

1.1.3 Masse und Impuls von Photonen

Ein Lichtquant hat beim Zusammentreffen mit einem Elektron (bzw. allgemein mit Materie im atomaren Bereich) Teilchencharakter, d.h. in ihm ist auf engstem Raum die Energie $E_{\text{ph}} = h \cdot f$ konzentriert.

Da sich Photonen stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, können sie nach den Gesetzen der Relativitätstheorie **keine Ruhemasse** und damit auch keine Ruheenergie haben; die Formel für die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse (FS S. 11) ist für sie nicht anwendbar.

Als bewegten Teilchen kann man ihnen aber gemäß der EINSTEINSchen Äquivalenz von Masse und Energie sowohl eine Masse als auch einen Impuls zuordnen (vgl. FS S. 34):

$$\begin{aligned} E_{\text{ph}} &= m_{\text{ph}} \cdot c^2 \stackrel{!}{=} h \cdot f \Rightarrow m_{\text{ph}} = \frac{h \cdot f}{c^2} \left(= \frac{E_{\text{ph}}}{c^2} \right) && \text{Photonenmasse} \\ p_{\text{ph}} &= m_{\text{ph}} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} \left(= \frac{E_{\text{ph}}}{c} \right) \Rightarrow p_{\text{ph}} = \frac{h}{\lambda} && \text{Photonenimpuls} \end{aligned}$$

Beispiele:

- $f = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (grünes Licht) $\Rightarrow m_{\text{ph}} = \dots = 4,0 \cdot 10^{-36} \text{ kg} \approx \frac{1}{229.000} \cdot m_e$
- $f = 3,0 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$ (harte Röntgenstrahlung) $\Rightarrow m_{\text{ph}} = \dots = 2,2 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \approx 24 \cdot m_e$

Aus der Masse der Photonen folgt wiederum ihre Ablenkbarkeit durch ein starkes Gravitationsfeld, z.B. das unserer Sonne. Dies wurde nach einer Vorhersage durch A. Einstein 1919 bei einer Sonnenfinsternis erstmals experimentell bestätigt.

Der Impuls der Photonen kann beispielsweise durch den sog. Strahlungsdruck nachgewiesen werden, wenn man einen Lichtblitz, z.B. erzeugt durch einen Laser, so auf einen geeigneten, an einem Faden aufgehängten Spiegel schickt, dass er dort reflektiert wird. Dabei wird der (leichte) Spiegel spürbar ausgelenkt (vgl. Buch S. 17).

Auch für Photonen gilt als Zusammenhang zwischen Masse und Impuls die in der Relativistik generell gültige

Relativistische Energie-Impuls-Beziehung:

$$E^2 = c^2 p^2 + E_0^2$$

Zusammenfassung:

Interferenz- und Beugungsversuche führen zum **Wellenmodell** des Lichts.

Der lichtelektrische Effekt und eine Reihe anderer Vorgänge können nur mit dem **Photonenmodell** befriedigend erklärt werden.

Das Licht hat also eine Doppelnatur; man spricht vom **Dualismus** des Lichts.

Dieser Gegensatz zeigt deutlich die **Problematik makroskopischer Modelle im atomaren Bereich** und wurde schließlich in umfassenden Quantentheorien mathematisch aufgelöst.

MAX BORN konnte durch eine statistische Betrachtung des Photonmodells den Dualismus des Lichts erklären:

Die Photonendichte (als Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem Raumpunkt P) ist demnach direkt proportional zum Amplitudenquadrat der elektromagnetischen Welle in P. Die in einem Lichtstrahl vorhandenen Photonen sind also nicht gleichmäßig verteilt, sondern treten dort verstärkt auf, wo das Quadrat der Wellenamplitude groß ist. Die Welle hat damit sozusagen die Eigenschaft einer Führungswelle.

Je mehr Photonen an einem Vorgang beteiligt sind, umso besser stimmt das durch die statistische Verteilung erzeugte Bild mit dem Wellenbild überein.

Je größer die Energie eines Photons ist, desto leichter kann es in einem Nachweisgerät als einzelnes Photon registriert werden. Deshalb tritt der korpuskulare Charakter der elektromagnetischen Strahlung umso mehr hervor, je größer die Frequenz ist. Das Übergangsgebiet liegt ungefähr im sichtbaren Frequenzbereich.