

In diesem Versuch wird die Energie von Elektronen untersucht, die von Licht aus Metallen ausgelöst werden. Die Beobachtungen führen zum Photonenmodell für Licht. Weiterhin wird das Planck'sche Wirkungsquantum aus den Messergebnissen bestimmt.

## 1. Theoretische Grundlagen

### 1.1 Der Fotoeffekt als Widerspruch zur klassischen Physik

Im Jahr 1888 wurde von W. Hallwachs beobachtet, dass bei der Bestrahlung von Metalloberflächen mit Licht eine Elektronenemission auftritt, wenn die Frequenz des Lichts eine bestimmte Grenzfrequenz überschreitet. Dieser Prozess wird als Fotoeffekt bezeichnet, die ausgelösten Elektronen als Fotoelektronen. Unterhalb der materialspezifischen Grenzfrequenz  $f_{\text{grenz}}$  werden auch bei noch so hoher Lichtintensität keine Fotoelektronen mehr beobachtet.

Nach der klassischen Wellentheorie des Lichtes werden die freien Elektronen im Metall durch das elektrische Feld der Lichtwelle beschleunigt. Die Energie des Elektrons sollte mit der Feldstärke und damit mit der Intensität der Lichtwelle wachsen. Bei genügend hoher Lichtintensität sollte es folglich möglich sein, unabhängig von der Lichtfrequenz aus jedem Metall Elektronen auszulösen. Die Existenz einer Grenzfrequenz ist mit dem klassischen Wellenmodell des Lichts also nicht zu erklären.

Erst im Jahre 1905 wurde der Fotoeffekt durch Einstein mit der Annahme von Lichtquanten (*Photonen*) der Energie

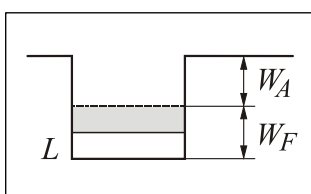
$$E_{\text{Phot}} = h \cdot f \quad h: \text{Planck'sches Wirkungsquantum} \quad (1)$$

erklärt. Jedes Elektron hat die Energie eines Photons aufgenommen. Den die Austrittsarbeit aus dem Metall übersteigenden Energiebetrag erhält das Elektron als kinetische Energie. Unterhalb der Grenzfrequenz reicht die Energie der Photonen nicht aus, um die Austrittsarbeit aufzubringen.

Für ein tieferes Verständnis der Vorgänge beim Fotoeffekt muss man zunächst die Energieverteilung der Elektronen in einem Metall betrachten.

### 1.2 Elektronen im Metall

Der Stromtransport in Metallen wird durch frei bewegliche Leitungselektronen getragen. Allerdings können diese Elektronen dabei nicht jeden Energiewert annehmen. Es gibt Bereiche verbotener und Bereiche erlaubter Energie. Dies führt auf das **Bändermodell**. Dieses Bändermodell für die Energie der



**Bild 1:** Leitungselektronen im Potentialtopf

Elektronen eines Festkörpers spielt eine wesentliche Rolle zur Erklärung der Vorgänge in Halbleitern. Während bei Halbleitern das Leitungsband nur durch wenige Elektronen thermisch besetzt ist, hat man bei metallischen Leitern auch bei Temperaturen  $T \approx 0$  K eine Besetzung des Leitungsbandes. Das oberste Energieniveau des Leitungsbandes, das im Grundzustand ( $T=0$  K) besetzt ist, heißt Fermi-Niveau. Die Vorgänge beim Fotoeffekt betreffen nur Elektronen aus dem Leitungsband  $L$ . Da sie im Kristall frei beweglich sind, kann man das Metall vereinfachend durch einen rechteckigen

Potentialtopf beschreiben, der bis zum Fermi-Niveau mit Elektronen gefüllt ist. Zur Entfernung eines Elektrons aus dem Potentialtopf muss mindestens die Austrittsarbeit  $W_A$  aufgebracht werden.

Monochromatisches Licht, das auf die Metalloberfläche trifft, kann aus allen Niveaus des Leitungsbands Elektronen auslösen, sofern die Photonen genügend Energie besitzen. Die Photoelektronen besitzen folglich eine Energieverteilung, die außer von der Frequenz des Lichts auch von der Dichte der Energiezustände im Band und der Besetzungswahrscheinlichkeit der Zustände abhängt.

Die maximale kinetische Energie besitzen Elektronen, die vom obersten besetzten Niveau ausgelöst werden. Bei der Temperatur  $T=0$  K ist dies das Fermi-Niveau  $W_F$ . Für Temperaturen  $T > 0$  K besetzen einige wenige Elektronen auch Energieniveaus mit  $W > W_F$ . Dabei gilt:

$$W - W_F < k \cdot T \quad k: \text{ Boltzmann-Konstante} \quad (2)$$

Bei Zimmertemperatur ist  $k \cdot T \approx 0,025$  eV und damit in der Regel gegen die Austrittsarbeit vernachlässigbar.

Metall	$W_A/\text{eV}$
Cs	1,94
K	2,25
Na	2,28
Si	3,59
Al	4,20
Zn	4,27
Cu	4,48
Ag	4,70

**Tabelle 1:** Austrittsarbeiten unterschiedlicher Metalle

### 1.3 Die Messmethode

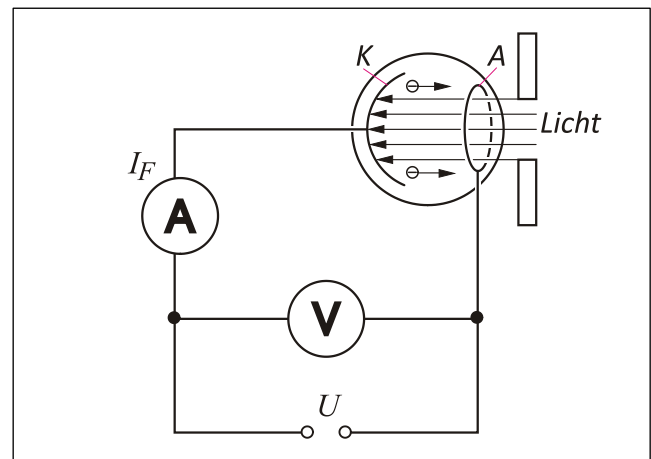
Für die kinetische Energie der Elektronen, die aus dem Fermi-Niveau ausgelöst werden, gilt

$$W_{kin} = h \cdot f - W_A \quad (3)$$

Wenn man die kinetische Energie  $W_{kin}$  der Photoelektronen aus dem Fermi-Niveau in Abhängigkeit von der Lichtfrequenz  $f$  misst, so erhält man nach Gleichung (3) bei der graphischen Darstellung eine Gerade mit der Steigung  $h$ .

Zur Messung von  $W_{kin}$  dient der in **Bild 2** dargestellte Versuchsaufbau. In einer Vakuum-Fotozelle trifft monochromatisches Licht auf die Fotokathode  $K$ . Es löst dort aus der Metalloberfläche Elektronen aus, die in alle Richtungen von der Kathode wegfliegen. Ein Teil dieser Photoelektronen trifft auf eine Anode  $A$  und kann dann als Fotostrom  $I_F$  nachgewiesen werden.

Da die ausgelösten Elektronen aus verschiedenen Energieniveaus des Leitungsbandes stammen, haben sie unterschiedliche kinetische Energie. Wird nun eine „Bremsspannung“  $U$  zwischen Anode und Kathode gelegt (Anode negativ gegenüber der Kathode), so erreichen nur noch solche Photoelektronen die Anode, deren kinetische Energie anfangs mindestens  $e \cdot U$  beträgt. Alle anderen Elektronen kehren schon vor der Anode um.



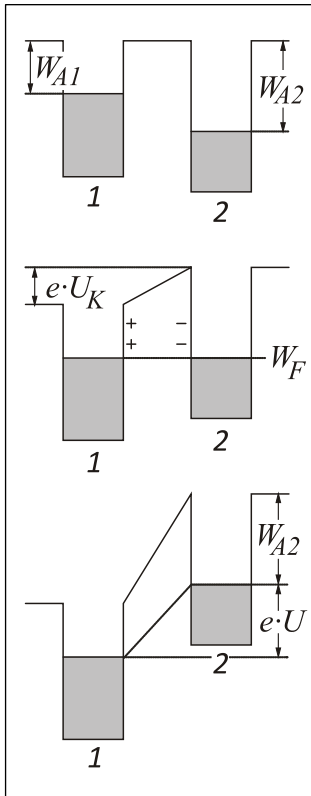
**Bild 2:** Prinzipaufbau des Versuches

Bei Vergrößerung von  $U$  erreichen immer weniger Elektronen die Anode, und der Fotostrom sinkt. Wird die Spannung bis zu dem Wert  $U_0$  erhöht, bei dem der Fotostrom gerade verschwindet, so kehren auch die Elektronen aus dem Fermi-Niveau unmittelbar an der Anode um.

Die anfängliche kinetische Energie dieser Elektronen ist dann

$$W_{kin} = e \cdot U_0 \quad (4)$$

### 1.4 Zur Messung der Austrittsarbeit



**Bild 3:** Energieverhältnisse bei zwei Metallen mit verschiedener Austrittsarbeit

Wird die kinetische Energie  $e \cdot U_0$  über der Frequenz des eingestrahlt Lichts abgetragen, so kann nach (3) aus dem Ordinatenabschnitt die Austrittsarbeit  $W_A$  bestimmt werden. Es handelt sich jedoch dabei nicht, wie man zunächst vielleicht vermutet, um die Austrittsarbeit aus der Kathode. Werden zwei Metalle mit unterschiedlicher Austrittsarbeit (**Bild 3 oben**) elektrisch leitend miteinander verbunden, so fließen solange Elektronen von dem Metall mit geringerer Austrittsarbeit zu dem anderen Metall, bis die höchsten besetzten Energieniveaus auf gleicher Höhe liegen (**Bild 3 Mitte**). Das erste Metall wird dadurch positiv, das zweite negativ geladen und zwischen beiden entsteht eine Potentialdifferenz (*Kontaktspannung*  $U_K$ ).

Im beschriebenen Experiment ist 1 die Kathode, 2 die Anode. Beim Anlegen der Bremsspannung zwischen Anode und Kathode werden die Energien der Elektronen in der Anode relativ zur Kathode um  $e \cdot U$  nach oben verschoben (**Bild 3 unten**).

Um nun Elektronen von der Kathode zur Anode zu bringen, muss zunächst ein Potentialberg der Höhe  $e \cdot U + W_{A,2}$  überwunden werden. Wird die notwendige Energie von je einem Photon aufgebracht, so verschwindet der Fotostrom, wenn gerade gilt

$$e \cdot U = h \cdot f - W_{A,2} \quad (5)$$

Dabei ist  $W_{A,2}$  die Austrittsarbeit aus der Anode, wobei der Messwert abhängig ist von der konkreten Anordnung (*Oberflächenbeschaffenheit*).

**Hinweis:** Man erhält also eine Gerade mit der Steigung  $h/e$ , wenn man die gemessene Spannung  $U_0$  über der Frequenz  $f$  des verwendeten Lichts aufträgt. Ist  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$  bekannt, so kann aus der Geradensteigung  $h$  bestimmt werden.

## 2. Versuch

### 2.1 Vorbetrachtung

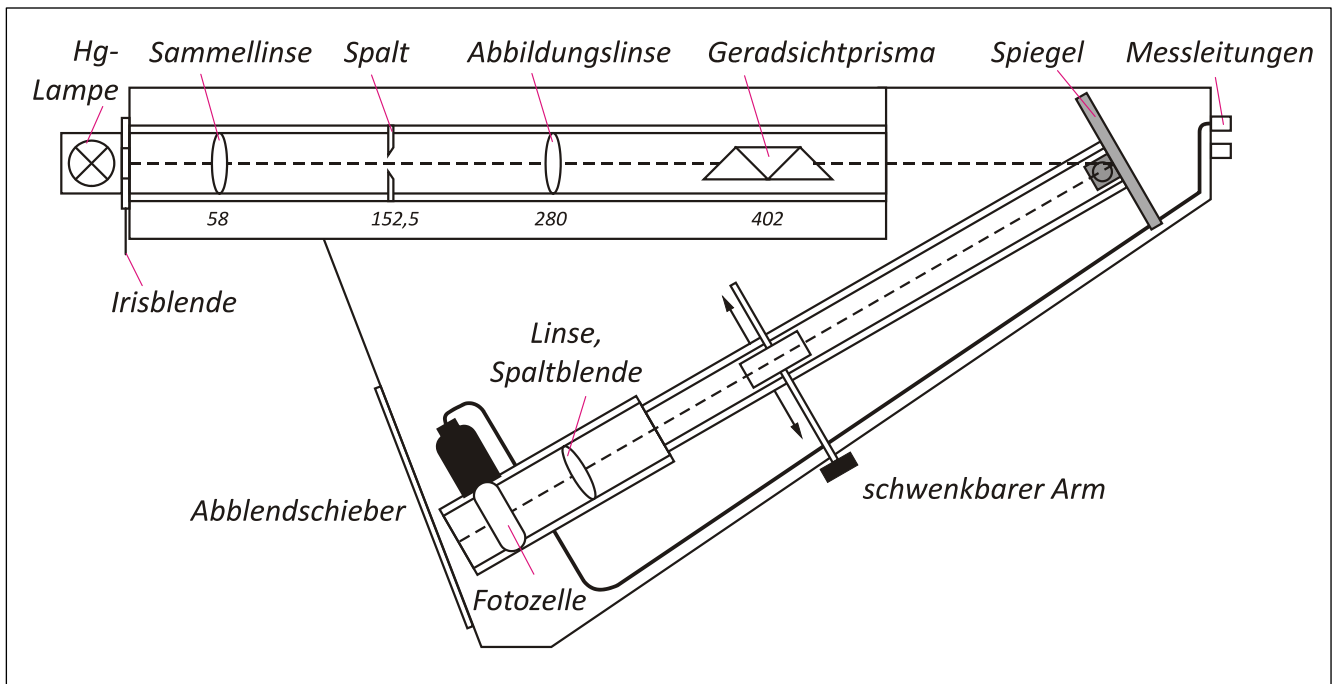
**Aufgabe:** Bestimmen Sie die Energien (in eV) der Photonen aus den Frequenzen  $f$  bzw. den Wellenlängen  $\lambda$  des violetten, blauen, blaugrünen, grünen, gelben und roten Lichtes (Siehe **Tabelle 2**). (Planck'sches Wirkungsquantum  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ; Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

## 2.2 Versuchsdurchführung

### 2.2.1 Verwendete Geräte

Quecksilber-Hochdrucklampe mit Versorgungsgerät, Kompaktanordnung mit Geradsichtprisma, Irisblende, Linsen, Fotozelle; Messverstärker mit Anzeigeelement, Vielfachmessgerät, Mehrgangpotentiometer, Batterieblock zur Gegenspannungserzeugung

### 2.2.2 Versuchshinweise

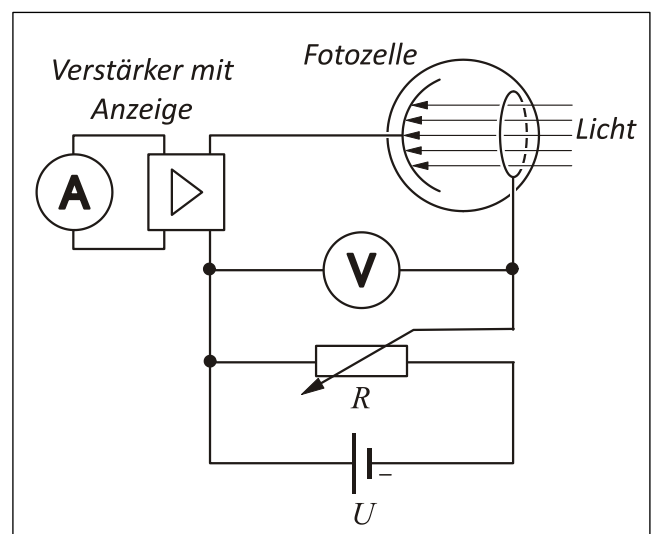


**Bild 4:** Kompaktanordnung

Kontrollieren Sie die optische Justage entsprechend der am Praktikumsplatz befindlichen Anleitung. Informieren Sie das Laborpersonal bei sichtbarer Verstellung!

**Aufgabe 1:** Abhängigkeit des Fotostromes von der angelegten Gegenspannung für monochromatisches Licht und für verschiedene Lichtintensitäten

- Kontrollieren Sie alle elektrischen Verbindungen entsprechend **Bild 5**.
- Verdunkeln Sie die Kompaktanordnung so, dass Sie die Spektrallinien im Inneren des Austrittsfensters noch erkennen können. Die Spaltblende der Linse besitzt einen Markierungsstift, dessen Schatten im Austrittsfenster (*innen*) sichtbar ist. Stellen Sie diesen Schatten auf den blauen Lichtstreifen mit Hilfe der Stellenschraube am schwenkbaren Arm.
- Schließen Sie die Abdeckung.
- Schalten Sie den Batterieblock zu.



**Bild 5:** Elektrische Schaltung des Versuchsaufbaues

- Variieren Sie die Bremsspannung  $U_0$  mit dem Wendepotentiometer  $R$  im Bereich von **0** bis **1,5V** in **0,1V-Schritten** und lesen Sie den dazugehörigen Fotostrom  $I_F$  ab.
- Schließen Sie die Irisblende (*siehe Bild 4*) soweit, dass sich der Anfangswert des Fotostromes  $I_F$  von dem der ersten Messreihe um **ca.  $\frac{1}{3}$**  unterscheidet und wiederholen Sie die Messung.
- Verändern Sie die Irisblende nochmals so, dass sich der Wert des Fotostromes  $I_F$  **um weitere  $\frac{1}{3}$**  von der ersten Messreihe unterscheidet und wiederholen Sie die Messung.

### Aufgabe 2: Abhängigkeit der Elektronenenergie von der Frequenz des eingestrahlten Lichts

- Ermitteln Sie die Bremsspannung  $U_0$  für violettes Licht.
- Dazu sind folgende Schritte nötig:
- Stellen Sie den Schwenkarm mittels Gewindeführung so ein, dass der Schatten des Markierungstiftes genau auf der violetten Spektrallinie liegt. Gegebenenfalls muss der Spiegel verstellt werden.
- Schließen Sie die Abdeckung.
- Stellen Sie mit dem Wendepotentiometer die Spannung der Fozelle auf  $U = 0$  ein und messen Sie den Fotostrom  $I_F$  (**Empfindlichkeit evtl. auf  $10^{-9}A$  stellen**).
- Erhöhen Sie dann die Spannung  $U$  so lange mit Wendepotentiometer, bis der Fotostrom  $I_F = 0$  wird (bis zur **Empfindlichkeit  $10^{-11}A$** ). Lesen Sie nun die Bremsspannung  $U_0$  ab.

#### Hinweis:

*Sollte für  $U$  größer  $U_0$  ein (starker) Gegenstrom fließen, so informieren Sie den Versuchsleiter!*

- Wiederholen Sie die Messung für die **blaue, blaugrüne, grüne** und **gelbe** Spektrallinie. Wechseln Sie die Spektralfarben durch Verstellen des schwenkbaren Armes.

*Eine mögliche Fehlerquelle bei dem Experiment ist ein Belag der Anode mit Kalium oder Restgasatomen. Dadurch wird die Austrittsarbeit aus der Anode herabgesetzt und es kommt zu einem Fotostrom in die entgegengesetzte Richtung, der das Messergebnis verfälscht. Dieser Effekt kann durch ein kurzes Ausheizen der Anode verringert werden. Dazu wird der Anodenring an einen Stelltransformator angeschlossen und für etwa 15 Sekunden zu schwacher Rotglut gebracht (Transformatorspannung vorsichtig einstellen!). **Laborpersonal verständigen!***

## 2.3 Versuchsauswertung

**Aufgabe 1:** Abhängigkeit des Fotostromes von der angelegten Gegenspannung für monochromatisches Licht und für verschiedene Lichtintensitäten

- Stellen Sie die Ergebnisse der 3 Messreihen in einem Diagramm  $I_F = f(U_0)$  graphisch dar.
- Welche Schlussfolgerungen ziehen Sie aus den Funktionsverläufen? Interpretieren Sie das Ergebnis.

**Aufgabe 2:** Abhängigkeit der Elektronenenergie von der Frequenz des eingestrahlten Lichts

- Stellen Sie die Abhängigkeiten  $I_F = f(f)$  (Säulendiagramm) graphisch dar.
- Stellen Sie die Abhängigkeiten  $U_0 = f(f)$  graphisch dar und führen Sie eine lineare Regression durch.

Bei vorhandenen Kenntnissen kann die Messunsicherheit auch unter Verwendung der Daten aus der linearen Regression bestimmt werden (**Abschnitt 4.3** „Einführung in das Physikalische Praktikum“)

- Bestimmen Sie das Planck'sche Wirkungsquantum (siehe Gleichung (5)) einschließlich der Messunsicherheit aus dem Anstieg dieser linearen Regression.
- Diskutieren Sie die Diagrammaussagen
- Bestimmen Sie die Austrittsarbeit  $W_A$  aus dem  $x_0$ -Wert ( $y = m \cdot x + x_0$ ) der Regressionsgleichung des Diagramms  $U_0 = f(f)$ .

Farbe	rot	gelb	grün	blaugrün	blau	violett
Frequenz $f$ in $\times 10^{14} \text{ s}^{-1}$	4,28	5,17	5,77	6,00	6,88	7,31

**Tabelle 2:** Zusammenhang Farbe – Frequenz

### 3. Ergänzung

- Was versteht man unter dem Dualismus-Charakter von Licht?
- Welchen Einfluss auf das Messergebnis haben die Temperatur der Kathode und der endliche Innenwiderstand des Messverstärkers?