenflächen der Orbitale von Abb. 4.4 eingezeichnet.

Du siehst jetzt, dass die Quantenzahlen etwas mit den Knotenflächen zu tun haben. In Abbildung 4.7 nimmt die Anzahl der kugelförmigen Knotenflächen von unten nach oben zu, und die Anzahl der kegelförmigen von links nach rechts. (In der linken Spalte sieht man nicht, dass die Zahl der kugelförmigen Knotenflächen nach oben zunimmt, weil die Elektronendichte außen so gering ist, dass man bei dem verwendeten Farbcode nichts mehr erkennt.)

Abbildung 4.8 zeigt noch eine andere Auswahl von Orbitalen: Hier ist für alle Teilbilder  $n = 6$ . Die dargestellten Orbitale unterscheiden sich im Wert von  $l$  und im Wert von  $m$ . Wieder erkennt man eine Systematik: Mit abnehmendem  $m$ -Wert nimmt die Zahl der Knotenflächen zu.

Man nummeriert die stationären Zustände mithilfe der drei Quantenzahlen  $n$ ,  $l$  und  $m$  durch.

## 4.4 Die Energie des Elektrons in stationären Zuständen – das Energietermschema

Wenn ein Atom in einen angeregten Zustand übergeht, speichert es die für die Formänderung aufgewendete Energie. In Abb. 4.9 sind die Energiewerte der verschiedenen stationären Zustände des Wasserstoffatoms auf der Energieachse markiert. Wir nennen diese Darstellung die *Energieleiter*. Die Energie eines stationären Zustands hängt nur von der Quantenzahl

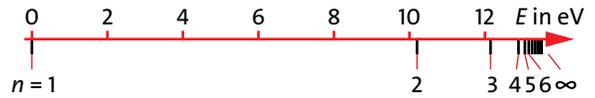


Abb. 4.9 Energie des Wasserstoffatoms in seinen stationären Zuständen

$n$  ab. In Zuständen, die sich nur in  $l$  oder  $m$  unterscheiden, hat das Atom die gleiche Energie.

Als Maßeinheit für die Energie wurde das in der Atomphysik und in der Chemie übliche eV (Elektronenvolt) benutzt: die Energie, die ein Teilchen mit der Elementarladung  $e$  aufnimmt, wenn es eine Potenzialdifferenz von 1 Volt durchläuft. Es ist

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Die Energie hat den niedrigsten Wert, wenn sich das Atom im Grundzustand befindet. Die Energiewerte in den Anregungszuständen liegen um den Betrag höher, der bei der Anregung aufgenommen wird. Wir sehen hier davon ab, dass man ein Atom auch in Bewegung setzen und damit seine Energie nach Belieben verändern kann. Wir betrachten also ruhende Atome.

Die Abbildung zeigt, dass die Abstände benachbarter Energiewerte mit zunehmender Energie immer geringer werden. Die höchste eingezeichnete Energie entspricht der Ionisierung des Atoms: Wenn die Energie des Elektrons diesen Wert überschreitet, löst es sich vom Atom. Im Fall des Wasserstoffatoms bleibt dann nur noch ein Proton zurück.

Ein ruhendes Atom kann nur ganz bestimmte Energiemengen speichern. Die Energie des Atoms hängt nur von der Quantenzahl  $n$ , nicht aber von  $l$  und  $m$  ab.

## 4.5 Die Stromdichte des Elektroniums

Wir haben gesehen, dass man aus den Psi-Funktionen die Dichte des Elektroniums berechnen kann.

Mit etwas mehr Aufwand kann Mühle 2 in Abb. 3.2 noch eine andere interessante Funktion berechnen:  $\vec{j}(x, y, z)$ . In die Formel für  $\vec{j}$  geht dabei nicht nur  $\psi(x, y, z)$  selbst ein, sondern auch die Ableitung von  $\psi(x, y, z)$  nach  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Für das genaue Aussehen der Formel interessieren wir uns hier nicht. Was kann man sich unter  $\vec{j}$  vorstellen? Multipliziert man  $\vec{j}$  mit der Masse  $m$  des Elektrons, so erhält man die Massenstromdichte des Elektroniums:

$$\vec{j}_m(x, y, z) = m \cdot \vec{j}(x, y, z).$$

Multipliziert man mit der Ladung  $-e$  des Elektrons, so bekommt man die elektrische Stromdichte:

$$\vec{j}_Q(x, y, z) = -e \cdot \vec{j}(x, y, z).$$

Zur Erinnerung:

$$\text{Massenstromdichte} = \frac{\text{Massenstromstärke}}{\text{durchströmte Fläche}}$$

und

$$\text{elektrische Stromdichte} = \frac{\text{elektrische Stromstärke}}{\text{durchströmte Fläche}}$$

So viel zu der neuen Größe  $\vec{j}$  und zu ihrer Berechnung. Was liefert nun aber die Rechnung konkret, und was kann man mit  $\vec{j}$  anfangen?

## 4.6 Drehimpuls und Magnetismus von Atomen

Wenn man  $\vec{j}$  für verschiedene Zustände des Elektrons berechnet, macht man einige auffällige Feststellungen:

- Für die Zustände mit  $m = 0$  ist  $\vec{j}$  an jeder Stelle  $(x, y, z)$  gleich null.
- Für die Zustände mit  $m \neq 0$  ist  $\vec{j}$  ungleich null. Das Elektronium strömt auf kreisförmigen Linien um eine Achse, die durch den Kern geht, Abb. 4.10. In Abbildung 4.8 ist für die obere Bildzeile  $m = 0$ , das Elektronium strömt nicht. In den anderen Teilbildern bildet es eine Strömung. Für zwei Zustände, für die sich  $m$  nur im Vorzeichen unterscheidet, ist die Elektroniumdichteverteilung dieselbe, aber die Strömungsrichtungen sind entgegengesetzt.

In Zuständen mit  $m \neq 0$  bildet das Elektronium eine Strömung mit kreisförmigen Stromlinien. Unterschiedliches Vorzeichen von  $m$  bedeutet unterschiedliche Strömungsrichtung.

Da das Elektronium strömt, verhält sich das Atom wie ein sich drehender Kreisel, und es hat Drehimpuls. Diesen Drehimpuls kann man berechnen (mit Mühle 2) und bekommt ein weiteres interessantes Ergebnis. Der Wert ist ein ganzzahliges Vielfaches von  $h/2\pi$ . Es ist

$$L = m \cdot h/2\pi.$$

Dieses Ergebnis ist vielleicht überraschend, aber im Grunde passt es ins Bild. Denn dasselbe Verhalten kennen wir schon von der elektrischen Ladung. Auch sie tritt nur in ganzzahligen Vielfachen von einem bestimmten Wert auf. Wir hatten gesagt, sie ist quantisiert. Wir sehen also: Auch der Drehimpuls ist quantisiert. Wir verstehen jetzt auch die physikalische Bedeutung der Quantenzahl  $m$ : Sie sagt uns, welchen Drehimpuls das Atom hat.

Diesen Drehimpuls, der mit der Strömung des Elektroniums um den Kern zusammenhängt, nennt man auch *Bahndrehimpuls*, um ihn zu unterscheiden von einem anderen Drehimpuls, den wir später kennenlernen werden.

In Zuständen mit  $m \neq 0$  hat das Atom Drehimpuls. Der Wert dieses Bahndrehimpulses ist ein ganzzahliges Vielfaches von  $h/2\pi$ . Der Drehimpuls ist quantisiert.

Dass das Elektronium strömt, bedeutet außerdem, dass ein elektrischer Kreisstrom fließt. Ein elektrischer Strom hat um sich herum ein magnetisches Feld. Das Feld eines Kreisstroms ist dem Feld eines kleinen Pilenmagneten ähnlich.

In Zuständen mit  $m \neq 0$  ist das Atom magnetisch.

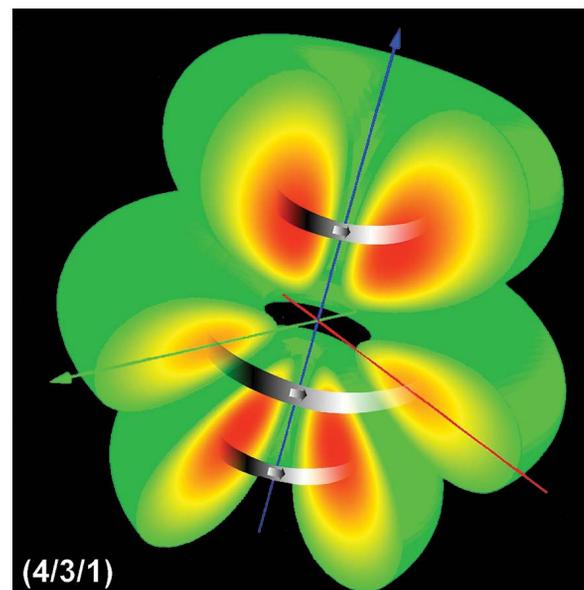


Abb. 4.10 Die Strömung des Elektroniums ist durch Pfeile angedeutet.

## 5 ÜBERGÄNGE IM ATOM – NICHTSTATIONÄRE ZUSTÄNDE

### 5.1 Übergänge zwischen stationären Zuständen

Ein stationärer Anregungszustand ist eine prekäre Angelegenheit. Du kannst ihn vergleichen mit dem Zustand der Kugel in Abb. 5.1.

Der Schwerpunkt der Kugel liegt genau über dem Hochpunkt ihrer Unterlage. Die Kugel befindet sich im *labilen* Gleichgewicht. Es gäbe eigentlich keinen Grund, dass sie herunterrollt. Allerdings genügt die kleinste Störung, um sie aus ihrer Gleichgewichtslage herauszubringen. Wenn das geschieht, rollt sie nach unten, in einen Zustand, in dem das Gravitationsfeld weniger Energie hat. Ähnlich ist es mit einem Atom in einem angeregten Zustand: Die kleinste Störung genügt, um einen Übergang in einen Zustand mit weniger Energie einzuleiten. Dabei gibt es die entsprechende Energie ab. Das geschieht meist so, dass das Atom ein Photon emittiert. Die Energie wird dann von dem Photon weggetragen.

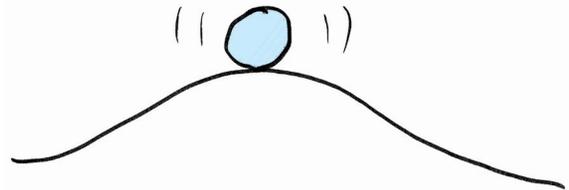
Wir nehmen an, das Atom gehe vom Zustand  $i$  in den Zustand  $k$  über. Die Energie des Atoms in den beiden Zuständen sei  $E_i$  und  $E_k$ . Das Photon muss dann die Energie

$$E = E_i - E_k.$$

haben. Da für das Photon  $E = h \cdot f$  ist, gilt:

$$f = \frac{E_i - E_k}{h}$$

Mit unserer zweiten Mühle, Abb. 3.2, kann man auch berechnen, was das Elektronium macht, während der Übergang vonstatten geht. Wenn es sich um einen Übergang vom Zustand  $i$  in den Zustand  $k$  handelt, so muss man die Psi-Funktion des Ausgangszustands  $\psi_i$  und die des Endzustandes  $\psi_k$  in die Mühle stecken. Daraus wird die Psi-Funktion  $\psi_{i \rightarrow k}$  während des



**Abb. 5.1** Den Zustand eines angeregten Atoms kann man vergleichen mit dem labilen Gleichgewichtszustand der Kugel.

Übergangs berechnet. Wir interessieren uns wieder für die Elektroniumdichte und lassen Mühle 2 gleich das Quadrat

$$\rho_{i \rightarrow k} = (\psi_{i \rightarrow k})^2$$

der Übergangs-Psi-Funktion berechnen. Das Ergebnis ist interessant: Die Elektroniumdichte  $\rho_{i \rightarrow k}$  hängt nicht nur vom Ort, sondern auch von der Zeit ab. Wenn der Übergang beginnt, fängt die durch  $\rho_{i \rightarrow k}$  beschriebene Dichteverteilung an zu schwingen. Abb. 5.2 zeigt drei Ausschnitte aus dem Prozess: Die Bildfolge von Abb. 5.2a gehört zum Anfang des Vorgangs; der Übergang ist noch nicht sehr weit fortgeschritten. In Abb. 5.2b ist der Übergang etwa zur Hälfte abgelaufen; kurz bevor der Grundzustand erreicht ist, sieht es so aus, wie es Abb. 5.2c zeigt.

Viel besser sieht man den Ablauf des Übergangs in einer Animation, siehe z.B. [www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/Atom/Start.html](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/Atom/Start.html).

Man erkennt in der Bewegung des Elektroniums zwei Tendenzen:

- Das Elektronium macht eine schnelle Schwingungsbewegung. Man sieht sie in jeder der drei Bildfolgen von Abb. 5.2.

- Die globale Gestalt der Elektroniums geht langsam über von der des Ausgangszustands in die des Endzustands. Man sieht das, wenn man die drei Bildfolgen miteinander vergleicht.

Ein typischer Übergang dauert etwa  $10^{-8}$  s. In dieser Zeit macht das Elektronium ungefähr  $10^7$  Schwingungen. In einer Animation kann man natürlich nicht zehn Millionen Schwingungen zeigen. Bei der Herstellung der Videos musste also etwas getrickst werden: Es wird so getan, als ob während des gesamten Übergangs nur etwa 15 Schwingungen stattfänden.

Die Zustände, die das Atom während des Übergangs durchläuft, sind die *nicht-stationären* Zustände.

## 5.2 Der Emissionsvorgang

Die „Animation“ von Abb. 5.2 zeigt  $\rho = \psi^2$  als Funktion von Ort und Zeit. Nun ist

$$\rho_Q = e \cdot \rho.$$

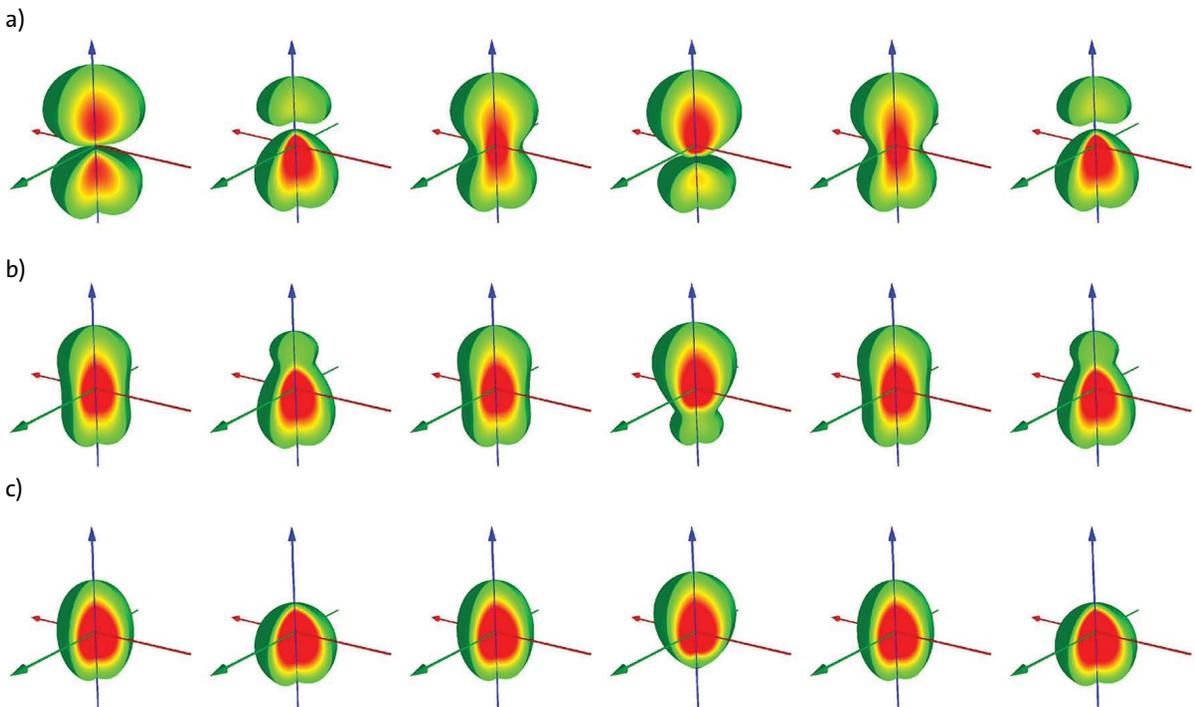
Die Bilder sagen uns damit, dass auch die Ladungsdichte des Elektroniums auf- und abschwingt. Das be-

deutet, dass sich das Atom wie eine Antenne verhält. In einer Antenne für Radiowellen schwingt elektrische Ladung auf und ab. Dabei entstehen ein elektrisches und ein magnetisches Feld. Beide Felder ändern sich schnell, und dadurch entsteht eine elektromagnetische Welle. Eine Antenne, bei der die elektrische Ladung auf- und abschwingt, nennt man auch eine *Dipolantenne*, Abb. 5.3a.

Da im Atom die elektrische Ladung schnell auf- und abschwingt, verhält sich das Atom wie eine Dipolantenne: Es emittiert eine elektromagnetische Welle und gibt damit Energie ab. Wir verstehen jetzt gleich zweierlei:

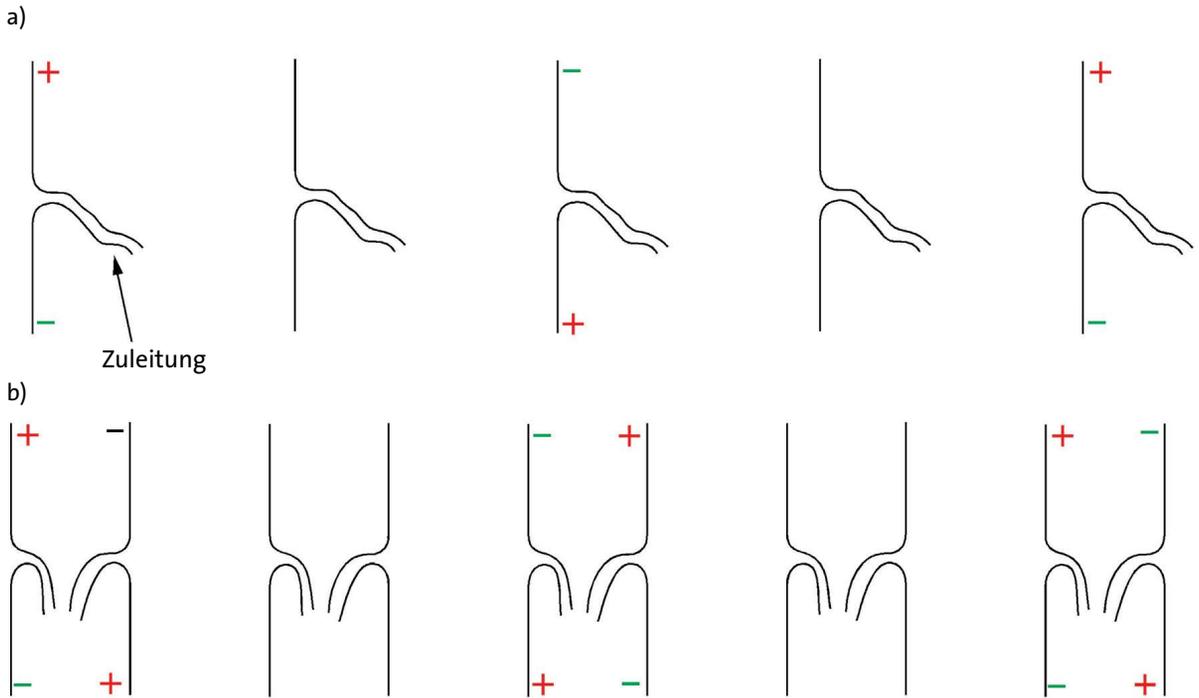
- Da das Atom beim Schwingen Energie abgibt, geht es nach und nach in den Zustand niedrigerer Energie über.
- Die Frequenz der Schwingung des Elektroniums ist gleich der Frequenz des emittierten Lichts.

Während des Übergangs eines Atoms aus einem Zustand höherer in einen Zustand niedrigerer Energie führt die elektrische Ladung des Elektroniums Schwingungen aus. Das Atom wirkt als Antenne. Die Schwingungsfrequenz ist gleich der Frequenz des emittierten Lichts.

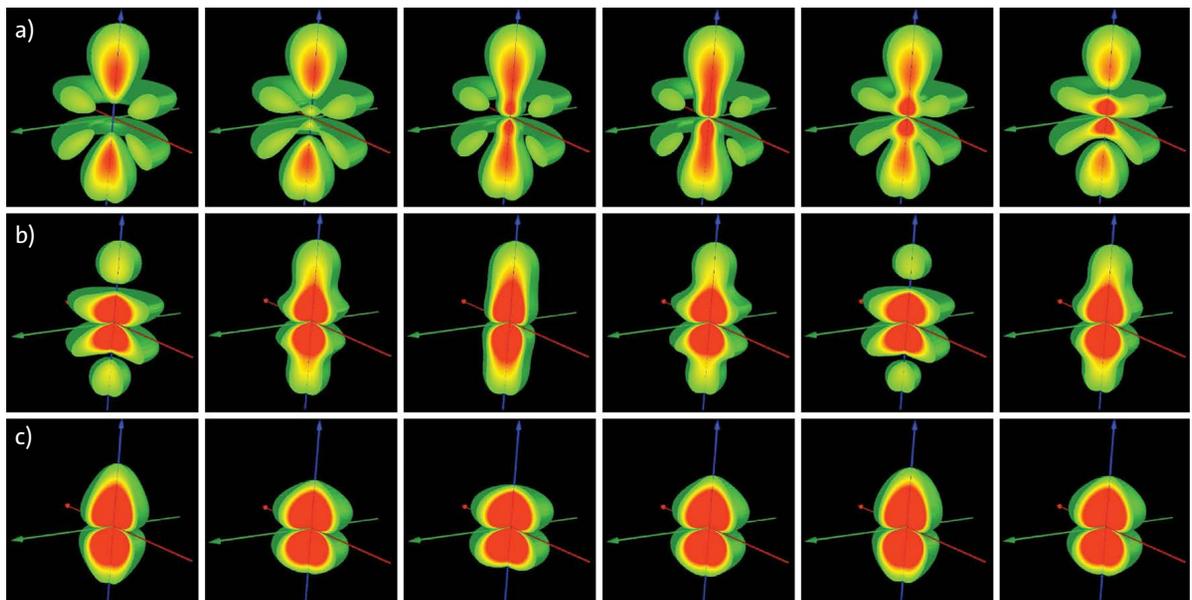


**Abb. 5.2** Übergang vom stationären Zustand (2/1/0) in den Grundzustand (1/0/0). Das Elektronium schwingt auf und ab. (a) Anfang, (b) Mitte, (c) Ende des Übergangs

## 5.1 Übergänge zwischen stationären Zuständen



**Abb. 5.3** (a) In einer Dipolantenne schwingt die elektrische Ladung auf und ab. (b) Eine Quadrupolantenne besteht aus zwei im Gegentakt schwingenden Dipolantennen.



**Abb. 5.4** Quadrupolübergang  $(4/3/0) \rightarrow (2/1/0)$ . Die obere und die untere Hälfte des Elektroniums schwingen gegeneinander.

## 5.3 Schnelle und langsame Übergänge

Ein typischer Übergang dauert etwa  $10^{-8}$  s. Es gibt aber auch Übergänge, die langsamer ablaufen, und es gibt welche, die so langsam gehen, dass man praktisch sagen kann, es finde gar kein Übergang mehr statt. Wie es kommt, dass manche Übergänge so langsam ablaufen, versteht man, wenn man sich die entsprechenden Videos ansieht. Abb. 5.4 zeigt einen Ausschnitt aus einem sehr langsamen Übergang. Auch hier schwingt die Ladungsverteilung. Allerdings ist die Bewegung nicht einfach ein Auf und Ab. Sie entspricht nicht der Schwingung einer Dipolantenne, sondern hat eine Ähnlichkeit mit der einer *Quadrupolantenne*.

Eine Quadrupolantenne erhält man, wenn man zwei im Gegentakt schwingende Dipolantennen dicht nebeneinander- oder übereinanderstellt, Abb. 5.3b. Dass eine solche Antenne nur schwach strahlt, ist verständlich: Das Feld, das die eine erzeugt, wird durch das Feld der anderen nahezu kompensiert. In Abb. 5.4 schwingt die obere Hälfte des Elektroniums im Gegentakt zur unteren. Man braucht sich also nicht zu wun-

dern, dass das Atom bei einem solchen Übergang nur schwach strahlt. Weil das Atom schwach strahlt, dauert es auch lange, bis es die Energie los ist, die zu dem Übergang gehört.

Schließlich gibt es Übergänge, bei denen das Elektronium noch weniger abstrahlt als eine Quadrupolantenne.

Bei verschiedenen Übergängen strahlt das Atom unterschiedlich stark.

Abb. 5.5 zeigt noch einmal die Energieleiter des Wasserstoffatoms, allerdings auf eine besondere Art dargestellt. Für Zustände mit unterschiedlicher Quantenzahl  $l$  wurden die Energieleiter getrennt nebeneinander gezeichnet. Außerdem sind die Dipolübergänge eingezeichnet, d. h. die Übergänge, bei denen das Atom stark strahlt.

Man sieht, dass sich bei diesen Übergängen die Quantenzahl  $l$  gerade um 1 ändert. Man sagt, für Dipolübergänge sei  $\Delta l = \pm 1$ .

Abb. 5.6 zeigt „Übergänge“, für die  $\Delta l = 0$  oder  $\Delta l = \pm 2$  ist. Sie finden nicht oder fast nicht statt.

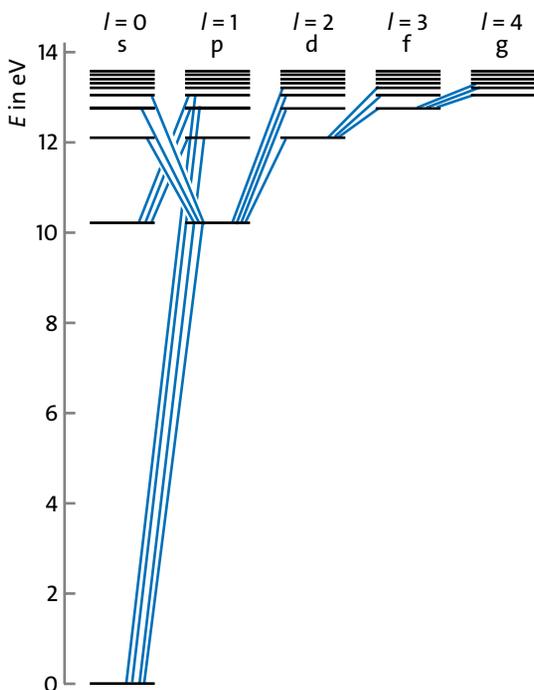


Abb. 5.5 Einige erlaubte Übergänge (Dipolübergänge) des Wasserstoffatoms.

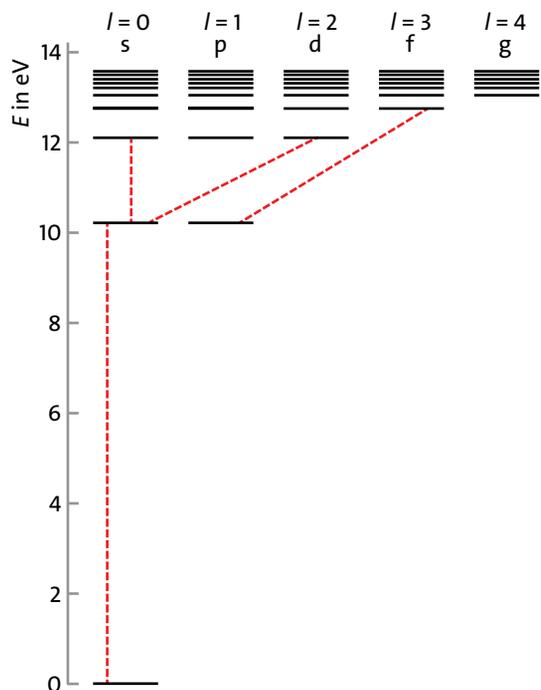
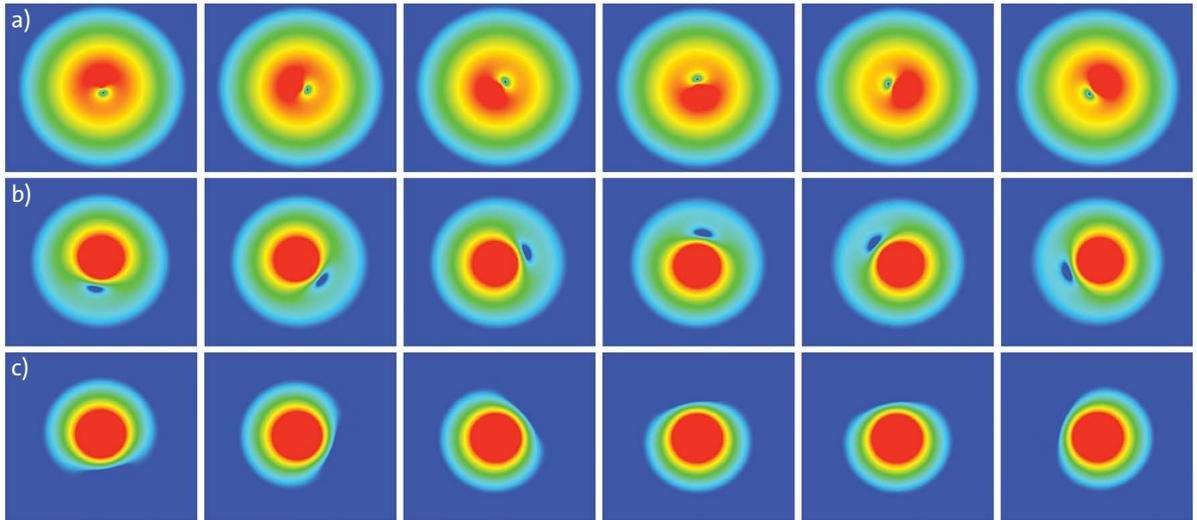


Abb. 5.6 Übergänge wie die gestrichelt gezeichneten finden nicht statt oder sind so schwach, dass man sie nicht beobachten kann.

### 5.3 Schnelle und langsame Übergänge



**Abb. 5.7** Übergang  $(2/1/1) \rightarrow (1/0/0)$ . Das Elektronium schwingt kreisförmig. (a) Anfang, (b) Mitte, (c) Ende des Übergangs

Für schnelle Übergänge ist  $\Delta l = \pm 1$ . Die anderen Übergänge sind sehr langsam oder finden gar nicht statt.

Als man die Emissionsspektren der Atome entdeckte, existierte die Quantentheorie noch nicht. Man stellte fest, dass manche Übergänge nicht stattfinden, wusste aber nicht, warum. Man sagte daher zunächst einfach, sie seien *verboten*. Diejenigen, die stattfinden, nannte man *erlaubte* Übergänge. Diese Bezeichnungen haben sich bis heute erhalten.

Ein interessanter Übergang ist noch in Abb. 5.7 dargestellt. Hier macht das Elektronium eine kreisförmige Bewegung. Das hat zur Folge, dass das emittierte Licht *zirkular polarisiert* ist: Die Spitze des elektrischen Feldstärkevektors an einer festen Stelle des Wellenfeldes macht keine Auf- und Abbewegung, wie wir es gewohnt sind, sondern sie rotiert um die Laufrichtung der Welle herum. ■

## 6 ATOME MIT MEHREREN ELEKTRONEN

### 6.1 Elektronenorbitale in größeren Atomen

Wir hatten eine Betrachtung darüber angestellt, wie man – in Gedanken – aus kleineren Atomen nach und nach größere aufbauen kann: immer abwechselnd ein Proton in den Kern und ein Elektron in die Hülle. Diesen Vorgang des Zusammensetzens eines größeren Atoms können wir nun genauer beschreiben, nachdem wir gesehen haben, welche Gestalt die Orbitale der Elektronen haben. Es tritt dabei nämlich eine recht einfache Systematik zutage.

Jedes der Elektronen in einem Atom muss sich in einem stationären Zustand befinden, anderenfalls würde das Atom strahlen und damit Energie abgeben – bis sich alle Elektronen in stationären Zuständen befinden. Wir sehen also: Jedes der Elektronen eines Atoms muss eines der Orbitale besetzen, die wir im vorigen Kapitel kennengelernt hatten. Dabei treten aber einige Besonderheiten auf.

Wir beginnen mit dem Wasserstoffatom im Grundzustand.

Das Elektron besetzt ein kugelsymmetrisches  $(1/0/0)$ -Orbital. Wir bringen nun in Gedanken ein zweites Proton in den Kern (und auch noch zwei Neutronen, die aber im Augenblick nicht interessieren). Das Orbital unseres Elektrons schrumpft dabei zusammen, behält aber seine kugelsymmetrische Gestalt. Wir geben dann ein zweites Elektron hinzu. Dieses besetzt nun wieder ein  $(1/0/0)$ -Orbital. Die Orbitale der beiden Elektronen haben dieselbe Gestalt und werden durch dieselbe Dichteverteilung beschrieben. Allerdings sind die neuen Orbitale beide wieder etwas größer geworden.

Bis hierher ist noch nichts Aufregendes passiert, oder wenigstens scheint es so.

Merkwürdig wird es erst, wenn wir eine dritte Elektronenportion hinzugeben (und ein drittes Proton), sodass wir ein Lithiumatom erhalten. Dieses Elektron nimmt nun nicht mehr das  $(1/0/0)$ -Orbital des Grundzustandes ein, sondern es besetzt ein  $(2/0/0)$ -Orbital, das zwar immer noch kugelsymmetrisch ist, sich aber vom  $(1/0/0)$ -Orbital deutlich unterscheidet. Es ist so, als gäbe es in dem  $(1/0/0)$ -Orbital des Grundzustandes keinen Platz mehr. Und tatsächlich ist das eine sehr allgemeine Regel:

Ein Orbital kann nur von zwei Elektronen besetzt werden.

Wir geben ein viertes Elektron (und ein viertes Proton) hinzu, sodass wir ein Berylliumatom erhalten. Das vierte Elektron besetzt dasselbe Orbital wie das dritte, nämlich das  $(2/0/0)$ -Orbital. Alle vier Atome – Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium – sind kugelsymmetrisch.

Erst wenn wir das fünfte Atom aufbauen, das Bor-Atom, kommt ein Orbital hinzu, das nicht mehr kugelsymmetrisch ist: ein  $(2/1/0)$ -Orbital. Das Bor-Atom ist deshalb auch nicht mehr kugelsymmetrisch. Allerdings ist die Abweichung von der Kugelgestalt gering, denn die vier besetzten Orbitale haben ja alle Kugelsymmetrie.

So kann man mit dem Aufbau der Atome weitermachen. Man gibt eine Portion Elektronen nach der anderen hinzu. Jede dieser Portionen besetzt im Atom ein bestimmtes Orbital oder in anderen Worten: Sie nimmt eine bestimmte Gestalt an. Die besetzten Orbitale fügen sich dabei wie die Bausteine eines Puzzles zusammen.

Beim Besetzen neuer Orbitale ergeben sich nun immer wieder Verteilungen, die exakt kugelsymmetrisch sind.

Wir wollen uns das an einem stark vereinfachenden Modell klarmachen, Abb. 6.1 Die drei Puzzleteile A, B und C passen so zusammen, dass sie insgesamt einen schwarzen Ring ergeben. Die Teile haben aber keinen scharfen Rand, wie es bei den Teilen eines normalen Puzzles der Fall wäre. Das heißt, man muss sie so legen, dass sie sich etwas überlappen. Dabei kommt Grau auf Grau, und zwar so, dass sich zusammen Schwarz ergibt.

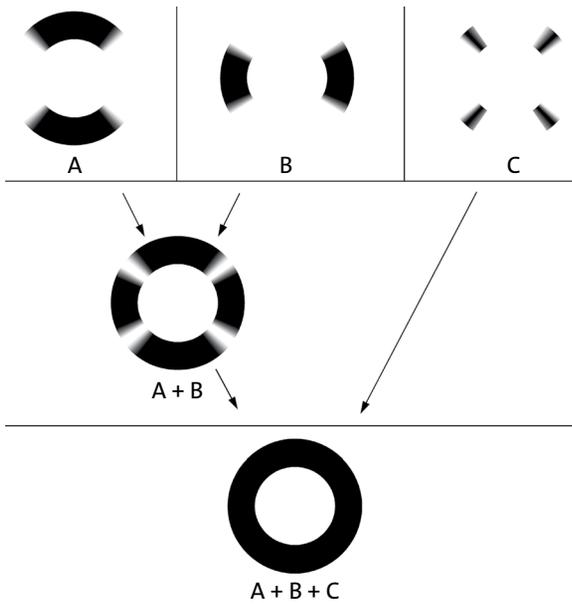
Ähnlich ist es bei den Elektronenorbitalen. Wenn sie sich überlagern, addieren sich die Elektronendichten, und beim Hinzufügen von neuen Orbitalen („Puzzleteilen“) entsteht irgendwann ein fertiges „Puzzle“.

Wenn man ein weiteres Elektron hinzufügt, beginnt ein neues Puzzle. Das neue Elektron ist nur schwach gebunden. Es lässt sich leicht vom Atom abtrennen.

Durch Hinzufügen weiterer Elektronen wird auch dieses Puzzle fertig und man kommt zum nächsten stabilen Atom. Und so geht es weiter.

Man sagt auch, die Orbitale, die zu einem dieser fertig gebauten Puzzles gehören, bilden eine *Schale*. Man kann sich ganz grob vorstellen, die Elektronen-

## 6.2 Der Spin



**Abb. 6.1** Puzzle mit unscharfen Rändern. Alle drei Teile A, B und C zusammengelegt ergeben einen schwarzen Ring. Dabei gilt: Grau + Grau = Schwarz (ebenso Hellgrau + Dunkelgrau = Schwarz etc.).

hülle werde schalenweise aufgebaut: eine Schale nach der anderen. Das *Schalenmodell* gibt eine grobe Orientierung. Man darf aber nicht vergessen, dass die Schalen (in radialer Richtung) keinen scharfen Rand haben. So wie die Orbitale, die zu einer Schale gehören, überlagern sie sich gegenseitig.

Abbildung 6.2 zeigt, wie aus 5 Orbitalen eine Schale entsteht.

Atome mit einer vollen Schale sind besonders stabil. Um ein Elektron, d.h. eine Elementarportion des Elektroniums, aus einem solchen stabilen Atom herauszulösen, braucht man besonders viel Energie. Zu

diesen stabilen kugelsymmetrischen Atomen gehören die Atome der Edelgase Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon.

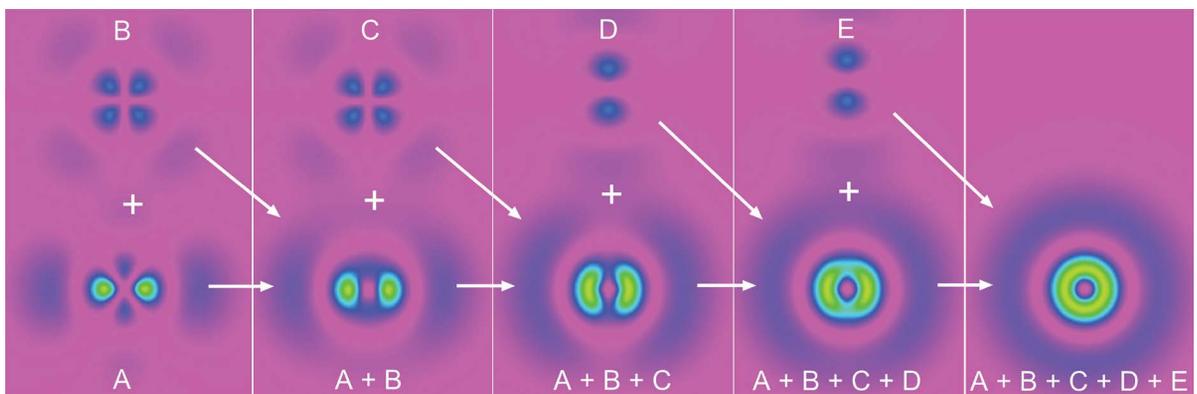
Die Schalenstruktur der Atomhülle ist der Grund dafür, dass sich die Eigenschaften der Atome mit der Anzahl der Elektronen periodisch wiederholen – wenigstens näherungsweise. Und darum ist es auch zweckmäßig, die Atome im *Periodensystem der Elemente* anzuordnen.

## 6.2 Der Spin

Die Regel, die wir gerade kennengelernt haben, scheint einen Schönheitsfehler zu haben. Einerseits sagt sie, dass die Elektronen eines Atoms verschiedene Orbitale besetzen müssen. Sie müssen damit durch verschiedene Psi-Funktionen beschrieben werden. Man kann auch sagen, dass sie sich in verschiedenen Zuständen befinden müssen. Andererseits scheint die Natur die Regel aber nicht ganz ernst zu nehmen: Es dürfen eben zwei Elektronen ein bestimmtes Orbital besetzen und nicht nur eines. Wir werden nun sehen, dass der Zustand eines Elektrons noch nicht eindeutig charakterisiert ist, wenn man nur das Orbital angibt.

Die Psi-Funktion enthält nämlich außer  $x, y, z$  noch eine weitere Variable: den Spin. Das Wort kommt vom Englischen *to spin* = drehen, kreiseln.

Die Spin-Variable  $s$  der Wellenfunktion kann nur zwei Werte annehmen. Wir können uns also vorstellen, die Spinvariable sei ein Parameter der Psi-Funktion, der nur einen von zwei Werten annehmen kann. Die physikalische Bedeutung der Größe  $s$  ist zunächst einfach. Sie sagt uns, dass das Elektron einen Drehimpuls hat, und zwar zusätzlich zum Bahndrehimpuls,



**Abb. 6.2** Aufbau einer Schale aus Orbitalen A, B, C, D und E. Die Orbitale B und C sehen im Bild gleich aus, sie unterscheiden sich aber in der Stromrichtung; ebenso die Orbitale D und E. Die komplette Schale – rechts – ist kugelsymmetrisch.

den wir schon angesprochen hatten und der mit der Strömung des Elektroniums um den Kern herum zu tun hat. Der *Spin-Drehimpuls* kann nur einen von zwei Werten annehmen, nämlich  $+h/4\pi$  und  $-h/4\pi$ . Die Werte unterscheiden sich gerade um ein Drehimpulsquantum  $h/2\pi$ .

Was kann man sich aber unter dem Spin-Drehimpuls vorstellen? Zu was für einer Drehbewegung gehört er?

Das Elektronium scheint noch eine andere Drehmöglichkeit zu haben als die Kreisströmung um den Kern herum. Du kannst es dir vorstellen als eine Art Eigendrehung an jeder Stelle des Elektroniums, Abb. 6.2. Aber Achtung! Dieses Bild stellt ein Modell dar – aber kein besonders gutes. Wenn es dir nicht einleuchtet, kannst du dich damit trösten, dass du in guter Gesellschaft bist. Auch professionelle Physikerinnen und Physiker haben ihre Probleme mit einer anschaulichen Deutung des Spins.

Was bringt uns nun der Spin? Wir kommen zurück zu unserem alten Problem: Wir wollen ein Atom nach und nach aufbauen, indem wir ein Elektron nach dem anderen zur Atomhülle hinzutun (und die entsprechende Zahl von Protonen zum Kern). Die beiden Elektronen des Heliumatoms, die beide ein  $(1/0/0)$ -Orbital besetzen, befinden sich nicht im selben Zustand, sie unterscheiden sich im Spin; ähnlich ist es für alle höheren Atome. Während wir zunächst geschlossen hatten, dass ein Orbital von zwei Elektronen besetzt werden kann, so können wir jetzt sagen, dass sich alle Elektronen in verschiedenen Zuständen befinden

müssen. Ein Zustand ist dabei charakterisiert durch das Orbital und durch den Spin.

Die Elektronen eines Atoms befinden sich in verschiedenen Zuständen. Zwei Elektronen, die dasselbe Orbital besetzen, unterscheiden sich im Spin.

## 6.3 Noch einmal die Psi-Funktion

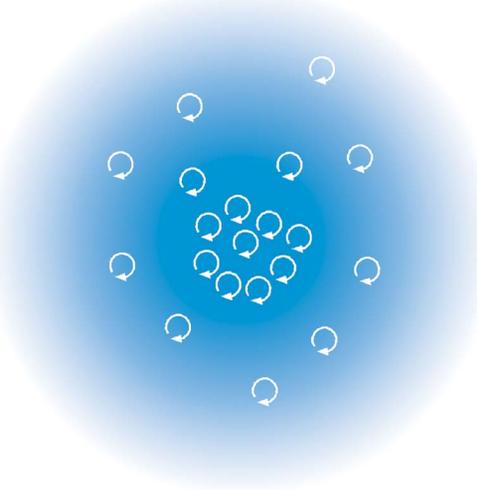
Wir haben den Aufbau von Atomen mit mehreren Elektronen beschrieben, indem wir angegeben haben, welche Orbitale besetzt sind. So bekommt man einen guten Überblick. Aber das Verfahren ist nicht sehr genau, denn in dem Maße, wie neue Orbitale besetzt werden, verändern oder verformen sich die alten, und auch die neu besetzten haben nicht exakt die gleiche Gestalt wie die Wasserstofforbitale.

Wenn man am exakten Aussehen der Elektronenhülle interessiert ist, muss man sich wieder der Theorie anvertrauen, d. h. unserer mathematischen Mühle. Diese hat es jetzt allerdings wesentlich schwerer. Wir betrachten das Heliumatom, d. h. das Zweiteinfachste nach dem Wasserstoffatom. Die Psi-Funktionen, die Mühle 1 liefert, haben jetzt die folgende Form:

$$\psi_i(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2).$$

Der Index  $i$  ist dazu da, die verschiedenen Funktionen durchnummerieren, denn wie beim Wasserstoffatom bekommen wir mehrere oder viele Ergebnisse, die den verschiedenen stationären Zuständen des Atoms entsprechen.

Was kann man sich aber unter einer solchen Funktion vorstellen? Sie ordnet einen Funktionswert nicht einem Raumpunkt zu, sondern zwei Raumpunkten. Wir geben die Werte von sechs unabhängigen Variablen vor und erhalten einen Funktionswert. Mathematisch kann man das so ausdrücken: Zu jedem Punkt in einem sechsdimensionalen Raum gehört ein Wert der Psi-Funktion. Beim Lithiumatom ist der Raum neundimensional, beim Bor zwölfdimensional, beim Sauerstoff 24-dimensional, beim Blei 246-dimensional usw. Eine anschauliche Vorstellung von solchen Funktionen wird man sich kaum machen können. Glücklicherweise hat aber unsere Mühle 2 keine Probleme mit der Verarbeitung dieser Funktionen, und sie liefert uns wieder Ergebnisse, die wir gut verstehen können: Sie liefert die Elektroniumdichte, die Stromdichte, Werte von Energie, Impuls, Drehimpuls usw. ■



**Abb. 6.3** Ein nicht sehr gutes Modell für eine Drehbewegung, die zum Spin-Drehimpuls gehört: Das Elektronium bildet sehr viele kleine Wirbel.

## 7 SPEKTREN

### 7.1 Die Anregung von Atomen mit Licht

Wenn man ein Atom mit einem Photon anregen will, muss die Energie des Photons genau gleich der Energie sein, die das Atom braucht, um aus dem Grundzustand in den Anregungszustand zu gelangen. Hat das Photon weniger Energie, so kann das Atom nicht angeregt werden, weil die Energie nicht ausreicht. Hat das Photon mehr Energie, ist die Anregung aber auch nicht möglich.

Wir beschreiben ein konkretes Experiment. Als anzuregende Atome nehmen wir Natriumatome. Mit Natrium lässt sich besonders gut beobachten, was passiert. Natrium ist normalerweise ein fester Stoff. Durch Erhitzen kann man aber Natriumdampf herstellen.

Die Photonen beschaffen wir uns mit einer Lampe, die einen Strahl weißen Lichts erzeugt, also ein Gemisch von Licht mit Wellenlängen von 400 bis 800 nm. Das bedeutet, dass wir ein Gemisch von Photonen verschiedenster Energien haben.

Der Lichtstrahl aus der Lampe wird auf das Natriumgas geschickt, Abb. 7.1. Der größte Teil der Photonen hat nun eine Energie, die keiner Anregung entspricht. Diese Photonen fliegen unbehelligt von den Atomen durch das Gas hindurch. Nur ein sehr kleiner Bruchteil der Photonen hat eine passende Energie, und nur diese werden von den Atomen absorbiert. Die Atome gehen in einen Anregungszustand über.

Die absorbierten Photonen fehlen nach dem Durchlaufen des Gases im Lichtstrahl. Da es sich aber nur um einen sehr geringen Teil des Lichts handelt, merkt man dem Licht zunächst nichts an. Wir wollen es daher, nachdem es das Natriumgas durchlaufen hat,

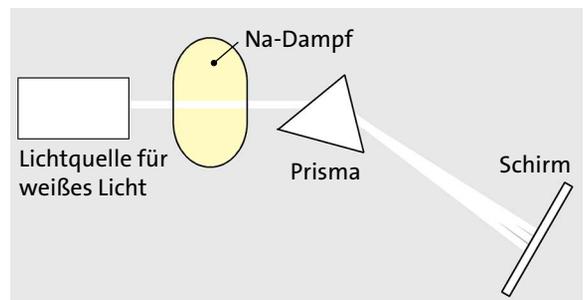


Abb. 7.1 Licht einer Glühlampe durchläuft Natriumgas und wird danach spektral zerlegt.

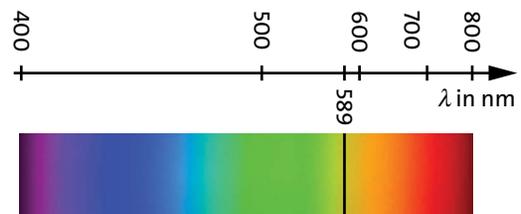


Abb. 7.2 Im Spektrum fehlt Licht der Wellenlänge 589 nm.

genauer untersuchen: Wir machen eine spektrale Zerlegung.

Wir lassen einen dünnen Strahl des Lichts, das das Natriumgas durchlaufen hat, auf ein Prisma fallen. Hinter dem Prisma wird in größerer Entfernung ein weißer Schirm aufgestellt. Das Licht trifft nun, nach Wellenlängen sortiert, auf diesen Schirm. Da Licht unterschiedlicher Wellenlänge in unseren Augen unterschiedliche Farbeindrücke hervorruft, sieht man auf dem Schirm die Farben des Regenbogens.

Wenn man nun sehr genau hinschaut, stellt man fest, dass der Schirm an einer bestimmten Stelle im Be-

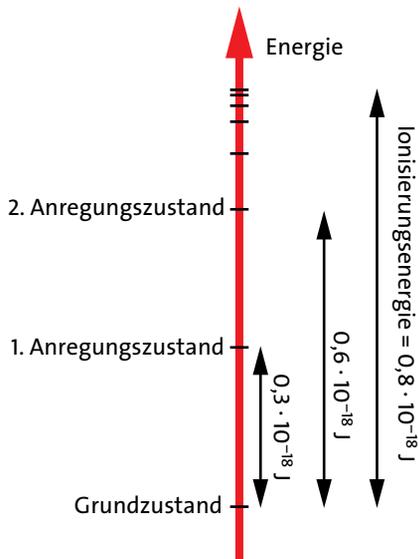
reich des gelben Lichts dunkel bleibt, Abb. 7.2: Es fehlt das Licht, dessen Photonen von den Natriumatomen absorbiert worden sind. Mit einem *Spektrometer* findet man auch die Wellenlänge des fehlenden Lichts:  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .

Daraus kann man die Energie der absorbierten Photonen berechnen:

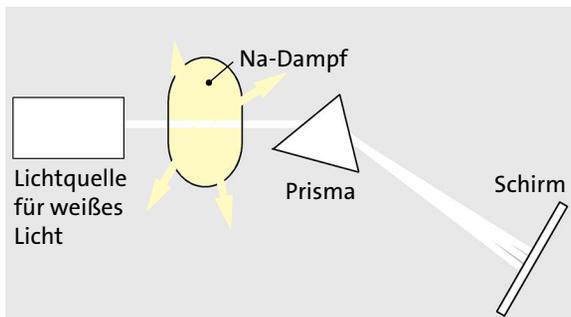
$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{589 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}.$$

Das ist zugleich die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem niedrigsten Anregungszustand der Natriumatome.

Photonen der Energie  $E = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$  sind nicht die Einzigen, die von den Natriumatomen absorbiert werden. Die Natriumatome können in noch viele an-



**Abb. 7.3** Energien der Anregungszustände des Natriumatoms



**Abb. 7.4** Das angeregte Natrium strahlt nach allen Seiten.

dere Anregungszustände gebracht werden. Deshalb gibt es auch weitere Photonensorten, die absorbiert werden können. Die Energien dieser Photonen sind größer als die der zuvor betrachteten, die Wellenlängen kleiner.

So absorbieren Natriumatome beispielsweise auch Photonen mit einer Energie von  $0,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ , Abb. 7.3. Das entspricht einer Wellenlänge von  $330 \text{ nm}$ ; es handelt sich also um ultraviolettes Licht.

Wir fassen zusammen:

Photonen mit passender Energie können Atome anregen. Die Photonen werden dabei absorbiert.

Wir haben gesehen, dass die meisten Photonen des sichtbaren Lichts von den Natriumatomen nicht absorbiert werden. Dasselbe gilt für alle anderen gasförmigen Stoffe. Ihre Atome bzw. Moleküle absorbieren nur sehr wenige oder gar keine sichtbaren Photonen. Das erklärt eine Eigenschaft von Gasen, die du gut kennst:

Gase sind durchsichtig.

Beim Rückgang eines angeregten Natriumatoms in den Grundzustand wird ein Photon emittiert. Dass dies tatsächlich der Fall ist, können wir an dem gerade beschriebenen Experiment sehen. Wenn man den durchstrahlten Natriumgasbehälter genau betrachtet, sieht man ein schwach gelbliches Leuchten. Eine Untersuchung des Lichts mit dem Spektrometer zeigt, dass es dieselbe Wellenlänge hat wie das Licht, das auf dem Schirm fehlt. Die Natriumatome geben also die Energie, die sie bei der Absorption eines Photons bekommen, wieder ab, indem sie ein gleichartiges Photon erzeugen.

Die Emission geschieht aber nicht nur in die Richtung, in die sich die absorbierten Photonen bewegt haben, sondern nach allen Seiten, Abb. 7.4. Deshalb fehlen die Photonen, die der Anregung entsprechen, in dem durchlaufenden Strahl fast vollständig.

### Aufgaben

1. Natriumatome können mit Licht der Wellenlänge  $\lambda = 285 \text{ nm}$  vom Grundzustand in den dritten Anregungszustand gebracht werden. Berechne die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem dritten Anregungszustand.
2. Welche Wellenlänge darf Licht, mit dem man Natriumatome ionisieren möchte, höchstens haben? Um was für Licht handelt es sich dabei?

## 7.2 Die Anregung von Atomen mit Elektronen

Zur Anregung von Atomen kann man außer Photonen auch andere Teilchen verwenden, z. B. Elektronen, Ionen, Protonen, Atome und Moleküle. Da sehr häufig Elektronen benutzt werden, befassen wir uns nun mit dieser Möglichkeit.

Damit ein Elektron ein Atom anregen kann, braucht es – zusätzlich zu seiner Ruhenergie – diejenige Energiemenge, die für die Anregung erforderlich ist. Man kann nun die Energie eines Elektrons erhöhen, indem man es in schnelle Bewegung versetzt, d. h. mit Impuls lädt, denn zusammen mit dem Impuls bekommt es auch Energie. Dieses Laden des Elektrons mit Impuls und Energie ist nicht schwierig.

Man bringt die Elektronen in ein elektrisches Feld. Da Elektronen elektrische Ladung tragen, zieht das Feld an ihnen. Impuls und Energie der Elektronen nehmen zu. Wenn solche schnellen Elektronen auf Atome treffen, werden die Atome verformt und können in einen Anregungszustand übergehen.

Hat das Elektron mehr Energie bekommen als für eine Anregung nötig ist, nimmt es die überschüssige Energie nach der Anregung wieder mit. Es unterscheidet sich also in dieser Hinsicht von den Photonen. Die Photonen verschwinden ja bei der Anregung. Es gibt deshalb auch niemanden, der die übrige Energie aufnehmen kann.

Atome können mit schnellen Elektronen angeregt werden.

Wenn die Energie des Elektrons groß genug ist, kann es das Atom ionisieren.

## 7.3 Gase als Lichtquellen

Eine häufig verwendete künstliche Lichtquelle ist die *Leuchtröhre*, nicht zu verwechseln mit der *Leuchtstoffröhre*.

In einer Glühlampe leuchtet ein Metalldraht, der durch einen elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird. In einer Leuchtröhre leuchtet ein Gas. Wie das Gas zum Leuchten gebracht wird, können wir uns mithilfe unserer Kenntnisse über die Anregung von Atomen klar machen.

Das Gas befindet sich in einer geschlossenen Glasröhre. An jedem Ende der Glasröhre ist eine Metallelektrode angebracht, Abb. 7.5. Eine der Elektroden befindet sich auf niedrigem, die andere auf hohem elektrischem Potenzial. Die Elektrode mit dem niedrigen Potenzial wird außerdem erhitzt. Das hat zur Folge, dass sie Elektronen abgibt. (Auch feste Stoffe bestehen zum großen Teil aus Elektronium. Durch Erhitzen kann das Elektronium so stark verformt werden, dass sich Elektronen vom Feststoff ablösen.) Da die Elektronen negativ geladen sind, werden sie von dem elektrischen Feld zwischen den beiden Metallelektroden zur Elektrode mit dem hohen Potenzial gezogen.

Auf dem Weg dorthin treffen sie auf Atome. Dabei passiert zweierlei:

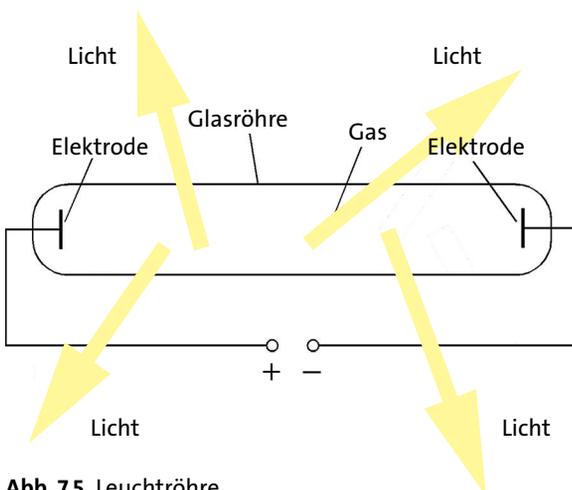


Abb. 7.5 Leuchtröhre

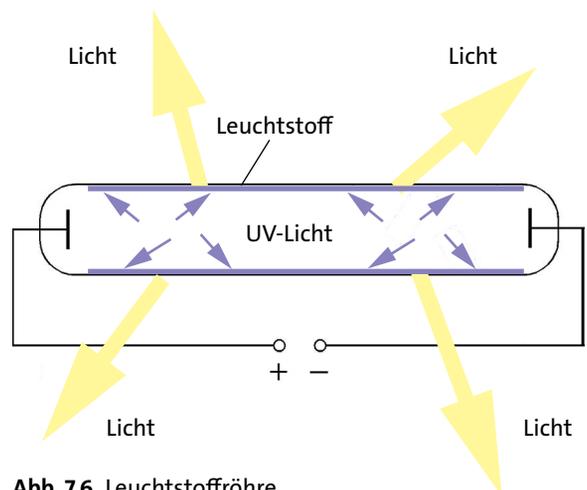


Abb. 7.6 Leuchtstoffröhre

1. Atome, die von schnellen Elektronen getroffen werden, werden ionisiert, d.h., es entstehen weitere Elektronen.

2. Atome, die von langsameren Elektronen getroffen werden, werden angeregt.

Die zusätzlichen Elektronen, die man im Fall 1 erhält, werden wiederum vom Feld beschleunigt, können weitere Atome ionisieren usw. Ausgehend von den Elektronen, die die Metallelektrode abgibt, werden also in der ganzen Leuchtöhre große Mengen freier Elektronen erzeugt.

Dadurch nimmt auch die Häufigkeit von Prozess 2 zu, d.h. es werden Atome durch den Aufprall von Elektronen angeregt. Die angeregten Atome emittieren beim Rückgang in den Grundzustand Photonen: Das Gas leuchtet.

In Leuchtöhren werden Atome mit Elektronen angeregt. Beim Rückgang in den Grundzustand emittieren die Atome Photonen.

Fußgängerüberwege, Tunnels und Straßenkreuzungen werden häufig mit Leuchtöhren beleuchtet, die Natriumdampf enthalten. Da Natriumatome „gelbe“ Photonen emittieren, entsteht das typische gelbe Licht der Natriumlampen.

Verglichen mit anderen Leuchtöhren verbrauchen Natriumlampen am wenigsten Energie. Der Nachteil dieser Lampen ist ihr Spektrum. Da sie nur Licht einer einzigen Wellenlänge emittieren, erscheinen die von ihnen beleuchteten Gegenstände alle in derselben Farbe: Alles erscheint in einem mehr oder weniger hellen Gelb. Um diesen Effekt abzuschwächen, enthalten die Lampen oft noch Zusätze von anderen Gasen, die Licht anderer Wellenlängen emittieren. Dadurch wird die Farbwiedergabe verbessert.

Ein etwas anderer Typ von Lichtquellen sind die *Leuchtstofföhren*. Du kennst sie gut, denn sicher werden sie auch in deiner Schule zur Beleuchtung der Klassenzimmer benutzt. Auch Energiesparlampen sind Leuchtstofföhren.

Das Gas, das hier mit Elektronen angeregt wird, ist Quecksilberdampf. Die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem ersten Anregungszustand ist etwa  $0,8 \cdot 10^{-18}$  J. Photonen dieser Energie entsprechen Licht mit einer Wellenlänge von etwa 250 nm. Der Quecksilberdampf emittiert also zunächst unsichtbares UV-Licht. Die Glasöhre, in der sich das Quecksilber befindet, ist aber auf der Innenseite mit einem weißen Stoff, dem *Leuchtstoff*, beschichtet. Das vom Quecksilber emittierte UV-Licht reagiert mit

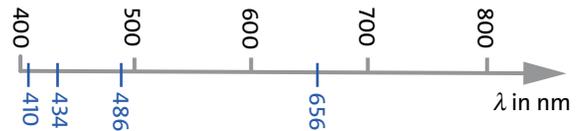


Abb. 7.7 Emissionsspektrum des Wasserstoffs

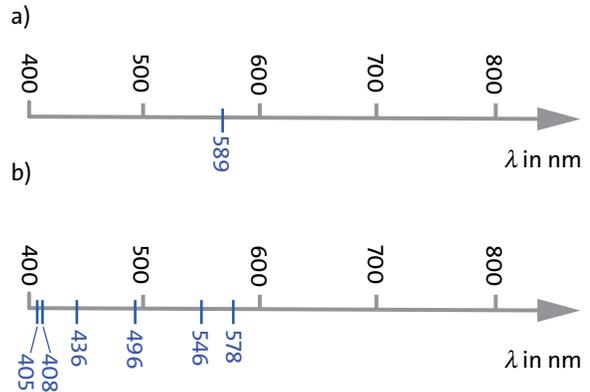


Abb. 7.8 Emissionsspektren von Natrium (a) und Quecksilber (b)

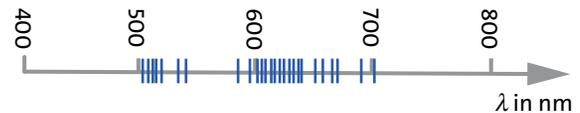


Abb. 7.9 Emissionsspektrum von Neon

dem Leuchtstoff und dabei entsteht das gewünschte sichtbare Licht, Abb. 7.6.

Der Hauptvorteil dieser Lampen gegenüber den Glühlampen ist ihr geringer Energiebedarf. Eine gewöhnliche Glühlampe benötigt vier bis fünfmal so viel Energie wie eine Leuchtstofföhre, um dieselbe Lichtmenge zu erzeugen. Außerdem ist die Lebensdauer der Leuchtstofföhren höher.

## 7.4 Die Spektren von Gasen

In einer Leuchtöhre werden die Atome nicht nur in den ersten angeregten Zustand befördert, sondern auch in höher angeregte Zustände.

Für den Rückgang aus einem höher angeregten Zustand in den Grundzustand hat das Atom, wie wir schon gesehen hatten, verschiedene Möglichkeiten. Es kann direkt in den Grundzustand zurückgehen oder es kann etappenweise hinuntersteigen.

## 7.5 Warum Flammen leuchten.

Daher können angeregte Atome viele unterschiedliche Photonen emittieren, und daher besteht das Licht, das von einer Leuchtröhre abgestrahlt wird, aus einem Gemisch von Lichtsorten mit unterschiedlichen Wellenlängen.

Abb. 7.7 stellt das Emissionsspektrum von Wasserstoff dar, allerdings nicht vollständig. Um das gesamte Spektrum des von Wasserstoff emittierten Lichts aufzutragen, müsste man die Wellenlängenskala erweitern, da Wasserstoff auch Licht im UV- und im Infrarotbereich ausstrahlt.

Das Emissionsspektrum von Natriumdampf für den Wellenlängenbereich von 400 bis 800 nm kennen wir bereits: Natrium emittiert hier nur eine einzige Lichtsorte, Abb. 7.8a.

Dass Quecksilberdampf vorwiegend UV-Licht emittiert, haben wir schon im vorigen Abschnitt erwähnt. Wie man in Abb. 7.8b sieht, emittiert Quecksilber aber auch im sichtbaren Bereich. Man findet Licht der Wellenlängen 405 nm, 408 nm, 436 nm (alle violett), 496 nm (türkis), 546 nm und 578 nm (beide gelb). Dieses Lichtgemisch nehmen wir als blaugrünes Licht wahr.

Das Spektrum der für die Werbung benutzten rötlich leuchtenden Neonröhren zeigt Abb. 7.9. Andersfarbige Werbeleuchtröhren erhält man durch Verwendung von anderen Gasen oder von Gasgemischen.

Ein Vergleich der Abbildungen 7.7, 7.8 und 7.9 zeigt, dass man die Spektren verschiedener Gase leicht voneinander unterscheiden kann. Das Spektrum ist ein sehr charakteristisches Erkennungsmerkmal, so etwas wie ein „Fingerabdruck“ des Gases.

Jedes Gas emittiert Licht mit bestimmten, für das Gas charakteristischen Wellenlängen. Die Spektren von Gasen sind deshalb leicht voneinander zu unterscheiden.

Tatsächlich wird die *Spektralanalyse* in der Chemie viel verwendet, um Stoffe zu identifizieren. Dabei werden die Atome des zu untersuchenden Stoffs oder Stoffgemischs angeregt und das emittierte Licht wird mit einem Spektrometer untersucht.

Ein etwas anderes Verfahren der Spektralanalyse ist die Untersuchung des *Absorptionsspektrums* eines Stoffs. Dabei schickt man Licht aus einem breiten Wellenlängenbereich durch das Gas und schaut mit dem Spektrometer nach, welche Wellenlängen im Spektrum fehlen. Da die Atome die gleichen Photonen absorbieren, die sie auch emittieren, liefert das Absorptionsspektrum die gleichen Daten wie das Emissionsspektrum.

Eine besonders wichtige Rolle spielt die Spektralanalyse in der Astrophysik. Die Sterne sind viel zu weit entfernt, als dass man einfach hinfliegen und Stoffproben entnehmen könnte. Wozu wir dagegen Zugang haben, ist die von den Sternen emittierte elektromagnetische Strahlung. So kann man aus dem Fehlen von Licht bestimmter Wellenlängen im sichtbaren Teil des Sonnenlichts auf die stoffliche Zusammensetzung der Gashülle der Sonne schließen: Die Atome in der Hülle absorbieren Photonen des von der Sonne erzeugten weißen Lichts. Es handelt sich also um das Absorptionsspektrum der Sonnenhülle.

Alle Kenntnisse, die wir über die zeitliche Entwicklung und die stoffliche Zusammensetzung von Sternen haben, entstammen der spektroskopischen Untersuchung ihrer Strahlung. Dabei wird natürlich nicht nur der sichtbare Teil der Strahlung untersucht, sondern auch Strahlung aller anderen Wellenlängenbereiche, von den Radiowellen bis zur Gammastrahlung.

## 7.5 Warum Flammen leuchten

Die Flamme einer Kerze, eines Feuerzeugs, eines Holzfeuers oder eines Bunsenbrenners bei gedrosselter Luftzufuhr leuchtet kräftig gelblich. Wenn man die Luftzufuhr des Bunsenbrenners öffnet, sodass die Flamme rauschend brennt, verschwindet das gelbliche Leuchten. Die Flamme leuchtet dann nur noch schwach bläulich, ähnlich wie die Flammen eines Gasherds. Eine Wasserstoffflamme leuchtet fast gar nicht. Bringt man aber etwas Natrium (auch Kochsalz) oder Lithium in die Wasserstoffflamme, so leuchtet sie kräftig gelb bzw. rot auf. Wie kommt das unterschiedliche Leuchten der verschiedenen Flammen zustande?

Die Atome und Moleküle eines Gases fliegen mit hoher Geschwindigkeit kreuz und quer durch die Gegend und prallen dabei immer wieder gegeneinander. Beim Zusammenstoß der Atome oder Moleküle verformen sich die Atomhüllen. Normalerweise reicht die Energie nicht aus, um eine Anregung zu verursachen. Beim Erhitzen der Gase werden die Atome schneller; ihre Energie nimmt zu. Bei einer hinreichend hohen Temperatur können schließlich Anregungen stattfinden.

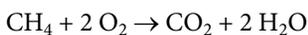
Bei vielen Gasen, z. B. bei Wasserstoff und den sonstigen in einer Wasserstoffflamme enthaltenen Gasen wie Sauerstoff und Stickstoff, braucht man allerdings relativ viel Energie, um die Atome bzw. Moleküle so anzuregen, dass sie sichtbare Photonen emittieren. Die hierfür nötige Temperatur wird in der Flamme

nicht erreicht; deshalb leuchtet eine Wasserstoffflamme nicht.

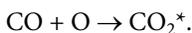
Die Energie der Atome und Moleküle in der Flamme reicht aber aus, um etwa die Atome von Lithium oder von Natrium in den ersten Anregungszustand zu bringen. Wenn man also etwas Lithium in eine Wasserstoffflamme bringt, so werden dessen Atome in den ersten Anregungszustand gebracht und sie emittieren beim Rückgang in den Grundzustand „rote“ Photonen: Die Flamme leuchtet rot. Entsprechend leuchtet die Flamme gelb, wenn man etwas Kochsalz, und damit Natrium, in die Flamme bringt. Durch Untersuchen des emittierten Lichts mit einem Spektrometer kann man feststellen, welcher Stoff in der Flamme leuchtet.

Atome können durch den Zusammenstoß mit anderen Atomen oder Molekülen, z. B. in einer Flamme, angeregt werden.

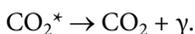
Das schwache bläuliche Licht, das eine Bunsenbrennerflamme bei genügender Sauerstoffzufuhr aussendet, stammt von  $\text{CO}_2$ -Molekülen, die aus angeregten Zuständen in den Grundzustand übergehen. Die  $\text{CO}_2$ -Moleküle werden hier aber nicht durch Zusammenstöße mit anderen Atomen oder Molekülen angeregt. In der Bunsenbrennerflamme verbrennen Kohlenwasserstoffe (überwiegend Methan,  $\text{CH}_4$ ) zu Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Die Gesamtreaktion



läuft in mehreren Schritten ab. Einer dieser Schritte ist die Verbrennung von Kohlenstoffmonooxid:



Bei dieser Reaktion entsteht Kohlenstoffdioxid in einem angeregten Zustand. Beim Rückgang in den Grundzustand emittieren die  $\text{CO}_2^*$ -Moleküle Photonen:



Diese Photonen bilden das bläuliche Licht der Flammen von Bunsenbrennern und Gasherden.

Bei chemischen Reaktionen können angeregte Atome und Moleküle entstehen.

Nach demselben Prinzip erzeugen Glühwürmchen das Licht, das sie aussenden. Ein Glühwürmchen glüht

nicht, wie ein Stück heißes Eisen glüht; vielmehr laufen im Hinterleib eines Glühwürmchens chemische Reaktionen ab, bei denen angeregte Moleküle entstehen, die dann sichtbare Photonen emittieren.

Wenn man die Luftzufuhr eines Bunsenbrenners drosselt, steht nicht genug Sauerstoff für die vollständige Oxidation zur Verfügung. Es bleiben Kohlenstoffatome übrig, die sich zu Kohlenstoffkörnchen zusammenschließen. Diese Körnchen sind die Bestandteile des Rußes. Wegen der hohen Temperaturen in der Flamme *glühen* die Rußkörnchen, d. h., sie senden Licht aus.

Das relativ kräftige gelbliche Leuchten der Flamme eines gedrosselten Bunsenbrenners, einer Kerze oder eines Feuerzeugs kommt also nicht von den beteiligten Gasen, sondern von glühenden Rußteilchen. Deshalb ähnelt das Spektrum dieser Flammen dem einer Glühlampe: Das ausgesandte Licht setzt sich aus Licht aller Wellenlängen von 400 bis 800 nm zusammen. Wie das Glühen zustande kommt, werden wir später untersuchen. ■

## 8 FESTE STOFFE

Bevor wir uns mit den festen Stoffen beschäftigen, tragen wir zusammen, worin die wesentlichen Unterschiede in der Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen bestehen und welche Gemeinsamkeiten es gibt.

### 8.1 Die Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen

Die Atome oder Moleküle eines Gases fliegen kreuz und quer in der Gegend herum – je höher die Temperatur, desto schneller. Dabei prallen sie zwar immer wieder gegeneinander, die meiste Zeit sind sie aber weit voneinander entfernt.

Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen dagegen liegen die Atome dicht an dicht, ähnlich wie Tennisbälle in einem Korb.

Es gibt zwei Möglichkeiten, Tennisbälle dicht zusammenzupacken. Sie können entweder regelmäßig aufgeschichtet werden, Abb. 8.1, oder sie können ungeordnet neben- und übereinandergelegt werden, Abb. 8.2. Dasselbe gilt für die Atome in Flüssigkeiten und Feststoffen.

In Feststoffen sind die Atome meist regelmäßig angeordnet. Man nennt solche Stoffe *kristalline* Feststoffe oder Kristalle. Metalle, die meisten Gesteinsarten, Salz, Zucker, Schwefel und Diamant sind kristallin.

Es gibt aber auch viele Feststoffe, bei denen die Anordnung der Atome mehr Ähnlichkeit mit der der Tennisbälle in Abb. 8.2 hat, z. B. Glas und die meisten Kunststoffe. Die Struktur solcher Stoffe nennt man *amorph*.

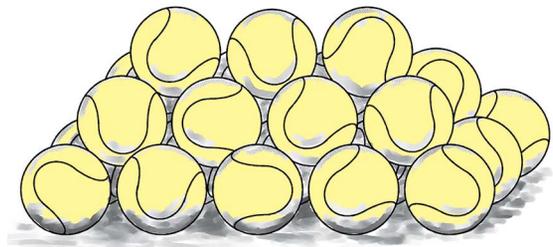


Abb. 8.1 Tennisbälle können regelmäßig gestapelt werden ...

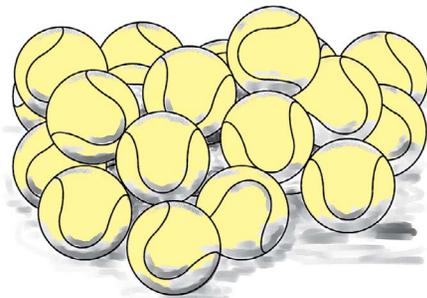


Abb. 8.2 ... oder durcheinander liegen.

Bei Flüssigkeiten ist die amorphe Struktur die Regel. Fast alle Flüssigkeiten sind amorph, auch die weitaus häufigste Flüssigkeit, nämlich das Wasser. Kristalline Flüssigkeiten verwendet man in Flüssigkristallanzeigen von Taschenrechnern und Flachbildschirmen. Du kennst vielleicht die Abkürzung LCD für den englischen Namen *liquid crystal display*.

Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über die Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei der Anordnung der Atome oder Moleküle in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen.

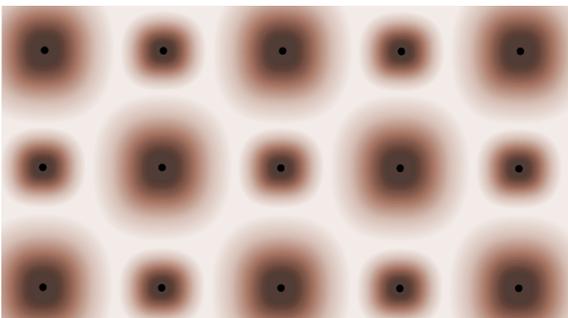
## 8.2 Die Verteilung des Elektroniums in festen Stoffen

Abbildung 8.3 zeigt, wie man sich das Innere eines Feststoffs, in diesem Fall eines Kristalls, vorstellen kann. Je dunkler der Grauton in der Abbildung, desto höher ist die Dichte des Elektroniums. An den Stellen maximaler Dichte befinden sich die Atomkerne. Mit zunehmendem Abstand von einem Kern nimmt die Dichte des Elektroniums zunächst ab – bis man in die Nähe des nächsten Kerns kommt. Dann nimmt sie wieder zu.

Wie bei einzelnen Atomen befindet sich der größte Teil des Elektroniums in der Nähe der Kerne. Es gibt keine Hohlräume zwischen den einzelnen Atomen wie bei der Pyramide aus Tennisbällen in Abb. 8.1. Der ganze Raum zwischen den Kernen ist mit Elektronium ausgefüllt. Auch existiert keine eindeutige Grenze zwischen den Atomen. Das Elektronium aller Atome ist zu einem durchgehenden „See“ verschmolzen.

Abb. 8.4 zeigt die berechnete Verteilung des Elektroniums in einem Feststoff, und zwar in einem Kochsalzkristall, NaCl. Die Dichte des Elektroniums ist hier durch Linien konstanter Dichte dargestellt. Je größer die Zahl in der Abbildung, desto höher ist die Dichte des Elektroniums am Ort der Linie. Man kann diese Linien mit den Höhenlinien auf einer Landkarte vergleichen. Je größer die Zahl, die an einer Höhenlinie steht, desto höher liegen die entsprechenden Stellen in der Landschaft.

In Abb. 8.4 erkennt man vier Bereiche, in denen die Dichte des Elektroniums besonders hoch ist: links oben und rechts unten in der Umgebung der Natriumkerne sowie rechts oben und links unten in der Umgebung der Chlorkerne. Dazwischen liegen Bereiche, in denen die Dichte des Elektroniums recht gering, aber doch von null verschieden ist.



**Abb. 8.3** Verteilung des Elektroniums in einem Feststoff. Die kleinen schwarzen Kreise stellen die Atomkerne dar (nicht im Maßstab).

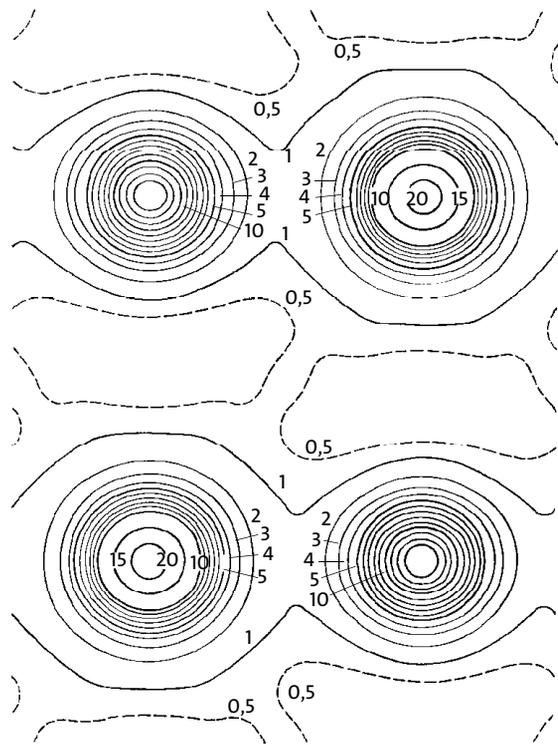
	Abstand der Atome oder Moleküle	Anordnung der Atome oder Moleküle
Gase	groß	fliegen ungeordnet durcheinander
Flüssigkeiten	dicht gepackt	meist amorph, selten kristallin
feste Stoffe	dicht gepackt	kristallin oder amorph

**Tab. 8.1** zeigt Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Anordnung der Atome in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern

In fester Materie füllt das Elektronium den gesamten Raum zwischen den Kernen aus; es bildet einen zusammenhängenden „See“.

Die Atome in einem Gas können fast frei in der Gegend herumfliegen. Sie bewegen sich um so schneller, je höher die Temperatur des Gases ist.

Die Atome von Feststoffen dagegen sind an einen festen Ort gebunden. Sie können ihren Platz im Kristallgitter nicht verlassen. Trotzdem sind sie nicht unbeweglich: Sie führen Schwingungen um eine mittlere Position aus, und auch diese Schwingungsbewegung ist um so schneller, je höher die Temperatur ist.



**Abb. 8.4** Die Verteilung des Elektroniums in Kochsalz

**Aufgabe**

1. Wie viele Atome enthält ein Kochsalzkristall mit einer Kantenlänge von einem Millimeter?

### 8.3 Die Energieleiter von Feststoffen

Wir hatten gesehen, dass das Elektronium in der Hülle eines Atoms verformt werden kann, und dass bestimmten Formen ein stationärer Zustand entspricht. Dasselbe trifft auch für den Elektroniumsee in Feststoffen zu.

Verformen bedeutet hier, genauso wie beim Einzelatom, dass eine Elementarportion des Elektroniums von einer Stelle zu einer anderen verschoben wird. Damit ändert sich die Elektroniumverteilung im See: An einer Stelle nimmt seine Dichte ab, an einer anderen entsprechend zu.

Das Elektronium in einem Feststoff kann auf sehr viele verschiedene Arten angeregt werden, und die Verformung bei einer einzelnen Anregung ist nicht auf den Bereich eines einzelnen Atoms beschränkt; sie erstreckt sich über viele Atome.

Wie bei den Atomen nennen wir den stationären Zustand mit der niedrigsten Energie den Grundzustand. Die Zustände höherer Energie sind die Anregungszustände.

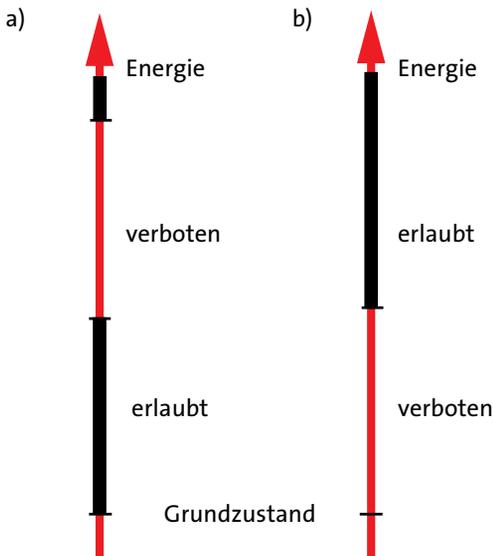
Die Energieleiter von Feststoffen unterscheiden sich deutlich von denen der einzelnen Atome: Während die Sprossen der Energieleiter eines Atoms sehr schmal sind, weil das Elektronium in einem Atom nur ganz bestimmte Energiemengen speichern kann, sind die Sprossen der Energieleiter eines Feststoffs breit. Die Energien, die das Elektronium eines Feststoffs speichern kann, umfassen ganze Wertebereiche auf der Energieskala. Wir nennen sie im Folgenden erlaubte Bereiche. Dazwischen liegen die verbotenen Bereiche.

Die Energien der stationären Elektronenzustände in festen Stoffen bilden Bereiche.

Die Energieleiter von Feststoffen lassen sich in zwei Gruppen einteilen.

Bei Stoffen der einen Gruppe beginnt der erste erlaubte Bereich beim Grundzustand, Abb. 8.5a. Metalle haben Energieleiter dieser Art. Zur Anregung des Elektroniums reichen schon sehr kleine Energien.

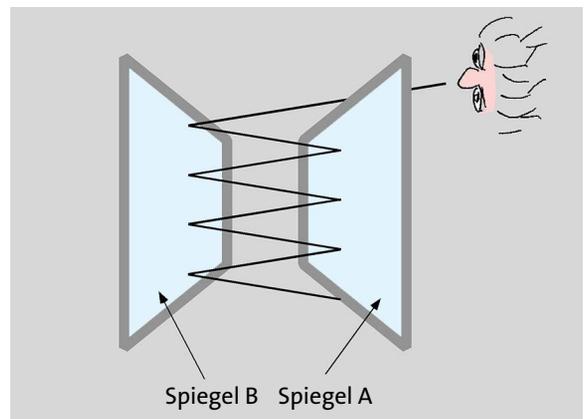
Beim zweiten Energieleitertyp liegt zwischen Grundzustand und erstem erlaubten Bereich ein verbotener Bereich, Abb. 8.5b. Eine solche Energieleiter ist typisch für Nichtmetalle. Hier sind Anregungen nur möglich, wenn die Anregungsenergie ausreicht, um die Lücke zwischen Grundzustand und erstem erlaubten Bereich zu überwinden.



**Abb. 8.5** Die Energieleiter von Metallen (a) und Nichtmetallen (b)

### 8.4 Wenn Licht auf Metalle trifft

Wenn Licht auf eine sehr glatte Metalloberfläche trifft, wird es zum größten Teil reflektiert. So besteht etwa



**Abb. 8.6** Der Beobachter empfängt Licht, das zwischen den Spiegeln sehr oft hin- und herreflektiert wurde.

die reflektierende Schicht eines Spiegels aus Aluminium. Es wird aber durchaus nicht das ganze Licht reflektiert. Man sieht das gut, wenn man das in Abbildung 8.6 skizzierte Experiment macht.

Zwei große Spiegel stehen sich in kleinem Abstand gegenüber. Schaut man am Rand des Spiegels A vorbei in Spiegel B hinein, so sieht man das Bild von Spiegel A. In diesem sieht man das Bild von Spiegel B, darin wieder das von A usw. Insgesamt sieht man eine Art Gang, dessen Wände von Spiegelrändern gebildet werden. Licht, das aus diesem Gang von weit hinten zu kommen scheint, ist solches Licht, das zwischen den beiden Spiegeln sehr oft hin und her reflektiert worden ist. Es ist nun für uns interessant, dass es in diesem Gang nach hinten zu immer dunkler wird, denn das bedeutet, dass bei jeder Reflexion etwas Licht verloren geht. Tatsächlich werden bei jeder Reflexion etwa 10 % des Lichts absorbiert.

Wir schließen daraus, dass der Spiegel, wie jedes andere Metall, Licht nicht nur reflektiert, sondern auch absorbiert. Dass das Licht nicht stärker absorbiert wird, liegt nur daran, dass wegen der Reflexion sehr wenig Licht in das Metall eindringt.

Die Absorption des Lichts in Metallen geschieht in Übereinstimmung mit seiner Energieleiter, Abb. 8.7. Die drei Balken neben der Energieleiter entsprechen der Energie der Photonen von rotem, grünem und blauem Licht. Sie stehen repräsentativ für alle Photonen aus dem Spektralbereich des sichtbaren Lichts. Alle drei Balken reichen über den unteren erlaubten Energiebereich nicht hinaus. Das bedeutet, dass die Photonen des sichtbaren Lichts das Elektronium in Metallen anregen können.

Photonen des sichtbaren Lichts können das Elektronium von Metallen anregen. Dabei werden sie absorbiert.

Es ist nun gar nicht schwer, ein Metall dazu zu bringen, dass es nicht nur 10 %, sondern alles auftreffende Licht absorbiert. Es genügt, das Metall in feine Teilchen zu zerlegen. Jedes Metallpulver absorbiert Licht fast vollständig: Metallpulver sind schwarz. Wie ist das zu erklären?

Wenn Licht auf ein Metallpulver trifft, wird es nicht nur einmal reflektiert, sondern sehr oft – von einem Pulverkörnchen zum nächsten, Abb. 8.8. Nach der ersten Reflexion sind noch 90 % der ursprünglichen Lichtmenge übrig, nach der zweiten noch 81 %, nach der dritten 73 % usw. Nach 25 Reflexionen sind noch 7 % übrig und nach 50 Reflexionen nur noch 0,5 %, also fast nichts mehr. Je feiner das Metallpulver, desto größer ist

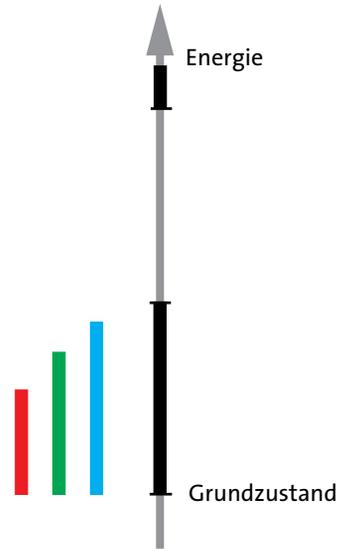


Abb. 8.7 Metall: Die Energie der Photonen des sichtbaren Lichts liegt im untersten erlaubten Bereich.

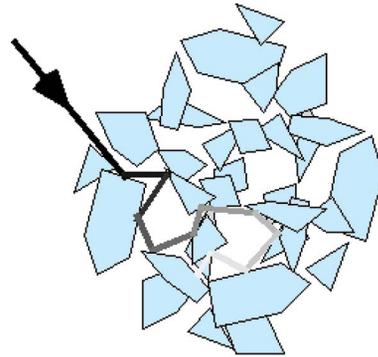


Abb. 8.8 Licht wird in einem Metallpulver mehrfach hin- und herreflektiert.

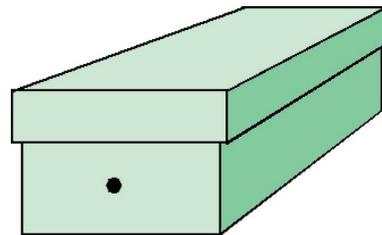


Abb. 8.9 Das Loch im Schuhkarton ist schwarz.

die Zahl der Reflexionen, und desto schwarzer ist das Pulver. Das Licht läuft sich in dem Pulver tot.

Dass pulverförmige Metalle Licht absorbieren, zeigt eine Erfahrung, die jeder schon einmal gemacht hat: Wenn man mit einem weißen Metallputzmittel eine saubere, glänzende Aluminiumoberfläche abreibt, wird das Putzmittel schwarz. Der Grund für das Schwarz werden ist das abgeriebene Aluminiumpul-

## 8.5 Wenn Licht auf Nichtmetalle trifft

ver.

Wie Licht bei zahlreichen Reflexionen nach und nach ganz verschwinden kann, sieht man auch in einem anderen, sehr einfachen Experiment. In einen Karton, etwa einen Schuhkarton, wird ein kleines Loch geschnitten, Abb. 8.9.

Die Innenseiten des Kartons sollen weiß sein, sodass sie nur wenig Licht absorbieren. Man sieht nun, dass das Loch völlig schwarz ist. Durch das Loch gelangt Licht in den Karton hinein. Es findet aber nicht wieder aus dem Karton heraus. Da bei jedem Auftreffen auf die Kartonwand etwas Licht absorbiert wird, ist nach einigem Hin und Her im Karton nichts mehr übrig.

Alles Schwarz, das wir in unserer Umgebung wahrnehmen, kommt auf diese Art zustande, z. B. auch das Schwarz von gedruckten Buchstaben. Bei genauer Betrachtung des Papiers sieht man, dass es eine raue Oberfläche hat. Das auftreffende Licht legt im Papier einen Zickzackkurs zurück, bevor es wieder herauskommt und z. B. in deine Augen gelangt. Befindet sich an der betreffenden Stelle auf dem Papier ein Stoff, der bei jeder Reflexion einen Teil des Lichts absorbiert, so erscheint das Papier dort schwarz.

■ In schwarzen Gegenständen läuft sich das Licht tot.

## 8.5 Wenn Licht auf Nichtmetalle trifft

Abbildung 8.10 zeigt die Energieleiter für Nichtmetalle. Den Balken links entsprechen wieder die Photonen des sichtbaren Lichts. Alle drei Balken enden noch im verbotenen Energiebereich. Die Energie der Photonen des sichtbaren Lichts reicht also nicht, um das Elektronium anzuregen. Das Licht wird nicht absorbiert, sondern geht durch das Material hindurch. Stoffe mit einer solchen Energieleiter sind daher durchsichtig. Beispiele für solche Stoffe sind Glas, Salze, Zucker, Eis, Zellulose (der Hauptbestandteil von Papier), die meisten Mineralien (z. B. Quarz und Feldspäte), Diamant und Kunststoffe.

Vielleicht fallen dir Gegenstände ein, die zwar aus einem der genannten Stoffe bestehen, aber trotzdem nicht durchsichtig sind, sondern weiß, etwa Feinsalz, Puderzucker, Papier, zerriebenes Glas oder Schnee. Alle diese Stoffe oder Dinge bestehen aus kleinen Teilchen: Körnchen oder Fasern. Je kleiner die Teilchen sind, desto kräftiger ist das Weiß. Puderzucker ist „weißer“ als Feinzucker.

Was hier weiß ist, sind aber gar nicht die einzelnen

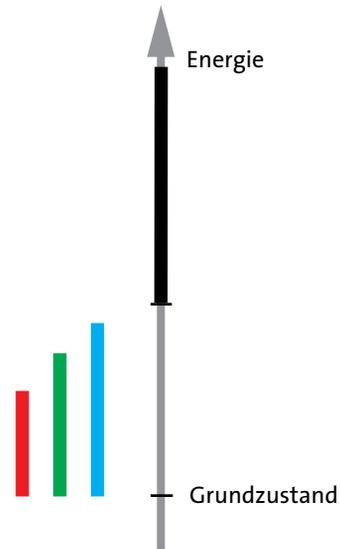


Abb. 8.10 Nichtmetall: Die Energie der Photonen des sichtbaren Lichts liegt im untersten verbotenen Bereich

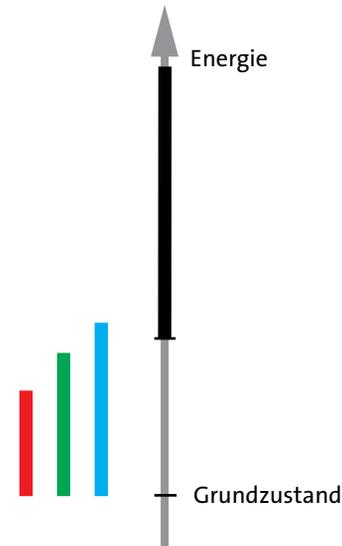


Abb. 8.11 Die Energieleiter von Cadmiumsulfid

kleinen Teilchen. Bei Schneekristallen, Salzkörnchen, Zuckerkörnchen und Glassplittern kann man es mit bloßem Auge erkennen, Papier muss man mit dem Mikroskop betrachten: Die einzelnen Körnchen oder Fasern sind durchsichtig. Der Farbeindruck Weiß ergibt sich erst bei einer Ansammlung von vielen transparenten Teilchen.

Weißer Gegenstände bestehen aus vielen kleinen, durchsichtigen Teilchen.

Auch das Weiß der Wolken kommt so zustande. Eine Wolke besteht aus vielen kleinen durchsichtigen Teilchen, nämlich Wassertröpfchen. Bei der Milch sind es die Fetttröpfchen, die das Weiß verursachen.

Es sind aber durchaus nicht alle Nichtmetalle durchsichtig oder weiß. So gibt es farbiges Glas und Papier, farbige Steine und farbige Kunststoffe. Die Farbigekeit hat in diesen Fällen ihre Ursache darin, dass den durchsichtigen Nichtmetallen andere Stoffe beige-mischt sind, die sichtbares Licht mit bestimmten Wellenlängen absorbieren.

Es gibt aber noch eine andere Ursache dafür, dass ein Nichtmetall farbig, oder sogar schwarz ist: Bei der in Abbildung 8.11 dargestellten Energieleiter ist der untere verbotene Bereich kleiner als die Energie der Photonen des blauen Lichts. Ein Beispiel für einen Stoff mit einer solchen Energieleiter ist Cadmiumsulfid. Der längste der drei Balken (er entspricht den Photonen des blauen Lichts) ragt in den Bereich der erlaubten Energien hinein. Die Energie dieser Photonen reicht also aus, um das Elektronium anzuregen. Die Photonen des blauen Lichts werden dabei absorbiert.

Alle anderen Photonen werden nicht absorbiert. Im durchgelassenen Licht fehlt das blaue Licht, das Gemisch aus dem Rest ergibt Gelb. Ein Stück Cadmiumsulfid ist deshalb durchsichtig und schwach gelb. Cadmiumsulfid-Pulver ist kräftig gelb.

Bei Silizium, Germanium und Grafit ist die Lücke zwischen Grundzustand und erstem erlaubtem Bereich noch kleiner als bei Cadmiumsulfid, Abb. 8.12. Die Energien aller Photonen des sichtbaren Lichts reichen zum Anregen des Elektroniums, mit der Konsequenz, dass sichtbares Licht nicht durchgelassen wird. Der Teil, der nicht reflektiert wird, wird absorbiert. Da ein größerer Teil des Lichts im Material versickert als bei Metallen, sind glatte Oberflächen nicht spiegelnd, sondern zeigen einen schwarzen Glanz. Man nennt diese Stoffe Halbleiter.

Auch die Halbleiter sind als Pulver tiefschwarz, da sich das Licht bei den Reflexionen an den Körnchen des Pulvers totläuft. Ruß ist ein solcher Stoff. Er besteht hauptsächlich aus winzigen Grafitteilchen und wird unter anderem zur Herstellung von Drucker-schwärze und zum Schwärzen von Kunststoffen verwendet.

Da die Energie von Infrarot-Photonen nicht bis zum ersten erlaubten Bereich hinaufreicht, sind Halbleiter für Infrarot-Licht durchlässig – im Gegensatz zu

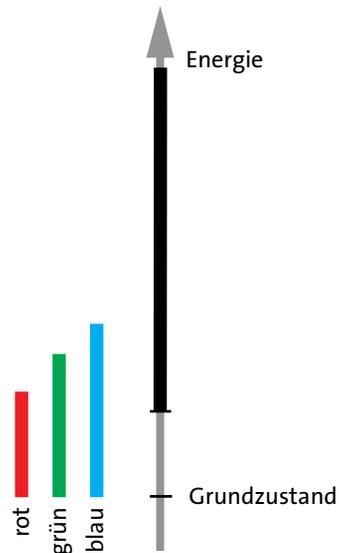


Abb. 8.12 Energieleiter eines Halbleiters

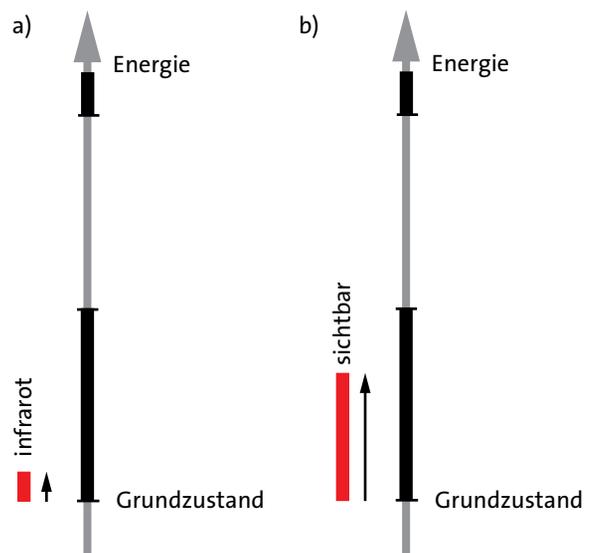


Abb. 8.13 (a) Bei Normaltemperatur reicht die Energie der Bewegung der Atome in Metallen nur für leichte Verformungen des Elektroniums aus. Das Metall emittiert nur Infrarot-Photonen. (b) Bei höherer Temperatur wird das Elektronium stärker angeregt. Es emittiert Photonen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts. Das Metall glüht.

Metallen.

Man verwendet Silizium zur Herstellung von Linsen für Infrarot-Kameras. Infrarot-Licht wird durch diese Linsen durchgelassen und es wird gebrochen.

## 8.6 Feststoffe als Lichtquellen

Sichtbares Licht dagegen, das den Film auch belichten würde und deshalb nicht in die Infrarot-Kamera gelangen darf, wird nicht durchgelassen.

## 8.6 Feststoffe als Lichtquellen

Das Licht einer Glühlampe kommt von einem glühenden Wolframdraht, das Licht einer Kerzenflamme von glühenden Rußteilchen. Wie entsteht dieses Licht?

In einem Feststoff bewegen sich die Kerne und das sie umgebende Elektronium um eine mittlere Lage. Je höher die Temperatur ist, desto schneller ist die Bewegung und desto mehr Energie haben die Atome.

In einem Metall reicht schon bei normaler Temperatur die Energie dieser Bewegung aus, um das Elektronium anzuregen. Mit den Anregungen nimmt das Elektronium aber nur wenig Energie auf. Auch die Photonen, die beim Rückgang in den Grundzustand emittiert werden, haben daher geringe Energien. Es sind Infrarot-Photonen und keine Photonen des sichtbaren Lichts, Abb. 8.13a.

Wenn man das Metall erhitzt, wird die Bewegung der Atome heftiger; ihre Energie nimmt zu. Das Elektronium wird stärker verformt und beim Rückgang in den Grundzustand entstehen energiereichere Photonen. Bei noch höherer Temperatur entstehen schließlich Photonen des sichtbaren Lichts – das Metall glüht, Abb. 8.13b.

Auch alle schwarzen Nichtmetalle, d. h. Halbleiter, beginnen zu glühen, wenn man sie erhitzt.

Metalle und Halbleiter können glühen: Bei hoher Temperatur emittieren sie sichtbares Licht.

Anders ist es bei durchsichtigen und farblosen Nichtmetallen. Ihre Energielücke ist so groß, dass das Elektronium auch bei hohen Temperaturen nicht angeregt wird, sodass keine Photonen des sichtbaren Lichts erzeugt werden können.

Gegenstände aus durchsichtigen Materialien glühen nicht.

## 8.7 Wie Feststoffe die Elektrizität leiten

Als Leitungen für Elektrizität benutzt man Kabel, die aus Metalldrähten – meist Kupfer – und einer Umhül-

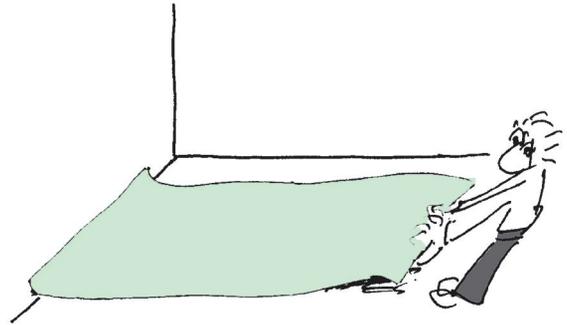


Abb. 8.14 Eine Möglichkeit, einen Teppich zu verschieben ...

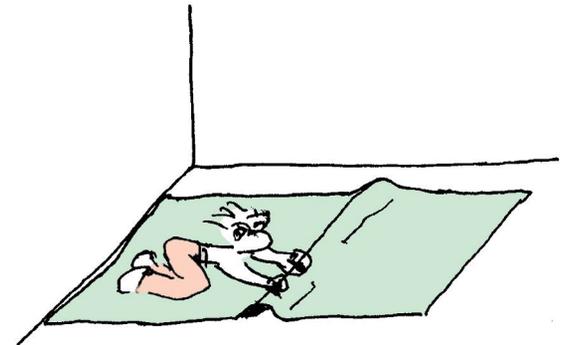


Abb. 8.15 ... und eine zweite Möglichkeit

lung aus Kunststoff bestehen. Der Draht ist aus Metall, weil Metalle die Elektrizität gut leiten, und die Hülle ist aus Kunststoff, weil Kunststoffe (und allgemein die meisten Nichtmetalle) die Elektrizität nicht leiten und so verhindern, dass die Elektrizität aus der Leitung herausfließt.

Elektrizität sitzt immer auf Teilchen, nämlich den negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Protonen der Atomkerne. Wenn Elektrizität durch einen Kupferdraht hindurchfließen soll, müssten sich entweder die Kerne oder das Elektronium bewegen. Nun sind die Kerne fest an ihren Platz im Kristallgitter gebunden; sie können sich nicht durch den Kupferdraht hindurchbewegen. Also bleibt nur das Elektronium.

Man könnte sich vorstellen, dass ein elektrischer Strom dadurch zustande kommt, dass das Elektronium eines Feststoffs als Ganzes an den Kernen vorbei durch den Feststoff fließt. Nun hängt aber das Elektronium so fest an den Kernen, dass es sich auf diese Art nicht verschieben lässt.

Die Situation ist ähnlich wie bei dem folgenden Problem: Ein großer, schwerer Teppich soll verschoben werden, Abb. 8.14.

Wir fassen den Teppich an einem Ende an und versuchen, ihn über den Boden zu ziehen. Da er groß und schwer ist, rührt er sich aber nicht. Wir versuchen es daher mit einem Trick. Wir drücken an einer Seite eine Falte in den Teppich hinein, Abb. 8.15. Diese Falte lässt sich nun bequem durch den Teppich hindurchschieben – und am Ende ist der ganze Teppich ein Stück versetzt.

Ähnlich wie der Teppich verhält sich das Elektronium in einem Feststoff.

Wir stellen uns zunächst vor, der „Elektroniumsee“ befinde sich in seinem Grundzustand. Dann hat er eine ganz bestimmte Verteilung, etwa wie in Abb. 8.3 und 8.4 dargestellt. Wenn man ihn anregt, bringt man ein Elektron, d. h. eine Elementarportion des Elektroniums, in einen Anregungszustand. Dabei ändert sich etwas an der Dichteverteilung des Elektroniumsees. (Diese Änderung findet in einem kleineren Raumbereich statt, ist aber nicht auf den Bereich eines Atoms begrenzt.) Im Vergleich zum Grundzustand bekommen wir also an manchen Stellen eine Zunahme, an anderen eine Abnahme der Dichte. Wenn man nun eine Spannung anlegt und damit im Material ein elektrisches Feld erzeugt, so bewegt sich die Verdichtung durch das Material hindurch, ebenso die Verdünnung.

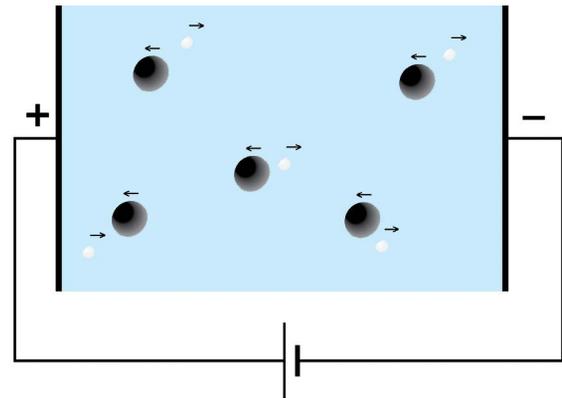
Wir sehen also, dass ein Material nur dann elektrisch leitfähig ist, wenn man das Elektronium leicht anregen kann. Das ist bei Metallen der Fall, Abb. 8.7. Für die Anregung reicht schon das elektrische Feld, das man im Leiter erzeugt. Nichtmetalle lassen sich so nicht anregen, Abb. 8.10; sie leiten daher den elektrischen Strom nicht.

Einer beweglichen Verdichtung entspricht gerade eine zusätzliche Elementarportion des Elektroniums, d. h. ein Elektron. Wir können also auch sagen: Metalle enthalten bewegliche Elektronen.

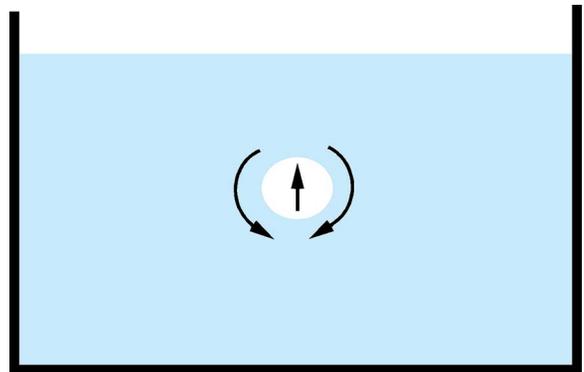
Einer Dichteverminderung entspricht eine fehlende Elementarportion im Elektroniumsee. Man nennt eine solche fehlende Portion auch schlicht ein *Loch*. Auch die fehlende Elementarportion verhält sich wie eine Falte im Teppich und kann durch das Material hindurchlaufen. Sie verhält sich auch, was die Ladungsbilanz betrifft, wie ein positiv geladener beweglicher Ladungsträger.

Metalle enthalten bewegliche Elektronen und Löcher. Darum sind sie elektrisch leitfähig.

Abb. 8.16 zeigt den Leitungsvorgang schematisch. Der Elektroniumsee ist – vereinfachend – gleichmäßig grau dargestellt. Die beweglichen Elektronen (Verdichtungen) sind dunkler, die Löcher (Verdünnungen) sind heller.



**Abb. 8.16** Bei angeschlossener Batterie laufen die beweglichen Elektronen (Verdichtungen) in Richtung Plus-Anschluss und die Löcher (Verdünnungen) in Richtung Minus-Anschluss.



**Abb. 8.17** Während sich die Luftblase von unten nach oben bewegt, bewegt sich Wasser von oben nach unten.

heller. Das elektrische Feld zieht die Elektronen nach links (zum hohen Potenzial) und die Löcher nach rechts (zum niedrigen Potenzial).

Die Bewegung der Löcher kann man vergleichen mit der Bewegung einer Luftblase, die vom Boden eines Wasserglases nach oben steigt. Wo sich vor dem Aufsteigen der Luftblase Luft befand, nämlich unten, befindet sich nach dem Aufsteigen Wasser. Während sich die Blase von unten nach oben bewegt, gelangt Wasser von oben nach unten, Abb. 8.17.

## 8.8 Wie man Nichtmetalle leitfähig machen kann

Wir betrachten ein Nichtmetall, dessen Energielücke nicht zu groß ist, z. B. Cadmiumsulfid. Photonen von

## 8.8 Wie man Nichtmetalle leitfähig machen kann.

blauem Licht bringen genug Energie mit, um den verbotenen Bereich zu überwinden. Wenn man ein solches Nichtmetall mit blauem Licht beleuchtet (oder mit weißem Licht, das ja auch blaues Licht enthält), wird das Elektronium angeregt; es werden bewegliche Elektronen erzeugt. Ist der Cadmiumsulfidkristall Teil eines Stromkreises, so kann ein elektrischer Strom fließen. Der Kristall ist durch die Anregung leitfähig geworden. Sobald die Beleuchtung aufhört, werden keine beweglichen Elektronen mehr erzeugt, und die Leitfähigkeit verschwindet wieder.

Man nennt Stoffe, die bei Beleuchtung leitfähig werden, Fotoleiter. Je mehr Licht auf einen *Fotoleiter* trifft, desto geringer ist sein Widerstand. Man verwendet Fotoleiter zur Messung der Lichtintensität, zum Beispiel in Fotoapparaten.

Nichtmetalle mit schmaler Energielücke können durch Beleuchten leitfähig gemacht werden.

Bei *Halbleitern* genügt schon das Erwärmen, um das Elektronium anzuregen und die Leitfähigkeit zu erhöhen. Die technisch wichtigsten Halbleiter sind Silizium und Germanium.

Es gibt noch eine wirksamere Möglichkeit, die Leitfähigkeit von Halbleitern zu erhöhen. Man ersetzt einen kleinen Teil der Atome des Materials durch Atome eines anderen Stoffs. Man wählt diese „fremden“ Atome so, dass sie entweder ein Elektron mehr oder ein Elektron weniger in der Hülle haben als die Atome des Materials, in das sie eingebaut werden. Man nennt dieses Einbauen fremder Atome in ein sonst reines Material *dotieren*.

So dotiert man etwa Germanium mit Arsenatomen. Das zusätzliche Elektron jedes Arsenatoms verhält sich wie eine Verdichtung des Elektroniums, d. h., es ist beweglich. Das Germanium wird also durch den Einbau der Arsenatome leitfähig. Da die neuen beweglichen Ladungsträger negativ sind, sagt man auch, man habe das Germanium *n-dotiert*.

Baut man in das Kristallgitter Atome ein, die ein Elektron weniger in der Hülle haben als die Germaniumatome, z. B. Galliumatome, so erzeugt man Verdünnungen. Jedes eingebaute Galliumatom bringt also ein bewegliches Loch mit. Auch so wird das Germanium leitfähig. Da die Löcher positiv sind, sagt man, das Germanium sei *p-dotiert* worden.

Halbleiter können durch Einbauen von fremden Atomen leitfähig gemacht werden. Die beweglichen Ladungsträger können negative Elektronen oder positive Löcher sein.

Um eine gute Leitfähigkeit zu erhalten, reicht es schon, etwa jedes millionste Germaniumatom durch ein Fremdatom zu ersetzen.

Die wichtigsten elektronischen Bauelemente – Dioden und Transistoren – werden aus dotiertem, d. h. leitfähig gemachtem Germanium oder Silizium hergestellt. Wir werden uns mit ihnen in den nächsten Abschnitten beschäftigen. ■

## 9 DIODE UND TRANSISTOR

### 9.1 Die Halbleiterdiode

Eine Halbleiterdiode ist ein elektronisches Bauelement mit zwei Anschlüssen. In einen Stromkreis eingebaut lässt sie die Elektrizität nur in einer Richtung durch. Eine Diode ist also für die Elektrizität, was ein Fahrradventil für die Luft ist.

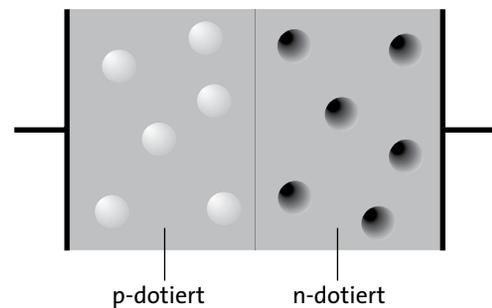
Sie besteht aus einem kleinen Stück eines Halbleitermaterials, meist Germanium oder Silizium, mit zwei Anschlusskontakten, Abb. 9.1. Auf einer Seite ist das Material n-dotiert (in der Abbildung rechts), auf der anderen ist es p-dotiert (links). Der n-Bereich und der p-Bereich stoßen in der Mitte aneinander. Beide Bereiche sind elektrisch leitfähig, aber die Ladungsträger sind nicht dieselben. Rechts sind es Elektronen, links Löcher.

Ein Teil der Diode ist für Elektronen, der andere für Löcher leitfähig.

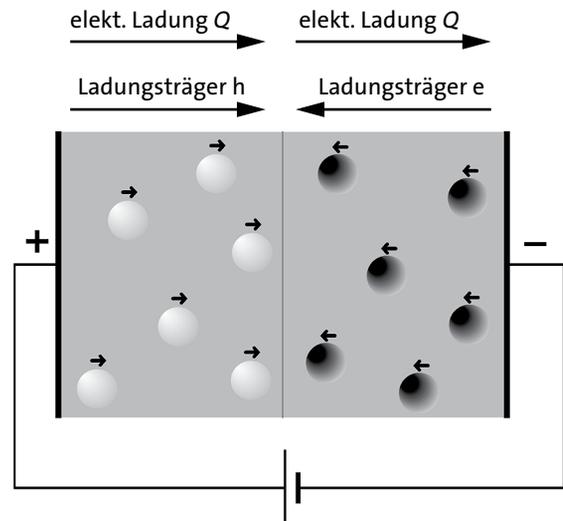
Im Folgenden bezeichnen wir die beweglichen Elektronen mit  $e$  und die Löcher mit  $h$  (vom englischen hole), so wie man Natrium mit Na, Kohlenstoff mit C oder Licht mit  $\gamma$  bezeichnet.

Wir schließen die Diode an eine Batterie an, und zwar den p-dotierten Teil mit den Löchern ans hohe Potenzial und den n-dotierten mit den Elektronen ans niedrige. Die positiven Löcher bewegen sich nun in Richtung niedrigen Potenzials, also zur Mitte der Diode hin, die negativen Elektronen in Richtung hohen Potenzials, also auch zur Mitte, Abb. 9.2. Gleichzeitig werden über den linken Anschluss der Diode Löcher und über den rechten Elektronen nachgeliefert, denn in den Metalldrähten der Zuleitungen sind von beiden Ladungsträgerarten genug vorhanden.

$$e + h \rightarrow \gamma.$$



**Abb. 9.1** Im rechten Teil der Diode befinden sich bewegliche Elektronen, im linken bewegliche Löcher.



**Abb. 9.2** Elektronen und Löcher bewegen sich auf die Grenzfläche zu. In beiden Teilen fließt ein elektrischer Strom von links nach rechts.

Die Reaktion läuft so lange, wie die Diode an die Batterie angeschlossen ist. Dabei fließt ein elektrischer

## 9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter, Lichtquelle und Solarzelle

Strom. Beachte, dass im linken Bereich positive Ladungsträger (die Löcher) nach rechts, und im rechten Bereich negative Ladungsträger (die Elektronen) nach links fließen. Beiden Ladungsträgerströmen entspricht ein Nettostrom elektrischer Ladung nach rechts.

Wir schließen die Diode nun umgekehrt an die Batterie an, legen also die p-dotierte Seite ans niedrige Potenzial und die n-dotierte ans hohe. Die Löcher im p-Teil bewegen sich jetzt von der Mitte der Diode weg nach links, die Elektronen im n-Teil gehen nach rechts, Abb. 9.3.

Da von der Mitte der Diode her keine Elektronen und Löcher nachgeliefert werden, kommt der Vorgang aber sofort zum Stillstand. Trotz angeschlossener Batterie fließt kein elektrischer Strom durch die Diode.

Es ergeben sich damit mehrere Anwendungsmöglichkeiten.

## 9.2 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter, Lichtquelle und Solarzelle

### Die Diode als Gleichrichter

Wir haben gesehen, dass die Diode in eine Richtung für die Elektrizität durchlässig ist, in die andere nicht. Baut man eine Diode in einen Stromkreis ein, der von einer Wechselspannungsquelle versorgt wird, Abb. 9.4, so fließt kein Wechselstrom. Die Diode lässt den elektrischen Strom nur in eine Richtung fließen. Der Strom wird *gleichgerichtet*. Die Diode arbeitet als *Gleichrichterdiode*.

Gleichrichterdioden gibt es in den verschiedensten Größen. Manche sind mehrere cm groß und vertragen Ströme von 50 A, andere befinden sich zu Millionen auf einem Computer-Chip und sind so winzig, dass man sie mit bloßem Auge gar nicht sieht. Die normale Durchschnittsdiode aus dem Elektronik-Geschäft ist ein kleiner unscheinbarer Zylinder mit zwei Anschlüssen, äußerlich von einem Widerstand oder Kondensator kaum zu unterscheiden, Abb. 9.5.

### Die Diode als Lichtquelle

Wenn eine Diode an eine Batterie angeschlossen ist wie in Abb. 9.2, emittiert sie Licht. Das Licht kommt aus der unmittelbaren Umgebung der Kontaktfläche, d. h. von dort, wo Elektronen und Löcher miteinander reagieren. Eine Diode, die als Lichtquelle optimiert ist, nennt man Leuchtdiode oder LED (Light Emitting Diode).

### Die Diode als Solarzelle

Man kann die Reaktion



auch dazu bringen, dass sie umgekehrt läuft, also



Wie macht man das? Wir wenden eine Regel an, die jeder Chemiker kennt.

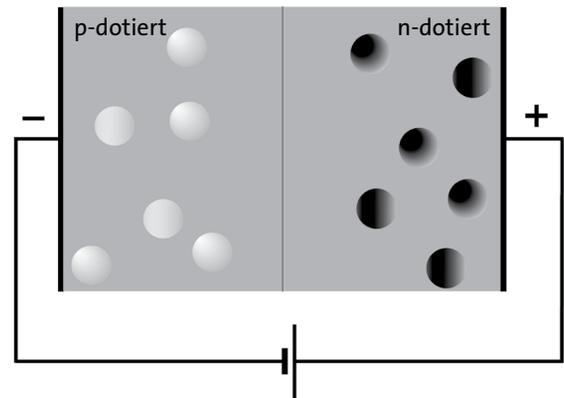


Abb. 9.3 Elektronen und Löcher bewegen sich von der Grenzfläche ein Stück weg. Sie kommen aber nicht weit, da von der Grenzfläche keine neuen Ladungsträger nachgeliefert werden.

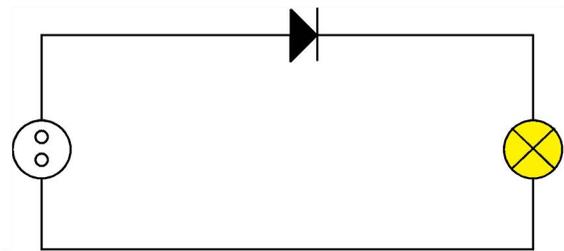


Abb. 9.4 Die Gleichrichterdiode lässt den elektrischen Strom nur in einer Richtung durch.

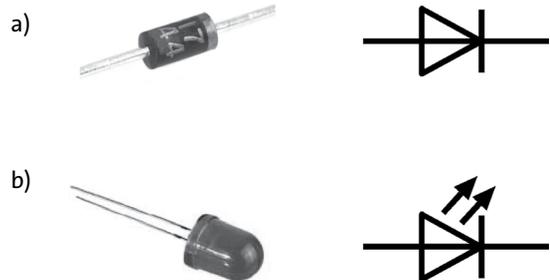
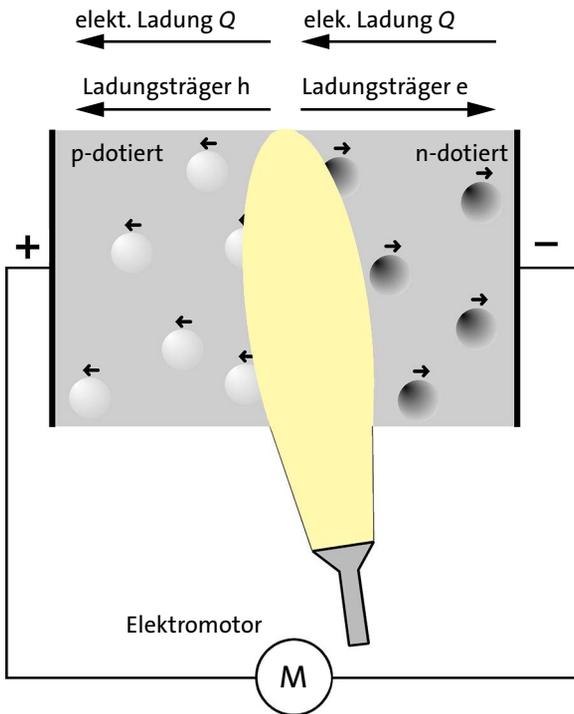
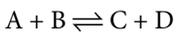


Abb. 9.5 Gleichrichterdiode (a) und Leuchtdiode (b) mit ihren Symbolen



**Abb. 9.6** Das Licht erzeugt an der Grenzfläche zwischen p- und n-Gebiet bewegliche Elektronen und Löcher. Die Elektronen können nur nach links abfließen, die Löcher nur nach rechts. Damit entsteht ein elektrischer Strom, der in der Diode nach links fließt.

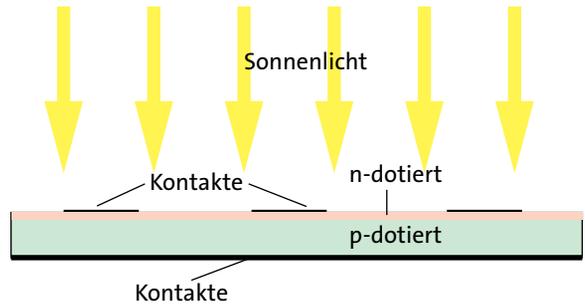
Um eine Reaktion



nach rechts zu treiben, d. h., die Stoffe A und B dazu zu bringen, sich in C und D zu verwandeln, reicht es, die Konzentration eines der Stoffe A und B zu erhöhen. Um die Reaktion nach links zu treiben, verfährt man umgekehrt: Man erhöht die Konzentration von C und/oder D. (Die quantitative Fassung dieser Regel nennt man das *Massenwirkungsgesetz*.)

Damit Reaktion (9.1) nach links läuft, müssen wir Licht hinreichender Intensität („Konzentration“) auf die Grenzfläche zwischen p- und n-Gebiet schicken, Abb. 9.6. Hier entstehen aus dem Licht bewegliche Elektronen und Löcher. Die Elektronen können nur nach rechts über das n-Gebiet abfließen, denn das p-Gebiet ist für Elektronen undurchlässig. Die Löcher können entsprechend nur nach links abfließen.

Der Elektronen- und der Löcherstrom werden angetrieben durch die Überschusskonzentration an Ladungsträgern, die das Licht an der Grenzfläche erzeugt.



**Abb. 9.7** Solarzelle im Querschnitt, schematisch

Was die Richtungen betrifft, gilt dasselbe, was wir schon beim Gleichrichter festgestellt hatten: Die Teilchenströme im p- und im n- Gebiet haben entgegengesetzte Richtungen, der elektrische Strom hat aber dieselbe Richtung.

Die Halbleiterdiode wirkt hier also als „Elektrizitätspumpe“ oder elektrische Energiequelle.

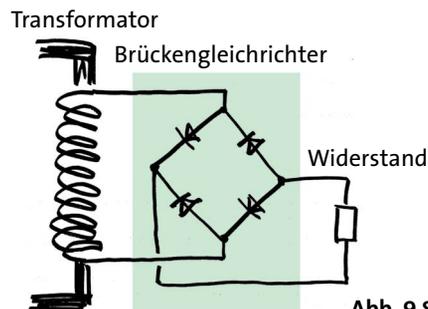
Licht erzeugt an der Grenzfläche zwischen p- und n-Bereich Elektronen und Löcher. Die Elektronen drängen über das n-Gebiet nach der einen Seite, die Löcher über das p-Gebiet nach der anderen.

Die technische Realisierung dieser Art Diode ist die *Solarzelle*.

Abb. 9.7 zeigt eine Solarzelle im Querschnitt. Sie ist nur Bruchteile eines Millimeters dick. Die Kontakte an der dem Licht zugewandten Seite müssen schmal sein, damit sie den Lichteinfall nicht zu stark behindern.

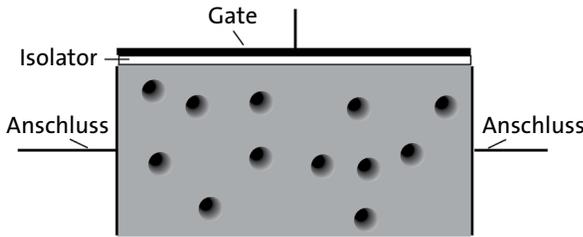
### Aufgaben

1. Stelle für den Stromkreis von Abb. 9.4 die elektrische Stromstärke als Funktion der Zeit grafisch dar.
2. In Abbildung 9.8 ist ein Widerstand an einen Transformator angeschlossen. Dazwischen befinden sich noch vier Gleichrichterdioden. Die Anordnung dieser Dioden nennt man einen Brückengleichrichter. Was bewirkt er? Wie funktioniert er?

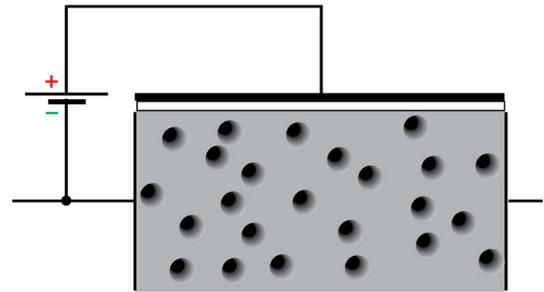


**Abb. 9.8** Zu Aufgabe 2

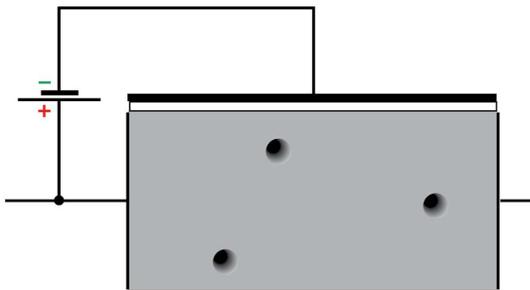
### 9.3 Der Transistor



**Abb. 9.9** Aufbau eines Transistors. Mithilfe des Gates steuert man den elektrischen Strom durch den Halbleiterkanal.



**Abb. 9.11** Die Batterie hat Elektronen in den Halbleiterkanal hineingedrückt. Der Kanal leitet.



**Abb. 9.10** Die Batterie hat fast alle Elektronen aus dem Halbleiterkanal abgezogen. Der Kanal leitet nicht mehr.

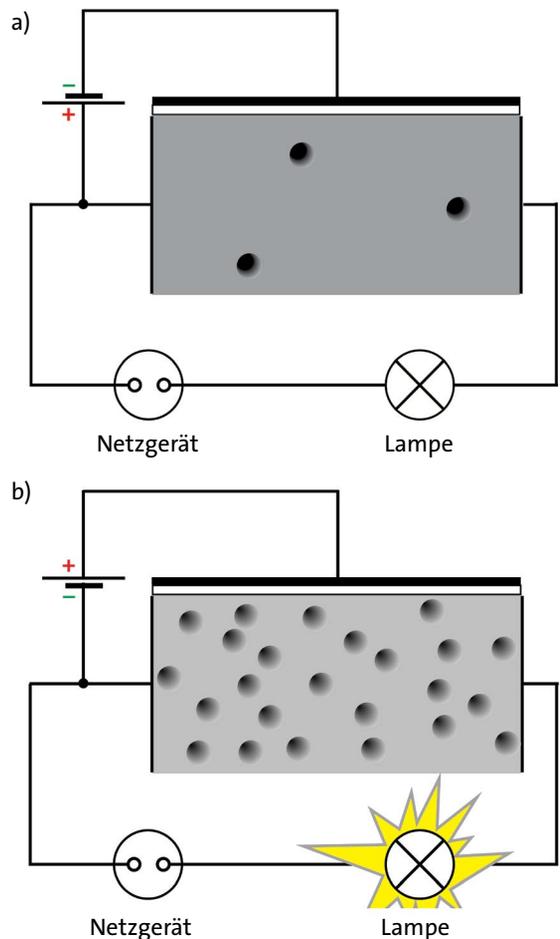
### 9.3 Der Transistor

Ein Transistor ist ein Schalter für den elektrischen Strom, der elektrisch gesteuert, d. h. geöffnet oder geschlossen werden kann. Er erfüllt also im Wesentlichen dieselbe Aufgabe wie ein Relais (ein Schalter, der mithilfe eines Elektromagneten gesteuert wird). Gegenüber dem Relais hat er aber einige Vorteile: Erstens genügt zum Steuern ein viel kleinerer elektrischer Strom, zweitens reagiert er viel schneller, drittens ist er viel kleiner und viertens kann man diesen Schalter nicht nur öffnen und schließen, sondern seine „Durchlässigkeit“ für den elektrischen Strom auch auf Zwischenwerte einstellen.

Transistoren werden in allen elektronischen Geräten eingesetzt: im Computer, im Fernseher, im MP3-Player, im Smartphone usw.

Abb. 9.9 zeigt den Aufbau eines Transistors. Der zu steuernde Strom wird durch einen n-dotierten „Halbleiter-Kanal“ geschickt.

Seitlich am Kanal (in der Abbildung oben) befindet sich eine Metallschicht, das Gate (englisch: Tor, Sperre). Das Gate ist vom Halbleiterkanal elektrisch isoliert. Zusammen mit dem Halbleiter bildet es einen Kondensator. Diesen Kondensator kann man laden,



**Abb. 9.12** (a) Das Gate hat die beweglichen (negativen) Elektronen aus dem Kanal hinausgedrängt; der Kanal leitet nicht mehr, die Lampe leuchtet nicht. (b) Das Gate hat die Elektronen in den Kanal hineingezogen; der Kanal leitet, die Lampe leuchtet.

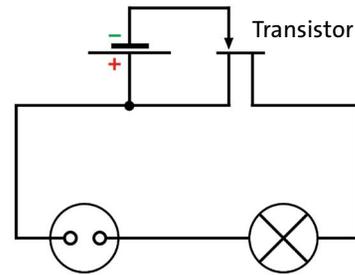
indem man eine Spannung zwischen Gate und Halbleiter legt.

Liegt der Halbleiterkanal auf hohem Potenzial (und das Gate auf niedrigem), Abb. 9.10, so ist der Halbleiter positiv geladen. Er enthält weniger Elektronen als im ungeladenen Zustand. Er enthält also weniger bewegliche Ladungsträger und ist daher auch weniger leitfähig. Die Leitfähigkeit kann dabei so stark abnehmen, dass der Kanal praktisch undurchlässig für den elektrischen Strom ist. Er verhält sich wie ein offener Schalter.

Befindet sich der Halbleiterkanal auf dem niedrigeren Potenzial (und das Gate auf dem hohen), Abb. 9.11, so enthält er mehr bewegliche Ladungsträger; seine Leitfähigkeit ist jetzt groß. Er verhält sich wie ein geschlossener Schalter.

Man kann also den Kanal öffnen und schließen, indem man die Spannung zwischen Kanal und Gate variiert.

Die Abbildungen 9.12a, 9.12b und 9.13 zeigen einen vollständigen Stromkreis mit einem Transistor. Ist das Gate-Potenzial niedriger als das Potenzial des Kanals, Abb. 9.12a, so leitet der Halbleiter nicht, und die Lampe leuchtet nicht. Ist das Gate-Potenzial höher, so



**Abb. 9.13** Wie Abbildung 9.12a, aber mit dem elektrotechnischen Symbol des Transistors

leitet der Halbleiter, und die Lampe leuchtet, Abb. 9.12b.

### Aufgabe

1. Es gibt Transistoren, deren Kanal aus einem p-dotierten Material besteht. Wie muss man eine Batterie an den Transistor anschließen, damit sich der Transistor wie ein geöffneter Schalter verhält?

## 10 KERNPHYSIK

Bei unserer Beschäftigung mit den Atomen haben wir uns vor allem für das Elektronium der Atomhülle interessiert; den Atomkern haben wir gebraucht, um das Elektronium zusammenzuhalten. Nun laufen in der Natur aber Vorgänge ab, für deren Verständnis man den Atomkern genauer kennen muss: Prozesse, bei denen sich die Atomkerne verändern. Man nennt diese Vorgänge Kernreaktionen.

Natürliche Kernreaktionen laufen in geringem Maße auf der Erde ab; viel wichtiger sind aber die in der Sonne. Sie sind dafür verantwortlich, dass die Sonne Licht emittiert und so die Erde mit Energie versorgt. Kernreaktionen werden aber auch technisch angewendet, zum Nutzen und zum Schaden der Menschen: in Kernreaktoren, in Fusionsreaktoren, in der Atombombe und in der Wasserstoffbombe.

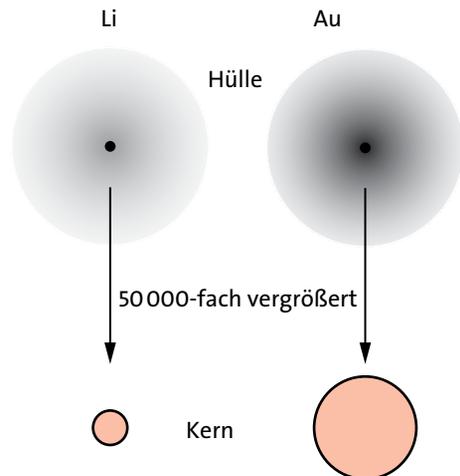
Beim Studium des Kernaufbaus wird dir vieles wieder begegnen, was du im Zusammenhang mit der Atomhülle kennengelernt hast. Und du wirst viel von dem anwenden können, was dir im Chemieunterricht bei der Beschreibung von gewöhnlichen chemischen Reaktionen begegnet ist.

### 10.1 Der Aufbau der Atomkerne

Wie wir schon gelernt hatten, ist der Durchmesser des Atomkerns etwa gleich  $1/50\,000$  des Atomdurchmessers. Trotz dieser Winzigkeit befindet sich praktisch die ganze Masse des Atoms im Atomkern. Die Masse der Hülle beträgt nur ungefähr  $1/4000$  der Kernmasse.

Außer in Masse und Größe unterscheiden sich Hülle und Kern noch in einer weiteren Eigenschaft.

Du erinnerst dich, dass die Dichte des Elektroniums von innen nach außen abnimmt, sodass die Atomhülle keinen scharfen Rand hat – ähnlich wie die Lufthülle der Erde. Außerdem hatten wir gesehen, dass sich die Hüllen von schweren und leichten Atomen nicht so sehr in der Größe als vor allem in der Dichte unterscheiden. Ein Gold- und ein Lithiumatom



**Abb. 10.1** Die Hülle des Goldatoms ist etwa so groß wie die des Lithiumatoms, aber sie ist viel dichter. Der Kern des Goldatoms hat etwa dieselbe Dichte wie der des Lithiumatoms, aber er ist viel größer.

sind etwa gleich groß, die Dichte des Elektroniums ist aber beim Goldatom sehr viel größer als beim Lithiumatom.

Ganz anders verhält es sich mit den Atomkernen. Die Dichte ist im Atomkern durchgehend gleich – also nicht wie bei der Erdatmosphäre, sondern wie zum Beispiel bei einer Glaskugel. Außerdem ist die Dichte des Kernmaterials von einem zum anderen Atomkern gleich. Der Kern des Lithiumatoms hat etwa dieselbe Dichte wie der des Goldatoms. Dafür unterscheiden sich Lithium- und Goldatomkern in der Größe, Abb. 10.1.

Die Dichte ist in einem Atomkern überall gleich. Die Dichten verschiedener Kerne sind untereinander gleich.

Was die Form betrifft, so sind sich Kern und Hülle wieder sehr ähnlich. Auch die Kerne sind näherungs-

weise kugelförmig. Einige weichen etwas von der Kugelform ab: Manche sind etwas platt gedrückt, wie eine Mandarine, andere etwas verlängert, etwa wie eine Kiwi.

Man misst die Dichte in  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Wasser zum Beispiel hat eine Dichte von

$$\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3,$$

d. h.,  $1 \text{ cm}^3$  Wasser wiegt 1 g, oder 1 Liter wiegt 1 kg.

Dass fast die ganze Masse eines Atoms im Kern konzentriert ist, hat zur Folge, dass die Dichte des Kerns riesige Werte annimmt. Die Kernmaterie hat eine Dichte von

$$\rho = 10^{14} \text{ g}/\text{cm}^3.$$

Wenn man  $1 \text{ cm}^3$  Kernmaterie zusammenbekäme, so hätte diese eine Masse von

$$10^{14} \text{ g} = 100\,000\,000 \text{ Tonnen.}$$

Um über diesen merkwürdigen Stoff, aus dem die Kerne bestehen, noch mehr zu lernen, machen wir in Gedanken ein Experiment, das wir schon bei der Untersuchung der Hülle gemacht haben: Wir „greifen hinein“, um eine Portion davon herauszuholen. Wieder darfst du das Hineingreifen nicht wörtlich nehmen. Mit den Händen können wir weder in die Hülle noch in den Kern hineingreifen. Man kann aber etwas machen, was dem Hineingreifen durchaus entspricht: mit irgendwelchen anderen kleinen Teilchen gegen den Kern schießen und auf diese Art etwas von der Kernmaterie hinauskatapultieren. Es kommt uns im Augenblick nicht darauf an, wie man das genau macht.

Greifen wir also in den Kern hinein, holen eine Portion heraus und schauen uns an, „was wir in der Hand haben“. Es wird dich nicht überraschen, dass wir auch hier, wie schon beim Elektronium der Hülle, immer nur ganz bestimmte Portionen erwischen. Eines ist aber anders: Es gibt zweierlei kleinste Portionen. Manchmal haben wir etwas in der Hand, was elektrisch positiv geladen ist, und manchmal bekommen wir etwas elektrisch Neutrales. Greifen wir stärker zu, so kann es sein, dass unsere Portion das Zweifache der geladenen Elementarportion ist, oder das Zweifache der neutralen Elementarportion oder gerade so viel, wie eine geladene und eine neutrale Portion zusammen. Du kannst dir vorstellen, was alles passieren kann, wenn wir noch stärker zulangten.

	elektrische Ladung	Masse
Proton	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	$0 \text{ C}$	$1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Elektron	$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Tab. 10.1 Daten von Proton, Neutron und Elektron

Wie man diese Portionen nennt, weißt du auch schon: Eine positive Elementarportion heißt *Proton*, eine neutrale heißt *Neutron*. Ein Kern enthält also eine ganze Zahl von positiven und eine im Allgemeinen andere ganze Zahl von neutralen Portionen. In anderen Worten: Ein Kern enthält eine bestimmte Zahl Protonen und eine bestimmte Zahl Neutronen.

Beachte aber, dass die Protonen und die Neutronen im Kern nicht räumlich voneinander abgegrenzt sind. Wenn du dir den Protonenstoff wie einen roten Pudding vorstellst und den Neutronenstoff wie einen weißen, so bestünde der ganze Kernpudding nicht aus roten und weißen Bereichen, sondern er wäre durchgehend rosa.

In Tabelle 10.1 sind die elektrische Ladung und die Masse von Proton, Neutron und Elektron aufgeführt. Die Massen von Proton und Neutron sind fast, aber doch nicht ganz gleich. Das Neutron ist etwas schwerer. Wir werden später sehen, dass dieser Unterschied für bestimmte Kernreaktionen wichtig ist. Merke dir, dass jedes der beiden Teilchen etwa 1800-mal so schwer ist wie das Elektron.

Die elektrische Ladung des Elektrons ist gerade entgegengesetzt gleich der des Protons. Ein Atom enthält in seiner Hülle genauso viele Elektronen, wie es im Kern Protonen enthält. Das hat zur Folge, dass das Atom insgesamt keine elektrische Ladung hat; es ist elektrisch neutral.

Die Kernmaterie lässt sich zerlegen in

- Portionen, die positiv geladen sind und
- Portionen, die elektrisch neutral sind.

Eine positive Portion heißt Proton, eine neutrale heißt Neutron.

### Aufgaben

1. Die Gesamtzahl von Protonen und Neutronen in einem Kern A sei achtmal so groß wie die in einem Kern B. Um welchen Faktor ist das Volumen von A größer als das von B?
2. Es gibt Himmelskörper, die aus Kernmaterie bestehen, die Neutronensterne. Ein typischer Neutronenstern hat einen Durchmesser von 10 km. Wie groß ist seine Masse?

## 10.2 Elemente, Nuklide, Isotope

Die Atome der verschiedenen chemischen Elemente unterscheiden sich in der Zahl der Protonen ihrer Kerne. Die Ordnungszahl gibt gerade diese Protonenzahl an. Und solange das Atom nicht ionisiert ist, ist die Ordnungszahl auch gleich der Anzahl der Elektronen.

Ordnungszahl = Anzahl der Protonen im Kern

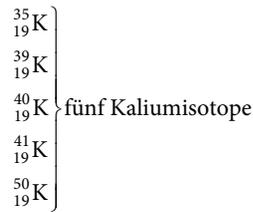
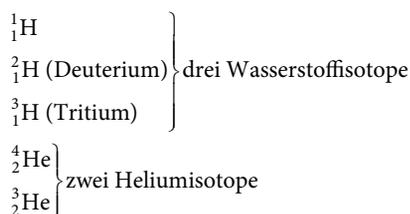
Wenn wir die Kerne nur nach ihrer Protonenzahl beurteilen, so gibt es so viele verschiedene Kerne, wie es verschiedene chemische Elemente gibt, also etwa 100. Nun kann aber ein Atomkern mit bestimmter Protonenzahl noch mehr oder weniger Neutronen enthalten. So gibt es Kaliumatomkerne (also Atomkerne mit 19 Protonen) mit Neutronenzahlen von 16 bis 33. Es gibt also verschiedene Kaliumsorten oder *Isotope*, wie man sagt. Chemisch unterscheiden sich die verschiedenen Isotope eines Elements fast gar nicht voneinander. Normales, natürliches Kalium ist ein Gemisch aus verschiedenen Isotopen. Auch von allen anderen Elementen existieren verschiedene Isotope.

Die Isotope eines Elements unterscheiden sich in der Anzahl der Neutronen in den Atomkernen.

Wenn man die verschiedenen Sorten jedes chemischen Elements einzeln zählt, kommt man nicht auf etwa 100 verschiedene Grundstoffe, sondern auf etwa 2000. Die 100 verschiedenen Grundstoffe der Chemie nennt man, wie du weißt, Elemente. Die 2000 verschiedenen Grundstoffe, die man erhält, wenn man auch noch nach der Neutronenzahl unterscheidet, heißen Nuklide. Zur Bezeichnung eines Nuklids benutzt man die folgende Schreibweise:

- das aus der Chemie bekannte Buchstabensymbol des Elements;
- links daneben oben die Gesamtzahl der Protonen und Neutronen und unten die Ordnungszahl, d. h. die Anzahl der Protonen.

Hier einige Beispiele für Nuklide in dieser Schreibweise:



${}^{56}_{26}\text{Fe}$  das häufigste Eisenisotop

${}^{238}_{92}\text{U}$  das häufigste Uranisotop

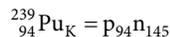
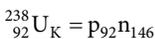
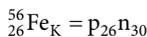
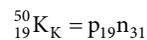
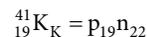
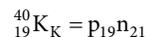
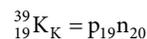
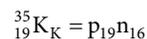
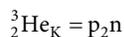
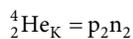
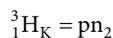
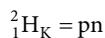
${}^{239}_{94}\text{Pu}$  ein Isotop des künstlichen Elements Plutonium

Wie du siehst, haben die beiden schweren Isotope des Wasserstoffs sogar eigene Namen bekommen: Das Isotop mit einem Neutron heißt Deuterium und das mit zwei Neutronen heißt Tritium.

Wenn man Kernreaktionen untersucht, interessiert man sich gewöhnlich nur für die Kerne. Es ist deshalb zweckmäßig, ein eigenes Symbol für die Kerne eines Nuklids einzuführen: Wir hängen an das Nuklidsymbol noch ein K als Index an. Während also etwa das Symbol  ${}^{25}_{12}\text{Mg}$  die vollständigen Atome eines bestimmten Magnesiumnuklids darstellt, meint man mit dem Symbol  ${}^{25}_{12}\text{Mg}_K$  nur die Kerne dieses Nuklids.

Für manche Zwecke ist eine andere symbolische Darstellung der Nuklide geeigneter. Sie lehnt sich an die Darstellung an, die man in der Chemie benutzt, um Moleküle zu charakterisieren.

Die Formel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gibt uns den Aluminium- und den Sauerstoffgehalt des Aluminiumoxids an. Entsprechend kann man Nuklide auch dadurch charakterisieren, dass man den Gehalt an Protonen p und an Neutronen n angibt. Hier einige Beispiele für die Übersetzung in diese Schreibweise:



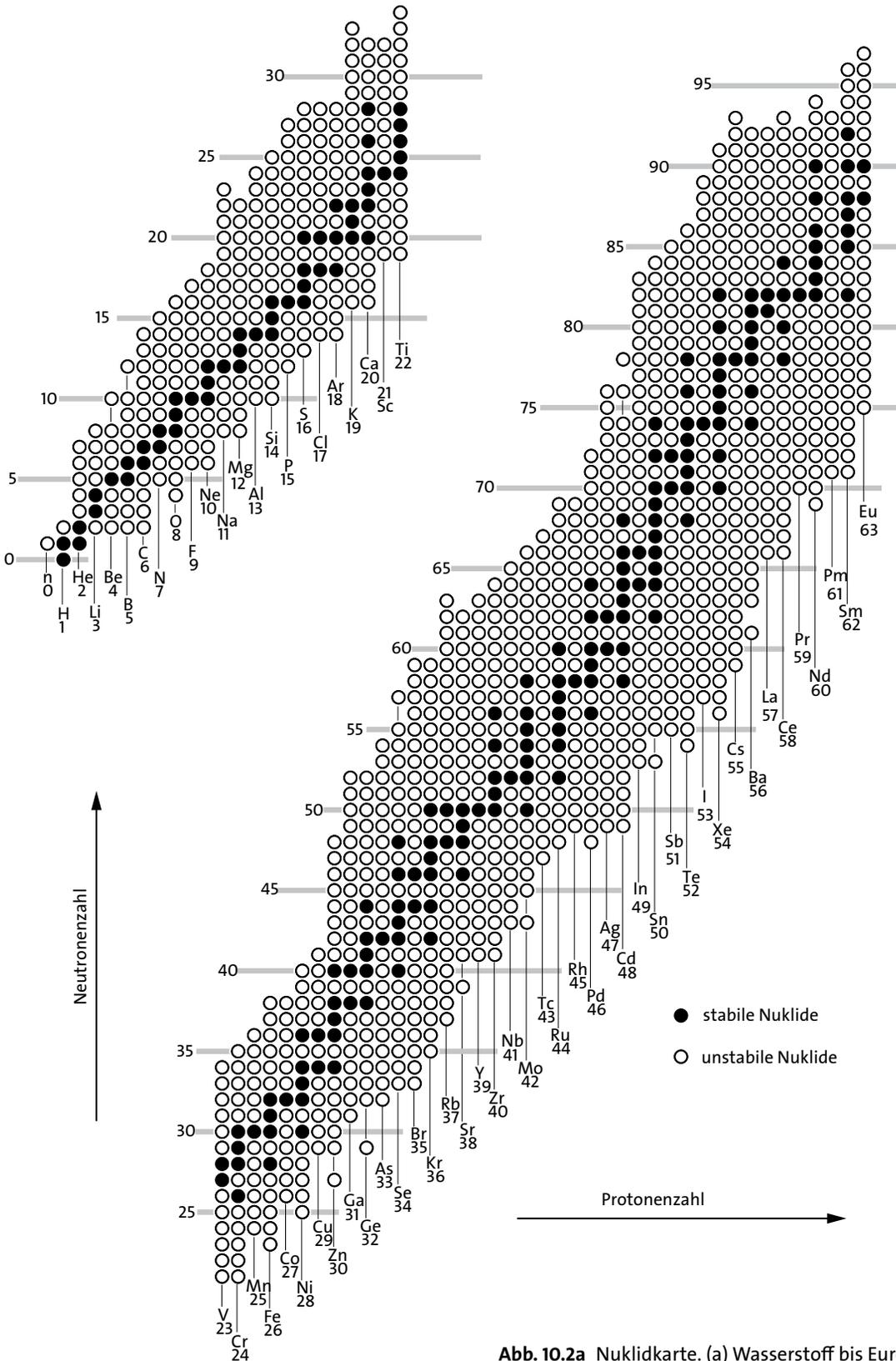


Abb. 10.2a Nuklidkarte. (a) Wasserstoff bis Europium

## 10.2 Elemente, Nuklide, Isotope

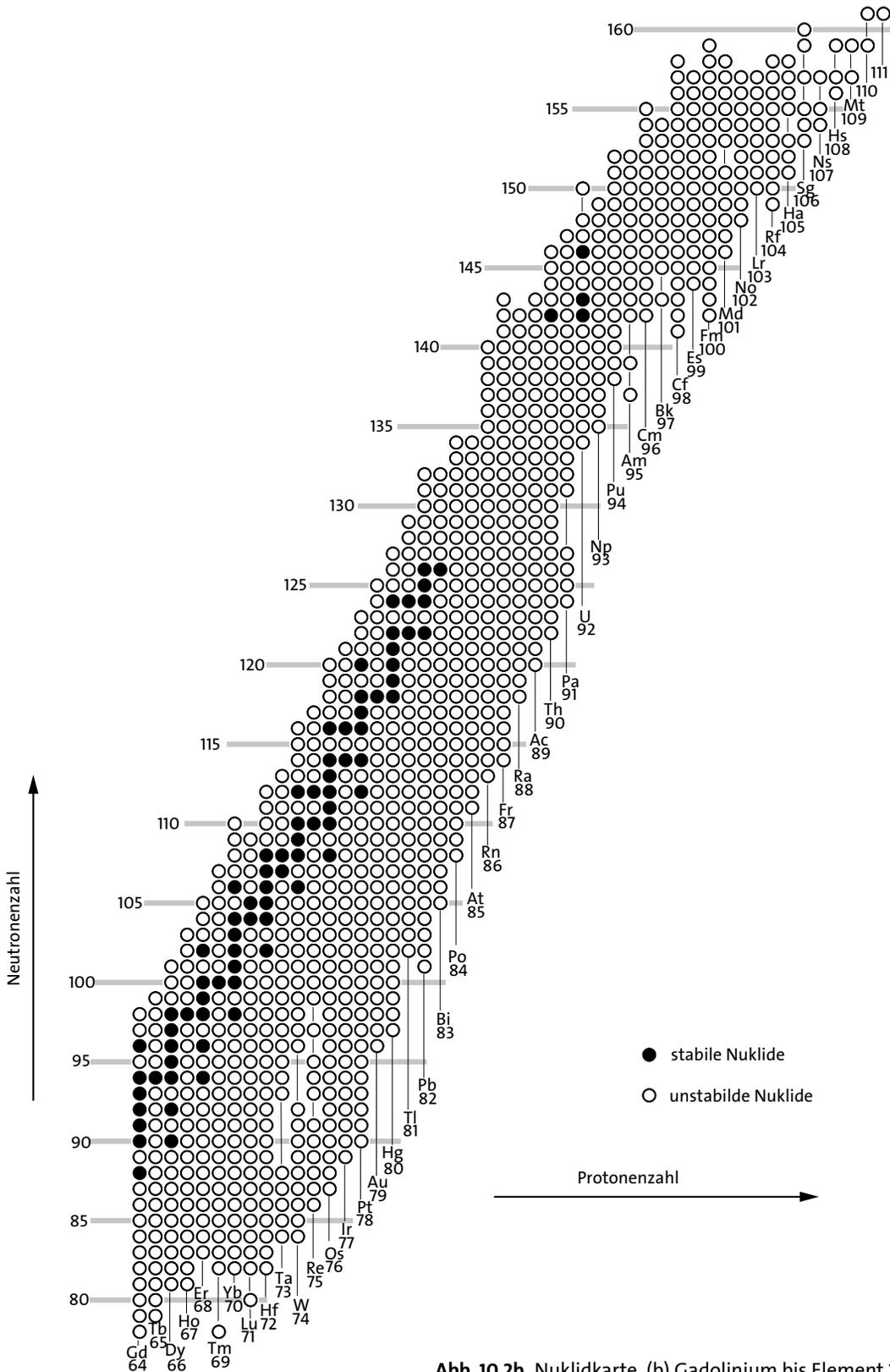


Abb. 10.2b Nuklidkarte. (b) Gadolinium bis Element 111

Was für Nuklide gibt es aber überhaupt? Wir hatten schon gesagt, dass es insgesamt etwa 2000 sind. Das bedeutet, dass nicht jede beliebige Gehaltsformel einem existierenden Nuklid entspricht. So gibt es zum Beispiel kein  $p_{n3}$ , also Wasserstoff mit 3 Neutronen, oder es gibt nicht das Sauerstoffisotop  $p_8n_{17}$  oder das Zinkisotop  $p_{30}n_{50}$ .

Die Frage danach, welche Nuklide es gibt, d. h. welche Kombinationen der Kernmaterie  $p$  und der Kernmaterie  $n$  möglich sind, ist ähnlich wie zum Beispiel die Frage danach, welche chemischen Verbindungen der Stoffe Wasserstoff und Sauerstoff es gibt. Welche der in der folgenden Reihe aufgeführten Wasserstoff-Sauerstoffverbindungen können existieren?

O, H, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HO, H<sub>2</sub>O, HO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>O, H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, HO<sub>3</sub>, ...

Einige davon sind alte Bekannte: der molekulare Wasserstoff H<sub>2</sub>, der molekulare Sauerstoff O<sub>2</sub>, das Wasser H<sub>2</sub>O. Von anderen der aufgeführten Stoffe weißt du sicher, dass es sie nicht gibt. Vielleicht kennst du aber auch das Wasserstoffperoxid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Diesen Stoff gibt es zwar, aber er ist nicht stabil. Ebenso das Ozon O<sub>3</sub>. Der atomare Wasserstoff H ist noch viel instabiler.

Ähnlich ist es bei den Nukliden. Die meisten denkbaren Kombinationen  $p_xn_y$  gibt es gar nicht. Und von denen, die existieren können, ist nur ein kleiner Bruchteil stabil.

Abb. 10.2 zeigt die *Nuklidkarte*, ein Diagramm, mit allen Nukliden, die man kennt. Die Anzahl der Protonen wurde nach rechts, die der Neutronen nach oben aufgetragen. Jeder Kreis entspricht einem der bisher gefundenen oder hergestellten Nuklide. Nur die vollen

Kreise stellen aber stabile Nuklide dar. Die den leeren Kreisen entsprechenden sind instabil, sie zerfallen nach und nach von selbst. Für manche ist die Lebensdauer sehr klein, für andere ist sie groß.

Es gibt etwa 100 verschiedene Elemente und 2000 verschiedene Nuklide.

### Aufgaben

1. Wähle aus der Nuklidkarte, Abb. 10.2, sechs Nuklide mit verschiedenen Ordnungszahlen aus und stelle sie symbolisch dar auf die beiden Arten, die im Text beschrieben wurden.
2. Formuliere eine grobe Regel dafür, wie bei den existierenden Nukliden das Verhältnis von Protonen zu Neutronen ist, und zwar zum einen für leichte Elemente (bis zu etwa 20 Protonen) und zum anderen für schwere Elemente. Benutze dazu die Nuklidkarte, Abb. 10.2.
3. Wie viele stabile Nuklide gibt es?
4. Welches ist das schwerste stabile Nuklid?
5. Welches sind die stabilen Isotope des Neons?
6. Welches ist das leichteste Element, das kein stabiles Isotop hat?
7. Welches Element hat die meisten Isotope? Wie viele sind es? Wie viele davon sind stabil?

## 10.3 Die Anregung von Kernen

Wie die Atomhülle, so lässt sich auch der Kern verformen, und wie die Hülle, so rastet auch der Kern in bestimmte Formen ein. Die wichtigsten Unterschiede: Erstens braucht man zum Verformen eines Atomkerns etwa eine Million mal mehr Energie als zum Verformen der Hülle, und zweitens ist die Dauer eines Übergangs zwischen zwei Zuständen des Kerns nur etwa ein Millionstel der Übergangszeit in der Hülle, Tab. 10.2.

Wir haben es im Folgenden oft mit Energien der Größenordnungen  $10^{-12}$  bis  $10^{-15}$  Joule zu tun. Es ist daher praktisch, die Abkürzung „pico“ für  $10^{-12}$  zu benutzen:  $10^{-12}$  J = 1 pJ. Abb. 10.3 zeigt die Energieleiter eines Thalliumisotops.

Auch die Methoden der Anregung sind im Prinzip dieselben wie bei der Hülle.

So kann man einen Kern mit Photonen anregen. Diese müssen genau die Energie haben, die dem Übergang vom Grundzustand in den angeregten Zustand entspricht. Die Energie darf nicht zu gering sein, sie darf aber auch nicht zu groß sein. Man braucht, wie schon gesagt, viel mehr Energie, als zur Anregung der Hülle. Bei den Photonen muss es sich also um  $\gamma$ -Strahlung

	typische Anregungsenergie	typische Übergangszeit
Atomhülle	$10^{-19}$ J	$10^{-8}$ s
Atomkern	$10^{-13}$ J = 0,1 pJ	$10^{-14}$ s

Tab. 10.2

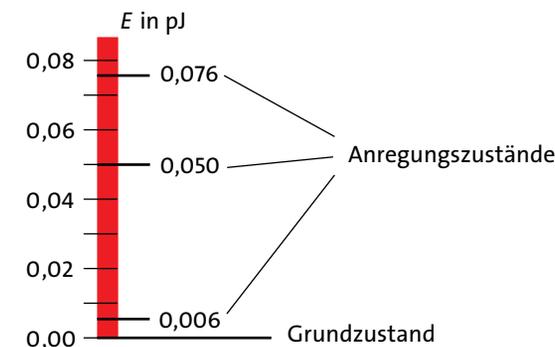
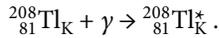


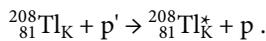
Abb. 10.3 Energieleiter des Thalliumisotops

## 10.4 Die Trennenergie

lung handeln. Ein Beispiel für einen solchen Prozess ist die Anregung eines Thalliumkerns:

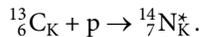


Man kann Kerne aber auch mit Teilchen anregen, die eine Ruhmasse haben, wie Elektronen, Protonen oder Neutronen. (Auch dieser Vorgang hat seine Entsprechung bei der Anregung der Hülle.) In diesem Fall muss das anregende Teilchen genug Energie mitbringen, es darf aber auch mehr Energie haben, als für die Anregung nötig ist. Das wegfliegende Teilchen kann ja die übrige Energie wieder mitnehmen. Als Beispiel betrachten wir wieder den Thalliumkern:



Hier stellt  $p'$  ein schnelles Proton dar,  $p$  ein langsames.

Auch die dritte Methode, einen angeregten Kern herzustellen, hat ihr Analogon bei der Atomhülle: Bei manchen chemischen Reaktionen entstehen Reaktionsprodukte im angeregten Zustand. Ein Beispiel ist eine Gasflamme. Genauso liegen die Reaktionsprodukte bei Kernreaktionen oft im angeregten Zustand vor. Wir werden Kernreaktionen später noch sehr ausführlich diskutieren. Hier sei schon ein erstes Beispiel genannt: Ein bestimmtes Kohlenstoffisotop reagiert mit einem Proton zu einem angeregten Stickstoffisotop:



Wie die Atomhülle, so lässt sich auch der Atomkern anregen. Im angeregten Zustand hat der Kern eine andere Form als im Grundzustand. Beim Anregen wird eine bestimmte Menge Energie im Kern gespeichert.

Du erinnerst dich, dass es sich bei Masse und Energie um dieselbe physikalische Größe handelt. Misst man die Größe in der Einheit kg, so nennt man sie Masse. Energie nennt man sie, wenn man sie in Joule misst. Man kann aber die eine Maßeinheit leicht in die andere umrechnen. In anderen Worten: Man kann Masse in Energie umrechnen.

Die Umrechnung geschieht nach der Formel

$$E = k \cdot m$$

$k = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$  ist der konstante Umrechnungsfaktor.

Wenn wir einem System Energie zuführen, wird es schwerer. In vielen Fällen ist aber die Energiezunahme, verglichen mit der Gesamtenergie des Systems, so

klein, dass man das Schwerwerden gar nicht nachweisen kann. So ändert sich die Masse eines Atoms beim Anregen der Hülle so wenig, dass man davon fast nichts merkt.

Anders ist es bei der Anregung von Atomkernen. Wir betrachten die Anregung des Thalliumisotops  ${}^{208}_{81}\text{Tl}$ , dessen Energieleiter Abb. 10.3 zeigt, in den zweiten angeregten Zustand. Hierzu muss man ihm eine Energie von 0,05 pJ zuführen. Wir rechnen um in kg:

$$m = \frac{E}{k} = \frac{0,05 \cdot 10^{-12} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} = 0,56 \cdot 10^{-30} \text{ kg.}$$

Verglichen mit der Gesamtmasse des Thalliumatoms ist dies zwar immer noch wenig. Es ist aber fast schon so viel wie die Masse eines Elektrons ( $0,9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ ).

Beim Anregen wird ein Kern schwerer.

### Aufgaben

1. Die Masse eines Thalliumatoms beträgt  $3,50 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ . Um welchen Bruchteil der Gesamtmasse wird das Atom schwerer a) bei einer typischen Anregung der Atomhülle, b) bei einer typischen Anregung des Kerns?
2. Kann man die Masse von 1 mol eines Stoffes, dessen Kerne angeregt sind, von der Masse desselben Stoffes mit den Kernen im Grundzustand mithilfe einer Waage unterscheiden?

## 10.4 Die Trennenergie

Um zwei aneinanderhängende Magneten voneinander zu trennen, braucht man Energie. Die getrennten Magneten haben zusammen also mehr Energie als die aneinanderhängenden. Da Energie gleich Masse ist, bedeutet das, dass die getrennten Magneten schwerer sind, als die zusammenhängenden, Abb. 10.4. Allerdings ist der Effekt so klein, dass man ihn niemals in einem Experiment wie dem von Abb. 10.4 nachweisen könnte.

Um aus einem Kern ein Proton herauszuholen, braucht man Energie. Kern und Proton zusammen haben daher weniger Energie als Kern und Proton getrennt. Holt man aus einem  ${}^{14}_7\text{N}$ -Kern ein Proton heraus, so entsteht ein  ${}^{13}_6\text{C}$ -Kern. Der  ${}^{14}_7\text{N}$ -Kern ist leichter als der  ${}^{13}_6\text{C}$ -Kern und das Proton zusammen, Abb. 10.5. Hier ist der Effekt wesentlich größer als im Beispiel mit den Magneten, und er ist durchaus nachweisbar.

Dasselbe gilt natürlich für einen Kern, aus dem man ein Neutron herausholt. Auch beim Abtrennen eines Neutrons wird das System schwerer, denn man braucht für den Vorgang Energie.

Wir wollen nun in Gedanken einen Atomkern nach und nach in einzelne Protonen und Neutronen zerlegen. Für diese vollständige Zerlegung eines Nuklidkerns braucht man eine ganz bestimmte Energiemenge, die *Trennenergie*. Sie hat für jedes Nuklid einen anderen Wert. Wir brauchen diese Energiewerte später, um zu entscheiden, in welche Richtung eine Kernreaktion läuft. Die Tabelle im Anhang enthält die Trennenergien von etwa 1000 Nukliden.

Zum Zerlegen eines Kerns in Protonen und Neutronen braucht man Energie, die Trennenergie. Die Bestandteile sind daher zusammen schwerer als der Kern.

### Aufgaben

1. Die Trennenergie ist näherungsweise proportional zur Gesamtzahl von Protonen und Neutronen. Wähle fünf Nuklide der Tabelle im Anhang aus, und stelle für sie die Trennenergie über der Gesamtzahl von Protonen und Neutronen grafisch dar.
2. Trennt man von einem  $^{15}_6\text{C}$ -Kern ein Neutron ab, so erhält man einen  $^{14}_6\text{C}$ -Kern. Trennt man von diesem ein Neutron ab, so entsteht ein  $^{13}_6\text{C}$ -Kern, nach Abtrennen eines dritten Neutrons ein  $^{12}_6\text{C}$ -Kern usw. Wie viel Energie braucht man jeweils zum Abtrennen eines weiteren Neutrons? Stelle diese Energie grafisch dar über der Gesamtzahl von Protonen und Neutronen des jeweiligen Kohlenstoffisotops. Tue das Entsprechende für die Heliumisotope. Was fällt dir auf?

## 10.5 Erhaltungsgrößen

Es ist unser Ziel, vorauszusagen, was für Kernreaktionen möglich sind. Das Verfahren, das wir verwenden werden, ist dir im Prinzip bekannt. Wir werden die Tatsache ausnutzen, dass bei einer Reaktion bestimmte mengenartige Größen ihren Wert nicht verändern dürfen.

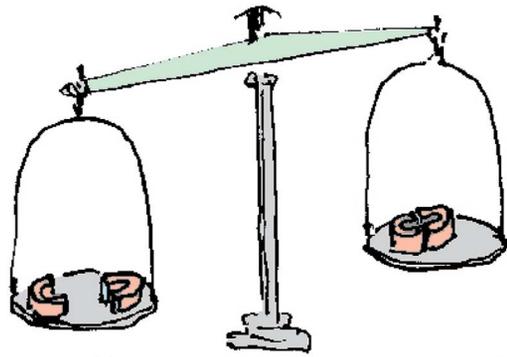
Du hast schon einige solcher Größen kennengelernt. Man nennt sie *Erhaltungsgrößen*.

So ist die Energie eine Erhaltungsgröße. Bei jedem Vorgang muss die Energiemenge insgesamt erhalten bleiben. Dasselbe gilt für die elektrische Ladung.

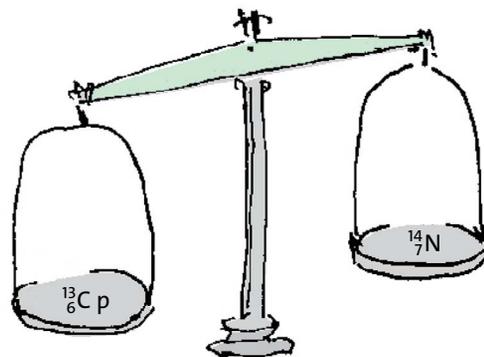
Betrachte den Vorgang, der durch die folgende Reaktionsgleichung beschrieben wird:



Eine solche Reaktion kann nicht stattfinden, denn hier ist die Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt. Die

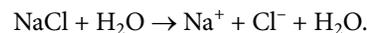


**Abb. 10.4** Die getrennten Magneten haben mehr Energie als die zusammenhängenden. Der Effekt ist allerdings so gering, dass man ihn durch eine Wägung nicht nachweisen kann.



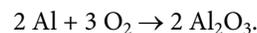
**Abb. 10.5** Ein  $^{14}_7\text{N}$ -Kern ist leichter als ein  $^{13}_6\text{C}$ -Kern und ein Proton zusammen.

Edukte (linke Seite) sind insgesamt neutral, die Produkte (rechts) tragen insgesamt eine negative elektrische Ladung. Eine erlaubte Reaktion ist dagegen:

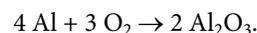


Hier stimmt die Ladungsbilanz.

Ein anderer verbotener Vorgang ist:



Hier wird ein anderes Erhaltungsgesetz verletzt: Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome Erhaltungsgrößen. Und die Atomzahlen stimmen auf der rechten und linken Seite der Reaktionsgleichung nicht überein. Eine mögliche Reaktion ist dagegen:



Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome Erhaltungsgrößen.

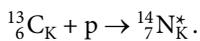
## 10.6 Teilchen und Antiteilchen

Also: Um eine chemische Reaktionsgleichung einzurichten, machen wir Gebrauch von der Erhaltung der elektrischen Ladung und von der Erhaltung der Atomzahlen.

Mit der Erhaltung der Atomzahlen hat es nun noch eine Bewandnis: Dieses Erhaltungsgesetz gilt nämlich nicht immer. Wir haben betont, dass es bei „chemischen Reaktionen“ gilt. Wir werden gleich sehen, dass es zum Beispiel nicht für Kernreaktionen gilt. Also:

Manche Erhaltungsgesetze gelten nur unter bestimmten Bedingungen.

Wir hatten schon ein Beispiel einer Kernreaktion kennengelernt:



Du siehst, dass links ein Kohlenstoffatomkern steht, rechts aber nicht. Auch steht links ein Proton, d. h. ein Wasserstoffatomkern und rechts nicht. Rechts dagegen steht ein Stickstoffkern und links nicht. Die Anzahl der Atome oder Atomkerne bleibt also bei dieser Kernreaktion nicht erhalten.

Wir stehen nun vor einem Problem: Wir haben keine Regel für das Einrichten der Reaktionsgleichung mehr. Oder ist etwa jede beliebige Reaktionsgleichung erlaubt? Die Erfahrung zeigt, dass das keineswegs der Fall ist. Die Untersuchung von Kernreaktionen hat gezeigt, dass es noch andere, früher noch nicht bekannte Größen gibt, für die ein Erhaltungssatz gilt: die baryonische Ladung und die leptonische Ladung. Für jeden Kern, und überhaupt jedes Teilchen hat die *baryonische Ladung* und die *leptonische Ladung* einen bestimmten Wert. Die baryonische Ladung der Teilchen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung (der Edukte) muss nun immer gleich der der rechten Seite

(der Produkte) sein. Ebenso muss die leptonische Ladung von Edukten und Produkten gleich sein.

Baryonische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Leptonische Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Bevor wir uns mit dem Einrichten einer Kernreaktionsgleichung unter diesem neuen Gesichtspunkt befassen, müssen wir aber unsere Kenntnisse über die Elementarportionen noch etwas erweitern.

### Aufgabe

1. Welche mengenartigen Größen kennst du? Welche davon sind Erhaltungsgrößen, welche nicht?

## 10.6 Teilchen und Antiteilchen

Beim Zerlegen von Hülle und Kern waren uns bisher drei verschiedene Arten von elementarer Materie, von elementaren Teilchen begegnet: die Elektronen, die Protonen und die Neutronen. Man hat nun außer diesen drei Teilchensorten noch einige andere entdeckt. Der größte Teil der uns umgebenden Natur besteht zwar nur aus Elektronen, Protonen und Neutronen. Die anderen Teilchen werden vorwiegend künstlich erzeugt.

Die Existenz dieser neuen Teilchen scheint die Kernreaktionen zunächst komplizierter zu machen. In Wirklichkeit lassen sich aber alle diese Teilchen in sehr systematischer und übersichtlicher Art zusammenfassen. In Tabelle 10.3 sind sie mit einigen ihrer Eigenschaften aufgeführt. Wir wollen diese Tabelle ausführlich diskutieren.

Name, Symbol	Ruhenergie	elektrische*	Ladung	
			baryonische	leptonische
Photon $\gamma$	0 pJ	0	0	0
Elektron e	0,0819 pJ	-1	0	1
Antielektron $\bar{e}$	0,0819 pJ	1	0	-1
Neutrino $\nu$	fast 0 pJ	0	0	1
Antineutrino $\bar{\nu}$	fast 0 pJ	0	0	-1
Proton p	150,3277 pJ	1	1	0
Antiproton $\bar{p}$	150,3277 pJ	-1	-1	0
Neutron n	150,5349 pJ	0	1	0
Antineutron $\bar{n}$	150,5349 pJ	0	-1	0

\* in Vielfachen der Elementarladung

Tab. 10.3

### Die alten Bekannten

In der linken Spalte stehen die Namen der Teilchen. Vier dieser Teilchen sind alte Bekannte: das Photon, das Elektron, das Proton und das Neutron.

### Das Neutrino

Eigentlich sollte es auch ein alter Bekannter sein, denn die Welt ist voll davon. Es sind Teilchen, von denen sehr viele frei herumfliegen: etwa  $10^{13}$  Stück pro Quadratcentimeter und Sekunde. Sie kommen vor allem von der Sonne. Sie entstehen dort in derselben Reaktion, die auch dafür verantwortlich ist, dass die Sonne Licht zu uns schickt. Man merkt von diesen Neutrinos so wenig, weil sie alle Materie fast ungehindert durchdringen. Es gibt daher fast keine Reaktion, mit der man sie nachweisen könnte. Die meisten der Sonnenneutrinos durchdringen die ganze Erde, ohne mit irgendeinem anderen Teilchen zu reagieren, oder auch nur abgelenkt zu werden.

Mithilfe der Neutrinos können wir etwas über die Reaktionen erfahren, die tief im Innern der Sonne ablaufen. Da die Neutrinos aber so wenig reaktionsfreudig sind, sind die Experimente zur Messung der Neutrinos sehr aufwendig. Die Nachweisgeräte müssen sehr groß sein, damit die Chance, dass darin ein Neutrino hängen bleibt, nicht zu klein ist. Außerdem müssen die Experimente abgeschirmt werden gegen alle anderen Teilchen, die in irgendwelchen Kernreaktionen entstehen oder aus dem Weltall kommen. Daher werden solche Experimente tief unter der Erde gemacht: in Tunneln oder in alten Bergwerken.

Nun wurde die Existenz von Neutrinos aber schon zu einer Zeit vermutet, als man an solche aufwendigen Experimente noch nicht denken konnte. Wie war das möglich? Es geschah mit einer Methode, die sich in der Mikrophysik schon öfter bewährt hat: Man untersucht eine bestimmte Reaktion und entdeckt, dass irgendein Erhaltungssatz, von dessen Gültigkeit man überzeugt ist, verletzt zu sein scheint. Im Fall der Neutrinos stellte man fest, dass die Energie bei einer bestimmten Reaktion nicht erhalten war. Man schloss daraus, dass an der Reaktion ein weiteres, bis dahin unbekanntes und unbemerktes Teilchen teilgenommen haben musste.

Neutrinos reagieren nur sehr schwach mit anderen Teilchen.

### Antiteilchen

Die Tabelle enthält noch vier weitere Teilchen. Die Namen dieser Teilchen beginnen alle mit dem Bestimmungswort „Anti-“: das Antielektron, das Antineutri-

no, das Antiproton und das Antineutron. Du überzeugst dich leicht davon, dass sie eine große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Teilchen ohne das „Anti“ haben: Sie stimmen mit diesen völlig überein, bis auf die Vorzeichen der drei Ladungen. So hat das Proton eine positive elektrische und eine positive baryonische Ladung, das Antiproton hat negative elektrische und baryonische Ladung.

Man sagt, das Antiproton ist das Antiteilchen zum Proton, und das Proton ist das Antiteilchen zum Antiproton. Teilchen und Antiteilchen bilden also ein Pärchen von zwei sehr ähnlichen Partnern.

Teilchen und Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung.

Elektronen und Neutrinos, sowie deren Antiteilchen tragen leptonische Ladung.

Protonen und Neutronen, sowie deren Antiteilchen tragen baryonische Ladung.

Zum Photon gibt es kein Antiteilchen.

## 10.7 Ladungsbilanzen

Wir sind nun in der Lage, eine Kernreaktion einzurichten. Wir betrachten zunächst einige sehr einfache Beispiele.

Gibt es eine Reaktion



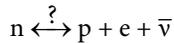
bei der sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron verwandelt? Wir machen die Bilanzen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung:

	n	p + e
elektrische Ladung	0	1 + (-1)
baryonische Ladung	1	1 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 1

Die elektrische Ladung von Edukten und Produkten ist dieselbe, nämlich null. Die Erhaltung der elektrischen Ladung wird also befolgt. Auch die baryonische Ladung hat links und rechts denselben Wert, nämlich 1. Die leptonische Ladung dagegen bliebe bei der Reaktion nicht erhalten: Sie ist null für die linke und eins für die rechte Seite. Die Reaktion kann daher nicht stattfinden, und zwar weder von links nach rechts noch von rechts nach links.

## 10.8 Die Reaktionsrichtung

Wir können die Reaktionsgleichung aber leicht reparieren, etwa indem wir rechts noch ein Antineutrino hinzufügen:

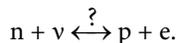


Diesmal stimmt die Bilanz:

	n	p + e + $\bar{\nu}$
elektrische Ladung	0	1 + (-1) + 0
baryonische Ladung	1	1 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 1 + (-1)

Auch die leptonische Ladung ist jetzt links und rechts gleich, nämlich null. Diese Reaktion findet in der Tat statt: Ein freies Neutron zerfällt von selbst in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino.

Man kann Gleichung (10.1) auch dadurch in Ordnung bringen, dass man auf der linken Seite ein Neutrino hinzufügt:



Auch diese Reaktion ist erlaubt, wie die Bilanztafel zeigt:

	n + $\nu$	p + e
elektrische Ladung	0 + 0	1 + (-1)
baryonische Ladung	1 + 0	1 + 0
leptonische Ladung	0 + 1	0 + 1

### Aufgabe

- Richte eine Gleichung ein, die die Reaktion eines Protons mit einem Antiproton beschreibt. Es gibt mehrere Möglichkeiten.

## 10.8 Die Reaktionsrichtung

Eine wichtige Frage ist noch offen: In welche Richtung läuft die Reaktion, die wir eingerichtet haben?

Die Entscheidung hierüber können wir wieder durch Anwendung eines Erhaltungsgesetzes treffen. Wir haben bis jetzt noch nicht die Energieerhaltung berücksichtigt. Auch die Energiebilanz einer Reaktion muss natürlich stimmen. Die Energie von Edukten und Produkten muss gleich sein. Wenn wir die Ruheenergie der Teilchen auf der einen Seite einer Reaktionsgleichung mit der der anderen Seite vergleichen, so werden wir es allerdings nie erleben, dass die Energien

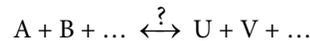
genau gleich sind. Tatsächlich brauchen aber die Ruheenergien auch gar nicht gleich zu sein.

Wenn die Ausgangskerne oder -Teilchen ruhen, so ist die Energie der Ausgangsteilchen die Summe der Ruheenergien dieser Teilchen. Die gesamte Ruheenergie der entstehenden Teilchen darf sicher nicht größer sein als die der Ausgangsteilchen. Sie darf aber sehr wohl kleiner sein. In diesem Fall bliebe von der Energie der Ausgangsteilchen etwas übrig. Diese übrige Energie lässt sich aber immer unterbringen: Sie kann den entstehenden Teilchen einfach mitgegeben werden, indem diese in schnelle Bewegung versetzt werden. Je schneller sich die Produktteilchen bewegen, desto mehr Energie haben sie zusätzlich zu ihrer Ruheenergie. Also: Eine Kernreaktion läuft so, dass die Ruheenergie der beteiligten Kerne und Teilchen abnimmt.

Um zu entscheiden, in welche Richtung eine Reaktion läuft, müssen wir also die gesamte Ruheenergie der Teilchen der linken Seite mit der der rechten vergleichen. Die Reaktion läuft von der hohen zur niedrigen Ruheenergie.

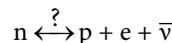
Eine Kernreaktion, bei der die Ausgangsteilchen ruhen, läuft stets in Richtung abnehmender Ruheenergie.

Wir gehen nun mit unseren neuen Werkzeugen an die Arbeit. Wir wollen untersuchen, in welche Richtung eine Reaktion läuft:



### Sind Neutronen stabil?

Die Reaktion



ist in Ordnung, was die Bilanz von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung betrifft. Wir hatten uns davon schon überzeugt. Es fehlt noch die Energiebilanz.

	n	p + e + $\bar{\nu}$
elektrische Ladung	0	1 + (-1) + 0
baryonische Ladung	1	1 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 1 + (-1)
Ruheenergie in pJ	n 150,5349	p 150,3277 e 0,0819
Summe in pJ	150,535	150,410

Wir fügen sie in die Tafel mit den Ladungsbilanzen ein: die Summe der Ruhenergien der linken Seite und die Summe der Ruhenergien der rechten Seite. Wir entnehmen die Ruhenergien der einzelnen Teilchen der Tabelle im Anhang.

Die Ruhenergie des Neutrons ist größer als die von Proton, Elektron und Antineutrino zusammen. Die Reaktion läuft also von links nach rechts. Wir ziehen die kleinere Summe von der größeren ab und erhalten:

$$\Delta E = 150,535 \text{ pJ} - 150,410 \text{ pJ} = 0,125 \text{ pJ}.$$

Tatsächlich beobachtet man, dass freie Neutronen, d. h. Neutronen, die nicht in einem Kern gebunden sind, von selbst zerfallen. Man kann Neutronen künstlich erzeugen. Sie zerfallen aber, wenn man sie vorsichtig aufbewahrt, in wenigen Minuten. Tatsächlich ist ihre Lebensdauer meist noch viel kürzer, denn sie sind sehr reaktionsfreudig und verbinden sich schnell mit den verschiedensten Atomkernen, die sie antreffen.

**Sind Protonen stabil?**

Dass Protonen nicht zerfallen, ist dir bekannt. Wir wollen uns davon überzeugen, dass auch unser kernphysikalisches Werkzeug dieses Ergebnis liefert. Was die Bilanzen der drei Ladungen betrifft, wäre die folgende Reaktion erlaubt:

$$p \rightarrow n + \bar{e} + \nu$$

Wir legen eine Tafel mit den Bilanzen an:

	p		n + $\bar{e}$ + $\nu$	
elektrische Ladung	1		0 + 1 + 0	
baryonische Ladung	1		1 + 0 + 0	
leptonische Ladung	0		0 + (-1) + 1	
Ruhenergie in pJ	p	150,3277	n	150,5349
			$\bar{e}$	0,0819
Summe in pJ	150,328		150,617	

Die Ruhenergie des Protons ist kleiner als die von Neutron und Antielektron zusammen. Die Reaktion kann also nur von rechts nach links laufen: Das Proton kann nicht zerfallen.

**Ist Tritium stabil?**

Wir versuchen es mit einem Zerfall in einen Heliumkern, ein Elektron und ein Antineutrino:

$${}^3_2\text{H}_K \xleftrightarrow{?} {}^4_2\text{He}_K + e + \bar{\nu}$$

Der Übersichtlichkeit halber tragen wir die Reaktionsgleichung in Zukunft immer als Inhaltsformel in die Tabelle ein.

$$pn_2 \xleftrightarrow{?} p_2n + e + \bar{\nu}$$

Die Ladungsbilanzen sind in Ordnung.

	pn <sub>2</sub>		p <sub>2</sub> n + e + $\bar{\nu}$	
elektrische Ladung	1		2 + (-1) + 0	
baryonische Ladung	3		3 + 0 + 0	
leptonische Ladung	0		0 + 1 + (-1)	
Ruhenergie in pJ	p	150,3277	p	2 · 150,3277
	n	2 · 150,5349	n	150,5349
			e	0,0819
-E <sub>T</sub> in pJ	-1,359		-1,2364	
Summe in pJ	450,0385		450,0358	

Wir berechnen die Ruhenergie eines Kerns, indem wir von der Ruhenergie der Teilchen, aus denen er besteht, die Trennenergie abziehen.

E<sub>T</sub>(pn<sub>2</sub>) und E<sub>T</sub>(p<sub>2</sub>n) wurden aus der Tabelle abgelesen. Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann also von links nach rechts laufen.

Tatsächlich ist Tritium instabil. Normales Wasser enthält eine sehr geringe Menge Tritium. Dieses Tritium zerfällt gemäß der Reaktion, die wir gerade untersucht haben. In 1 kg Wasser zerfallen pro Minute etwa 45 Tritiumkerne. Wie kann es aber überhaupt sein, dass Wasser Tritium enthält? Müsste nicht alles Tritium, das aus irgendeinem Grund einmal in das Wasser hineingeraten ist, längst zerfallen sein?

Tritium zerfällt nicht nur, es wird auch ständig nachproduziert, in einer Reaktion mit der so genannten kosmischen Strahlung. Die Erde wird von einem ständigen Strom von Teilchen sehr hoher Energie – vorwiegend Protonen und Heliumkernen – getroffen. Diese Teilchen verursachen zahlreiche Kernreaktionen in der Atmosphäre. Auf diese Art entstehen viele instabile Nuklide.

**Der Zerfall von <sup>14</sup>C<sub>K</sub>**

Durch die kosmische Strahlung wird auch das instabile Kohlenstoffisotop <sup>14</sup>C<sub>K</sub> produziert. Es zerfällt gemäß

$${}^{14}_6\text{C}_K \rightarrow {}^{14}_7\text{N}_K + e + \bar{\nu}$$

oder

$$p_6n_8 \rightarrow p_7n_7 + e + \bar{\nu}. \tag{10.2}$$

## 10.9 Kernstrahlung

Wir schreiben von jetzt an für die Energiebilanz alle die Beiträge nicht mehr auf, die sich in der Rechnung sowieso wegheben: die Ruhenergien derjenigen Teilchen, die in der Gehaltsformel sowohl links als auch rechts auftreten. So berücksichtigen wir im Fall von Gleichung (10.2) nicht mehr: 6 Protonen und 7 Neutronen. Die Bilanztafel sieht dann so aus:

	$p_6 n_8$	$p_7 n_7 + e + \bar{\nu}$
elektrische Ladung	6	$7 + (-1) + 0$
baryonische Ladung	14	$14 + 0 + 0$
leptonische Ladung	0	$0 + 1 + (-1)$
Ruhenergie in pJ	n 150,5349	p 150,3277 e 0,0819
$-E_T$ in pJ	-16,87	-16,77
Summe in pJ	133,66	133,64

Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann ablaufen.

### Der Zerfall von Uran

Die Isotope des Urans können auf sehr viele verschiedene Arten zerfallen. Wir betrachten als Beispiel eine der vielen Zerfallsmöglichkeiten des Uranisotops  $^{235}_{92}\text{U}_K$ , den Zerfall in Barium und Krypton:



	$p_{92} n_{143}$	$p_{56} n_{85} + p_{36} n_{56} + 2n$
elektrische Ladung	92	$56 + 36 + 0$
baryonische Ladung	235	$141 + 92 + 2$
leptonische Ladung	0	$0 + 0 + 0$
$-E_T$ in pJ	-285,80	$-188,09 - 129,78$
Summe in pJ	-285,80	-317,87

Diese Reaktion ist eine von vielen, die im Kernreaktor zur Energiegewinnung ausgenutzt werden.

### Die Synthese von Kohlenstoff

Wir untersuchen eine Reaktion, die in Sternen abläuft, und die für die Entstehung des Kohlenstoffs im Universum zuständig ist:  $3\ ^4_2\text{He}_K \rightarrow\ ^{12}_6\text{C}_K$ .

	$3p_2 n_2$	$p_6 n_6$
elektrische Ladung	$3 \cdot 2$	6
baryonische Ladung	$3 \cdot 4$	12
leptonische Ladung	0	0
$-E_T$ in pJ	$-3 \cdot 4,53$	-14,77
Summe in pJ	-13,59	-14,77

Dass diese Reaktion auf der Erde normalerweise nicht abläuft, liegt an dem hohen Reaktionswiderstand. Vermindern kann man den Widerstand mit den in der Chemie üblichen Methoden: durch Temperaturerhöhung oder Verwendung eines Katalysators. Da es sich um eine Kernreaktion handelt, ist die Temperatur, bei der die Reaktion zu laufen beginnt, aber sehr hoch: Sie muss über 100 Millionen Kelvin betragen. In Sternen wird diese Temperatur erreicht.

### Aufgaben

- Prüfe, ob Deuterium auf eine der folgenden Arten zerfallen kann:  
 $pn \rightarrow p + n$   
 $pn \rightarrow 2p + e + \bar{\nu}$   
 $pn \rightarrow 2n + \bar{e} + \nu$
- Das Kaliumisotop  $^{40}_{19}\text{K}$  ist instabil. Nach welchen der folgenden Reaktionen kann es zerfallen?  
 $^{40}_{19}\text{K}_K \rightarrow ^{20}_9\text{F}_K + ^{20}_{10}\text{Ne}_K$   
 $^{40}_{19}\text{K}_K \rightarrow ^4_2\text{He}_K + ^{36}_{17}\text{Cl}_K$   
 $^{40}_{19}\text{K}_K \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca}_K + e + \bar{\nu}$   
 $^{40}_{19}\text{K}_K \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar}_K + \bar{e} + \nu$
- Prüfe, welche der beiden Reaktionen ablaufen kann:  
 $^{14}_6\text{C}_K \rightarrow ^4_2\text{He}_K + ^8_4\text{Be}_K$   
 $^{14}_6\text{C}_K \rightarrow 2\ ^7_3\text{Li}_K$
- In der Sonne reagieren vier Protonen zu einem  $^4_2\text{He}$ -Kern. Welche Teilchen entstehen dabei außerdem? Stelle die Energiebilanz der Reaktion auf.

## 10.9 Kernstrahlung

Wenn man sich ein bestimmtes Nuklid vornimmt, um zu entscheiden, ob es stabil ist oder nicht, müsste man alle Zerfallsmöglichkeiten untersuchen. Man würde dabei feststellen, dass es für viele der Nuklide eine ganze Reihe verschiedener solcher Möglichkeiten gibt.

Die Beobachtung zeigt nun allerdings oft, dass das Nuklid doch stabil ist. Es zerfällt nicht, obwohl es von der Bilanz der drei Ladungen und der Energie her erlaubt wäre. Der Grund hierfür ist, dass der Reaktionswiderstand zu hoch ist – eine Erscheinung, die wir auch aus der Chemie kennen.

Und man macht noch eine andere Beobachtung: Die meisten der Zerfallsreaktionen, die tatsächlich stattfinden, lassen sich in einige wenige Klassen einteilen. Um diese Klassen geht es im Folgenden. Das Ge-

meinsame dieser typischen Reaktionen ist, dass eines der Reaktionsprodukte ein sehr kleines Teilchen ist: ein Elektron, ein Antielektron, ein Neutrino oder ein  ${}^4_2\text{He}$ -Kern.

Bei den häufigsten Zerfallsreaktionen ist eines der Reaktionsprodukte ein kleines Teilchen.

### Entstehung eines Elektrons

Ein Beispiel ist der Zerfall des Kohlenstoffisotops  ${}^{14}_6\text{C}_K$ , den wir im vorigen Abschnitt untersucht haben, siehe Gleichung (10.2).

### Entstehung eines Antielektrons

Bei einem anderen häufigen Reaktionstyp ist eines der Reaktionsprodukte ein Antielektron. Das  ${}^{40}_{19}\text{K}_K$  kann auf diese Art zerfallen:



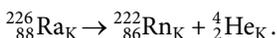
Wir überprüfen, ob die Reaktion tatsächlich erlaubt ist:

	$p_{19}n_{21}$	$p_{18}n_{22} + \bar{e} + \nu$
elektrische Ladung	19	18 + 1 + 0
baryonische Ladung	40	40 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + (-1) + 1
Ruhenergie in pJ	p 150,3277	n 150,5349 $\bar{e}$ 0,0819
$-E_T$ in pJ	-54,72	-55,08
Summe in pJ	95,61	95,54

Die linke Summe der Energiewerte ist größer als die rechte. Die Reaktion ist also erlaubt.

### Entstehung eines ${}^4_2\text{He}$ -Kerns

Ein Beispiel für diesen Reaktionstyp ist der Zerfall des Radiumisotops  ${}^{226}_{88}\text{Ra}_K$  in ein Radonisotop  ${}^{222}_{86}\text{Rn}_K$  und einen Kern des Heliumisotops  ${}^4_2\text{He}_K$ :



	$p_{88}n_{138}$	$p_{86}n_{136} + p_2n_2$
elektrische Ladung	8	86 + 2
baryonische Ladung	226	222 + 4
leptonische Ladung	0	0 + 0
Ruhenergie in pJ	0	0
$-E_T$ in pJ	-277,43	-273,68 - 4,5334
Summe in pJ	-277,43	-278,21

Bei den meisten Kernreaktionen, mit denen wir es zu tun haben, reagieren nur winzige Mengen. Der Reaktionsumsatz ist sehr, sehr gering – verglichen mit dem Umsatz bei einer typischen chemischen Reaktion. Es entsteht gewöhnlich so wenig von den Reaktionsprodukten, dass sie selbst mit den empfindlichsten Waagen nicht nachzuweisen sind. Man könnte denken, dass daher der Nachweis, dass überhaupt eine Kernreaktion stattgefunden hat, sehr schwierig ist. Nun macht sich aber der Ablauf einer Kernreaktion häufig doch sehr deutlich bemerkbar. Wenn nämlich eines der entstehenden Teilchen ein leichtes Teilchen ist, nimmt dieses den größten Teil der bei der Reaktion übrigen Energie  $\Delta E$  mit. Es fliegt mit sehr hoher Geschwindigkeit weg und kann darum auf die verschiedensten Arten nachgewiesen werden.

Während man zum Nachweis des Ablaufs einer Reaktion mit chemischen Methoden typischerweise mindestens eine Milliarde Moleküle braucht, kann man die genannten Kernzerfallsreaktionen schon erkennen, wenn nur ein einziger Kern zerfällt.

Während man zum Nachweis des Ablaufs einer Reaktion mit chemischen Mitteln sehr viele Teilchen braucht, kann man bei einer Kernreaktion oft den Zerfall eines einzigen Kerns nachweisen.

Dass es überhaupt Reaktionen der Kerne gibt, wurde auf diese Art entdeckt: Man stellte fest, dass bestimmte Stoffe eine unbekannte „Strahlung“ abgeben: irgendwelche sich schnell bewegenden Teilchen. Man sagte auch, diese Stoffe seien radioaktiv. Da die schnellen Teilchen bei Kernreaktionen entstehen, wollen wir sie Kernstrahlung nennen. Oft spricht man auch von „radioaktiver Strahlung“. Nun bedeutet das Wort radioaktiv strahlungsaktiv (radius = Strahl). Es ist aber der zerfallende Stoff, der radioaktiv ist, nicht dagegen die Strahlung.

Man hatte zunächst nur drei verschiedene Arten von Kernstrahlung entdeckt, die sich in der elektrischen Ladung unterscheiden. (Die Ladung der Teilchen war leicht festzustellen.) Bevor man genau wusste, um was es sich handelt, wurden diese drei zuerst entdeckten Strahlungsarten mit Namen versehen: Die Teilchen, die später als Heliumkerne identifiziert wurden, nannte man  $\alpha$ -Strahlen, die schnellen Elektronen wurden  $\beta$ -Strahlen genannt. Außerdem wurden bei vielen Reaktionen Photonen hoher Energie abgegeben, nämlich immer dann, wenn sich das Reaktionsprodukt zunächst in einem angeregten Zustand befindet. Diese Photonen wurden  $\gamma$ -Strahlen genannt.

Die Namen  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen haben sich bis heute erhalten, obwohl wir wissen, dass es sich dabei

## 10.10 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

ganz einfach um irgendwelche normalen Reaktionsprodukte handelt, und dass es noch viele andere Reaktionsprodukte gibt, die keinen zusätzlichen Namen bekommen haben.

Wir hatten gesagt, dass bei den meisten Zerfällen instabiler Nuklide eines der Reaktionsprodukte ein Elektron, ein Antielektron oder ein Heliumkern ist. Dieses Verhalten wird in Abb. 10.6 besonders deutlich. Die Abbildung zeigt eine stark vereinfachte Version der Nuklidkarte von Abb. 10.2.

Kernstrahlung ist bei zu hoher Intensität für Menschen und andere Organismen gefährlich. Daher gelten für den Umgang mit radioaktiven Stoffen strenge Sicherheitsbestimmungen. In unserer natürlichen Umgebung befinden sich aber auch radioaktive Stoffe, sodass wir stets einer geringen Kernstrahlung ausgesetzt sind.

### Aufgaben

- Welches der drei Teilchen  $e$ ,  $\bar{e}$  und  ${}^4_2\text{He}_K$  entsteht beim Zerfall von  
a)  ${}^{61}_{29}\text{Cu}$  b)  ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ , c)  ${}^{228}_{90}\text{Th}$ .
- Zeige, dass die Bilanz der drei Ladungen bei der Reaktion  ${}^{55}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{55}_{25}\text{Mn} + \nu$  in Ordnung ist. Beachte, dass hier nicht die Symbole der Kerne, sondern die der ganzen Atome, einschließlich Hülle, stehen. Die Reaktion kommt tatsächlich vor. Beschreibe in Worten, was dabei passiert. Stelle die Energiebilanz auf.
- (a) Wir betrachten die Zerfallsreaktion eines instabilen Nuklids A, bei der ein Nuklid B und ein Elektron entstehen:  $A_K \rightarrow B_K + e + \bar{\nu}$ . Wo liegt das Nuklid A in der Nuklidkarte? Wo liegt A relativ zu B?  
(b) Wo liegen die Nuklide C und D, die in der Zerfallsreaktion  $C_K \rightarrow D_K + \bar{e} + \nu$  auftreten?  
(c) Wo liegen die Nuklide E und F, die in der Zerfallsreaktion  $E_K \rightarrow F_K + p_2n_2$  auftreten?

## 10.10 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

Dass wir von Kernreaktionen im täglichen Leben so wenig merken, liegt daran, dass diese Reaktionen im Allgemeinen sehr langsam ablaufen. Wie schnell eine Reaktion abläuft, sagt uns die Umsatzrate der Reaktion:

$$\text{Umsatzrate} = \frac{\text{Umsatz}}{\text{Zeitdauer}}$$

oder in Symbolen:

$$I_n = \frac{n}{t}$$

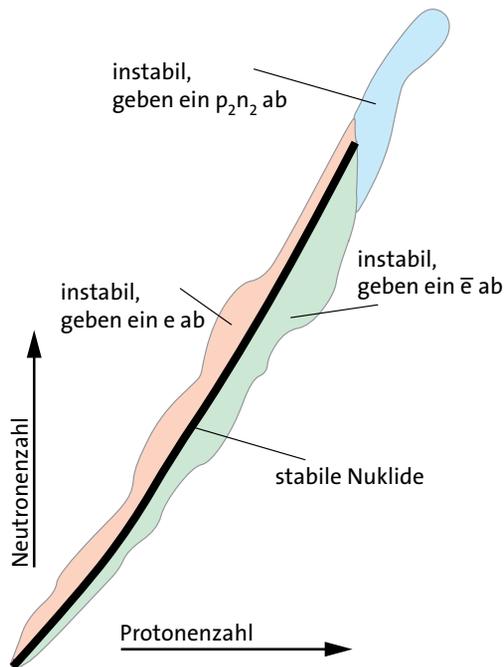


Abb. 10.6 Nuklidkarte, stark vereinfacht

Der Umsatz  $n$  ist ein Maß für die umgesetzte Menge. Bei chemischen Reaktionen gibt man ihn in der Maßeinheit mol an, sodass sich für die Umsatzrate die Einheit mol/s ergibt.

Bei Kernreaktionen sind die Umsatzraten so gering, dass man auch mit den bekannten Bestimmungswörtern wie *nano*, *pico* oder *femto* nicht mehr auskommt. Man gibt daher den Umsatz nicht mehr in mol an, sondern durch die Anzahl der Elementarreaktionen: die Anzahl der Kerne, die zerfallen sind, oder die gebildet worden sind.

Bekanntlich entsprechen einem mol  $6 \cdot 10^{23}$  Teilchen oder „Elementarmengen“:

$$1 \text{ mol} = 6 \cdot 10^{23} \text{ Elementarmengen}$$

Die Umsatzrate misst man entsprechend durch die Anzahl der Elementarmengen pro Sekunde, und es ist

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \frac{\text{Elementarmengen}}{\text{s}}$$

Der Einheit „Elementarmenge pro Sekunde“ hat man einen eigenen Namen gegeben: Becquerel, abgekürzt Bq. Es ist also:

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq}$$

**Beispiel**

Wir hatten früher gesehen, dass ein sehr geringer Teil des Wasserstoffs von gewöhnlichem Wasser das Wasserstoffisotop Tritium ist. Dieses Tritium zerfällt nach der Reaktionsgleichung



Die Umsatzrate in einem Kubikmeter normalem Wasser beträgt etwa

$$I_n = 750 \text{ Bq}.$$

Zum Vergleich betrachten wir eine chemische Reaktion, die als langsam gilt: das Rosten eines Autos.

Nehmen wir an, es bilde sich 1 mol Rost pro Jahr. Es ist also

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ year}} = \frac{1 \text{ mol}}{32 \cdot 10^6 \text{ s}} \\ &= \frac{1}{32 \cdot 10^6} 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq} = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ Bq}. \end{aligned}$$

Der Vergleich zeigt einen typischen Unterschied zwischen chemischen und Kernreaktionen: Die meisten Kernreaktionen, mit denen wir es zu tun haben, haben sehr viel geringere Umsatzraten als typische chemische Reaktionen. Die Mengen der chemischen Elemente auf der Erde ändern sich durch Kernreaktionen also nur sehr, sehr wenig.

Die Umsatzraten von typischen Kernreaktionen sind sehr viel kleiner als die von typischen chemischen Reaktionen.

Oft möchte man eine chemische Reaktion beschleunigen, man möchte die Umsatzrate vergrößern. Man kann das mit zwei verschiedenen Methoden erreichen:

- durch Erhöhen der Temperatur;
- durch Zugabe eines Katalysators (eines Stoffs, dessen Menge sich beim Reaktionsablauf nicht ändert).

Genauso kann man nun bei Kernreaktionen verfahren. Man kann die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung oder durch Verwendung eines Katalysators vergrößern.

Um die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung merklich zu vergrößern, sind allerdings Temperaturen von vielen Millionen Kelvin erforderlich. Solche Bedingungen herrschen in der Sonne und in anderen Sternen. Tatsächlich funktioniert die Energieproduktion in Sonne und Sternen über Kernreaktionen. Ein

anderes Beispiel für die Erhöhung der Umsatzrate mithilfe hoher Temperaturen ist der *Fusionsreaktor*, eine Anlage, die sich noch im Entwicklungsstadium befindet und die eines Tages der Produktion elektrischer Energie dienen soll.

Die katalytische Beschleunigung einer Kernreaktion geschieht im Kernreaktor. Als Katalysator wirken hier Neutronen.

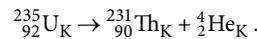
Wir werden uns mit diesen Vorgängen noch beschäftigen: mit Kernreaktionen im Kernreaktor und in der Sonne.

Kernreaktionen lassen sich wie chemische Reaktionen beschleunigen durch

- Temperaturerhöhung;
- Verwendung eines Katalysators.

**Aufgabe**

1. Natürliches Uran enthält 99,28 % des Isotops  ${}^{238}_{92}\text{U}$  und 0,72 % des Isotops  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Wie viel mol des Isotops  ${}^{235}_{92}\text{U}$  enthält ein kg natürlichen Urans? Das Isotop  ${}^{235}_{92}\text{U}$  wird im Kernreaktor zur Energiegewinnung verwendet. Noch wenn es sich nicht im Reaktor befindet, zerfällt es von selbst nach der Reaktionsgleichung



Die Umsatzrate für 1 kg des natürlichen Uranisotopengemischs beträgt für diese Reaktion

$$I_n = 5,76 \cdot 10^5 \text{ Bq}.$$

Rechne die Umsatzrate in mol/s um. Wie lange dauert es, bis 1 % des  ${}^{235}_{92}\text{U}_K$  zerfallen ist?

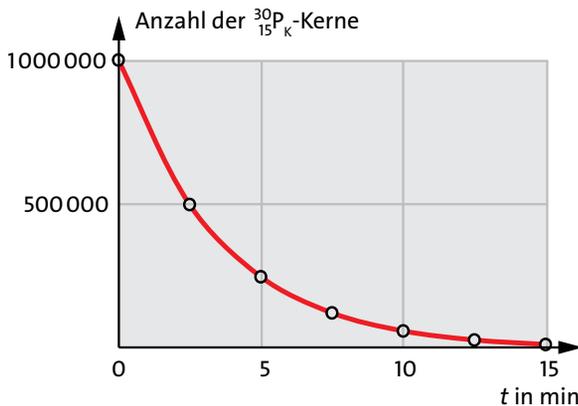
**10.11 Die Halbwertszeit**

Das Phosphorisotop  ${}^{30}_{15}\text{P}_K$  ist instabil. Es zerfällt gemäß



Wir betrachten einen einzelnen Kern dieses Phosphorisotops. Er kann zerfallen, und er wird zerfallen – aber wann? Die Frage hat dieselbe Antwort wie eine andere Frage, die wir früher schon gestellt und auch beantwortet hatten. Der Zeitpunkt, zu dem die Reaktion stattfindet, ist unbestimmt. Das bedeutet aber nicht, dass absolute Willkür herrscht. Denn die Wahrscheinlichkeit, mit der der Kern in einem bestimmten Zeitintervall zerfällt, liegt ganz genau fest. Im Fall un-

## 10.12 Kernreaktionen in der Sonne



**Abb. 10.7** Die Anzahl der  $^{30}\text{P}_{15}\text{K}$ -Kerne nimmt in jedem 2,5-Minuten-Intervall auf die Hälfte ab.

serer Reaktion ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Kern in 2,5 Minuten zerfällt, 50 %. Es ist so, als würde der Kern alle 2,5 Minuten eine Münze werfen. Je nachdem, ob er Kopf oder Zahl geworfen hat, wird er dann innerhalb der nächsten 2,5 Minuten zerfallen oder nicht.

Falls der Kern mehrere Zerfallsmöglichkeiten hat – und das ist bei vielen Kernen der Fall –, so „erwürfelt“ er auch noch, auf welche Art er zerfallen soll.

Wir betrachten nun eine sehr große Anzahl von  $^{30}\text{P}_{15}\text{K}$ -Kernen, sagen wir eine Million. Wir wissen dann, dass von diesen nach 2,5 Minuten nur noch die Hälfte übrig ist, die andere Hälfte ist zerfallen. Nach 2,5 Minuten sind also noch etwa 500 000 Phosphorkerne übrig. Nach weiteren 2,5 Minuten bleiben noch etwa 250 000, noch einmal 2,5 Minuten später 125 000 usw., Abb. 10.7.

Wir nennen die Zeitspanne, in der die Menge des reagierenden Stoffs auf die Hälfte abgenommen hat, die *Halbwertszeit*  $T_{1/2}$ . Die zeitliche Abnahme der Zahl  $N$  der zerfallenden Kerne wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben. Wir bezeichnen die Anzahl zum Zeitpunkt  $t = 0$  s mit  $N_0$ . Es gilt dann

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

In unserem Beispiel war

$$\begin{aligned} N_0 &= 1\,000\,000 \\ T_{1/2} &= 2.5 \text{ min.} \end{aligned}$$

Die Anzahl der Phosphorkerne als Funktion der Zeit ist also

$$N(t) = 1\,000\,000 \cdot 2^{-\frac{t}{2.5 \text{ min}}}$$

Setzen wir für  $t$  z. B. 10 min ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} N(t) &= 1\,000\,000 \cdot 2^{-\frac{10 \text{ min}}{2.5 \text{ min}}} \\ &= 1\,000\,000 \cdot 2^{-4} = 62\,500. \end{aligned}$$

Die Halbwertszeit ist die Zeitspanne, in der die Hälfte der Menge eines Stoffs zerfallen ist.

### Aufgaben

- Ein instabiles Nuklid habe eine Halbwertszeit von 5 Minuten. Wie viele von den ursprünglich vorhandenen 400 000 Kernen sind nach 20 Minuten etwa noch übrig?
- Die Menge eines Nuklids, dessen Halbwertszeit 2 Jahre beträgt, hat von ursprünglich  $8 \cdot 10^8$  auf  $1 \cdot 10^8$  abgenommen. Wie viele Jahre sind vergangen?
- Die Menge eines Nuklids hat in 4 Monaten auf 1/16 der Anfangsmenge abgenommen. Wie ist die Halbwertszeit?
- Ein Nuklid A zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2 Tagen in ein Nuklid B (plus zwei schnelle Teilchen) und dann weiter mit einer Halbwertszeit von 120 Jahren in ein Nuklid C. Zum Zeitpunkt  $t_0$  liegt reines A vor. Wie ist die prozentuale Zusammensetzung des Gemischs der Kerne A, B und C zu den Zeitpunkten  
 $t_0 = 0$  Jahre,  
 $t_1 = 2$  Jahre,  
 $t_2 = 1\,000\,000$  Jahre?
- Wie du weißt, nimmt die Menge eines Stoffs, dessen Kerne instabil sind, innerhalb der Halbwertszeit auf die Hälfte ab. Um welchen Faktor nimmt die Umsatzrate in diesem Zeitintervall ab?

## 10.12 Kernreaktionen in der Sonne

Die Sonne „funktioniert“ mithilfe von Kernreaktionen. Mit funktionieren ist gemeint: Die Energie, die mit dem Licht von der Sonne kommt, wird von Kernreaktionen geliefert.

Die Sonne ist ein Stern. Es gibt im Universum noch unzählige andere Sterne, die genauso aufgebaut sind wie die Sonne und in denen dieselben Prozesse ablaufen. Dass wir die Sonne größer sehen als die anderen Sterne, liegt nur daran, dass wir der Sonne viel näher sind.

Um uns eine Vorstellung von Größe, Masse, Temperatur und Zusammensetzung der Sonne zu machen, vergleichen wir sie mit der Erde. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 10.4 zusammengefasst. Besonders interessant ist die Dichteverteilung der Sonne.

Abb. 10.8 zeigt, dass die Dichte außerhalb des halben Sonnenradius sehr gering ist. 90 % der Masse der

	Erde	Sonne
Masse	$6 \cdot 10^{24}$ kg	$2,0 \cdot 10^{30}$
Radius	6 000 km	700 000 km
Dichte innen	17 g/cm <sup>3</sup>	100 g/cm <sup>3</sup>
außen	3 g/cm <sup>3</sup>	0,0001 g/cm <sup>3</sup>
Temperatur innen	6000 K	15 000 000 K
außen	300 K	6000 K
Zusammensetzung (Die Prozentwerte beziehen sich auf die Masse.)	35 % Fe 30 % O 15 % Si 13 % Mg 7 % andere	75 % H 23 % He 2 % andere

Table 10.4 Daten von Erde und Sonne

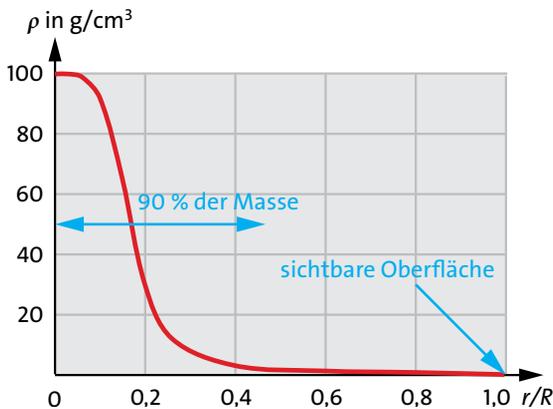


Abb. 10.8 Die Dichte der Sonne als Funktion des Abstands vom Zentrum. Der Abstand  $r$  wurde in Einheiten des Sonnenradius  $R$  aufgetragen. Man sieht, dass sich der weitaus größte Teil der Sonnenmasse innerhalb des halben Radius, also innerhalb von  $r/R = 0,5$  befindet.

Sonne befinden sich innerhalb des halben Radius. Man kann also fast sagen, die Sonne sei in Wirklichkeit nur halb so groß, wie sie aussieht.

Beachte auch, woraus die Sonne besteht: fast nur aus Wasserstoff und Helium.

Der Aufbau der Sonne ist nicht besonders kompliziert. Sie ist einfach ein großer Gasball. Das ist eigentlich überraschend, denn ihre Dichte im Innern ist größer als die aller irdischen festen Materie. Bei so hohen Temperaturen, wie sie in der Sonne herrschen, verhält sich aber jede Materie wie ein Gas.

Die Sonne besteht fast nur aus Wasserstoff und Helium.

Die Sonne gibt Licht ab und mit dem Licht Energie. Der Energiestrom, der die Sonne auf diese Art verlässt, ist sehr groß. Er beträgt

$$P = 4 \cdot 10^{26} \text{ W.}$$

Nur der zweimilliardste Teil davon trifft die Erde. Dies sind immer noch

$$P = 2 \cdot 10^{17} \text{ W.}$$

Woher nimmt die Sonne diese Energie? Im Innern der Sonne läuft eine Kernreaktion ab. Wasserstoff verwandelt sich in Helium nach der Reaktionsgleichung



Wir prüfen die Bilanz der Reaktion:

	4p	p <sub>2</sub> n <sub>2</sub> + 2ē + 2ν
elektrische Ladung	4 · 1	2 + 2 · 1 + 0
baryonische Ladung	4 · 1	4 + 0 + 0
leptonische Ladung	0	0 + 2 · (-1) + 2 · 1
Ruhenergie in pJ	2 p 2 · 150,3277	2 n 2 · 150,5349 2 ē 2 · 0,0819
-E <sub>T</sub> in pJ	0	-4,5334
Summe in pJ	300,655	296,7

Es bleibt pro Elementarumsatz ein Energiebetrag von  $\Delta E = 3,956$  pJ übrig. Mit dieser Energie wird bei der Reaktion Entropie produziert:

Unter normalen Umständen – d. h. Umständen, die wir Erdmenschennormalen nennen – läuft die Heliumsynthesereaktion allerdings gar nicht ab: Der Reaktionswiderstand ist viel zu hoch. Die Reaktion kommt in der Sonne nur dadurch in Gang, dass dort eine sehr hohe Temperatur herrscht. Tatsächlich läuft die Reaktion nur im Innern der Sonne, dort, wo die Temperatur etwa 15 Millionen Kelvin beträgt. Für uns Erdbewohner ist dies eine gewaltige Temperatur. Für Kernreaktionen ist sie allerdings nicht sehr hoch. Man sieht es daran, dass die Reaktion, die wir gerade untersuchen, auch bei 15 000 000 K noch recht langsam läuft. Der Reaktionsumsatz von 1 Liter Sonnenmaterie aus dem Sonneninnern, also dort, wo es am heißesten ist, beträgt nur etwa

$$I_n = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Bq} \\ = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Elementarumsätze pro Sekunde.}$$

Vergleichen wir noch einmal mit dem rostenden Auto, für das wir etwa  $2 \cdot 10^{16}$  Bq berechnet hatten. Es ist beruhigend, das zu wissen: Ein Auto ist in einigen Jahrzehnten total verrostet. Die Sonne dagegen „funktioniert“

### 10.13 Warum es im Innern der Sonne so heiß ist.

niert“ schon seit etwa 5 Milliarden Jahren, und sie hat noch genügend „Brennstoff“, nämlich Wasserstoff, um noch einmal so lange zu scheinen. Wegen der geringen Umsatzrate ist auch die Energiemenge, die ein Liter Sonne pro Sekunde liefert, nicht sehr groß. Wir erhalten den Energiestrom, indem wir den Reaktionsumsatz  $\dot{N}$  (in der Maßeinheit Becquerel) mit der Energie multiplizieren, die pro Elementarumsatz abgegeben wird, also mit  $3,956 \text{ pJ}$ :

$$P = 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,955 \text{ pJ/s} = 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,955 \cdot 10^{-12} \text{ J/s} \\ = 0,01 \text{ W.}$$

Der Energiestrom, der aufgrund der Kernreaktion aus jedem Liter Sonne herauskommt, beträgt also  $0,01 \text{ W}$ .

Wir vergleichen mit anderen, uns vertrauteren Energielieferanten: Eine gewöhnliche irdische Flamme mit einem Volumen von  $1 \text{ Liter}$  produziert etwa  $1000 \text{ W}$ , also  $100\,000$ -mal so viel wie  $1 \text{ Liter}$  Sonne.

Dass die Sonne insgesamt so viel Energie abgibt, liegt an dem großen Volumen des Reaktors „Sonne“.

In der Sonne werden in einer Kernreaktion aus Wasserstoffkernen Heliumkerne produziert. Der Reaktionsumsatz ist trotz der hohen Temperatur sehr gering. Die bei der Reaktion übrige Energie wird mit Entropie aus der Reaktionszone nach außen transportiert.

Wir wissen jetzt, welches die Energiequelle der Sonne ist. Die Funktionsweise der Sonne ist damit aber noch nicht ganz erklärt. Um sie zu verstehen, müssen wir noch zwei Fragen beantworten:

- Wie kommt es, dass im Innern der Sonne so hohe Temperaturen herrschen, obwohl doch die Reaktion sehr langsam läuft?
- Die Kernreaktion in der Sonne ist dieselbe wie die, die in einer Wasserstoffbombe abläuft. Warum explodiert dann die Sonne nicht wie eine riesige Wasserstoffbombe?

#### Aufgaben

1. Wie viel Energie wird in der Sonne bei der Bildung von  $1 \text{ mol}$  Helium abgegeben? Vergleiche mit der Energie, die bei der gewöhnlichen Verbrennung von  $1 \text{ mol}$  Wasserstoff (d. h. Reaktion mit Sauerstoff) abgegeben wird.
2. Jeder Mensch produziert Wärme: Er gibt Energie und Entropie ab. Schätze ab, wie viel Energie „ $1 \text{ Liter}$  Mensch“ abgibt. Vergleiche mit der Energie, die  $1 \text{ Liter}$  Sonne abgibt.

### 10.13 Warum es im Innern der Sonne so heiß ist

Dass trotz eines sehr geringen Reaktionsumsatzes sehr hohe Temperaturen entstehen können, kennen wir auch von Erscheinungen auf der Erde, etwa von einem Heuhaufen. Wir stellen uns vor, das Heu sei gerade frisch angehäuft worden. In frischem Heu läuft nun eine sehr langsame Reaktion ab, bei der Entropie entsteht – allerdings sehr wenig. Der Heuhaufen erwärmt sich dabei ganz langsam. Da das Innere des Heuhaufens von der Umgebung sehr gut wärmeisoliert ist, wird die Temperatur langsam immer höher. Wegen der höheren Temperatur im Innern fließt Entropie von innen nach außen ab. Die Temperatur wird aber nur so lange wachsen, bis die abfließende Entropie gleich der erzeugten ist: Ein Fließgleichgewicht stellt sich ein. Die Temperatur, die sich im Innern einstellt, ist um so höher, je größer der Weg und damit der Wärmewiderstand ist, den die Entropie von drinnen nach draußen überwinden muss. Sie kann bei einem großen Heuhaufen so hohe Werte erreichen, dass sich das Heu entzündet. Deshalb muss man die Temperatur im Innern von größeren Heuhaufen überwachen.

Genau dieser „Heuhaufeneffekt“ ist für die hohe Temperatur im Innern der Sonne verantwortlich und man versteht, warum die Temperatur im Innern der Sonne so riesige Werte angenommen hat. Weil die Sonne sehr groß ist, ist der Weg zwischen der Reaktionszone im Innern und der Oberfläche sehr groß: einige  $100\,000 \text{ km}$ . Damit die Entropie diese Strecke überwinden kann, hat sich ein Temperaturunterschied von einigen Millionen Kelvin aufbauen müssen.

Damit ein Fließgleichgewicht für die Entropie aufrechterhalten werden kann, muss die Sonne im Innern sehr viel heißer sein als außen.

#### Aufgabe

1. Schätze das Temperaturgefälle in der Sonne von innen nach außen ab. Schätze das Temperaturgefälle in der Erde ab. Vergleiche mit dem Temperaturgefälle in der Wand eines geheizten Hauses.

### 10.14 Das ungewöhnliche Verhalten der Sonne bei Entropiezufuhr

Wenn man einem Körper Entropie zuführt, wird er wärmer, d. h., seine Temperatur nimmt zu. Wenigstens ist das das normale Verhalten. Wir kennen auch den

Fall, dass sich die Temperatur bei Entropiezufuhr nicht ändert: etwa, wenn man Wasser auf dem Herd kocht. Wenn das Wasser 100 °C erreicht hat und man es auf der Herdplatte lässt, d.h. weiter Entropie zuführt, so nimmt die Temperatur nicht weiter zu. Stattdessen verdampft das Wasser.

Wir stellen uns nun vor, wir könnten der Sonne nach Belieben Entropie zuführen oder entziehen. Dabei würden wir ein merkwürdiges Verhalten beobachten. Wenn man der Sonne Entropie zuführt, würde sie nicht wärmer, sondern kälter, d.h., die Temperatur würde abnehmen. Wenn man ihr Entropie entzieht, würde sie nicht kälter, sondern wärmer; die Temperatur würde zunehmen.

Das klingt paradox, ist es aber nicht. Um das einzusehen, machen wir – in Gedanken – einige Experimente mit einem Gas, z.B. Luft, in einem Zylinder mit einem verschiebbaren Kolben, Abb. 10.9.

Als Erstes führen wir dem Gas Entropie zu und halten dabei den Kolben in seiner Position fest. Wir stellen fest, dass die Temperatur des Gases zunimmt – selbstverständlich, wirst du sagen.

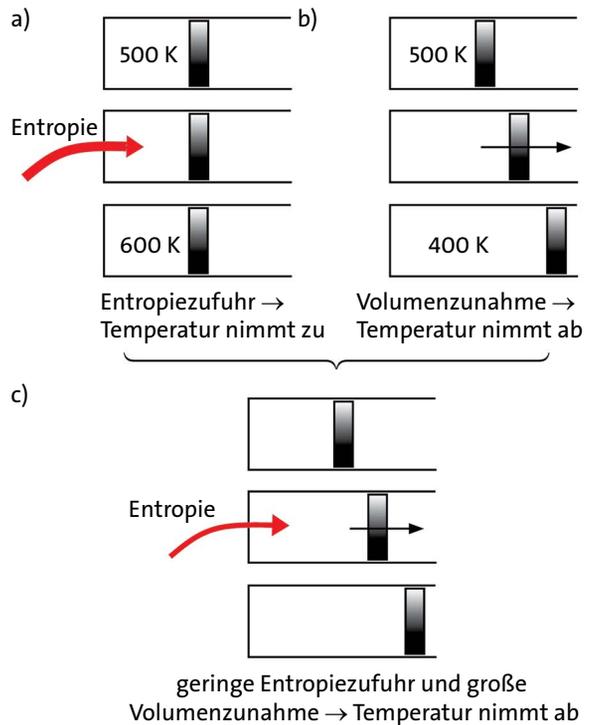
In einem zweiten Experiment verschieben wir den Kolben, sodass das Volumen des Gases zunimmt. Du erinnerst dich hoffentlich daran, was jetzt passiert: Die Temperatur des Gases nimmt ab. (Das ist derselbe Effekt, wie wenn Luft aus einem Autoreifen ausströmt. Deren Temperatur nimmt auch ab.)

Schließlich ein drittes Experiment: Wir führen dem Gas Entropie zu und vergrößern dabei gleichzeitig das Volumen. Die Entropiezufuhr allein würde eine Temperaturerhöhung verursachen, die Volumenvergrößerung eine Temperaturabnahme. Je nachdem, wie groß man die Entropiezufuhr und die Volumenvergrößerung macht, hat der eine oder der andere Effekt die Oberhand. Wenn die Entropiezufuhr gering ist und die Volumenzunahme groß, so nimmt die Temperatur ab – und da haben wir es schon: Temperaturabnahme trotz Entropiezufuhr.

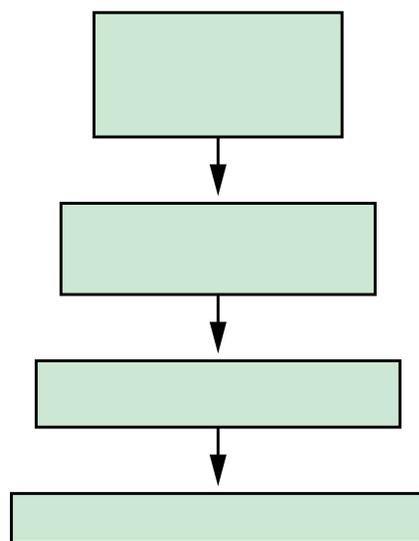
Du siehst, worin der Trick besteht: Die Temperatur hängt nicht nur von der Entropie, sondern auch vom Volumen ab. Also kann man trotz Entropiezunahme eine Temperaturabnahme erreichen.

Es ist ähnlich wie in folgendem Beispiel: Wie schafft man es, ein rechteckiges Grundstück durch Vergrößerung seiner Länge zu verkleinern? Indem man die Breite stärker verkleinert als man die Länge vergrößert, Abb. 10.10.

Du könntest sagen: Das ist ein billiger Trick. Vielleicht – aber es ist der Trick, der in der Sonne zum Einsatz kommt. Bei Entropiezufuhr vergrößert die Sonne gleichzeitig ihr Volumen, und zwar so stark,



**Abb. 10.9** (a) Der Kolben wird festgehalten. Die Entropiezufuhr verursacht eine Temperaturerhöhung. (b) Die Volumenvergrößerung verursacht eine Temperaturabnahme. (c) Bei geringer Entropiezufuhr und starker Volumenvergrößerung nimmt die Temperatur ab.



**Abb. 10.10** Obwohl die Länge des Rechtecks zunimmt, nimmt sein Flächeninhalt ab.

## 10.15 Warum die Sonne nicht explodiert.

dass die Temperatur dabei abnimmt. Dass sich ihr Volumen so stark vergrößert, liegt am Gravitationsgesetz. Je größer ein Himmelskörper geworden ist, desto leichter ist es, ihn noch größer zu machen. Die Materie ist weiter vom Mittelpunkt weg und wird immer weniger zur Mitte gezogen.

Nimmt ihre Entropie zu, so wird die Sonne größer und kälter, nimmt ihre Entropie ab, so wird sie kleiner und heißer.

### Aufgabe

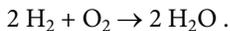
- Beschreibe einen Prozess mit einem Zylinder mit Kolben (entsprechend Abb. 10.9) bei dem die Temperatur des Gases zunimmt, obwohl man ihm Entropie entzieht.

## 10.15 Warum die Sonne nicht explodiert

### Die Knallgasreaktion

Wir betrachten zunächst eine Explosion, die noch nichts mit der Sonne zu tun hat.

Knallgas ist ein Gemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff im Mengenverhältnis 2:1. Der Wasserstoff kann mit dem Sauerstoff reagieren:



Die Energiebilanz der Reaktion ist positiv, d. h., es ist Energie übrig. Wenn man keine besonderen Vorkehrungen trifft, wird mit dieser übrigen Energie einfach Entropie produziert, sodass die Temperatur zunimmt.

Bei normaler Temperatur läuft die Reaktion sehr, sehr langsam. Der Reaktionswiderstand ist sehr hoch; die Reaktion ist praktisch *gehemmt*. Sie wird aber schneller, wenn die Temperatur höher wird: je höher die Temperatur, desto größer die Umsatzrate.

Wir erhitzen nun das Knallgas etwas, sodass die Reaktion beginnen kann. Nun ist die Energiebilanz der Reaktion positiv, d. h., es ist Energie übrig. Mit dieser übrigen Energie wird Entropie erzeugt. Dadurch steigt die Temperatur und die Reaktion wird schneller. Es ist nun noch mehr Energie übrig, es wird noch mehr Entropie erzeugt und die Temperatur steigt weiter – und so weiter.

Was wir hier beschrieben haben, ist eine Explosion:

Explosion: Eine Reaktion schafft selbst die Bedingungen dafür, dass sie immer schneller läuft.

### Ein Argument dafür, dass auch die Sonne explodiert.

Die Sonne besteht zum größten Teil aus Wasserstoff. Wasserstoff kann sich in einer Kernreaktion in Helium verwandeln:



Wenn diese Reaktion läuft, ist Energie übrig. Wenn wir Wasserstoff unter irdischen Bedingungen aufbewahren, läuft die Reaktion praktisch nicht; sie ist gehemmt. Sie würde laufen, wenn die Temperatur hoch genug wäre. Auch hier können wir uns nun vorstellen, dass man die Reaktion nur zu „zünden“ braucht, damit sie losgeht. Es würde genügen, dass man den Wasserstoff auf eine genügend hohe Temperatur bringt. Er würde reagieren und dabei würde Entropie produziert; die Temperatur würde weiter steigen, und sehr schnell würde der ganze Wasserstoff explosionsartig reagieren.

Was hier beschrieben wurde, gibt es tatsächlich. Aber es entspricht nicht den Vorgängen in der Sonne, sondern denen in einer Wasserstoffbombe.

Wir wissen, dass die Sonne bisher nicht explodiert ist und sicher in der näheren Zukunft nicht explodiert.

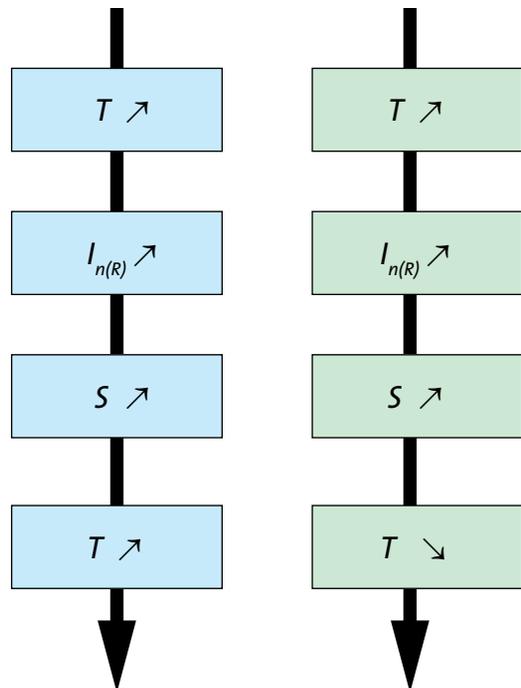


Abb. 10.11 Links: positive Rückkopplung; eine Temperaturerhöhung führt zu einer weiteren Temperaturerhöhung. Rechts: negative Rückkopplung; eine Temperaturerhöhung macht sich selbst rückgängig.

ren wird. Das bedeutet, dass unsere Schlusskette einen Fehler enthalten muss. Wir stellen sie noch einmal grafisch dar, Abbildung 10.11 links.

Die Temperatur nimmt zu; dadurch nimmt die Umsatzrate  $I_n(R)$  zu; dadurch wird mehr Entropie produziert; dadurch wird die Temperatur noch höher usw. Man sagt, hier finde eine *positive Rückkopplung* statt.

Wenn wir diese Schlusskette auf die Sonne anwenden, machen wir aber einen Fehler. Wir erinnern uns an die Aussage des vorigen Abschnitts: Wenn die Entropie der Sonne zunimmt, so nimmt die Temperatur ab. Die entsprechend korrigierte Schlusskette ist in Abb. 10.11 rechts dargestellt. Die ursprüngliche Temperaturzunahme bewirkt einen Prozess, der zu einer Abnahme der Temperatur führt. Falls die Temperatur am Anfang durch irgendeine Störung abgenommen hat, so bewirkt der Prozess, dass sie wieder zunimmt. Man sagt, bei einem solchen Prozess finde *negative Rückkopplung* statt. Positive Rückkopplung führt also zu einer Explosion, negative zur Stabilisierung eines Zustandes.

In unserem Fall wird die Temperatur der Sonne stabilisiert, und damit auch die Umsatzrate und die Entropieproduktion.

Da die Temperatur der Sonne mit zunehmender Entropie abnimmt, wird die Kernreaktion stabilisiert.

## Aufgabe

1. Nenne und beschreibe andere Vorgänge mit positiver und mit negativer Rückkopplung.

## 10.16 Der Kernreaktor

### Das Kernkraftwerk

Abb. 10.12 zeigt den Aufbau eines Kernkraftwerks.

Die Funktionsweise eines Kernkraftwerks ist der eines Kohlekraftwerks sehr ähnlich. In beiden wird Wasserdampf erzeugt, der einen hohen Druck und eine hohe Temperatur hat. Hierzu wird Entropie auf hoher Temperatur gebraucht. Diese wird beim Kohlekraftwerk im Heizkessel erzeugt, indem man Kohle verbrennt. Beim Kernkraftwerk geschieht die Entropieerzeugung im *Kernreaktor*. Die Energie hierfür liefert eine Kernreaktion.

Die Entropie wird vom Reaktor mit dem Wasser des Primärkreislaufs konvektiv zum *Dampfzeuger* gebracht. (Der Primärkreislauf funktioniert wie eine Zentralheizung: Auch bei der Zentralheizung wird Entropie mit Wasser konvektiv von einer Stelle – dem Heizkessel – zu einer anderen – den Heizkörpern – gebracht.)

Im Dampfzeuger wird aus dem flüssigen Wasser des Sekundärkreislaufs Wasserdampf erzeugt, der einen

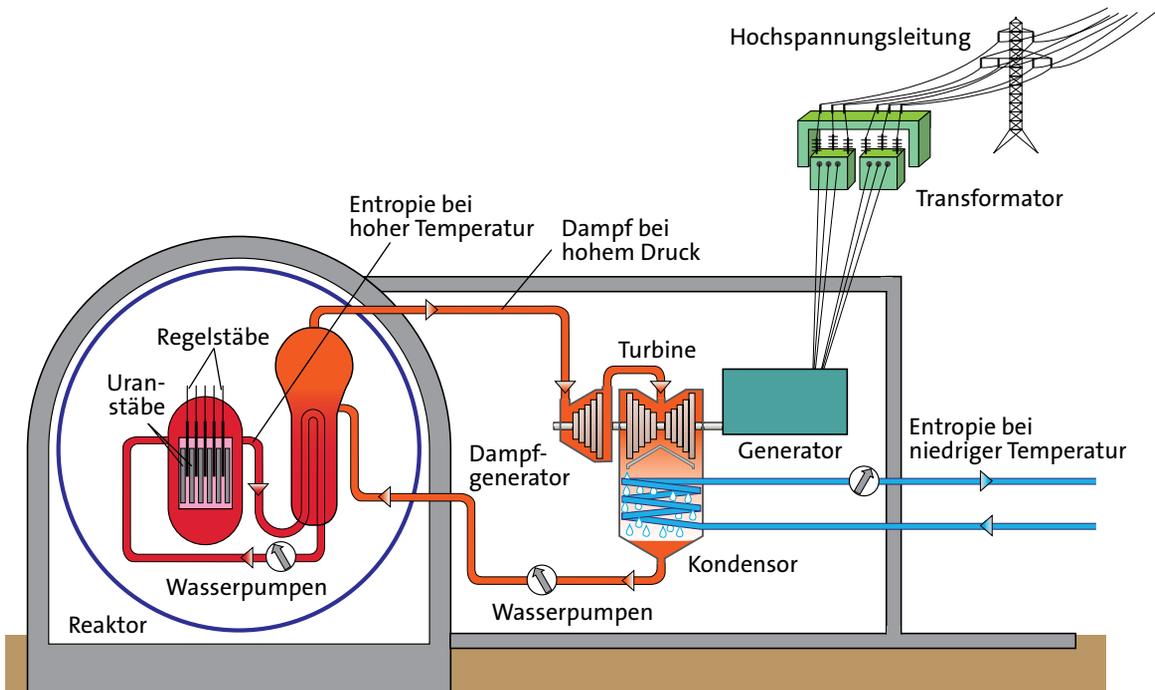


Abb. 10.12 Aufbau eines Kernkraftwerks

hohen Druck – etwa 50 bar – und eine hohe Temperatur – etwa 270 °C – hat. Mit dem Dampf wird eine Dampfturbine angetrieben. Am Ausgang der Turbine hat der Dampf nur noch einen Druck von etwa 70 Millibar und eine Temperatur von 40 °C. Im *Kondensator* gibt der entspannte Dampf seine Entropie an das Wasser des Kühlkreislaufs ab. Das Kühlwasser bringt die Entropie dann konvektiv irgendwohin in die Umgebung: über einen weiteren Wärmeaustauscher in einen vorbeifließenden Fluss oder über einen Kühlturm in die Luft.

**Die Kernreaktionen**

Nun zu den Reaktionen, die im Kernreaktor ablaufen. Das Nuklid, das für die Energieproduktion zuständig ist, ist das Uranisotop  $^{235}_{92}\text{U}_K$ . Im natürlichen Uran ist es nur zu 0,7 % enthalten. Die restlichen 99,3 % macht das Isotop  $^{238}_{92}\text{U}_K$  aus. Zur Verwendung in Kernreaktoren wird das Uran zunächst auf einen  $^{235}_{92}\text{U}_K$ -Gehalt von 3 % angereichert.

Der  $^{235}_{92}\text{U}_K$ -Kern ist instabil und kann in zwei andere Nuklide zerfallen, z. B. so:



oder so:



oder so:

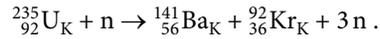


oder auf sehr viele andere Arten. Bei all diesen Reaktionen ist Energie übrig.

Du siehst, dass außer den beiden größeren Nukliden noch zwei Neutronen entstehen. Wir werden gleich sehen, dass das wichtig ist.

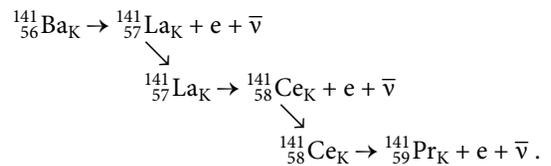
Alle diese Zerfallsreaktionen haben zunächst einen hohen Reaktionswiderstand. Ihr Reaktionsumsatz ist so gering, dass sie eigentlich für die Energieproduktion völlig ungeeignet sind.

Die Reaktion kann aber leicht mit einem Katalysator beschleunigt werden. Und das Interessante daran ist: Als Katalysator sind Neutronen geeignet, d. h. gerade der Stoff, der bei der Reaktion selbst entsteht. Reaktionen, in denen der Katalysator, der die Reaktion beschleunigt, selbst produziert wird, nennt man *autokatalytische* Reaktionen. Um die Rolle des Katalysators zum Ausdruck zu bringen, können wir auf der linken Seite der Reaktionsgleichung ein Neutron hinzufügen. Auf der rechten Seite taucht dann natürlich auch ein Neutron mehr auf. So ergibt sich zum Beispiel:



Das Uran reagiert mit *einem* Neutron, und es entstehen dabei drei Neutronen.

Dieser Zerfall in zwei größere Bruchstücke plus einige Neutronen ist aber nur der erste Reaktionsschritt. Denn nicht nur die entstandenen Neutronen reagieren weiter, sondern auch die großen Bruchstücke, die entstanden sind, sind durchweg instabil. Sie zerfallen in einer Kette von Folgereaktionen, bei denen sich aber von dem jeweiligen Kern immer nur kleine Teilchen lösen: Elektronen oder  $^4_2\text{He}$ -Kerne. Wir betrachten als Beispiel den  $^{141}_{56}\text{Ba}_K$ -Kern, der beim Uranzerfall entsteht:



Aus dem  $^{141}_{56}\text{Ba}_K$ -Kern entsteht zunächst ein instabiler  $^{141}_{57}\text{La}_K$ -Kern, daraus dann ein wiederum instabiler  $^{141}_{58}\text{Ce}_K$ -Kern. Erst der daraus entstehende  $^{141}_{59}\text{Pr}_K$ -Kern ist stabil.

Alle aufgeführten Reaktionen tragen zur Energieproduktion des Reaktors bei, wenn auch in sehr unterschiedlichem Ausmaß. Etwa 95 % der insgesamt abgegebenen Energie entstehen bei dem durch Neutronen katalysierten Zerfall des Urans und nur 5 % bei den Folgereaktionen.

Trotz der geringen Bedeutung für die Energiebilanz des Reaktors spielen die Folgereaktionen im Reaktorbetrieb eine sehr wichtige Rolle: Sie sind der Grund dafür, dass ein Reaktor sehr kostspielige Sicherheitsvorrichtungen braucht.

Im Kernreaktor zerfallen  $^{235}_{92}\text{U}$ -Kerne in zwei etwa gleich große Kerne sowie einige Neutronen. Die Reaktion wird von Neutronen katalysiert (Autokatalyse). Alle entstehenden Nuklide sind instabil und zerfallen weiter.

**Die Steuerung des Reaktors**

Zunächst zur Erinnerung, wie man den Heizkessel eines Kohlekraftwerks steuert: genauso wie eine Ölheizung, wie einen gewöhnlichen Kohleofen oder wie ein Kaminfeuer. Damit die Reaktion schneller läuft, führt man mehr Brennmaterial und mehr Sauerstoff zu, um die Umsatzrate zu vermindern, drosselt man die Brennstoff- oder Luftzufuhr.

Da im Kernreaktor eine autokatalytische Reaktion abläuft, kann man hier anders verfahren: Der Reaktor wird einmal im Jahr mit dem „Brennstoff“ geladen, d. h. mit dem Uranbedarf für das ganze Jahr.

Man hat nun allerdings ein System mit einer positiven Rückkopplung: Bei der Reaktion werden Neutronen erzeugt, durch die Neutronen wird die Umsatzrate größer, es werden mehr Neutronen erzeugt usw. Was wir hier beschrieben haben, ist nicht ein Kernreaktor, sondern eine Atombombe. Um daraus einen Reaktor zu machen, muss man die Reaktion steuern, indem man die Menge des Katalysators – der Neutronen – beeinflusst.

Man vermindert die Neutronenkonzentration im Reaktor, indem man *Steuerstäbe* in die Reaktionszone hineinschiebt. Die Steuerstäbe sind Stäbe aus einem Material, das Neutronen absorbiert, d. h. mit dem die Neutronen besonders gut reagieren.

### Die Sicherheitsvorrichtungen

Bei der katalytischen Zerlegung des Urans entstehen sehr viele verschiedene Nuklide, und alle sind instabil; sie reagieren weiter. Die Folgereaktionen werden aber nicht durch irgendeinen Katalysator beschleunigt. Sie laufen mit den verschiedensten ihnen eigenen Geschwindigkeiten: einige schnell, andere langsam.

Wir hatten gesehen, dass bei diesen Folgereaktionen neben einem schwereren Nuklid immer ein leichtes Teilchen entsteht: ein Elektron oder ein  ${}^4_2\text{He}$ -Kern. Wir wissen schon, dass in diesem Fall fast die ganze Energie, die bei der Reaktion übrig ist, von dem leichten Teilchen mitgenommen wird. Das bedeutet, dass die Zerfallsprodukte des Urans radioaktiv sind. Wegen der hohen Umsatzraten im Reaktor ist die Kernstrahlung, die die Zerfallsprodukte emittieren, sehr intensiv und gefährlich.

Daraus ergibt sich eines der Probleme beim Betrieb eines Reaktors. Die Zerfallsprodukte des Urans dürfen nicht in die Umgebung gelangen. Dies zu verhindern ist schon schwierig genug. Es gibt aber noch ein ande-

res Problem: Man kann die Energieproduktion eines Reaktors nicht schnell stoppen. Man kann zwar, mithilfe der Steuerstäbe, die Uranzerfallsreaktion sehr schnell anhalten. Auf die Folgereaktionen hat man aber keinen Einfluss. Die Folgereaktionen laufen weiter und klingen erst nach und nach ab. Tabelle 10.5 zeigt, wie die Energieproduktion nach dem Anhalten der Uranspaltung noch weiterläuft.

Ein großes Kraftwerk produziert im Normalbetrieb etwa 1000 MW.

Schaltet man es ab, so produziert es nach einem Tag noch 0,7 % von 1000 MW. Das sind 7 MW. Die Energieabfuhr muss daher noch für einige Tage nach dem Abschalten gewährleistet sein. Andernfalls könnte sich der Reaktor so stark erhitzen, dass der Reaktorbehälter schmilzt.

Die Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken müssen nun so beschaffen sein, dass auch im Notfall der Abtransport der Wärme gewährleistet ist, sodass ein Schmelzen des Reaktorbehälters sehr unwahrscheinlich wird. Sollte dies doch geschehen, müssen weitere Sicherheitsbarrieren dafür sorgen, dass keine radioaktiven Stoffe in die Umgebung gelangen.

Ein Reaktor braucht wegen der Folgereaktionen der Zerfallsprodukte des Urans sehr aufwendige Sicherheitssysteme, denn

- die Zerfallsprodukte des Urans sind radioaktiv und dürfen nicht in die Umgebung gelangen;
- die Energieproduktion bei den Folgereaktionen kann man nicht abschalten.

### Die radioaktiven Abfälle

Wenn der Reaktor einmal im Jahr mit neuem Uran geladen wird, müssen vorher die Reaktionsprodukte des abgelaufenen Jahres aus dem Reaktor entfernt werden. Bei diesen Reaktionsprodukten handelt es sich um ein Gemisch aus den verschiedensten Nukliden. Viele dieser Nuklide sind instabil, und man trifft Nuklide mit den verschiedensten Halbwertszeiten an.

Mit dem Entladen der Reaktionsprodukte kann man natürlich nicht so lange warten, bis sich alle instabilen Nuklide in stabile verwandelt haben, denn einige Nuklide haben Halbwertszeiten von Jahren, andere von Jahrzehnten und wieder andere sogar von Jahrhunderten und Jahrtausenden.

Die Reaktionsprodukte, die man einmal im Jahr aus dem Reaktor entnimmt, sind also noch radioaktiv, und sie bleiben es noch für eine lange Zeit. Sie müssen daher an einem Ort gelagert werden, von dem aus sie nicht in den biologischen Stoffkreislauf gelangen können.

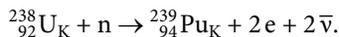
Zeit nach dem Abschalten	Energieproduktion (bezogen auf den Normalbetrieb)
5 Sekunden	5 %
1 Minute	4 %
10 Minuten	3 %
1 Stunde	1 %
1 Tag	0,7 %
2 Tage	0,5 %

Tab. 10.5

### Plutonium

Die Zerfälle des Urans und der Folgeprodukte sind die wichtigsten und häufigsten Reaktionen im Kernreaktor. Daneben finden aber noch Reaktionen eines anderen Typs statt: Synthesereaktionen.

Das  $^{235}_{92}\text{U}$  reagiert mit Neutronen zu schwereren Nukliden. Unter diesen ist das Plutonium besonders wichtig. Plutonium ist ein Element, von dem kein Isotop in der Natur vorkommt. Im Reaktor entsteht das  $^{239}_{94}\text{Pu}$ -Nuklid aus  $^{238}_{92}\text{U}_K$  in der folgenden Reaktion



In den radioaktiven Abfällen ist also auch Plutonium enthalten. Auch  $^{239}_{94}\text{Pu}$  ist radioaktiv. Es zerfällt unter Abgabe von Heliumkernen mit einer Halbwertszeit von 24 000 Jahren.

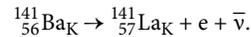
Wie  $^{235}_{92}\text{U}_K$ , so wird auch der Zerfall von  $^{239}_{94}\text{Pu}$  in zwei etwa gleich große Teile durch Neutronen katalysiert. Man könnte daher  $^{239}_{94}\text{Pu}$  als Reaktorbrennstoff verwenden. Man müsste es dazu zunächst von den anderen radioaktiven Abfallstoffen abtrennen. Damit ist aber ein neues Problem verbunden. Mit solchem abgetrennten, reinen Plutonium lässt sich auf relativ bequeme Art eine Atombombe bauen.

### Aufgaben

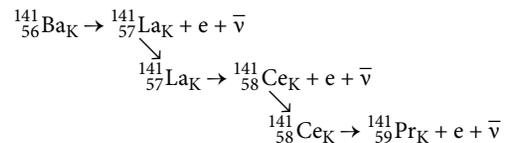
1. Vergleiche die Energieproduktion der Uranzerfallsreaktion



mit der Energieproduktion der Folgereaktion



2. Wir betrachten die Folgereaktionen, bei denen aus  $^{141}_{56}\text{Ba}_K$  zunächst  $^{141}_{57}\text{La}_K$ , dann  $^{141}_{58}\text{Ce}_K$  und schließlich  $^{141}_{59}\text{Pr}_K$  entsteht:



Die Halbwertszeiten der drei instabilen Nuklide sind:

$$T_{1/2}(^{141}_{56}\text{Ba}) = 18 \text{ Minuten,}$$

$$T_{1/2}(^{141}_{57}\text{La}) = 4 \text{ Stunden,}$$

$$T_{1/2}(^{141}_{58}\text{Ce}) = 32 \text{ Tage.}$$

Wir beginnen zum Zeitpunkt  $t_0$  mit einer bestimmten Menge  $^{141}_{56}\text{Ba}$ . Schätze ganz grob ab, wie viel Ba, La, Ce, und Pr vorhanden ist („viel“, „mittel“, „wenig“, „sehr wenig“):

- a) nach 30 Sekunden,
- b) nach 18 Minuten,
- c) nach 5 Tagen,
- d) nach 1 Jahr.

# 11 TEILCHENPHYSIK

## 11.1 Strahlen – elastische und inelastische Streuung

Wenn sich irgendeine Art Stoff ungehindert geradeaus bewegt, so bildet er einen Strahl. Beispiele sind ein Wasserstrahl oder ein Lichtstrahl. Für wissenschaftliche und technische Zwecke erzeugt man viele andere Arten von Strahlen: Radar- und Röntgenstrahlen, Elektronen-, Protonen- und Atomstrahlen. Man sagt, die Photonen, die Elektronen, die Protonen usw. bilden eine Strahlung.

Wenn Strahlung auf ein Hindernis trifft, passiert im Allgemeinen irgendetwas: Energie und Impuls der Strahlungsteilchen können sich ändern, die Strahlung kann verschwinden und es können neue Teilchen entstehen. In jedem Fall sagt man, die Strahlung werde *gestreut*.

Die vielen unterschiedlichen Prozesse, die dabei ablaufen, teilt man grob in zwei Klassen ein.

### Elastische Streuung

Die Teilchen der Strahlung bleiben, was sie sind – Elektronen bleiben Elektronen, Photonen bleiben Photonen. Sie werden lediglich abgelenkt. Das bedeutet, dass sich ihr Impuls ändert. (Der Impuls ist ein Vektor und dessen Richtung ändert sich.) Ihre kinetische Energie kann dabei umverteilt werden.

### Inelastische Streuung

Die Strahlungsteilchen verschwinden und es entstehen andere Teilchen.

Wenn weißes Licht auf ein Blatt weißes Papier fällt, wird das Licht zurückgestreut. Dabei ändert sich seine Energie nicht, nur seine Richtung ändert sich. Es handelt sich um elastische Streuung.

Wenn Röntgenstrahlung auf ein Kristallgitter trifft, entsteht ein Interferenzmuster, woraus man auf die Kristallstruktur schließen kann. Dabei ändert sich die

Energie der Röntgenstrahlung nicht – nur die Richtung und damit der Impuls. Es handelt sich um elastische Streuung.

Wenn UV-Licht auf ein weißes Material fällt und das weiße Material dadurch sichtbares Licht emittiert, so ändert sich die Energie des Lichts. Die Streuung ist inelastisch. (Man spricht hier von Fluoreszenz.)

Wenn ein Proton eines Protonenstrahls mit dem eines gegenläufigen Strahls kollidiert (etwa im LHC in Genf), so entstehen Hunderte von neuen Teilchen. Es handelt sich um inelastische Streuung.

## 11.2 Elastische Streuung – „sehen“ mit verschiedenen Strahlungen

Damit man einen Gegenstand sehen kann, muss Licht von ihm ausgehen. Manche Gegenstände emittieren Licht von selbst, andere emittieren Licht, weil man sie beleuchtet. Uns interessiert im Augenblick nur dieser zweite Fall. Der Gegenstand wird also beleuchtet und das Licht wird zum Teil absorbiert, zum Teil elastisch gestreut.

Man kann Dinge im übertragenen Sinn sehen, indem man nicht das sichtbare Licht ausnutzt, das von ihnen ausgeht, sondern Strahlung anderer Wellenlängen, die wir mit den Augen nicht wahrnehmen. Man muss dann nur einen geeigneten Detektor verwenden, d. h. ein geeignetes Nachweis- oder Messgerät.

So kann man ein Flugzeug mithilfe von Radarwellen „sehen“, d. h. elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen von 1 bis 10 cm. Man sieht in den menschlichen Körper hinein mit Röntgenstrahlen, d. h. elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen von 10 bis 1000 pm ( $1 \text{ Picometer} = 10^{-12} \text{ m}$ ).

## 11.2 Elastische Streuung – „sehen“ mit verschiedenen Strahlungen

Die Strahlung muss gar keine elektromagnetische Strahlung sein. Es geht auch mit jeder anderen Strahlung. So kann man mit Schallwellen etwas „sehen“. Mit dem Echolot untersucht man vom Schiff aus den Meeresboden. Die verwendeten Ultraschallwellen haben eine Wellenlänge von etwa 10 cm. Mit Ultraschall sieht man auch in den menschlichen Körper hinein. Hierbei haben die Schallwellen eine Wellenlänge von etwa 0,5 mm. Fledermäuse orientieren sich mit Ultraschallwellen. Ähnlich wie das Radar „beleuchten“ sie die Welt mit Schallwellen mit einer Wellenlänge von wenigen Millimetern und empfangen das von den Objekten, z. B. Insekten, zurückgestreute Schallsignal.

Nun kann man sich fragen, warum in einem Fall die eine und in einem anderen Fall die andere Strahlung verwendet wird. Diese Frage hat zwei Antworten:

1. Der Weg zwischen Beobachter und beobachtetem Objekt muss für die Strahlung frei sein. Sie darf auf dem Weg nicht absorbiert werden. So kann man mit sichtbarem Licht nicht in den menschlichen Körper hineinschauen, da das Licht nicht bis zu den Organen eindringt, die man sehen möchte. Es wird absorbiert. Mit Röntgenstrahlen oder Ultraschall dagegen kommt man in den Körper hinein.

Das genügt aber noch nicht. Falls nämlich die Strahlung von dem zu beobachtenden Gegenstand nicht absorbiert oder gestreut wird, ist sie auch nicht brauchbar, denn sie würde durch das Objekt ungestört hindurchgehen, und man bekäme keine Information darüber. Röntgenstrahlen dringen in den Körper ein, werden dort aber teilweise absorbiert. Auf diese Art erfährt man mithilfe der austretenden Strahlung etwas über die Gestalt der absorbierenden Körperteile, also zum Beispiel der Knochen. Radarwellen durchqueren die Luft ungestört, werden aber an Metallobjekten gestreut. So kann man mit Radarwellen Flugzeuge oder Regenwolken „sehen“. Das Entsprechende gilt für Ultraschallwellen.

Ein Objekt soll mithilfe einer Strahlung abgebildet werden. Die Strahlung darf auf dem Weg zum Objekt nicht absorbiert oder gestreut werden.

Die Strahlung muss vom Objekt absorbiert oder gestreut werden.

2. Eine wichtige Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Strahlung hängt davon ab, welche *Auflösung* man haben möchte: Wie kleine Details sollen unterschieden werden können? Hohe Auflösung bedeutet: Man kann kleine Einzelheiten des Objekts erkennen. Wie groß die Auflösung einer Strahlung ist, lässt sich leicht beurteilen. Man kann nur solche Strukturen er-

kennen, die nicht kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung sind. So kann man mit einem Flugzeugradar mit  $\lambda = 10$  cm nur Objekte oder Strukturen an einem Objekt ausmachen, die nicht kleiner als 10 cm sind.

Mit sichtbarem Licht ( $\lambda \approx 600$  nm) kann man keine Atome sehen, denn deren Durchmesser ist etwa 0,1 nm, also grob 1000-mal kleiner als die Wellenlänge. Mit Röntgenstrahlung dagegen „sieht“ man Atome.

Man kann nur solche Strukturen erkennen, die nicht kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung sind.

Außer den elektromagnetischen und den Schallwellen gibt es die Materiewellen. Wir hatten gelernt, dass Elektronen eine Sinuswelle bilden können und dass man solche Wellen zur Interferenz bringen kann. Wie ist deren Wellenlänge? Was man von der Strahlung gewöhnlich weiß, ist die Energie ihrer Teilchen. Wir wollen die Wellenlänge aus der Teilchenenergie berechnen.

Wir erinnern uns an die Beziehung zwischen Impuls und Wellenlänge

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Wenn die Teilchen sehr schnell sind, also fast die Grenzgeschwindigkeit  $c$  haben, so macht ihre Ruheenergie  $E_0$  nur einen kleinen Teil ihrer Gesamtenergie  $E$  aus. Es ist also

$$E_0 \ll E.$$

Wir hatten gesehen, dass dann der Zusammenhang zwischen Energie und Impuls sehr einfach ist:

$$E = c \cdot p.$$

Damit können wir die Wellenlänge angeben:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}.$$

### Beispiel: SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)

Der Linearbeschleuniger am SLAC erzeugt Elektronen mit einer Energie von 30 GeV ( $= 30 \cdot 10^9$  eV). Für deren Wellenlänge ergibt sich:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{30 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 4,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}. \end{aligned}$$

Das ist viel weniger als der Durchmesser eines Protons ( $1,7 \cdot 10^{-15}$  m). Tatsächlich wurde am SLAC entdeckt, dass das Proton eine innere Struktur hat. Es besteht aus kleineren Teilchen, den Quarks.

### Beispiel: LHC (Large Hadron Collider)

Im LHC kreisen Protonen mit einer Energie von 7000 GeV (7000 Gigaelektronenvolt).

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{7 \cdot 10^{12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \\ = 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ m.}$$

Die Wellenlänge ist also 200-mal kleiner als die der Elektronen am SLAC.

Du siehst, dass man mit Materiewellen eine sehr hohe Auflösung erreichen kann.

## 11.3 Die Größe der Teilchen

Wenn man wissen will, wie ein Elektron aussieht, könnte man es so versuchen: Man schickt zwei hochenergetische Elektronenstrahlen gegeneinander und untersucht, wie die einen Elektronen durch die anderen gestreut werden. Daraus kann man berechnen, wie groß die Elektronen sind. Nun hatten wir früher gesehen, dass ein Elektron, d. h. eine Portion Elektronium, die unterschiedlichsten Gestalten annehmen kann. Das Elektron kann also ganz unterschiedlich groß sein. Um es klein zu bekommen, muss man es zusammendrücken, und dazu braucht man Energie. Je stärker man es zusammendrückt, d. h., je mehr Energie man ihm zuführt, desto kleiner wird es. Wenn man nun ein Elektron mit einer Strahlung hoher Energie untersucht, so führt man ihm Energie zu. Je höher die Energie der Strahlung ist, desto kürzer ist ihre Wellenlänge, desto besser wird die Auflösung, desto kleiner wird aber auch das untersuchte Elektron. Die Frage ist also nicht unbedingt „Wie groß ist das Elektron?“, sondern „Wie klein kann man das Elektron machen?“

In den bisherigen Experimenten konnte man keine untere Grenze für den Durchmesser des Elektrons entdecken. Da man die Elektronen mit einer Strahlung einer Wellenlänge von  $10^{-19}$  m untersucht hat, kann man nur schließen, dass die Maximalgröße des Elektrons kleiner als dieser Wert sein muss.

Anders ist es beim Proton. Man hat festgestellt, dass das Proton eine Größe von  $1,7 \cdot 10^{-15}$  m hat. Man hat also eine endliche Ausdehnung gefunden. Das bedeutet, dass das Proton eine innere Struktur hat; auch die-

se hat man aufgedeckt: Es besteht aus drei kleineren Teilchen, den sogenannten Quarks, wofür jedoch noch keine Minimalgröße gefunden wurde.

Manchmal wird gesagt, dass die Elektronen und die Quarks punktförmig seien. Diese Aussage ist aus zwei Gründen etwas leichtsinnig:

- Wenn man weiß, dass die Maximalgröße eines Teilchens  $10^{-19}$  m ist, so ist damit noch längst nicht gesagt, dass man nicht eines Tages einen Durchmesser und eine innere Struktur findet, die kleiner als  $10^{-19}$  m ist, z. B.  $10^{-20}$  m oder  $10^{-200}$  m oder  $10^{-2000}$  m.
- Um die Größe eines Teilchens auf einen Punkt zu reduzieren, brauchte man unendlich viel Energie. Man kann daher die Punktförmigkeit von irgendetwas prinzipiell nicht nachweisen.

## 11.4 Inelastische Streuung – Teilchenreaktionen

Man erzeugt Teilchen hoher Energie nicht nur, um kleine Strukturen „aufzulösen“ (d. h. zu sehen), sondern vor allem, um neue Teilchen zu erzeugen. Wie macht man das? Man lädt irgendwelche Teilchen, von denen es genug gibt, mit möglichst viel Energie. Im Fall des LHC sind das gewöhnlich Protonen. Man erzeugt zwei Protonenstrahlen und sorgt dafür, dass sie sich unter einem sehr kleinen Winkel kreuzen, also fast frontal aufeinanderstoßen. Die meisten Protonen fliegen geradeaus durch diesen Kreuzungsbereich hindurch. Nur einige wenige werden aneinander inelastisch gestreut. Man kann auch sagen, sie stoßen zusammen. Wenn das passiert, entsteht eine große Zahl neuer Teilchen. Darunter sind viele, die es in unserer natürlichen Umgebung nicht gibt. Du weißt, dass die uns umgebende Materie aus nur drei verschiedenen Teilchen aufgebaut ist: Protonen, Neutronen und Elektronen.

Immer wenn eine neue Beschleunigeranlage eine höhere Energie erreichte, wurden neue Teilchen mit größerer Ruhmasse erzeugt – inzwischen über hundert verschiedene Arten.

Warum gibt es aber diese künstlich erzeugten Teilchen nicht in der Natur? Weil sie sehr schnell wieder zerfallen. Dieses Zerfallen ist ein statistischer Prozess, wie wir ihn schon aus der Kernphysik kennen. Man kann für ein gegebenes Teilchen nicht angeben, wann es zerfällt. Wenn man aber eine große Zahl gleichartiger Teilchen betrachtet, kann man eine Zeitdauer angeben, nach der nur noch ein bestimmter Prozentsatz

## 11.5 Die alten und die neuen Teilchen

davon übrig ist. Wählt man für diesen Prozentsatz 50 %, so nennt man die zugehörige Zeit die Halbwertszeit. Es ist üblich, die Zeit zu betrachten, nach der nur noch 37 % übrig sind. Man nennt sie die Lebensdauer der Teilchen.

Wegen der kurzen Lebensdauer der Teilchen sind der Nachweis und die Bestimmung ihrer Eigenschaften mit sogenannten Detektoren kompliziert.

Wir wollen versuchen, uns einen Überblick über die verschiedenen Teilchen zu verschaffen.

## 11.5 Die alten und die neuen Teilchen

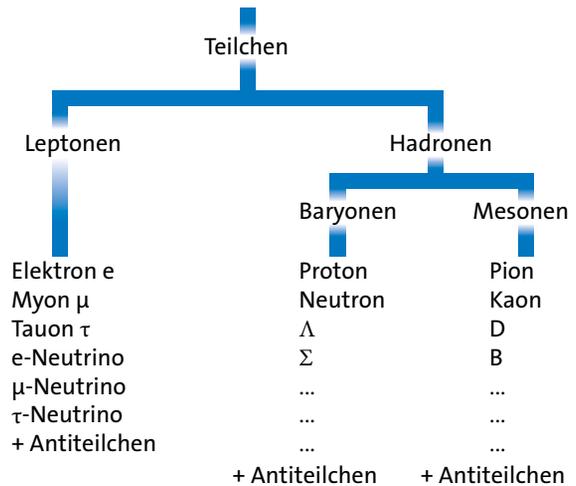
### Klassifizierung

Alle Teilchen können zunächst in zwei Klassen eingeteilt werden, die Leptonen und die Hadronen, Abb. 11.1. Für die Leptonen konnte bisher keine innere Struktur festgestellt werden. Die Hadronen dagegen sind zusammengesetzte Teilchen. Sie bestehen aus sogenannten Quarks. Auch für die Quarks wurde keine innere Struktur gemessen.

Die Hadronen kann man wiederum einteilen in Mesonen und Baryonen. Die Mesonen bestehen aus zwei, die Baryonen aus drei Quarks.

### Leptonen

Es gibt 12 verschiedene Leptonen, Tabelle 11.1, die beiden ersten Spalten. Je zwei bilden ein Teilchen-Antiteilchen-Paar. Die baryonische Ladung aller Leptonen ist gleich null. Unter den Leptonen befinden sich einige alte Bekannte: das Elektron und das e-Neutrino, das wir früher einfach als Neutrino bezeichnet hatten, und deren Antiteilchen. Das Myon hat nur eine kurze Lebensdauer, das Tauon eine noch viel kürzere.



**Abb. 11.1** Klassifizierung der Teilchen. Leptonen haben (nach heutiger Kenntnis) keine innere Struktur. Hadronen bestehen aus Quarks. Auch Quarks sind strukturlos.

Myonen trifft man trotz ihrer kurzen Lebensdauer auf der Erde an. Sie entstehen durch die kosmische Strahlung in etwa 10 km Höhe. Die Strahlung aus dem Kosmos besteht zum großen Teil aus hochenergetischen Protonen. Wenn diese auf Atomkerne der Atmosphäre treffen entstehen über einige Zwischenschritte Myonen, deren Geschwindigkeit nahe der Grenzgeschwindigkeit  $c$  ist. Dass sie es überhaupt bis zur Erdoberfläche schaffen, ist zunächst überraschend, denn man könnte erwarten, dass sie während ihrer Lebensdauer nur eine Strecke von

$$s = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 600 \text{ m}$$

zurücklegen können. Nun ist aber  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  die Lebensdauer in ihrem eigenen Bezugssystem. Im Be-

Lepton-Antilepton-Paar		elektrische Ladung		leptonische Ladung		Ruhenergie (= Ruhmasse/ $c^2$ )	Lebensdauer in s
e (Elektron)	$\bar{e}$	-1	+1	+1	-1	0,511 MeV	$\infty$
$\mu$ (Myon)	$\bar{\mu}$	-1	+1	+1	-1	105,7 MeV	$2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
$\tau$ (Tauon)	$\bar{\tau}$	-1	+1	+1	-1	1777 MeV	$3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
$\nu_e$ (Elektronneutrino)	$\bar{\nu}_e$	0	0	+1	-1	< 2,2 eV	$\infty$
$\nu_\mu$ (Myonneutrino)	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	+1	-1	< 0,17 eV	$\infty$
$\nu_\tau$ (Tauneutrino)	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	+1	-1	< 15,5 eV	$\infty$

**Tab. 11.1** Leptonen und Antileptonen mit ihrer elektrischen Ladung (Einheit ist die Elementarladung), leptonischen Ladung, Ruhenergie und Lebensdauer

Quark-Antiquark-Paar		elektrische Ladung		baryonische Ladung		Ruhenergie (= Ruhmasse/c <sup>2</sup> )
u (Up)	$\bar{u}$	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 3 MeV
d (Down)	$\bar{d}$	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 5 MeV
s (Strange)	$\bar{s}$	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 100 MeV
c (Charm)	$\bar{c}$	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 1,25 GeV
b (Bottom)	$\bar{b}$	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 4,2 GeV
t (Top)	$\bar{t}$	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 171 GeV

Tab. 11.2 Quarks und Antiquarks mit ihrer elektrischen Ladung (Einheit ist die Elementarladung), baryonischen Ladung und Ruhenergie

Hadron	Ruhenergie (= Ruhmasse/c <sup>2</sup> )	elektrische Ladung	baryonische Ladung	leptonische Ladung	Lebensdauer in s	Zusammensetzung
Proton	938,3 MeV	+1	+1	0	∞	uud
Neutron	939,6 MeV	0	+1	0	885,7	udd
Λ <sup>0</sup>	1115,6 MeV	0	+1	0	2,6 · 10 <sup>-10</sup>	uds
Σ <sup>0</sup>	1189,4 MeV	+1	+1	0	0,8 · 10 <sup>-10</sup>	uus
π <sup>+</sup>	139,6 MeV	+1	0	0	2,6 · 10 <sup>-8</sup>	u $\bar{d}$
K <sup>0</sup>	493,7 MeV	-1	0	0	1,2 · 10 <sup>-8</sup>	u $\bar{s}$
η <sub>e</sub>	2980,0 MeV	0	0	0	2,5 · 10 <sup>-23</sup>	c $\bar{c}$
B <sup>+</sup>	5270,8 MeV	+1	0	0	1,4 · 10 <sup>-12</sup>	u $\bar{b}$

Tab. 11.3 Daten einiger Hadronen

zugssystem der Erde – und darauf kommt es an – ist sie viel größer.

**Quarks**

Es gibt 12 verschiedene Quarks – genau so viele, wie es Leptonen gibt. Je zwei Quarks bilden ein Quark-Antiquark-Paar, Tabelle 11.2. Die leptonische Ladung aller Quarks ist gleich null.

Um die neuen Teilchen, die man im Collider erzeugt, zu beschreiben, ist es zweckmäßig, neue physikalische Größen einzuführen. Diesen Größen entsprechen keine Eigenschaften, die wir aus unserer normalen, makroskopischen Erfahrung kennen. Sie erscheinen uns also nur als mathematische Hilfsmittel. Zwei dieser Größen hattest du schon im Zusammenhang mit den Kernreaktionen kennengelernt: die baryonische Ladung und die leptonische Ladung. Für die Teilchenphysik wurden einige weitere solcher Grö-

ßen eingeführt. Da die Werte dieser Größen immer ganzzahlige Vielfache eines bestimmten Wertes sind, wie auch bei der elektrischen Ladung oder beim Drehimpuls, gibt man sie immer in Vielfachen dieser Einheit an. Die Werte, die man angibt, sind also ganze Zahlen. Man nennt diese Zahlen *Quantenzahlen*.

**Hadronen**

Durch Kombination der sechs Quarks und ihrer Antiquarks erhält man die verschiedenen Hadronen, von denen man über 100 kennt. Zwei davon, das Proton und das Neutron, machen zusammen mit den Elektronen praktisch die ganze in der Natur vorkommende Materie aus, auch die aller Himmelskörper. Alle anderen hat man künstlich erzeugt. Die Baryonen bestehen aus drei, die Mesonen aus zwei Quarks. Tabelle 11.3 enthält als Beispiel die Daten von vier Baryonen und vier Mesonen. In der letzten Spalte

## 11.5 Die alten und die neuen Teilchen

stehen die drei bzw. zwei Quarks, aus denen das Baryon besteht.

Zusammengehalten werden die Quarks in einem Baryon oder Meson durch ein Feld. Es ist das Feld der *starken Wechselwirkung*. Da es sich nur im Innern der Hadronen befindet, kennen wir es aus der makroskopischen Welt nicht.

Ein Vergleich der Ruhenergiewerte aus Tabelle 11.2 und 11.3 zeigt, dass die Ruhenergie der Hadronen viel größer ist als die Summe der Ruhenergien der Quarks, aus denen sie bestehen. Wir betrachten als Beispiel das Proton:

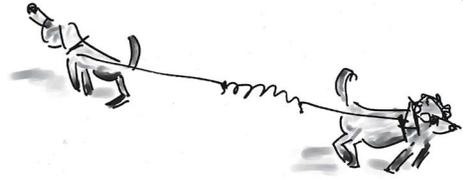
Proton	938 MeV
u-quark 3 MeV	} 11 MeV
u-quark 3 MeV	
d-quark 5 MeV	

Der größte Teil der Ruhenergie des Protons stammt nicht von den Quarks, sondern von dem Feld der starken Wechselwirkung, das die Quarks zusammenhält.

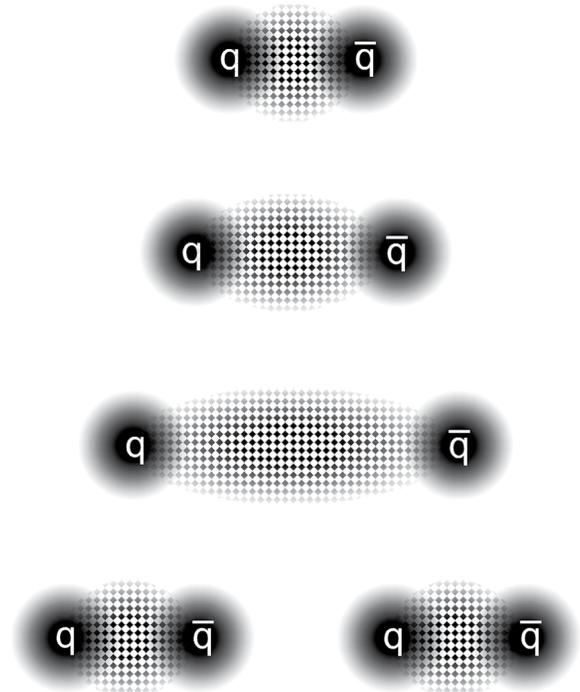
Eine merkwürdige Eigenschaft der Quarks haben wir noch nicht angesprochen: Quarks existieren nur im Innern der Hadronen; es gibt keine freien Quarks. Man kann das auch anders ausdrücken: Quarks gibt es nur zu zweit oder zu dritt. Aber warum sollte es nicht möglich sein, ein Quark aus einem Proton herauszuzucken? Wir wollen mithilfe eines Vergleichs versuchen zu verstehen, warum das nicht geht.

Zwei Hunde hängen über eine Feder zusammen, Abb. 11.2. Solange die Feder nicht gespannt ist, hat jeder Hund das Gefühl, sich frei bewegen zu können. Erst wenn sie versuchen, sich voneinander zu entfernen, merken sie, dass sie aneinanderhängen. Sie können sich ein Stück voneinander entfernen, aber nur unter Energieaufwand. Je weiter sie sich entfernen wollen, desto mehr Energie müssen sie in die Feder stecken. So steht es auch mit den Quarks in einem Baryon oder in einem Meson.

Wenn die Hunde immer mehr Energie in die Feder pumpen, passiert es schließlich, dass die Feder reißt, und jetzt sind sie wirklich frei. Bei den Quarks passiert etwas anderes, wenn man immer mehr Energie in das Meson oder Baryon hineinschießt: Wenn die Energie den Betrag erreicht, der nötig ist, um ein neues Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen, trennen sich die beiden ursprünglichen Quarks tatsächlich, aber jedes von ihnen bildet gleich ein neues Pärchen mit einem der neu erzeugten Quarks, Abb. 11.3. Wir haben also wieder kein freies Quark bekommen.



**Abb. 11.2** Solange die Feder entspannt ist, fühlen sich die beiden Hunde frei. Um sich voneinander zu entfernen, müssen sie Energie in die Feder bringen. Wenn sie zu stark ziehen, d. h. zu viel Energie in die Feder pumpen, reißt die Feder, und beide Hunde sind wieder frei.



**Abb. 11.3** Solange das Quark und das Antiquark (oben) nah beieinander sind, sind sie „frei“. Um sie voneinander zu entfernen, muss man Energie in das Feld der starken Wechselwirkung stecken. Wenn die Energie ausreicht, um ein neues Quark und ein neues Antiquark zu erzeugen, trennt sich das ursprüngliche Quark-Antiquark-Paar und es entstehen zwei neue Paare.

### Aufgaben

1. Welche Regelmäßigkeiten enthält Tabelle 11.1?
2. Welche Regelmäßigkeiten enthält Tabelle 11.2?
3. Prüfe nach, ob die Einträge der Spalten mit der elektrischen und der baryonischen Ladung von Tabelle 11.3 korrekt sind.

## 12 ORDNUNGSPRINZIPIEN IN DER PHYSIK

Warum ist man an der Erzeugung und an den Eigenschaften künstlich erzeugter Teilchen so interessiert, dass man Milliarden von Euro für Geräte ausgibt, mit denen man sie erzeugen kann?

Die Welt erscheint uns verwickelt und unübersichtlich. Die Welt verstehen heißt Ordnungsprinzipien im scheinbaren Chaos zu entdecken – falls es solche Ordnungsprinzipien überhaupt gibt. Die gesammelte Erfahrung der letzten Jahrhunderte, seit es eine ernst zu nehmende Naturwissenschaft gibt, hat gezeigt, dass es solche Ordnungsprinzipien tatsächlich gibt. Diese sind von zweierlei Art:

- Man führt die Vielfalt der Erscheinungen auf das Zusammenspiel von vielen Teilchen zurück, von denen es nur eine kleine Zahl von Arten gibt. Alle Teilchen einer Art sind untereinander gleich. Wir wollen diese Methode das „Lego-Prinzip“ nennen.
- Man beschreibt die Welt mathematisch, d. h. mit Theorien.

### 12.1 Das „Lego-Prinzip“

Die erste Methode, um zu einem vereinfachenden Verständnis der Welt zu gelangen, versteht man am besten mithilfe eines Vergleichs. Wir betrachten Lego-Bausteine. Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, es gebe zehn verschiedene Formen von Lego-Bausteinen, alle in sechs verschiedenen Farben. Es gibt also insgesamt 60 Bausteinsorten. Mit diesen kann man nun unzählige verschiedene Sachen bauen: Häuser, Fahrzeuge, Menschen, Tiere, Roboter .... Keines

dieser Dinge gleicht dem anderen. Der chaotischen Vielfalt der Lego-Bauwerke liegt aber ein einfaches Prinzip zugrunde. Die Vielfalt entsteht durch unterschiedliche Kombinationen von einigen wenigen Elementarbausteinen.

Dieselbe Methode lässt sich auf die Nichtspielzeugwelt anwenden.

Ein solcher Versuch, die Welt zu erklären, war schon von *Leukippos* und *Demokrit* im 5. Jahrhundert vor Christus gemacht worden. Aus heutiger Sicht würde man diese Ideen vielleicht als Spekulationen bezeichnen, doch später zeigte sich, dass das Erklärungsverfahren tatsächlich funktioniert. Die Wissenschaft, die sich damit befasst, ist die Chemie. Das Auftreten der unzähligen verschiedenen (reinen) Stoffe kann man mit dem „Lego-Prinzip“ verstehen: Ein reiner Stoff besteht aus untereinander gleichen Molekülen. Ein Molekül ist zusammengesetzt aus Atomen, und von diesen gibt es nur rund 100 Stück – so viele, wie es chemische Elemente gibt. So kann man die Existenz der Millionen verschiedener Stoffe, die wir kennen, zurückführen auf nur hundert Grundbausteine.

In unserem Vergleich entsprechen die verschiedenen Atome den verschiedenen Sorten von Legobausteinen. Einem Molekül entspricht ein Bauwerk, das aus Legobausteinen zusammengesetzt wurde.

Wir haben hier noch außer Acht gelassen, dass die Atome jedes chemischen Elements mit unterschiedlichen Massen auftreten. Von jedem Element es gibt eine Reihe von Isotopen. Wenn man die verschiedenen Isotope aller Elemente als Grundbausteine betrachtet, so hat man es mit etwa 3000 Grundstoffen zu tun: den Nukliden. Die Atome eines Nuklids sind un-

## 12.2 Theorien

tereinander gleich; die Atome verschiedener Nuklide sind verschieden. Mit „untereinander gleich“ ist gemeint: Sie haben dieselben chemischen Eigenschaften und sie haben dieselbe Masse, Abb. 12.1.

Das Lego-Prinzip kann also die Vielfalt der Stoffe auf geniale Art erklären. Millionen verschiedener Moleküle werden zurückgeführt auf etwa 3000 verschiedene Atome. Es stellt sich jedoch gleich die nächste Frage: Woraus bestehen denn die einzelnen Atome? Wir haben den Grund für die Vielfalt der reinen Stoffe erkannt. Wie erklärt sich aber die Vielfalt der verschiedenen Atome? Die Antwort kennst du längst. Wir wenden das Lego-Prinzip noch einmal an: Die Atome sind selbst wieder legoartig zusammengesetzt aus Bausteinen, von denen es nur drei verschiedene Arten gibt: die Protonen, die Neutronen und die Elektronen.

Sind wir damit am Ende? Du hast gerade gelernt, dass die Antwort auf diese Frage „nein“ heißen muss. Am Aufbau der natürlichen uns umgebenden Materie sind zwar nur drei Bausteine der tieferen Lego-Ebene beteiligt, aber das sind nicht alle Bausteine, die es auf dieser Ebene gibt. Wir wissen, dass es außer Proton und Neutron noch viele andere Hadronen gibt, und außer den Elektronen noch andere Leptonen. Und auf die Hadronen können wir das Lego-Prinzip noch einmal anwenden. Wir können die Vielfalt der Hadronen zurückführen auf die Quarks, von denen es nur noch 12 Stück gibt. Wir hätten also als Bausteine der Materie nur noch 12 Leptonen und 12 Quarks.

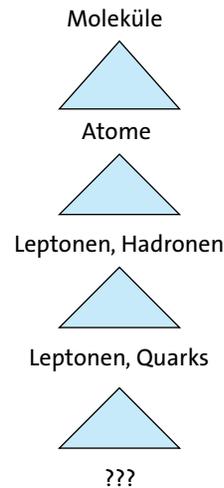
Sicher kannst du dir vorstellen, wie es weiter geht. Es liegt die Vermutung nahe, dass es dabei nicht bleibt. Tatsächlich gibt es zur Zeit Theorien, die nahelegen, dass es auf der Quark-Lepton-Ebene mehr Teilchen gibt und dass man dafür ein neues Ordnungsprinzip finden muss. Man nennt diese Theorien supersymmetrische Theorien.

### Aufgabe

1. Setze die Abbildung 12.1 nach oben fort. Es sind mehrere Fortsetzungen möglich: eine zum immer Komplexeren und eine zum immer Größeren.

## 12.2 Theorien

Die zweite Methode, Ordnung in das scheinbare Durcheinander der Welt zu bringen, besteht darin, dass man die Mathematik auf die Natur anwendet. Man beschreibt die verschiedensten Erscheinungen an den verschiedensten Orten zu den verschiedensten



**Abb. 12.1** Hierarchie von Bausteinen: Moleküle bestehen aus Atomen, Atome aus Hadronen und Leptonen, Hadronen aus Quarks.

Zeiten mit ein und derselben Formel. Der Zusammenhang  $P = v \cdot F$  gilt für ein Auto, für ein Elektron und für einen Stern. Er gilt in Deutschland, in China, auf dem Mars und in der Andromeda-Galaxis, er gilt jetzt und galt vor 10 000 Jahren und vor 10 Milliarden Jahren, und er wird noch in 10 Milliarden Jahren gelten. Eine Theorie oder eine Formel erfasst also Gemeinsamkeiten vieler verschiedener Vorgänge.

Die Naturwissenschaft muss aber aus verschiedenen Gründen immer neue Theorien erfinden:

- Eine Theorie beschreibt eine Erscheinung immer nur näherungsweise. Man bestätigt die Gültigkeit einer Theorie, indem man Messungen macht. Messungen haben prinzipiell nur eine begrenzte Genauigkeit. Im Lauf der Zeit werden die Messungen präziser. Irgendwann stellt man fest, dass die bisherige Theorie die Welt nicht genau genug beschreibt und man konstruiert eine neue Theorie. Ein Beispiel ist die „klassische“ Mechanik. Sie war brauchbar, solange man es mit Geschwindigkeiten zu tun hatte, die klein gegen die Grenzggeschwindigkeit  $c$  sind. Mit zunehmender Messgenauigkeit, aber auch mit zunehmender Geschwindigkeit der untersuchten Objekte, stellte sich heraus, dass die klassische Mechanik nicht mehr ausreichte. So wurde die Relativitätstheorie erfunden.
- Theorien, mit denen verschiedene Erscheinungsbe-reiche beschrieben werden, entstehen gewöhnlich unabhängig voneinander. Irgendwann stellt man fest, dass man zwei Bereiche zusammenfassen kann; dass man sie mit einer einzigen, umfassenden Theorie beschreiben kann. Ein Beispiel sind

Elektrizität und Magnetismus. Die elektrischen und die magnetischen Erscheinungen schienen zunächst nichts miteinander zu tun zu haben. Es stellte sich dann aber heraus, dass sie sehr eng miteinander verwoben sind, und es entstand die Theorie der Elektrodynamik, die sowohl die elektrischen wie die magnetischen Erscheinungen erfasst.

- Wenn sich die Untersuchungsmethoden verbessern, dringt man in Erscheinungsbereiche vor, die vorher noch unbekannt waren. Dafür muss eine neue Theorie erfunden werden. Ein Beispiel ist die Teilchenphysik. Solange man die innere Struktur der Hadronen noch nicht kannte, kam man mit der Quantentheorie gut aus. Mit der Entdeckung der Quarks wurde eine ganz neue Theorie gebraucht, die Quantenchromodynamik.

Auf dem Programm der Forscherinnen und Forscher stehen noch viele ungelöste Probleme; das heißt, es müssen weitere neue Theorien erdacht werden. Es gibt auch schon Kandidaten, die noch auf ihre Fertigstellung und ihre Bestätigung warten: die schon erwähnten supersymmetrischen Theorien, die „Stringtheorien“ und die „Grand Unification Theory“.

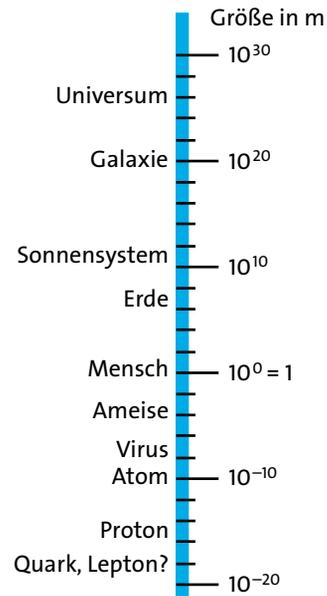
## 12.3 Das ganz Kleine und das ganz Große

Wir sind mit der Teilchenphysik vorgedrungen in die kleinsten Strukturen, die man bisher erforscht hat. Damit du dir eine bessere Vorstellung der Größen der Teilchen machen kannst, zeigt Abbildung 12.2 die Größe verschiedener Objekte auf einer logarithmischen Skala. Der Abstand zwischen zwei benachbarten kleinen Strichen entspricht jeweils einem Faktor 100.

In die Abbildung sind bei  $10^{-19}$  m das Quark und das Lepton eingetragen, allerdings mit einem Fragezeichen, denn alles, was man bisher weiß, ist, dass diese Teilchen höchstens  $10^{-19}$  m groß sind. Ob es Strukturen gibt, die größer als  $10^{26}$  m oder kleiner als  $10^{-19}$  m gibt, wissen wir nicht.

## 12.4 Die elementaren Teilchen und die Weltformel

Manchmal wird behauptet, die Naturwissenschaft sei auf der Suche nach den letzten, endgültigen, strukturlosen, elementaren Bausteinen der Materie. Und man



**Abb. 12.2** Größen verschiedener Objekte, von den kleinsten bis zu den größten, auf einer logarithmischen Skala: Der Abstand zwischen zwei benachbarten kurzen Strichen entspricht einem Faktor 100.

hört, die Theoretiker beschäftigen sich damit, eine Weltformel zu suchen, d. h. eine Theorie, die endgültig alles beschreibt.

Tatsächlich mag es auch der heimliche Wunsch mancher Naturwissenschaftler sein, dass man irgendwann einmal am Ende ist, dass man die definitiv elementaren Teilchen findet und die Theorie, die alles umfasst.

Das Streben nach solchen endgültigen Antworten ist menschlich. Es ist dasselbe Streben, das unsere Vorfahren veranlasste, Götter und Dämonen zu erfinden. So hatte man, wenigstens, wenn man nicht sehr anspruchsvoll im Denken war, die endgültige Erklärung für alles Ungemach, wie Blitzschlag, Missernten und verlorene Kriege. Man hatte Klarheit darüber, was gut und böse ist, und man hatte endgültige Antworten auf die Frage nach dem Anfang und dem Ende der Welt. Für den, der nach Erkenntnis strebt, ist aber die Aussicht, dass man einmal alles ergründet haben wird, eher deprimierend. Viel befriedigender und spannender ist es, wenn das erfolgreiche Forschen immer weiter geht. ■

## Tabelle der Trennenergien

$Z$  = Anzahl der Protonen

$N$  = Anzahl der Neutronen

$E_T$  = Trennenergie in pJ

	Z	N	$E_T$		Z	N	$E_T$		Z	N	$E_T$		Z	N	$E_T$
<b>H</b>	1	0	0,00	<b>N</b>	7	5	11,86	<b>Na</b>	11	9	23,39	<b>P</b>	15	13	35,48
		1	0,356			6	15,08			10	26,13			14	38,34
		2	1,359			7	16,77			11	27,90			15	40,15
<b>He</b>	2	1	1,2364			8	18,50			12	29,89			16	42,12
		2	4,5334			9	18,90			13	31,01			17	43,39
		3	4,39	10	19,84	14	32,45			18	45,01				
		4	4,69	11	20,30	15	33,35	19	46,02						
<b>Li</b>	3	2	4,22	<b>O</b>	8	6	15,82	<b>Mg</b>	12	9	23,90	<b>S</b>	16	14	39,04
		3	5,13			7	17,94			10	27,01			15	41,13
		4	6,29			8	20,45			11	29,12			16	43,54
		5	6,61			9	21,11			12	31,76			17	44,93
		6	7,26			10	22,40			13	32,94			18	46,76
						11	23,03			14	34,72			19	47,88
		12	24,25	15	35,75	20	49,46								
<b>Be</b>	4	3	6,02	<b>F</b>	9	8	20,54	<b>Al</b>	13	11	29,41	<b>Cl</b>	17	16	43,91
		4	9,05			9	22,01			12	32,13			17	45,75
		5	9,32			10	23,68			13	33,95			18	47,78
		6	10,41			11	24,74			14	36,04			19	49,15
		7	10,49			12	26,04			15	37,28			20	50,80
		13	26,87			16	38,79			21	51,78				
		14	28,08	17	39,71	22	53,08								
<b>B</b>	5	3	6,05												23
		4	9,02	<b>Ne</b>	10	7	18,09	<b>Si</b>	14	12	33,01	<b>Ar</b>	18	16	44,66
		5	10,37			8	21,17			13	35,14			17	46,70
		6	12,21			9	23,04			14	37,90			18	49,14
		7	12,75			10	25,74			15	39,25			19	50,55
8	13,53	11	26,82			16	40,95			20	52,45				
<b>C</b>	6	3	6,25	12	28,48	17	42,01	17	42,01	21	53,50			21	53,50
		4	9,71	13	29,31	18	43,48	18	43,48	22	55,08			22	55,08
		5	11,77	14	30,74	19	44,23	19	44,23	23	56,06			23	56,06
		6	14,77	15	31,42			20	46,70	20	46,70			24	57,57
		7	15,56					21	49,14	21	49,14			25	58,47
		8	16,87					22	50,55	22	50,55	26	59,81		
		9	17,06					23	52,45	23	52,45				
								24	53,50	24	53,50				
								25	55,08	25	55,08				
						26	56,06	26	56,06						

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>K</b>	19	18	49,44
		19	51,37
		20	53,47
		21	54,72
		22	56,33
		23	57,54
		24	59,09
		25	60,25
		26	61,68
		27	62,78
	28	64,12	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Ti</b>	22	21	57,55
		22	60,16
		23	61,68
		24	63,80
		25	65,22
		26	67,08
		27	68,39
		28	70,14
		29	71,16
		30	72,41
	31	73,28	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Fe</b>	26	25	69,13
		26	71,73
		27	73,44
		28	75,58
		29	77,07
		30	78,87
		31	80,09
		32	81,70
		33	82,76
		34	84,17
	35	85,06	
	36	86,35	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Cu</b>	29	30	81,69
		31	83,30
		32	85,18
		33	86,60
		34	88,34
		35	89,61
		36	91,20
		37	92,33
		38	93,79
		39	94,80

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Ca</b>	20	18	50,17
		19	52,30
		20	54,80
		21	56,14
		22	57,98
		23	59,25
		24	61,04
		25	62,22
		26	63,89
		27	65,05
	28	66,65	
	29	67,47	
	30	68,49	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>V</b>	23	23	62,54
		24	64,62
		25	66,31
		26	68,16
		27	69,66
		28	71,43
		29	72,60
		30	73,96
		31	74,94

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Co</b>	27	27	74,14
		28	76,39
		29	78,01
		30	79,83
		31	81,21
		32	82,88
		33	84,08
		34	85,57
		35	86,63
		36	87,99

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Zn</b>	30	31	84,15
		32	86,21
		33	87,67
		34	89,58
		35	90,85
		36	92,63
		37	93,76
		38	95,39
		39	96,43
		40	97,90
	41	98,84	
	42	100,26	
	43	101,12	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Cr</b>	24	22	61,20
		23	63,31
		24	65,92
		25	67,62
		26	69,70
		27	71,18
		28	73,11
		29	74,39
		30	75,94
		31	76,94
	32	78,27	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Ni</b>	28	27	74,88
		28	77,54
		29	79,18
		30	81,14
		31	82,58
		32	84,41
		33	85,66
		34	87,36
		35	88,45
		36	90,00
	37	90,98	
	38	92,42	
	39	93,34	

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Sc</b>	21	21	56,83
		22	58,77
		23	60,32
		24	62,14
		25	63,54
		26	65,25
		27	66,57
		28	68,19
		29	69,16

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Mn</b>	25	25	68,35
		26	70,55
		27	72,23
		28	74,16
		29	75,60
		30	77,24
		31	78,40
		32	79,79
		33	80,81

	Z	N	E <sub>T</sub>
<b>Ga</b>	31	33	88,30
		34	90,21
		35	91,67
		36	93,47
		37	94,80
		38	96,45
		39	97,67
		40	99,17
		41	100,21
		42	101,68
	43	102,71	
	44	104,07	

## Anhang

	Z	N	$E_T$														
<b>Ge</b>	32	34	91,21	<b>Br</b>	35	41	105,16	<b>Sr</b>	38	43	111,43	<b>Nb</b>	41	48	122,87		
		35	92,67			42	106,92			44	113,45			49	124,49		
		36	94,65			43	108,25			45	114,87			50	126,42		
		37	95,97			44	109,96			46	116,78			51	127,68		
		38	97,81			45	111,22			47	118,15			52	129,10		
		39	99,00			46	112,85			48	119,99			53	130,25		
		40	100,72			47	114,07			49	121,34			54	131,61		
		41	101,81			48	115,60			50	123,12			55	132,72		
		42	103,45			49	116,70			51	124,14			56	134,01		
		43	104,49			50	118,12			52	125,39						
		44	106,00							53	126,32			<b>Mo</b>	42	48	123,96
		45	106,97			<b>Kr</b>	36			39	102,77					49	125,58
		46	108,37							40	104,82					50	127,61
		47	109,29							41	106,31					51	128,91
		42	108,23	52	130,46												
		43	109,57	53	131,64												
		44	111,42	54	133,10												
		45	112,68	55	134,20												
<b>As</b>	33	37	96,69	46	114,44	<b>Y</b>	39	45	115,63	56	135,58						
		38	98,55	47	115,63			46	117,50	57	136,53						
		39	99,90	48	117,32			47	119,02	58	137,86						
		40	101,63	49	118,46			48	120,92	59	138,72						
		41	102,91	50	120,04			49	122,41								
		42	104,55	51	120,92			50	124,25	<b>Tc</b>	43	51	129,65				
		43	105,72	52	122,05			51	125,35			52	131,24				
		44	107,28	53	122,87			52	126,62			53	132,50				
		45	108,39	54	129,78			53	127,67			54	134,02				
		46	109,82					54	128,87			55	135,19				
		<b>Rb</b>	37	45	113,61	55	129,86	56	136,62								
				46	115,36	<b>Zr</b>	40	47	120,20			57	137,71				
				47	116,76			48	122,18								
		48	118,44	49	123,67			<b>Ru</b>	44	50	129,27						
		49	119,83	50	125,59					51	130,70						
		50	121,42	51	126,74					52	132,42						
		51	122,39	52	128,13					53	133,72						
		52	123,54	53	129,21					54	135,35						
		53	124,46	54	130,52	55	136,54										
				55	131,56	56	138,09										
<b>Se</b>	34	37	97,66			56	132,82	57	139,18								
		38	99,72			57	133,71	58	140,66								
		39	101,07			58	134,74	59	141,66								
		40	103,00					60	143,09								
		41	104,29					61	144,03								
		42	106,07					62	145,39								
		43	107,26					63	146,26								
		44	108,94														
		45	110,06														
		46	111,65														
		47	112,72														
		48	114,21														
49	115,14																
50	116,53																

	Z	N	$E_T$
<b>Rh</b>	45	53	134,41
		54	136,08
		55	137,39
		56	138,97
		57	140,17
		58	141,66
		59	142,78
		60	144,22
	61	145,27	

	Z	N	$E_T$
<b>Pd</b>	46	53	135,42
		54	137,20
		55	138,53
		56	140,22
		57	141,44
		58	143,04
		59	144,18
		60	145,71
		61	146,76
		62	148,24
		63	149,22
		64	150,63
65	151,55		
66	152,90		

	Z	N	$E_T$
<b>Ag</b>	47	56	140,89
		57	142,23
		58	143,84
		59	145,11
		60	146,64
		61	147,80
		62	149,28
		63	150,37
		64	151,78
		65	152,82

	Z	N	$E_T$
<b>Cd</b>	48	56	141,92
		57	143,28
		58	145,02
		59	146,29
		60	147,94
		61	149,12
		62	150,70
		63	151,82
		64	153,33
		65	154,38
		66	155,82
		67	156,81
		68	158,20
69	159,13		
70	159,75		

	Z	N	$E_T$
<b>In</b>	49	61	149,95
		62	151,56
		63	152,79
		64	154,30
		65	155,47
		66	156,91
		67	158,00
		68	159,41

	Z	N	$E_T$
<b>Sn</b>	50	59	147,92
		60	149,73
		61	151,04
		62	152,77
		63	154,01
		64	155,66
		65	156,87
		66	158,40
		67	159,51
		68	161,01
		69	162,05
		70	163,51
		71	164,49
		72	165,91
73	166,86		
74	168,22		
75	169,14		
76	170,45		
77	171,34		

	Z	N	$E_T$
<b>Sb</b>	51	67	160,30
		68	161,83
		69	162,95
		70	164,43
		71	165,52
		72	166,96
		73	168,00
		74	169,39
		75	170,39
		76	171,73

	Z	N	$E_T$
<b>Te</b>	52	65	158,42
		66	160,12
		67	161,33
		68	162,98
		69	164,14
		70	165,71
		71	166,83
		72	168,34
		73	169,39
		74	170,85
		75	171,86
		76	173,26
		77	174,24
78	175,59		
79	176,54		
80	177,83		
81	178,77		

	Z	N	$E_T$
<b>I</b>	53	70	166,50
		71	167,70
		72	169,23
		73	170,38
		74	171,84
		75	172,94
		76	174,35
		77	175,39
		78	176,77
		79	177,78
80	179,22		

## Anhang

	Z	N	$E_T$																				
<b>Xe</b>	54	67	162,92	<b>La</b>	57	78	181,32	<b>Nd</b>	60	79	185,37	<b>Eu</b>	63	85	195,71								
		68	164,70			79	182,51			80	187,05			86	197,03								
		69	165,95			80	183,98			81	188,30			87	198,06								
		70	167,63			81	185,17			82	189,88			88	199,33								
		71	168,84			82	186,58			83	190,86			89	200,34								
		72	170,45			83	187,41			84	192,11			90	201,71								
		73	171,61			84	188,49			85	193,03			91	202,74								
		74	173,15			85	189,30			86	194,25			92	204,05								
		75	174,26							87	195,09			93	205,06								
		76	175,74			<b>Ce</b>	58			75	177,95			88	196,27	94	206,26						
		77	176,80							76	179,61			89	197,08	<b>Gd</b>	64	85	196,69				
		78	178,23							77	180,87			90	198,26			86	198,09				
		79	179,26							78	182,46			91	199,11			87	199,13				
		80	180,63							79	183,65			92	200,28			88	200,51				
		81	181,67							80	185,21			<b>Pm</b>	61			81	188,97	89	201,51		
		82	182,95							81	186,41							82	190,57	90	202,93		
		83	183,59							82	187,88							83	191,61	91	203,96		
		<b>Cs</b>	55							75	175,13							83	188,75	84	192,88	92	205,33
										76	176,62							84	189,90	85	193,88	93	206,35
77	177,77			85	190,73			86	195,11	94	207,62												
78	179,21			86	191,83			87	196,06	95	208,57												
79	180,31			87	192,59			88	197,22	96	209,77												
80	181,73			<b>Pr</b>	59			79	184,38	89	198,12	97	210,67										
81	182,81							80	185,95	<b>Sm</b>	62	80	188,51					<b>Tb</b>	65	91	204,81		
82	184,14							81	187,22			81	189,89							92	206,22		
83	184,84							82	188,72			82	191,57							93	207,30		
<b>Ba</b>	56							71	170,47			83	189,66							83	192,66	94	208,60
								72	172,20			84	190,83							84	194,00	95	209,63
						73	173,43	85	191,76			85	195,02							96	210,86		
						74	175,08					86	196,33			97	211,86						
						75	176,28					87	197,27			<b>Dy</b>	66			87	200,66		
						76	177,85					88	198,55							88	202,15		
						77	179,00					89	199,44							89	203,25		
						78	180,52					90	200,77	90	204,76								
						79	181,63					91	201,71	91	205,88								
						80	183,09					92	202,98	92	207,33								
		81	184,20					93	203,91			93	208,42										
		82	185,58									94	209,79										
		83	186,33									95	210,83										
		84	187,37									96	212,14										
		85	188,09									97	213,15										
								98	214,37														
								99	215,29														
								100	216,42														

	Z	N	$E_T$
<b>Ho</b>	67	95	211,67
		96	213,02
		97	214,08
		98	215,37
		99	216,37
		100	217,54

	Z	N	$E_T$
<b>Lu</b>	71	101	222,61
		102	223,93
		103	225,01
		104	226,24
		105	227,25
		106	228,38
		107	229,34

	Z	N	$E_T$
<b>Re</b>	75	107	233,23
		108	234,58
		109	235,62
		110	236,85
		111	237,84
		112	239,02
		113	239,96
		114	241,09

	Z	N	$E_T$
<b>Au</b>	79	115	246,14
		116	247,48
		117	248,55
		118	249,84
		119	250,88
		120	252,10
		121	253,10

	Z	N	$E_T$
<b>Er</b>	68	92	208,96
		93	210,12
		94	211,60
		95	212,70
		96	214,12
		97	215,18
		98	216,54
		99	217,57
		100	218,82
		101	219,78
		102	220,94
		103	221,85
104	222,95		

	Z	N	$E_T$
<b>Hf</b>	72	99	220,98
		100	222,43
		101	223,55
		102	224,93
		103	226,01
		104	227,31
		105	228,34
		106	229,56
		107	230,54
		108	231,72
		109	232,63
110	233,71		
111	234,56		

	Z	N	$E_T$
<b>Os</b>	76	106	232,97
		107	234,09
		108	235,50
		109	236,56
		110	237,89
		111	238,90
		112	240,18
		113	241,13
		114	242,37
		115	243,30
		116	244,51
		117	245,40
118	246,54		

	Z	N	$E_T$
<b>Hg</b>	80	113	244,54
		114	246,01
		115	247,11
		116	248,53
		117	249,62
		118	250,98
		119	252,05
		120	253,33
		121	254,33
		122	255,57
		123	256,53
		124	257,73
125	258,64		

	Z	N	$E_T$
<b>Tm</b>	69	97	215,93
		98	217,33
		99	218,42
		100	219,71
		101	220,77
		102	221,97
		103	222,97

	Z	N	$E_T$
<b>Ta</b>	73	105	229,13
		106	230,39
		107	231,46
		108	232,67
		109	233,64
		110	234,75

	Z	N	$E_T$
<b>Ir</b>	77	111	239,60
		112	240,91
		113	241,93
		114	243,22
		115	244,22
		116	245,46
		117	246,43
		118	247,59

	Z	N	$E_T$
<b>Tl</b>	81	119	252,81
		120	254,13
		121	255,23
		122	256,49
		123	257,55
		124	258,76
		125	259,80
		127	261,51

	Z	N	$E_T$
<b>Yb</b>	70	96	215,76
		97	216,89
		98	218,34
		99	219,44
		100	220,80
		101	221,86
		102	223,14
		103	224,16
		104	225,36
		105	226,29
		106	227,39
		107	228,28
108	229,37		

	Z	N	$E_T$
<b>W</b>	74	104	228,99
		105	230,10
		106	231,44
		107	232,52
		108	233,81
		109	234,80
		110	235,99
		111	236,91
		112	238,06
		113	238,94
114	240,03		

	Z	N	$E_T$
<b>Pt</b>	78	109	237,94
		110	239,40
		111	240,48
		112	241,90
		113	242,93
		114	244,32
		115	245,33
		116	246,67
		117	247,64
		118	248,91
		119	249,85
		120	251,06
		121	251,95
122	253,12		

	Z	N	$E_T$
<b>Pb</b>	82	119	253,70
		120	255,10
		121	256,21
		122	257,55
		123	258,63
		124	259,92
		125	261,00
		126	262,18
		127	262,81
		128	263,65
		129	264,26
		130	265,08

## Anhang

	Z	N	$E_S$
<b>Bi</b>	83	123	259,20
		124	260,49
		125	261,60
		126	262,79
		127	263,53
		128	264,35
		129	265,05

<b>Po</b>	84	122	258,78
		123	259,90
		124	261,25
		125	262,36
		126	263,59
		127	264,32

<b>At</b>	85	123	260,33
		124	261,68
		125	262,83
		126	264,07
		127	264,88
		128	265,84
130	267,58		

<b>Rn</b>	86	121	258,29
		124	262,32
		125	263,48
		126	264,76
		132	270,29
		136	273,68

<b>Fr</b>	87	122	259,98
		125	263,82
		128	267,07
		133	271,75
		136	274,52

<b>Ra</b>	88	134	273,76
		135	274,58
		136	275,62
		137	276,40
		138	277,43
		139	278,16
		140	279,18

	Z	N	$E_T$
<b>Ac</b>	89	135	275,27
		136	276,34
		137	277,20
		138	278,25
		139	279,05

<b>Th</b>	90	138	279,27
		139	280,11
		140	281,20
		141	282,02
		142	283,05
		143	283,82
144	284,81		

<b>Pa</b>	91	138	279,94
		139	280,86
		140	281,96
		141	282,85
		142	283,89

<b>U</b>	92	141	283,86
		142	284,95
		143	285,80
		144	286,85
		145	287,67
		146	288,66
		147	289,43

<b>Np</b>	93	143	286,58
		144	287,63
		145	288,51
		146	289,50

<b>Pu</b>	94	143	287,47
		144	288,59
		145	289,50
		146	290,54
		147	291,38
		148	292,39
149	293,20		

<b>Am</b>	95	145	290,20
		146	291,26
		147	292,15
		148	293,17
		149	294,03

	Z	N	$E_T$
<b>Cm</b>	96	150	296,05
		151	296,88
		152	297,87
		153	298,63

<b>Bk</b>	97	149	295,70
		150	296,76

<b>Cf</b>	98	153	300,42
		154	301,41

<b>Es</b>	99	153	301,08
		154	302,10

<b>Fm</b>	100	156	304,82
		157	305,61

<b>Md</b>	101	156	305,41
		157	306,26

<b>No</b>	102	156	306,20
		157	307,08

<b>Lr</b>	103	153	303,51
		154	304,65
		157	307,59

<b>Rf</b>	104	157	308,25
-----------	-----	-----	--------

<b>Db</b>	105	156	307,66
		157	308,67

<b>Sg</b>	106	157	309,17
-----------	-----	-----	--------

<b>Bh</b>	107	155	307,05
-----------	-----	-----	--------