Karlsruhe Institute of Technology

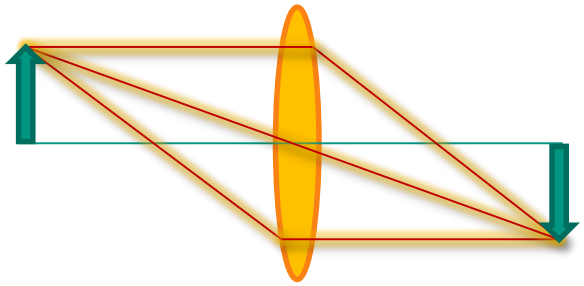
Atomphysik
3.2 Quanteneigenschaften des Lichts

Prof. David Hunger

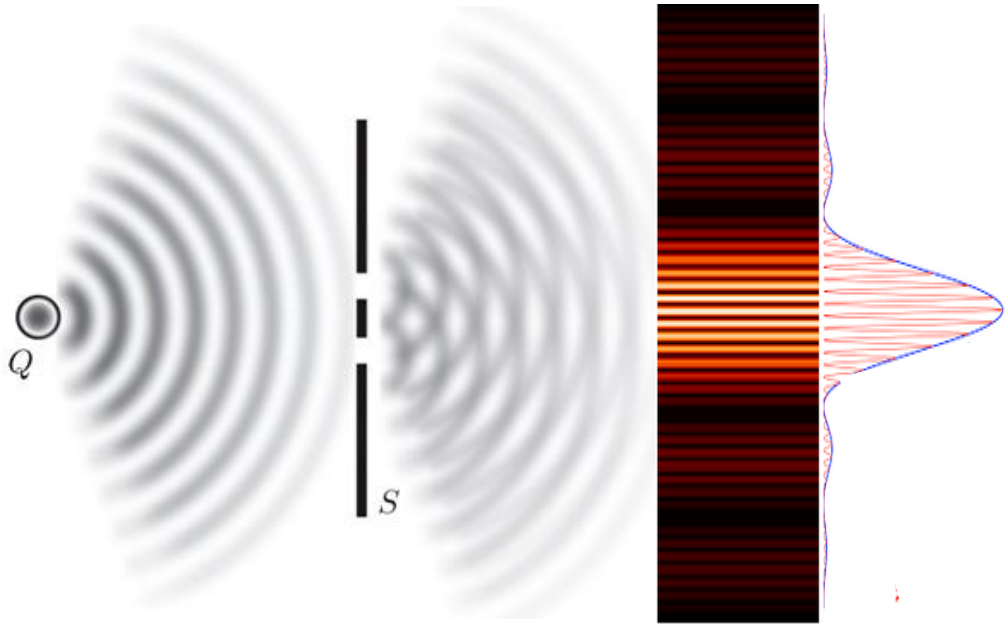
Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

Welle oder Teilchen?

- Christiaan Huygens (1629-1695): Wellenoptik
- Isaac Newton (1643 – 1727): Korpuskel
  beide Theorien erklären geometrische Optik



- Thomas Young (1802): Doppelspalt Experiment



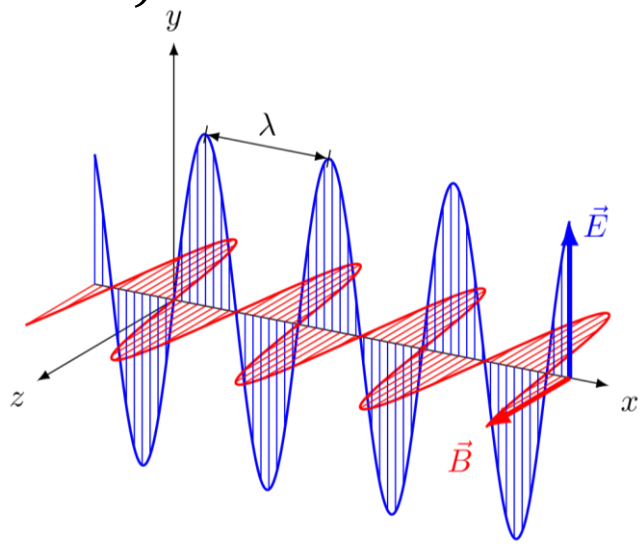
Wikipedia

Elektromagnetische Wellen

- James C. Maxwell (1861)

Licht als elektromagnetische Welle

Elektrisches Feld	$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{A}\cos(\omega t - \boldsymbol{kr})$
Intensität	$I = c\epsilon_0 E^2$
Energiedichte	$w = \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0(E^2 + c^2 B^2)$
Impulsdichte	$\boldsymbol{\pi} = \epsilon_0(\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B})$



Wärmestrahlung

Schwarzer Körper:

Hohlraum mit perfekt absorbierenden Wänden

- im thermischen Gleichgewicht: Absorption = Emission

$$\frac{dW_A(\nu)}{dt} = \frac{dW_E(\nu)}{dt}$$

- Randbedingung im Hohlraum: Stehwellen / Moden
- Anzahl Moden pro Frequenzintervall $d\nu$

spektrale Modendichte $\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}d\nu$

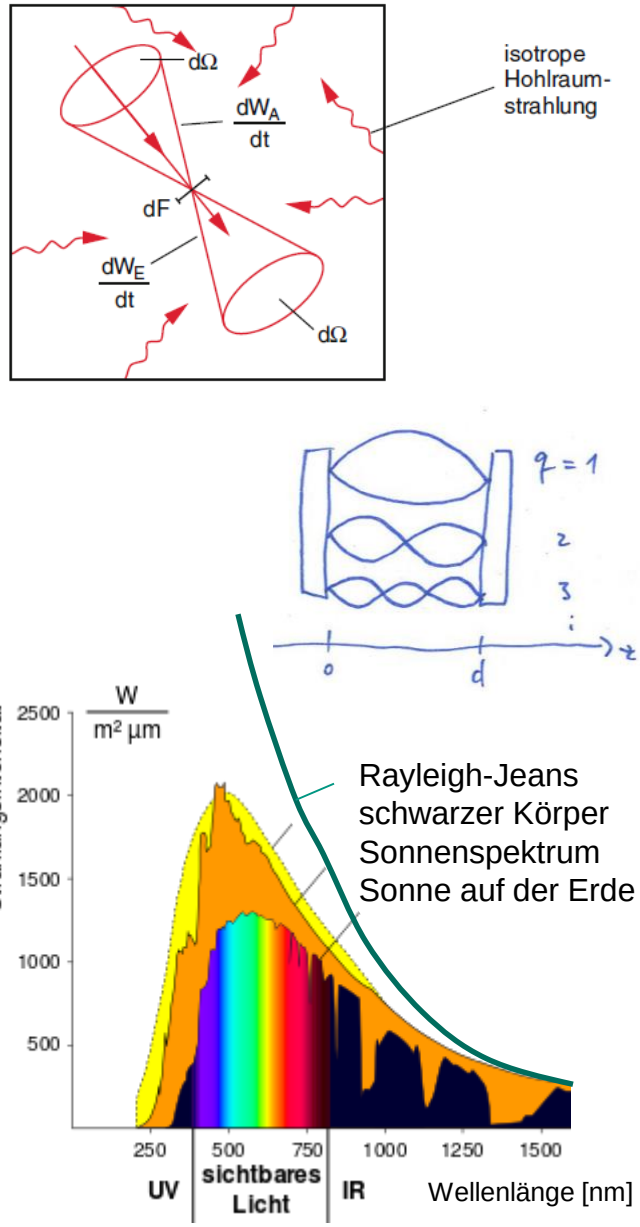
Energiedichte $w(\nu)d\nu = \rho(\nu)\,\bar{W}(T)d\nu$

- mit mittlerer Energie pro Eigenschwingung $\bar{W}(T)$
- klassische thermische Besetzung $\bar{W}(T) = k_B T$

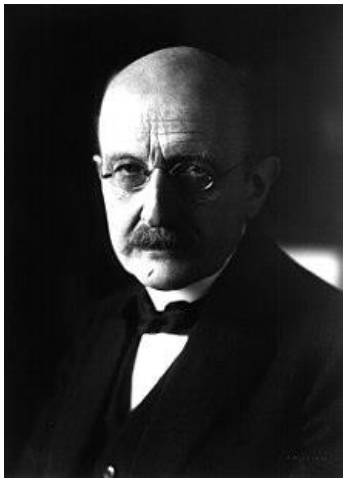
Rayleigh-Jeans Strahlungsgesetz $S(\nu) = \frac{2\nu^2}{c^2}k_B T$

- gute Übereinstimmung bei niedriger Frequenz
- Ultraviolett-Katastrophe:

  Strahlungsdichte divergiert mit $\nu \to \infty$



Planck‘sches Strahlungsgesetz



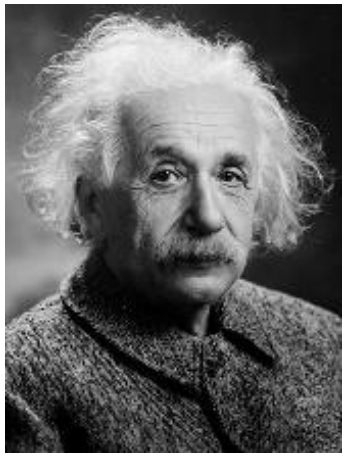
Quantenhypothese (1900)

Jeder Oszillator kann Energie nur in bestimmten Energiequanten aufnehmen und abgeben

$$E = h\nu$$

$h = 6.63 \times 10^{-34} Js$ Planck‘sches Wirkungsquantum

Einstein (1905): Energiequanten des elektromagnetischen Feldes – **Photonen**



- Energie einer Mode mit *n* Photonen: $W_\nu = nh\nu$
- Thermisches Gleichgewicht: Besetzungswahrscheinlichkeit gemäß Boltzmannverteilung

$$p(n) \sim e^{-W/k_B T}$$

- mit Normierung $\sum p(n) = 1$

$$p(n) = \frac{e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}}}{\sum_n e^{-nh\nu/k_B T}}$$

Planck‘sches Strahlungsgesetz

Mittlere Energie pro Eigenschwingung

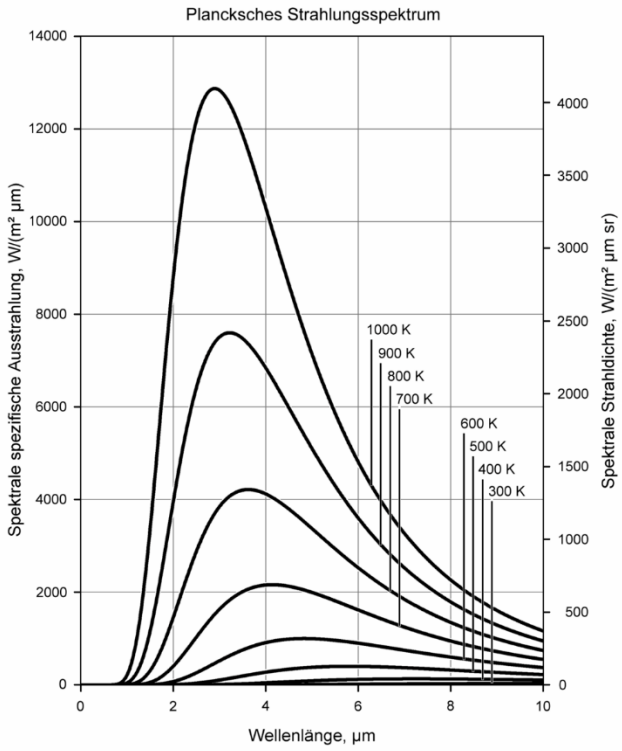
$$\bar{W} = \sum_n nh\nu\, p(n) = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T}-1}$$

- spektrale Energiedichte $w(\nu, T) = \rho(\nu)\bar{W}(\nu, T)$

Planck‘sche Strahlungsformel

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

- stimmt für kleine Frequenzen mit Rayleigh-Jeans Gesetz



- Wien‘sches Verschiebungsgesetz
- Stefan Boltzmann Gesetz

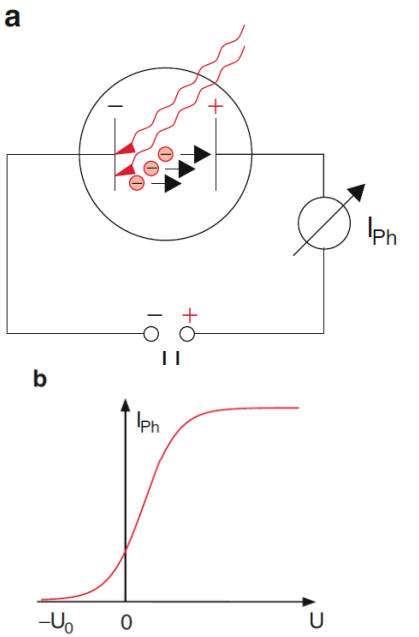
$$\lambda_{max} T = const.$$
$$P_{ges} = \int_\nu S_\nu d\nu = \sigma_B T^4$$

Photoelektrischer Effekt

- Hertz (1887), Hallwachs (1895): Bestrahlung einer negativ geladenen Metallplatte mit UV Licht führt zu Entladung

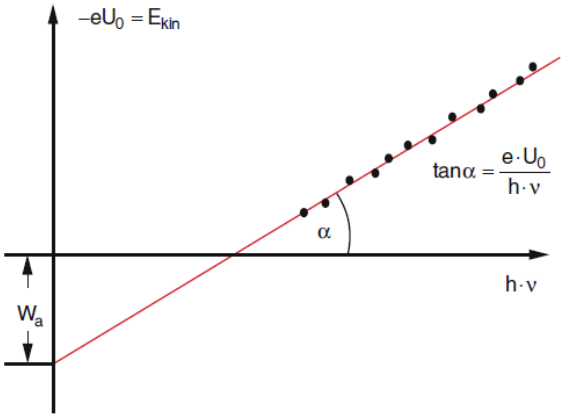
  → Licht-induzierte Elektronenemission
- endliche Gegenspannung: Photoelektronen brauchen Mindestenergie

  $$E_{kin} > e\mathrm{U}_0$$
- E_{kin} hängt nur von Frequenz des Lichts ab, nicht von Intensität I
- Zahl der Photoelektronen $N_e \sim I$
- Keine messbare Verzögerung



- Einstein (1905): **Lichtquanten Modell**: Jedes Photon gibt seine Energie an ***ein*** Elektron ab
- für $h\nu > W_a$ wird Elektron ausgelöst

$$E_{kin}^{max} = h\nu - W_a \qquad \text{mit Austrittsarbeit } W_a$$

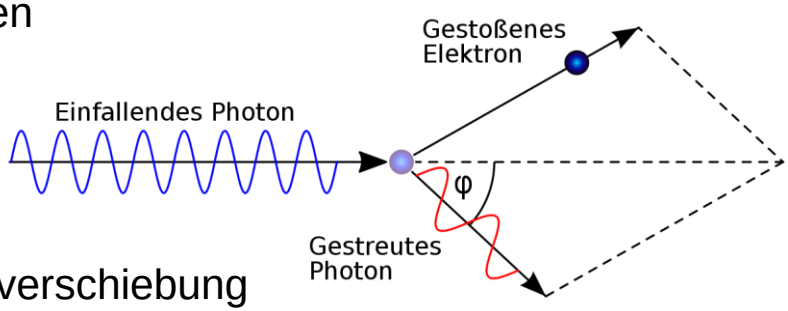


Nobelpreis 1921 für Einstein

Compton Effekt

Arthur Compton (1927)

Streuung von Lichtwellen an (quasi) freien Elektronen



- elastischer Stoß zwischen Photon und Elektron
- gestreutes Licht hat größere Wellenlänge
- Relativitätstheorie: Impuls $p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \hbar k$
- aus Energie und Impulserhaltung: Wellenlängenverschiebung

$$\Delta\lambda = \lambda_C(1 - \cos\phi)$$

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$$

Compton Wellenlänge = Wellenlängenverschiebung bei 90° Ablenkung

hängt nur vom streuenden Teilchen ab

- Elektron: $\lambda_C = 2.4 \times 10^{-12}$m
- Proton: $\lambda_C = 1.3 \times 10^{-15}$m
- Wellenlängenänderung unabhängig von Einfallswellenlänge
- Änderung sehr klein -> nur bei hohen Photonenergien (kleinen Einfallswellenlängen) messbar

Eigenschaften des Photons

- Intensität und el. Feld vs. Photonenzahl

$$I = \frac{N}{V} c\, h\nu = \epsilon_0 c\, E^2 \quad \rightarrow E = \sqrt{\frac{h\nu}{\epsilon_0}\frac{N}{V}} \propto \sqrt{N}$$

- Photonenenergie

$$E = h\nu$$

- Photonenimpuls

$$p = \frac{h\nu}{c} = \hbar k$$

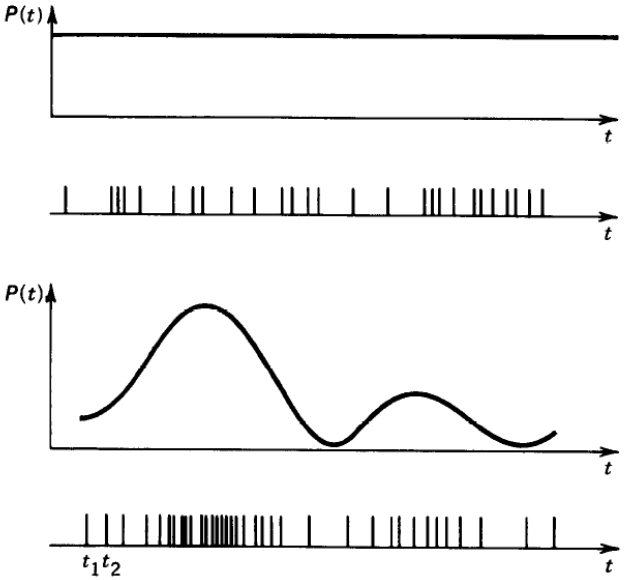
- Photonenmasse gemäß $E = mc^2$

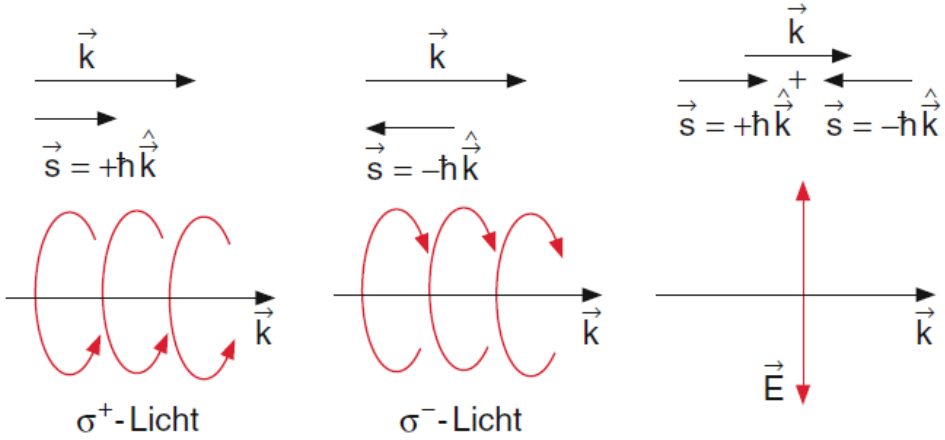
$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

- Drehimpuls: Bei Absorption von Photonen wird Drehimpuls übertragen

$$S = \pm\hbar \cdot \vec{k}/|\vec{k}|$$

Photonenspin

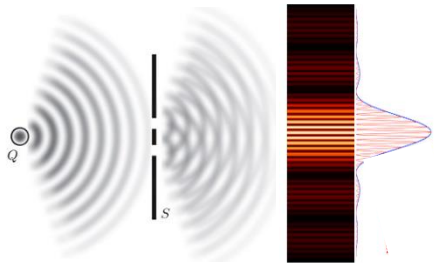




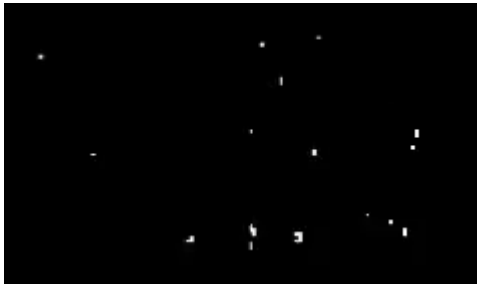
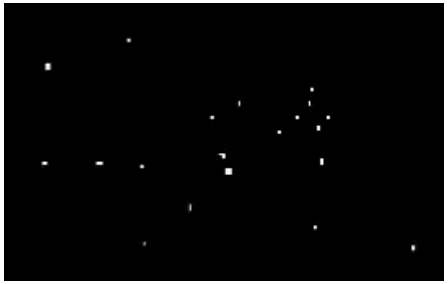
Welle-Teilchen Dualismus beim Photon

Young‘sches Doppelspaltexperiment mit Einhelphotonen

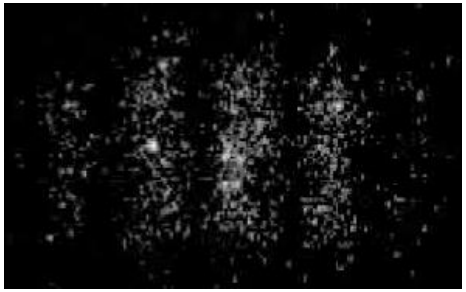
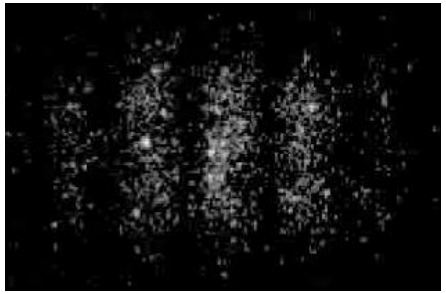
- Lichtquelle mit <1 Photon gleichzeitig im Aufbau



2. Einzelbilder

3. Überlagerte Bilder

Doppelspaltmuster als Häufigkeitsverteilung der Auftrefforte der Photonen