

IN DIESEM KAPITEL

Die Strahlung schwarzer Körper

Mit Licht Elektronen auslösen

Das Bohr'sche Atommodell aufstellen

Das Verhalten von Röntgenstrahlen

Die Welleneigenschaften der Materie

Auf der Suche nach der Wahrheit: Welle oder Teilchen?

Kapitel 1

Der Weg zur Quantenmechanik

» Schon in wenigen Jahren werden alle fundamentalen physikalischen Konstanten annähernd bestimmt worden sein, und ... die einzige Beschäftigung, die dann den Wissenschaftlern bleibt, wird sein, diese Messungen eine Dezimalstelle weiter zu treiben.«

Diese Feststellung stammt von James Clerk Maxwell, und er äußerte sie bei seiner Antrittsvorlesung an der Universität Cambridge im Jahr 1871. Er selber teilte diese Einstellung nicht unbedingt, aber sie spiegelt die damals vorherrschende Meinung wider. Nach der Entwicklung der *klassischen Physik*, die nach der Formulierung der Maxwell'schen Gleichungen, die den Elektromagnetismus in ähnlicher Weise zusammenfassen wie die Newton'schen Gesetze die Mechanik, waren die Wissenschaftler überzeugt, dass das Gebäude zur exakten Beschreibung der Natur vollendet war – zumindest aber der Grundbau stand.

Nur drei Jahrzehnte später war diese Meinung nicht nur heftig erschüttert, sondern Max Planck läutete im Dezember 1900 mit der Vorstellung seiner Formel zur Beschreibung des Strahlungsspektrums schwarzer Körper die Revolution der Quantentheorie ein.

Sie fragen sich, was in diesen Jahrzehnten passiert ist? Sie sind neugierig, warum die Gültigkeit eines über Jahrhunderte entwickelten naturwissenschaftlichen Weltbilds plötzlich infrage gestellt werden konnte? Sie denken darüber nach, ob neue Experimente wirklich bahnbrechende Folgen haben können?

30 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

In diesem einleitenden Kapitel werden die wichtigsten der zu Beginn des 20. Jahrhunderts neu gefundenen Ergebnisse und Erkenntnisse vorgestellt, die sich schnell als mit der klassischen Physik unvereinbar erwiesen. Am Ende dieses Kapitels wird deutlich, dass zur Erklärung der neuen experimentellen Ergebnisse ein völlig neuer Weg eingeschlagen werden musste, der schließlich in die sogenannte *Quantenmechanik* führte.

Die Strahlung schwarzer Körper

Der erste der um die Jahrhundertwende auftretenden eklatanten Widersprüche zwischen den experimentellen Beobachtungen und der klassischen Physik betraf die Strahlung eines schwarzen Körpers.

Eine Idealisierung: Der schwarze Strahler

Sie wissen aus eigener Erfahrung, dass Körper Licht abstrahlen, wenn sie auf hohe Temperaturen erhitzt werden, und dass die Farbe von der Temperatur abhängt. Beispielsweise glüht ein Draht, wenn er erhitzt wird, zuerst rot, dann gelb und schließlich weiß.

Um diese Strahlung genauer messen und vor allem beschreiben zu können, betrachtet man in der Physik in der Regel einen *schwarzen Körper*. Dabei bezieht sich »schwarz« auf die Fähigkeit des Körpers, alle auftreffenden Strahlungen vollständig zu absorbieren, sodass sie nicht zu seiner Emission beitragen und diese allein auf dem Körper und seiner Temperatur beruht. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, ist der in Abbildung 1.1 dargestellte *Hohlraumresonator*.

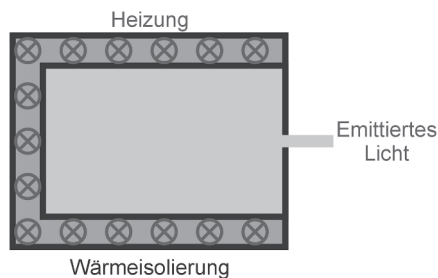


Abbildung 1.1: Ein Hohlraumresonator

Wie Abbildung 1.2 zeigt, hängt die von einem schwarzen Strahler emittierte Strahlungsverteilung sehr stark von der Temperatur ab. Aus der Abbildung kann man folgende Punkte entnehmen:

- ✓ Mit wachsender Temperatur verschiebt sich das Maximum der Spektren zu kürzeren Wellenlängen, das heißt, zu höheren Frequenzen.
- ✓ Je höher die Temperatur ist, desto höher sind sowohl die maximale Intensität als auch die Gesamtintensität der Strahlung.

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 31

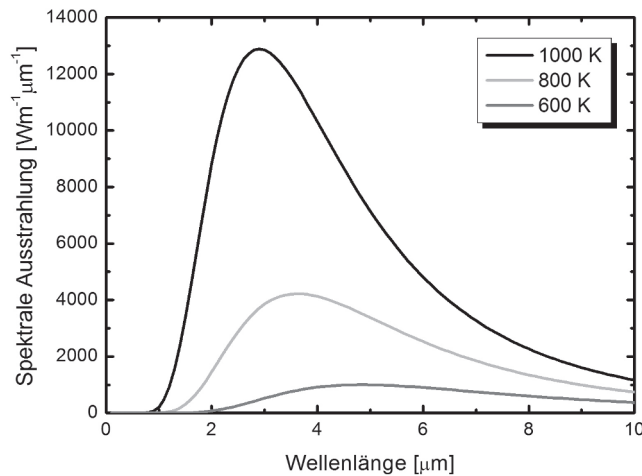


Abbildung 1.2: Das Spektrum eines schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden einige wichtige Gesetzmäßigkeiten und Erklärungsversuche veröffentlicht, die die Strahlung schwarzer Körper betrafen und auf der klassischen Physik beruhten. Zu ihnen gehören:

- ✓ Das Wien'sche Verschiebungsgesetz
- ✓ Das Rayleigh-Jeans-Gesetz
- ✓ Das Wien'sche Gesetz

Nun war es nicht so, dass diese Erklärungsversuche völlig fehlschlügen, aber keines dieser Modelle konnte die gemessenen Spektren im gesamten Wellenlängenbereich beschreiben. Das Wien'sche Gesetz deckte den Bereich kleiner Wellenlängen gut ab, versagte aber im Bereich großer Wellenlängen. In diesem erwies sich dagegen das Rayleigh-Jeans-Gesetz als gute Beschreibung. Wendete man jedes in seinem Wellenlängenbereich an, konnten die Beobachtungen einigermaßen erklärt werden ...

Das Planck'sche Strahlungsgesetz

Notwendig war also eine Theorie, die in der Lage sein würde, den gesamten spektralen Bereich richtig zu beschreiben. In seinem 1900 veröffentlichten *Strahlungsgesetz* griff Planck auf Elemente des Wien'schen Gesetzes und des Rayleigh-Jeans-Gesetzes zurück und verwendete (wie Wien) die klassische Thermodynamik, das heißt, die Maxwell-Boltzmann-Verteilung.

Dann verließ Planck aber den Boden der klassischen Physik und nahm an, dass ein Oszillator (eine Schwingungsmode) nicht jeden beliebigen Energiewert annehmen kann. Vielmehr sollte die Energie *quantisiert* sein. Mit dieser geradezu revolutionären Hypothese

32 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

gelangte Planck zu einer Strahlungsformel, die die experimentellen Beobachtungen sehr genau wiedergab:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Das Planck'sche Strahlungsgesetz existiert in zahlreichen Darstellungen, je nachdem ob es in Abhängigkeit von der Frequenz oder Wellenlänge formuliert wird, ob sich eine Intensität in eine bestimmte Richtung oder auf den gesamten Raum bezieht oder, oder, oder. Eine häufig verwendete Form ist die Darstellung der spektralen Ausstrahlung, die in Abbildung 1.3 gezeigt wird.

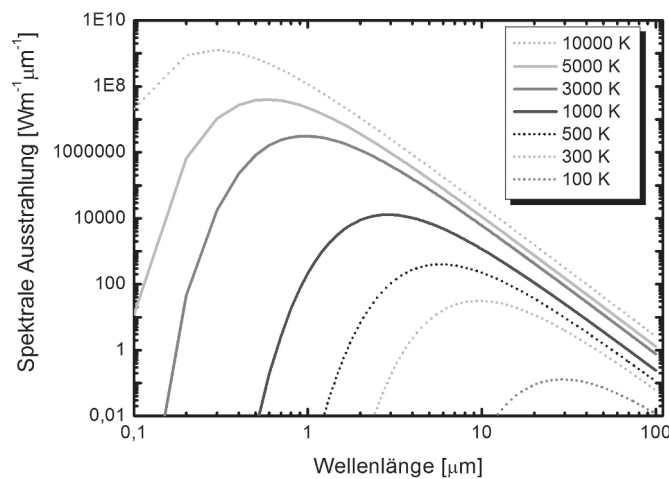


Abbildung 1.3: Die Strahlung eines schwarzen Körpers nach der Planck'schen Strahlungsformel für verschiedene Temperaturen. (Beachten Sie die doppellogarithmische Auftragung.)

In der obigen Gleichung ist λ die Wellenlänge und T die absolute Temperatur, darüber hinaus stehen dort noch drei grundlegende Größen der gesamten Physik.



Die Boltzmann-Konstante k_B ist eine der wichtigsten Naturkonstanten der Physik überhaupt. Es gilt:

$$k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \approx 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$



Die Vakuumlichtgeschwindigkeit c beträgt:

$$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Die Lichtgeschwindigkeit gehört ebenfalls zu den fundamentalen Naturkonstanten.

In diesem Zusammenhang sollten Sie sich folgende Punkte in Erinnerung rufen:

- ✓ Licht beziehungsweise elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus.

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 33

- ✓ Die Lichtgeschwindigkeit spielt sowohl in der speziellen als auch in der allgemeinen Relativitätstheorie eine entscheidende Rolle.
- ✓ Die Lichtgeschwindigkeit ist die absolute Grenzgeschwindigkeit im Universum.

Diese Punkte werden im Verlauf einiger Kapitel dieses Buches noch eine wichtige Rolle spielen.

Außerdem wird in der Gleichung das *Planck'sche Wirkungsquantum* (oder die *Planck-Konstante*) h als neue Naturkonstante eingeführt.



Das Wirkungsquantum h hat die Dimension einer sogenannten *Wirkung*, dem Produkt aus Energie und Zeit, und ist die *zentrale Größe der Quantenmechanik*. Der exakte, im November 2018 festgelegte Wert beträgt:

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s (exakt)} \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Dies mag auf den ersten Blick harmlos klingen, war aber der erste Stein im neuen Gebäude der Quantenphysik. Die revolutionäre Hypothese, die Max Planck bei der Herleitung der Strahlungsformel aufstellte, besagt nämlich, dass die Wände des Hohlraums die Energie nicht kontinuierlich absorbieren, sondern nur in Quanten mit der Energie

$$E = h \cdot f$$

Verwendet man in diesem Ausdruck statt der Frequenz f die Kreisfrequenz ω , so lautet sie:

$$E = \hbar \cdot \omega$$

Dabei ergibt sich aus dem bekannten Zusammenhang $\omega = 2\pi f$ die Definition des reduzierten Planck'schen Wirkungsquantums $\hbar$ (gesprochen *h-quer*):

$$\hbar := \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Um eine Vorstellung davon zu gewinnen, was ein diskreter Energieaustausch zwischen Strahlung und Wänden bedeutet, betrachten Sie Abbildung 1.4. Übergänge sind nur zwischen diesen *diskreten Energieniveaus* möglich: Bei der Emission geht ein Oszillator (eine Schwingungsmode) von einem höheren in einen niedrigeren Zustand über, bei einer Absorption wird ein höheres Niveau eingenommen:

$$E_n = 0, \hbar\omega, 2\hbar\omega, 3\hbar\omega, \dots n\hbar\omega$$

Allerdings besagt die Annahme nur, dass die ausgetauschte Energie $E = \hbar\omega$ gequantelt ist, nicht, dass die Strahlung selbst quantisiert ist! Die schrittweise Entleerung einer Badewanne mit einem Eimer ist schließlich auch kein Indiz dafür, dass Wasser nur in diskreten Portionen existiert. Erst die Untersuchung von Albert Einstein im Jahr 1905, die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird, forderte die Quantisierung des Lichts.

Sie sollten aber die Bedeutung des Planck'schen Strahlungsgesetzes auf gar keinen Fall unterschätzen. Es folgt nicht aus der klassischen Physik, sondern die Quantisierung widerspricht

34 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

ihr eklatant. Allerdings hatte Planck deswegen Zeit seines Lebens »Bauchschmerzen« und bezeichnete seinen Ansatz als »Akt der Verzweiflung«, um ein positives Resultat zu erzielen.



Abbildung 1.4: Die Quantisierung von Energieniveaus

Mit Licht Elektronen auslösen: Der Photoeffekt

Als *photoelektrischen Effekt* oder *Photoeffekt* bezeichnet man die Beobachtung, dass bei Bestrahlung eines Metalls mit Licht Elektronen aus dem Metall austreten können (siehe Abbildung 1.5). Dies ist durchaus mit der klassischen Physik vereinbar. Das Licht wird im Metall absorbiert und die Energie auf Elektronen übertragen, die dann in der Lage sind, das Metall zu verlassen. Dazu muss eine gewisse Potentialbarriere überwunden werden, die *Austrittsarbeit* W_A genannt wird.

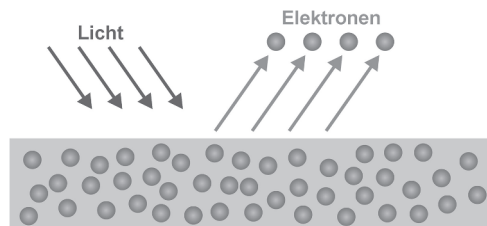


Abbildung 1.5: Der Photoeffekt

Allerdings stehen die beim Photoeffekt experimentell beobachteten Abhängigkeiten von Zahl und Energie der austretenden Elektronen von den Parametern Frequenz und Intensität des Lichts im völligen Widerspruch zur klassischen Physik. Dieser zufolge sollte die kinetische Energie der Elektronen umso größer sein, je größer die Intensität des einfallenden Lichts ist, da die vom Metall aufgenommene Energie größer ist.

Die experimentellen Beobachtungen standen allerdings im völligen Widerspruch zu diesen Erwartungen. Die kinetische Energie der Elektronen hängt bei gegebenem Metall einzig und allein von der Frequenz des Lichts ab, wobei die Abhängigkeit linear ist. Darüber hinaus gibt es eine Grenzfrequenz f_s , unterhalb derer keine Elektronen austreten (siehe Abbildung 1.6). Die Intensität des Lichts hat lediglich Einfluss auf die Zahl der austretenden Elektronen.

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 35

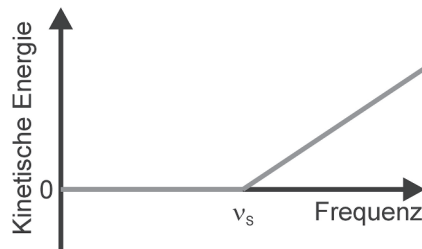


Abbildung 1.6: Die Frequenzabhängigkeit beim Photoeffekt

Wie im vorangegangenen Abschnitt diskutiert, hat Planck die Wärmestrahlung erklärt, indem er postulierte, dass die Emission und Absorption der Strahlung in Form von Energiequanten erfolgt. Zur Erklärung des Photoeffekts erweiterte Einstein 1905 die Planck'sche Quantenhypothese und nahm an, dass das Licht selbst quantisiert ist. Einsteins Vorstellung zufolge ist das Licht nicht kontinuierlich im Raum verteilt, sondern besteht aus einzelnen Teilchen, den sogenannten *Photonen* oder *Lichtquanten*. Jedes dieser Teilchen besitzt die gleiche, durch die Frequenz bestimmte Energie:

$$E_{\text{ph}} = hf = \hbar\omega$$

Dabei ist h das im vorangegangenen Abschnitt eingeführte Planck'sche Wirkungsquantum. Wenn ein solches Photon im Metall auf ein Elektron trifft, wird es absorbiert und seine Energie auf das Elektron übertragen. Die Wechselwirkung findet also zwischen *einem* Photon und *einem* Elektron statt. Ist die Energie groß genug, kann das Elektron das Metall verlassen (Abbildung 1.7). Die kinetische Energie des Elektrons beträgt daher:

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$$

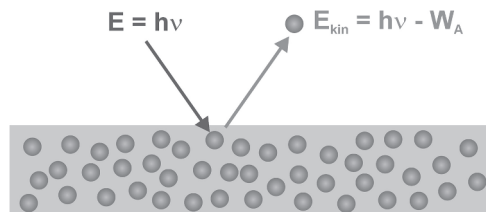


Abbildung 1.7: Die Erklärung des Photoeffekts

wobei W_A die Austrittsarbeit des jeweiligen Metalls ist. Diese Gleichung beschreibt das in Abbildung 1.6 dargestellte Verhalten genau. Die Intensität des Lichts bestimmt die Anzahl der austretenden Elektronen.

Um Ihnen ein erstes Beispiel zu geben, das zeigt, in welcher Größenordnung man sich hier bewegt, betrachten Sie die Austrittsarbeit von Natrium.

36 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten



Die Austrittsarbeit von Natrium beträgt 2,28 eV. Wenn es mit Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 300 \text{ nm}$ bestrahlt wird, beträgt die Energie der austretenden Elektronen:

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}} &= h \cdot f - W_A = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \\ &= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{300 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \cdot \frac{1}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}} - 2,28 \text{ eV} \\ &= 1,86 \text{ eV} \end{aligned}$$

(Beachten Sie den Faktor zur Umrechnung von Joule in Elektronenvolt.)

In dieser Gleichung tritt eine weitere wichtige Größe auf.



In der Quantenmechanik wird in der Regel für die Energie die Einheit Elektronenvolt (eV) verwendet. Das ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 Volt durchläuft. Es gilt:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \, 176 \, 634 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Sie bilden die Elemente: Die Atome

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte sich allmählich die Erkenntnis durch, dass Materie aus *Atomen* besteht. Der Name geht auf das griechische *átomos* zurück, was »das Unteilbare« bedeutet. Aber schon als noch nicht alle Wissenschaftler die Existenz von Atomen akzeptierten, zeigte sich, dass Atome keineswegs unteilbar sind – es gibt vielmehr Teilchen, aus denen sie aufgebaut sind. Allerdings sind diese Atombausteine für alle Atomsorten gleich. Insofern sind Atome die kleinsten Materiebausteine, die die charakteristischen Merkmale eines jeden Elements ausmachen.

Heute weiß man, dass Atome aus drei Bausteinen bestehen: Elektronen, Protonen und Neutronen. Da ihre Eigenschaften in diesem Buch durchaus eine Rolle spielen, sind sie in Tabelle 1.1 zusammengefasst.

Teilchen	Masse	Ladung	Durchmesser
Elektron	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$<10^{-18} \text{ m}$
Proton	$1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1,7 \times 10^{-15} \text{ m}$
Neutron	$1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$	Keine Ladung	$1,7 \times 10^{-15} \text{ m}$

Tabelle 1.1: Eigenschaften der drei Atombausteine

Elektronen und Protonen sind geladene Teilchen, wobei sie jeweils eine negative beziehungsweise positive Elementarladung tragen. Neutronen sind dagegen elektrisch neutral.

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 37

Da Atome als Ganzes ebenfalls neutral sind, folgt, dass die Anzahl der Elektronen und Protonen in einem Atom gleich sein muss.

Auf der anderen Seite geht aus Tabelle 1.1 hervor, dass Elektronen wesentlich leichter sind (etwa um einen Faktor 2000) als Protonen und Neutronen, die in etwa gleich schwer sind. Außerdem sind Elektronen sehr viel kleiner.

Das soll an dieser Stelle erst mal reichen. Natürlich ist das nicht das Ende der Erkenntnis (wenn man so will, ist es erst der Beginn). Wenn Sie mehr über die Zusammensetzung von Protonen und Neutronen und die spannende Geschichte der Quarks und weiterer Elementarteilchen erfahren wollen, werfen Sie einen Blick in Kapitel 10.

Experimentelle Ergebnisse

Um die vorletzte Jahrhundertwende herum wusste man schon einiges über Atome. Es gab insbesondere zwei experimentelle Beobachtungen, die jedes Modell zur Beschreibung von Atomen erklären können muss. Diese beiden Beobachtungen werden im Folgenden kurz dargelegt.

Atome sind weitgehend leer: Der Rutherford-Versuch

Den ersten wichtigen Aufschluss über die Struktur von Atomen gaben Streuversuche, die Ernest Rutherford in den Jahren von 1909 bis 1913 durchgeführt hat. Dabei wurde eine dünne Goldfolie mit einem Strahl aus α -Teilchen (positiv geladene Helium-Atomkerne) beschossen. Aus diesen Streuversuchen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- ✓ Atome sind weitgehendst leer. Die meisten der α -Teilchen konnten die Goldfolie ohne Wechselwirkung durchqueren.
- ✓ Die Masse der Atome ist im sehr kleinen, positiv geladenen Kern konzentriert.

Gestochen scharfe Linien: Atomspektren

Um die Wende zum 20. Jahrhundert entdeckte man, dass Wasserstoff eine Reihe von charakteristischen Spektralserien emittieren oder absorbieren kann, die aus jeweils sehr scharfen Linien bestehen. Die erste dieser Serien wurde 1885 von dem Schweizer Physiker Johann Balmer gefunden. Abbildung 1.8 zeigt als Beispiel diese im sichtbaren Bereich des Spektrums auftretende *Balmer-Serie*. Ähnliche Serien gibt es auch im Ultraviolett und im Infrarot. Die entsprechenden Energien können durch eine einzige einfache Formel beschrieben werden:

$$E = R_y \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{mit } R_y = hc \cdot R_\infty$$

Dabei sind R_y die Rydberg-Energie, R_∞ die Rydberg-Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit, h das Planck'sche Wirkungsquantum und n und m ganze Zahlen.

Die Bedeutung sowie die Herleitung dieser Gleichung sind in Kapitel 6 ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung des Wasserstoffatoms. Wenn Sie mehr dazu erfahren möchten, blättern Sie zu Kapitel 6 vor.

38 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

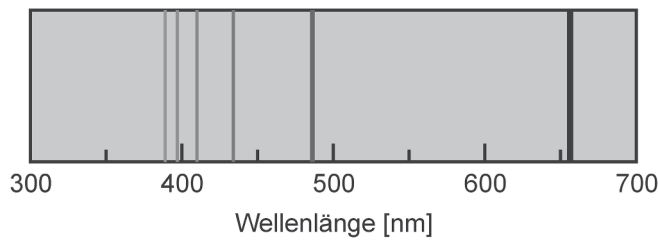


Abbildung 1.8: Die Balmer-Serie im Wasserstoffspektrum



Wichtig ist: Jedes Modell zur Beschreibung von Atomen muss in der Lage sein, die Existenz dieser Linien zu begründen und ihre Wellenlänge richtig vorherzusagen.

Frühe Atommodelle

Das Bohr'sche Atommodell ist Ihnen wahrscheinlich schon einmal begegnet. Aber natürlich hatte es auch schon Vorläufer; die beiden wichtigsten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

✓ Das Plumpudding-Modell

Das erste Atommodell wurde um 1900 von dem britischen Physiker Joseph John Thomson entwickelt. Thomson nahm an, dass Atome aus einer masse- und strukturlosen positiv geladenen Wolke bestehen, in der sich negativ geladene Elektronen bewegen. Dieses Modell wird Thomson'sches Atommodell genannt, aber auch Rosinenkuchen-Modell oder *Plumpudding-Modell*. Nachdem die Masse von Elektronen genauer bestimmt worden war, gab es bereits erhebliche Zweifel an diesem Modell (nach dem ein Wasserstoffatom etwa 2000 Elektronen enthalten müsste). Als die Ergebnisse der Rutherford'schen Streuexperimente bekannt wurden, hatte sich das Plumpudding-Modell natürlich erledigt.

✓ Das Rutherford'sche Atommodell

Ausgehend von den oben erwähnten Streuexperimenten entwickelte Rutherford selbst ein Atommodell, das nach ihm benannt wurde. Ihm zufolge bestehen Atome aus positiven Kernen, in denen die Masse konzentriert ist und die von Elektronen umgeben sind. Allerdings macht das Modell keine Angaben darüber, wie die Struktur dieser Elektronenwolke genauer aussieht. Daher kann dieses Modell zwar die Rutherford'schen Streuversuche erklären, nicht aber die Atomspektren.

Das Bohr'sche Atommodell

1913 entwickelte der dänische Physiker Niels Bohr das Rutherford'sche Modell weiter. Auch er nahm an, dass Atome einen positiv geladenen Kern besitzen. Die zur Ladungsneutralität erforderlichen Elektronen umkreisen diesen Kern auf Kreisbahnen, deren Radius Bohr ganz klassisch berechnete. Ein Elektron wird auf der einen Seite vom Kern elektrostatisch

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 39

angezogen; auf der anderen Seite erfährt es auf seiner Kreisbahn eine nach außen wirkende Zentrifugalkraft. Im Gleichgewicht müssen beide Kräfte gleich groß sein. Für ein Wasserstoffatom (ein Proton und ein Elektron) gilt beispielsweise:

$$F_{ES} = F_{ZF}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Dabei ist e die Elementarladung, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, v die Geschwindigkeit des Elektrons und r der Radius der Kreisbahn. Allerdings besagt die klassische Physik, dass eine beschleunigte Ladung Energie abstrahlt. Da eine gleichmäßige Kreisbewegung beschleunigt ist (die Richtung des Elektrons ändert sich ständig), sollte der klassischen Vorstellung zufolge das Elektron auf seiner Kreisbahn ständig Energie abstrahlen. Das sollte zu einer ständigen Abnahme des Bahnradius r führen, sodass die Elektronen innerhalb von weniger als 10^{-9} s spiralförmig in den Kern stürzen würden. Genau das ist offensichtlich nicht der Fall.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsache entwickelte Bohr seine Version eines Atommodells und stellte *drei Postulate* auf:

1. Die Elektronen bewegen sich auf bestimmten, sogenannten *stationären Bahnen* ohne Strahlung.
2. Ein Elektron gibt eine elektromagnetische Strahlung mit der Frequenz f ab, wenn es von einer äußeren stationären Bahn auf eine innere stationäre Bahn springt. Die dabei abgegebene Energie entspricht der Energiedifferenz des Elektrons auf beiden Bahnen:

$$E = hf = E_{\text{äu}} - E_{\text{inn}}$$

3. Der Drehimpuls $L = m \cdot r \cdot v$ des Elektrons auf seiner Kreisbahn ist ein ganzzahliges Vielfaches von $\hbar$:

$$L = mrv = n\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3 \dots$$

Man kann an dieser Stelle auch noch einen Schritt weitergehen: Setzt man $L = n\hbar$ in die obige Kräftebilanz ein und löst nach dem Radius auf, ergibt sich:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = \frac{m(n\hbar/mr)^2}{r}$$

$$\Rightarrow r = \frac{4\pi\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{me^2} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3 \dots$$

Das bedeutet, dass sich mit dieser Gleichung die diskreten Bahnradien berechnen lassen! Der kleinstmögliche Radius der Elektronenbahnen im Wasserstoffatom ergibt sich für $n = 1$:

$$r(n=1) := a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}$$



40 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

Diese Größe a_0 wird *Bohr'scher Radius* genannt. Er beträgt $0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (0,053 nm). Der Bohr'sche Radius sagt den Radius eines Wasserstoffatoms ziemlich genau voraus.

Demzufolge kann man die Schlussfolgerungen aus dem Bohr'schen Atommodell wie folgt zusammenfassen:

- ✓ Die Elektronen auf ihren Bahnen sind stabil. Sie können allerdings die Bahn wechseln. Dazu ist Energie erforderlich. Diese Energie kann beispielsweise durch die Absorption von Licht aufgebracht werden. Ein derartig angeregtes Elektron auf einer höheren Bahn kann wieder auf eine tiefere Bahn wechseln, wobei die freigesetzte Energie in Form von Licht emittiert wird. Diese Übergänge finden zwischen wohldefinierten Energieniveaus statt. Dies erklärt die scharfen Linien in den Absorptions- und Emissionsspektren von Atomen (siehe die Balmer-Serie in Abbildung 1.8). Auch die Rydberg-Energie ergibt sich aus diesem Modell zwangsläufig.
- ✓ Sie haben es vielleicht schon vermutet: Die Zahl n heißt *Quantenzahl*. Sie wird in den folgenden Kapiteln immer wieder auftauchen, und ihre Bedeutung wird somit im Verlauf dieses Buches immer klarer werden.
- ✓ Das dritte Postulat (siehe oben) sorgt für die *Quantisierung* der Bahnradien und der Energie. Die Quantenzahl n legt den Bahnradius r_n und die Energie E_n der stationären Bahnen fest.

Schlussbemerkung

Das Bohr'sche Atommodell beschreibt die Atomspektren des Wasserstoffatoms sehr genau, und es erklärt weitere experimentelle Beobachtungen. Dabei sollten Sie aber immer im Hinterkopf haben, dass es zwar viele richtige Ergebnisse liefert, aber die Wirklichkeit **nicht** korrekt beschreibt. Die Elektronen bewegen sich **nicht** auf Kreisbahnen um den Atomkern, wie sich im Verlauf dieses Buches herausstellen wird.

Zudem kann das Bohr'sche Atommodell die Spektren von Atomen mit mehreren Elektronen nicht korrekt erklären. Man erhält mit diesem Modell nicht einmal für Helium (das zweitleichteste Atom mit nur zwei Elektronen) brauchbare Ergebnisse.

Sie sollten aber Folgendes nicht vergessen: Obwohl das Bohr'sche Atommodell falsch ist, hat es den Weg zum Aufbau der Quantenmechanik geebnet. Seine historische Bedeutung beruht sicher auch darauf, dass es die Nahtstelle zwischen klassischer Physik und Quantenphysik repräsentiert wie nur wenig anderes.

Licht: Welle oder Teilchen?

Seit dem 17. Jahrhundert stritten die Physiker heftig über die wahre Natur des Lichts. Handelt es sich um Teilchen oder Wellen?

KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 41

Sir Isaac Newton (1643–1727), der neben James Clerk Maxwell (1831–1879) vielleicht bedeutendste Physiker der klassischen Periode, vertrat die Auffassung, dass das Licht aus atomähnlichen Teilchen (Korpuskeln) besteht. Christiaan Huygens (1629–1696), ein niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker, der zu den führenden Wissenschaftlern seiner Zeit zählt, entwickelte dagegen das *Huygen'sche Prinzip* und gilt somit als Begründer der *Wellentheorie* des Lichts.

Die erbitterten Debatten über die Natur des Lichts, die sich zwangsläufig daraus ergaben, erstreckten sich weit über Newton und Huygens hinaus. Da Newton seinerzeit aber als nahezu unangreifbar galt, gewannen seine Vorstellungen im 18. Jahrhundert die Oberhand, während Huygens' Wellentheorie eher ein Schattendasein führte. Dies änderte sich erst im Jahr 1802, als Young sein berühmtes Doppelspaltexperiment durchführte und die Wellennatur des Lichts nachwies, was das Blatt schlagartig zu Huygens' Gunsten wendete.

Der Doppelspaltversuch: Licht ist eine Welle

Beim Doppelspaltversuch fällt Licht durch zwei eng benachbarte Spalte auf einen dahinter befindlichen Schirm (siehe Abbildung 1.9). Dabei beobachtet man auf dem Schirm keineswegs zwei helle Streifen, sondern ein komplexes Muster der Intensität, wobei das Maximum in der Mitte zwischen den beiden Spalten liegt. Dieses Muster kann durch *Interferenz* zweier von den Spalten ausgehender Wellen erklärt werden. Der Versuch zeigt, dass Licht durch Interferenz ausgelöscht werden kann – dies ist bei Teilchenstrahlen nicht möglich.

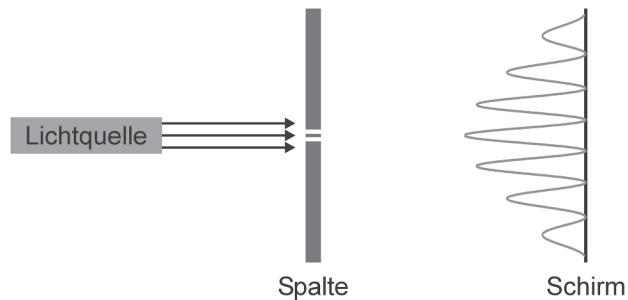


Abbildung 1.9: Der Young'sche Doppelspaltversuch



Wann immer Interferenzeffekte beobachtet werden, sind an dem betrachteten Prozess Wellen beteiligt!

Danach waren sich die Physiker etwa 100 Jahre lang einig: Licht besteht aus Wellen, zu deren Charakterisierung es (neben der Intensität) drei Größen gibt: die Wellenlänge λ , die Frequenz f und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Zwischen ihnen besteht die Beziehung:

$$c = \lambda \cdot f$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit. Sie beträgt $2,998 \cdot 10^8$ m/s und ist unabhängig von der Wellenlänge.



42 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten



Grün-blaues Licht besitzt eine Wellenlänge von $\lambda \approx 500 \text{ nm}$. Somit ergibt sich eine Frequenz von

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{500 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 6,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 600 \text{ THz}$$

Eigentlich sollte dieser Punkt das Ende der langen Debatte um die Frage sein, ob es sich bei Licht um Teilchen oder Wellen handelt.

Aber es kam anders: Etwa 100 Jahre nach dem Doppelspaltversuch geriet das Weltbild der Physiker wieder aus den Fugen. Wie oben dargestellt, lassen sich die experimentellen Daten zum Photoeffekt nur erklären, wenn man annimmt, dass Licht aus Teilchen besteht, den sogenannten *Photonen*. Diese Teilchen besitzen eine Energie, die einzig und allein durch die Wellenlänge beziehungsweise die Frequenz des Lichts bestimmt ist:

$$E = h \cdot f$$

Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum.

Photon schubst Elektron: Der Comptoneffekt

Bis 1922 war der Photoeffekt der einzige experimentelle Nachweis für die von Einstein postulierte Teilchennatur von Licht beziehungsweise elektromagnetischen Wellen. In diesem Jahr bestrahlte der amerikanische Physiker Arthur Compton Graphit mit hochenergetischer Röntgenstrahlung und untersuchte die vom Graphit gestreute Strahlung. Dabei machte er zwei erstaunliche Beobachtungen:

- ✓ In Vorwärts- und Rückwärtsrichtung sind die Streuwinkelverteilungen unterschiedlich.
- ✓ Die Wellenlänge der gestreuten Strahlung ist größer als die des einfallenden Strahls, das heißt, die Frequenz ist kleiner. Zudem hängt die Wellenlänge vom Streuwinkel ab.

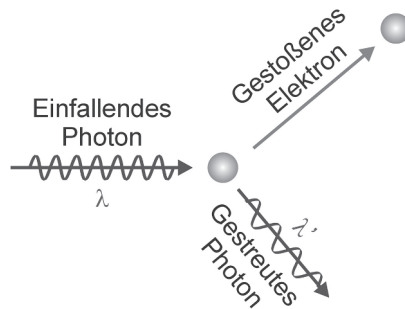
Beide Beobachtungen sind nicht mit der klassischen Physik vereinbar. Ihr zufolge sollte die elektromagnetische Welle die Elektronen im Graphit in Schwingungen versetzen, aber nach einer gewissen Zeit sollte der Graphit eine Welle mit der ursprünglichen Frequenz aussenden.

Wenn man allerdings annimmt, dass auch Röntgenstrahlen aus Teilchen bestehen, die eine ihrer Frequenz entsprechende Energie besitzen ($E_{\text{ph}} = hf$), lassen sich die Beobachtungen des Comptonversuchs einfach erklären. Dann findet zwischen einem bewegten Photon und einem ruhenden Elektron ein elastischer Stoß statt, das heißt, die Gesamtenergie beider Teilchen bleibt beim Stoß erhalten (siehe Abbildung 1.10). Man kann hier die klassische Stoßtheorie anwenden. Beim Stoß wird ein Teil der Energie des Photons auf das Elektron übertragen, die Energie des Photons nimmt also ab und damit auch seine Frequenz. Infolgedessen nimmt die Wellenlänge der Strahlung zu, wobei die Zunahme vom Streuwinkel θ abhängt:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c}(1 - \cos \theta) = \lambda_c(1 - \cos \theta)$$



KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 43

**Abbildung 1.10:** Der Comptoneffekt

Dabei ist m_e die Masse des Elektrons und c die Lichtgeschwindigkeit. λ_c ist die *Comptonwellenlänge* des Elektrons; sie gibt die Wellenlängenzunahme an, wenn das Photon unter einem rechten Winkel gestreut wird. Für die Comptonwellenlänge des Elektrons gilt:

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e \cdot c} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$$



Der Comptoneffekt kann auch bei anderen Elementarteilchen beobachtet werden. Dann muss man in der Gleichung für die Comptonwellenlänge die Masse des Elektrons durch die Masse des betrachteten Teilchens ersetzen.

Somit geht aus dem Comptoneffekt eindeutig hervor, dass nicht nur sichtbares Licht Teilcheneigenschaften besitzt, sondern dies auch für andere Bereiche des elektronmagnetischen Spektrums gilt.

Photonen werden Ihnen im Verlauf dieses Buches noch häufig über den Weg laufen. Im Folgenden sind die wichtigsten Informationen aufgelistet:

- ✓ Photonen besitzen keine Masse.
- ✓ Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.
- ✓ Photonen gehören zu den Fundamentarteilchen (siehe Kapitel 10).
- ✓ Photonen besitzen den Spin 1, sind also Bosonen (siehe Kapitel 7). Dieser Spin ist entweder parallel oder antiparallel zur Ausbreitungsrichtung.

Um die Ergebnisse der Diskussion bezüglich der Frage »Welle oder Teilchen?« bis zu diesem Punkt zusammenzufassen:

- ✓ Es hat sich eindeutig gezeigt, dass das Licht eine Welle ist (Doppelspaltversuch).
- ✓ Es ist ebenso eindeutig, dass Licht aus Photonen besteht (Photoeffekt, Comptoneffekt).



44 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

Sie haben recht: Dies ist – zum dritten Mal eindeutig – ein Widerspruch! Bevor die (dieses Kapitel) abschließende Diskussion folgt, muss diese Betrachtung allerdings noch um einen weiteren Punkt ergänzt werden.

Die Welleneigenschaften der Materie

Albert Einstein hat 1905 bei der Erklärung des Photoeffekts postuliert, dass Licht zwar eine Welle ist, aber auch Teilchencharakter haben kann. Der französische Physiker Louis de Broglie präsentierte im Jahr 1924 (in seiner Doktorarbeit!) quasi den Umkehrschluss: Quantenobjekte, wie zum Beispiel Elektronen, sind zwar Teilchen, aber unter bestimmten Bedingungen können sie auch einen Wellencharakter besitzen.

Um diese zum damaligen Zeitpunkt doch etwas gewagte These besser einordnen zu können, betrachten Sie im Folgenden noch einmal Elektronen, die zu den Elementarteilchen gehören und somit ein gutes Beispiel für Quantenobjekte sind. In der klassischen Physik werden sie durch eine Masse m und eine Geschwindigkeit v beschrieben. Somit kann man ihnen auch einen Impuls p und eine (kinetische) Energie E zuordnen:

$$p = m \cdot v \quad \text{und} \quad E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{m}$$

De Broglie stellte die folgenden Thesen auf:

- ✓ Bei der Ausbreitung verhalten sich Quantenobjekte wie Wellen – sogenannte *Materiewellen* –, die Interferenz und Beugung zeigen.
- ✓ Bei der Wechselwirkung mit Materie reagieren Quantenobjekte *lokal* und übertragen Energie und Impuls.

In Übereinstimmung mit diesen beiden Punkten formulierte er die Zusammenhänge zwischen den beiden mechanischen Größen E und p einerseits und den Wellengrößen ω und k andererseits wie folgt:

$$E = hf = \hbar\omega \quad \text{und} \quad p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

Dabei ist k die Wellenzahl mit $k = 2\pi/\lambda$.



Diese Wellenlänge wird *De-Broglie-Wellenlänge* genannt. Mithilfe der oben vorgestellten Beziehung zwischen Impuls und Energie lässt sie sich auch folgendermaßen schreiben:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

Die Elektronenbeugung

Obwohl die Vorstellung von Materiewellen erst einmal gewöhnungsbedürftig ist, ist das Auftreten von Interferenzeffekten bei Elektronen gar nicht so schwer zu überprüfen! Eine



KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 45

Möglichkeit besteht beispielsweise darin, einen Elektronenstrahl auf einen Doppelspalt fallen zu lassen. Aufgrund der äußerst kleinen Wellenlängen kann man dazu allerdings keine mechanisch konstruierten Spalten benutzen.

Dennoch gelang Davidson und Germer schon 1927 (also nur kurz nach de Broglies Postulat) der Nachweis, dass man mit Elektronenstrahlen Interferenzeffekte erzeugen kann. Der von ihnen benutzte Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1.11 dargestellt. Ein Nickelkristall wird mit einem Elektronenstrahl beschossen. Die rückgestreuten (gebeugten) Elektronen werden dann als Funktion des Streuwinkels registriert. Dabei werden eindeutig Interferenzeffekte beobachtet, das heißt Maxima und Minima als Funktion von θ . (Hier handelt es sich also nicht um Beugung an einem Doppelspalt, sondern um Beugung an einem Gitter, die allerdings auch bei Licht und anderen elektromagnetischen Wellen auftreten kann.)

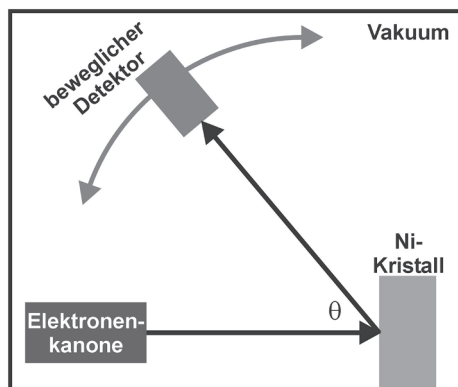


Abbildung 1.11: Der prinzipielle Aufbau des Versuchs von Davidson und Germer

Diese Interferenzen können anhand von Abbildung 1.12 erklärt werden. Als Streuzentren dienen die Atome des Kristalls. (In Kapitel 8 finden Sie eine kurze Einführung in die Festkörperphysik und die Beschreibung von Kristallen.) Damit zwei Strahlen von zwei Gitterebenen mit dem Abstand d in einem Detektor positiv interferieren, muss der Gangunterschied zwischen ihnen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein. Damit muss für die Winkel, unter denen man positive Interferenz (a) beobachtet, gelten:

$$d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

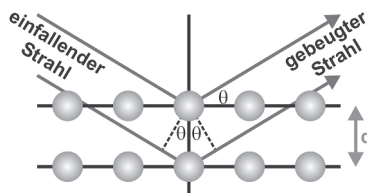


Abbildung 1.12: Das Prinzip der Elektronenbeugung



46 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten



Diese Bedingung entspricht der bekannten Röntgenbeugung, bei der Röntgenstrahlung zur Untersuchung von Kristallen verwendet wird. In diesem Zusammenhang wird die Gleichung auch als Bragg-Bedingung bezeichnet.

Die Beugung von Materiewellen kann am Beispiel von Elektronen relativ einfach nachgewiesen werden, da sie die leichtesten und am einfachsten zugänglichen Elementarteilchen sind. Aber natürlich ist die De-Broglie-Gleichung nicht auf Elektronen beschränkt, sie gilt im Prinzip für alle Teilchen. In der Tat wurden Beugungseffekte schon früh für Neutronen, Protonen und α -Teilchen nachgewiesen. Inzwischen ist es sogar gelungen, Interferenzeffekte auch bei größeren Molekülen nachzuweisen, beispielsweise an C_{60} -Molekülen, den berühmten *Fullerenen* oder Buckyballs.



Die De-Broglie-Wellenlänge eines Teilchens lässt sich übrigens einfach berechnen. Betrachten Sie beispielsweise ein α -Teilchen, dessen Kern aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Wenn man in erster Näherung die Bindungsenergie vernachlässigt, beträgt seine Masse:

$$m_{\alpha} = 2(m_p + m_n) = 2 \cdot (1,673 + 1,675) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 6,696 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Bei einem α -Teilchen mit einer Energie von 1 keV beträgt die De-Broglie-Wellenlänge:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 6,696 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 10^3 \text{ eV} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ eV}^{-1}}} \\ &= 4,53 \cdot 10^{-13} \text{ m} = 0,45 \text{ pm} \end{aligned}$$

An dieser Stelle ergibt sich natürlich die Frage, wie schwer Teilchen sein dürfen, damit man Interferenzeffekte beobachten kann. Um das zu überprüfen, betrachten Sie einen Fußball mit einer Masse von 450 g, der mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h über den Rasen fliegt. Dies entspricht 28 m/s. Damit ergibt sich für die »De-Broglie-Wellenlänge des Fußballs«:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{0,45 \text{ kg} \cdot 28 \text{ m/s}} = 5,26 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Dies ist so unvorstellbar klein, dass man einem Fußball – wie allen anderen makroskopischen Körpern – keine Wellenlänge zuordnen kann.

Welle oder Teilchen? Beides!

Die Frage, ob es sich bei Quantenobjekten wie Licht (Photonen) oder Elektronen um Wellen oder um Teilchen handelt, lässt sich nicht beantworten. Sie ist im Prinzip sogar falsch gestellt. In beiden Fällen handelt es sich um Quantenobjekte, bei denen es von der Art der Messung abhängt, die man mit ihnen durchführt, ob die Wellen- oder die Teilcheneigenschaften zutage treten. Quantenmechanische Objekte werden, wie die Darstellung in Teil II zeigt, durch *Wellenfunktionen* beschrieben, die nicht messbar sind, da sie komplexwertig sind.

Die Tatsache, dass man immer nur einen der beiden Aspekte beobachten kann, führt letztendlich zu der Erkenntnis, dass sich das Wellen- und das Teilchenbild sowohl ergänzen als



KAPITEL 1 Der Weg zur Quantenmechanik 47

auch gegenseitig ausschließen. Dieses Prinzip der *Komplementarität* ist einer der grundlegenden Bausteine der Quantenmechanik.

Einschub: Welcher-Weg-Informationen und Experimente mit verzögerter Wahl

Bereits in den 1920er-Jahren haben Albert Einstein, Niels Bohr und andere Physiker diskutiert, ob sich das Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch ändert, wenn man beobachtet, durch welchen Spalt die Elektronen jeweils fliegen. Das Ergebnis ist eindeutig, bei der Messung des Spaltdurchgangs – dem Erlangen der sogenannten »Welcher-Weg-Information« – verschwindet das Interferenzmuster. Es ist selbst dann kein Interferenzmuster zu sehen (sondern eine Addition von zwei Beugungsmustern), wenn man das verwendete Messgerät nicht ausliest. Die physikalische Möglichkeit zum Gewinn dieser Information ist ausreichend, um das Auftreten des Interferenzmusters zu verhindern.

1978 stellte der amerikanische Physiker John A. Wheeler eine zum damaligen Zeitpunkt überraschende Frage: Was passiert, wenn die Ortsmessung erst dann stattfindet, wenn das Quantenobjekt den Doppelspalt mit Sicherheit passiert hat – aber noch nicht auf dem Schirm angekommen ist? Auch in diesem Fall erhält man eindeutige Antworten:

- ✓ Die Elektronen, an denen Ortsmessungen vorgenommen wurden, erzeugen kein Interferenzmuster. Jedes Elektron verhält sich, als wäre es nur durch einen Spalt geflogen.
- ✓ Die Elektronen, an denen **keine** Ortsmessungen vorgenommen wurden, erzeugen ein Interferenzmuster auf dem Schirm. In diesem Fall muss jedes Elektron als Welle durch **beide** Spalten zugleich geflogen sein.

Mit diesen Ergebnissen kommt man schnell zu einer Frage, die Ihnen an dieser Stelle als ungeheuerlich erscheinen muss, aber zu den grundlegenden Fragen der Quantenmechanik gehört: Hatte ein Teilchen, dessen Ort gemessen wurde, schon vor der Messung den gemessenen Ort?

Diese Frage wird in Kapitel 5 untersucht und darüber hinaus bei der Diskussion des Effekts der Dekohärenz in Kapitel 9 ebenfalls eine Rolle spielen.

Ein neuer Weg

Die Notwendigkeit einer neuen Art von Physik oder eines neuen Gedankengebäudes innerhalb der Physik ergibt sich aus den in diesem Kapitel diskutierten experimentellen Befunden. Demzufolge mussten bei der Erarbeitung der neuen Theorie folgende Punkte berücksichtigt werden:

✓ Welle-Teilchen-Dualismus

Quantenobjekte wie Photonen oder Elektronen können sowohl Teilchen- als auch Wellencharakter besitzen. Je nach der Situation, in der das Objekt betrachtet wird, gerät die eine oder die andere Eigenschaft ins Blickfeld.



48 TEIL I Der Eintritt in die Welt der Quanten

✓ Quantisierung

Eine physikalische Größe wie die Energie eines physikalischen Systems kann nicht jeden beliebigen Wert annehmen, sondern nur ganz bestimmte: Die Größe ist quantisiert. Diese Quantisierung tritt auch bei anderen Größen wie etwa dem Drehimpuls auf.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellte **Quantenmechanik** ist in der Lage, diese Phänomene zu erklären. Der Preis ist allerdings hoch, da sie an weiteren Grundlagen der klassischen Physik rüttelt, die man unter der Überschrift »Bestimmt unbestimmt« zusammenfassen kann:

- ✓ Die Quantenmechanik beziehungsweise die Lösung der Schrödingergleichung (mit der Sie in den folgenden Kapiteln arbeiten werden) erlaubt nur die Angabe von Wahrscheinlichkeiten beziehungsweise Aufenthaltswahrscheinlichkeiten.
- ✓ Die Heisenberg'sche Unschärferelation besagt, dass bestimmte Größen wie Ort und Impuls niemals gleichzeitig mit absoluter Genauigkeit angegeben werden können.
- ✓ Das Ergebnis einer Ortsmessung ermöglicht keine Rückschlüsse auf den Ort, den das Teilchen vor der Ortsmessung hatte.

Ich hoffe, Ihre Neugierde ist geweckt und Sie blättern weiter zu Teil II.

Teil II ermöglicht Ihnen auf unterschiedliche Weise, Ihren Weg in die Quantenmechanik zu finden. Kapitel 2 beinhaltet die absoluten Grundlagen, ohne die gar nichts geht. Wenn Sie sich ernsthaft mit der Quantenmechanik beschäftigen wollen, ist dieses Kapitel unverzichtbar.

Da Ihnen die in Kapitel 2 eingeführten Grundlagen erst einmal sehr ungewohnt – vielleicht sogar abenteuerlich – erscheinen werden, folgt direkt im Anschluss in Kapitel 3 mit der Untersuchung von Potentialtöpfen und -barrieren der Sprung in den Umgang mit den neuen Begriffen. Sie werden dort die Herangehensweise an quantenmechanische Aufgaben kennenlernen. Darüber hinaus werden Sie bei der Untersuchung des harmonischen Oszillators (Kapitel 4), des quantenmechanischen Drehimpulses und schließlich des Wasserstoffatoms (Kapitel 6) Ihr Wissen ergänzen und Ihre Fähigkeiten erweitern.

Wenn Sie ein gewisses Verständnis für die mathematischen Hintergründe entwickeln, wird Ihnen das Ihren Umgang mit der Quantenmechanik sehr erleichtern. Daher wird in Kapitel 4 die zugehörige Mathematik zusammenfassend und anschaulich dargestellt.

Da die physikalischen »Besonderheiten« ein wesentlicher Schlüssel zum Verständnis der Quantenphysik sind, wird ihnen mit Kapitel 5 ein Extra-Kapitel gewidmet. Dort finden Sie nicht nur Hintergründe, die bei Ihnen für die gewissen »Aha-Momente« sorgen sollen, sondern die vielleicht auch Ihre Neugier in Bezug auf das »Wesen der Quantenmechanik« anstacheln.

