

# 1.2. Photonen / Photo Effekt



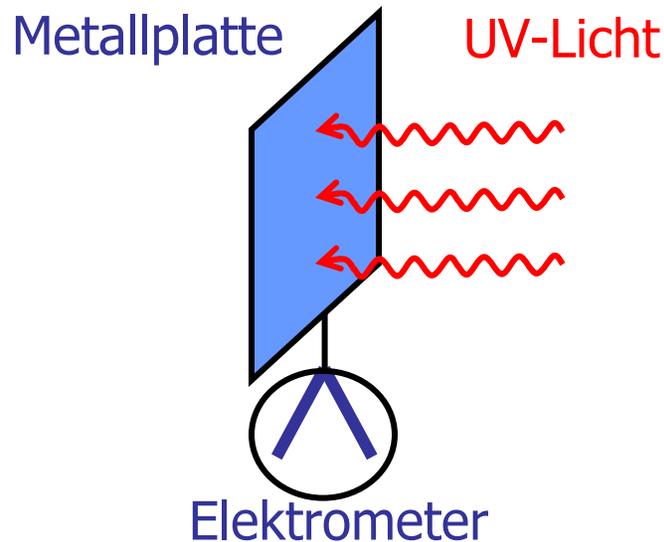
Newton, Descartes: **Korpuskeltheorie des Lichtes** → nicht erfolgreich

Huygens, Fresnel, Hertz, Maxwell: **Wellentheorie** → erfolgreich

Moderne Beobachtung: Das UV-Licht eines Lichtbogens führt zur sofortigen Zündung einer anderen Funkenstrecke;

→ „Photonen“ (**Licht-Korpuskel**) schlagen Elektronen aus Elektrode

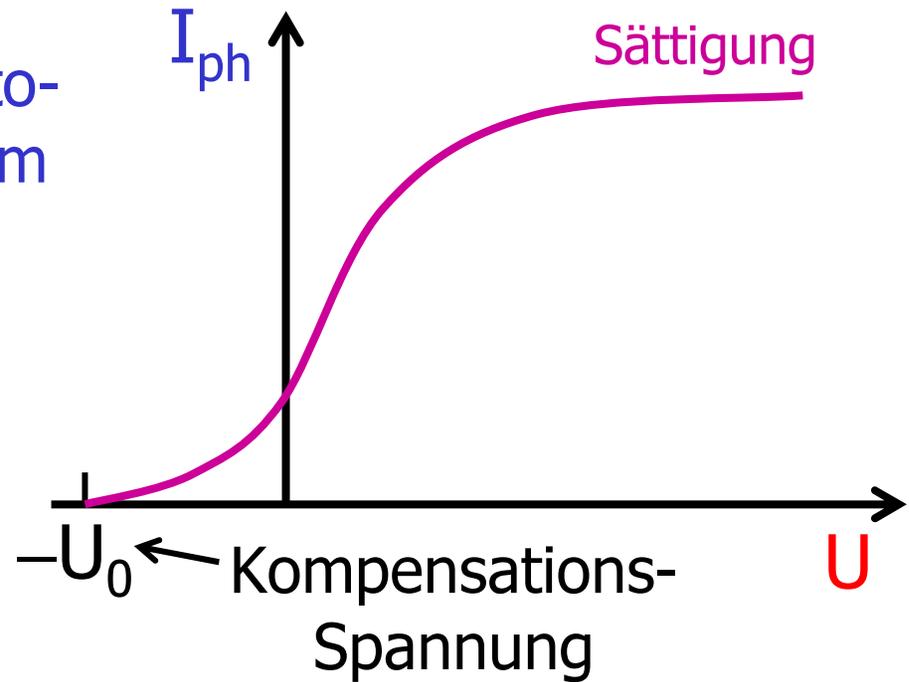
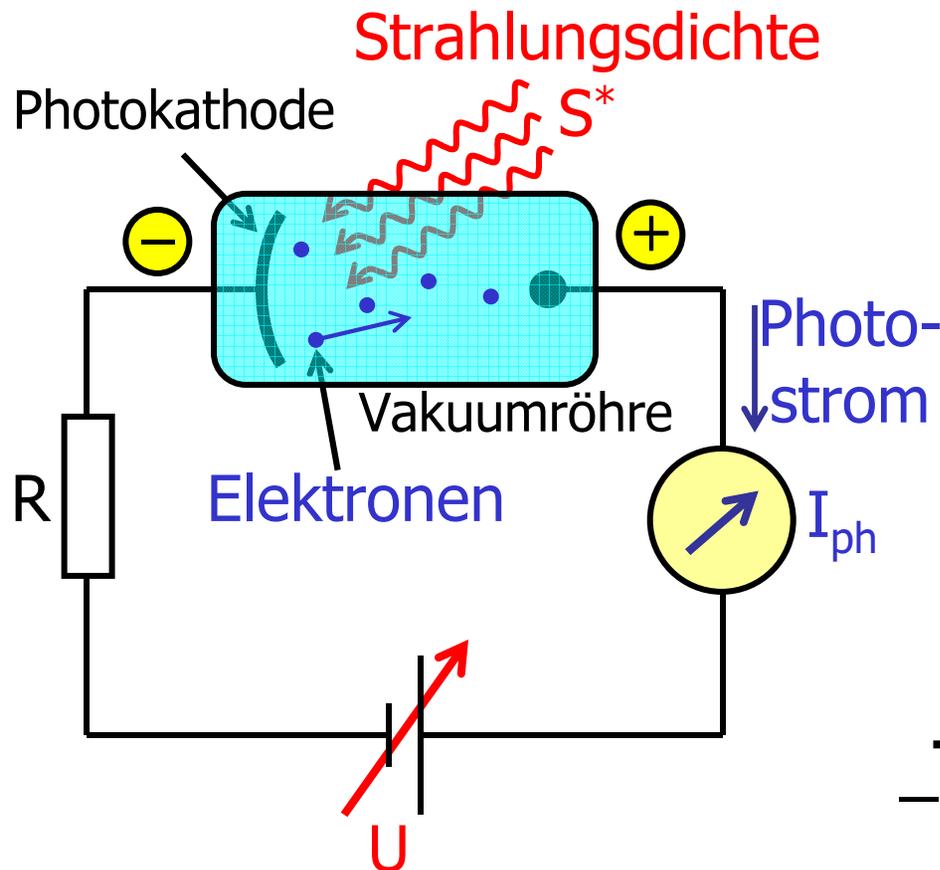
Experiment von Hallwachs (1887):



Plattenladung	Beobachtung
negativ	Entladung
positiv	keine Entladung
neutral	positive Aufladung bis zum „Haltepotential“

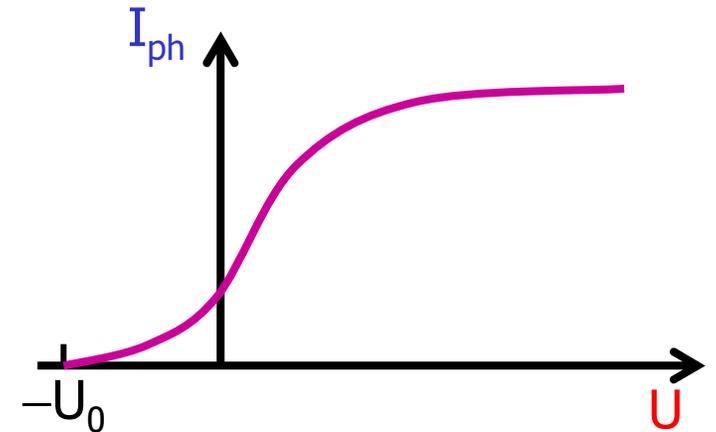
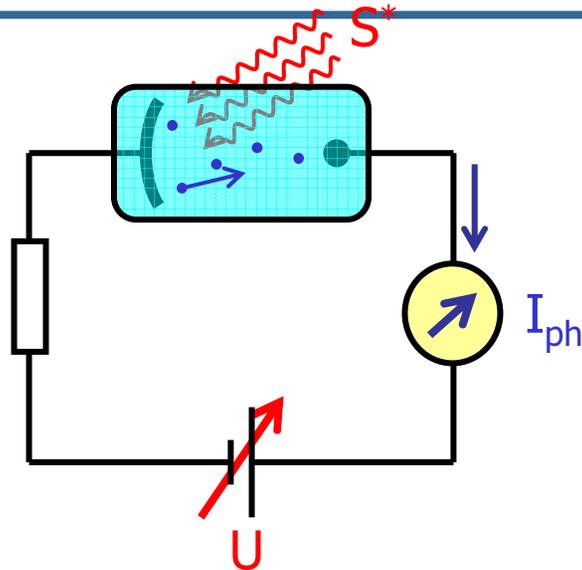
# 1.2.1 Photo Effekt

Die Photozelle (Lenard, 1902)



# 1.2.1 Photo Effekt

Befunde:



Wellenbild

Korpuskelbild

a)  $S^* \nearrow \Rightarrow I_{ph} \nearrow$



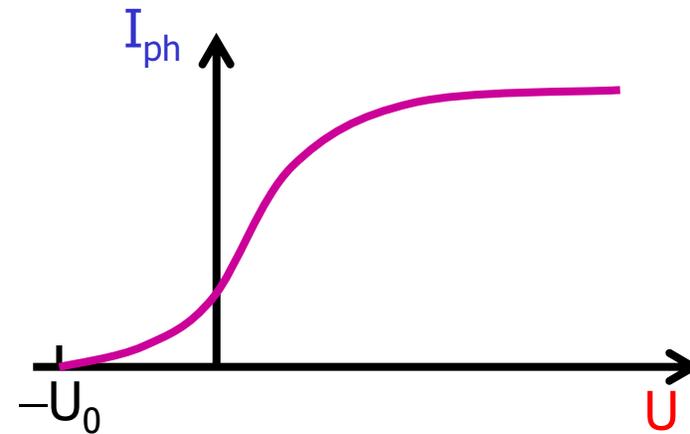
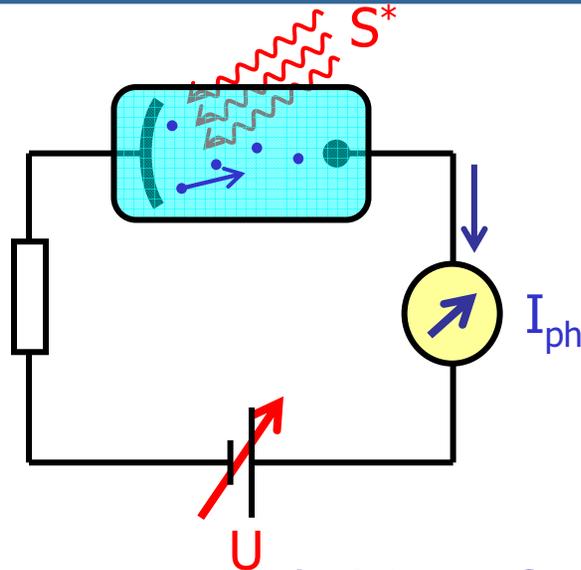
b) Sättigungsstrom unabhängig von U  
sobald Raumladungseffekte klein



c)  $eU_0 = \text{max. kinetische Energie}$   
ausgelöster Elektronen  
→ abhängig von  $\nu$ , nicht aber von  $S^*$



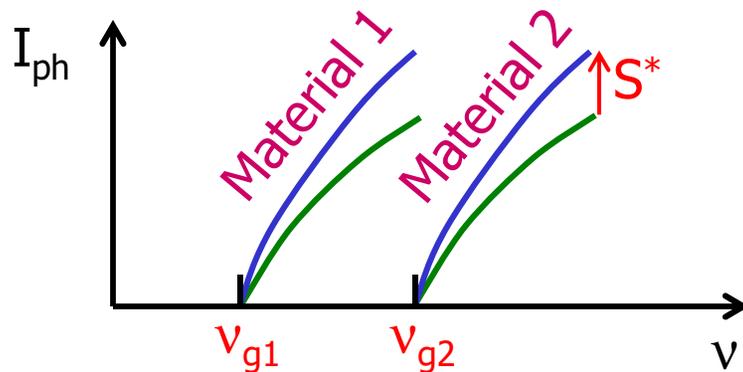
# 1.2.1 Photo Effekt



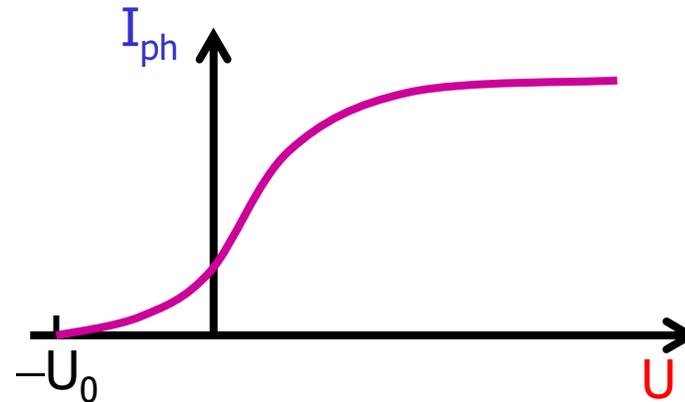
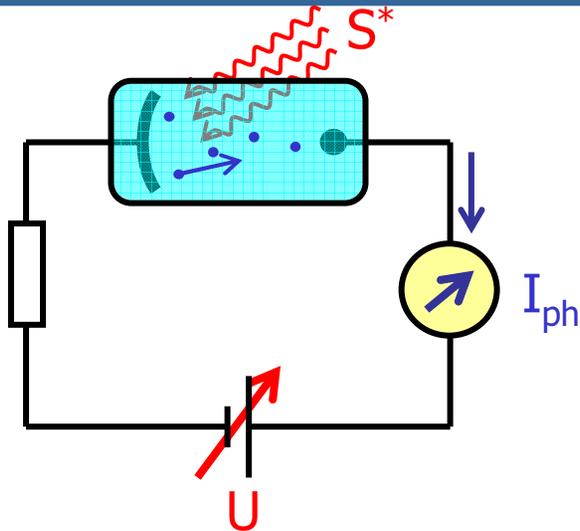
d) Photostrom setzt bei Grenzfrequenz  $\nu_g$  ein.  $\nu_g$  hängt vom Kathodenmaterial ab.

Wellenbild

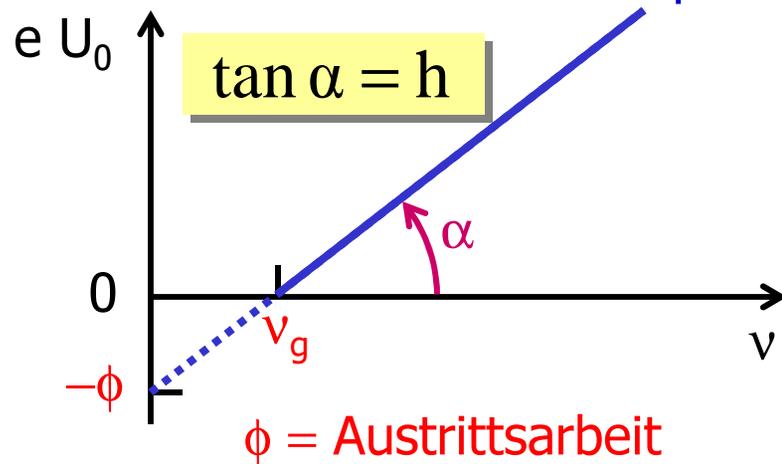
Korpuskelbild



# 1.2.1 Photo Effekt



e) Die Gegenspannung hängt charakteristisch von der Frequenz ab.

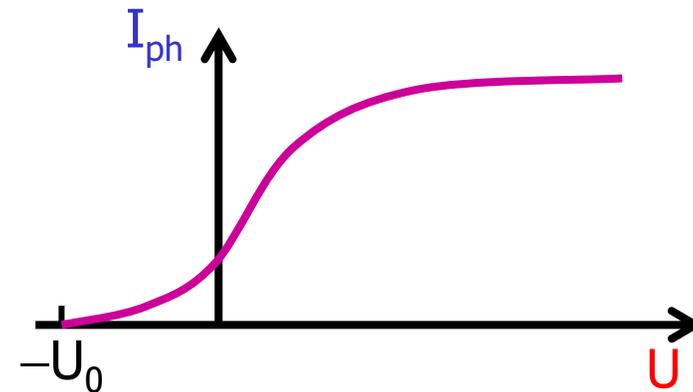
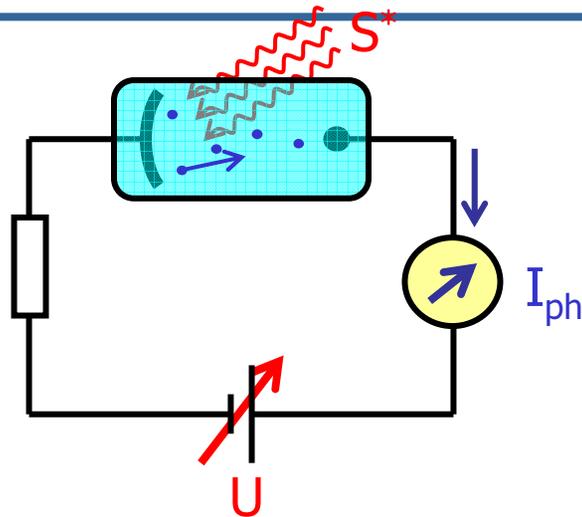


Wellenbild

Korpuskelbild



# 1.2.1 Photo Effekt



f) Zwischen Lichteinfall und Photostrom gibt es keine messbare Verzögerung

Wellenbild

Korpuskelbild



Beispiel: Austrittsarbeit aus Kathode  
Hohe Bestrahlungsintensität  
Elektronendichte  
Zeitverzögerung (Wellenbild)

$$\phi \approx 2 \text{ eV} \approx 3 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

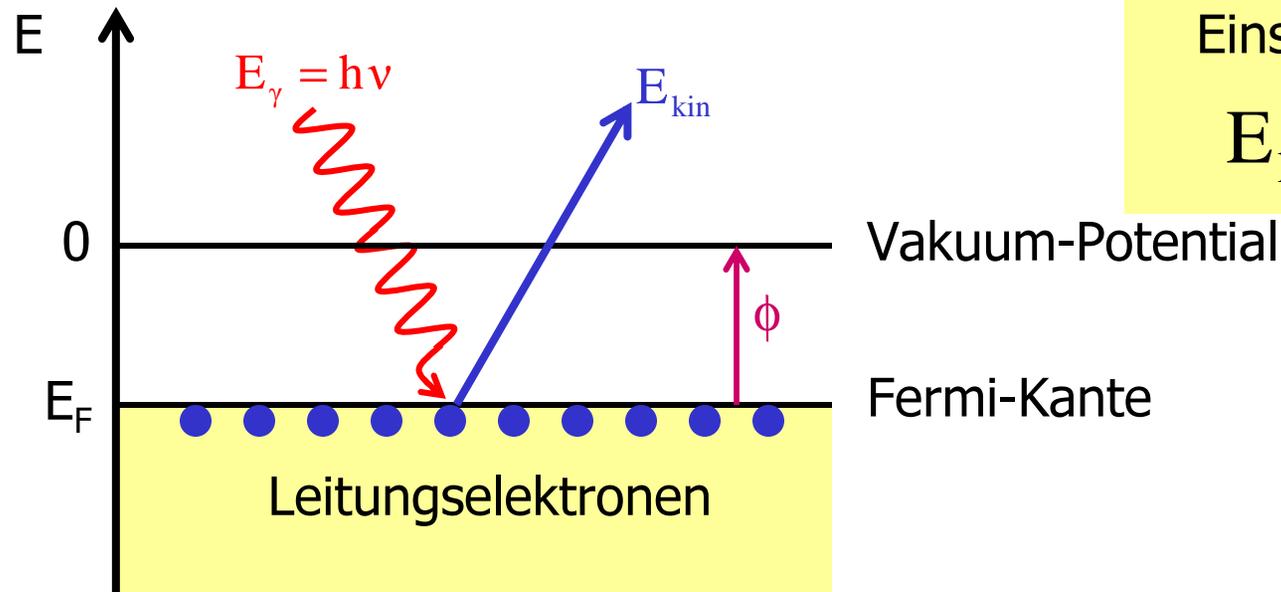
$$I \approx 1 \text{ mW/cm}^2$$

$$n \approx 10^{15} / \text{cm}^2$$

$$\Delta t > 100 \text{ ms}$$

# 1.2.1 Photo Effekt

Hypothese (Einstein, 1905; Nobelpreis 1912): Licht ist in Photonen der Energie  $h\nu$  quantisiert. Diese Quantisierung ist fundamental und hängt nicht mit der Quantisierung harmonischer Oszillatoren zusammen, wie bei der Planckschen Erklärung der Hohlraumstrahlung.



Einstein-Gleichung

$$E_{\text{kin}} = h\nu - \phi$$

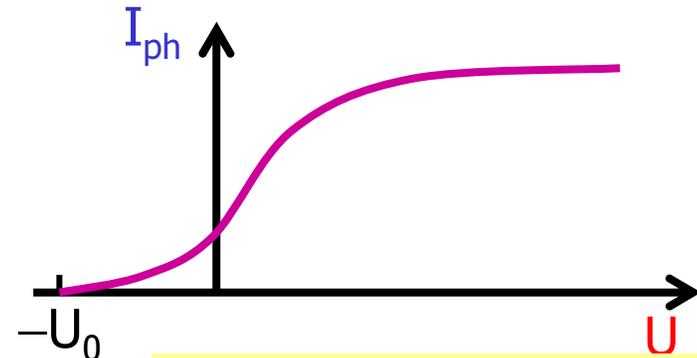
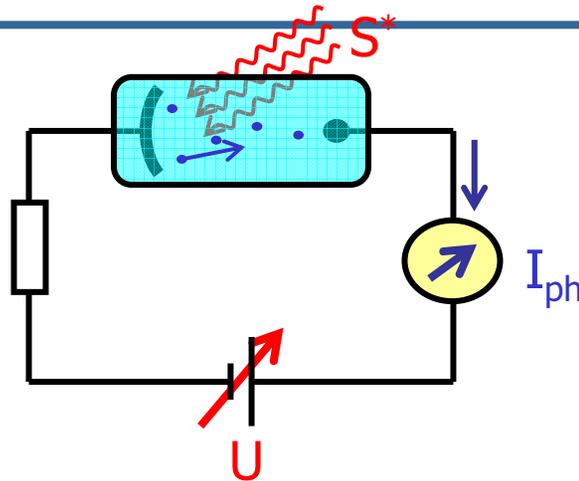
Grenzfrequenz:

$$\nu_g = \frac{\phi}{h}$$

Grenzwellenlänge:

$$\lambda_g = \frac{hc}{\phi}$$

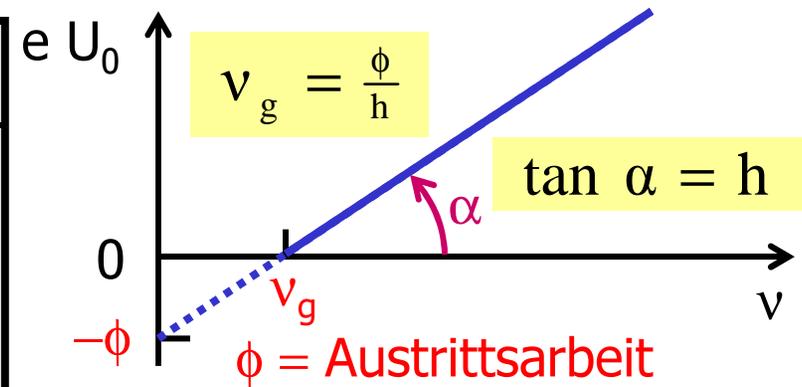
# 1.2.1 Photo Effekt



$$eU_0 = E_{\text{kin}} = h\nu - \phi$$

Messung von  $U_0$  als Funktion von  $\nu \Rightarrow h, \phi$

Oberfläche	$\phi$ [eV]	$\lambda_g$ [nm]	
Au	5,3	234	UV
Nb	4,3	288	UV
Cs	2,14	579	Visible
Ta / Cs	1,3	954	Near IR

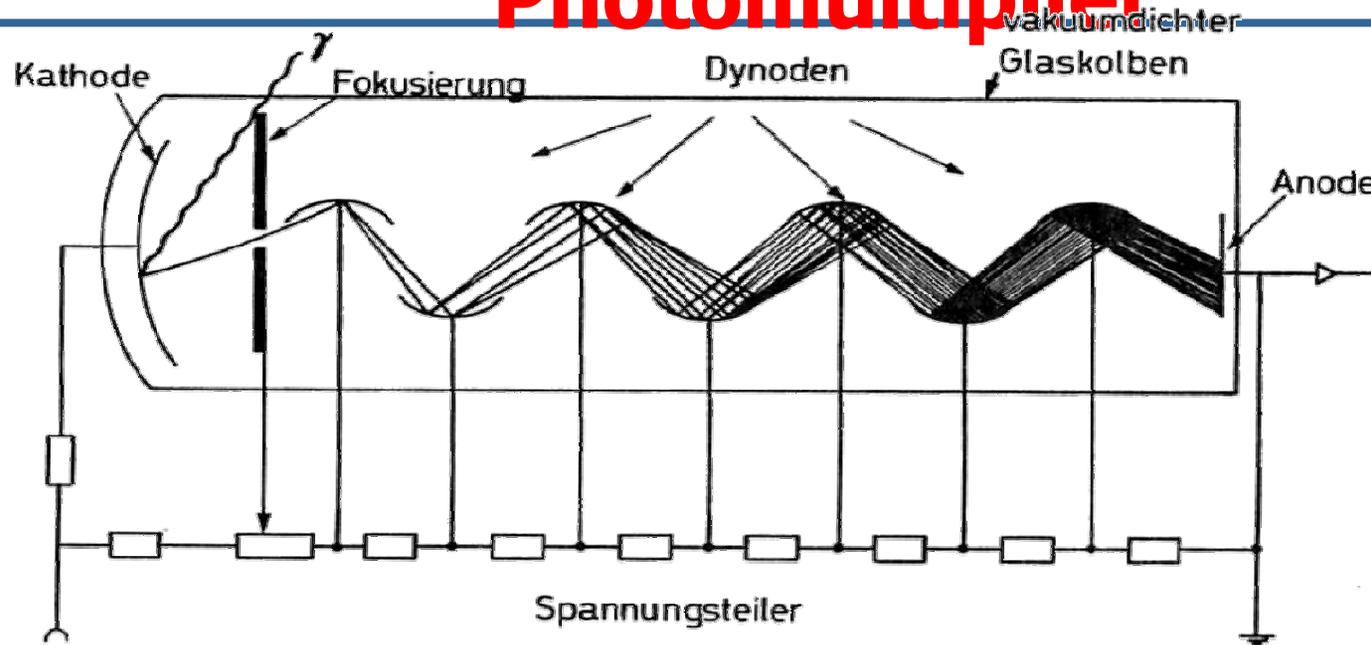


$$\lambda_g = \frac{hc}{\phi} = \frac{1240 \text{ nm}}{\phi [\text{eV}]}$$

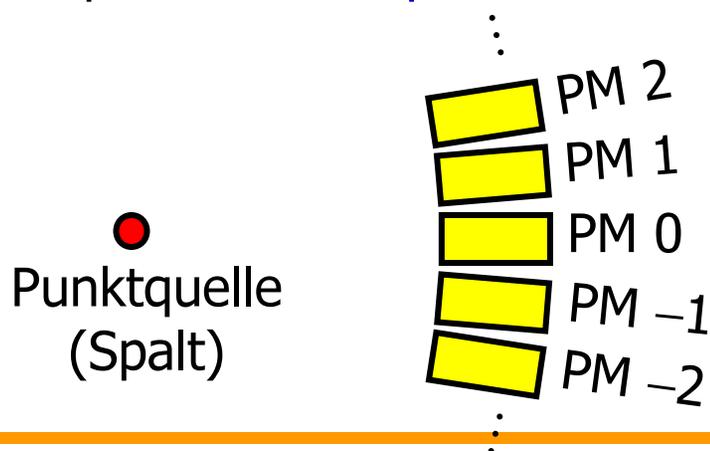
Anwendung: Cs-aktivierte Photokathoden

Quanteneffizienz typisch 25 %

# 1.2.1 Anwendung: Photomultiplier



Experiment: **Korpuskelnatur des Lichts**



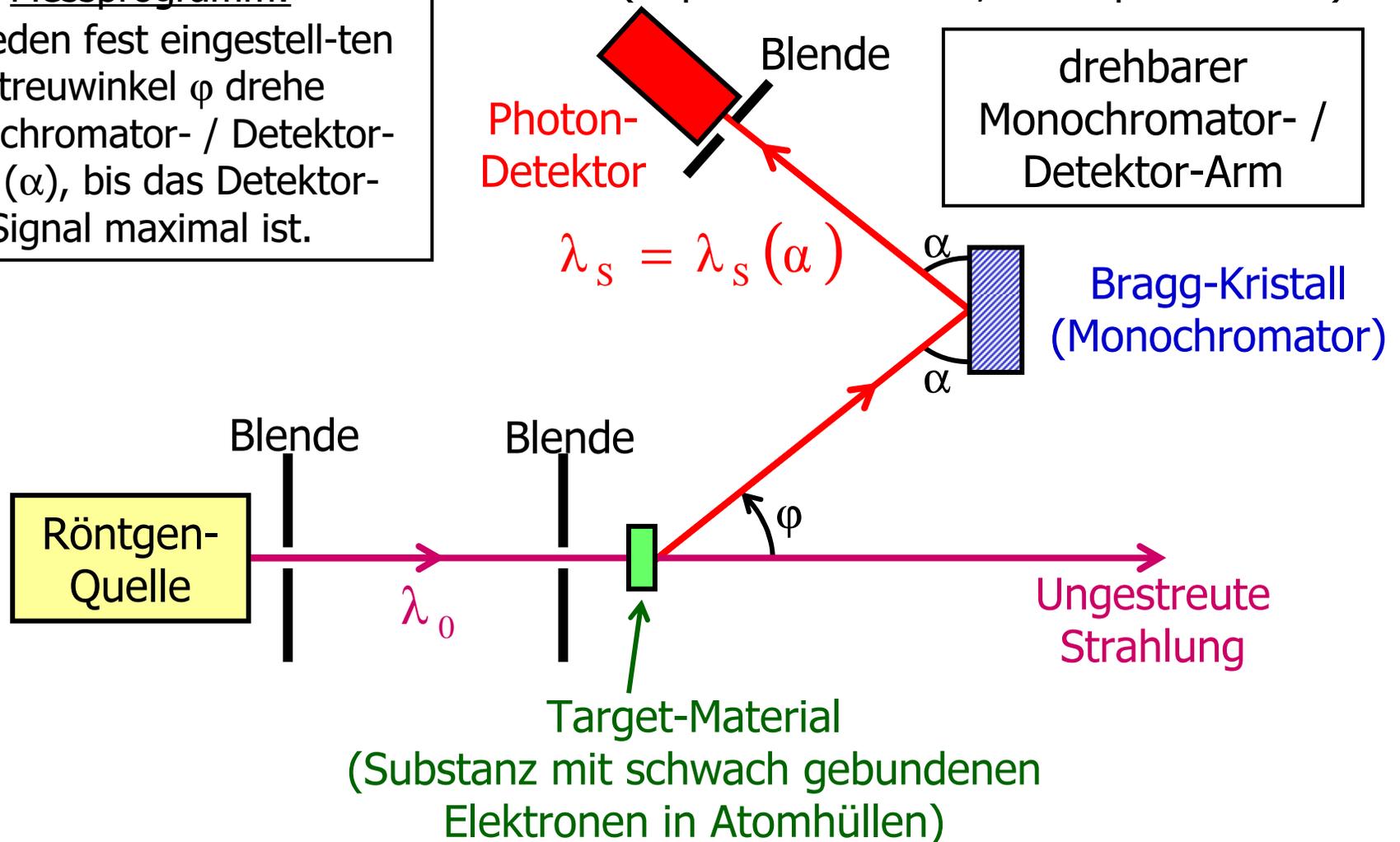
- Hohe Intensität ⇒ **kontinuierlicher** Photostrom in allen PMs
- Kleine Intensität ⇒ **statistisch verteilte, kurze** Stromstöße in **einzelnen** PMs

# 1.2.2 Compton Effekt

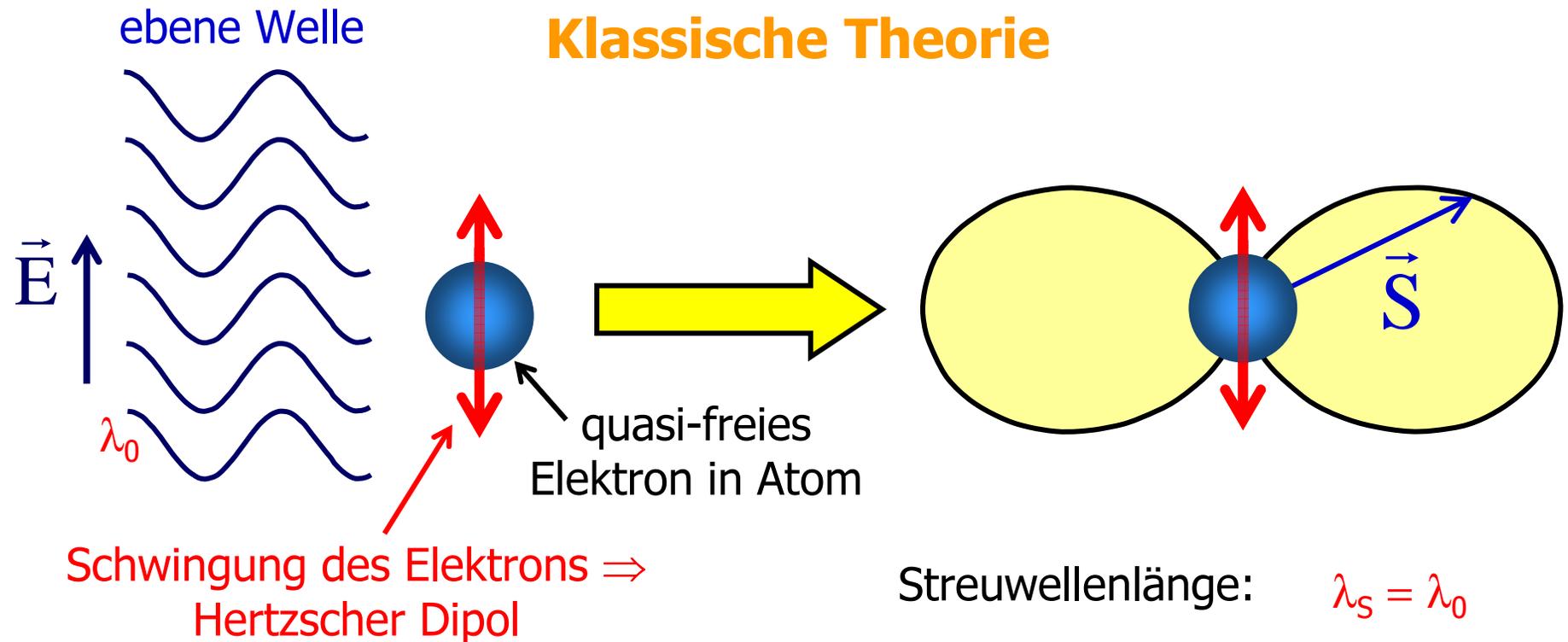
## Messprogramm:

Für jeden fest eingestellten Streuwinkel  $\varphi$  drehe Monochromator- / Detektor-Arm ( $\alpha$ ), bis das Detektor-Signal maximal ist.

(Experiment: 1922, Nobelpreis: 1927)



# 1.2.2 Compton Effekt



Beobachtung: Neben der klassischen Streuung gibt es eine gestreute Komponente mit  $\lambda_s > \lambda_0$ . Diese **nicht-klassische** Komponente wird umso stärker, je **härter** (je **kleiner**  $\lambda$ ) die einfallende Strahlung ist.

# 1.2.2 Compton Effekt

Streuung im quantenmechanischen Photonen-Bild:

$$E_\gamma = \hbar \omega$$

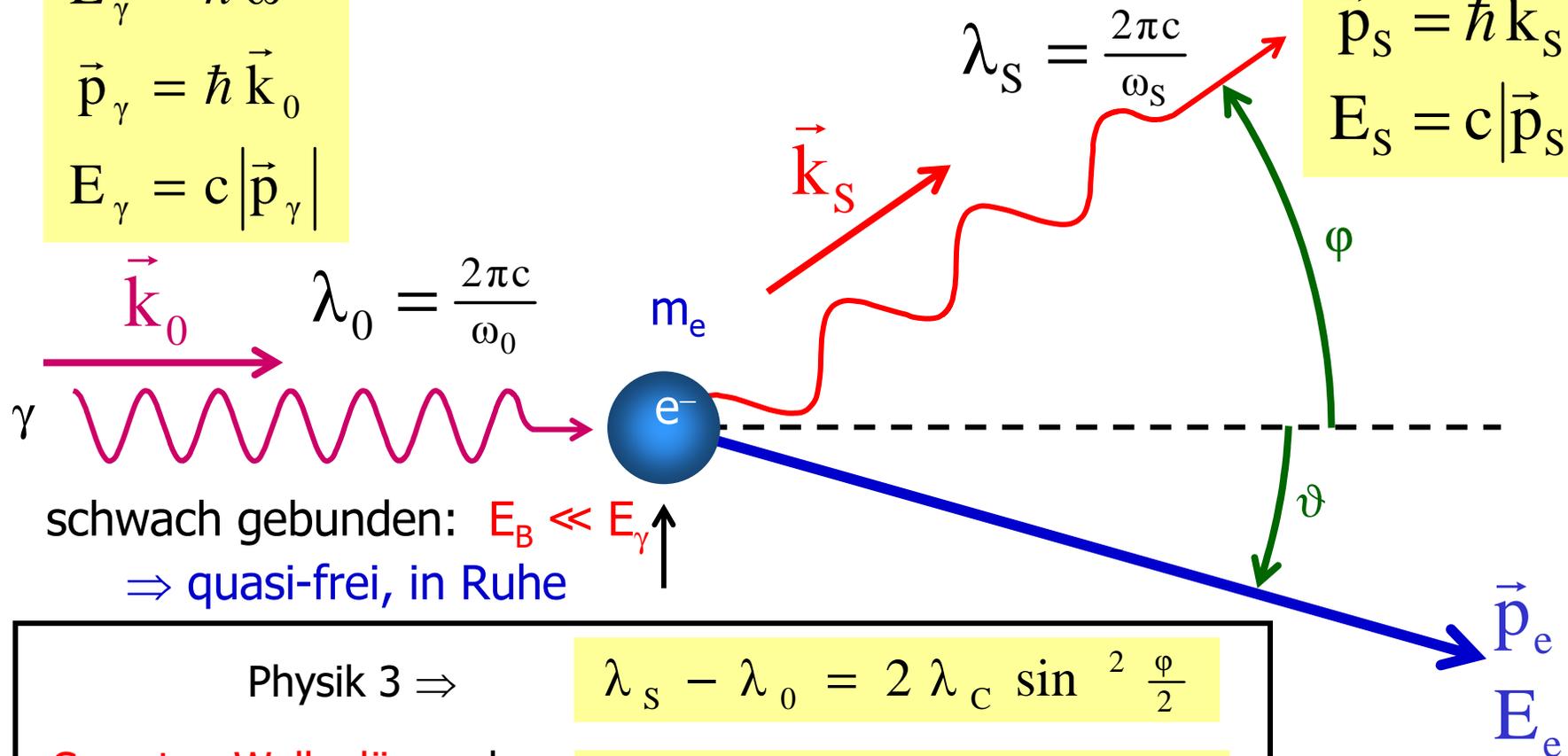
$$\vec{p}_\gamma = \hbar \vec{k}_0$$

$$E_\gamma = c |\vec{p}_\gamma|$$

$$E_S = \hbar \omega_S$$

$$\vec{p}_S = \hbar \vec{k}_S$$

$$E_S = c |\vec{p}_S|$$



schwach gebunden:  $E_B \ll E_\gamma$   
 $\Rightarrow$  quasi-frei, in Ruhe

Physik 3  $\Rightarrow$

$$\lambda_S - \lambda_0 = 2 \lambda_C \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

Compton-Wellenlänge des Elektrons

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

## 1.2.2 Compton Effekt

$$\Delta\lambda = \lambda_S - \lambda_0 = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad \lambda_C = \frac{h}{m_e c}$$

### Bemerkungen:

a) Stets  $\lambda_0$  und  $\lambda_S$  gemischt.

Grund: Kollektive Streuung am Atom,  $M_{\text{Atom}} \gg m_e$ .

b) Compton-Formel experimentell bestätigt

⇒ noch eine unabhängige Messung von  $h$ .

c)  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 2 \frac{\lambda_C}{\lambda_0} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$  nur groß falls  $\lambda_0 \lesssim \alpha(\lambda_C)$

⇒ X- und  $\gamma$ -Strahlung:  $E_\gamma = \hbar \omega_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{\lambda_C}{\lambda_0} m_e c^2 = \frac{\lambda_C}{\lambda_0} \cdot 511 \text{ keV}$

d) Ein Photon mit  $\lambda_0 = \lambda_C$  hat relativistische Masse  $m_e$ . Beim klassischen zentralen elastischen Stoß würde das Photon stehenbleiben,  $\lambda_S = \infty$ .

Hier:

$$\Delta\lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{180^\circ}{2} = 2\lambda_C \Rightarrow \lambda_S = 3\lambda_C$$

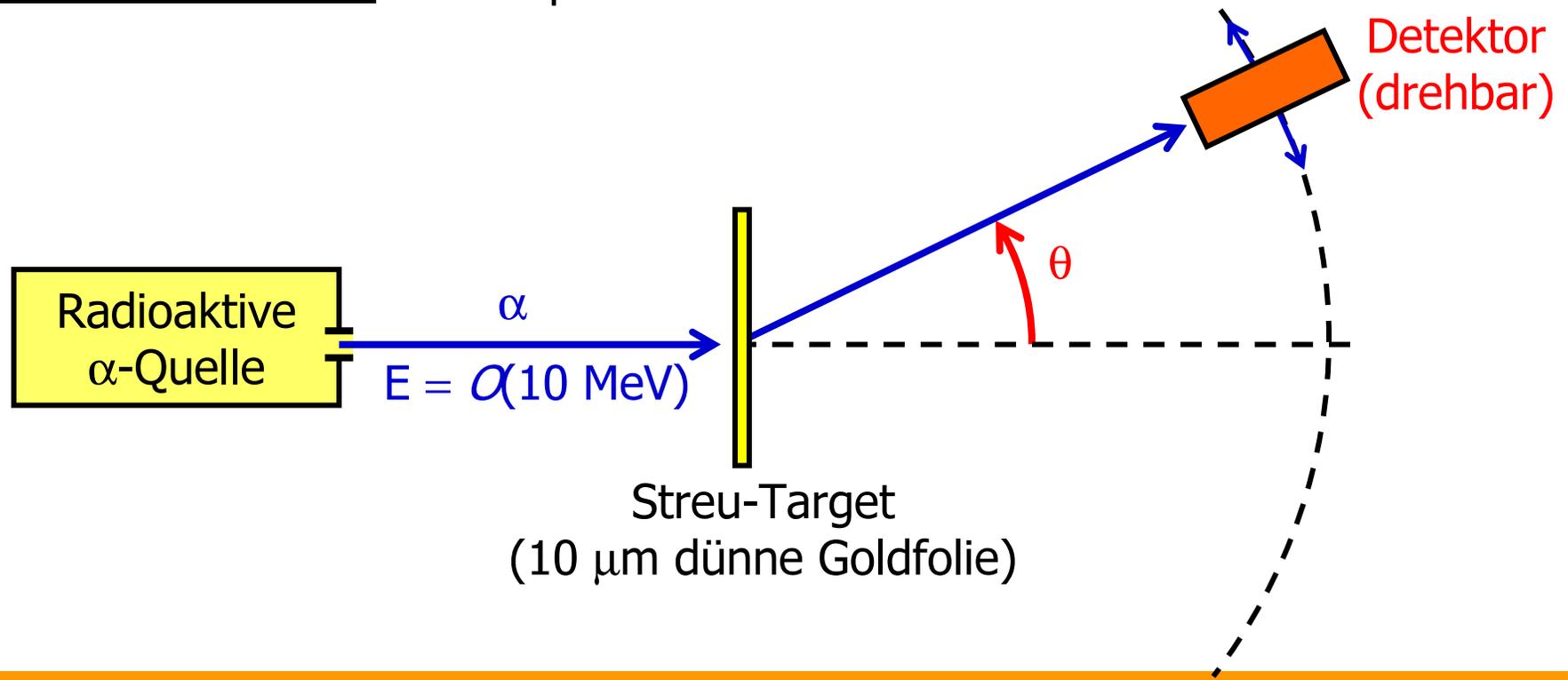
# 1.3.1 Bohr'sches Atommodell



## Das Thomsonsche Atommodell

Hypothese (Thomson): Ein Atom ist eine homogen geladene Kugel gleich vieler positiver (Protonen) und negativer (Elektronen) Elementarladungen.

Experimenteller Test: Streuexperiment nach Rutherford

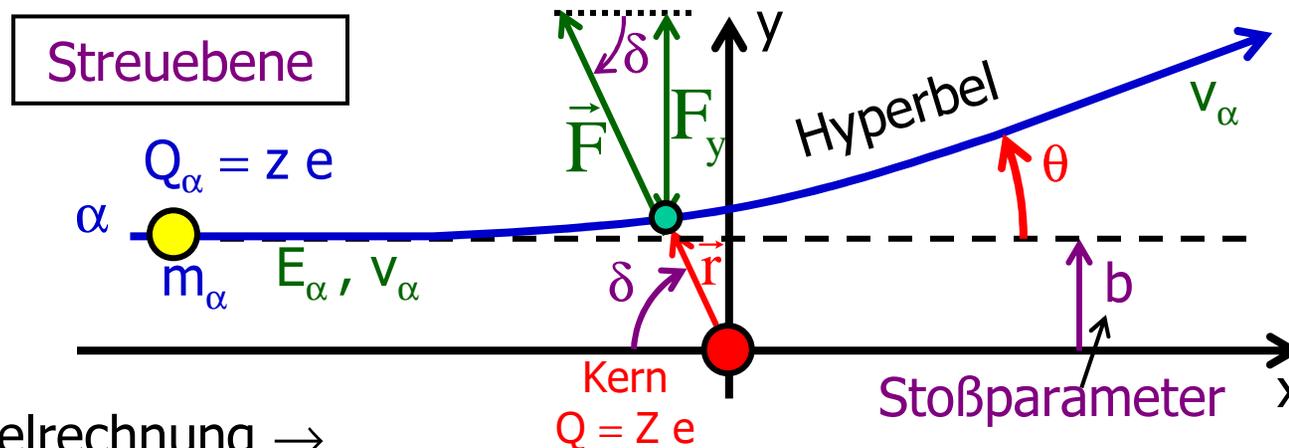


# 1.3.1 Bohr'sches Atommodell

## Das Rutherford'sche Atommodell

Hypothese (Rutherford): Ein Atom besteht aus einem praktisch punkt-förmigen Kern der Ladung  $+Ze$ , der praktisch die gesamte Atommasse trägt. Der Kern ist umgeben von einer ausgedehnten Hülle von  $Z$  Elektronen ( $\rightarrow$  Atomgröße), die die Kernladung perfekt abschirmt.

Streuung von  $\alpha$ -Teilchen: Streuung nur in **unmittelbarer** Kernnähe  $\Rightarrow$  Mehrfachstreuungen sehr selten  $\Rightarrow$  **betrachte nur Einfachstreuungen!**

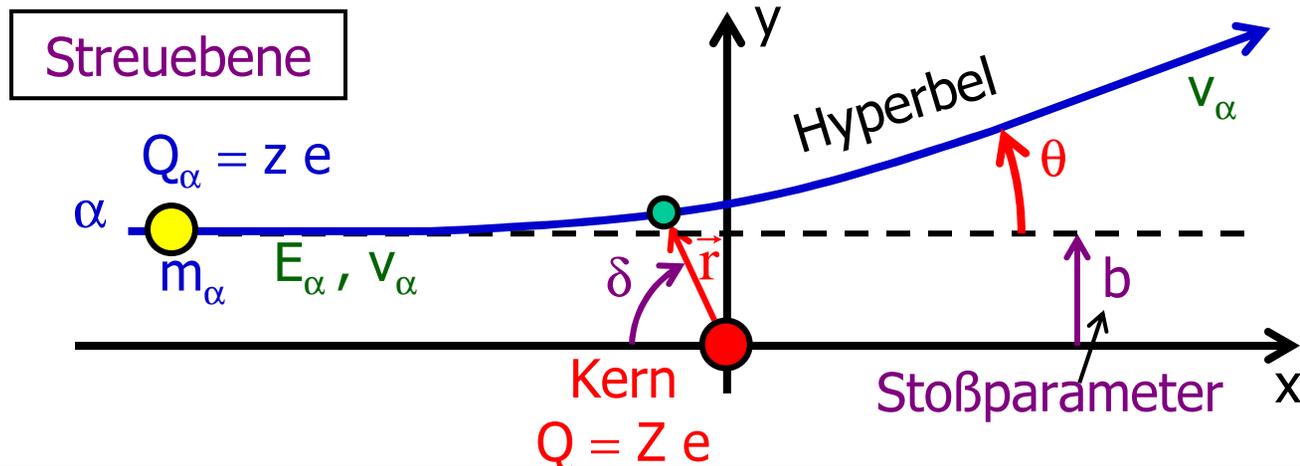


Tafelrechnung  $\rightarrow$

Streuwinkel:

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{4 \pi \epsilon_0}{z Z e^2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 b = \frac{8 \pi \epsilon_0}{z Z e^2} E_{\alpha} b$$

# 1.3.1 Rutherford Streuung



Winkelverteilung:  
( $\rightarrow$  Tafelrechnung)

$$\frac{1}{N_0} \frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{16} \left( \frac{z Z e^2}{4 \pi \epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{E_\alpha^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Bezeichnung:

$$\left. \frac{1}{N_0} \frac{dN}{d\Omega} \right|_{\text{Einzelkern}} = \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

gerechnet für einen  
Einzelkern als Streutarget

$\sigma$  = Wirkungsquerschnitt der  $\alpha$ -Kern Streuung (Einheit  $m^2$ )  
 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  = differentieller Wirkungsquerschnitt der  $\alpha$ -Kern Streuung