

Der Photoelektrische Effekt

Elektronen können aus einem Metall befreit werden, indem man seine Oberfläche mit Licht bestrahlt. Es zeigt sich, dass dieser Effekt auf der Grundlage der klassischen elektromagnetischen Lichttheorie nicht erklärt werden kann. Die Deutung des Photoelektrischen Effekts trug wesentlich zur Entstehung der Quantentheorie bei.

1.1 Historischer Überblick

1.1.1 Die Natur des Lichts

Was ist Licht? Die Vorstellung über die Natur des Lichts wandelte sich im Lauf der Zeit erheblich. Auch die biblische Legende, der Regenbogen sei Gottes Unterschrift unter einen Vertrag mit den Menschen, ist in ihrer Art eine "Theorie", nur enthält sie keine hinreichende Erklärung dafür, dass der Regenbogen von Zeit zu Zeit immer wieder erscheint und warum dies stets im Zusammenhang mit Regenfällen passiert.

Der ganze Fragenkomplex der Farbphänomene wurde erstmalig von Sir Isaac Newton (1643-1727) wissenschaftlich untersucht. Licht setzt sich seiner Ansicht nach aus winzigen Partikeln - sogenannten Korpuskeln - zusammen. Um die vielfältigen Phänomene im Zusammenhang mit Licht erklären zu können, sprach Newton den Lichtteilchen, aber auch den Gegenständen verschiedene Eigenschaften zu.

Christian Huygens (1629-1695), ein Zeitgenosse Newtons, entwickelte die Theorie der Wellennatur des Lichts. Nach dieser Theorie sendet eine Lichtquelle Licht in Form von kugelförmigen Wellenfronten aus. Durch die Entdeckung von Interferenz und Beugung wurde die Newtonsche Korpuskeltheorie zugunsten der Wellentheorie aufgegeben.

James Clerk Maxwell (1831-1879) konnte alle bisherigen Erkenntnisse in eine geschlossene mathematische Form bringen (Maxwell-Gleichungen). Seine Theorie verbindet Elektrodynamik und Optik, gemäß der Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht, die transversal sind und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Das Bild vom Licht als Welle hatte sich zu diesem Zeitpunkt endgültig durchgesetzt.

1.1.2 Die Entdeckung des Photoelektrischen Effekts

Erstmals beschrieben wurde der Photoelektrische Effekt 1886 von Heinrich Hertz (1857-1894) in Form einer Randnotiz über seine Arbeit mit Radiowellen. Er beobachtete, dass sein Funkendetektor mehr Ereignisse registrierte, wenn die Metallkugeln, die diese Funken erzeugen, mit ultraviolettem Licht bestrahlt werden. Er maß dem aber keine große Bedeutung bei und ist dem Phänomen dann auch nicht weiter nachgegangen.

Wilhelm Hallwachs (1859-1922) setzte sich 1888 dann eingehender mit dem Problem auseinander und bestrahlte geladene Zinkplatten. Er beobachtete, dass negativ geladene Platten ihre Ladung unter der Einwirkung von ultraviolettem Licht ausgesprochen rasch verlieren.

Joseph J. Thomson (1856-1940, Nobelpreis 1906) zeigte 1899, dass die von Metall emittierten Ladungen identisch sind mit den von ihm 1897 entdeckten Elektronen.

Von Philipp von Lenard (1862-1947, Nobelpreis 1905) wurde der Vorgang 1902 genauer untersucht. Er konnte Elektronenemission an verschiedenen bestrahlten Oberflächen nachweisen. Dabei zeigte sich, dass sich die experimentellen Ergebnisse nicht in Einklang mit den damals existierenden Theorien bringen ließen.

1.2 Der Photoelektrische Effekt

Werden metallische Platten mit Licht bestrahlt, können Elektronen emittiert werden. Die Emission einer positiven Ladung wird dabei niemals beobachtet. Der emittierte Elektronenstrom ist direkt proportional zur Intensität des eingestrahlten Lichts. Diesen Prozess nennt man Photoelektrischen Effekt (oder kurz Photoeffekt, wird manchmal auch als Lichtelektrischer Effekt bezeichnet).

1.2.1 Klassische Vorhersagen

Betrachten wir Licht unter klassischen Gesichtspunkten, d.h. als transversale elektromagnetische Welle mit Wellenlänge λ , die sich mit Lichtgeschwindigkeit c ausbreitet, können wir folgende Vorhersagen treffen:

1. Die Energie einer Welle wird auf eine große Anzahl von Elektronen aufgeteilt.
2. Die freien Elektronen im Metall werden durch das elektrische Feld der Lichtwelle beschleunigt und dadurch zum Mitschwingen angeregt. Dabei nehmen sie solange Energie auf, bis sie die normalerweise das Austreten aus dem Metall verhindernden Kräfte überwinden können. Dadurch sollten sowohl die Anzahl als auch die noch vorhandene kinetische Energie der ausgetretenen Elektronen mit wachsender Lichtintensität zunehmen.
3. Bei geringer Intensität sollte die Emission der Photoelektronen umso später einsetzen, je geringer die Intensität ist, da eine gewisse Zeit benötigt wird, bis ein Elektron genügend Energie von der Strahlung aufgenommen hat.

1.2.1 Experimentelle Ergebnisse

Die experimentell beobachteten Fakten stehen in Widerspruch zu den Vorhersagen, die wir gerade unter klassischen Gesichtspunkten getroffen haben:

1. Es existiert eine Grenzfrequenz ν_0 , unterhalb derer keine Elektronen emittiert werden, unabhängig von der Intensität des eingestrahlten Lichts.
2. Eine Erhöhung der Intensität des eingestrahlten Lichts produziert zwar mehr, aber nicht schnellere Photoelektronen. Die kinetische Energie dieser Elektronen ist proportional ihrer Frequenz ν abzüglich der Grenzfrequenz ν_0 , unabhängig von der Intensität des eingestrahlten Lichts.
3. Es handelt sich um einen spontanen Effekt ohne Zeitverzögerung, wieder unabhängig von der Intensität des eingestrahlten Lichts.

Offensichtlich ist der Photoelektrische Effekt unter klassischen Gesichtspunkten nicht erklärbar.

1.3 Einsteins Deutung des Photoelektrischen Effekts

1.3.1 Die Lichtquantenhypothese Einsteins

Der Gedanke der diskreten Energiequanten wurde Anfang des vorigen Jahrhunderts erstmals von Max Planck (1858-1947, Nobelpreis 1918) eingeführt. Er beschrieb die zuvor nicht erklärbare Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers, indem er voraussetzte, dass elektromagnetische Strahlung in Form von diskreten Quanten auftritt mit einer jeweiligen Energie

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

wobei ν die Frequenz der Strahlung und h eine universelle Konstante (das sogenannte Plancksche Wirkungsquantum) ist.

In Analogie zu dieser von Max Planck gemachten Quantenhypothese besagt Albert Einsteins (1879-1955, Nobelpreis 1921) Theorie, dass Licht nicht kontinuierlich im Raum verteilt ist. Stattdessen ist es in kleinen Paketen quantisiert. Anstelle von Plancks Hypothese, dass Licht nur in diskreten Quanten absorbiert oder emittiert wird, sattelt Einstein das Pferd bildlich gesprochen von hinten auf und behauptet, dass das Licht selbst aus Teilchen, die er Photonen nennt, besteht.

Die Energie eines solchen Photons ist dann gegeben durch

$$E_{\text{Photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

wobei λ die Wellenlänge der Strahlung und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

1.3.2 Einsteins Erklärung des Photoelektrischen Effekts

Die Erklärung des Problems gab Albert Einstein 1905 mit seiner Formel der Energiebilanz des Photoelektrischen Effekts

$$E_{\text{kin}} = h\nu - W_A \quad (1.3)$$

auf der Grundlage folgender Annahmen: Licht besteht aus einem Strom von einzelnen Photonen mit der Energie $E = h\nu$. Trifft ein Photon auf Metall, kann diese Energie von genau einem Elektron ohne Zeitverzögerung absorbiert werden, da die Wahrscheinlichkeit für die Absorption von zwei Photonen durch ein Elektron sehr gering ist. Das Elektron wird emittiert, wenn die absorbierte Energie die Austrittsarbeit W_A übersteigt. Den Differenzbetrag behält das Elektron als kinetische Energie E_{kin} in Abhängigkeit von der Lichtfrequenz.

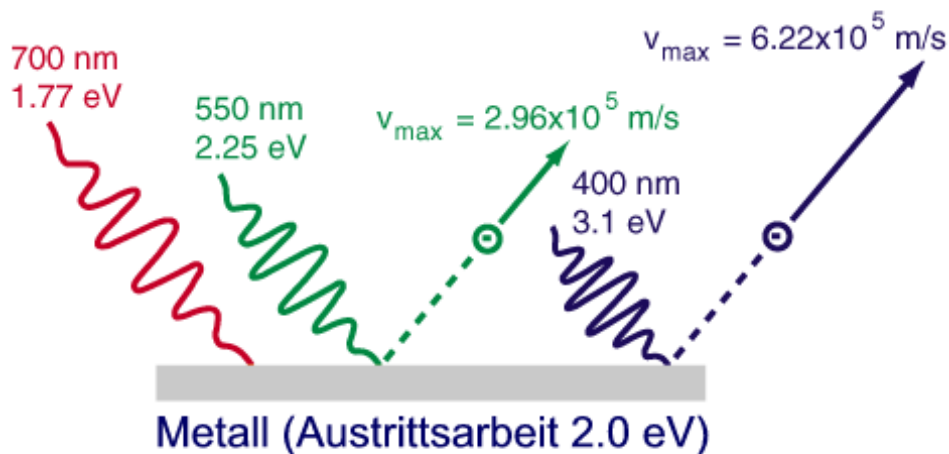


Abb. 1: Photoelektrischer Effekt

Nehmen wir an, Metall wird wie in Abb. 1 mit monochromatischem Licht bestrahlt, dann sind die einzelnen Interaktionen aufgrund der gleichen Energie der Photonen vollkommen gleichartig und alle Photoelektronen haben dieselbe kinetische Energie.

Erhöhen wir nun die Intensität, kommt dies einer Vermehrung der einfallenden Photonen gleich und es werden mehr Photoelektronen emittiert.

Erhöhen wir die Frequenz bei gleichbleibender Intensität, beobachten wir einen Anstieg der Geschwindigkeit und somit der kinetischen Energie der Photoelektronen.

Senken wir die Frequenz unter die Grenzfrequenz ν_0 (bei beliebiger Intensität), kann das Elektron die Austrittsarbeit nicht aufbringen. Die Austrittsarbeit W_A entspricht somit der Photonenenergie bei der Grenzfrequenz ν_0 und hängt vom jeweiligen Metall ab.

$$h\nu_0 = W_A \quad (1.4)$$

Die Elektronenenergie misst man, indem man sie gegen ein bremsendes elektrisches Feld anlaufen lässt. Ist die an einen Kugelkondensator angelegte Spannung U größer als die Energie der Elektronen geteilt durch die Elementarladung,

$$U > \frac{E_{\text{kin}}[\text{eV}]}{e} \quad (1.5)$$

können keine Elektronen auf die äußere Kugel gelangen und es fließt kein Strom mehr. Man erhält

$$eU = h\nu - W_A \quad (1.6)$$

Für diese elegante Erklärung des Photoelektrischen Effekts erhielt Albert Einstein im Jahr 1921 den Nobelpreis.

1.4 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie

Nach heutiger Kenntnis wird beim Photoeffekt ein Photon durch die Elektronenhülle eines Atoms vollständig absorbiert. Die Energie des Photons geht auf eines der Elektronen über, das dadurch in einen angeregten Zustand gehoben wird oder das Atom vollständig verlässt. Die Bindungsenergie B des Elektrons ist abhängig von der Kernladungszahl Z des Atoms und von der Schale, in der es sich befindet.

1.4.1 Äußerer Photoelektrischer Effekt

Ist die Energie des Photons größer als die Bindungsenergie B des Elektrons, so wird letzteres mit der kinetischen Energie

$$E_{kin} = h\nu - B \quad (1.7)$$

emittiert (Abb. 2). In diesem Fall spricht man vom äußeren Photoelektrischen Effekt.

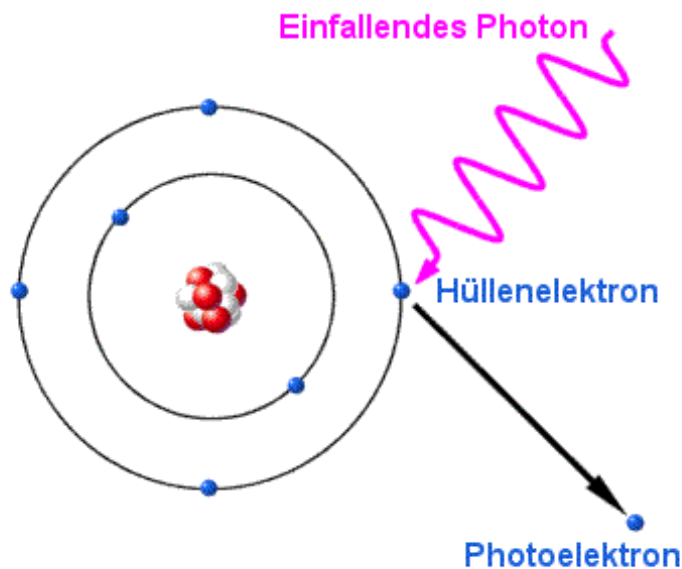


Abb. 2: Äußerer Photoelektrischer Effekt

1.4.2 Innerer Photoelektrischer Effekt

Unterhalb der Grenzfrequenz ist die Energie des Photons kleiner als die Bindungsenergie B des Elektrons, kann aber ausreichen, um das Elektron in einen angeregten Zustand zu versetzen. Befindet sich der angeregte Zustand in einem Leitungsband, entsteht ein Strom. In diesem Fall spricht man vom inneren Photoelektrischen Effekt. Praktische Anwendungen des inneren Photoelektrischen Effekts sind Solarzellen, Belichtungsmesser oder Sensoren.

A.1.1 Tabellen

Tabelle 1.1: verwendete physikalische Konstanten

Planck-Konstante	h	$6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Lichtgeschwindigkeit	c	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Elementarladung	e	$1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$

Tabelle 1.2: Austrittsarbeiten W_A und Grenzwellenlängen λ_0 einiger Metalle

Metall	$W_A [eV]$	$\lambda_0 [nm]$
Li	2.46	504
Na	2.28	543
K	2.25	551
Rb	2.13	582
Cs	1.94	639
Cu	4.48	277
Pt	5.36	231

A.1.2 Literaturverzeichnis

- [1] Haken - Wolf: "Atom- und Quantenphysik", 8. Auflage 2004
- [2] Albert Einstein, Leopold Infeld: "Die Evolution der Physik", Neuausgabe 1995
- [3] B. Bröker: "dtv-Atlas zur Atomphysik", 1993