

1

Die Natur des Lichts

Spricht man von Licht – oder von hell und dunkel – so bezieht man sich im Allgemeinen auf den Spektralbereich, den man mit dem menschlichen Auge wahrnehmen, sehen kann. In Wirklichkeit umfasst das sichtbare Licht nur einen sehr engen Bereich von Wellenlängen in dem gesamten Spektrum der elektromagnetischen Strahlung. Das ist in Abb. 1.1 veranschaulicht.

Das sichtbare Licht ist von derselben Natur wie die kurzwellige Röntgen- und γ -Strahlung oder die langwellige Wärme- und Mikrowellenstrahlung. Auch Radiowellen sind elektromagnetische Wellen. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist nicht an ein Medium, an irgendwelche Materie, gebunden. Das wissen wir. Die elektromagnetische Strahlung die von unserer Sonne zu uns gelangt, breitet sich durch den nahezu luft- und materiefreien Raum zwischen Erde und Sonne aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem luftleeren Raum, also im Vakuum, ist unabhängig von der Wellenlänge der Strahlung. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit ist also für Röntgenstrahlung, sichtbares Licht, Wärmestrahlung und Radiowellen immer gleich groß, nämlich ungefähr 300 000 Kilometer pro Sekunde! Aufgrund dieser ungeheuer großen Geschwindigkeit benötigt das Licht von der Sonne auf dem Weg zu unserer Erde lediglich ungefähr acht Minuten. Die Lichtgeschwindigkeit, bezeichnen wir diese symbolisch mit dem Buchstaben c , ist gegeben durch das Produkt aus der Wellenlänge, λ , und der Frequenz, ν , der Strahlung. Es ist also $c = \lambda \times \nu$. Die Frequenz entspricht der Zahl der Schwingungen der Lichtwelle pro Zeit, also beispielsweise pro Sekunde. Da die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum immer gleich groß, also konstant, ist, bedeutet dies, dass kurzwellige elektromagnetische Strahlung eine hohe Frequenz und langwellige Strahlung eine niedrigere Frequenz besitzt.

Wodurch entsteht aber elektromagnetische Strahlung? Weshalb sendet die Sonne Licht und Wärmestrahlung aus? Weshalb können wir mit einem Radio- oder Fernsehapparat unterschiedliche Sender empfangen oder mit einem Mobiltelefon telefonieren? Weshalb bezeichnen wir einen beheizten Kachelofen als warm und einen nicht beheizten Ofen als kalt? Auch hier gilt natürlich der bekannte Spruch: Von nichts kommt nichts. Das heißt in unserem Zusammenhang: Die Erzeugung von Licht, oder allgemeiner die Erzeugung elektromagnetischer Strahlung, erfordert eine Energiequelle. Bei der Sonnenstrahlung ist diese Energiequelle die Kernenergie, die bei der Verschmelzung (Fusion) von Wasser-

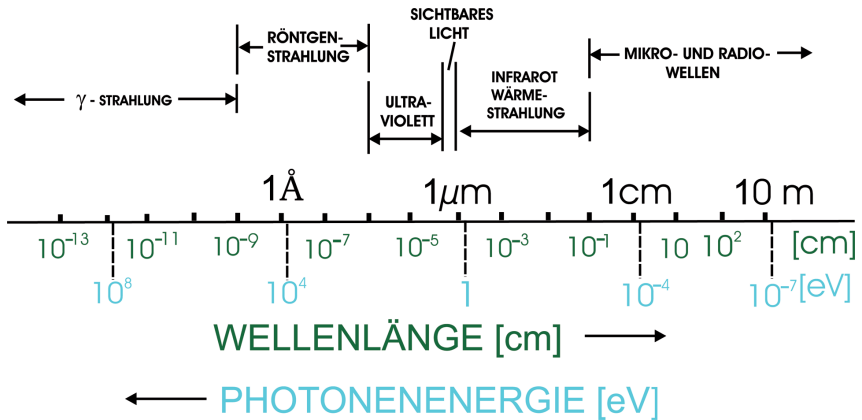


Abb. 1.1 Übersicht über das elektromagnetische Spektrum. Zwischen den unterschiedlichen Bereichen gibt es keine genauen Grenzen. Als Gamma-(γ)-Strahlung bezeichnet man elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen $\lambda < 0.1 \text{ \AA}$. Röntgenstrahlung liegt im Bereich $0.1 \text{ \AA} < \lambda < 100 \text{ \AA}$. Als ultraviolette (UV)-Strahlung bezeichnet man den Bereich $100 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$ (1 Nanometer = 10 \AA = ein milliardstel Meter). Sichtbares Licht umfasst Wellenlängen im Bereich 380 nm (violett) $\leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$ (rot) – die genauen Grenzen sind für menschliche Augen unterschiedlich; das Maximum der Augenempfindlichkeit liegt bei $\lambda \approx 552 \text{ nm}$ (grünes

Licht). Für infrarote (Wärme)-Strahlung ist $780 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm}$. Mikrowellenstrahlung liegt im Bereich $1 \text{ mm} \leq \lambda \leq 1 \text{ m}$ und Radiowellen im Bereich $1 \text{ m} \leq \lambda \leq 1000 \text{ m}$. Einzelne Spektralbereiche werden oft noch unterteilt, im Zusammenhang mit der biologischen Wirkung ultravioletter Strahlung in UV-C (Vakuum / fernes UV; $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 280 \text{ nm}$), UV-B (mittleres UV; $280 \text{ nm} \leq \lambda \leq 315 \text{ nm}$), UV-A (nahes UV; $315 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$). Die wichtigsten Rundfunkfrequenzen sind UKW (FM Frequenz Modulation; $1 \text{ m} \leq \lambda \leq 10 \text{ m}$) und Mittelwelle (AM Amplituden Modulation; $100 \text{ m} \leq \lambda \leq 1000 \text{ m}$).

stoffatomkernen zu Heliumatomkernen entsteht. Bei einem Mobilfunk- oder Radiosender wird elektrische Energie in elektromagnetische Strahlung umgewandelt. Bei einem Kachelofen entsteht die Wärmestrahlung durch die Verbrennung von Holz, also durch die Umwandlung von chemischer Energie. Elektromagnetische Strahlung entsteht also durch Umwandlung einer anderen Form von Energie. Es gibt allerdings einen wesentlichen Unterschied zwischen der elektromagnetischen Strahlung, die von der Sonne, einer Glühlampe oder dem Kachelofen ausgeht, und der elektromagnetischen Strahlung, die von einem Radio-, Fernseh- oder Mobilfunksender ausgeht. Die Sonne, die Glühlampe oder der Kachelofen senden ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher Frequenzen aus. Das heißt, es wird gleichzeitig Strahlung in einem breiten Wellenlängenbereich ausgesandt. Man bezeichnet solche Lichtquellen als thermische Strahler. Radio-, Fernseh- oder Mobilfunksender emittieren Strahlung in jeweils relativ engen Frequenzbereichen. Jedes Frequenzband ist charakteristisch für einen bestimmten Sender.

Was sind elektromagnetische Wellen?

Schon der Name lässt vermuten, dass solche Wellen elektrische und magnetische Anteile enthalten. Das ist tatsächlich so. Bereits in den Jahren 1861–1864 hat der englische Physiker James Maxwell (1831–1879) eine vollständige Theorie der elektromagnetischen Strahlung formuliert. Diese Theorie wurde aber nicht a priori, sondern auf der Basis zahlreicher experimenteller Untersuchungen und experimentell gefundener Gesetze entwickelt. Zu diesen damals bereits bekannten Gesetzen zählen das Faraday'sche¹⁾ Induktionsgesetz (1831) sowie das Ampere'sche²⁾ Gesetz (1822). Die wesentliche Aussage der Maxwell'schen Theorie lautet: *Ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld erzeugt ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld.* Auch die Umkehrung gilt: *Ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld erzeugt ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld.* Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung handelt es sich also darum, dass fortwährend die Energie des elektrischen Feldes der Lichtwelle in Energie des magnetischen Feldes der Lichtwelle umgewandelt wird. Die Energie des magnetischen Feldes der Lichtwelle wird dann wieder in elektrische Energie umgewandelt usw. Die Abb. 1.2 zeigt eine schematische Darstellung einer fortschreitenden elektromagnetischen Welle (Fernfeld).

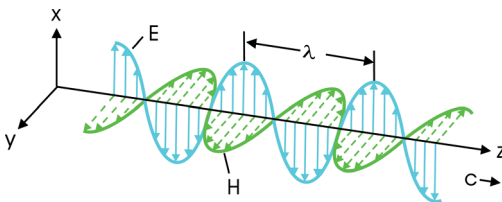


Abb. 1.2 Schematische Darstellung einer (ebenen) elektromagnetischen Welle. Diese Welle wird charakterisiert durch die Wellenlänge λ (Abstand zwischen zwei „Wellenbergen“), durch die Amplitude (Länge der Pfeile für das elektrische Feld E bzw. das magnetische Feld H) sowie durch die Polarisation (räumliche Orientierung des E -Feldes, hier also die x -Richtung). Die Welle breitet sich in

z -Richtung mit der Lichtgeschwindigkeit c aus. Deshalb zeigt die Abbildung eine „Momentaufnahme“ der Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Intensität I einer „Lichtwelle“ ist umso größer, je größer die Feldstärken, also die Länge der Pfeile für E und H , sind. Diese Abhängigkeit ist *quadratisch*, I ist also proportional zu E^2 . Abgekürzt schreibt man $I \propto E^2$.

Zur Veranschaulichung und zum besseren Verständnis erinnern wir uns an die Schulphysik. Dort hatten wir gelernt, dass zwischen zwei aufgeladenen Metallplatten – an denen beispielsweise eine Batterie angeschlossen ist – ein elektrisches Feld E existiert. In Abb. 1.3a ist die untere Kondensatorplatte negativ aufgeladen, besitzt also einen Überschuss an Elektronen. Die obere Platte ist positiv aufgeladen, besitzt also zu wenige Elektronen. Solange sich die Ladung auf diesen

1) Michael Faraday (1791–1867), englischer Physiker und Chemiker

2) André Marie Ampère (1775–1836), französischer Physiker und Mathematiker

Platten nicht ändert, bleibt das elektrische Feld unverändert, also konstant. Klemmt man nun die Batterie ab, so bleibt im Idealfall die Ladung immer noch konstant. Verbindet man aber die Metallplatten mit einem Draht, so fließen Ladungen von der einen Platte zur anderen Platte. Das ist in Abb. 1.3b dargestellt. In Metallen fließen die negativ geladenen Elektronen zur positiv aufgeladenen Platte, der Elektronen fehlen. Es fließt also ein Strom (gemäß der allgemein üblichen Definition ist die Richtung des Stroms I gerade entgegengesetzt zur Richtung des Elektronenflusses). Durch diesen Ladungsausgleich verändert sich das elektrische Feld im Kondensator; es nimmt ab. Nach Maxwell sollte diese zeitliche Veränderung des elektrischen Feldes ein magnetisches Feld erzeugen. Das beobachtet man in der Tat. Ganz ähnlich ist der Sachverhalt für magnetische Felder. Vielleicht erinnern wir uns, dass eine stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld besitzt. Nach außen verhält sich eine solche Spule wie ein Magnetstab. Solange die Stromstärke unverändert bleibt, ist das Magnetfeld konstant – so wie bei einem Stabmagnet. Wird der Strom abgeschaltet, so beobachtet man eine zeitliche Abnahme des Magnetfeldes. Nach Maxwell sollte dadurch ein elektrisches Feld entstehen. Das wird auch beobachtet. Mit einem Kondensator bzw. einer Spule kann also die Aussage der Maxwell'schen Theorie direkt überprüft werden. Ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld erzeugt ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld und umgekehrt. Nun gibt es einen weiteren interessanten Aspekt. Das elektrische Feld in einem Kondensator existiert *zwischen* den Kondensatorplatten; es existiert auch dann, wenn man die Platten immer weiter voneinander entfernt. Es existiert selbst dann, wenn man die Luft zwischen den Kondensatorplatten entfernt. Genauso verhält sich das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Dieses Magnetfeld existiert im Inneren der Spule, aber auch außerhalb. Entfernen wir uns von der Spule, so nimmt zwar die Stärke des Magnetfeldes ab, aber es existiert auch noch in großer Entfernung – auch dann, wenn wir uns im luftleeren Raum befinden. Elektrische und magnetische Felder können also auch im Vakuum existieren. Das ist ein ganz wesentlicher Punkt.

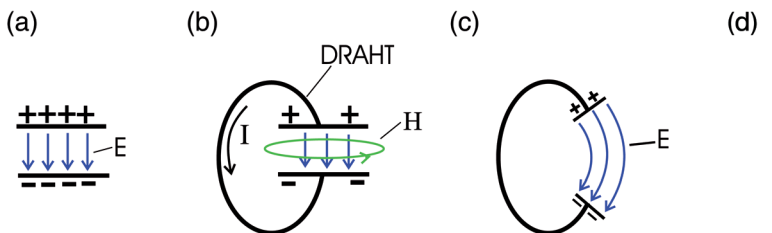


Abb. 1.3 Erzeugung elektromagnetischer Wellen.

- a) geladener Plattenkondensator;
- b) geschlossener Schwingkreis;
- c)–d) Übergang zu einem Sender / Antenne (Hertz-Oszillator).

Mobilfunk- und Radiosender

Nach diesem Vorspann können wir verstehen, wie ein Mobilfunk- oder Radiosender funktioniert. Betrachten wir nochmals die Abb. 1.3. Beim Übergang von 1.3b zu 1.3d lassen wir die Platten immer kleiner werden und biegen den Draht auf. Im Extremfall erhalten wir einen Metallstab (Abb. 1.3d). Das „obere“ und „untere“ Ende des Metallstabes entsprach ursprünglich der oberen und unteren Kondensatorplatte. Ein solcher Metallstab verhält sich ganz ähnlich wie zwei Kondensatorplatten die mit einem Draht verbunden sind. Enthält das „untere“ Ende des Metallstabes mehr Elektronen als das obere Ende, so fließt ein Strom. Die mit dem Stromfluss verbundene Veränderung des elektrischen Feldes zwischen dem oberen und unteren Ende des Metallstabes (ursprünglich der oberen und unteren Kondensatorplatte) erzeugt – wie erwartet – ein magnetisches Feld. Verbindet man nun den Metallstab in geeigneter Weise mit einer Wechselspannungsquelle, so wiederholt sich dieser Vorgang, d. h. die Elektronen fließen wieder von oben nach unten und danach von unten nach oben usw. Die Elektronen bewegen sich also regelmäßig (periodisch) von oben nach unten und umgekehrt. Bei jeder dieser Schwingungen verändert sich das elektrische Feld zwischen oberem und unterem Ende des Metallstabes. Dieses periodisch veränderliche elektrische Feld erzeugt ein oszillierendes magnetisches Feld. Und nun gibt es einen weiteren ganz wesentlichen Aspekt. Das oszillierende elektrische Feld, das sich von einem solchen Metallstab, in dem Ladungen „hin und her schwingen“, in den Raum hinaus ausbreitet, kehrt nicht zurück (Abb. 1.4). Es löst sich vom Metallstab ab.

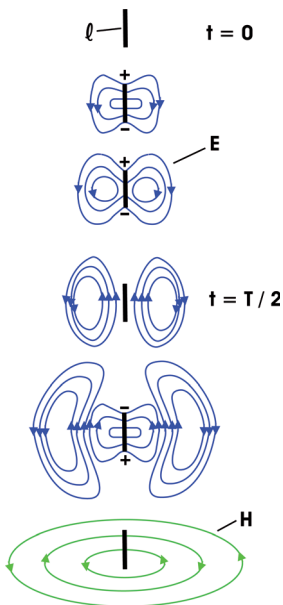


Abb. 1.4 Elektrisches Feld E eines schwingenden Dipols (Hertz-Oszillators) zu unterschiedlichen Zeiten t . T ist die Schwingungsdauer. Nach der Zeit $t = T/2$ lösen sich die „nierenförmigen“ Feldlinien vom Dipol ab und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Schwingungsfrequenz $\nu = c/\lambda = c/2l$ ist umso größer, je kleiner die Stablänge l ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist $c \approx 3 \times 10^{10}$ cm/s. Im unteren Bild ist das magnetische Feld H um den Dipol gezeigt. Die Richtung der Feldlinien ändert sich nach jeder halben Periode.

Da nach Maxwell ein zeitlich oszillierendes elektrisches Feld ein zeitlich oszillierendes magnetisches Feld und dieses wieder ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld erzeugt, breitet sich dieses elektromagnetische Feld aus. Das ist die in Abb. 1.2 dargestellte elektromagnetische Welle (Fernfeld). Ein solcher Metallstab, in dem Ladungen oszillieren, sendet also elektromagnetische Wellen aus. Man bezeichnet ein solches System, in dem Ladungen hin und her schwingen, auch als oszillierenden Dipol (Hertz³)-Oszillator). Die Frequenz eines solchen Senders ist gegeben durch die Länge ℓ des Metallstabes. Für die Grundschiwingung ist die Wellenlänge gerade $\lambda = 2 \ell$. Da die Geschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) der vom Dipol emittierten elektromagnetischen Welle gleich der Lichtgeschwindigkeit c ist, gilt für die Frequenz der Strahlung $\nu = c / \lambda = c / 2 \ell$. Je kürzer also der Metallstab ist, umso höher ist die Frequenz der abgestrahlten elektromagnetischen Welle. Damit wir nun Sprache oder Musik hören können, werden auf diese Grundschiwingung des Dipols (Trägerfrequenz) die der Sprache oder Musik entsprechenden elektrischen Signale überlagert (aufmoduliert). Die Energie des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes und der sonstigen Verluste wird von der angeschlossenen Spannungsquelle geliefert.

Der Empfänger, die Antenne, funktioniert ganz ähnlich. Die vom Sender kommende elektromagnetische Welle versetzt die Elektronen in der Antenne in Schwingungen und das dabei entstehende elektrische Feld wird verstärkt und im Radio- oder Fernsehapparat oder im Mobiltelefon weiter verarbeitet. Natürlich gibt es heute sehr viel raffinierter ausgebildete Sender und Empfänger und man verwendet auch völlig neue Materialien.

Auf jeden Fall haben wir nun verstanden, weshalb Radio-, Fernseh- und Mobilfunksender elektromagnetische Strahlung nur in einem sehr engen Spektralbereich emittieren, während thermische Strahler ein breites Spektrum unterschiedlicher Frequenzen ausstrahlen.

Lichtquanten

Viele Phänomene im Zusammenhang mit der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung und deren Wechselwirkung mit Materie können wir auf der Basis der beschriebenen „Lichtwellen“ erklären. Es gibt aber andere Beobachtungen, die sich auf der Basis von „Lichtwellen“ nicht oder nur sehr schwer erklären lassen. Das liegt daran, dass es noch eine andere wichtige Eigenschaft des Lichtes, der elektromagnetischen Strahlung, gibt. Bereits Max Planck (1858–1947) und Albert Einstein⁴ (1879–1955) haben Anfang des 20. Jahrhunderts gefunden, dass elektromagnetische Strahlung von einem „Sender“ in ganz bestimmten „Portionen“, oder Vielfachen davon, ausgesandt (emittiert) wird. Genauso kann von einem „Empfänger“ Licht in solchen „Portionen“ aufgenommen (absorbiert) werden.

3) Heinrich Hertz (1857–1894), deutscher Physiker

4) Lichtquanten-Hypothese, 1905

Diese „Lichtportionen“ nennt man Lichtquanten oder Photonen. Die Energie eines Photons, E , ist umso größer, je größer die Frequenz der Lichtwelle, ν , ist. Es ist $E = h \nu$. Den Proportionalitätsfaktor, h , nennt man Planck-Konstante oder Planck'sches Wirkungsquantum. h ist eine Naturkonstante⁵⁾. Man kann also elektromagnetische Strahlung sowohl durch Lichtwellen als auch durch Lichtteilchen (Photonen) beschreiben. Man bezeichnet diesen Sachverhalt als den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts. Abhängig von der physikalischen Fragestellung behandelt man Licht als Welle oder als Teilchen. Die Tatsache, dass elektromagnetische Strahlung nur in ganz bestimmten Portionen von einem „Sender“ emittiert bzw. von einem „Empfänger“ absorbiert werden kann, hängt mit dem Aufbau der Materie aus Atomen und Molekülen zusammen.

Das Bohr'sche Atommodell

Betrachten wir das einfachste Modell für die Beschreibung eines Atoms, das sogenannte Bohr'sche Atommodell (1913). Nach diesem Modell beschreiben die elektrisch negativ geladenen Elektronen Kreisbahnen um den elektrisch positiv geladenen Atomkern. Die Abb. 1.5 zeigt diesen Sachverhalt für das einfachste Atom, das Wasserstoffatom. Beim „normalen“ Wasserstoffatom besteht der Atomkern aus einem einzigen positiv geladenen Teilchen, dem Proton, um das ein einziges negativ geladenes Elektron kreist. Anschaulich kann man sich diese Bewegung ganz ähnlich wie die Bewegung der Erde um die Sonne vorstellen.

Bei den für uns gängigen Temperaturen und in Abwesenheit kurzwelliger ultravioletter Strahlung befindet sich das Elektron bei der Bewegung um den Kern auf der innersten Bahn $n=1$. Man nennt diesen Zustand den Grundzustand des Atoms. In diesem Grundzustand ist die Bindung des Elektrons an den Atomkern maximal. Man ordnet nun jedem Zustand des Elektrons, also jeder dieser Kreisbahnen des Elektrons um den Kern, ein Energieniveau zu. Auf diese Weise erhält man die in Abb. 1.5b dargestellte Energieleiter. Man bezeichnet diese auch als Termschema.⁶⁾

Das unterste Niveau mit der Energie $E(n=1)$ entspricht also der Energie des Elektrons auf der innersten Bahn. Durch Zufuhr von Energie, also beispielsweise durch *Absorption* elektromagnetischer Strahlung – in diesem Fall kurzwelliger ultravioletter Strahlung, kann nun das Elektron von der innersten Bahn mit der Bezeichnung $n=1$ auf die nächst höhere Bahn mit der Bezeichnung $n=2$ „angehoben“ werden. In diesem ersten angeregten Zustand kreist das Elektron in größerer Entfernung um den Kern. Die Bindung des Elektrons an den Kern ist

5) Aus der Äquivalenz von Masse und Energie, $E = m c^2$, erhält man mit $E = h \nu$ für die Masse des Photons $m = h \nu / c^2$. Da sich das Photon mit der Lichtgeschwindigkeit c bewegt, muss nach der Relativitätstheorie die Ruhemasse des Photons null sein.

6) In der Literatur werden hier entweder Bindungsenergien angegeben, dann ist die Ionisierungsenergie $E(n=\infty)$ der Nullpunkt, oder, so wie in Abb. 1.5, Anregungsenergien des Elektrons.

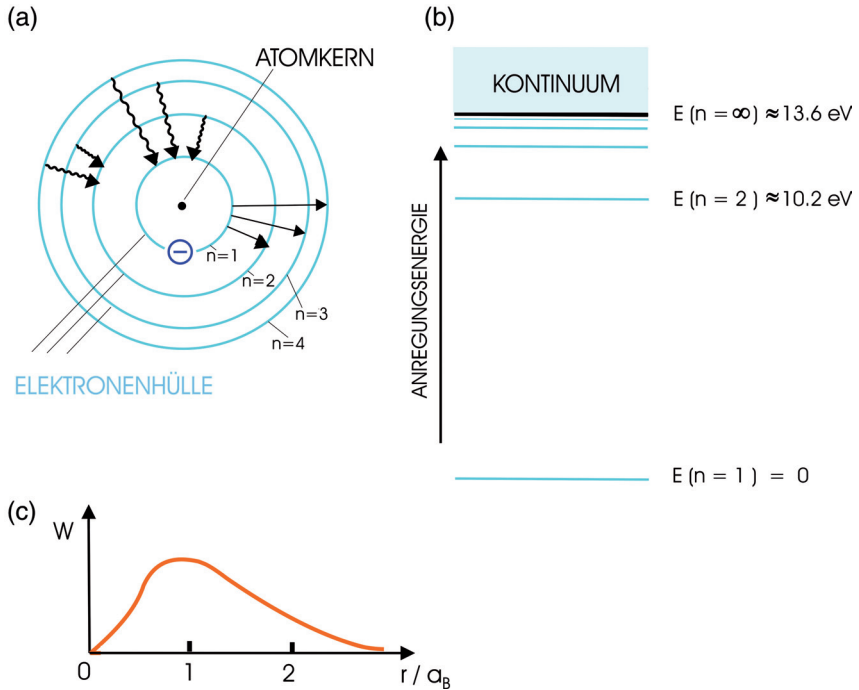


Abb. 1.5 Bohr'sches Atommodell und Termschema des Wasserstoffatoms.

a) Der Atomkern hat einen Radius von ungefähr 10^{-13} cm (ein Zehntausendstel eines milliardstel Zentimeters). Unter „normalen“ Bedingungen befindet sich das Elektron im Grundzustand $n = 1$. Der Radius der Elektronenbahn beträgt ungefähr $5 \times 10^{-9} \text{ cm}$ (fünf milliardstel Zentimeter). Der Übergang des Elektrons vom Grundzustand $n = 1$ in angeregte Zustände $n = 2, 3, 4, \dots$ kann durch Absorption von Licht erfolgen (gerade Pfeile). Beim Übergang von angeregten Zuständen in niedrigere Zustände wird Licht emittiert (geschwungene Pfeile).

b) Anregungsenergien (Termschema) des Elektrons. Für $n = 1$ ist die Bindung des Elektrons an den Atomkern maximal. Mit zunehmender Anregung in Zustände $n = 2, 3, \dots$ nehmen die Energiedifferenzen rasch ab. $E(n = \infty)$ ist die Ionisierungsenergie (Bindungsenergie null). Regt man also das Elektron in das Kontinuum an, so ist es frei. Dann kann das Elektron *beliebige* Werte der (kinetischen) Energie besitzen.

c) Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte W in radialer Richtung für das Elektron im Grundzustand $n = 1$. Das *Maximum* von W stimmt ungefähr mit dem Radius der ersten Bohr'schen Bahn, a_B , überein.

weniger stark. Die Energiedifferenz zwischen den Zuständen $n = 1$ und $n = 2$ entspricht genau der Energie des absorbierten Lichtteilchens, des ultravioletten Photons mit der Energie $h\nu$. Es gilt also $E(n=2) - E(n=1) = h\nu$. Ähnliches gilt nun für die Anregung höherer Zustände mit den Bezeichnungen $n = 3, 4, \dots$. Wichtig ist dabei, zu verstehen, dass bei einem Übergang des Elektrons von einer inneren Bahn zu einer weiter außen liegenden Bahn, also bei dem Übergang von einem Energieniveau zum nächst höheren Niveau, nur eine ganz *bestimmte* Energieportion aufgenommen (absorbiert) werden kann. Führt man jedoch dem Elektron

eine Gesamtenergie $E \geq E(n = \infty)$ zu, so verliert das Elektron seine Bindung an den Atomkern. Das System besteht dann aus einem positiv geladenen Wasserstoff-Ion (Proton) und einem *freien* Elektron. Man sagt, das Elektron befindet sich dann im Kontinuum, da es dort *beliebige* Energieportionen aufnehmen kann. Man bezeichnet $E(n = \infty)$ als Ionisationsenergie. Übergänge von höheren Energieniveaus in niedrigere Energieniveaus, also beispielsweise von $E(n = 2)$ nach $E(n = 1)$, sind mit der Aussendung (Emission) von elektromagnetischer Strahlung verknüpft. Die Frequenz der emittierten Strahlung ist charakteristisch für das Wasserstoffatom. Die Gesamtheit der möglichen absorbierten bzw. emittierten Strahlungsfrequenzen bezeichnet man als Absorptionsspektren bzw. als Emissionsspektren.

Das Bohr'sche Atommodell ist anschaulich und es hat sehr wesentlich zum besseren Verständnis vieler physikalischer Phänomene beigetragen. Insbesondere konnte die „Grobstruktur“ von Absorptions- und Emissionsspektren von Atomen auf der Basis dieses Modells analysiert werden. Vielleicht ist aber dem einen oder anderen Leser aufgefallen, dass dieses Modell im Widerspruch steht zu dem, was wir wenige Seiten zuvor über Mobilfunk- und Radiosender gelernt haben. Bei dem in Abb. 1.5 dargestellten Atom schwingt das Elektron „hin und her“. Es befindet sich zeitweise „oben“ und zeitweise „unten“. Es verhält sich also wie ein oszillierender Dipol. Es müsste elektromagnetische Strahlung aussenden, also Energie abstrahlen. Das würde die Bewegungsenergie (kinetische Energie) des Elektrons vermindern (wegen der Energieerhaltung). Ein solches Atom wäre nicht stabil, das Elektron würde in den Kern „hineinfallen“. Es würde aufhören um den Atomkern zu „kreisen“. Das ist natürlich auch dem Nobelpreisträger Niels Bohr (1885–1962) aufgefallen. Er hat deshalb postuliert, dass sich das Elektron im Wasserstoffatom *nicht* wie ein klassischer Dipol verhält. Im Mikrokosmos gelten offenbar andere Gesetze. Diese Gesetze wurden von dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) und dem Deutschen Werner Heisenberg (1901–1976) gefunden: sie bilden die Grundlage der Quantenmechanik. Danach ist es beispielsweise unmöglich, dass man zu einem bestimmten Zeitpunkt sagen kann, wo, also an welchem Ort, sich das Elektron befindet (Unschärferelation). Mit anderen Worten: das Elektron kreist also *nicht* wie ein punktförmiges Teilchen um den Atomkern. Deshalb strahlt es auch keine Energie ab. Vielmehr ist das Elektron „verschmiert“, es befindet sich also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit *überall* um den Atomkern herum. Man spricht hier von einer „Elektronenwolke“. Abbildung 1.5c veranschaulicht die Aufenthaltswahrscheinlichkeit (Dichte) des Elektrons in radialer Richtung für den Grundzustand $n = 1$. Das Maximum von W stimmt in guter Näherung mit dem Bahnradius a_B überein, den man nach dem Bohr'schen Atommodell in einfacher Weise berechnen kann. Aber das Elektron befindet sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch näher am Atomkern ($r < a_B$) oder auch weiter entfernt ($r > a_B$). Bis vor wenigen Jahren konnte man die Dichteverteilung von Elektronen nur berechnen. Heute, seit wenigen Jahren, kann man Veränderungen der Dichteverteilung der Elektronen innerhalb eines Atoms mit sogenannten Attosekunden-Laserpulsen „photographieren“ (1 Attosekunde = 10^{-18} Sekunden entspricht einem Milliardstel von

einer milliardstel Sekunde). Die kürzesten Laserpulse, die man zurzeit erzeugen kann, sind einige hundert Attosekunden lang – Tendenz fallend. Vermutlich haben selbst die Pioniere der Quantenmechanik das für unmöglich gehalten!

Quantenmechanik für Fußgänger

Die Erkenntnis, dass die an ein Atom *gebundenen* Elektronen Energie nur in ganz bestimmten Portionen aufnehmen können, hat Anfang des 20. Jahrhunderts auch sehr bekannten Physikern Schwierigkeiten bereitet. Der Grund liegt darin, dass diese Erkenntnis in scheinbarem Widerspruch zu der bis dahin bekannten klassischen Physik stand.

Um die Sachlage besser zu verstehen, bedienen wir uns eines einfachen Bildes: Ein Tourist hat nun lange genug eine im Tal gelegene Stadt besichtigt und möchte nun, vielleicht zum Abschluss seiner Tour, noch einen Aussichtsblick besteigen. Dazu hat er zwei Möglichkeiten: er kann entweder auf einem Umweg entlang der Straße, die sich gemächlich in Serpentinaugen hinauf zum Gipfel windet, gehen – oder er kann den kürzeren Weg wählen, eine Treppe mit 999 Stufen, die direkt von der Stadt zum Gipfel führt. Wählt er die Straße, so kann unser Tourist an jeder beliebigen Stelle stehen bleiben, verschlafen und die Aussicht genießen. Er kann sogar dann stehen bleiben, wenn die zusätzliche Höhendifferenz, die er in Bezug auf seinen vorherigen Stopp überwunden hat, beliebig klein ist, beispielsweise nur wenige Millimeter beträgt. Wählt unser Tourist aber die Treppe, so entspricht die minimale Höhendifferenz, die er zwischen zwei Stopps zu überwinden hat, gerade der Stufenhöhe, sagen wir 15 cm. Dazwischen ist ein Ausruhen nicht möglich. Unser Tourist kann frei entscheiden. Er kann entweder entlang der Straße gehen oder die Treppe hinaufsteigen. Übertragen wir nun dieses Bild auf das Wasserstoffatom. Nehmen wir also an, der Tourist im Tal entspricht dem Elektron im Grundzustand $n = 1$. Nun gibt es aber einen ganz wesentlichen Unterschied zwischen unserem Touristen und dem Elektron. Für das Elektron gibt es *keine* Wahlmöglichkeit. Für das Elektron existiert ausschließlich die Treppe. Soll also das Elektron vom Tal, dem Grundzustand $n = 1$, zum Aussichtspunkt, dem angeregten Zustand $n = 1000$, „angehoben“ werden, so ist dieser Prozess *nur* über die Treppe möglich. Soll das Elektron angeregt, also in einen höheren Zustand angehoben werden, so müssen wir dem System Energie zuführen und zwar in Portionen die zumindest dem Abstand zwischen zwei Stufen entsprechen.

Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied zwischen der Treppe und den Anregungsstufen für das Elektron. Die Anregungsstufen für das Elektron sind *nicht* gleich hoch (siehe Abb. 1.5b). Je höher die Treppe hinaufführt, umso kleiner wird die Stufenhöhe. Die Höhe der Stufen, die Energiedifferenz zwischen den Anregungszuständen, nimmt also ab mit zunehmender Stufenzahl n . Noch etwas: das Elektron kann auch eine oder mehrere Stufen überspringen, wenn wir die entsprechende Energieportion zuführen. Für den Abstieg gilt das Gleiche.

Während der Wanderer wieder wählen kann – zwischen Straße und Treppe, gibt es für das Elektron *keine* Wahlmöglichkeit. Der Übergang vom Berg ins Tal ist *ausschließlich* über die Treppe möglich. Bei diesem Prozess wird Energie frei und zwar in Portionen, die dem Abstand zwischen zwei oder mehreren Stufen entsprechen. Wissenschaftlicher ausgedrückt kann man den Sachverhalt folgendermaßen zusammenfassen: Ein Atom kann Energie nur in ganz bestimmten Portionen aufnehmen oder abgeben. Energieaufnahme bzw. Energieabgabe kann durch Absorption bzw. Emission elektromagnetischer Strahlung erfolgen. In einem Gas sind solche Übergänge auch über Stöße zwischen den Atomen / Molekülen möglich. Dabei wird beispielsweise kinetische Energie, also Bewegungsenergie der Atome, in Anregungsenergie des Elektrons umgewandelt – oder umgekehrt. Andere Atome, aber auch Moleküle, verhalten sich ganz ähnlich wie das Wasserstoffatom. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass solche Atome bzw. Moleküle nicht ein einzelnes, sondern mehrere Elektronen besitzen. Deshalb gibt es in solchen Atomen und in Molekülen sehr viel mehr Möglichkeiten, Elektronen anzuregen.

In Molekülen gibt es aber noch einen weiteren Aspekt. Moleküle bestehen aus zwei oder mehreren Atomen. Der Sauerstoff in unserer Luft besteht aus zwei Sauerstoffatomen. Chemiker schreiben dieses abgekürzt als O_2 . Das bekannte Ozon, O_3 , besteht aus drei Sauerstoffatomen. Wasser, H_2O , besteht aus zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom usw. In solchen Molekülen gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten, Elektronen anzuregen. Aber es gibt noch andere Formen der Anregung, nämlich Schwingungen und Rotationen. In einer Molekülschwingung schwingen Atome relativ zueinander. Im einfachsten Fall eines zweiatomigen Moleküls, also beispielsweise eines O_2 -Moleküls, schwingen die Atome gegeneinander. Darüber hinaus können Moleküle Rotationen um eine oder mehrere Achsen durchführen. Für das O_2 -Molekül sind Rotationen nur um die Achse senkrecht zur Verbindungslinie zwischen den Atomen möglich. Diese Rotationsachse liegt hier genau in der Mitte zwischen den Atomen. Interessant ist nun, dass sowohl die Energie der Molekülschwingungen als auch die Energie der Molekülrotationen quantisiert ist. Das heißt, das Molekül kann wieder nur ganz bestimmte Portionen an Schwingungsenergie und/oder Rotationsenergie aufnehmen bzw. abgeben.

Fügt man viele Atome oder Moleküle zusammen, so entsteht eine Flüssigkeit oder ein fester Körper. Ob solche „kondensierten“ Atome / Moleküle eine Flüssigkeit oder einen Festkörper bilden, hängt von der Stärke der Bindung zwischen den Atomen und von der Temperatur ab. Ganz ähnlich wie bei Atomen oder Molekülen können Elektronen in Festkörpern Energie wieder nur in ganz bestimmten Portionen aufnehmen bzw. abgeben. Allerdings gibt es hier aufgrund der Vielzahl von Atomen und Elektronen eine Vielzahl elektronischer Zustände, also eine Vielzahl unterschiedlicher elektronischer Anregungen. Auch sind die Atome in einem Festkörper nicht in Ruhe, sondern schwingen um eine Gleichgewichtslage, ganz ähnlich zu dem Pendel der Uhr in Omas Wohnzimmer. Die elementaren Anregungen von Atomen, Molekülen und Festkörpern werden wir in Kapitel 2 ausführlich diskutieren. Eines sei aber schon jetzt gesagt: Auf einer

mikroskopischen Skala unterscheidet sich der heiße Kachelofen vom kalten Kachelofen durch den Grad der Schwingungsanregungen der Atome / Moleküle. Je stärker diese schwingen, desto höher ist die Temperatur des Kachelofens. Von weitem können wir erfahrungsgemäß nicht beurteilen, ob ein Kachelofen heiß oder kalt ist – das sieht man dem Ofen nicht an. Kommen wir aber in dessen Nähe, so spüren wir die wohlige Wärmestrahlung – wenn der Ofen beheizt ist. Das liegt daran, dass die elektromagnetische Strahlung, die von den schwingenden Atomen ausgesandt wird, im infraroten Spektralbereich liegt. Diese infrarote Strahlung, diese Wärmestrahlung, ist sehr viel langwelliger als das rote Licht, das wir gerade noch sehen können. Aber, in unserer Haut befinden sich Rezeptoren, welche diese Wärmestrahlung sehr wohl wahrnehmen – auch wenn wir diese Strahlung nicht „sehen“ können. Was aber haben alle diese Bemerkungen zur Natur des Lichts, der Natur der elektromagnetischen Strahlung, mit Lasern zu tun? Das werden wir gleich verstehen, wenn wir bei einem Laserpointer den „Knopf drücken“. Dann sehen wir – in den meisten Fllen – einen roten oder einen grünen Laserstrahl. Bei diesem Laserstrahl handelt es sich wieder um elektromagnetische Strahlung. Und trotzdem unterscheidet sich das Licht, das aus diesem Laser „herauskommt“, ganz wesentlich von dem Licht, das wir beobachten, wenn wir eine Glühlampe einschalten. Das ist in Abb. 1.6 veranschaulicht. Laserlicht breitet sich als Strahl, als ein relativ enges Lichtbündel, aus. Das Licht der Glühbirne breitet sich nach allen Richtungen aus. Laserlicht, das wir sehen können, ist rot, grün oder blau – das Licht der Glühlampe ist weiß oder gelblich – abhängig von deren Wattzahl und dem Durchmesser des glühenden Wolframdrahts.

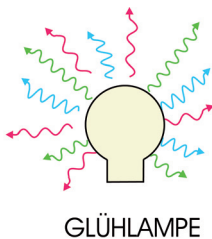


Abb. 1.6 Vergleich der (sichtbaren) Strahlung aus einer Glühlampe und einem Laser. Die Glühlampe sendet „weißes“ Licht aus. Dieses enthält alle Farben von rot bis violett. Die Lichtausbreitung erfolgt in alle Richtungen. Der Laserstrahl ist einfarbig (monochromatisch) und breitet sich nahezu „parallel“ aus.

Es gibt aber auch ultraviolette und Rntgenlaser sowie Infrarot- und Mikrowellenlaser. Letztere bezeichnet man als MASER, von *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Die Strahlung dieser unterschiedlichen Laser unterscheidet sich durch die Wellenlänge. Diese Emission von Strahlung wird letztendlich wieder zusammenhängen mit elektronischen Anregungszuständen in Atomen, Molekülen oder Festkörpern – oder mit angeregten Schwingungszuständen. Wesentlich ist, dass diese Übergänge zwischen *bestimmten* Energie-

niveaus erfolgen. Deshalb ist das emittierte Licht „einfarbig“. Bei der Glühbirne oder dem Kachelofen erfolgen solche Übergänge zwischen sehr vielen eng benachbarten Energieniveaus. Deshalb ist die emittierte Strahlung „vielfarbig“, besitzt also ein breites Spektrum. Übrigens: die Form des Spektrums ist für alle thermischen Strahler sehr ähnlich. Man kann sie beschreiben durch das sogenannte Planck'sche Strahlungsgesetz. Daraus folgt, dass sich das Maximum dieses breiten Spektrums mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen hin verschiebt.⁷⁾

7) Die Wellenlänge für das Maximum dieser Verteilung ist gegeben durch $\lambda_{\max} \times T = \text{const.} = 0.29 \text{ cmK}$. Hierbei ist T die (absolute) Temperatur in Kelvin (siehe Glossar). Für einen Kachelofen mit einer Temperatur von

60 °C liegt also das Maximum der Planck-Verteilung bei $\lambda_{\max} \approx 8.7 \mu\text{m}$ (infraroter Spektralbereich). Die mittlere Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ungefähr 5800 K. Damit ist $\lambda_{\max} \approx 500 \text{ nm}$ (sichtbarer Spektralbereich).

