

# 1 Formeln zum Photon (mit $f$ als Photonenfrequenz)

## 1.1 Photonenenergie

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}; \quad [E] = 1 \text{ Js} \cdot 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ J};$$

Deutung: Es findet ein Energietransfer zwischen Licht und Materie statt (die Richtung ist nicht angegeben), bei der Licht der Frequenz  $f$ /Wellenlänge  $\lambda$  Energie der Menge  $E$  austauscht.

Größenordnung bei normalen Licht: Einige Elektronenvolt.

## 1.2 Photonenmasse

$$m(c) = \frac{hf}{c^2}; \quad [m(v)] = 1 \frac{\text{Js} \cdot \text{s}^{-1}}{\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{-2}} = \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} = 1 \text{ kg};$$

Herleitung durch Umformung von  $hf = E(c) = m(c)c^2$  nach  $m(c)$ .

Nicht: Ein Photon hat eine Masse von  $m(c) = \frac{hf}{c^2}$ .

Sondern:  $m(c)$  ergibt nur im Kontext eines Impulsübertrags Sinn, also beispielsweise in der Berechnung des Photonenimpulses.

## 1.3 Photonenimpuls

$$p = \frac{hf}{c}; \quad [p] = 1 \frac{\text{Js} \cdot \text{s}^{-1}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{m}} = \text{Ns};$$

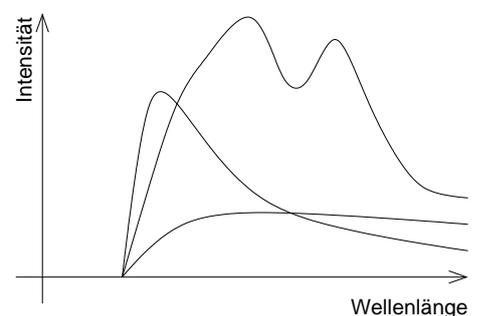
Herleitung über  $p = mv = mc$ .

Deutung: Es findet ein Impulsübertrag zwischen Licht und Materie statt (die Richtung ist nicht angegeben), bei der Licht der Frequenz  $f$  Impuls der Menge  $p$  austauscht.

# 2 Formeln zur Röntgenbremsstrahlung

$$f_{\text{max}} = \frac{eU}{h}; \quad [f_{\text{max}}] = 1 \frac{\text{C} \cdot \text{V}}{\text{Js}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Js}} = 1 \text{ Hz};$$

Herleitung über  $eU = hf_{\text{max}}$ .



### 3 Formeln zum lichtelektrischen Effekt (mit $f$ als Frequenz des einfallenden Lichts)

#### 3.1 Versuch ohne Gegenspannung

$$E_e = hf - E_{\text{Austritt}}; \quad [E_e] = 1 \text{ Js} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ J};$$

Genügt die Lichtquantenenergie  $hf$  nicht, um die Austrittsenergie aufzubringen ( $hf < E_{\text{Austritt}}$ ), so gibt das Elektron die Energie wieder ab, beispielsweise in Form von Schwingungsenergie an den Festkörper.

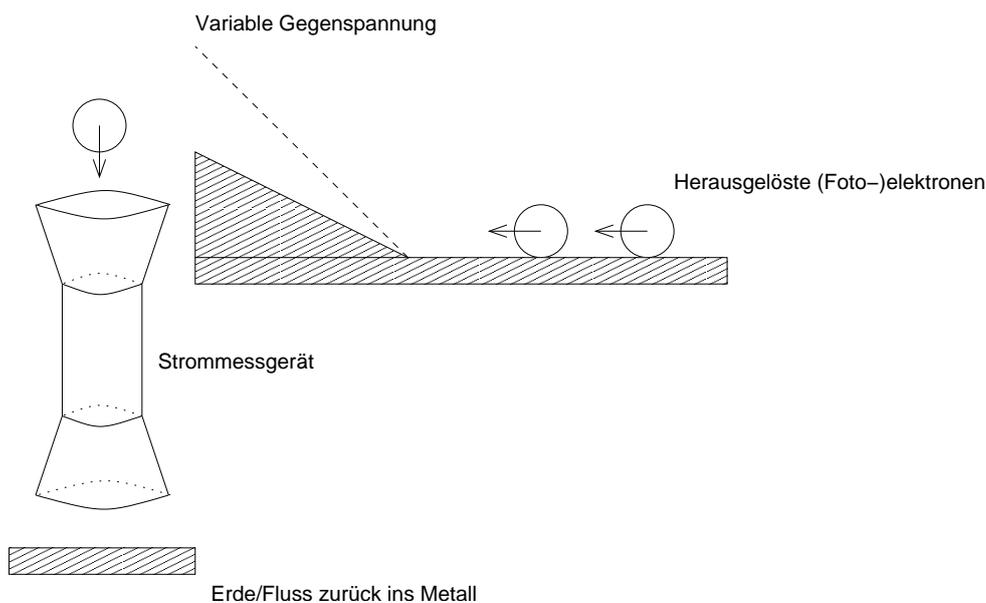
Ansonsten wird  $E_e$  als kinetische Energie genutzt.

#### 3.2 Versuch mit Gegenspannung

$$E_e = hf - E_{\text{Austritt}} = eU_{\text{Gegen}}; \quad [E_e] = 1 \text{ Js};$$

Mindestens zwei Versuche mit unterschiedlichen Lichtfrequenzen sind notwendig, um das PLANKsche Wirkungsquantum zu  $h = \frac{\Delta E}{\Delta f} = e \frac{\Delta U_{\text{Gegen}}}{\Delta f}$  zu bestimmen.

Nicht alle Elektronen nutzen ihre gesamte kinetische Energie zur Überwindung der Gegenspannung, daher ist die Gegenspannung zur Herausfiltrierung der „schnellsten“ (energiereichsten) Elektronen notwendig.



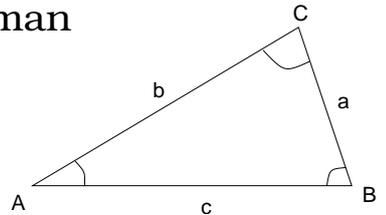
## 4 Formeln zum Compton-Effekt

### 4.1 Kosinussatz (allgemein)

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \varphi;$$

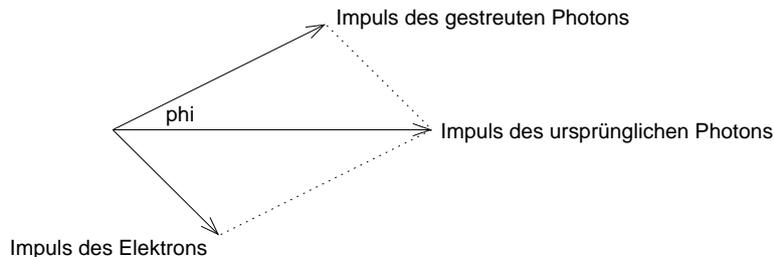
Wobei  $a$ ,  $b$  und  $c$  die Längen eines beliebigen ebenen Dreiecks sind und  $\varphi$  der Winkel an der  $c$  gegenüberliegenden Ecke ist.

$a$ ,  $b$  und  $c$  können beliebig ausgetauscht werden, sofern man nicht vergisst, auch den Winkel auszutauschen.



### 4.2 Kosinussatz zum Compton-Effekt

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - 2p_\gamma p_\gamma' \cdot \cos \varphi; \quad [p_e^2] = (1 \text{ Ns})^2;$$



### 4.3 COMPTONwellenlänge beim Stoß mit Elektronen

$$\lambda_C = \frac{h}{m_{e_0} c}; \quad [\lambda_C] = 1 \frac{\text{Js}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{kg}} = \text{m};$$

### 4.4 Wellenlängenänderung beim Stoß mit Elektronen

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_{e_0} c} (1 - \cos \varphi); \quad [\Delta \lambda] = 1 \text{ m};$$

( $\varphi$ : Winkel zwischen einfallendem Licht und gestreutem Licht)

Überraschend:  $\Delta \lambda$  unabhängig von der Originalfrequenz!

– Minimale Wellenlängenänderung bei  $\varphi = 0^\circ$ :

$$\Delta \lambda = 0 \text{ nm};$$

– Maximale Wellenlängenänderung bei  $\varphi = 90^\circ$ :

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_{e_0} c} \approx +0,0024 \text{ nm} = +2,4 \text{ pm};$$

Das Licht verliert beim „Stoß“ Energie; mit  $E = hf$  nimmt die Frequenz ab; die Wellenlänge wird größer.