

Kapitel 1: Von den Anfängen der Quantentheorie

Seit den Arbeiten von Faraday, Maxwell und Hertz zwischen 1836 und 1888 wurde die Ausbreitung des Lichtes als eine Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen verstanden. Licht zeigt die für Wellen typischen Eigenschaften der Interferenz und Beugung.

Im Jahr 1900 zeigte Max Planck, dass das Licht auch gequantelt (portioniert) ist. Er konnte das Strahlungsspektrum, welches ein schwarzer Körper bei unterschiedlichen Temperaturen abstrahlte nur dann erklären, wenn er annahm, dass Licht in Energiebündeln abgestrahlt wurde. Die Energie dieser Bündel war proportional zur Lichtfrequenz. Er führte den Proportionalitätsfaktor h ein, welcher heute als Planck'sche Konstante oder Planck'sches Wirkungsquantum bekannt ist und den Wert $6.626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ besitzt. Als Formel:

$$E=h \cdot f$$

(f =Frequenz, manchmal auch als ν (griech. ν) geschrieben)

Einstein nahm diese Idee auf und vermochte mit ihr 1905 den sog. Photoeffekt zu erklären. Er nannte die Energiebündel Lichtpfeile, heute allgemein als Photonen bekannt.

Mit den Arbeiten von Planck und Einstein tat sich ein Widerspruch zu der historischen Betrachtungsweise des Lichts auf, der bis heute nicht geklärt ist. Licht besitzt je nach der Art der Untersuchung Wellencharakter oder Teilchencharakter. Dieses Verhalten wird mit dem Begriff Welle-Teilchen Dualismus versehen. Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass sogar einzelne Photonen (Lichtteilchen) sich wie Wellen verhalten und sich den Gesetzmässigkeiten der Interferenz unterwerfen. Da für Interferenz die Überlagerung von mindestens zwei Wellenzügen erforderlich ist, bleibt nur der Schluss, dass das Photon als Welle reist, die sich aufteilen kann, dass es aber bei einer Messung auch als Teilchen erscheinen kann. Der wahrscheinliche Ort des Auftretens kann mit Hilfe der Wellenphysik berechnet werden.

Die beim Photon gemachten Erfahrungen brachten den französischen Physiker Louis de Broglie 1924 dazu in seiner Doktorarbeit zu postulieren, dass auch ein Teilchen mit Masse, wie das Elektron, Wellencharakter haben könnte. Experimentelle Beweise dafür gab es dannzumal noch nicht. 1927 zeigten Davisson und Germer, dass ein an einem Einkristall gestreuter Elektronenstrahl auch ein Interferenzmuster erzeugte. 34 Jahre später gelang es Jönsson das Interferenzmuster des Elektronenstrahls auch am Doppelspalt zu erzeugen und damit die

Analogie zu den Eigenschaften der Photonen zu demonstrieren. 1999 zeigten Arndt und Zeilinger, dass auch Moleküle aus 60 C-Atomen Wellencharakter aufweisen können. Die Annahme von de Broglie hat sich also als richtig erwiesen: Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit beliebiger massehaltiger und bewegter Teilchen kann mit Hilfe einer dem Teilchen zugeordneten Materiewelle berechnet werden. Die Welle selbst hat keine physikalische Bedeutung. Gemäss de Broglie gilt dabei:

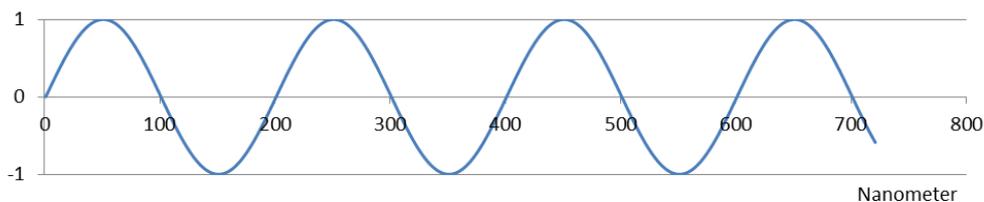
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$$

(λ =Wellenlänge, m =Masse, v =Teilchengeschwindigkeit, p =Impuls)

Hier setzt nun die Quantenchemie an: Sie ordnet den Elektronen eine Materiewelle zu und untersucht deren Verhalten im Anziehungsbereich des Kerns. Damit können Wahrscheinlichkeiten über das Auftreten von Elektronen an bestimmten Orten in einem Atom angegeben werden.

Fragen zu Kapitel 1

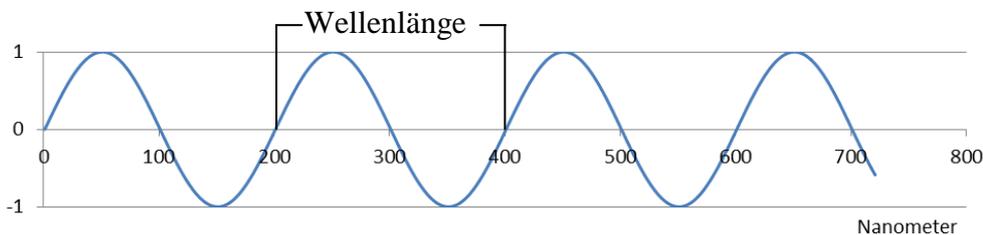
1. Bei der folgenden Welle soll es sich um eine elektromagnetische Welle handeln



- Wie gross ist die Wellenlänge dieser Welle in Metern?
- Was ist eine Amplitude und wie gross ist sie bei der Welle aus Aufgabe 1?
- Die Welle unter Aufgabe 1. hat Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8$ m/s). Sie legt also in der Sekunde den Weg von $3 \cdot 10^8$ m zurück. Die Wellenlänge (Länge einer Schwingung) in Metern wurde in 2. berechnet. Wie gross ist ihre Frequenz [Schwingungen/s]?
- In 3. haben Sie soeben eine wichtige Beziehung hergeleitet: $f = v/\lambda$ oder $\lambda = v/f$. Ersetzen Sie f durch E/h (aus $E=h \cdot f$) und danach E durch $m \cdot c^2$ (aus $E=m \cdot c^2$). Welche Erkenntnis erhalten sie mit $v=c$?
- Berechnen Sie die Wellenlänge eines Elektrons mit 5 % Lichtgeschwindigkeit ($0.15 \cdot 10^8$ m/s)?
- Welche Auswirkungen hätte eine zusätzliche Beschleunigung des Elektrons (grössere kinetische Energie) auf dessen Wellenlänge? Stimmt das mit den Erkenntnissen aus der Wellentheorie überein?

Antworten zu Kapitel 1

1.



Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder zwischen zwei Wellentälern und umfasst eine ganze Schwingung, in diesem Fall 200 nm. 1 nm ist 10^{-9} m, somit beträgt die Wellenlänge $200 \cdot 10^{-9}$ m oder $2 \cdot 10^{-7}$ m.

2. Als Amplitude wird die max. Auslenkung vom Nullwert (Ruhelage der Schwingung) bezeichnet, sie hat hier den Wert 1. Auf die Einheit der Amplitude wird nicht eingegangen. 1 m ist 10^9 nm (oder 1 nm ist 10^{-9} m). Sie legt also $3 \cdot 10^8 \cdot 10^9 = 3 \cdot 10^{17}$ nm zurück.

3. In einer Sekunde legt die Welle $3 \cdot 10^8$ m zurück. Die Wellenlänge ist $2 \cdot 10^{-7}$ m. Der Quotient aus den beiden Werten ergibt die Anzahl Schwingungen pro Sekunde: $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} / 2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ oder Hz.

4. Mit $f = E/h$ und $v = c$ erhält man:

$$\lambda = c \cdot h / E.$$

Mit $E = m \cdot c^2$:

$$\lambda = (c \cdot h) / (m \cdot c^2) \text{ oder gekürzt: } \lambda = h / (m \cdot c)$$

Das ist die Gleichung von de Broglie für ein Photon. De Broglie konnte zeigen, dass die Gleichung für alle bewegten Massen gilt, auch wenn sie nicht Lichtgeschwindigkeit haben.

5. Die Wellenlänge kann mit der Formel von de Broglie berechnet werden: $\lambda = h / (m \cdot v)$

Mit $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js (Joule mal Sekunden)

$m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg und $v = 0.15 \cdot 10^8$ m/s

erhält man $0.48 \cdot 10^{-11}$ m. Der Durchmesser eines Wasserstoffatoms liegt bei $1 \cdot 10^{-10}$ m. Die de Broglie-Wellenlänge des Elektrons liegt also in der Größenordnung eines Atomdurchmessers. Dies ist eine Voraussetzung für das Auftreten von Quanteneffekten, wie das nächste Kapitel zeigen wird.

6. Bei grösserer Geschwindigkeit wird die Wellenlänge kürzer, die Frequenz wird grösser. Wellen mit kurzen Wellenlängen gelten als energiereicher als solche mit langen.