

Welle-Teilchen- Dualismus

Matthias Küster

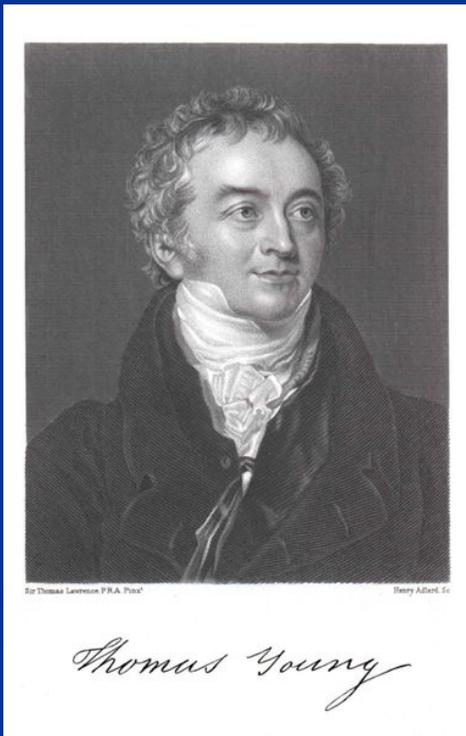
Gliederung

- Materie und Licht klassisch
- Energiequantelung von elm. Wellen
- Experimente zum „Nachweis“ von Photonen
- Materiewellen und experimenteller Nachweis
- Quantenmechanischer Formalismus

Klassische Betrachtungen von Licht und Materie

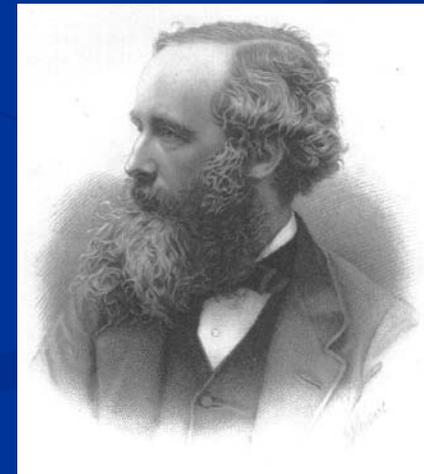
17. und 18. Jahrhundert:

Experimenteller Nachweis der Welleneigenschaften von Licht durch Interferenzexperimente durch Huygens und Young



1885

Formulierung der Elektrodynamik durch Maxwell



Materie

- Zustand eines Körpers ist durch Lagen und Geschwindigkeiten einer endlichen Zahl von Atomen und Elektronen bestimmt
- Energie des Körpers ist die Summe der Energien der Atome und Elektronen

Licht

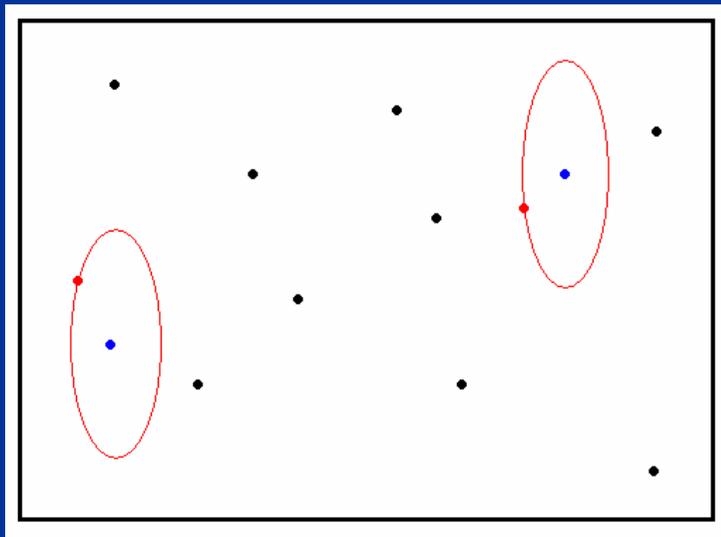
- Elektromagnetischer Zustand wird durch kontinuierliche Raumfunktionen beschrieben
- Energie ist kontinuierlich im Raum verteilt

$$\bar{E} = k_B \cdot T$$

Lichterzeugung und –verwandlung

- Thermodynamisches Gleichgewicht: Alle Moleküle und Elektronen besitzen die mittlere kinetische Energie

$$\bar{E} = k_B \cdot T$$



- Durch Abstrahlung bzw. Strahlungsaufnahme verliert bzw. gewinnt das Gas durch die Zusammenstöße Energie
- Die Resonatoren, die durch Strahlung miteinander in Wechselwirkung treten, müssen in allen Raumrichtungen die entsprechende mittlere Energie \bar{E} besitzen



- Rayleigh-Jeans:

$$w_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} k_B \cdot T$$

- Problem: UV-Katastrophe



- Planck: Die Resonatoren können nur diskrete Energieniveaus annehmen $\bar{E} = n \cdot h \cdot \nu$

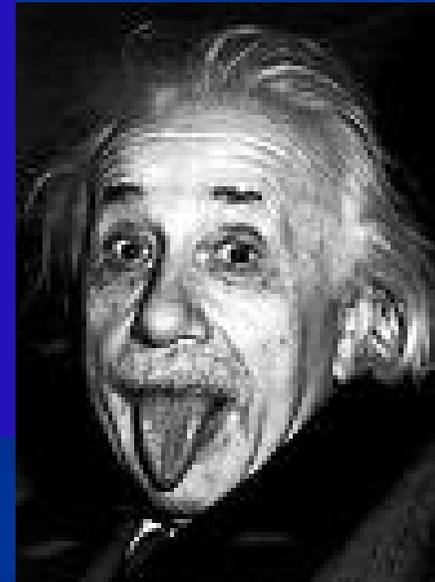
- Plancksche Strahlungsformel:

$$w_\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^3 \frac{h}{\exp(h \cdot \nu / k_B \cdot T) - 1}$$

Fazit:

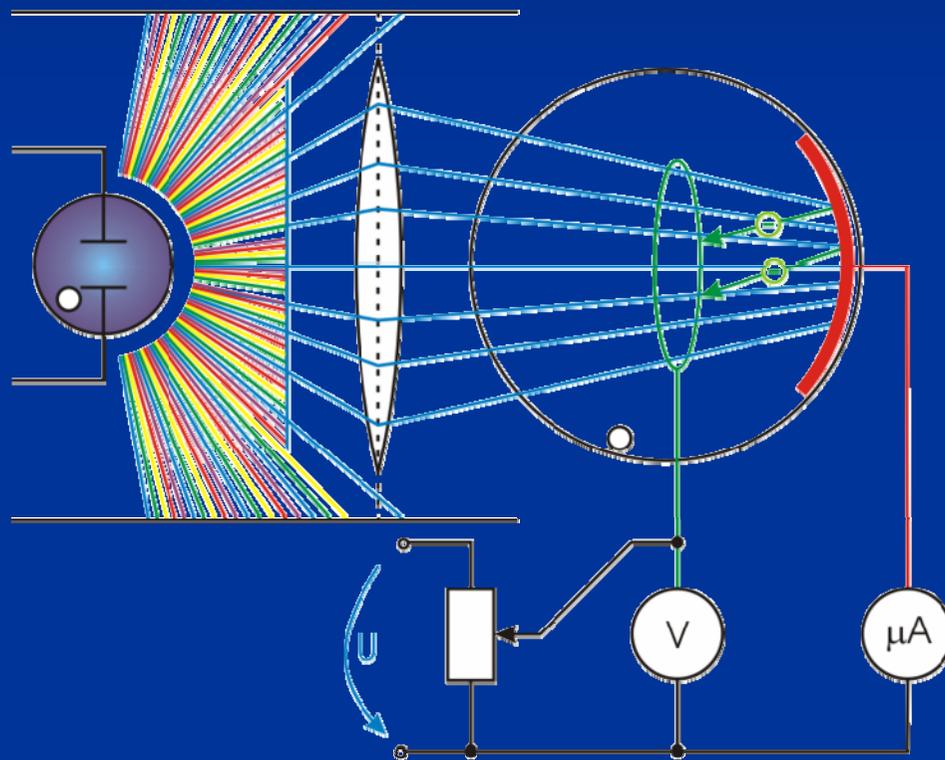
- Die Energie elm. Wellen wird durch diskontinuierliche Funktionen beschrieben

Licht könnte auch
aus derartigen
Energiequanten
bestehen!



Experimente zum Photonennachweis

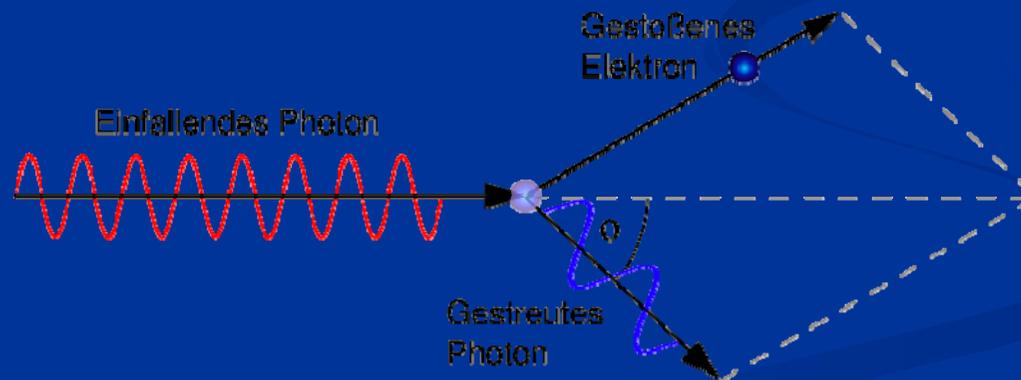
Der Photoeffekt:



- Photoeffekt tritt erst ab materialabhängiger Grenzfrequenz auf
- Die kinetische Energie ist linear zur Frequenz des Lichtes
- Oberhalb der Grenzfrequenz ist die Anzahl der Photoelektronen proportional zur Intensität
- Der Photoeffekt erfolgt ohne zeitliche Verzögerung

Der Comptoneffekt

- Röntgenstrahlen werden an einem Streukörper (z.B. Graphit) gestreut
- Ergebnis: Man erhält eine vom Streuwinkel abhängige Wellenlängenverschiebung (**Comptonverschiebung**)

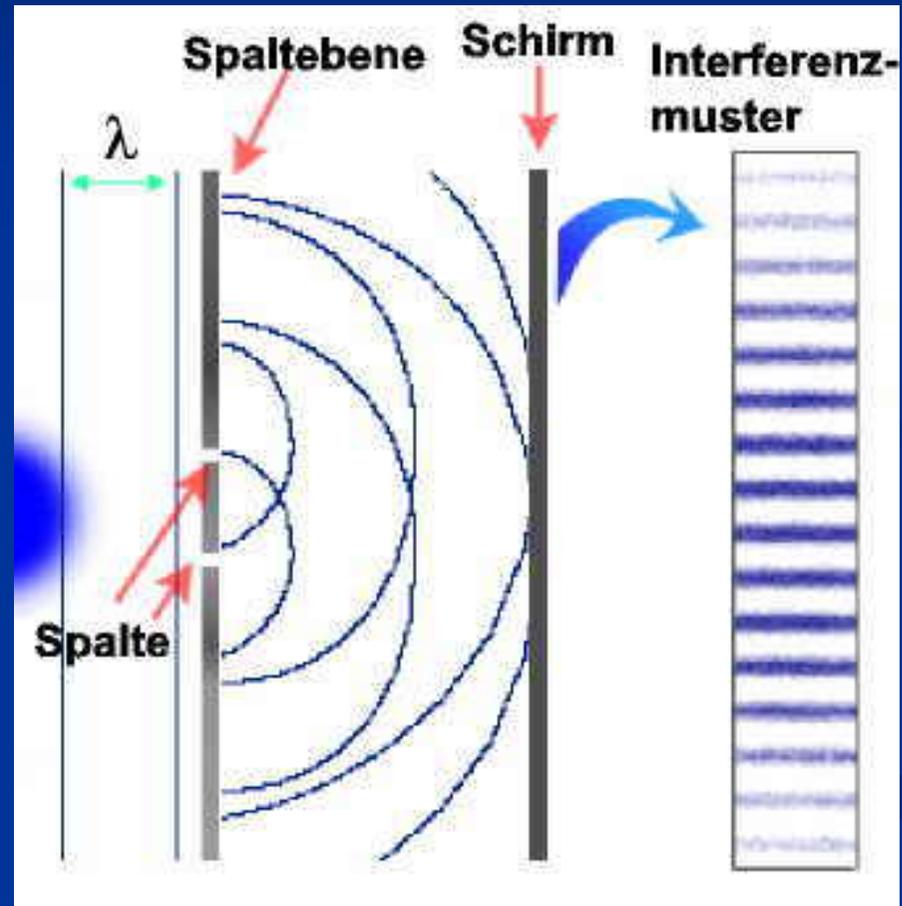


Gedankenexperiment

- Mischung von Interferenzexperiment und Photoeffekt

- Minimieren der Lichtintensität

→ Es werden lokal einzelne Elektronen emittiert

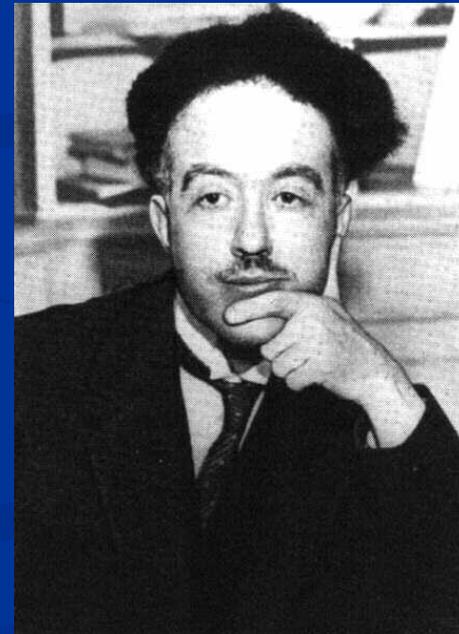


Materiewellen

- De Broglie: Wenn elm. Wellen Teilchencharakter haben, dann müssen auch Teilchen (Elektronen, Protonen oder auch Atome) Welleneigenschaften besitzen (1924)

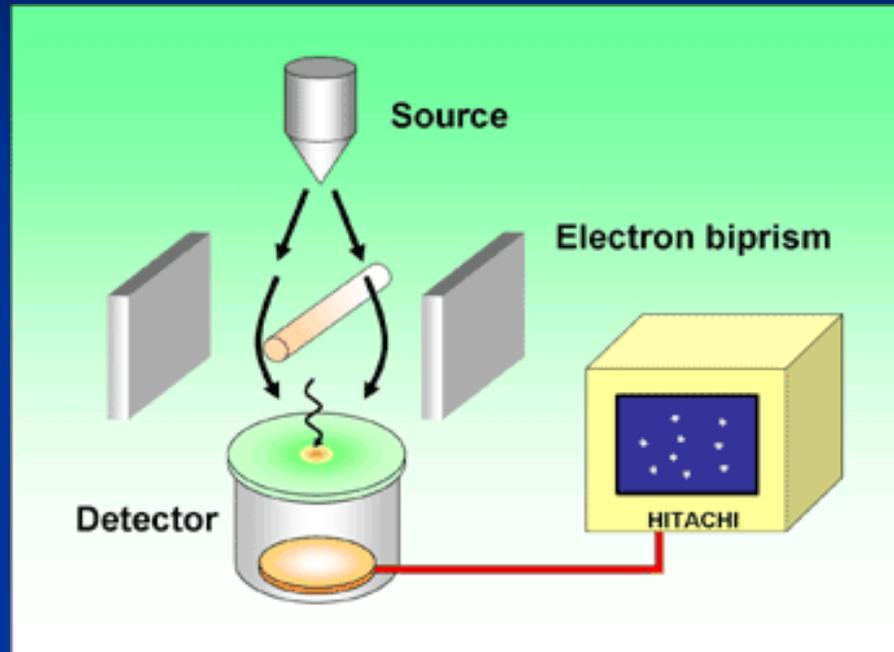
- Für Licht: $\vec{p} = \hbar \cdot \vec{k}$

- Für Materie: $\lambda_{dB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$



Möllenstedt-Versuch

- Aufbau:



- Man erhält wie bei der Lichtbeugung ein Interferenzmuster

Quantenmechanischer Formalismus

- Die Trajektorie eines Teilchens wird als Superposition ebener Wellen dargestellt

$$\psi(\vec{r}, t) = \iiint d^3 \vec{p} f(\vec{p}) \exp \left[i\hbar^{-1} (\vec{p} \cdot \vec{r} - E \cdot t) \right]$$

- Die Schrödingergleichung ist die Bewegungsgleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}, t)$$

- Interpretation der Materiewelle: $|\psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ ist die Wahrscheinlichkeit das Teilchen in dem infinitesimalen Volumenelement dV vorzufinden

Zusammenfassung

- Die Energie von Materie und Licht wird durch diskrete Raumfunktionen beschrieben
- Materie und Licht besitzen sowohl Wellen-, als auch Teilcheneigenschaften, man kann Materie eine Wellenlänge zuordnen, und Photonen eine (bewegte) Masse
- Betrachtet man die Wellenfunktion eines Teilchens, so können nur noch Aussagen über die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem Ort anzutreffen, getroffen werden

**Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit**