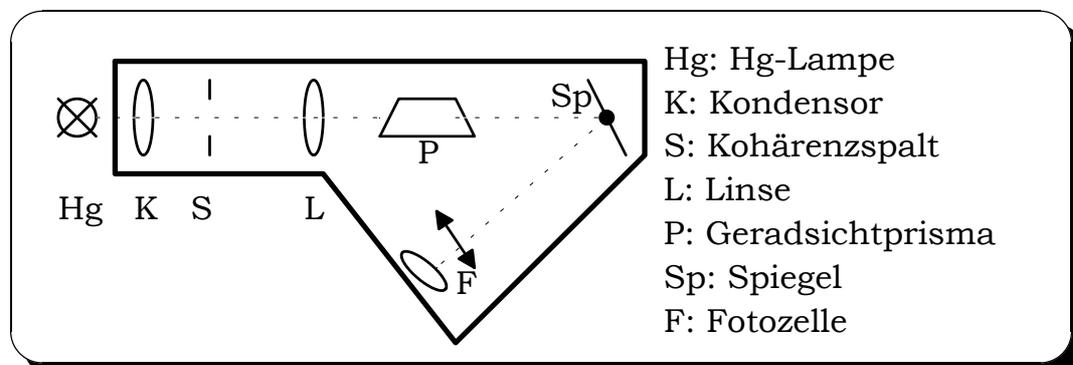


## 5.1.2 Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz und kinetischer Energie der Photoelektronen; Austrittsarbeit, Grenzfrequenz; Plancksches Wirkungsquantum $h$

### Lichtfrequenz und kinetische Energie der Photoelektronen

Die Gegenspannung, die im letzten Versuch des vorigen Kapitels den Fotostrom zum Erliegen bringt, ist von der Frequenz des einfallenden Lichts abhängig; die Abhängigkeit kann mit dem nachfolgend skizzierten Versuchsaufbau genauer untersucht werden.

Versuchsaufbau (Kompaktanordnung zur  $h$ -Bestimmung der Firma Leybold-Heraeus):



Die optische Anordnung, bestehend aus Sammellinse, Spalt, Projektionsobjektiv, Spiegel, Sammellinse (vor der Fotozelle) und Fotozelle ist in einem geschlossenen Gehäuse zur Verhinderung von unerwünschtem Lichteinfall untergebracht. Die Sammellinse bündelt das Licht der Quecksilberdampflampe auf die Spaltöffnung. Der Spalt wird vom Projektionsobjektiv auf die Fotozelle abgebildet. Hinter dem Objektiv fächert ein Geradsichtprisma das Licht spektral auf. Vor der Fotozelle stehen ein weiterer Spalt und eine Sammellinse, die das Licht einer einzelnen Spektrallinie auf die Fotokathode konzentrieren. Der Strahlengang ist geknickt, um die Baulänge der Anordnung zu reduzieren. Die Fotozelle und die Sammellinse sind auf einem schwenkbaren Arm montiert, so dass die Fotozelle in die Richtung der einzelnen Spektrallinien geführt werden kann. An der Fotozelle liegt eine Gegenspannung; im Stromkreis befindet sich der stromempfindliche Messverstärker.

Ergebnisse:

Farbe	Wellenlänge in nm	Frequenz in Hz	Gegenspannung in U
gelb	578	$5,19 \cdot 10^{14}$	0,7
grün	546	$5,49 \cdot 10^{14}$	0,9
türkis	493	$6,08 \cdot 10^{14}$	1,1
blau	436	$6,88 \cdot 10^{14}$	1,38

---

Es wird für jede Spektrallinie die Gegenspannung  $U$  gemessen, die den Fotostrom gerade zum Verschwinden bringt. Die Ergebnisse stehen in oben stehender Tabelle.

Im letzten Kapitel wurde bereits dargestellt, dass die Gegenspannung ein Maß für die Elektronenenergie ist. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass diese für größere Einstrahlfrequenzen zunimmt.

### **Die Einsteinsche Deutung des Fotoeffekts mit dem Photonenmodell**

Das unsinnige Ergebnis des Zahlenbeispiels im letzten Kapitel ergibt sich unter der Voraussetzung, dass die Energie des Strahlungsfeldes gleichmäßig auf der Wellenfläche verteilt ist. Lässt man diese Annahme fallen, kann der Fotoeffekt zwanglos erklärt werden. Man muss also annehmen, dass sich die Energie des Strahlungsfeldes kurzzeitig auf sehr kleine Bereiche mit atomaren Abmessungen konzentrieren kann. Die Intensität des Lichts besteht also nicht aus einem örtlich und zeitlich konstanten Energiestrom. Es besitzt eine Art "Körnigkeit", die Energie wird in Klumpen oder Korpuskeln transportiert. Diese Energiequanten heißen Photonen oder Lichtquanten.

1900 gelang es Max Planck, ein Gesetz über die spektrale Verteilung der Temperaturstrahlung aufzustellen. Er musste dazu revolutionäre Annahmen machen:

1. Die Aufnahme und Abgabe der Energie eines strahlenden Körpers erfolgt nicht stetig, sondern in Quanten.
2. Die Energie eines Quants ist gleich dem Produkt aus der Frequenz  $f$  der Strahlung und einer universellen Konstanten  $h$ , also  $W = h \cdot f$ .

Einstein fand 1905 einen Ausweg aus dem Zwiespalt zwischen der Wellentheorie des Lichts und den Ergebnissen der Versuche im Zusammenhang mit dem Fotoeffekt. Er identifizierte die Lichtkorpuskeln mit den Planckschen Energiequanten und machte dazu folgende Annahmen:

1. Licht der Frequenz  $f$  besteht aus einzelnen Lichtquanten (Photonen), die sich mit Lichtgeschwindigkeit geradlinig bewegen, wobei jedes Photon als Korpuskel seine Energie  $h \cdot f$  beibehält. Sie können nur als Ganzes erzeugt oder absorbiert werden.
2. Ein Photon teilt seine Energie beim Fotoeffekt momentan einem getroffenen Elektron mit, indem es sich teilweise in kinetische Energie des Elektrons umwandelt und außerdem noch die Ablösearbeit  $W_A$  aufbringt.

Mit diesen Annahmen ergibt sich für den lichtelektrischen Effekt folgende Energiebilanz:

$$h \cdot f = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 + W_A.$$

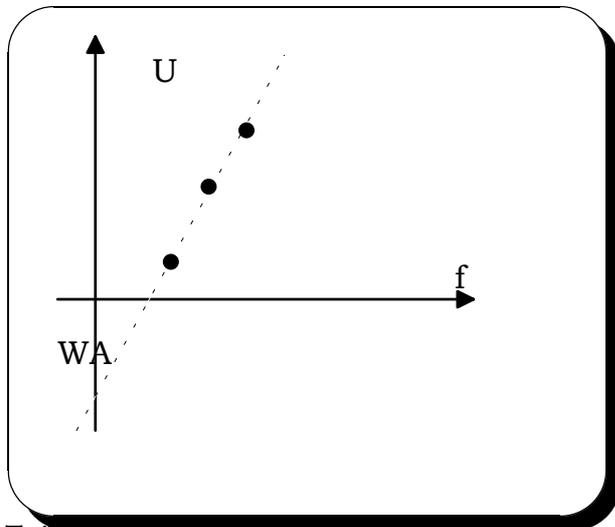
Die Geschwindigkeit  $v$  kann durch die Spannung gemessen werden, die den Fotostrom zum Verschwinden bringt, die also die Elektronengeschwindigkeit vor dem Erreichen der Auffängerelektrode auf Null abbremst:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = e \cdot U,$$

so dass der Zusammenhang

$$h \cdot f = e \cdot U + W_A$$

folgt (vgl. Skizze).



Trägt man die einzelnen Gegenspannungen über den verschiedenen Lichtfrequenzen auf, so lässt sich aus der Steigung der (Ausgleichs-)Geraden die Konstante h, das Plancksche Wirkungsquantum, bestimmen:

Es seien  $U_1, f_1$  und  $U_2, f_2$  zwei Wertepaare. Dann gilt

$$e \cdot U_1 = h \cdot f_1 - W_A \text{ und } e \cdot U_2 = h \cdot f_2 - W_A.$$

Daraus folgt

$$e \cdot (U_1 - U_2) = h \cdot (f_1 - f_2) \text{ bzw.}$$

$$h = \frac{e \cdot \Delta U}{\Delta f}.$$

$\frac{\Delta U}{\Delta f}$  ist dabei die Steigung der Ausgleichsgeraden durch die verwendeten Punkte im f-U-Diagramm.

Der Literaturwert für h beträgt  $h = 6,6025 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

Anmerkungen:

1. Mit dem Photonenmodell lassen sich die im letzten Kapitel zusammengestellten Ergebnisse der Versuche zum Photoeffekt zwanglos erklären.
2. Mit der Einsteinschen Gleichung ist das Auftreten einer Grenzfrequenz  $f_g$  leicht erklärbar:  $f_g$  ist die Frequenz, bei der die zugehörige Energie gerade ausreicht, die Ablösearbeit aufzubringen:  $h \cdot f_g = W_A$ .

Zusammenfassung: Die Abgabe von Energie durch Licht der Frequenz f erfolgt immer in Energiequanten der Größe  $W = h \cdot f$ . Man nennt sie Lichtquanten oder Photonen. Das Plancksche Wirkungsquantum h ist eine Naturkonstante und hat den Wert  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

### Deutung der Grenzfrequenz bei der Röntgenstrahlung

Beim Fotoeffekt geben Lichtquanten ihre Energie als Ganzes an einzelne Elektronen eines Metalls ab; ist die übertragene Energie groß genug, dann verlassen die Elektronen das Metall mit der kinetischen Energie

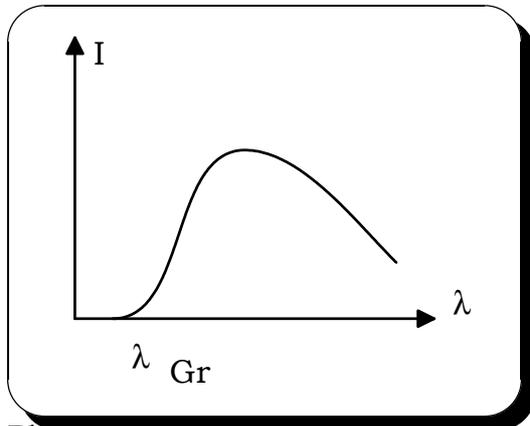
$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = h \cdot f - W_A.$$

Im folgenden soll gezeigt werden, dass dieser Vorgang auch umgekehrt ablaufen und mit dem Photonenbild leicht erklärt werden kann.

Das Röntgenbremsspektrum entsteht, wenn Elektronen durch eine hohe Spannung beschleunigt werden und auf die Anode aufprallen. Dann werden die Elektronen in der Anode abgebremst. Bei der Wechselwirkung mit den Atomen der Anode wird normalerweise ein erheblicher Teil der freiwerdenden Energie als Wärme  $Q$  an die Antikathode abgegeben, der andere Teil dient zur Erzeugung eines oder mehrerer Röntgenquanten. Die Energiebilanz lautet dann

$$e \cdot U = Q + h \cdot f_1 + h \cdot f_2 + \dots$$

Dabei entsteht etwa folgendes Spektrum:



Photonen maximaler Energie entstehen dann, wenn ein Elektron genau ein Photon erzeugt, ohne dass dabei Wärme abgegeben wird ( $Q = 0$ ). In diesem Fall lautet die Energiebilanz

$$e \cdot U = h \cdot f_{\text{max}}.$$

Es ist also für das Röntgenbremsspektrum eine kontinuierliches Spektrum mit einer scharfen hochfrequenten bzw. langwelligen Grenze zu erwarten, die nur von der Beschleunigungsspannung, nicht aber vom Anodenmaterial abhängt. Genau dies wird durch das Experiment bestätigt. Damit wird die Gültigkeit der Quantengesetze für den Einzelprozess gestützt.

Zusammenfassung: Bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen entstehen Quanten nach der Gleichung  $W = h \cdot f$ . Das bei einer Spannung  $U$  erzeugte kontinuierliche Röntgenbremsspektrum bricht zu höheren Frequenzen hin in einer Kante mit der Grenzfrequenz  $f_{\text{max}}$  ab.

Aus  $W = e \cdot U = h \cdot f_{\text{max}}$  lässt sich das Plancksche Wirkungsquantum berechnen.