

V500

Der Photoeffekt

Fritz Agildere
fritz.agildere@udo.edu

Amelie Strathmann
amelie.strathmann@udo.edu

Durchführung: 20. Juni 2023

Abgabe:

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	2
2 Theorie	2
2.1 Eigenschaften von Licht	2
2.2 Lichtelektrischer Effekt	2
2.3 Grundlagen der Apparatur	4
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
5 Diskussion	7
Literatur	7
Anhang	8

1 Zielsetzung

Im folgenden Versuch sollen die Wellenlängenabhängigkeit der maximalen Energie von Photoelektronen sowie das Verhalten einer Photozelle als mit dem lichtelektrischen Effekt zusammenhängende Erscheinungen experimentell untersucht werden.

2 Theorie [1]

Bei Bestrahlung von Metalloberflächen mit Licht kann es zur Auslösung von Elektronen kommen. Dieses Phänomen wird als Photoeffekt oder lichtelektrischer Effekt bezeichnet, zu seiner Beschreibung ist zunächst eine Einordnung der relevanten Eigenschaften von elektromagnetischer Strahlung sinnvoll.

2.1 Eigenschaften von Licht

Die widerspruchsfreie Beschreibung aller experimentell nachgewiesenen Erscheinungen des Elektromagnetismus ist hochgradig nichttrivial und erfordert komplexe mathematische Formulierungen. Ein solches Modell, das diesem Anspruch gerecht wird, ist in Form der Quantenelektrodynamik gegeben. Als Grenzfälle enthält diese Quantenfeldtheorie wieder die klassischen Zusammenhänge, welche sonst nicht miteinander vereinbar wären. Falls über eine große Anzahl von als Photonen bezeichneten Feldquanten gemittelt werden kann, ergibt sich die Maxwellsche Welleninterpretation zur Beschreibung von Beugung und Interferenz. Bei Interaktionen von Licht mit Materie stellt die Newtonsche Punktmechanik eine bessere Näherung dar und liefert Erklärungen für Beobachtungen wie den Compton-Effekt oder die Paarbildung. Ansätze der zweiten Kategorie heißen auch Korpuskelinterpretationen.

2.2 Lichtelektrischer Effekt

Anordnungen zur Untersuchung des Photoeffekts wie in Abbildung 1 bestehen prinzipiell darin, eine Festkörperoberfläche im Vakuum mit monochromatischem Licht zu bestrahlen. Neben der sogenannten Photokathode wird eine weitere Elektrode verbaut, welche bezüglich dieser ein positives Potential besitzt. Letztere trägt auch die Bezeichnung der Auffängeranode. Es lassen sich einige charakteristische Resultate solcher Versuche zusammenfassen:

1. Der ausgelöste Elektronenstrom ist proportional zur Lichtintensität.
2. Die kinetische Energie der Photoelektronen ist nur proportional zur Lichtfrequenz.
3. Das Lösen von Elektronen tritt nur oberhalb einer bestimmten Grundfrequenz auf.

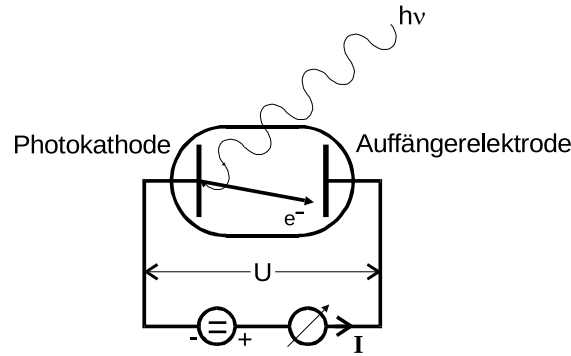


Abbildung 1: Prinzipielle Anordnung zur Untersuchung des Photoeffekts.

Diese Beobachtungen lassen sich nicht mit einem Wellenmodell erklären. Ein solches würde die Elektronen als Oszillatoren betrachten, die bei großer Schwingungsamplitude die elektrostatische Rückstellkraft überwinden können. Dann müsste jedoch deren kinetische Energie mit der Intensität anwachsen. Ebenso gibt es in dieser Anschauung keine minimal notwendige Frequenz der Strahlung, da auch für langwelliges Licht mit ausreichend hoher Intensität ein Auslösen möglich wäre. Zudem sollte durch Resonanzerscheinungen eine bevorzugte Austrittsfrequenz existieren.

In der Einsteinschen Korpuskulartheorie wird daher die Annahme der gleichmäßigen Energieverteilung über eine Wellenfront verworfen. Stattdessen erfolgt der Transport von Strahlungsfeldenergie über konzentrierte Volumina mit praktisch verschwindender Ausdehnung im Raum. Diese Lichtquanten oder Photonen werden als identisch mit den Planckschen Energiequanten postuliert. Daraus folgen mehrere relevante Schlüsse: Monochromatisches Licht der Frequenz ν besteht gänzlich aus Photonen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit c und Energie $h\nu$ geradlinig bewegen. Mit h wird hier das Plancksche Wirkungsquantum bezeichnet. Überträgt ein Photon seine Energie auf ein Elektron, teilt sich diese in Austrittsarbeit A_k und kinetische Energie E_k auf. Demnach gibt

$$h\nu = E_k + A_k \quad (1)$$

die Energiebilanz an und erklärt direkt die allgemeine Proportionalität von kinetischer Energie der Photoelektronen zur Frequenz sowie für $h\nu < A_k$ das Auftreten einer unteren Grenze. Weiter folgt aus der Theorie, dass die Intensität der Strahlung proportional zur Anzahl der Photonen pro Fläche und Zeit ist. Da ein Photon jeweils nur maximal ein Elektron aus der Metalloberfläche auslösen kann, wächst der Strom also wie beobachtet mit der Intensität an.

2.3 Grundlagen der Apparatur

Der eigentliche lichtelektrische Effekt findet in einem dazu evakuierten Glaskolben, der sogenannten Photozelle statt. Die Kathode besteht dabei aus einer auf der Innenseite zur Bestrahlung aufgedampften Metallschicht. Wie in Abbildung 2 ist diese von einer kreisförmigen Ringanode umgeben.

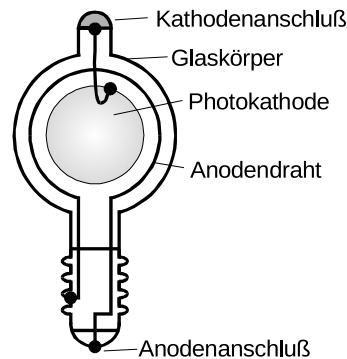


Abbildung 2: Schematische Darstellung der verwendeten Photozelle.

Zur Erzeugung von monochromatischer Strahlung verschiedener Frequenzen dient eine Spektrallampe. Das Licht wird durch die Kondensorlinse gebündelt, die Abbildungslinse wirft ein Bild der Spaltblende auf den Eintrittsspalt. Ein Geradsichtprisma sorgt für die notwendige räumliche Trennung der für den jeweiligen Übergang spezifisch emittierten Spektrallinien, ohne dass die optische Achse verschoben wird. Je nach eingestelltem Winkel des Schwenkarms trifft so eine andere Lichtfarbe auf die Photokathode. Die hier beschriebene Funktionsweise kann in Abbildung 3 nachvollzogen werden.

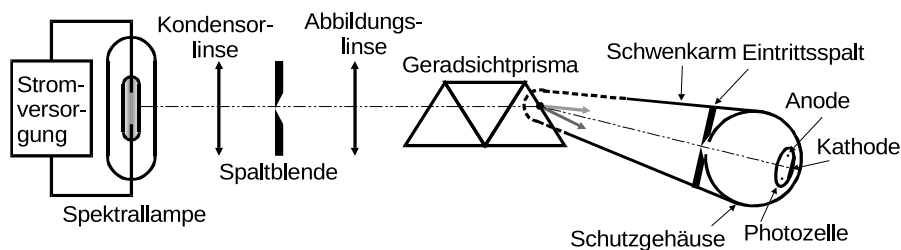


Abbildung 3: Optischer Teil des Versuchsaufbaus.

Der Aufbau ist so zu justieren, dass in der Ebene der Spaltblende ein Bild entsprechend dessen Breite entsteht. Mit den Parametern Brennweite f , Gegenstandsweite g , Bildweite b , Gegenstandsgröße G und Bildgröße B können die Beziehungen für dünne Linsen

$$f = \frac{bg}{b+g} \qquad \frac{G}{B} = \frac{g}{b} \qquad (2)$$

genutzt werden, um die Einstellung rechnerisch vorzubereiten.

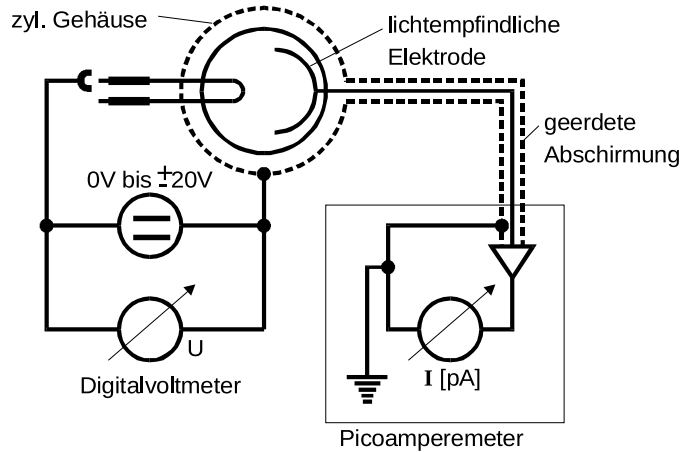


Abbildung 4: Elektrisches Schaltbild der Messapparatur.

Zur Messung der Energien wird mit der Schaltung in Abbildung 4 die Gegenfeldmethode umgesetzt. Zur Abschirmung möglicher Störfelder werden für die Zuleitungen geerdete Koaxialkabel verwendet. Mit e_0 und m_0 sind die Naturkonstanten Elementarladung und Ruhemasse des Elektrons bezeichnet. Es erreichen nur solche Ladungsträger die Anode, deren kinetische Energie größer als die Feldenergie ist. Bei

$$e_0 U_g = \frac{1}{2} m_0 v_0^2 \quad (3)$$

verschwindet also der Photostrom, entsprechend lässt sich aus der Gegenspannung U_g die Energie der schnellsten Elektronen mit maximaler Geschwindigkeit v_0 bestimmen. Wird dies in die vorherige Beziehung der Frequenzabhängigkeit eingesetzt, ergibt sich

$$h\nu = e_0 U_g + A_k \quad (4)$$

als Energiebilanz. Die Messung wird weiter erschwert, da der Strom bei U_g nicht diskret auf Null abfällt, sondern bereits zuvor wie in Abbildung 5 deutlich sinkt.

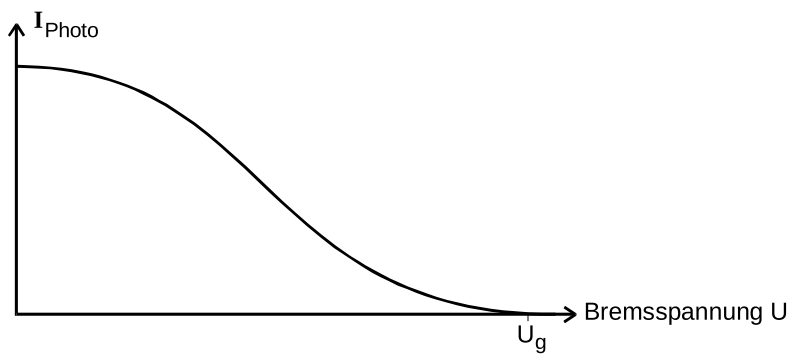


Abbildung 5: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung.

Begründen lässt sich dieses Phänomen damit, dass die Energieverteilung der Elektronen im Festkörper bereits einer kontinuierlichen Fermi-Dirac-Statistik folgt. Diese besagt, dass sowohl für Leitungselektronen als auch Valenzelektronen alle kinetischen Energien zwischen Null und der Fermi-Energie ζ vorkommen. Durch thermische Effekte treten zudem noch Ausreißer mit weit höheren Energien auf. Für die vorliegende Apparatur kann zwischen Photostrom I und Bremsspannung U mit

$$I \sim U^2 \quad (5)$$

ein parabolischer Zusammenhang angenommen werden.

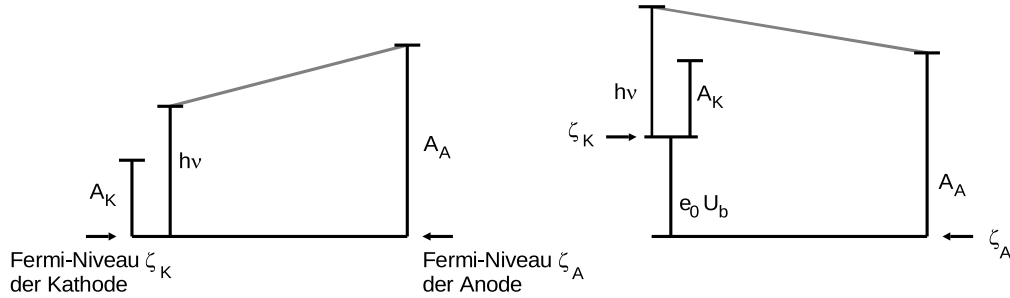


Abbildung 6: Potentialverhältnisse zwischen Anode und Kathode.

Ein zusätzliches Problem tritt auf, falls zwischen den Austrittsarbeiten der Kathode A_k und der Anode A_a ein Verhältnis $A_k \ll A_a$ herrscht. Dann gibt es für $A_k < h\nu < A_a$ kinetische Energien, bei denen zwar Elektronen gelöst werden, diese aber nicht die Anode erreichen. Ein solcher Fall ist links in Abbildung 6 dargestellt. Um trotzdem geringere Frequenzen untersuchen zu können, wird eine Beschleunigungsspannung U_b mit

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_a \quad (6)$$

angelegt, sodass das Potential eine Gestalt wie rechts in Abbildung 6 annimmt. Zuletzt ist noch zu beachten, dass für große Bremsspannungen ein negativer Strom auftreten kann, welcher den eintreffenden Strom überlagert und die Messwerte verfälscht.

3 Durchführung

Für den Versuch fungiert nun eine Spektrallampe mit Quecksilberdampf als Lichtquelle, alle übrigen Streulichteinflüsse werden abgeschirmt. Zur Untersuchung der verschiedenen auftretenden Lichtfarben wird die Photozelle entsprechend der jeweiligen Spektrallinie ausgerichtet und die Bremsspannung monoton so eingeregelt, dass der Photostrom verschwindet. In Abhängigkeit der Spannung am Voltmeter wird bei jedem Schritt der Strom am Picoamperemeter abgelesen und notiert. Gegebenenfalls verbessert das Anlegen einer kleinen Beschleunigungsspannung die Messung bei geringen Frequenzen. Weiter wird anhand einer Messung für gelbes Licht bei $\lambda = 578 \text{ nm}$ mit beschleunigenden und verzögernden Spannungen zwischen -20 V und 20 V sowie einer konstanten Intensität die Funktion der Photozelle betrachtet.

4 Auswertung

5 Diskussion

Literatur

- [1] *Anleitung zu Versuch 500, Der Photoeffekt.* TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.

Anhang