
5.1.6 Wellen- und Teilchenaspekt von Licht und Materie; Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Vorstellungen; statistische Deutung nach Born

Der Dualismus Welle-Teilchen

Elektromagnetische Strahlung zeigt eine merkwürdige, scheinbar widersprüchliche Doppelnatur: Einige optische Erscheinungen wie Beugung und Interferenz können nur mit Hilfe des Wellenmodells der Strahlung beschrieben werden, andere Erscheinungen wie etwa der Fotoeffekt oder vor allem der Comptoneffekt deuten auf eine Korpuskelnatur der elektromagnetischen Strahlung hin. Zudem zeigen sogar scheinbar eindeutig korpuskulare Teilchen wie das Elektron Welleneigenschaften. Diese scheinbare Doppelnatur nennt man den "Dualismus Welle-Teilchen".

Die Frage, ob das Licht in Wirklichkeit eine Welle oder ein Teilchen ist, hat in der Physik zeitweise zu Schwierigkeiten geführt, weil man sich nicht bewusst war, dass es sich bei der Wellen- wie der Quantenvorstellung um Modelle handelt, die die jeweiligen Versuchsergebnisse möglichst gut und einfach beschreiben sollen. Nur in diesem Sinne ist eine Modellvorstellung als richtig oder falsch zu werten. Dagegen ist die Frage, ob das Licht in Wirklichkeit eine Wellenerscheinung oder ein korpuskularer Vorgang ist, nicht sinnvoll. Vielmehr ist das Licht weder eine Welle noch ein Teilchen, sondern ein Etwas, das sich der Beschreibung durch ein Modell entzieht. Einzelne Seiten sind durch das Quantenmodell, andere durch das Wellenmodell erfassbar.

Statistische Deutung nach Born

In der Physik wurde oft nach einer Verknüpfung zwischen der Wellen- und der Teilchentheorie gesucht. Max Born (1882 - 1970, dt. Physiker, NP 1954) hat durch die statistische Deutung der Quantentheorie einen Weg zur Auflösung des scheinbaren Widerspruchs gewiesen:

In der Wellenlehre wird gezeigt, dass die Beleuchtungsstärke in irgendeinem Punkt P direkt proportional zum Amplitudenquadrat der einfallenden elektromagnetischen Welle ist. Nach der Photonentheorie ist dagegen die Beleuchtungsstärke in P direkt proportional zur Photonendichte in P.

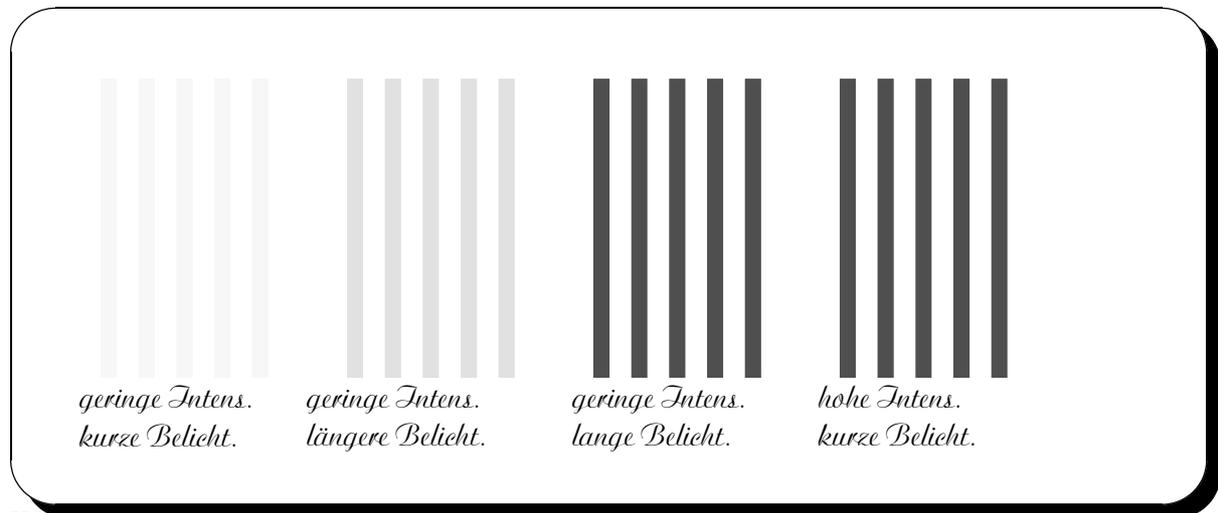
Born fasste seine Überlegungen so zusammen:

Die Photonendichte in einem Raumelement um den Punkt P ist direkt proportional zum Amplitudenquadrat der elektromagnetischen Welle in P.

Diese Auffassung soll durch den Versuch von Taylor (1909) erläutert werden:

Versuch: Hinter einer üblichen Doppelspaltanordnung befindet sich eine so empfindliche Fotoplatte, dass bereits einzelne Photonen eine erkennbare Schwärzung hervorrufen.

Ergebnisse:



Wenn der Doppelspalt stark beleuchtet wird, dann sind an dem Vorgang sehr viele Photonen beteiligt, und wir erhalten bei einer fotografischen Aufnahme üblicher Belichtungsdauer das uns vertraute Interferenzbild. Wird dagegen die Beleuchtungsstärke oder die Belichtungszeit stark herabgesetzt und so die Zahl der beteiligten Photonen erheblich verringert, so erscheinen die geschwärzten Stellen in einzelne Schwärzungspünktchen aufgelöst; dabei ist die Schwärzungsverteilung entsprechend der Verteilung der Photonendichte noch zu erkennen. Ein einzelnes Photon ruft jedoch nur an einer ganz bestimmten Stelle ein Schwärzungspünktchen hervor. Seine Energie wird also nicht entsprechend der Wellenvorstellung auf eine größere Fläche zu einer Interferenzfigur verteilt. Das Photon trifft vielmehr an irgend einer Stelle auf, an der das Amplitudenquadrat der elektromagnetischen Stelle nicht verschwindet. Für das einzelne Photon hat die Welle den Charakter einer "Führungswelle". Je größer an einer Stelle des Raumes das Amplitudenquadrat der Welle ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich das Photon dort befindet. Genauere Angaben darüber, wohin ein einzelnes Photon gelangt, lassen sich grundsätzlich nicht machen. Dies ist Ausdruck einer Unbestimmtheit, der wir im atomaren Bereich noch öfter begegnen werden.

Damit unterscheidet sich das Photon von einem makroskopischen Teilchen, bei dem man stets auf Grund seines augenblicklichen Bewegungszustandes sagen kann, wie es sich weiterhin bewegen wird. Demnach ist der Übergang zum Photonenmodell des Lichts in der modernen Physik keine Rückkehr zur Newtonschen Korpuskulartheorie des Lichts. Die Lichtkörperchen der Newtonschen Vorstellung unterscheiden sich nämlich nur durch ihre Größe von makroskopischen Körpern. Mit den Photonen eines einfarbigen Lichtbündels ist dagegen die zugehörige elektromagnetische Welle als

Führungswelle unlösbar verbunden, deren Amplitudenquadrat die räumliche Verteilung der Photonen bestimmt. Sind an einem Versuch viele Photonen beteiligt, so werden die vielen mehr oder minder wahrscheinlichen Bewegungsmöglichkeiten der Photonen weitgehend realisiert, und wir erhalten als statistische Verteilung der Photonendichte das Bild, wie es sich aus der Wellenvorstellung ergibt. Da in Beugungs- und Interferenzversuchen in der Regel viele Photonen zusammenwirken, erhalten wir in Beugungs- und Interferenzbildern eine Verteilung der Beleuchtungsstärke entsprechend der Wellenvorstellung.

Bei jeder Registrierung oder Messung von Strahlungsvorgängen treten im Registriergerät (Netzhaut des Auges, Photoplatte, Photozelle) Vorgänge auf, die korpuskular gedeutet werden müssen. Je größer die Energie eines Photons ist, desto leichter kann es in einem Nachweisgerät als einzelnes Photon festgestellt werden. Daher tritt der korpuskulare Charakter elektromagnetischer Strahlung um so mehr in den Vordergrund, je größer die Energie des einzelnen Photons, d. h. je größer seine Frequenz ist. Die Tabelle gibt für einige Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums die Energie der zugehörigen Photonen an.

Tabelle:

Frequenzbereich	Frequenz	Energie eines Photons
UKW	10^8 Hz	0,4 μ eV
Ultrarot	10^{12} Hz	4 meV
sichtbares Licht	$5 \cdot 10^{14}$ Hz	2 eV
Ultraviolett	10^{16} Hz	0,04 keV
Röntgenstrahlung	10^{19} Hz	0,04 MeV
Gammastrahlen	10^{24} Hz	4 GeV

Empfänger langwelliger Strahlung bis zum Ultrarot hin sind so unempfindlich, dass bei einer registrierbaren Strahlungsleistung sehr viele Photonen pro Sekunde aufgenommen werden müssen; einzelne Photonen können damit nicht wahrgenommen werden. Deshalb tritt bei niedrigen Frequenzen der Wellencharakter der elektromagnetischen Strahlung stark hervor. Das heißt nicht, dass die Photonenvorstellung in diesem Frequenzgebiet versagte. Beobachtungen der Mikrowellenspektroskopie, auf die wir hier nicht eingehen, sind mit dem Photonenbild im Einklang.

Photonen aus dem Frequenzbereich der Röntgen- und Gammastrahlen haben dagegen Energiewerte von keV bis zu mehreren GeV. Solche Photonen lassen sich leicht einzeln nachweisen. Daher tritt der Wellencharakter dieser Strahlung gegenüber dem Teilchencharakter ihrer Photonen zurück. Die Wellenlänge hochfrequenter Röntgen- und Gammastrahlen lässt sich sogar überhaupt nicht unmittelbar durch einen Interferenzversuch bestimmen, denn es gibt keine Kristallgitter, die fein genug sind, um mit ihnen

Interferenzaufnahmen zu machen. Auf ihre Wellenlänge muss man aus der Energie der zugehörigen Photonen schließen.

Das Übergangsgebiet zwischen den beiden Extremen liegt etwa im sichtbaren Frequenzbereich. Deshalb lassen sich in diesem Bereich sowohl Experimente durchführen, die den Wellencharakter des Lichts zeigen, wie auch solche, die den Teilchencharakter der Photonen offenbaren.

Bei der Betrachtung der elektromagnetischen Strahlung machen wir von drei verschiedenen Modellvorstellungen Gebrauch, die sich gegenseitig nicht ausschließen, sondern ergänzen. Zur Beschreibung der Ausbreitung der Strahlung benutzen wir zunächst das Modell des Strahlenbündels. Bei der Überlagerung mehrerer gleichfrequenter Strahlenbündel ist es notwendig, zum Wellenmodell überzugehen. Zum Photonenmodell hat uns schließlich die Untersuchung der Wechselwirkung von Strahlungsenergie mit Materie geführt. Es trägt der Tatsache Rechnung, dass elektromagnetischen Strahlungsenergie nur in Quanten der Energie $h \cdot f$ mit Materie in Wechselwirkung tritt.